



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Étude hydraulique et hydrogéologique du bassin versant de la Retrève. 4 : Hydrologie

Rapport final

BRGM/RP-71960-FR

Version 0 du 24 juin 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

Bessiere H., Gutierrez A., Noury G., Braibant G.

Vérificateur :

Nom : SALQUEBRE D.

Fonction : Directeur régional délégué

Date : 24/06/2022

Signature :

Approbateur :

Nom : SAADA A.

Fonction : Directeur Régional CVL

Date : 24/06/2022

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés : Hydrologie ; Inondation ; Karst ; Beauce, Retrève.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Bessiere H., Gutierrez A., Noury G., Braibant G. (2022) – Étude hydraulique et hydrogéologique du bassin versant de la Retrève. 4 : Hydrologie. Rapport final V0. BRGM/RP-71960-FR, 125 p., 63 fig., 22 tabl., 2 ann.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-20/01/2022

Synthèse

L'étude hydraulique et hydrogéologique du bassin versant de la Retrève confiée au BRGM et au CEREMA vise la compréhension des phénomènes qui ont provoqué la crue de Mai 2016 afin d'être en mesure de la simuler, puis de simuler d'autres types de crues de période de retour critique pour les infrastructures existantes et envisager des scénarios d'aménagements.

Le rôle du BRGM est de décrire les fonctionnements hydrologiques et déterminer les débits de la Retrève à la sortie de la forêt d'Orléans (principalement), à l'origine des inondations des villes de Cercottes et Gidy notamment. Après avoir étudié l'importance des gouffres (Tâche 1), le caractère ruisselant des sols (Tâche 2), le rôle discret des eaux souterraines (Tâche 3), ce rapport aborde les écoulements superficiels (Tâche 4).

Les écoulements en forêt d'Orléans sont complexes. Les grandes crues connues ne se corrélaient pas directement avec les précipitations. Elles ont par ailleurs été fortement réduites en fréquence à la suite des aménagements du bassin de la Retrève dans les années 70, excepté en 1983 et 2016. L'une des raisons de cette diminution du risque d'inondation est l'aménagement des gouffres qui tamponnent les crues et ont une capacité d'absorption d'au moins 2,7 m³/s (Retrève amont et ruisseau du Renard cumulé). Toutefois, d'une part il est à noter que le fond des gouffres peut se colmater avec le temps, et d'autre part les pertes associées sont relativement faibles par rapport aux crues provoquées par les pluies exceptionnelles telles que celles de 2016, dont l'occurrence est largement supérieure à la fréquence centennale.

Pour simuler la crue de 2016, les pluies de plusieurs stations et sources de données ont été comparées, les bassins ont été caractérisés en déterminant en particulier leurs coefficients de ruissellement et les temps de concentration. À défaut de données hydrométriques observées (il n'y a pas de station de mesure sur la Retrève), les débits de 2016 ont été reconstitués en utilisant un calcul simple (la méthode rationnelle et celle du Gradex) pour calculer le débit de pointe et une modélisation (avec le modèle Gardenia) pour représenter la dynamique de la crue. Après quelques tests de différents jeux de valeurs dans la plage des incertitudes des calculs, le débit de 22 m³/s a été retenu car il donne les meilleurs résultats avec le modèle du CEREMA¹. Ce calage a ensuite permis de proposer d'autres débits de projet.

Les jaugeages et suivis de niveau, réalisés en plusieurs emplacements, ont démontré l'intérêt et la faisabilité de disposer d'au moins une station de surveillance. Outre la production de données valorisables dans les calculs, elle pourrait être utilisée pour alerter la population en cas de crue soudaine et anticiper les inondations. Plusieurs sites sont proposés, et le gouffre d'Ambert constitue potentiellement un bon site, mais l'analyse nécessitera une réflexion plus poussée et quelques années de fonctionnement avant de pouvoir l'utiliser à des fins prédictives.

¹ Modèle présenté par le CEREMA dans un rapport distinct

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	11
1.2. DOMAINE D'ÉTUDE.....	11
1.3. PRINCIPE DE L'ÉTUDE	12
2. Caractéristiques des bassins versants étudiés	15
2.1. HYDROGÉOMORPHOLOGIE DES BASSINS VERSANTS ÉTUDIÉS.....	15
2.2. ANALYSE HISTORIQUE SUR LE BASSIN DE LA RETRÈVE	18
2.2.1. Analyse des crues historiques.....	18
2.2.2. Bref historique des travaux sur la Retrève	23
2.3. CAMPAGNES DE JAUGEAGE	25
2.4. ESTIMATION DES DÉBITS ABSORBÉS PAR LES GOUFFRES.....	29
2.4.1. Mesures réalisées en 2020-21	32
2.4.2. Analyse des anciennes données.....	38
2.4.3. Estimation du débit total	39
2.4.4. Estimation des incertitudes.....	41
2.5. CONCLUSION	43
3. Étude pluviométrique.....	45
3.1. TRAITEMENT DES DONNÉES.....	45
3.2. ESTIMATION DES QUANTILES DE PLUIE	48
3.2.1. Données de pluies au poste de Bricy	48
3.2.2. Données de pluies au poste de Loury	50
3.2.3. Données de pluies Safran moyennées sur le bassin de la Retrève aux Longs Domaines	52
3.2.4. Données de pluies Safran moyennées sur le bassin du Renard.....	54
3.2.5. Données de pluies Safran moyennées sur le bassin du Nan.....	56
3.2.6. Synthèse des quantiles de pluies calculés	58
4. Étude hydrologique.....	61
4.1. MÉTHODE D'ESTIMATION DES DÉBITS DE POINTE	61
4.1.1. Méthode rationnelle	61
4.1.2. Méthode du GRADEX	62
4.2. CALCUL DES DÉBITS DE PROJET	63
4.2.1. Calcul du temps de concentration des bassins	63
4.2.2. Calcul du coefficient de ruissellement	66
4.2.3. Estimation des débits de projet	70
4.3. ESTIMATION DE LA FORME DE L'HYDROGRAMME.....	73
4.3.1. Le modèle Gardénia	73
4.3.2. Les simulations réalisées avec Gardénia sur le bassin de la Retrève	74
4.3.3. Analyse des simulations et classification des débits de pointe journaliers.....	79
4.4. VALIDATION AVEC LE MODÈLE HYDRAULIQUE	82
4.4.1. Passage du débit journalier au débit instantané.....	83
5. Éléments pour la mise en place d'une station d'alerte sur la Retrève	87

5.1. INTRODUCTION	87
5.2. CHOIX DU SITE	89
5.2.1. Le gouffre d'Ambert.....	90
5.2.2. Le gouffre des Pas Ronds.....	91
5.2.3. Les fosses Guillaume.....	91
5.2.4. L'étang de la Retrève	93
5.2.5. Conclusion sur le choix des sites	97
5.3. CHOIX DES ÉQUIPEMENTS.....	98
5.4. CONCLUSION.....	99
6. Conclusion	101
7. Bibliographie	105

Liste des figures

Figure 1 : Bassins versants étudiés.....	12
Figure 2 : Schématisation de l'étude.....	12
Figure 3 : Bassins versants considérés dans cette étude et leur superficie (km ²).....	15
Figure 4 : Profil en long de la Retrève jusqu'aux Longs Domaines (cotes altimétrique et longitudinale en mètres).	17
Figure 5 : Profil en long du Renard jusqu'à la confluence avec la Retrève (cotes altimétrique et longitudinale en mètres).	17
Figure 6 : Profil en long du Nan jusqu'à sa confluence avec la Retrève (cotes altimétrique et longitudinale en mètres).	18
Figure 7 : Crues exceptionnelles et pluies journalières à Bricy.	20
Figure 8 : Crues exceptionnelles et pluies annuelles à Bricy.....	21
Figure 9 : Fréquence des crues à Gidy de 1920 à 2020.....	23
Figure 10 : Mesure à Ambert par la famille Peter-Borie.....	25
Figure 11 : Points de mesure du débit de la Retrève avec leurs sous-bassins, et zoom sur le bassin versant de l'étang de la Retrève.	26
Figure 12 : Jaugeage au micromoulinet à Grand Pont (Orfosses mouillées) – Point M1 le 01/02/2021.....	27
Figure 13 : Mesure du débit de la Retrève au courantomètre MF-Pro, à Ambert (M3bis), le 01/02/2021 (© BRGM).	27
Figure 14 : Les fosses Guillaume 2 en cours de remplissage – 03/02/2021.	29
Figure 15 : Illustration de l'effet de colmatage à l'entrée du conduit karstique en régime transitoire pendant une crue.	30
Figure 16 : Observations de niveau d'eau au fond du gouffre des Sans Ronces (Communication Silvain Yart) et coupe interprétative.....	31
Figure 17 : Mesures de débit au gouffre des Sans Ronces (Langlois, 1967).	32
Figure 18 : La perte des Fosses Guillaume 2 (en gris, à gauche, notre tube pour la prise de pression).	33
Figure 19 : Suivi de la crue de février 2021 au Ravin des grands gouffres (Gouffre d'Ambert)..	34

Figure 20 : Plan des Fosses Guillaume (Communication ONF)	35
Figure 21 : Suivi du débit au pont d'Ambert (station M2) entre le 11 et le 20 février 2021.	36
Figure 22 : Tentative de courbe de tarage en M2 et M3bis.....	37
Figure 23 : Estimation de l'absorption maximale des gouffres à partir des données historiques (principalement)	40
Figure 24 : Pluviométrie moyenne annuelle interannuelle sur 30 ans (1980-2010) - Grille Aurelhy Météo France et localisation des postes climatiques à proximité de la zone d'étude.....	45
Figure 25 : Grille et numéros de maille Safran sur les bassins versants étudiés.....	46
Figure 26 : Chroniques pluviométriques journalières et leurs moyennes sur la période 1972-2019 aux postes de Bricy (en bleu), de Loury (en gris) et sur la maille Safran du poste de Bricy et la moyenne des mailles Safran sur le bassin.	47
Figure 27 : Chroniques d'évapotranspiration potentielle au poste de Bricy et à la maille Safran correspondante.....	48
Figure 28 : Chroniques des maxima annuels des pluies au poste de Bricy (en haut) et nombre d'années (effectif) où le maximum mensuel pluviométrique est atteint pour chaque mois pour la station de Bricy (en bas).....	49
Figure 29 : Ajustement de Gumbel sur les pluies au poste de Bricy (cumuls journaliers de pluies en mm).....	50
Figure 30 : Méthode de Sen sur maxima annuels des données pluviométriques.....	51
Figure 31 : Test de tendance sur maxima annuels à la station Loury.....	51
Figure 32 : Chroniques des maxima annuels des pluies (en mm) Safran moyennées sur le bassin de la Retrève aux Longs Domaines (en haut) et le nombre d'années (effectif) où le maximum mensuel pluviométrique est atteint pour chaque mois (en bas).....	53
Figure 33 : Ajustement de Gumbel sur les pluies journalières moyennes des mailles Safran sur le bassin de la Retrève aux Longs Domaines.....	54
Figure 34 : Chroniques des maxima annuels des pluies Safran moyennées sur le bassin du Renard (en haut) et le nombre d'années (effectif) où le maximum mensuel pluviométrique est atteint pour chaque mois (en bas).....	55
Figure 35 : Ajustement de Gumbel sur les pluies journalières moyennes des mailles Safran sur le bassin du Renard.	56
Figure 36 : Chroniques des maxima annuels des pluies Safran moyennées sur le bassin du Nan (en haut) et le nombre d'années (effectif) où le maximum mensuel pluviométrique est atteint pour chaque mois (en bas).....	57
Figure 37 : Ajustement de Gumbel sur les pluies Safran moyennes sur le bassin du Nan.....	58
Figure 38 : Méthode d'estimation des débits centennaux par la méthode du GRADEX. Exemple pour un temps de concentration de 24 h.....	63
Figure 39 : Hydrogramme d'une crue et hétérogramme correspondant - Définition des principales caractéristiques.....	64
Figure 40 : Principales formules pour le calcul du temps de concentration.	65
Figure 41 : Carte de la lithologie de surface (rapport BRGM-RP-71266-FR) et transcription en 3 classes.	67
Figure 42 : Carte d'occupation du sol (Corinne Land Cover).....	67

Figure 43 : Schématisation du cycle de l'eau.	73
Figure 44 : Représentation du schéma de fonctionnement de Gardenia, modèle global à réservoirs.	74
Figure 45 : Différents points de jaugeages ayant servant aux essais de modélisation.....	75
Figure 46 : Résultats de la modélisation Gardenia à M1Bis, comparaison des débits simulés avec les points de jaugeages.....	76
Figure 47 : Simulation aux Longs Domaines à partir des résultats du calage Gardenia à M1Bis.	77
Figure 48 : Résultats de la modélisation Gardenia à M3Bis, comparaison des débits simulés avec les points de jaugeages.....	78
Figure 49 : Simulation aux Longs Domaines à partir des résultats du calage Gardenia à M3Bis.	78
Figure 50 : Chroniques des débits simulés aux Longs Domaines à partir du calage à M1Bis (courbe bleue) et quantiles de débits associés (traits discontinus bleus) et à M3Bis (courbe orange) et traits discontinus (orange).	79
Figure 51 : Crue de 2016 simulée à la Retrève aux Longs Domaines avec le logiciel Gardenia.	81
Figure 52 : Crue de janvier 1961 simulée à la Retrève aux Longs Domaines avec le logiciel Gardenia.	82
Figure 53 : Hyétogramme de pluie du 29 au 31 mai 2016 (Source: Sépia 2018).	84
Figure 54 : Simulations Gardenia aux Longs Domaines avec un facteur correctif supplémentaire de +25 % sur la pluie de Bricy à partir du calage à M1Bis pour la crue de référence de juin 2016.	85
Figure 55 : Simulations Gardenia aux Longs Domaines avec un facteur correctif supplémentaire de +32 % sur la pluie de Bricy à partir du calage à M3Bis pour la crue de référence de juin 2016.	86
Figure 56 : Les Pas Ronds.	91
Figure 57 : Les fosses Guillaume (archives de l'ONF – communication de Mr T.Wrobel).....	93
Figure 58 : L'étang de la Retrève (Archives de l'ONF. Communication de Mr. T. Wrobel).....	94
Figure 59 : L'étang de la Retrève à sec (23/07/2019).....	95
Figure 60 : Étang de la Retrève : bief amont.	95
Figure 61 : Vanne de l'étang de la Retrève : l'alimentation se fait en pied de structure. La vanne est bloquée en position semi-ouverte. Le tuyau avec col de cygne est la prise d'eau qui fonctionne en siphon et envoie l'eau dans le puits absorbant voisin.....	96
Figure 62 : Puits absorbant voisin de l'exutoire de l'étang.....	97
Figure 63 : Méthodologie du calcul des débits de projet.....	102

Liste des tableaux

Tableau 1 : Paramètres morphologiques des bassins étudiés.	16
Tableau 2 : Inventaire des crues historiques de la Retrève.	22

Tableau 3 : Liste des points de jaugeage (voir aussi l'Annexe 2).	26
Tableau 4 : Suivi de la crue de février 2021 et comparaison des méthodes (Jaugeage/flotteur).	28
Tableau 5 : Jaugeages réalisés lors de la crue du 8 février 2021.	32
Tableau 6 : Estimation des débits de vidange par l'analyse des décrues.	38
Tableau 7 : Débits maximaux d'absorption et volumes de quelques gouffres.	39
Tableau 8 : Valeurs d'absorption maximale des gouffres selon 3 hypothèses.	41
Tableau 9 : Valeurs d'absorption maximale des gouffres selon 3 hypothèses.	42
Tableau 10 : Cumuls des pluies journalières et intensité horaire le 30/05/2016 pour les différentes données disponibles.	47
Tableau 11 : Synthèse des quantiles humides de pluies estimés avec les ajustements de Gumbel.	59
Tableau 12 : Quantiles de pluies (12 h, 24 h et 48 h) calculés avec les coefficients de Montana.	59
Tableau 13 : Synthèse des quantiles de pluies estimés sur les intervalles à +/- 70 % et +/-95 % avec les ajustements de Gumbel.	60
Tableau 14 : Temps de concentration calculés pour les bassins étudiés.	65
Tableau 15 : Coefficients de ruissellement de chaque type de parcelle de l'occupation des sols Corine Land Cover.	68
Tableau 16 : Table de coefficients de ruissellement en fonction de la pente et de la texture du sol (source Montas <i>et al.</i> , 1990 et McNeely, 1982).	69
Tableau 17 : Coefficients de ruissellement moyen retenus pour la méthode rationnelle (pluie décennale).	70
Tableau 18 : Débits de pointe estimés à la Retrève aux longs Domaines avec intervalle de confiance à 95 % pour un ajustement de Gumbel sur la pluie au poste de Bricy en m ³ /s	71
Tableau 19 : Débits de pointe estimés à la Retrève aux longs Domaines avec intervalle de confiance à 70 % pour un ajustement de Gumbel sur la pluie au poste de Bricy en m ³ /s.	71
Tableau 20 : Débits de pointe estimés au Fossé du Renard en m ³ /s.	72
Tableau 21 : Classification des débits de pointe simulés aux Longs Domaines à partir du calage à M1bis (QT10 = 4,2 m ³ /s ; QT20 = 5,5 m ³ /s ; QT50 = 7,7 m ³ /s ; QT100 = 9,7 m ³ /s).	80
Tableau 22 : Classification des débits de pointe simulés aux Longs Domaines à partir du calage à M3Bis (QT10 = 3,4 m ³ /s ; QT20 = 4,6 m ³ /s ; QT50 = 6,5 m ³ /s ; QT100 = 8,2 m ³ /s).	80

Liste des annexes

Annexe 1 : Campagnes de jaugeages	107
Annexe 2 : Fiches de jaugeages	113

1. Introduction

1.1. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

À partir du 30 mai 2016 et pendant plus d'une semaine, les communes de l'agglomération d'Orléans et du nord d'Orléans ont vécu des inondations qui ont créé une situation de crise systémique suite à une série de pluies fortes et soutenues. Conformément aux recommandations du rapport du CGEDD n°01073501 (déc. 2016), l'étude hydraulique et hydrogéologique du bassin versant de la Retrève a pour principaux objectifs :

- d'approfondir la connaissance du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du bassin versant de la Retrève et compléter le recensement de l'ensemble des gouffres ;
- d'émettre des recommandations d'aménagement.

Le BRGM est en charge de la partie « connaissances », dont les 4 tâches principales préparent les données pour la modélisation hydraulique du bassin de la Retrève (Tâche 5) réalisée par le CEREMA. Le CEREMA est en charge de la partie « modélisation » dont découleront les principales recommandations.

Les trois premières tâches ont fait l'objet d'un rapport chacune :

1. Inventaire et analyse des indices karstiques BRGM/RP-71330-FR.
2. Cartographie de la lithologie de surface BRGM/RP-71266-FR.
3. Ecoulements souterrains BRGM/RP-71804-FR.

Le présent rapport correspond à la tâche 4 du projet et à la préparation des débits d'entrées du modèle du CEREMA. Il s'agit d'étudier les apports d'eau qui contribuent à alimenter la Retrève en période d'inondation.

1.2. DOMAINE D'ÉTUDE

Le domaine d'étude correspond au bassin versant hydrologique et hydrogéologique du cours d'eau temporaire de la Retrève en amont de Gidy (Figure 1), dans lequel s'individualisent :

- le BV Retrève « amont » (env. 90 km²) : cette zone correspond au secteur de la forêt d'Orléans, en amont de Cercottes. Elle constitue la principale zone d'étude, pour laquelle des investigations approfondies sont prévues. En accord avec le CEREMA, le sous-bassin est arbitrairement arrêté à la ferme des longs domaines, à la sortie de la forêt ;
- le sous bassin versant du fossé du Renard, qui s'étend principalement en forêt d'Orléans jusqu'aux fosses Guillaume (intersection de la voie ferrée) ;
- le BV Retrève «aval»: Il s'agit de la portion comprise entre Cercottes et Gidy, très aménagée (A10, RD2020, voie ferrée, Centre commercial, zone périurbaine); hors fossé du Renard.

En complément, le BV Nan (env. 325 km², également cours d'eau temporaire) se raccorde à celui de la Retrève en aval du domaine d'étude. Il s'agit d'intégrer ce secteur afin d'estimer de manière approchée les venues d'eau depuis le Nan à injecter dans le modèle hydraulique sur la Retrève (confluence au niveau de Bricy).

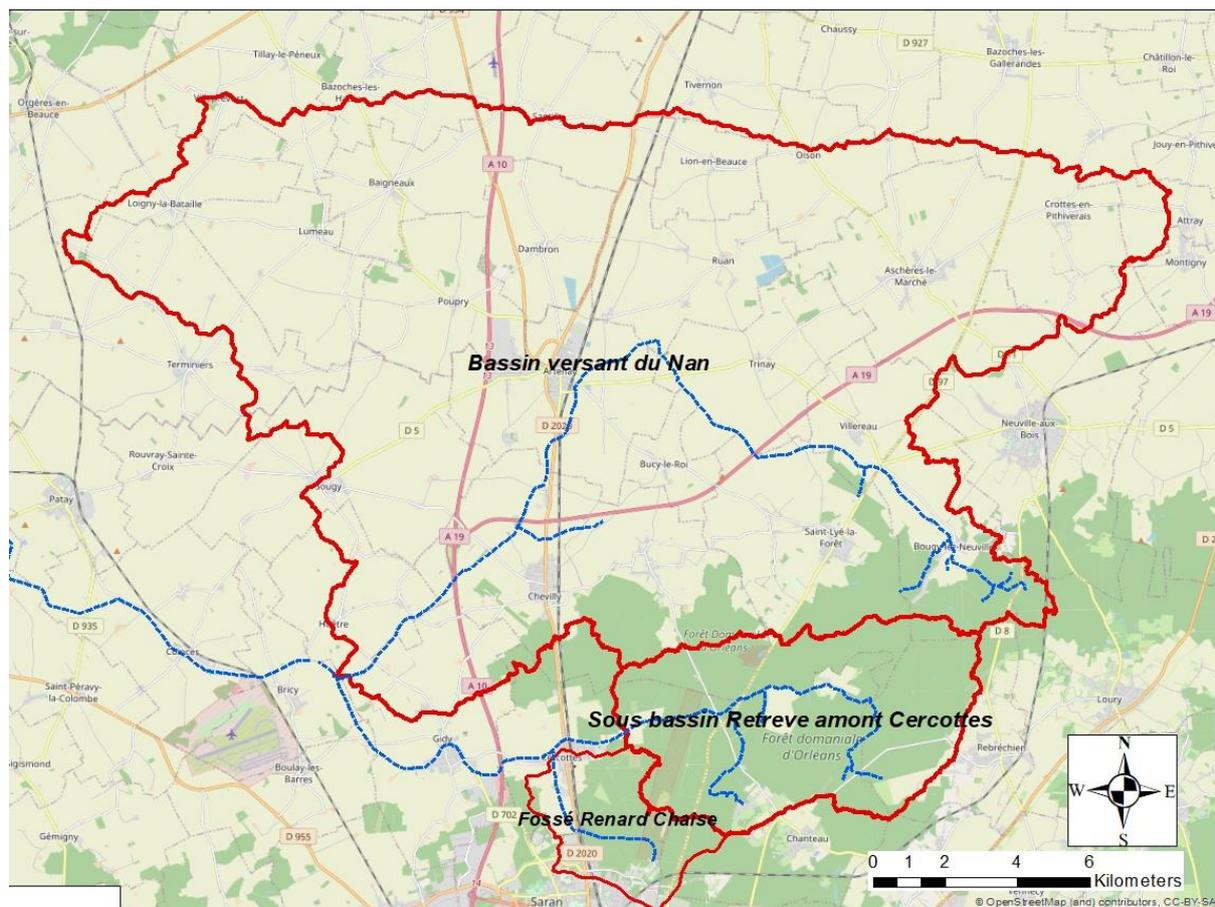


Figure 1 : Bassins versants étudiés.

1.3. PRINCIPE DE L'ÉTUDE

Afin de simuler les crues de la Retrève, le modèle hydraulique qui représente finement la topographie du lit du cours d'eau et les obstacles à l'écoulement, aura besoin d'une estimation des flux en divers points du modèle : à l'amont, mais aussi aux confluences avec les principaux affluents : le fossé du Renard et le Nan. Il incombe au BRGM de calculer ces flux (Figure 2).

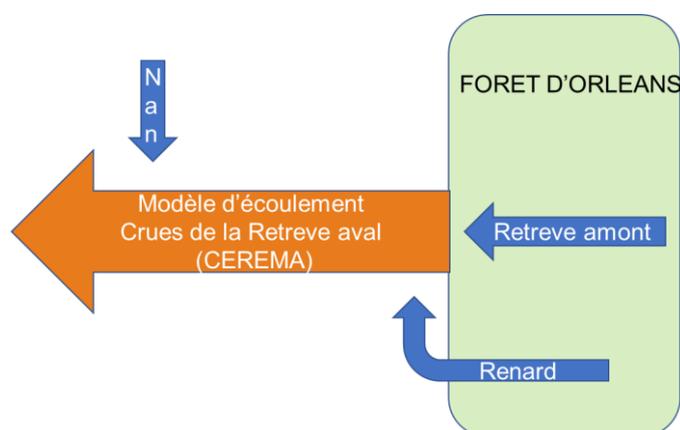


Figure 2 : Schématisation de l'étude.

Ces calculs nécessitent tout d'abord de définir les caractéristiques des bassins versants, réaliser des jaugeages, analyser les postes pluviométriques et la fréquence des précipitations avant d'aborder le calcul des débits.

Pour estimer les venues d'eau selon les différents sous-bassins versants, et estimer les débits de pointe en entrées (et sorties), il est envisagé deux approches :

- méthode rationnelle : elle permet d'estimer les apports d'eau par un calcul simple : surface BV x taux ruissellement x cumul pluie efficace². Le taux de ruissellement pourra être calé en fonction de données bibliographiques d'une part, et de la cartographie de la géologie de surface ;
- modélisation Gardenia (contribution des eaux souterraines) : sur la base des données piézométriques ou hydrométriques, elle devrait permettre d'apporter des éléments sur la contribution des apports d'eau souterraine issus du secteur de la forêt d'Orléans. L'application de cette méthode est assortie d'incertitudes, car elle dépend de données qui ne sont malheureusement pas disponible en quantité suffisante (pour l'instant) sur les bassins étudiés.

² Il est prévu une estimation pour l'évènement de mai-juin 2016 (calage), ainsi que pour 1 à 2 autre(s) période(s) de retour.

2. Caractéristiques des bassins versants étudiés

2.1. HYDROGÉOMORPHOLOGIE DES BASSINS VERSANTS ÉTUDIÉS

Afin de pouvoir mettre en relation les précipitations et les débits de la Retrève, il est nécessaire de délimiter les surfaces qui l'alimentent. Chaque bassin versant est ainsi défini par rapport à un exutoire fixé arbitrairement, généralement pris à la confluence entre deux cours d'eau ou à l'emplacement d'une station de jaugeage.

Pour les besoins de cette étude, trois bassins versants ont été considérés (Figure 3) :

- le bassin de la Retrève à l'amont de la ferme des Longs Domaines (Cercottes) ;
- le bassin du Renard à la confluence avec la Retrève ;
- le bassin du Nan à la confluence avec la Retrève.

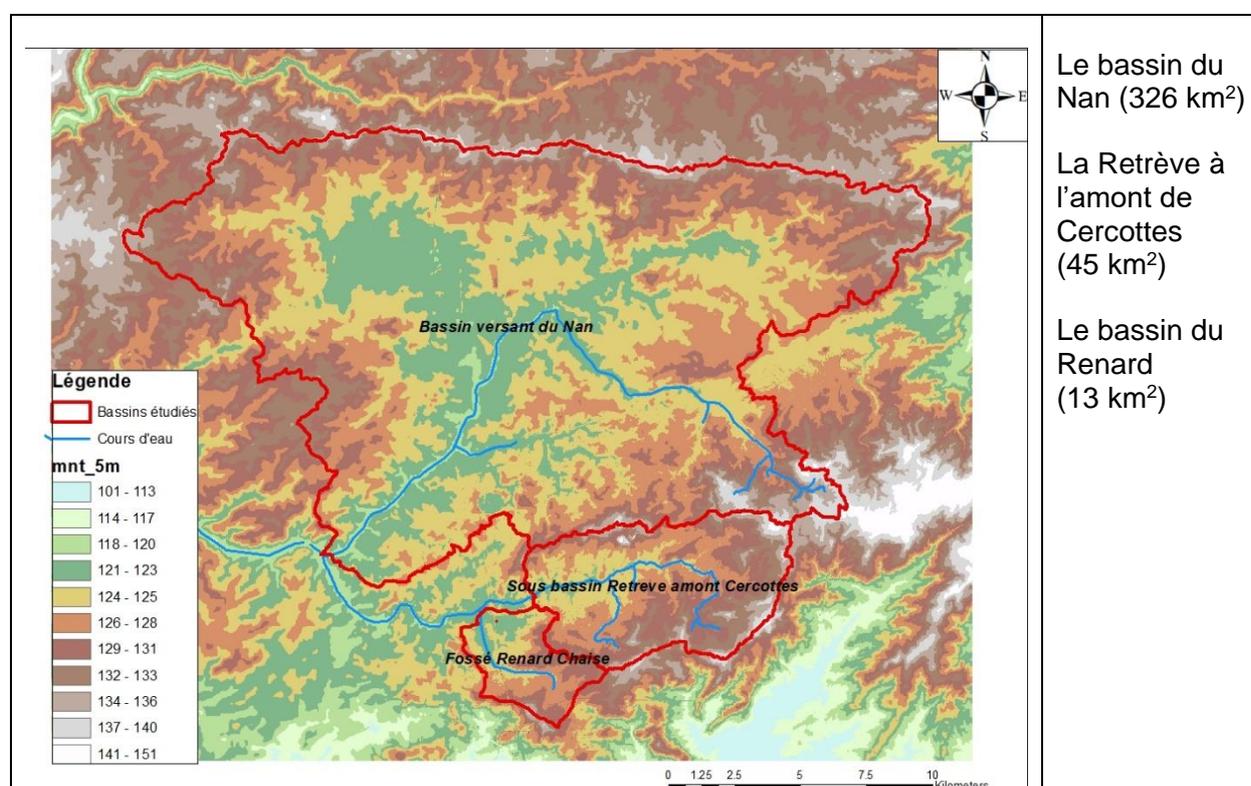


Figure 3 : Bassins versants considérés dans cette étude et leur superficie (km²).

Les paramètres morphologiques de ces bassins sont indiqués dans le Tableau 1. L'indice admis par les hydrologues pour caractériser la forme d'un bassin versant est l'indice de compacité de GRAVELIUS (K_c) qui est le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface. L'indice de compacité des trois bassins montre que Le Renard et la Retrève amont ont des caractéristiques similaires (K_c respectivement de 1,4 et 1,5), tandis que le Nan est un peu différent ($K_c = 1,9$). Le cours de ce dernier peut d'ailleurs être subdivisé en deux portions, l'une dirigée vers le nord-ouest, drainant (avec son affluent « le Petit Nan ») les sols de la forêt d'Orléans avant de traverser la Beauce jusqu'à Artenay, l'autre à travers la Beauce d'Artenay à la confluence avec la Retrève. Cette dernière portion est appelée le Nan sec.

Les bassins ont un drainage général est-ouest. Leur pente est très faible. Seule la partie amont présente un peu de relief, lié à la présence des formations géologiques des sables et argiles de Sologne (cf. Rapport Tâche 3). Les altitudes varient très peu dans les parties aval des bassins situées sur les formations des calcaires de Beauce (plus ou moins recouvertes de limons de plateau).

Sous bassin	périmètre (km)	superficie (km ²)	longueur thalweg (km)	altitude max (m)	altitude min (m)	pente moyenne	Indice de compacité
Nan	121.5	326.7	27.7	132	117	0.05 %	1.9
Retrève_amont	37.1	45.1	10.4	130.2	121.2	0.09 %	1.5
Renard	18.85	13.7	5.3	127	121	0.11 %	1.4

Tableau 1 : Paramètres morphologiques des bassins étudiés.

Les profils en long des cours d'eau temporaires (Figure 4 ; Figure 5 ; Figure 6) illustrent parfaitement ce phénomène avec des pentes plus importantes sur les parties situées en forêt d'Orléans. Tracés à partir des modèles numériques de terrain extrêmement précis, ces profils montrent également des approfondissements brusques et des pics. Les pics correspondent aux routes (souvent surélevées). Les dépressions dans le lit des cours d'eau sont liées à la présence des « gouffres » (cf. Rapport Tâche 1). Si les routes disposent d'ouvrages de franchissement (buses ou ponts) pour ne pas interrompre le cours, il n'en est pas de même des gouffres. Les profils montrent bien leur rôle sur les écoulements : **les gouffres font barrage à l'écoulement naturel et constituent des zones de pertes**, l'eau s'engouffrant avec plus ou moins de facilité.

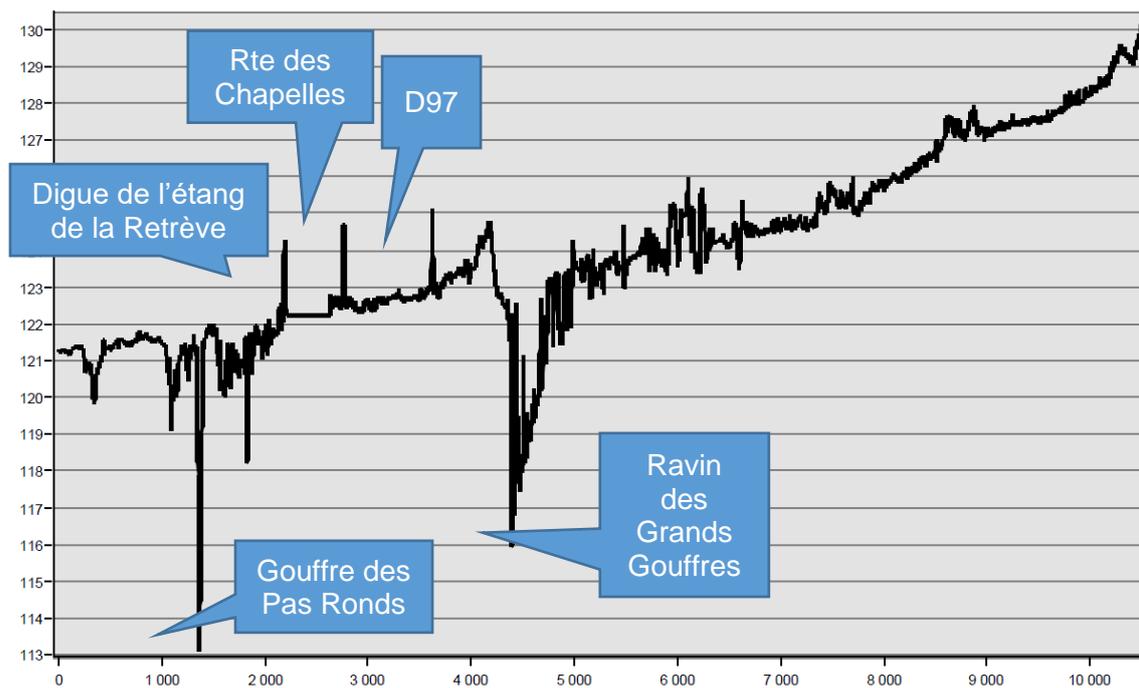


Figure 4 : Profil en long de la Retrève jusqu'aux Longs Domaines (cotes altimétrique et longitudinale en mètres).

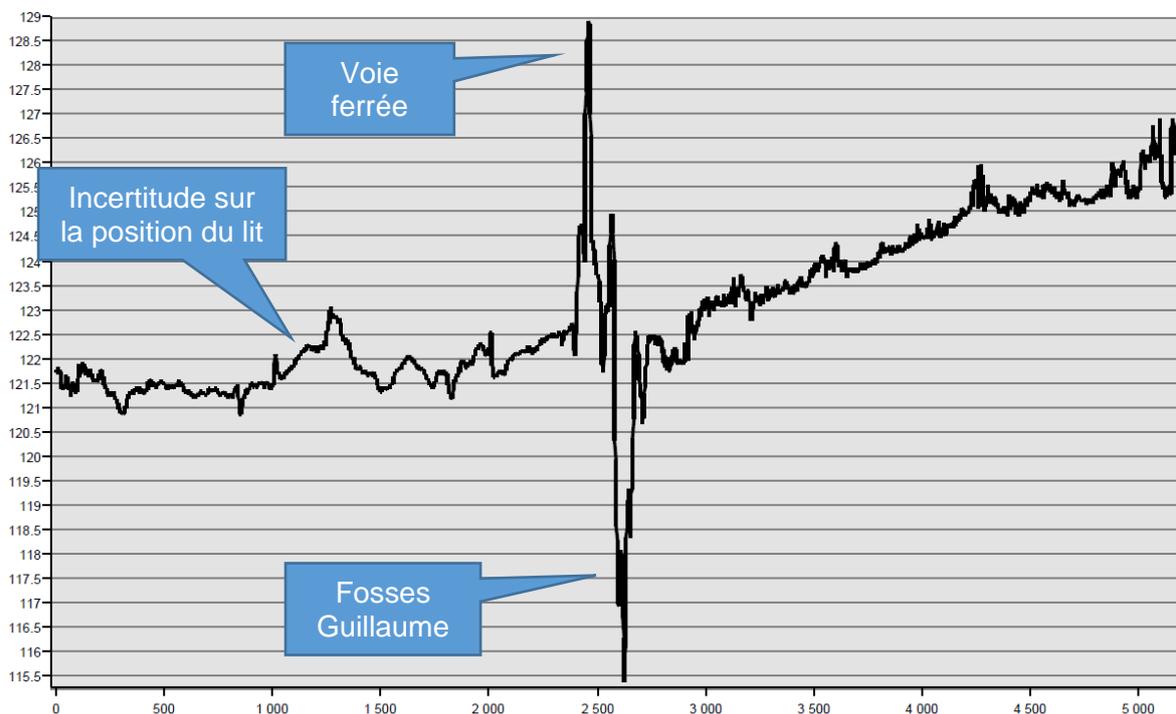


Figure 5 : Profil en long du Renard jusqu'à la confluence avec la Retrève (cotes altimétrique et longitudinale en mètres).

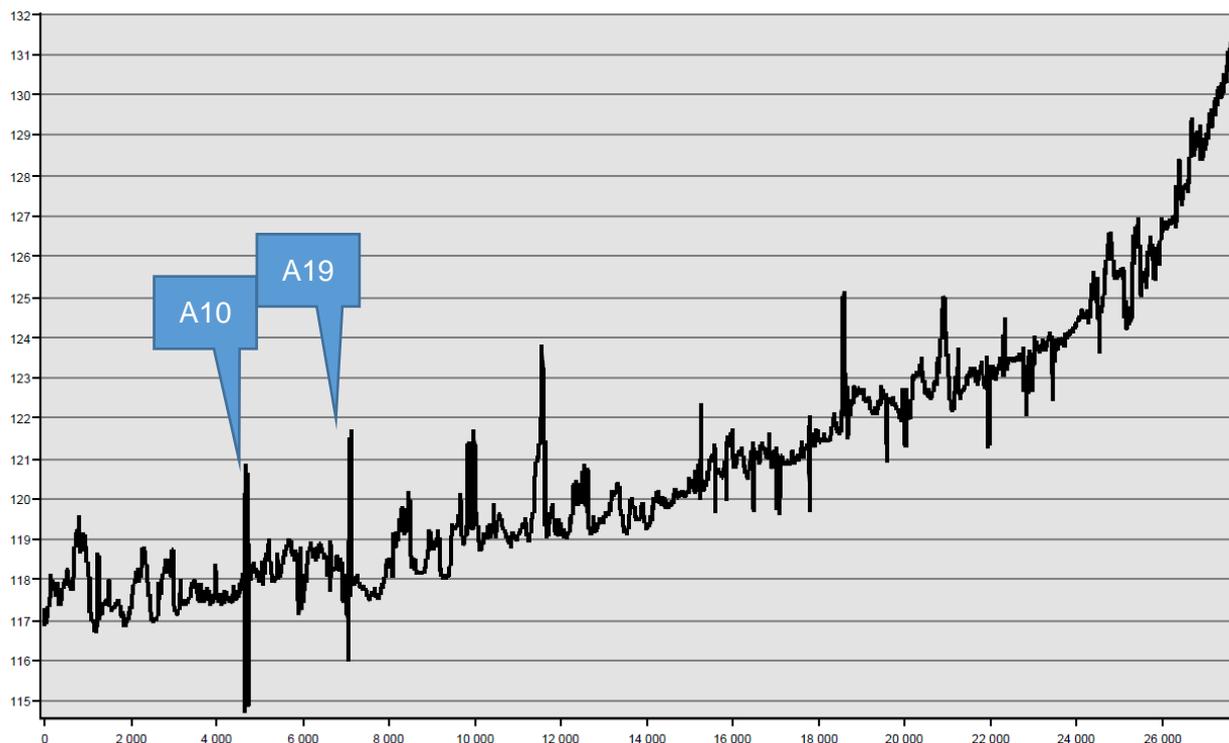


Figure 6 : Profil en long du Nan jusqu'à sa confluence avec la Retrève
(cotes altimétrique et longitudinale en mètres).

2.2. ANALYSE HISTORIQUE SUR LE BASSIN DE LA RETRÈVE

2.2.1. Analyse des crues historiques

Les informations concernant les crues historiques sont reprises par plusieurs documents. On citera en particulier l'étude hydrologique du Génie Rural (1969), l'excellente publication du Groupe Spéléologique Orléanais (GSO, 2002), ou encore le rapport de stage de Anne-Gaëlle Mothé (BRGM, 2018). Toutefois, la constitution d'une liste aussi complète que possible des crues exceptionnelles a nécessité un temps considérable et un travail d'enquête dans les documents d'origine. En effet, souvent, seules les années sont citées, parfois avec le mois. Il faut donc associer une date et un lieu à une information incomplète. Par exemple, le GSO indique :

« 1966 : La rivière coula en janvier, jusqu'au-delà de Bricy puis revint en décembre, cette fois, sans dépasser Bricy ». En recherchant la source de cette information, on trouve (Bulletin de la Société des Naturalistes Orléanais n°34 de juillet 1966) : « En 1966, par deux fois la Retrève parvint à Gidy : du 25 au 31 janvier d'abord, puis du 14 au 18 février ». Puis le bulletin de la Société des Naturalistes Orléanais n°36 de 1967 nous indique que le gouffre des Barons situé sur la commune de Gidy, a retenu la crue du 7 au 9 décembre. Ces différentes informations nous permettent ainsi de dater les 3 crues de 1966.

Pour cette analyse, nous avons considéré la chronique pluviométrique de la station météorologique de Bricy qui est la plus longue chronique journalière disponible sous forme numérique. Malheureusement, la chronique est interrompue entre 1941 et 1947, et n'est pas antérieure à 1937, ce qui fait que toutes les crues répertoriées ne peuvent être associées à des épisodes climatiques connus. On sait cependant que de 1910 à 1930 le cours d'eau de la Retrève se remplit régulièrement sans causer de dégâts, et que de 1931 à 1937, la vallée reste sèche.

Le graphique de la Figure 7 représente les pluies à la station de Bricy avec les crues répertoriées depuis 1937. Chaque losange représente une crue identifiée à Gidy. Un code de couleur indique si la date est connue avec précision ou non. Le même type de graphique est présenté avec le cumul annuel des pluies en Figure 8. Le Tableau 2 donne une liste des crues exceptionnelles depuis 1887 et indique la source de l'information.

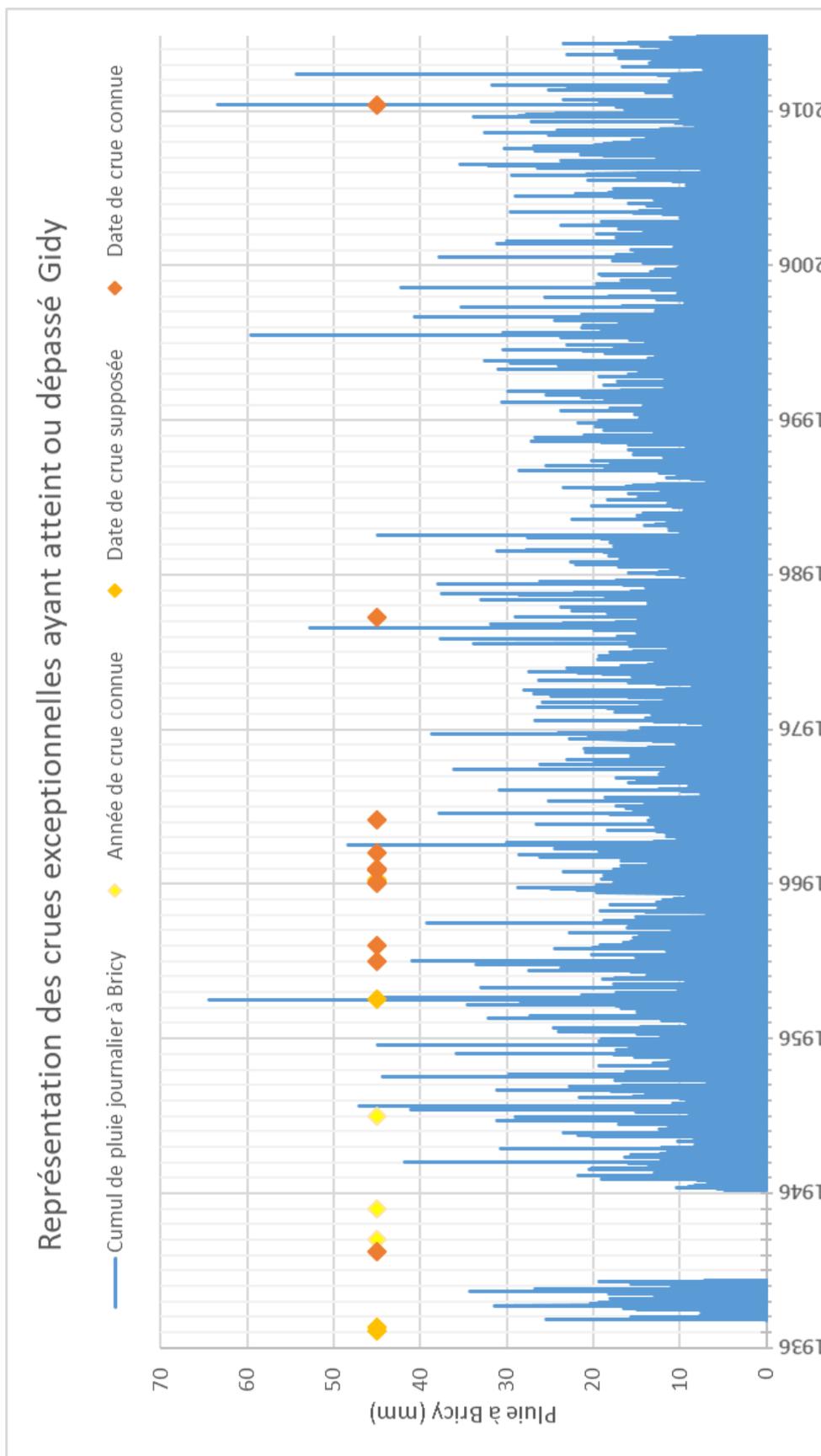


Figure 7 : Crues exceptionnelles et pluies journalières à Bricy.

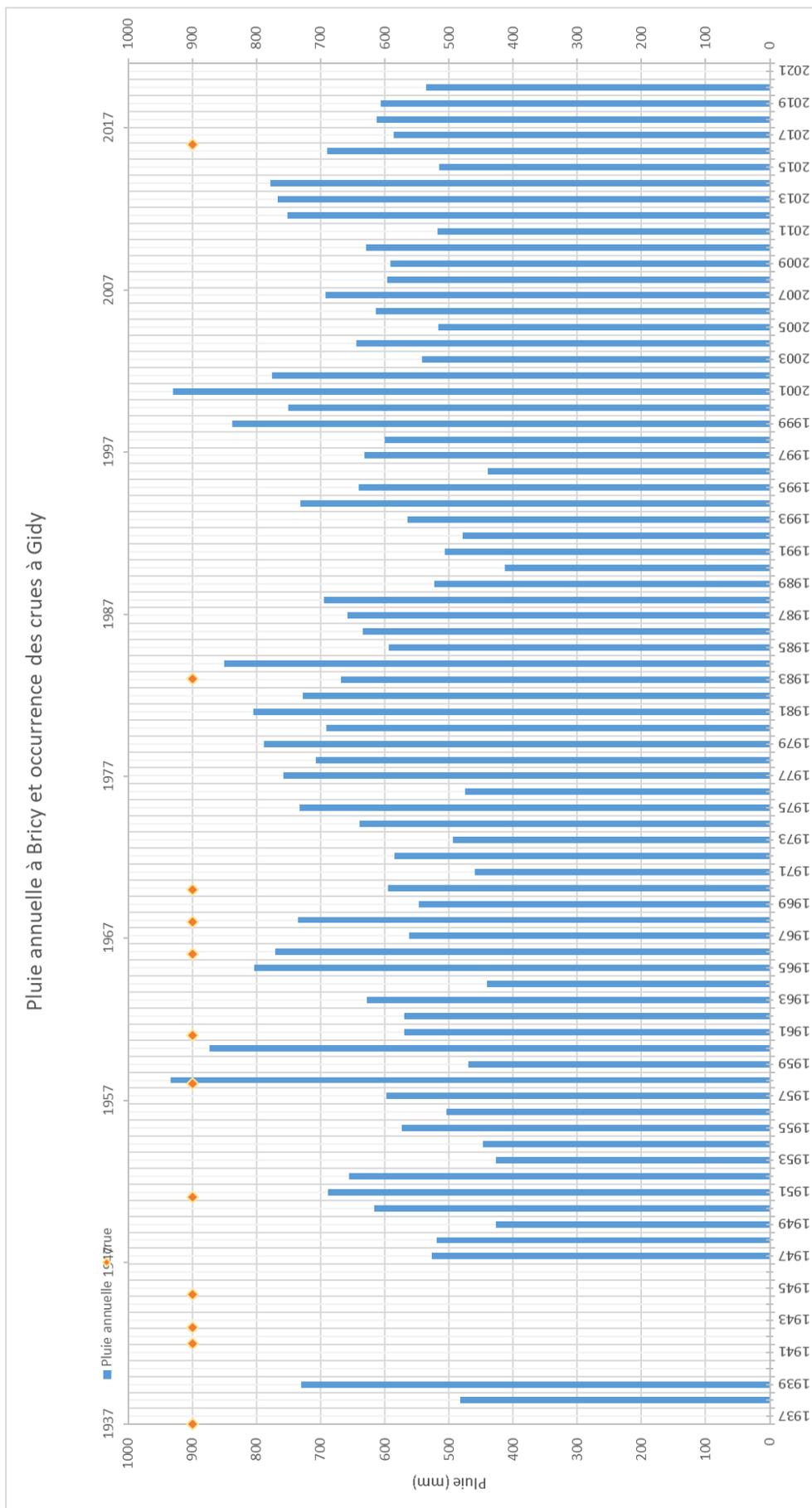


Figure 8 : Crues exceptionnelles et pluies annuelles à Bricy.

Date	Lieu	Commentaire	origine	débit
4/05/1887	Gidy	1.02m d'eau au pont du chemin de fer de Cercottes	Cité par A.G.Mothe, 2018	
nov-30	Gidy		Bull.Nat.Orl XXXIV, 1966	
mai-31	Gidy		Bull.Nat.Orl XXXIV, 1966	
Fevrier 1937	Gidy		Cité par A.G.Mothe, 2018	
mai-37	Gidy		Cité par A.G.Mothe, 2018	
07/03/1942	Cercottes	Crue moyenne. Débit observé au pont de chemin de fer à Cercottes : environ 2m ³ /s.		
1943	Gidy		Bull.Nat.Orl XXXIV, 1966	2000 l/s
1945	Gidy		Bull.Nat.Orl XXXIV, 1966	
1958	Gidy	Gidy est inondé, la rivière traverse complètement le village. Hauteur d'eau mesurée atteignant 1m en certains endroits.		
janv-61	Gidy	Gidy est inondé.	Bull.Nat.Orl XXXIV, 1966	
14/01/1962	Ravin des GG		Bull.Nat.Orl XXXIV, 1966	
début 1966	Gidy		Bull.Nat.Orl XXXVI, 1967	200 l/s
10/12/1966	Gidy		Bull.Nat.Orl XXXVI, 1967	
09/12/1966	Gouffre du Baron	a retenu la crue durant 3 jours du 7-9 dec 1966	Bull.Nat.Orl XXXVI, 1967	
09/12/1966	Gouffre des Chaises	Recemment desobstrué	Bull.Nat.Orl XXXVI, 1967	70 l/s
07/01/1968	Gidy	Gidy inondé du 7 au 16 janvier 1958	Cité par A.G.Mothe, 2018	80 l/s
28/02/1970	Gidy	La Retrève vient mourir à Gidy	La Rep du Centre 28/02/1970	
10/04/1983	Gidy	Gidy inondé, A10 coupée, fosses Guillaume débordent, inondation >2016	Cité par A.G.Mothe, 2018	
02/06/1983	Gidy	Gidy inondé. Max des crues 2 et 3 juin. Max des pluies 30/05		
01/06/2016	Gidy			

Tableau 2 : Inventaire des crues historiques de la Retrève.

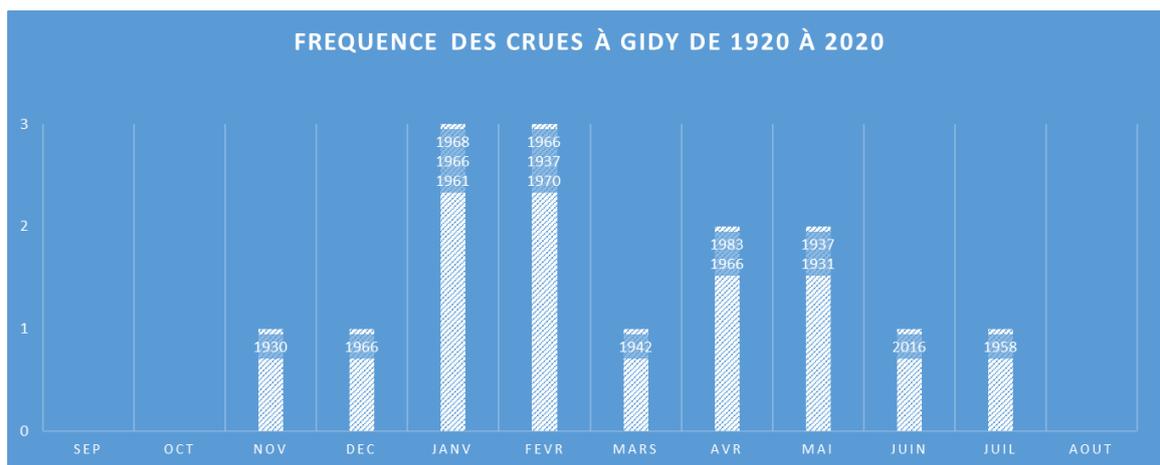


Figure 9 : Fréquence des crues à Gidy de 1920 à 2020.

On constate aisément à la lecture du graphique que les crues observées ne se corrèlent pas avec les pluies journalières : nombre de crues correspondent à des périodes humides prolongées mais il est apparemment assez rare qu'elles soient créées par une pluie journalière exceptionnelle comme en 2016. On n'identifie pas non plus de corrélation avec les pluies annuelles. Les crues les plus fréquentes survenues à Gidy l'ont été en janvier et février (Figure 9).

De même, il apparaît nettement que la fréquence des crues exceptionnelles a considérablement chuté après 1970. Il y a donc deux périodes distinctes. Le nombre d'occurrence des crues de la période récente (2) est bien insuffisant pour tenter de le corrélérer avec des pluies, quel que soit le pas de temps considéré. En revanche, cela serait intéressant à examiner si nous disposions d'un enregistrement des périodes d'écoulement continu, comme cela sera proposé au dernier chapitre de ce rapport.

Ce changement de régime observé autour de 1970 correspond au début de la campagne de travaux d'aménagement de la Retrève par le Génie Rural élaborée en janvier 1966 et pilotée par MM Véry et Bourillon, ingénieurs divisionnaires du Génie Rural. Ainsi peut-on lire dans la République du Centre du 9 janvier 1968 (communication de D. Langlois) : « On ne parlera plus de la Retrève en 1970 » ! D'après ce même article la première phase de ce projet consistera à aménager de nombreux gouffres de la forêt d'Orléans, « récemment explorés par des membres de la Société des Naturalistes ».

Le fait est, qu'entre 1970 et 2022 il n'y a eu que 2 débordements jusqu'à Gidy en 52 ans, alors qu'il y en avait eu 15 entre 1930 et 1970 (soit en moyenne moins d'une fois tous les 4 ans). On constatera également que le changement climatique ne peut être tenu responsable de cette modification. Il n'y a pas significativement moins de pluies exceptionnelles sur la deuxième période que sur la première.

Force est de constater que les travaux d'aménagement de la Retrève ont porté leurs fruits.

2.2.2. Bref historique des travaux sur la Retrève

Les travaux initiés par le programme du Génie Rural en 1968 n'étaient pourtant pas les premiers, mais ils furent certainement les plus conséquents.

À la fin du 19^e siècle et au début du 20^e, la forêt d'Orléans est le siège de travaux de drainage (fossés) pour lutter contre l'insalubrité (présence de marécages sur l'ensemble de la forêt).

La commune de Bricy canalise la Retrève en 1931 (dossier administratif n° 563 - Archives Dep.).

Dans les années qui précèdent les décisions qui mèneront aux travaux du Génie Rural, plusieurs idées sont avancées pour limiter les débordements qui inondent régulièrement Cercottes et Gidy :

- envoyer l'eau vers le nord (Villeneuve, actuel péage de l'autoroute A10 d'Artenay) où l'eau aurait alors rejoint la vallée du Nan ;
- faire un barrage au niveau des Pas Ronds de manière à « stabiliser » les eaux de la Retrève jusqu'au Ravin des grands gouffres ;
- créer des digues à Chanteau, au champs de tir, aux longs domaines, à l'amont de la ligne SNCF, à l'amont du CD102 sur Gidy (ou viennent les eaux du Renard) ;
- canaliser les eaux pour la traversée Gidy sous la ville par une canalisation de diamètre 1000 mm et 2790 m de longueur ;
- creuser un bassin de réception de 820 m de long sur 45 m de large entre Gidy et Marmogne, dans lequel les eaux des plus violentes crues viendraient mourir.

En novembre 1969, le groupe spéléologique orléanais convainc le syndicat de la Retrève de remettre en état et d'aménager les gouffres de la forêt d'Orléans (La République du Centre du 10/11/1969).

En 1970, plusieurs gouffres sont débouchés (bénévolement par les spéléologues) tel celui de La Chaise, dont la capacité d'absorption est passée de 15 l/s en 1966 à 60 l/s en 1970, ou le gouffre d'Ambert (60 l/s en 1969, 250 l/s en 1970).

Les travaux d'aménagement sont décidés, mais en 1971 ils ne sont pas encore réalisés. Les plans perturbent le remembrement. La dépense n'est pas jugée à la mesure de l'inconvénient (La Nouvelle République du 3 février 1971). Le projet est toujours de faire 6 retenues sur le cours de la Retrève, dont le volume stocké serait absorbé par les gouffres (dont 8 sont à aménager) et une canalisation sous Gidy.

À la même époque, le réseau karstique est étudié par le BRGM pour le passage de la future autoroute A10 (Desprez *et al.*, 1971). Celle-ci sera mise en service en 1973.

En 1974 : Création de l'étang de la Retrève pour l'écrêtement des crues.

L'inventaire n'est pas exhaustif mais il semble qu'il y a eu moins de travaux d'aménagements après les années 70, jusqu'en 2016.

Suite aux inondations de 2016, un contournement de la station d'épuration de Gidy a été creusé (2017), l'A10 a fait l'objet d'un élargissement et de nouveaux bassins pour stocker les eaux pluviales ont été créés. Le chantier devrait s'achever en 2023.

2.3. CAMPAGNES DE JAUGEAGE

L'objectif des campagnes de jaugeage réalisées dans le cadre de l'étude hydrologique était de quantifier les écoulements observés en période de ruissellement. La réalisation de jaugeages différentiels à plusieurs points du cours d'eau devait permettre de mieux comprendre la distribution des écoulements le long du cours d'eau et le rôle des gouffres.

La difficulté pour la réalisation de ces mesures de débit était multiple. Il fallait tout d'abord se trouver sur place lorsque les écoulements se produisent. Une veille a été établie. Elle fut, facilitée par la proximité du BRGM à Orléans, la présence de personnel du BRGM habitant dans les bassins concernés³ (Figure 10), et l'aimable concours de Daniel Langlois, spéléologue résidant lui-même à proximité. Ces observateurs nous permirent de réagir lors des épisodes de crue. En fin de projet, un dispositif d'alerte a été installé au gouffre d'Ambert. Il n'a jamais eu l'occasion de fonctionner, car les écoulements de 2022 ont été très faibles.



Figure 10 : Mesure à Ambert par la famille Peter-Borie.

La deuxième difficulté tient à l'identification de points de jaugeages où la mesure pouvait être répétée dans diverses configurations d'écoulement (faibles ou forts débits), faciles d'accès et sans ambiguïté pour pouvoir faire intervenir différents opérateurs.

Plusieurs repérages amenèrent Damien Salquèbre, alors chef de projet, à identifier 9 points de jaugeage (M1 à M9) le long de la Retrève. Par la suite des points furent ajoutés (M1bis, M3bis, JM, FG1 et FG2) et d'autres furent jugés moins propice à la mesure (M4, M5). Les codes sont reportés sur la Figure 11 et dans le Tableau 3. L'Annexe 2 présente des fiches de jaugeage avec un plan et un exemple de données de jaugeage.

³ Nous remercions en particulier Mariane Peter-Borie et Frédéric Guiet pour leur contribution.

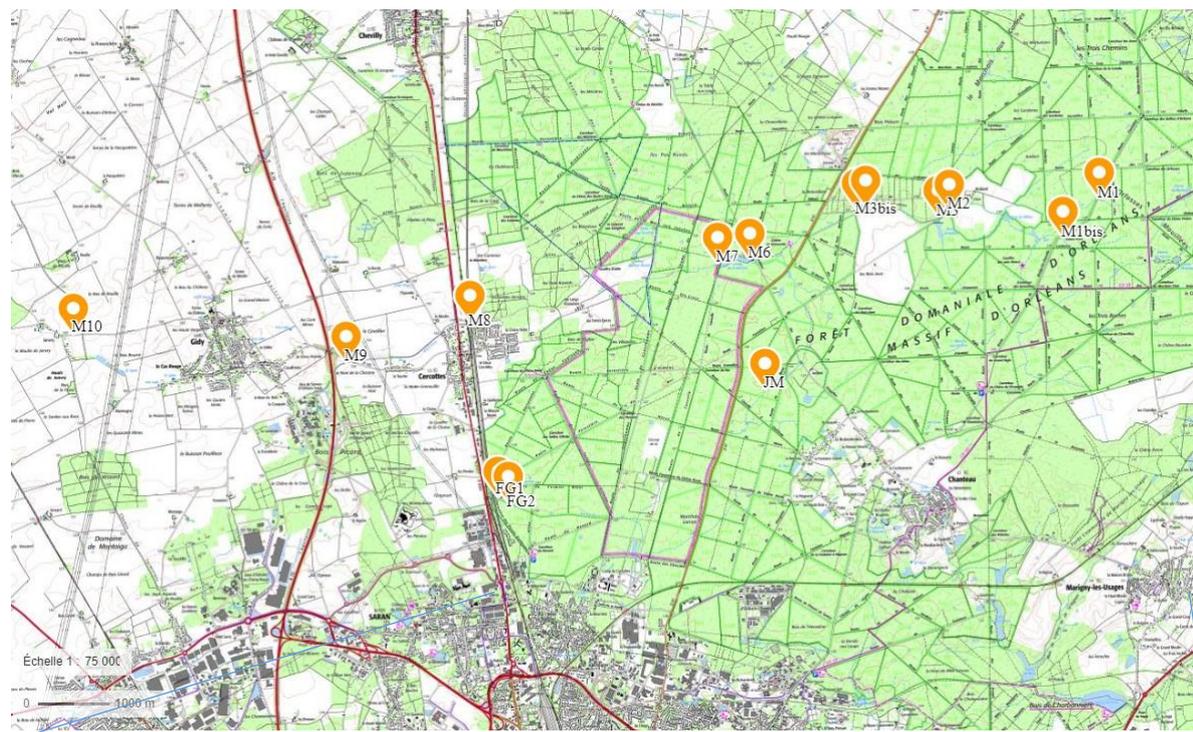


Figure 11 : Points de mesure du débit de la Retrève avec leurs sous-bassins, et zoom sur le bassin versant de l'étang de la Retrève.

Code	Localisation	Remarque
FG1	Fosse Guillaume 1 (aval)	Se remplit en dernier
FG2	Fosse Guillaume 2 (amont)	Section amont propice à la mesure
M1	Orfosses mouillées	Ne représente pas l'écoulement principal
M1bis	Orfosses mouillées - Grand Pont	Mieux adapté que M1
M2	Pont d'Ambert (face aux écuries)	Suivi par la famille Peter-Borie
M3	Etang d'Ambert	Accès peu aisé en période humide Permet d'évaluer l'absorption par le gouffre d'Ambert
M3bis	Ravin des grands gouffres	Section peu pratique. Lieu où le courant peut changer de sens
M4	Pont sur la D97	Abandonné (difficile d'accès). Remplacé par JM en amont
M5	Confluence Ruisseau de l'Ardelet	
M6	Entrée de l'Etang de la Retrève	Bief rectiligne et entrée de buse \varnothing 90 mm Bief rectiligne, difficile d'accès en période d'inondation
M7	Exutoire de l'Etang de la Retrève fossé en bordure du Lotissement de	
M8	Cercottes	Reçoit des apports parasites (vide cave?)
M9	Pont de la Chicane (amont de Gidy)	Secteur très plat, écoulements très lents
M10	Janvry (amont de Boulay les barres)	Mesure au passage sous la route
JM	Entrée du gouffre Jean Moreau 1 sur le ruisseau de l'Ardelet	L'un des premiers écoulements sur le bassin

Tableau 3 : Liste des points de jaugeage (voir aussi l'Annexe 2).

Les techniques de jaugeage utilisées ont été :

- le micromoulinet sur perche OTT C2 (Figure 12). Il s'agit d'une hélice calibrée qui, plongée dans le courant, donne la vitesse de celui-ci. Plusieurs mesures à différentes profondeurs le long d'une section du cours d'eau permettent de calculer la vitesse moyenne, puis le débit ;
- le courantomètre OTT MF Pro (Figure 13). Cet appareil mesure la vitesse par induction magnétique. Le principe d'acquisition est le même que pour le micromoulinet ;
- la méthode du bouchon. Il s'agit d'observer la vitesse de déplacement d'un flotteur (de la taille d'un bouchon de liège). La mesure donne une estimation de la vitesse de surface et doit être corrigée par un facteur empirique. Des mesures concomitantes de différentes méthodes ont permis de préciser les coefficients à apporter selon les sites de mesure. En moyenne, ce coefficient est de 0,6 (Tableau 4).



Figure 12 : Jaugeage au micromoulinet à Grand Pont (Orfosses mouillées) – Point M1 le 01-02-2021.



Figure 13 : Mesure du débit de la Retrève au courantomètre MF-Pro, à Ambert (M3bis), le 01/02/2021 (© BRGM).

Jaugeages					Estimation au bouchon	
Colonne1	Débit	Unité	Méthode	Type	Débit brut (l/s)	Coeff à appliquer
Gouffre d'Ambert	107	l/s	OTT C2	lit	187.5	0.57
Etang Retrève amont	20.2	l/s	OTT C2	lit	40.3	0.50
Grand Pont	101	l/s	OTT C2	canal	185.19	0.55
Etang Retrève amont	11	l/s	MF-PRO	conduite	16.61	0.66
Fosse Guillaume	28.3	l/s	MF-PRO	lit	43.48	0.65
Fosse Guillaume	60	l/s	MF-PRO	lit	113.33	0.53
Etang Retrève amont	62.4	l/s	MF-PRO	conduite	133.00	0.47
Gouffre d'Ambert	344	l/s	MF-PRO	lit	550.00	0.63
Ambert	224	l/s	MF-PRO	conduite	267.69	0.84
Grand Pont	182	l/s	MF-PRO	canal	314.52	0.58
					moyenne	0.60

Tableau 4 : Suivi de la crue de février 2021 et comparaison des méthodes (Jaugeage/flotteur).

Le détail des jaugeages réalisé est donné en Annexe 1. Toutes ces données ont été utilisées pour ajuster les tentatives de modélisation présentées plus loin. Certaines ont complété utilement les estimations d'absorption par les gouffres, présentées au chapitre suivant.

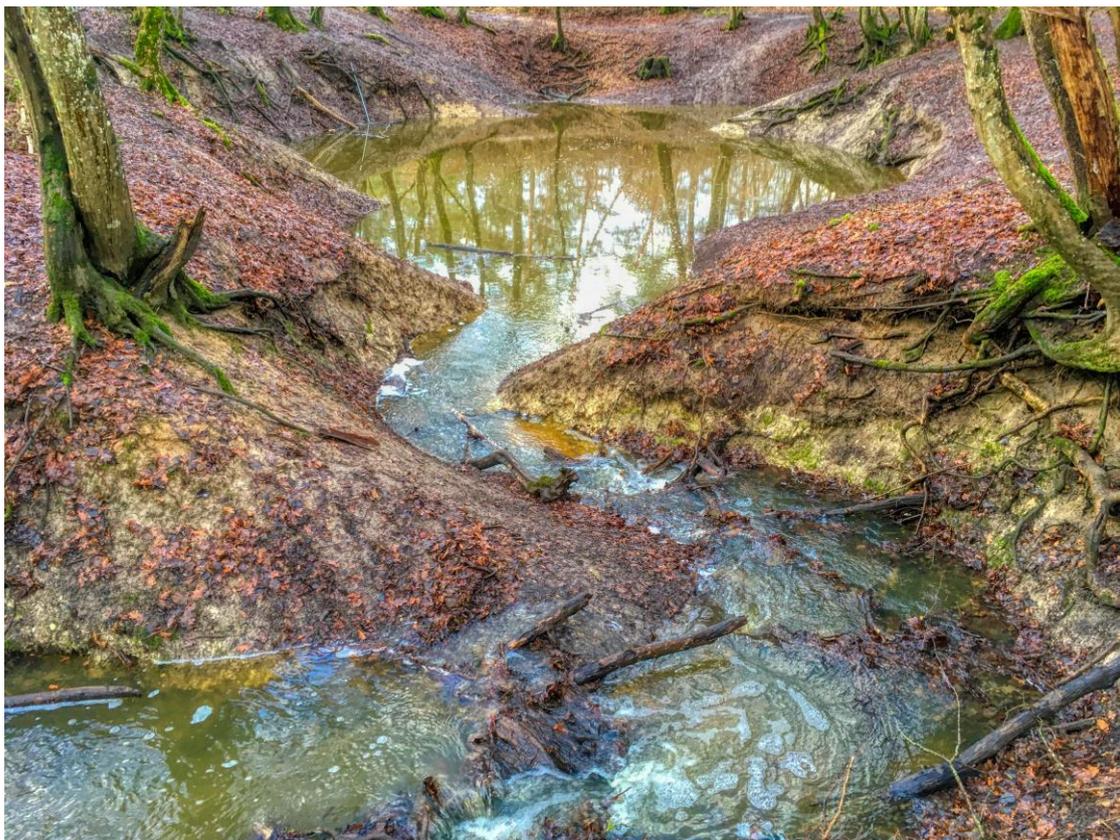


Figure 14 : Les fosses Guillaume 2 en cours de remplissage – 03/02/2021.

2.4. ESTIMATION DES DÉBITS ABSORBÉS PAR LES GOUFFRES

Afin d'estimer la capacité d'absorption des gouffres, différentes approches ont été entreprises :

- jaugeages et mesures de niveau (2020-21) ;
- exploitation de la bibliographie et analyse des fiches du GSO.

Il convient cependant au préalable de rappeler quelques éléments de contexte.

Les indices karstiques qui sont concernés par des observations d'absorption de ruissellement sont ceux que l'on appelle gouffres, caractérisés par des pentes abruptes et la présence d'une (ou plusieurs) perte(s) dans un (ou plusieurs) point(s) bas. Les autres types d'indices karstiques ou de dépressions artificielles jouent un rôle de stockage en période de forte pluie mais ne présentent pas d'intérêt pour un écrêtage de crue, l'infiltration y étant lente ou inexistante (mare). Le volume total de stockage dans ces dépressions a été estimé dans le rapport n°1 (Noury *et al.*, 2019). Le volume total de $1,34 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pour toutes les dépressions, d'origine karstique ou non, ne représente pas plus de 18 mm de pluie efficace, une fois rapporté à la surface du bassin. Ce volume de stockage constitue finalement une valeur relativement faible par rapport aux précipitations hivernales sur le bassin.

L'eau de ruissellement qui parvient aux gouffres commence par s'y perdre en totalité, puis, si le débit continue d'augmenter, la capacité d'absorption du gouffre est atteinte, et le gouffre commence à s'envoyer.

C'est cette **capacité d'absorption que l'on cherche à estimer**, car elle **correspond au débit de ruissellement qui échappe à la Retrève** et qui fait que **le cours d'eau n'a d'existence que lorsque le débit ruisselé est supérieur à la capacité d'absorption des pertes**. En d'autres termes, c'est le débit à soustraire lors du calcul de débit de crue proposé dans les chapitres suivants.

Cependant cette valeur n'est pas constante, elle dépend de :

- la charge dans le gouffre. Parfois le volume du gouffre est tel que la charge peut varier de plusieurs mètres (9 m aux Pas ronds, plus de 6 m à Ambert, plus de 11 m aux fosses Guillaume) ;
- la quantité de matériaux faisant obstacles à l'écoulement, qui varie en fonction de la période (en hiver, feuilles, branches et sédiments sont remobilisés et plus ou moins bien avalés par les gouffres). L'homme peut également agir par le nettoyage ou la désobstruction de ces cavités. Ainsi, de très fortes valeurs d'absorption mesurées dans certains gouffres ont pu être observées dans des conditions qui ne prévalent plus à présent. Par exemple, aux Pas Ronds, la capacité d'infiltration estimée aujourd'hui est de 5 à 6 l/s alors qu'elle était encore d'au moins 15 l/s en 2010 et estimée à 50,100 voire 150 l/s par le passé (Moreau et Munerot, 1966). De même, un article de la République du Centre de mars 1970 indique que les spéléologues, par leurs travaux de désobstruction du gouffre d'Ambert, ont fait passer la capacité d'absorption de 70 à 250 l/s (les travaux étaient en cours).

Il y a donc deux phénomènes en jeu dans l'atteinte d'un seuil de capacité d'absorption (Figure 15) :

- l'écoulement est obstrué à l'entrée ou dans le conduit karstique La valeur du débit d'infiltration mesurée est inférieure à la capacité d'absorption potentielle. Un nettoyage ou un débouillage pourra modifier cet état ;
- l'écoulement est limité par la forme du conduit entre la perte et la nappe, qui confère une perméabilité intrinsèque au milieu. La saturation est locale. La charge monte dans le conduit jusqu'à refouler en surface mais cela ne signifie pas que la nappe de Beauce sous-jacente remonte à la surface. Seul le conduit karstique est en charge. Un conduit propre donnera alors la valeur maximale de la capacité d'absorption.

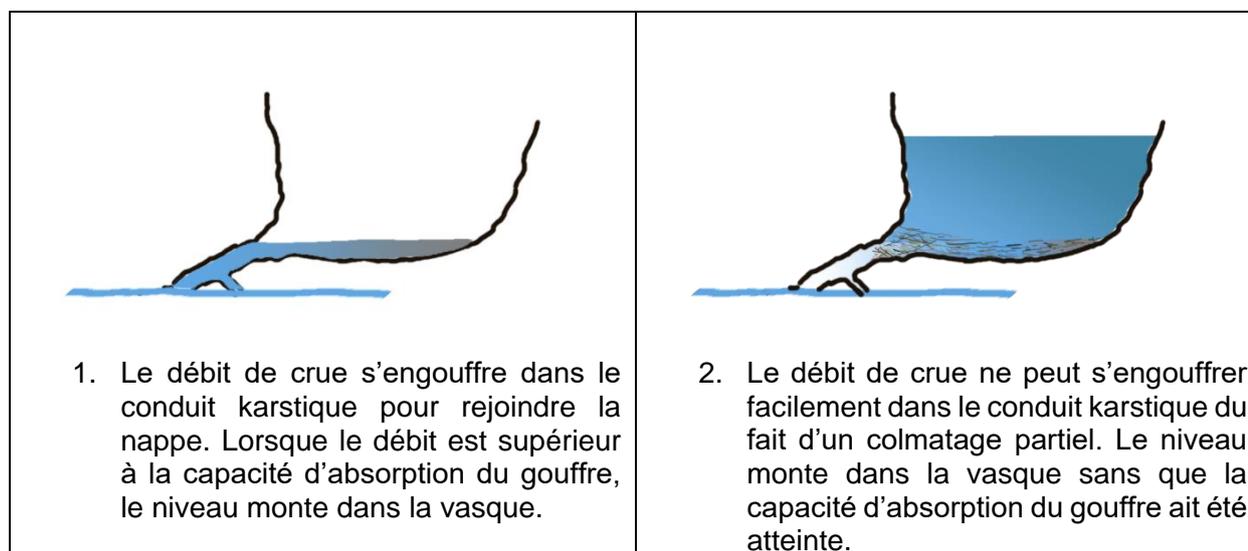


Figure 15 : Illustration de l'effet de colmatage à l'entrée du conduit karstique en régime transitoire pendant une crue.

Il y a tout lieu de penser que la capacité globale d'absorption des gouffres n'a cessé de se détériorer depuis les travaux d'aménagement de la Retrève dans les années 1970 et les initiatives des spéléologues. Même si de nouveaux gouffres se créent ou évoluent (tel le gouffre Moreau 2 qui s'est approfondi récemment), beaucoup se comblent, car feuilles, branchages et sédiments s'accumulent chaque hiver dans les fonds des dépressions. Parfois, certains peuvent se réactiver subitement lorsque la charge de l'eau entraîne la rupture d'un bouchon (débouillage). Ce phénomène a été observé par exemple aux Diableaux (1 et 2) par D. Langlois.

Un spéléologue orléanais, Silvain Yart, a disposé durant l'hiver 2017-2018 un capteur de pression au fond du puits du gouffre des Sans Ronces. L'observation permet d'illustrer le phénomène de mise en charge du conduit karstique et la dissipation de la charge dans la nappe. Sur ce graphique (Figure 16) on remarque :

- une inertie au démarrage : les pluies d'automne et du début de l'hiver n'ont pas créé d'écoulement dans le conduit karstique avant le 21 janvier 2018 malgré un cumul pluviométrique de 206 mm (pluie de Bricy) depuis le 1^{er} septembre 2017. Cette inertie est attribuée au temps nécessaire pour saturer les sols et les dépressions en amont ;
- une réaction (temps de concentration) rapide, de l'ordre de la journée, entre le phénomène pluvieux et l'apparition de la crue dans le karst **dès lors que la période d'imbibition est passée**. Des pluies importantes passent cependant inaperçues tandis que des crues apparaissent parfois sans pluviométrie importante la veille. Cela est probablement imputable à la distance entre la mesure du ruissellement et la station pluviométrique (20 km) qui ne permet pas d'être précis sur les occurrences des pluies dans le détail ;
- un niveau de base qui monte légèrement, passant de 5 cm (valeur lorsque la sonde est dans l'air – l'appareil étant légèrement décalé) à plus de 20 cm fin mars. Il s'agit du niveau de la nappe de Beauce qui noie le fond du puits des Sans Ronces en hiver. Ce concept est illustré par les vignettes qui représentent la coupe transversale du gouffre et la position de la nappe en octobre 2017 et mars 2018.

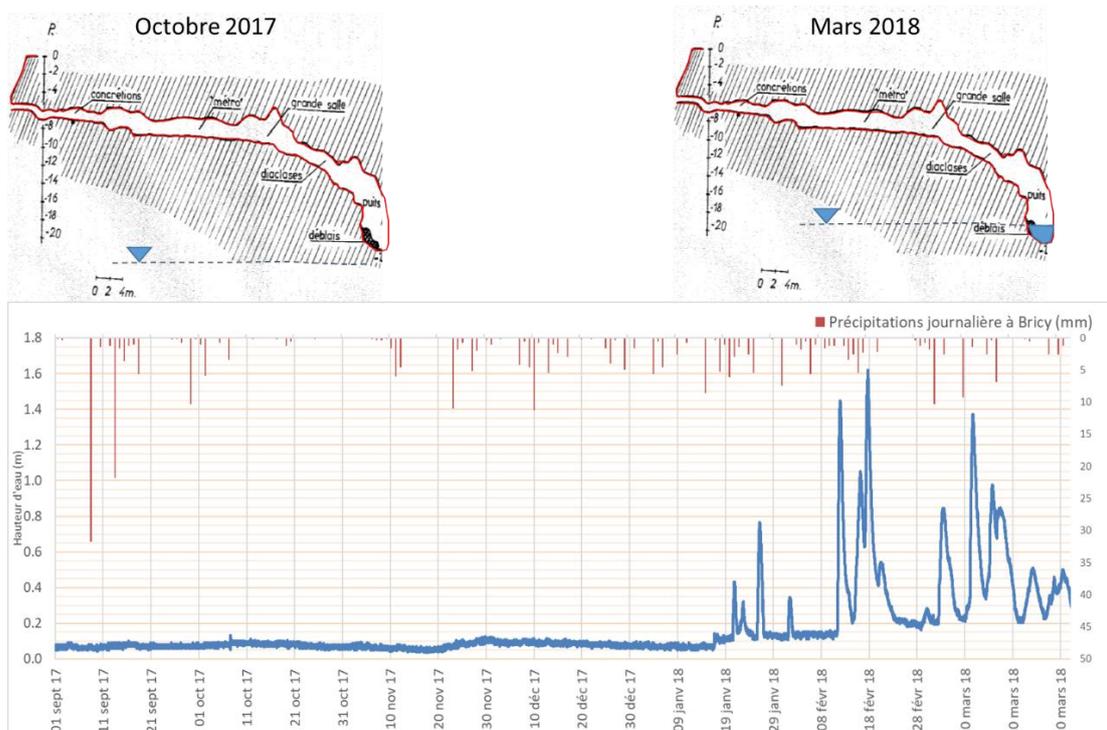


Figure 16 : Observations de niveau d'eau au fond du gouffre des Sans Ronces (Communication Silvain Yart) et coupe interprétative.

La Figure 16 est à mettre en parallèle avec la suivante, qui n'est malheureusement pas concomitante mais montre des mesures de débit à l'entrée du gouffre des Sans Ronce, réalisées en hiver 1965-1966. Cette année-là fut particulièrement pluvieuse. L'eau a coulé pendant 125 jours consécutifs à une moyenne de 33 litres par secondes (Langlois, 1967).

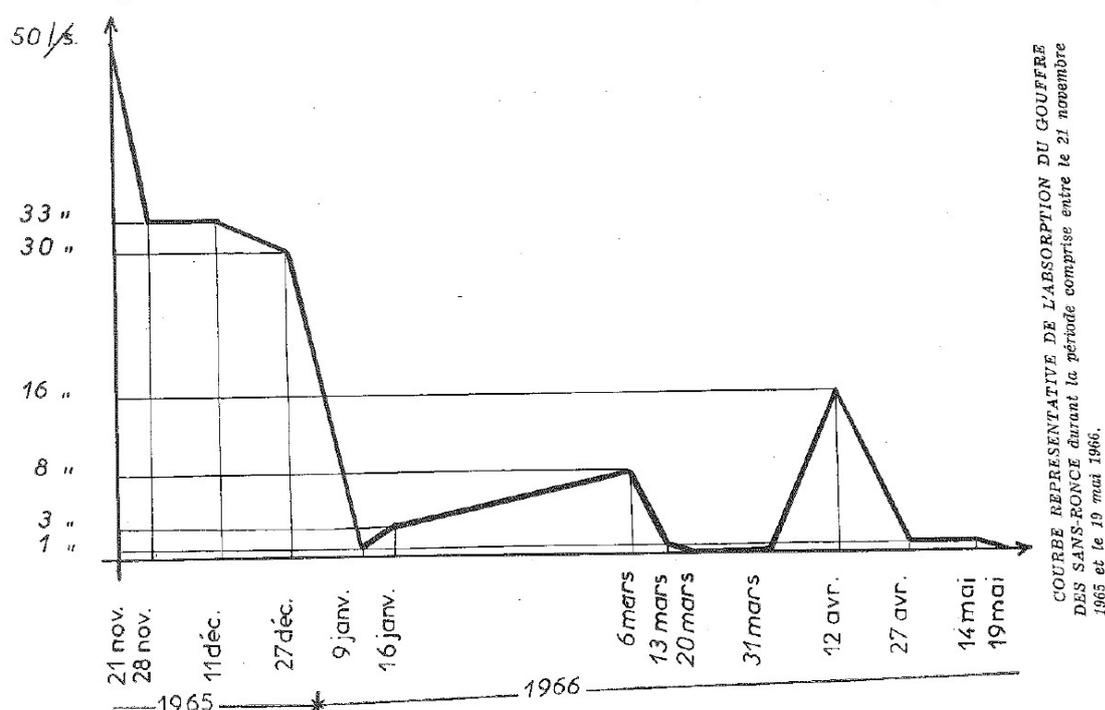


Figure 17 : Mesures de débit au gouffre des Sans Ronce (Langlois, 1967).

2.4.1. Mesures réalisées en 2020-21

Pendant la durée du présent projet, plusieurs jaugeages ont été réalisés dans le lit de la Retrève et le fossé du Renard, à l'amont de pertes. Il a notamment été possible de suivre la crue du 7-9 février 2021 par des mesures réalisées durant la journée du 8/02/2021 au moment du pic de crue au gouffre d'Ambert. Les mesures sont réalisées au courantomètre OTT MFPRO et sont présentées dans le Tableau 5.

Point de jaugeage	Code	Date	Débit
Fosse Guillaume	FG1	08/02/2021 10:00	28.3 l/s
Fosse Guillaume	FG2	08/02/2021 11:40	60 l/s
Etang Retrève aval	M7	08/02/2021 12:00	0 l/s
Etang Retrève amont	M6	08/02/2021 12:00	62.4 l/s
Gouffre d'Ambert	M3bis	08/02/2021 13:10	344 l/s
Ambert	M2	08/02/2021 14:00	224 l/s
D97	M4	08/02/2021 15:30	0 l/s
Grand Pont	M1bis	08/02/2021 16:00	182 l/s

Tableau 5 : Jaugeages réalisés lors de la crue du 8 février 2021.

En complément, bien que non envisagé au départ dans le programme d'étude, le BRGM a mis en place 3 capteurs de pression dans les indices karstiques les plus importants, à savoir :

- le ravin des grands gouffres au droit du gouffre d'Ambert ;
- la dépression des Pas Ronds ;
- les Fosses Guillaume.

Le but de ces instrumentations était de suivre l'apparition du ruissellement et la disparition des écoulements dans la Retrève au cours d'une crue. Le dispositif peut également servir de prototype à une station d'alerte future. La réflexion sur sa pertinence, le pas d'acquisition, l'emplacement des capteurs sera discutée dans le dernier chapitre. Nous nous intéressons ici à l'analyse des données ainsi récupérées.

Une seule crue est survenue en 2021, en février. Elle a pu être suivie entièrement sur le gouffre des Pas Ronds, le Ravin des Grands gouffre, et aux fosses Guillaume (Fosse Guillaume 2, voir Figure 18 et Figure 20). Pour cette dernière, l'eau a continué à ruisseler après le passage de la crue mais la centrale d'acquisition ayant été forcée et la sonde retirée de sa position initiale, les données ultérieures, biaisées, ne sont pas présentées. Le passage de la crue sur les 3 sites est illustré en Figure 19.



Figure 18 : La perte des Fosses Guillaume 2 (en gris, à gauche, notre tube pour la prise de pression).

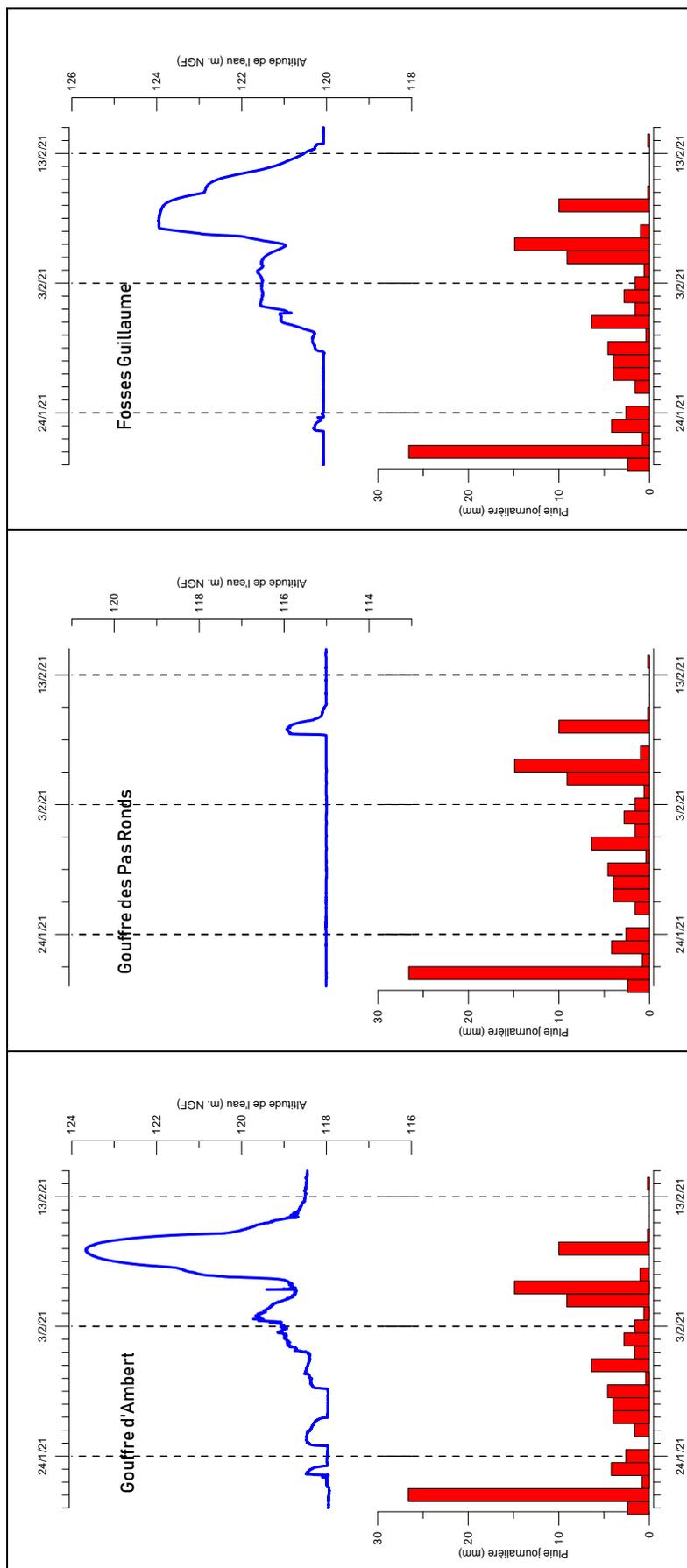


Figure 19 : Suivi de la crue de février 2021 au Ravin des grands gouffres (Gouffre d'Ambert).

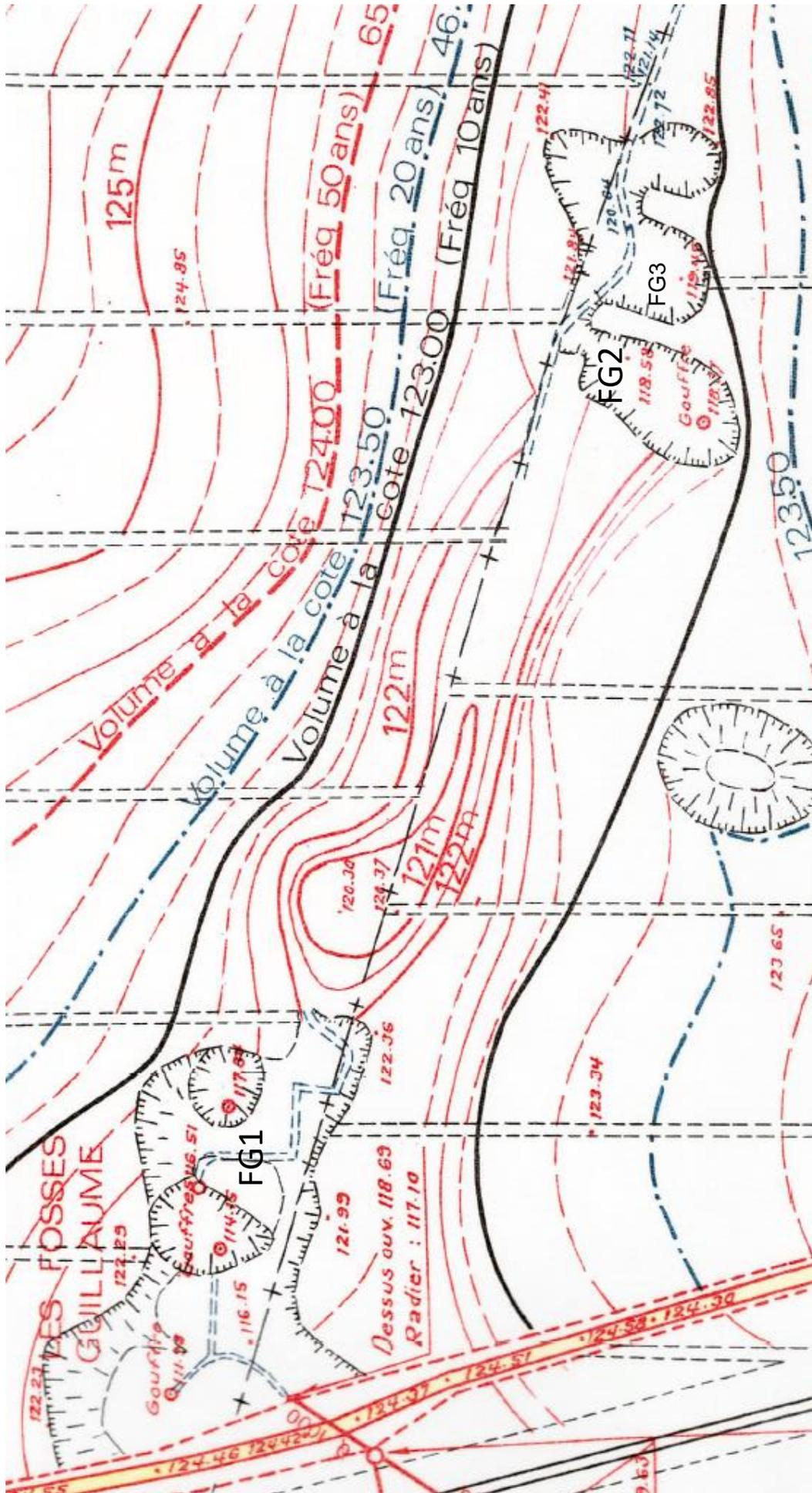


Figure 20 : Plan des Fosses Guillaume (Communication ONF).

Cette succession de chroniques permet de suivre la crue sur la Retrève : De l'aval des Orfosses mouillées à Grand-Pont (M1bis), à Ambert (M2) puis au gouffre d'Ambert (M3bis) le débit augmente progressivement (respectivement 182 l/s, 224 l/s puis 344 l/s). Le ravin des Grands Gouffre absorbe entièrement le ruissellement amont. La mesure de débit de 344 l/s a été réalisée le 8 février à 13 h 10, soit juste avant le pic de crue, dont le niveau a pratiquement atteint le seuil de débordement du ravin. Etant proche de l'étal et de la hauteur maximale, le débit de 344 l/s peut être considéré proche de la capacité d'absorption actuelle du ravin des Grands Gouffres. À l'aval du gouffre, rien ne coulait (M4). L'étang de la Retrève recevait des apports du ruisseau de l'Ardelet (Gouffres Moreau saturés) estimés à 62 l/s. A l'aval de l'étang, rien ne coulait. Ce qui apparaît au Pas Ronds (petite crue de moins d'un mètre de haut) résulte probablement du ruissellement dans le sous bassin local. A Cercottes et au-delà, rien ne coulait.

Le passage de la crue a été suivi par la famille Peter-Borie à Ambert (Figure 21). Un premier épisode de crue suit les pluies de la première semaine de février. Le 14 février, il n'y a plus d'écoulement visible. Le cours d'eau est gelé. Puis il y a un deuxième épisode qui semble corrélé avec une petite averse (4 mm) le 18 février. Peut-être l'averse était-elle plus forte à Ambert qu'à Bricy. Comme pour les sans-ronce précédemment, la distance entre le phénomène observé et la station pluviométrique peut générer des questionnements.

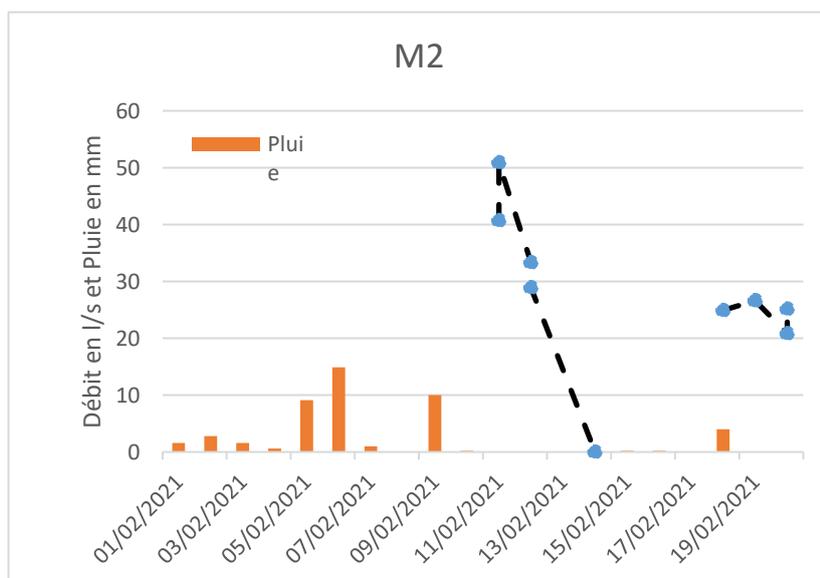


Figure 21 : Suivi du débit au pont d'Ambert (station M2) entre le 11 et le 20 février 2021.

Il y a malheureusement trop peu d'observations pour tenter de corréliser le niveau de la Retrève avec un débit. La multiplication des mesures (débit, niveau) permettrait de déduire le débit de la lecture du niveau. C'est le principe de la courbe de tarage dont la Figure 22 constitue une ébauche.

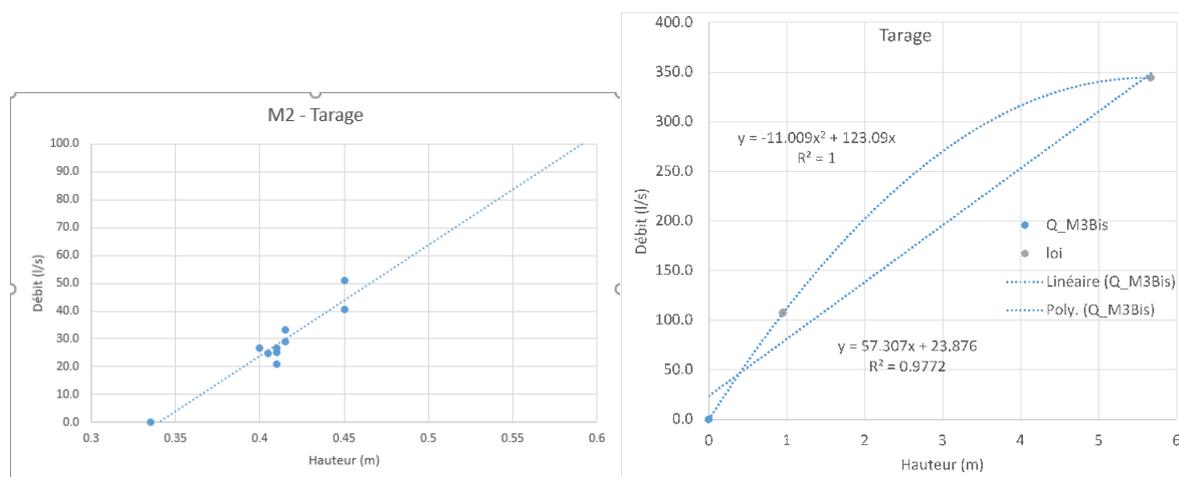


Figure 22 : Tentative de courbe de tarage en M2 et M3bis.

Aux Fosses Guillaume, la crue est à peine plus rapide. La Fosse FG2 est la première à se remplir (cf. Figure 14), puis la surverse remplit FG3 en même temps que le débordement commence à alimenter FG1. Le débit d'entrée mesuré dans FG2 en condition de surverse, étant de 60 l/s et celui de débordement vers FG1 de 28 l/s, le débit d'absorption de FG2 et FG3 réunis est estimé à 32 l/s.

L'analyse des décrues est utilisée comme autre moyen pour calculer la capacité d'absorption des gouffres. En premier lieu, il nous faut remarquer la rapidité de la décrue de ces cours d'eau (la Retrève en particulier) qui souligne l'absence de contribution d'une nappe souterraine (cf. le Rapport n°3 sur les écoulements souterrains, Gutierrez, 2022). Ainsi, cette décrue est celle d'un écoulement superficiel qui disparaît dans les gouffres (puisque rien ne coule à l'aval).

Prenons le cas du ravin des grands gouffres. L'eau s'y accumule car le débit qui arrive est supérieur à la capacité d'absorption du gouffre, le niveau monte de 6 m puis redescend à zéro en moins de deux jours. Cette vidange nous donne une approximation de ce que le gouffre d'Ambert peut absorber.

En calculant le volume maximal présent au moment du pic de crue et en faisant l'approximation qu'il n'y a plus d'apport s'il ne pleut plus, la vidange correspond au débit de perte soutenu par la fin du ruissellement. C'est donc une estimation basse du débit d'absorption qui est ainsi estimée (sans la queue de ruissellement la vidange aurait été plus rapide).

Les volumes d'eau stockée au maximum de la crue (H max) sont estimés à partir du MNT LIDAR, excepté pour les fosses Guillaume où la fosse 2 était en eau au moment du lever LIDAR. Son volume est alors estimé à partir de sa surface (830 m²) et d'une profondeur moyenne évaluée à 3,5 m. Les résultats retenus sont donnés dans le Tableau 6.

Gouffre	Charge max H	Volume correspondant	Temps de décrue	Q hypothèse haute	Q hypothèse basse
Ravin des Grands Gouffres	6 m	56 500 m ³	1,5 à 2 j	450 l/s	330 l/s
Pas Ronds	1 m	500 m ³ / 450 m ³	24 h / 22,5 h	6 l/s	5.5 l/s
Fosse Guillaume 2	4 m	2900 m ³	2 à 3 j	17 l/s	11 l/s

Tableau 6 : Estimation des débits de vidange par l'analyse des décrues.

Bien que sujettes à approximations, ces données semblent relativement cohérentes avec les mesures de débit précédentes. Elles sont cependant très ponctuelles et insuffisantes pour une extrapolation à l'ensemble du bassin, dans des contextes hydrauliques différents. Ainsi, l'analyse des anciennes observations a-t-elle été recherchée.

2.4.2. Analyse des anciennes données

Il y a certainement eu des mesures réalisées dans les années 60/70 lors des travaux de l'autoroute et des aménagements de la Retrève mais nous n'avons pu trouver que des traces partielles (quelques plans) de ces travaux.

L'essentiel des informations consultées provient des travaux du GSO, publiés pour certains dans les bulletins des Naturalistes orléanais, ou bien mentionnés dans la synthèse de Jean Moreau (GSO, 2002). Ces données sont analysées et exploitées dans ce qui suit.

L'absorption de certains gouffres a été estimée (visuellement ou par mesure au flotteur) par les spéléologues du GSO depuis les années 1960 :

- les données les plus nombreuses concernent les gouffres Diableaux 1 et 2, Chevreuils et Mézières 1 ; elles datent des années 2000 et 2010.
- pour les autres gouffres et pour les formes les plus grandes, les valeurs fournies sont moins nombreuses ; il s'agit parfois des absorptions maximales estimée dans les périodes de fortes pluies. Elles concernent :
 - sur la zone d'étude :
 - le Ravin des Grands Gouffres (et mesures au gouffre d'Ambert),
 - les Fosses Guillaume,
 - le gouffre des Pas-Ronds,
 - les Orfosses Mouillées,
 - le gouffre du Renard, des Sans-Ronces, de la Chaise, Jeanne d'Arc, des Domaines, Orfosses 1 et 2, Moreau 1, 2 et 3, du Baron, de l'Étang, St-Georges et St-Sulpice ;
 - et en dehors de la zone d'étude : Les Puits de l'Enfer 1 et 2 et Mézières 1.

Le jeu de données historiques est complété par les quelques valeurs estimées au Tableau 6.

2.4.3. Estimation du débit total

Nous cherchons à extrapoler les valeurs ponctuelles mesurées dans quelques gouffres, à l'ensemble du bassin versant. Pour cela, nous avons essayé de trouver une corrélation entre des facteurs morphologiques de la forme karstique et le débit maximal absorbé. Il aurait été intéressant de calculer les bassins versants drainés par ces structures mais ce calcul est extrêmement complexe pour les 820 formes dans un contexte topographique extrêmement plat à l'échelle de ces sous-bassins.

Il s'avère que le volume de l'indice karstique se corrèle (visuellement) assez bien avec le débit maximal d'absorption estimé. Le graphique de la Figure 23 présente les absorptions estimées en fonction des volumes des formes. Ce traitement indique que plus une forme est volumineuse, plus elle absorbe (Tableau 7). La raison de cette corrélation apparente tient probablement dans le pouvoir d'érosion de l'eau (plus le débit est fort, plus la forme karstique est érodée).

Gouffre	Débit d'absorption maximal observe (L/s)	Volume de la dépression (m ³)
DOMAINES	8	822
SAINT-SULPICE	28	897
RENARD	20	1710
DIABLEAUX 2	35	2210
CHAISE	70	3490
CHEVREUILS	15	3580
MÉZIÈRES 1	40	3800
PUITS DE L'ENFER 1	15	3820
DIABLEAUX 1	50	4670
ETANG	15	4993
FOSSES GUILLAUME 2 & 3	31	5000
SANS-RONCE	50	5296
PUITS DE L'ENFER 2	40	5800
ORFOSSES MOUILLÉES	110	18997
PAS-RONDS	200	22580
AMBERT	500	58500
RAVIN DES GRANDS GOUFFRES	600	58500

Tableau 7 : Débits maximaux d'absorption et volumes de quelques gouffres.

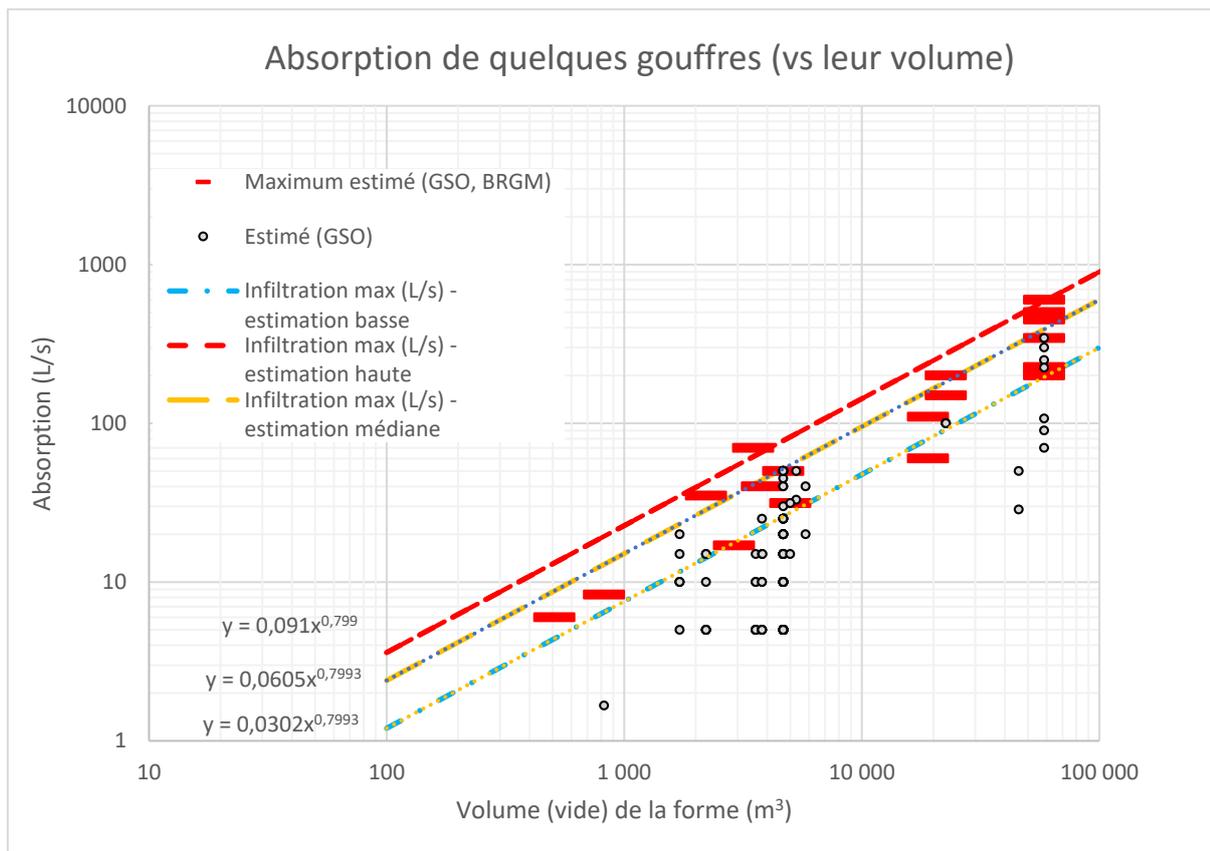


Figure 23 : Estimation de l'absorption maximale des gouffres à partir des données historiques (principalement).

Trois formules sont alors proposées pour estimer l'absorption maximale de ces formes karstiques (estimation haute, moyenne et basse). Elles sont ensuite utilisées sur les autres indices karstiques de la zone d'étude de manière à intégrer leur rôle au fonctionnement hydrogéologique du système.

Cependant, l'extrapolation à l'ensemble des 820 indices karstiques surestimerait l'infiltration réelle (en période de crue) car seuls les gouffres « actifs » boivent. Combien sont-ils et comment les reconnaître ?

L'étude des formes karstiques (cf. rapport n°1, Noury *et al.*, 2021) a proposé un critère de distinction entre gouffres et dolines à fond plat en fonction de la pente autour du point le plus bas de la forme. Pour mémoire, l'étude a considéré les pentes dans un rayon de 1,5 m autour du point le plus bas. Elle a mis en évidence que les gouffres connus ont dans leur grande majorité des pentes supérieures à 6°.

En prenant comme seuil la valeur de 6° de pente (valeur arbitraire, basée sur la distribution statistique des pentes dans les gouffres remarquables, cf. rapport n°1), nous obtenons un volume total de 252 585 m³.

Il faut ajouter à ces débits la valeur (estimée) des infiltrations par les forages absorbants de l'étang de la Retrève et des fosses Guillaume 1. Contrairement aux gouffres qui absorbent dès le début de leur remplissage, ces forages absorbants fonctionnent comme des surverses lorsque les retenues sont pleines. Sur la base d'une capacité d'absorption d'environ 30 l/s par ouvrage

(valeur plausible dans le calcaire de Beauce), nous pouvons considérer qu'une centaine de litres par seconde sont évacués au niveau de l'étang et une trentaine aux fosses Guillaume. Le rôle de l'évaporation par le plan d'eau est évidemment négligeable à l'échelle des épisodes de crue.

Ainsi à partir des relations empiriques identifiées sur la Figure 23, nous pouvons établir l'estimation des débits de pertes dans les gouffres et forages absorbants présentée au Tableau 8.

Gouffres retenus (pente > 6°)	Volume total Gouffres	BV3 (Amont Cercottes)	BV1 (Renard)	BV5 (Gidy-Cercottes)
	252 585 m³	190 215 m³	34 499 m³	27 871 m³
Infiltration max (L/s) - estimation haute	4436	3212	678	547
Infiltration max (L/s) - estimation médiane	2997	2171	462	365
Infiltration max (L/s) - estimation basse	1559	1131	246	182

Tableau 8 : Valeurs d'absorption maximale des gouffres selon 3 hypothèses.

2.4.4. Estimation des incertitudes

La forte incertitude qui pèse sur les mesures de débit d'absorption instantané et l'estimation du débit global de perte nous a conduit à faire les trois propositions (basse, médiane, haute). En examinant les facteurs de cette incertitude nous essayons ici de donner une préférence à l'une ou l'autre de ces propositions.

- Surestimation

Il faut garder à l'esprit que beaucoup de données historiques donnent des valeurs plus fortes que la situation actuelle. Des gouffres suivis et désobstrués par les spéléologues ont donné des valeurs que l'on ne peut appliquer aujourd'hui (*cf.* Rapport n° 1). Quelques valeurs excessives (telle la valeur d'1 à 1,5 m³/s au gouffre d'Ambert) ont été retirées du jeu de données car elles paraissent aujourd'hui improbables dans les conditions actuelles.

De plus, la méthode de mesure « au bouchon » utilisée par les spéléologues tend à surestimer les débits (Tableau 7). Il faudrait y appliquer en moyenne un coefficient correcteur de 0,6 qui varie cependant selon le contexte (forme et rugosité du lieu où se fait l'écoulement). Nous ne l'avons pas fait dans le jeu de données historiques ne sachant pas quelles étaient les conditions de mesures mais nous en tenons compte à présent dans l'analyse.

- Sous-estimation

D'un autre côté, les débits maximums sont difficiles à estimer car les écoulements sortent de leurs lits, deviennent turbulents et les sections d'écoulement sont plus complexes. Comment être sûr que les débits mesurés sont bien des maximum d'absorption ? En outre, comme nous l'avons vu, il peut y avoir plusieurs valeurs pour un même point selon l'hydraulicité ou la quantité de sédiments et débris végétaux obstruant le flux.

La façon de calculer ces débits de pertes par le calcul de la vidange du gouffre lorsque la pluie s'arrête, comme nous l'avons proposé pour les trois principaux gouffres (Figure 19), n'est pas non plus dénuée d'incertitudes. Le calcul n'est pas aussi simple que ce que nous avons appliqué, car le bassin versant continue à ruisseler après l'arrêt des précipitations poursuivant l'alimentation du gouffre. Il se perd donc un volume supérieur à ce que nous considérons par le volume seul du gouffre. Cette estimation tend donc à sous-estimer le débit réel de perte.

Par ailleurs, la méthode utilisée pour extrapoler à l'ensemble des gouffres actifs se base sur une valeur arbitraire de la pente autour de l'orifice d'absorption. Ainsi, selon le rapport n°1, si la pente est de 6°, 37 % des formes identifiées seraient des gouffres actifs. Mais avec une pente de 5° ce chiffre serait de 45 %. Le choix de la valeur de pente a donc une influence sur le nombre de gouffres et donc sur le débit de perte. Nous avons calculé les volumes concernés et les conséquences sur l'estimation du débit total par sous bassin (Tableau 9).

Valeur seuil (pente max autour du point bas)	Nombre de formes attribuées à la catégorie "Gouffre"	Volume total (m ³)	Bassin de la Retrève en amont de Cercottes	Bassin du fossé du Renard	Bassin de la Retrève entre Gidy et Cercottes
5°	261	291 207 m³	223 396 m³	37 600 m³	30 214 m³
Infiltration max (L/s) - estimation haute		5261	3901	752	608
Infiltration max (L/s) - estimation moyenne		3548	2631	512	405
Infiltration max (L/s) - estimation basse		1834	1360	271	203
6°	211	252 585 m³	190 215 m³	34 499 m³	27 871 m³
Infiltration max (L/s) - estimation haute		4436	3212	678	547
Infiltration max (L/s) - estimation moyenne		2997	2171	462	365
Infiltration max (L/s) - estimation basse		1559	1131	246	182
7°	181	238 670 m³	176 930 m³	34 140 m³	27 600 m³
Infiltration max (L/s) - estimation haute		4096	2891	665	539
Infiltration max (L/s) - estimation moyenne		2770	1958	454	359
Infiltration max (L/s) - estimation basse		1445	1024	242	180

Tableau 9 : Valeurs d'absorption maximale des gouffres selon 3 hypothèses.

Constatant que la quinzaine de gouffres du Tableau 7 qui appartient au bassin de la Retrève représente à elle seule 1,15 m³/s nous pensons que **les estimations basses sont toutes sous-estimées**. Même s'il s'agit des gouffres principaux, cette liste comporte des absents notoires qui

n'ont pas pu faire l'objet d'une estimation de la capacité maximale d'absorption telle les fosses Guillaume 1 ou les Orfosses mouillées.

D'autre part, l'extrapolation n'a pu considérer que les gouffres pour lesquels nous pouvions calculer le volume à partir du LIDAR, ce qui a laissé de côté 246 formes qui étaient en eau. Certes la plupart sont des mares ou des dolines qui n'ont pas de capacité d'absorption rapide et ne jouent donc pas de rôle dans la réduction du débit de crue. Cependant, comme évoqué dans le rapport n°1, le fait qu'il ait plu durant le mois, et même la semaine qui a précédé le vol d'acquisition des données, conduit à nuancer cette analyse. La mise de côté des formes remplies d'eau conduit donc, elle aussi, à une sous-estimation des débits de pertes.

2.5. CONCLUSION

Le manque de données, et en particulier le faible nombre de mesures directes en comparaison avec le nombre de gouffres conduit à de fortes incertitudes pour estimer les débits d'absorption. S'il est possible que la relation empirique élaborée maximalise les débits d'absorption car les données anciennes étaient, d'une part plus optimistes, d'autre part concernaient des gouffres désobstrués ou moins comblés qu'aujourd'hui, l'analyse des autres facteurs d'incertitude conduit finalement à ne retenir que les hypothèses moyenne à haute avec une préférence pour l'hypothèse moyenne.

Avec la prise en compte des forages absorbants de l'étang de la Retrève, les valeurs estimées des débits infiltrés, à considérer dans la modélisation des débits de crue de la Retrève sont les suivantes :

- bassin de la Retrève en amont de Cercottes (Longs Domaines) : 2,2 m³/s ;
- bassin du fossé du Renard : 0,5 m³/s ;
- portion entre Cercottes et Gidy : 0,4 m³/s.

3. Étude pluviométrique

3.1. TRAITEMENT DES DONNÉES

La carte de la Figure 24 présente la grille Aurelhy de Météo France qui correspond à la moyenne annuelle interannuelle des précipitations sur 30 ans de 1980 à 2010. L'intensité pluviométrique en tête de bassin versant et au Sud de la Retrève est plus importante.

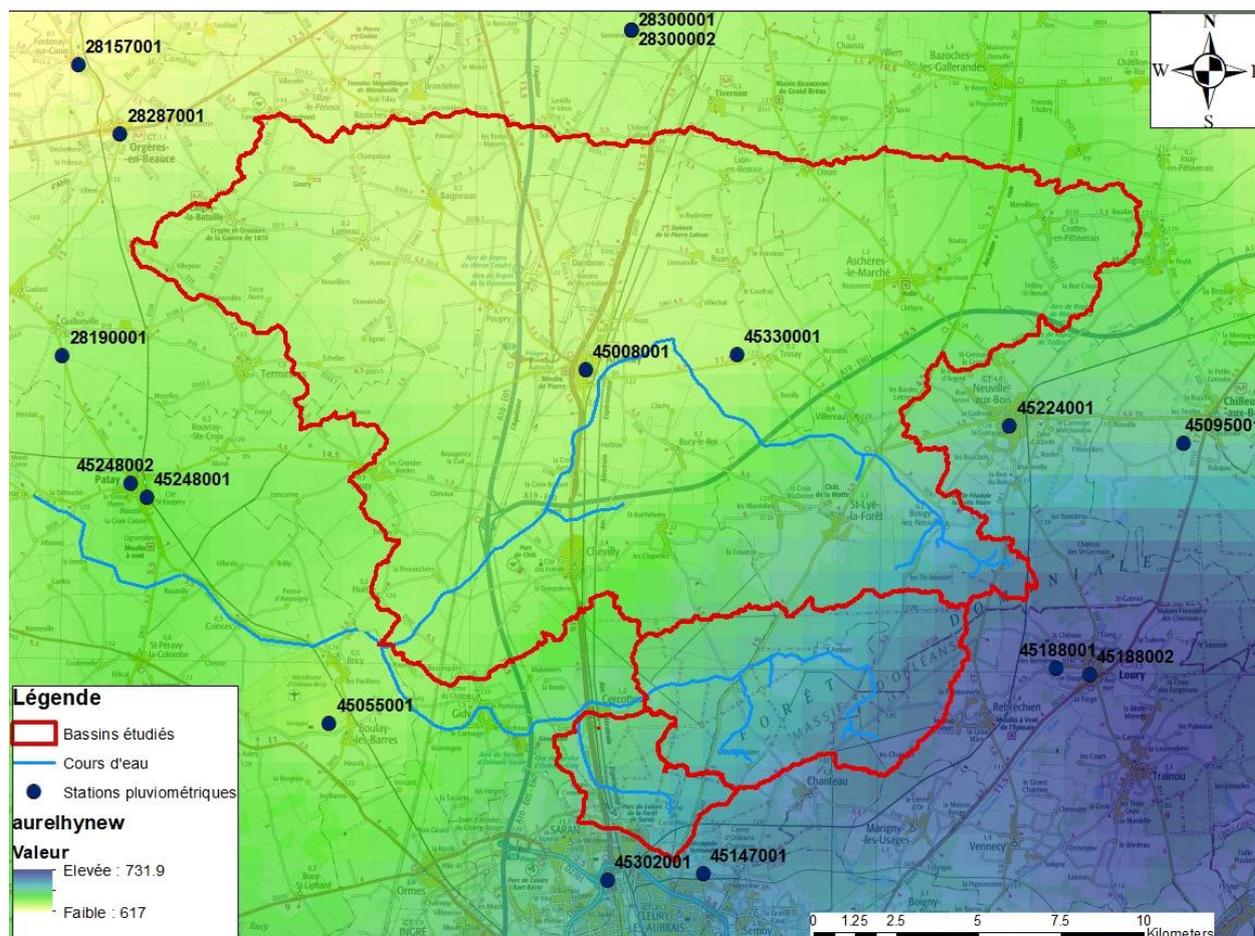


Figure 24 : Pluviométrie moyenne annuelle interannuelle sur 30 ans (1980-2010) - Grille Aurelhy Météo France et localisation des postes climatiques à proximité de la zone d'étude.

Les données climatiques ont été obtenues auprès de Météo France. Il s'agit de données journalières :

- de précipitations au poste de Loury de décembre 1971 à décembre 2020. Le poste est actuellement fermé ;
- de précipitations au poste de Bricy d'octobre 1937 à avril 1940 puis de mars 1946 à aujourd'hui.

- de précipitations et d'ETP (évapotranspiration) du modèle Safran⁴ de Météo France sur des mailles de 8 km x 8 km (Figure 25) de janvier 1958 à décembre 2020.

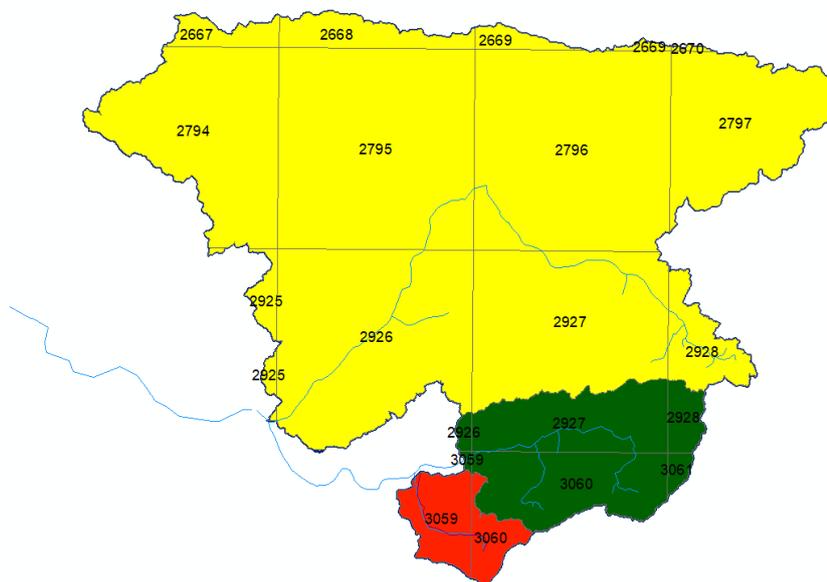
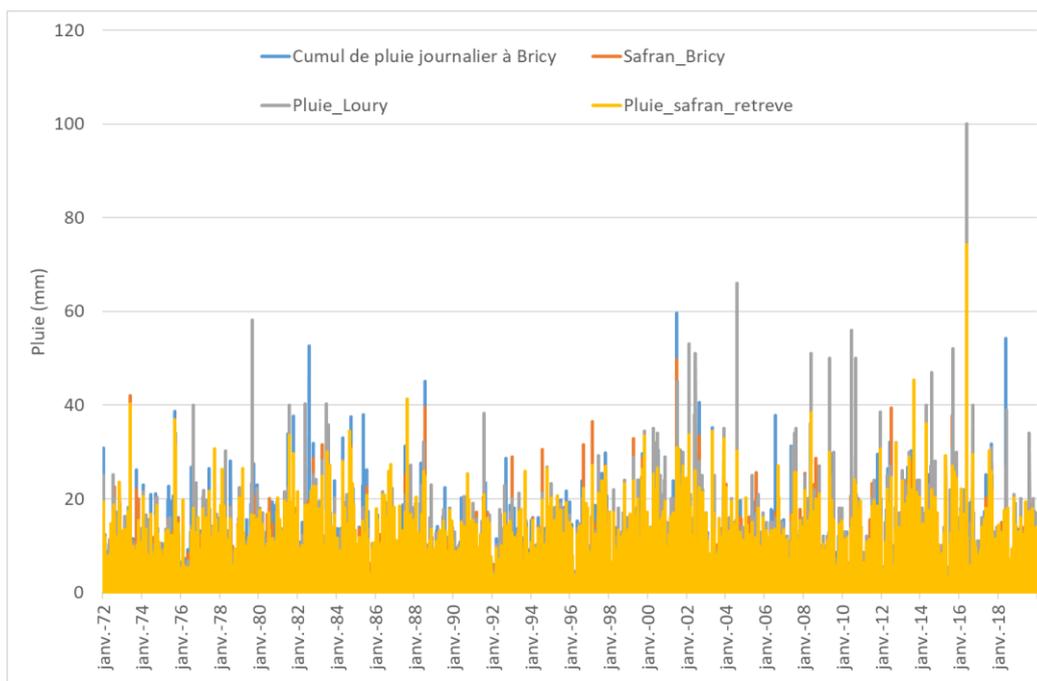


Figure 25 : Grille et numéros de maille Safran sur les bassins versants étudiés.

Similairement à ce qui a été constaté sur la grille des pluies Aurhely de Météo France, l'analyse des chroniques journalières des pluies montre que la moyenne annuelle interannuelle des pluies est supérieure à Loury qu'à Bricy. La moyenne des pluies Safran au niveau du poste de Bricy est inférieure à la moyenne au poste lui-même. Et la moyenne annuelle interannuelle des pluies Safran sur le bassin de la Retrève aux Longs Domaines se situe entre les valeurs moyennes des deux postes bien que plus proche du poste de Loury. Il en est de même pour les valeurs maximales des chroniques, à la date du 30 mai 2016 ; le cumul des pluies journalières à Loury s'élève à 100 mm tandis qu'à Bricy il vaut 63,4 mm. Les cumuls de pluies moyennes Safran sur la Retrève et sur le bassin du Renard sont très élevés également (74,2 mm et 75,7 mm respectivement). On voit d'ailleurs, sur les graphiques des pluies journalières, que le pic des pluies journalières à Loury présente un caractère encore plus exceptionnel qu'à Bricy.

⁴ Le système SAFRAN est un modèle d'analyse de la distribution de paramètres météorologiques (dont les précipitations, distribué selon un maillage irrégulier, qui utilise à la fois les observations sol et altitude des réseaux français et un modèle climatique. Il est particulièrement bien adapté pour alimenter les modèles hydrologiques, en particulier en zone de plaine.



Période	Pluie_Bricy	Safran_Bricy	Pluie_Loury	Pluie_safran Retrève
Moyenne 1972 – 2019 (en mm/j)	1.8	1.7	2.0	1.9
Moyenne 1972 – 2019 (en mm/an)	645.2	631.3	727.1	706.5

Figure 26 : Chroniques pluviométriques journalières et leurs moyennes sur la période 1972-2019 aux postes de Bricy (en bleu), de Loury (en gris) et sur la maille Safran du poste de Bricy et la moyenne des mailles Safran sur le bassin.

date	Pluie Bricy	Safran Bricy	Pluie Loury	Pluie_safran Retrève	Pluie_safran Renard	Pluie_safran Nan
Cumul journalier le 30/05/2016 (mm/jour)	<u>63.4</u>	<u>62</u>	<u>100</u>	<u>74.2</u>	<u>75.7</u>	<u>55.5</u>
Intensité horaire du 30/05/2016	2.64	2.58	4.17	3.09	3.15	2.31

Tableau 10 : Cumuls des pluies journalières et intensité horaire le 30/05/2016 pour les différentes données disponibles.

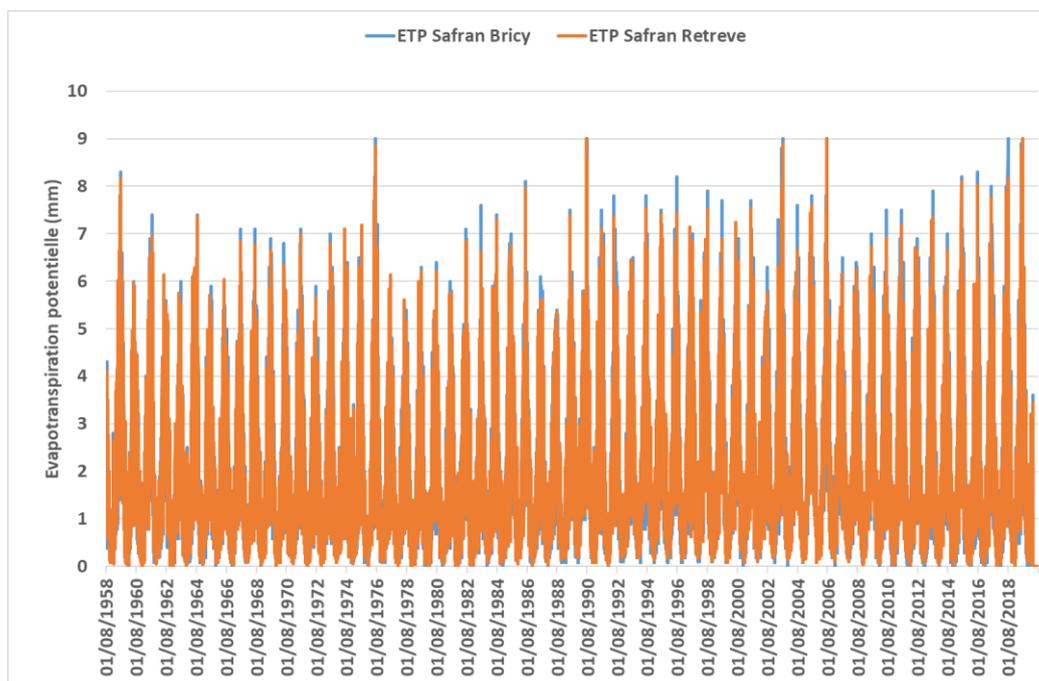


Figure 27 : Chroniques d'évapotranspiration potentielle au poste de Bricy et à la maille Safran correspondante.

3.2. ESTIMATION DES QUANTILES DE PLUIE

L'estimation des quantiles de pluies s'effectue à partir des chroniques des maxima annuels déduits des chroniques des pluies journalières.

Différentes lois, dont Gumbel et GEV, ont été testées sur la période des données disponibles. Les résultats des ajustements peuvent être évalués visuellement ou par un estimateur (pvalue) issu du test de Kolmogorov Smirnov⁵.

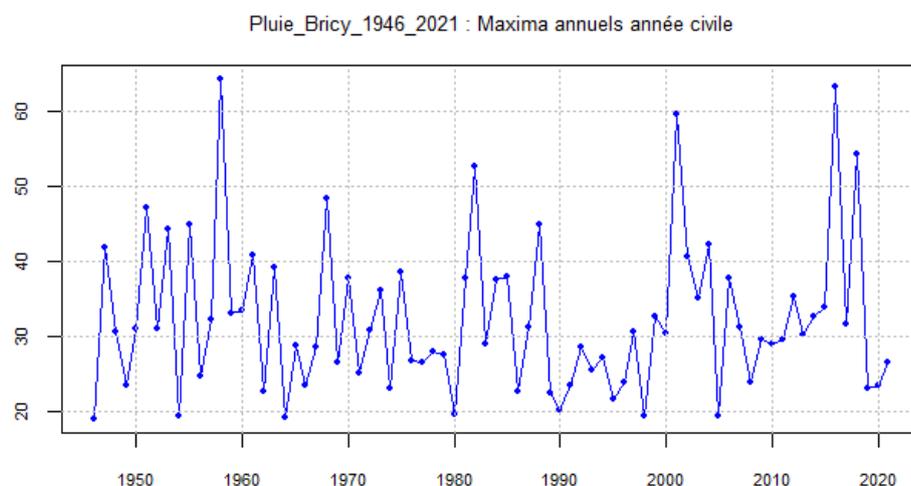
Les deux lois, Gumbel et GEV, apportent des résultats satisfaisants (pvalue > 0.9) mais seule la loi de Gumbel a été retenue pour la cohérence avec la suite de l'étude.

3.2.1. Données de pluies au poste de Bricy

Les maxima annuels de la station de Bricy sont illustrés sur la Figure 28. Par ailleurs, on s'aperçoit qu'à ce poste, les maximums mensuels sont atteints généralement en automne, au mois d'octobre particulièrement mais il y a également une forte proportion au mois de mai (comme l'événement de 2016).

L'ajustement de Gumbel sur la série de données est présenté sur la Figure 29, avec les intervalles de confiance à 70 % et 95 %. On voit que certains points de l'échantillon se situent sur l'intervalle à -90 % ; d'où l'importance de considérer ces incertitudes dans les estimations des quantiles de pluies et ultérieurement dans les calculs des débits de projet.

⁵ En statistiques, le test de Kolmogorov-Smirnov est un test d'hypothèse utilisé pour déterminer si un échantillon suit bien une loi donnée connue par sa fonction de répartition continue, ou bien si deux échantillons suivent la même loi.



Nombre d'années : 76 de 1946 à 2021

Nombre d'années manquantes (ou éliminées) : 0

Moyenne : 32.237

Médiane : 30.5

Ecart-type : 10.221

Minimum : 19

Maximum : 64.4

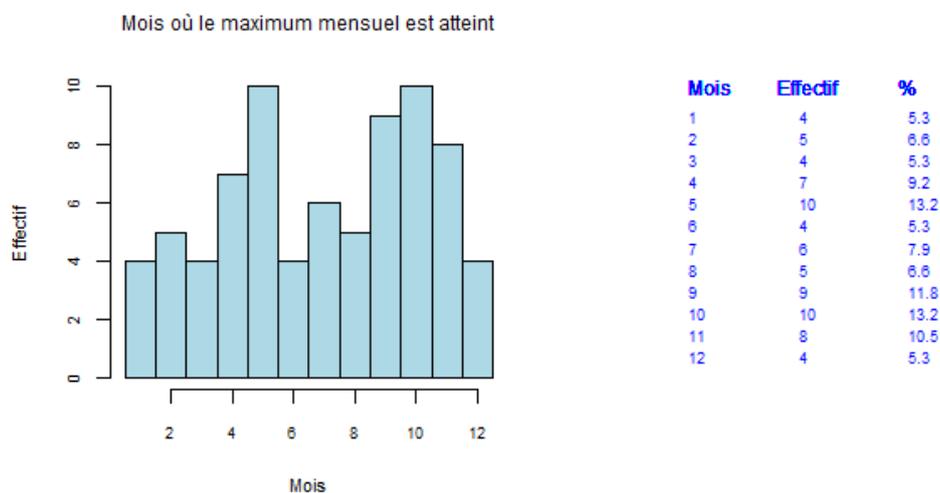


Figure 28 : Chroniques des maxima annuels des pluies au poste de Bricy (en haut) et nombre d'années (effectif) où le maximum mensuel pluviométrique est atteint pour chaque mois pour la station de Bricy (en bas).

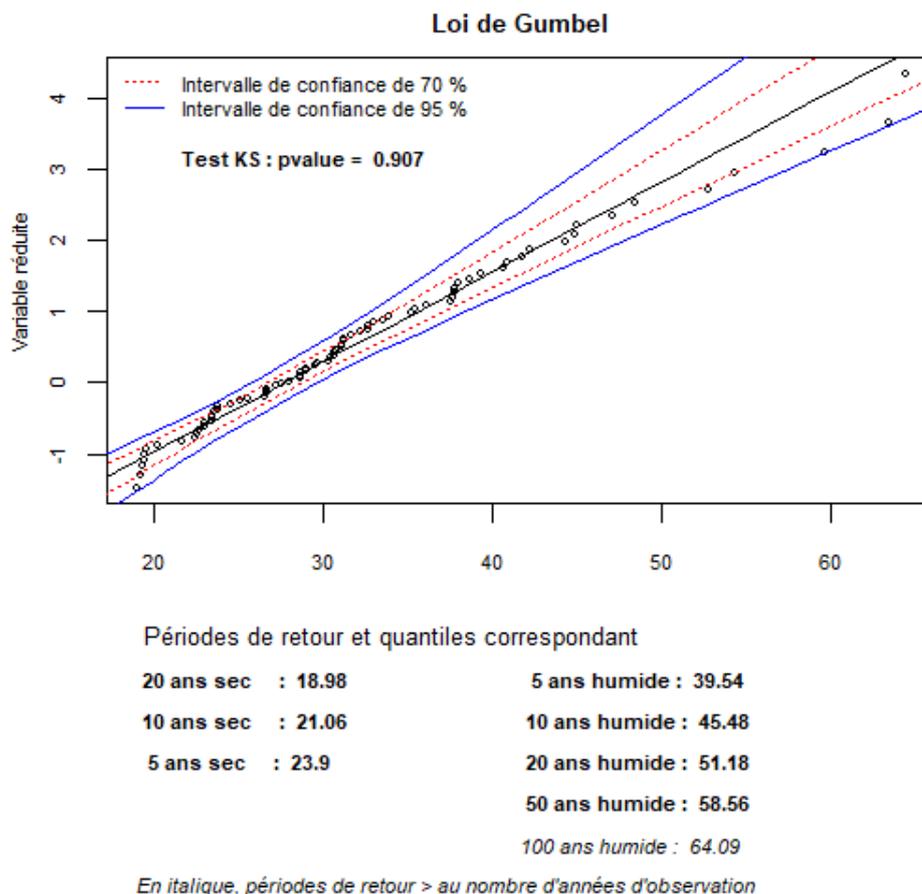


Figure 29 : Ajustement de Gumbel sur les pluies au poste de Bricy (cumuls journaliers de pluies en mm).

3.2.2. Données de pluies au poste de Loury

La série des maxima annuels de la chronique de Loury n'est pas homogène sur la période des données disponibles. La méthode de Sen (Figure 30) décompose en deux moitiés la série pluviométrique des maxima annuels, puis réalise une corrélation entre ces deux séries. Il apparaît clairement que la deuxième moitié (période plus récente) présente des maxima annuels supérieurs à la première moitié (période plus ancienne).

Une tendance à la hausse étant effectivement observée sur les maxima annuels des pluies journalières à la station de Loury pour la période 1972-2019 (Figure 31) ; les ajustements statistiques ne peuvent être effectués.

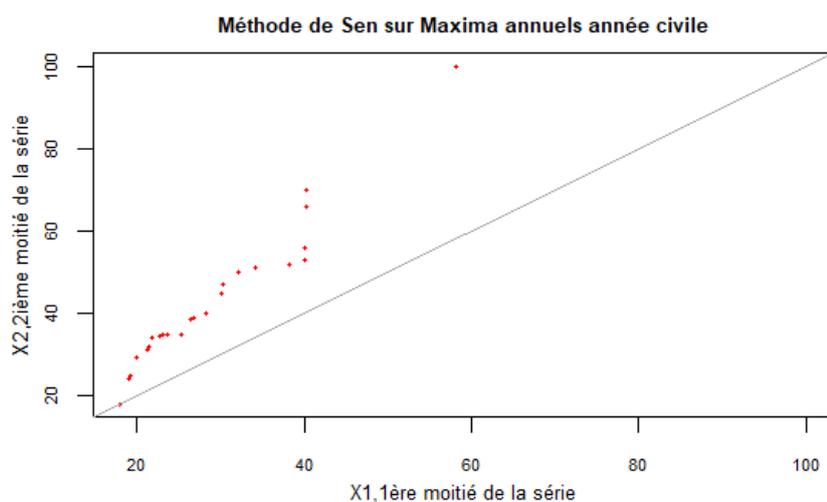
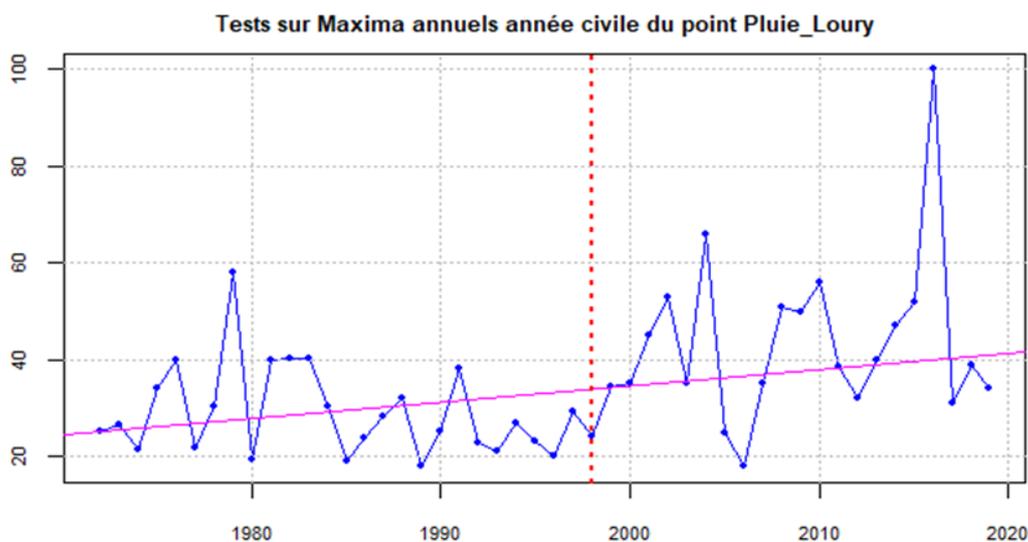


Figure 30 : Méthode de Sen sur maxima annuels des données pluviométriques.



Test de tendance

Mann-Kendall : pvalue non corrigée : 7.059e-03 corrigée (Hamed-Rao) : 7.059e-03
pvalue selon méthode Yue-Pilon : 2.407e-02 et selon méthode Zhang 2.525e-02

Calcul de la pente

selon la méthode de Sen (cm/an): 0.3333

Test de rupture (Pettitt)

pvalue : 0.004 à la date 1998

Test d'homogénéité de Wilcoxon

pvalue : 4.703e-01

Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz et autocorrélation

pvalue : 4.318e-03 Autocorrélation d'ordre 1 : 0.245

NB. La droite de tendance et la date de rupture sont indiquées sur le graphique si resp. les tests de Mann-Kendall (corrigé ou non) et de Pettit sont rejetés au seuil de 5%

Figure 31 : Test de tendance sur maxima annuels à la station Loury.

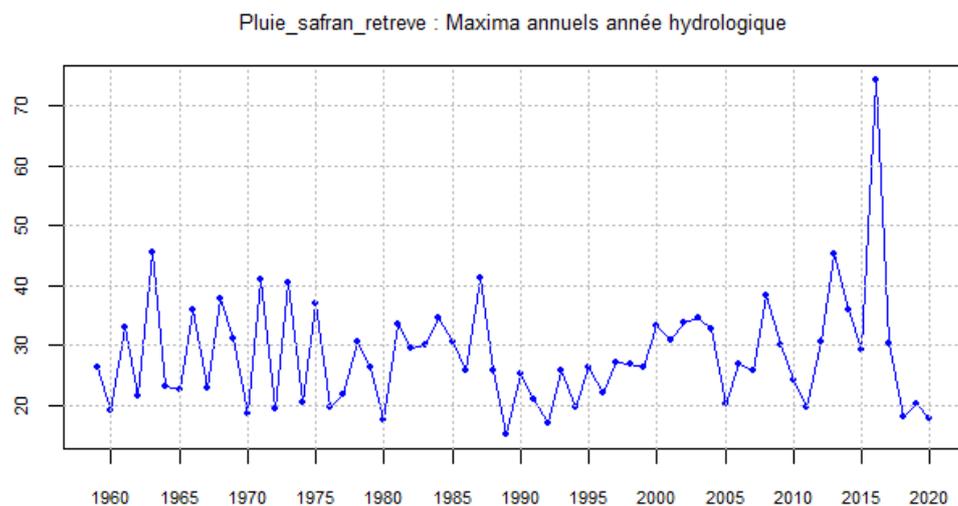
3.2.3. Données de pluies Safran moyennées sur le bassin de la Retrève aux Longs Domaines

Les données de pluies Safran moyennées sur le bassin de la Retrève présentent un pic exceptionnel en 2016 : 74,6 mm alors que la moyenne des maxima annuels vaut 28,5 mm et les autres pics maximaux autour de 45 mm (Figure 32).

D'ailleurs sur l'ajustement de Gumbel, cette valeur extrême de 2016 sort des intervalles de confiance. Le quantile 100 ans humide se situe autour de 57,9 mm pour le bassin de la Retrève.

C'est pendant l'automne que les maxima mensuels sont les plus élevés de l'année.

On s'aperçoit que les ajustements statistiques pour une période de retour 100 ans avec les pluies Safran donnent des valeurs inférieures aux observations, ce qui signifie que la période retour de l'épisode de 2016 est bien au-delà de la centennale, Elle est probablement bicentennale bien qu'il soit hasardeux de définir une période de retour dans de tels extrêmes.



Nombre d'années : 62 de 1959 à 2020

Nombre d'années manquantes (ou éliminées) : 0

Moyenne : 28.537

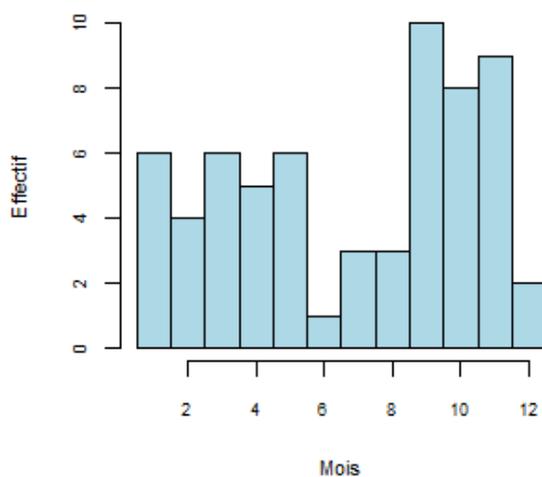
Médiane : 26.686

Ecart-type : 9.438

Minimum : 15.244

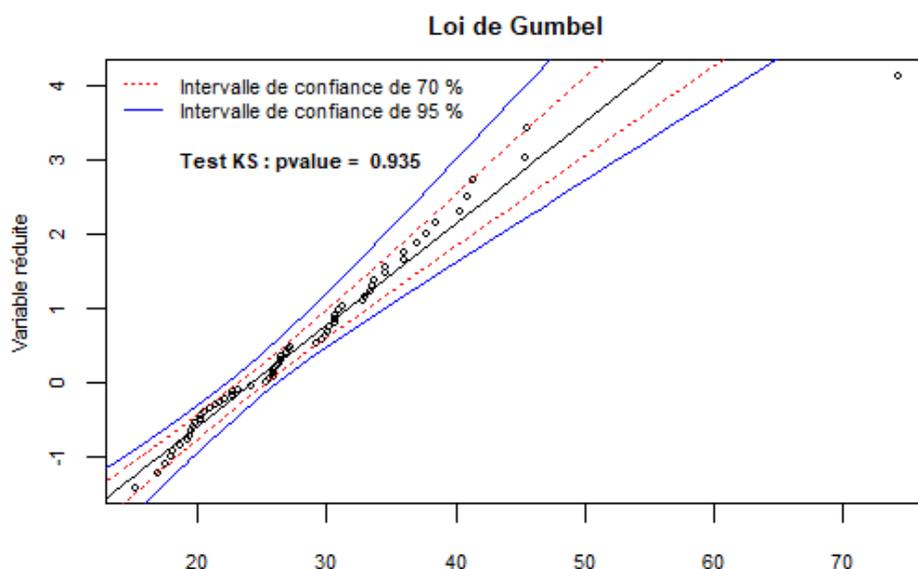
Maximum : 74.26

Mois où le maximum mensuel est atteint



Mois	Effectif	%
1	6	9.5
2	4	6.3
3	6	9.5
4	5	7.9
5	6	9.5
6	1	1.6
7	3	4.8
8	3	4.8
9	10	15.9
10	8	12.7
11	9	14.3
12	2	3.2

Figure 32 : Chroniques des maxima annuels des pluies (en mm) Safran moyennées sur le bassin de la Retrève aux Longs Domaines (en haut) et le nombre d'années (effectif) où le maximum mensuel pluviométrique est atteint pour chaque mois (en bas).



Périodes de retour et quantiles correspondant

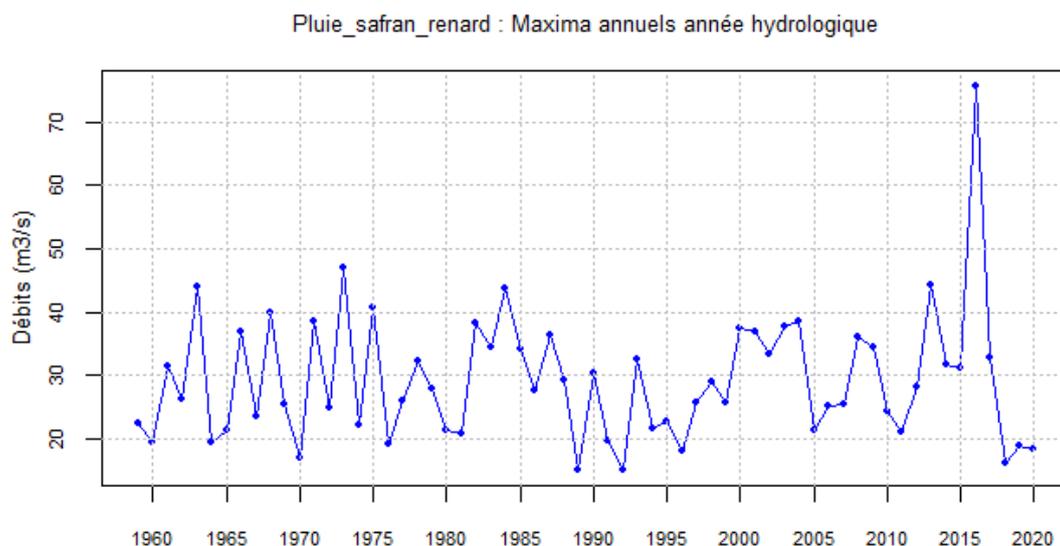
20 ans sec : 16.32	5 ans humide : 35.27
10 ans sec : 18.24	10 ans humide : 40.75
5 ans sec : 20.85	20 ans humide : 46
	50 ans humide : 52.8
	100 ans humide : 57.9

En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

Figure 33 : Ajustement de Gumbel sur les pluies journalières moyennées des mailles Safran sur le bassin de la Retrève aux Longs Domaines.

3.2.4. Données de pluies Safran moyennées sur le bassin du Renard

Comme pour les pluies Safran sur le bassin de la Retrève ; l'année 2016, avec son pic à 75,7 mm, présente un caractère exceptionnel vis-à-vis des maxima annuels pluviométriques. La loi du Gumbel donne une estimation pour le quantile 100 ans humide autour de 60,8 mm. Les mois d'automne sont les plus arrosés, et en particulier le mois de novembre.



Nombre d'années : 62 de 1959 à 2020

Nombre d'années manquantes (ou éliminées) : 0

Moyenne : 29.294

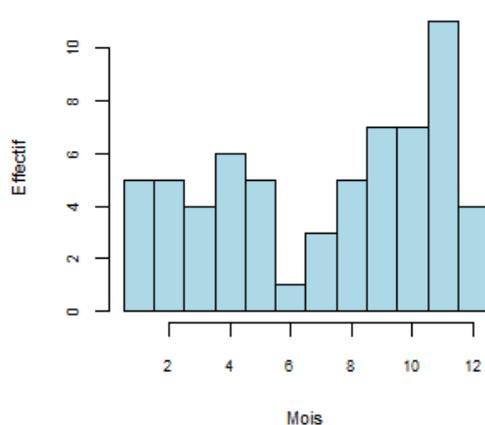
Médiane : 27.75

Ecart-type : 10.145

Minimum : 15.135

Maximum : 75.67

Mois où le maximum mensuel est atteint



Mois	Effectif	%
1	5	7.9
2	5	7.9
3	4	6.3
4	6	9.5
5	5	7.9
6	1	1.6
7	3	4.8
8	5	7.9
9	7	11.1
10	7	11.1
11	11	17.5
12	4	6.3

Figure 34 : Chroniques des maxima annuels des pluies Safran moyennées sur le bassin du Renard (en haut) et le nombre d'années (effectif) où le maximum mensuel pluviométrique est atteint pour chaque mois (en bas).

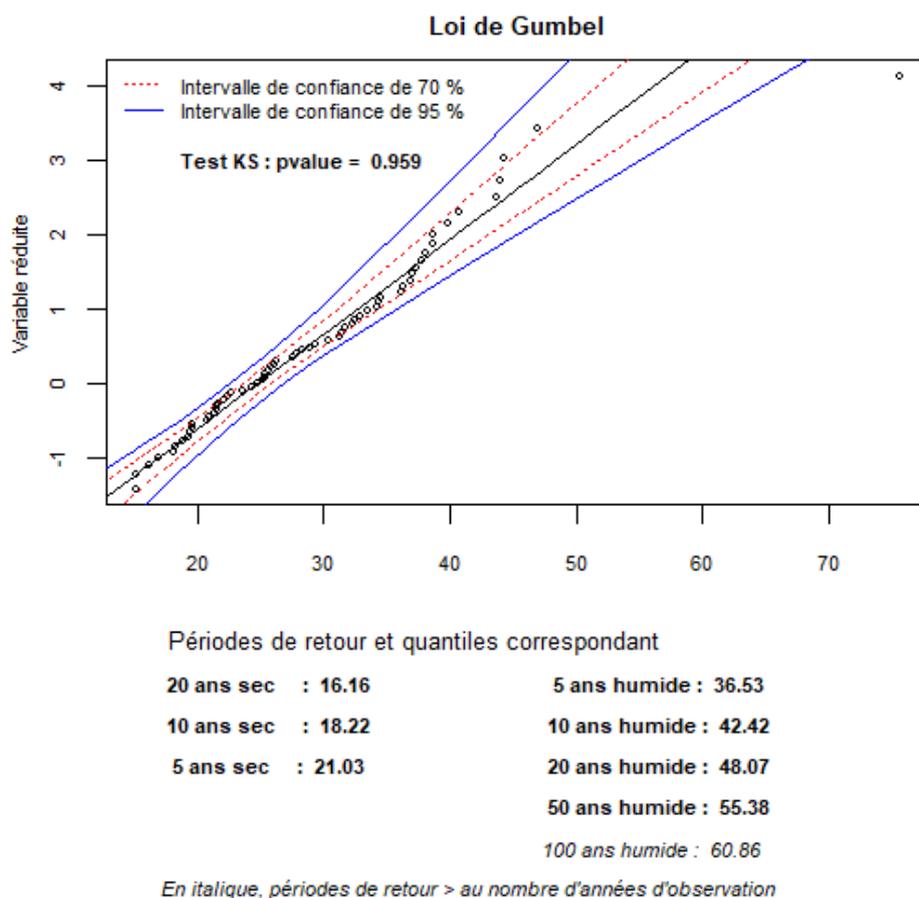
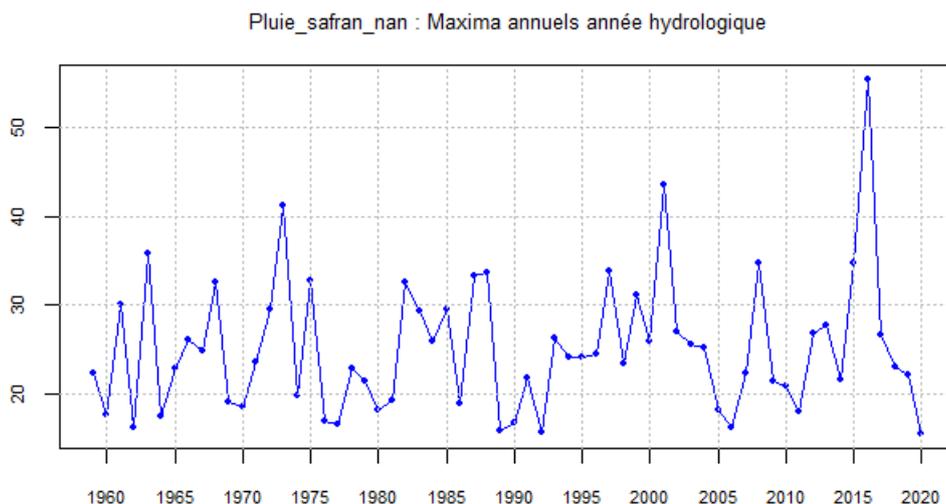


Figure 35 : Ajustement de Gumbel sur les pluies journalières moyennes des mailles Safran sur le bassin du Renard.

3.2.5. Données de pluies Safran moyennées sur le bassin du Nan

La série des maxima annuels des pluies Safran moyennées sur le bassin du Nan présente également un pic relativement exceptionnel pour l'année 2016 de 55.5 mm, tandis que le quantile 100 ans humide s'élève à 48,8 mm avec la loi de Gumbel.

Les maxima mensuels pluviométriques sont plus souvent atteints en automne mais leur répartition est plus distribuée sur l'année que pour les autres bassins (Retrève et Renard).



Nombre d'années : 62 de 1959 à 2020
 Nombre d'années manquantes (ou éliminées) : 0
 Moyenne : 25.165
 Médiane : 23.827
 Ecart-type : 7.609
 Minimum : 15.551
 Maximum : 55.46

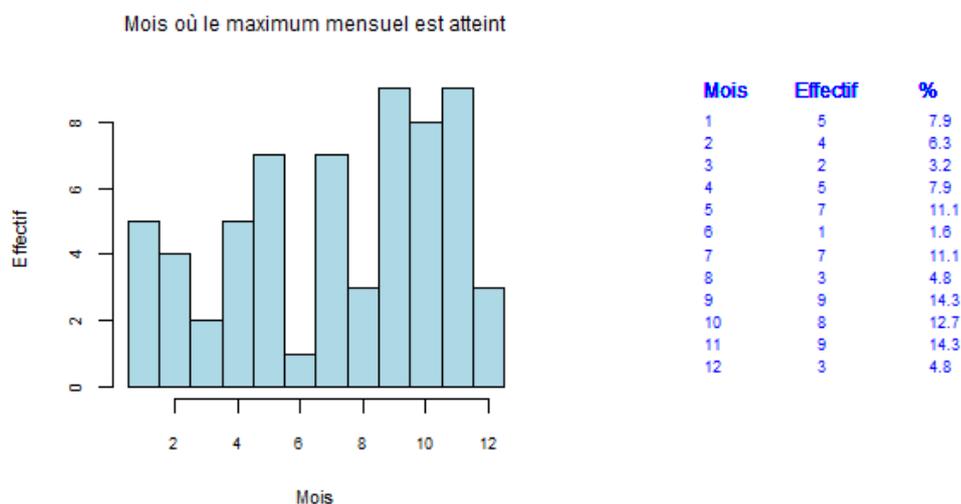


Figure 36 : Chroniques des maxima annuels des pluies Safran moyennées sur le bassin du Nan (en haut) et le nombre d'années (effectif) où le maximum mensuel pluviométrique est atteint pour chaque mois (en bas).

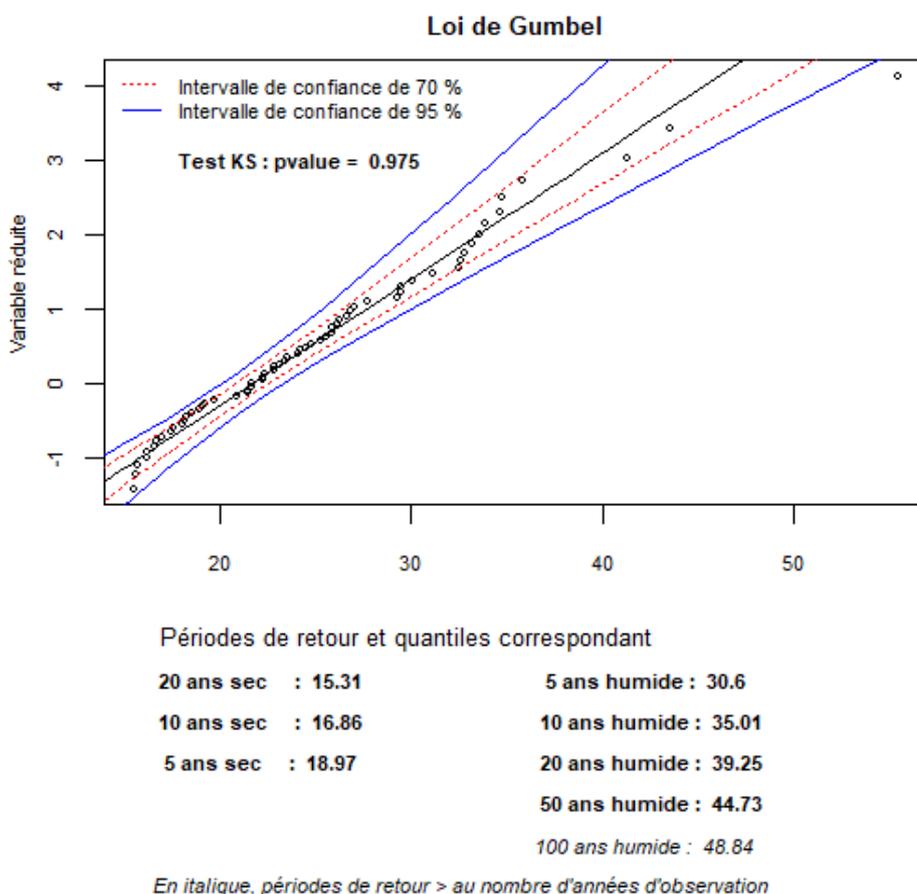


Figure 37 : Ajustement de Gumbel sur les pluies Safran moyennes sur le bassin du Nan.

3.2.6. Synthèse des quantiles de pluies calculés

Le Tableau 11 récapitule les quantiles humides de pluies calculés avec les différentes données journalières (poste de Bricy, moyenne Safran sur les bassins de la Retrève, du Renard et du Nan).

Afin de se rendre compte des incertitudes sur les ajustements statistiques réalisés, les quantiles humides selon les intervalles à +/-70 % et +/-95 % sont également présentés dans le Tableau 13.

Les quantiles de pluie ont également été calculés avec les coefficients de Montana⁶, obtenus auprès de Météo France (Tableau 12). Trois intensités de pluie (12 h, 24 h et 48 h) apparaissent dans le tableau selon différentes périodes de retour. Les intensités 24 h Montana sont nettement supérieures aux quantiles humides calculés selon l'ajustement de Gumbel sur les chroniques de pluie journalières.

⁶ Les coefficients de Montana permettent de déterminer pour un intervalle de temps compris entre 2 pas de temps (ou durées de cumul) non consécutifs la hauteur de pluie ou l'intensité maximale selon différentes durées de retour. Les pas de temps pris en compte sont : 6min, 15 min, 30min, 1h, 2h, 3h, 6h, 12h, 24h, 48h, 96h, 192h. Les durées de retour étudiées sont : 5 ans, 10 ans, 20 ans, 30 ans, 50 ans et éventuellement 100 ans (Source : Météo France)

Périodes de retour	Intensités (mm/jour) (ajustement Gumbel) sur 24h				
	Bricy _Poste Gumbel	Bricy _Safran	Safran _Retrève _amont	Safran _Nan	Safran _renard
T5	39.5	34.3	35.3	30.6	36.5
T10	45.5	39.3	40.7	35	42.4
T20	51.2	44.3	46	39.2	48.1
T50	58.6	50.3	52.8	44.7	55.4
T100	64.1	55	57.9	48.8	60.9

Tableau 11 : Synthèse des quantiles humides de pluies estimés avec les ajustements de Gumbel.

Périodes de retour (année)	Coefficients de Montana (12h à 48h)		Intensités (mm/jour)		
	a	b	12h	<u>24h</u>	48h
T5	594	0.779	84.7	<u>49.4</u>	28.8
T10	774	0.796	98.7	<u>56.9</u>	32.8
T20	995	0.814	112.8	<u>64.1</u>	36.5
T30	1138	0.825	120.0	<u>67.7</u>	38.2
T50	1353	0.839	130.1	<u>72.7</u>	40.7
T100	1674	0.856	143.9	<u>79.5</u>	43.9

Tableau 12 : Quantiles de pluies (12 h, 24 h et 48 h) calculés avec les coefficients de Montana.

		Intensité (mm/jour) (ajustement Gumbel) sur 24h intervalle à -70%					Intensité (mm/jour) (ajustement Gumbel) sur intervalle à -95%				
		Bricy_Poste_Gumbel	Bricy_Safran	Safran_Retrève_amont	Safran_Nan	Safran_renard	Bricy_Poste_Gumbel	Bricy_Safran	Safran_Retrève_amont	Safran_Nan	Safran_renard
T5		37.7	32.5	33.4	29	34.5	36	30.9	31.6	27.7	32.6
T10		42.9	36.9	38.2	32.9	39.6	40.7	34.7	35.8	31.1	37.1
T20		48	41	42.7	36.6	44.5	45.1	38.3	39.8	34.3	41.4
T30											
T50		54.5	46.4	48.6	41.4	50.9	50.8	42.9	44.9	38.4	46.9
T100		59.3	50.4	53	44.9	55.6	55.1	46.4	48.7	41.4	50.9

		Intensité (mm/jour) (ajustement Gumbel) sur 24h intervalle à +70%					Intensité (mm/jour) (ajustement Gumbel) sur intervalle à +95%				
		Bricy_Poste_Gumbel	Bricy_Safran	Safran_Retrève_amont	Safran_Nan	Safran_renard	Bricy_Poste_Gumbel	Bricy_Safran	Safran_Retrève_amont	Safran_Nan	Safran_renard
T5		41.4	36	37.2	32.1	38.6	43.1	37.6	38.9	33.5	40.4
T10		48	41.7	43.3	37.1	45.2	50.3	43.8	45.7	39	47.7
T20		54.4	47.1	49.3	41.9	51.6	57.2	49.8	52.2	44.2	54.7
T30											
T50		62.7	54.2	57	48.1	59.9	66.3	57.7	60.7	51.1	63.9
T100		68.9	59.5	62.8	52.8	66.1	73.1	63.5	67.1	56.3	70.8

Tableau 13 : Synthèse des quantiles de pluies estimés sur les intervalles à +/- 70 % et +/-95 % avec les ajustements de Gumbel.

4. Étude hydrologique

Le but de l'étude hydrologique est de définir, à la sortie de la Forêt d'Orléans (entrée du modèle du CEREMA), le débit de la crue de 2016 et quelques débits de projet, c'est-à-dire les débits maxima instantanés des crues de période de retour variable.

La définition des périodes de retour s'est faite en concertation avec la DDT, le CEREMA et le BRGM après l'analyse des résultats de la simulation de la crue de 2016.

Concrètement, il s'agissait de déterminer pour la Retrève aux Longs Domaines et pour le Renard, les débits de pointe et la forme probable de l'hydrogramme de la crue de 2016, ainsi que pour certaines périodes de retour. Pour le Nan, les calculs des intensités pluviométriques ont été menés (cf. chapitre précédent) mais aucune information sur les débits n'a pu être fournie du fait de l'absence totale de données de débit observé à la confluence avec la Retrève.

La méthodologie utilisée est la suivante :

- l'utilisation de la formule empirique (méthode rationnelle $Q=C.i.A$ (C :coeff de ruissellement, i : intensité de la pluie; A : surface) pour la définition des débits de pointe (maximums instantanés)
- L'utilisation du logiciel GARDENIA⁷ (d'un point de vue théorique, car trop peu de données observées sont disponibles pour une calibration dans les règles de l'art) pour la définition de la forme de l'hydrogramme.

La méthodologie s'appuie sur les quelques informations hydrométriques existantes et les observations de terrain décrites au Chapitre 2.

4.1. MÉTHODE D'ESTIMATION DES DÉBITS DE POINTE

4.1.1. Méthode rationnelle

Suite à l'absence de données, l'estimation du débit décennal ne peut être déterminée par ajustement. Les débits ont donc été calculés à l'aide de la méthode rationnelle.

Cette méthode suppose :

- que l'intensité de l'averse est uniforme dans le temps et sur toute la superficie du bassin ;
- que le débit est maximum lorsque la superficie totale du bassin contribue à l'écoulement

$$Q_p(T) = k \cdot C(T) \cdot I(t_c, T) \cdot A$$

⁷ GARDENIA est un modèle hydrologique global développé au BRGM. Il est en libre accès (Version 8.7) : <https://www.brgm.fr/fr/logiciel/gardenia-logiciel-modelisation-hydrologique-globale-bassin-versant>. Trois rapports BRGM téléchargeables constituent sa documentation RP-67797-FR : notice d'utilisation ; RP-61720-FR : didacticiel (exemples) ; RP-6500-FR : validation du code de calcul par modélisations physiques comparatives

Avec :

$Q_p(T)$ est le débit de pointe de crue (en m^3/s) de période de retour T ;

$C(T)$ le coefficient de ruissellement pour la période de retour T ($0 < C <= 1$) ;

$I(t_c, T)$ l'intensité d'une averse dont la durée est égale au temps de concentration t_c du bassin pour la période de retour T ;

A la superficie du bassin versant en km^2 ;

k un coefficient d'ajustement fonction des unités utilisées ($k = 1/3,6$, pour A en km^2 et I en mm/h).

4.1.2. Méthode du GRADEX

Afin de réaliser une évaluation du débit maximum instantané de fréquence centennale, la méthode du GRADEX⁸ est utilisée. Elle présente l'intérêt de tenir compte de l'information « pluie » pour compléter l'information "débit" qui est en général plus courte. Généralement les échantillons de débits sont beaucoup moins étoffés que les échantillons de pluie. Ceci veut dire que si l'on se base uniquement sur l'échantillon de débit on aura du mal à dépasser en extrapolation des durées de retour de l'ordre de 10 ou 20 ans. Au contraire, les échantillons de pluie étant généralement plus longs, il sera plus facile de déterminer avec suffisamment de précision la valeur centennale, millénaire par exemple. Dans le cas de notre étude, l'information débit est extrêmement limitée puisqu'aucune station ne mesure ce paramètre en continu. Seuls les jaugeages réalisés lors de cette étude donnent quelques indications.

Pour toute pluie P reçue par le bassin supérieur à P_0 , l'écoulement serait intégral. Si on note T_0 la période de retour correspondant au seuil P_0 pour lequel la saturation d'équilibre du sol est atteinte, alors l'écoulement généré par $P_0(T_0)$ sera un débit $Q(T_0)$ de même période de retour. Il est appelé "la charnière ou débit de saturation".

Ainsi, pour tout $T > T_0$, la courbe des débits va tendre vers une loi de Gumbel (donc une droite) parallèle à la droite des pluies extrêmes.

On peut considérer, en l'absence de données de débits que $T_0 = 10$ ans. C'est la loi de probabilité de Gumbel qui permettra de calculer le débit max par Gradex pour la période de retour T :

$$Q(T) = Gd(t_c) * [y(T) - 2.25] + Q(10)$$

Où $y(T)$ est la variable réduite de Gumbel pour la période de retour T .

Pour mémoire, le calcul de $Q(T_0)$ a été faite avec la méthode rationnelle dans cette étude.

Il s'agit d'appliquer la méthode du GRADEX après la fréquence décennale (correspondante à la valeur « pivot ») pour l'extrapolation à la fréquence centennale. Cela revient à considérer qu'au-delà du point pivot, toute l'augmentation de la pluie contribue directement et intégralement au ruissellement (Figure 38). La valeur utilisée est le Gradex de durée égale au temps de concentration retenu pour le bassin versant.

⁸ GRADEX : Gradient des valeurs extrêmes (collectif, 1994).

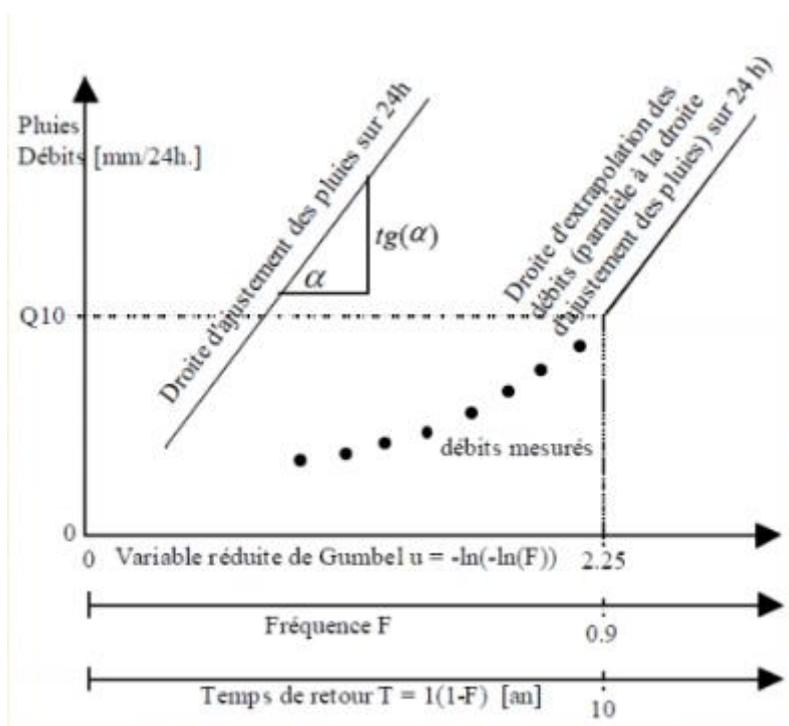


Figure 38 : Méthode d'estimation des débits centennaux par la méthode du GRADEX. Exemple pour un temps de concentration de 24 h.

4.2. CALCUL DES DÉBITS DE PROJET

4.2.1. Calcul du temps de concentration des bassins

Le temps de concentration (t_c) est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée "hydrologiquement" de l'exutoire pour parvenir à celui-ci (Figure 39). On peut estimer t_c en mesurant la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement direct ou à partir de formules empiriques. La Figure 39 donne la signification des principales caractéristiques d'une crue.

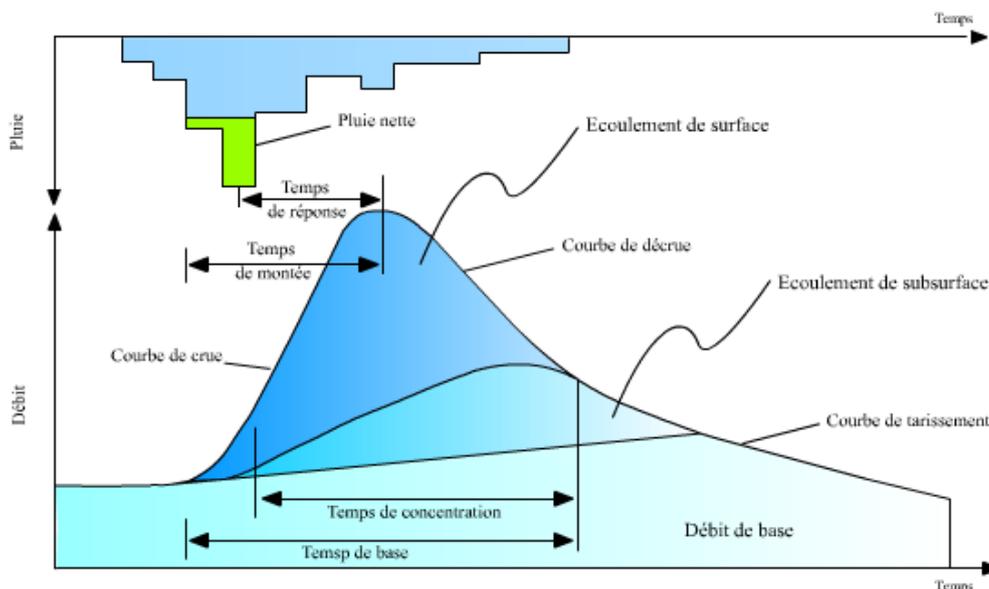


Figure 39 : Hydrogramme d'une crue et hyétogramme correspondant - Définition des principales caractéristiques.

Nous devons connaître le temps de concentration pour déterminer un débit de crues car cela permet de calculer le débit maximal du bassin versant si toutes ses zones contribuent à l'écoulement. Il s'agit avant tout d'une valeur estimée car :

- les pluies se déplacent et ne concernent souvent qu'une partie du bassin versant ;
- en début d'averse, une partie de la pluie participe à la saturation du sol, et il est difficile d'estimer l'instant et le lieu où le phénomène de ruissellement débute ;
- en fin de décrue, il est également difficile de déterminer la fin du ruissellement, car on assiste à la vidange (des aquifères et/ou de la couche superficielle).

Les formules de calcul du temps de concentration sont multiples, certaines s'adaptent mieux à des bassins versants de montagnes d'autres sont plus spécifiquement adaptées à des plaines. Les temps de concentration ont été estimés à l'aide de plusieurs formules, Kirpich, Giandotti, Passini-Ventura et Turraza (Figure 40).

Formule de Giandotti

$$T_c = 60 \times \frac{0,4\sqrt{S} + 0,0015L}{0,8\sqrt{P \times L}}$$

T_c : en min
 S : Surface en Ha
 L : Plus grande longueur hydraulique en m
 P : Pente en m/m

Formule de Passini

$$T_c = 0,14 \times \frac{(S \times L)^{1/3}}{\sqrt{P}}$$

T_c : en min
 S : Surface en Ha
 L : Plus grande longueur hydraulique en m
 P : Pente en m/m

Formule de Kirpich

$$T_c = 0,0195 \left(\frac{L}{\sqrt{P}} \right)^{0,77}$$

T_c : en min
 L : Plus grande longueur hydraulique en m
 P : Pente en m/m

Formule de Ventura

$$T_c = 7,62 \times \left(\frac{S}{P} \right)^{0,5}$$

T_c : en min
 S : Surface en km²
 P : Pente en m/m

Formule de Turraza

$$T_c = 65,1 \times \sqrt{S}$$

T_c : en min
 S : Surface en km²

Figure 40 : Principales formules pour le calcul du temps de concentration.

Les principales caractéristiques morphologiques nécessaires à l'évaluation du temps de concentration ont été synthétisées dans le Tableau 1 du chapitre 2.

Le Tableau 14 suivant récapitule les diverses valeurs du temps de concentration obtenues par ces différentes formules. La valeur du temps de concentration retenue est la moyenne des valeurs proches. On a éliminé les valeurs extrêmes très grandes (Johnstone et Cross) ou très petites (Kirpich) pour ne laisser que les valeurs intermédiaires.

Tc (h)						Tc (h)		Tc (jours)
Kirpich	Giandotti	Ventura	passini	Turraza	johnstone et Cross	Moyenne	Moyenne sans Kirpich et Johstone	Retenu
15.5	36.7	97.0	16.1	122.5	674.7	160.4	68.1	2.5
6.1	17.7	28.6	4.8	33.7	327.0	69.6	21.2	1
3.3	11.6	13.4	2.2	15.8	204.1	41.7	10.	0.5

Tableau 14 : Temps de concentration calculés pour les bassins étudiés.

4.2.2. Calcul du coefficient de ruissellement

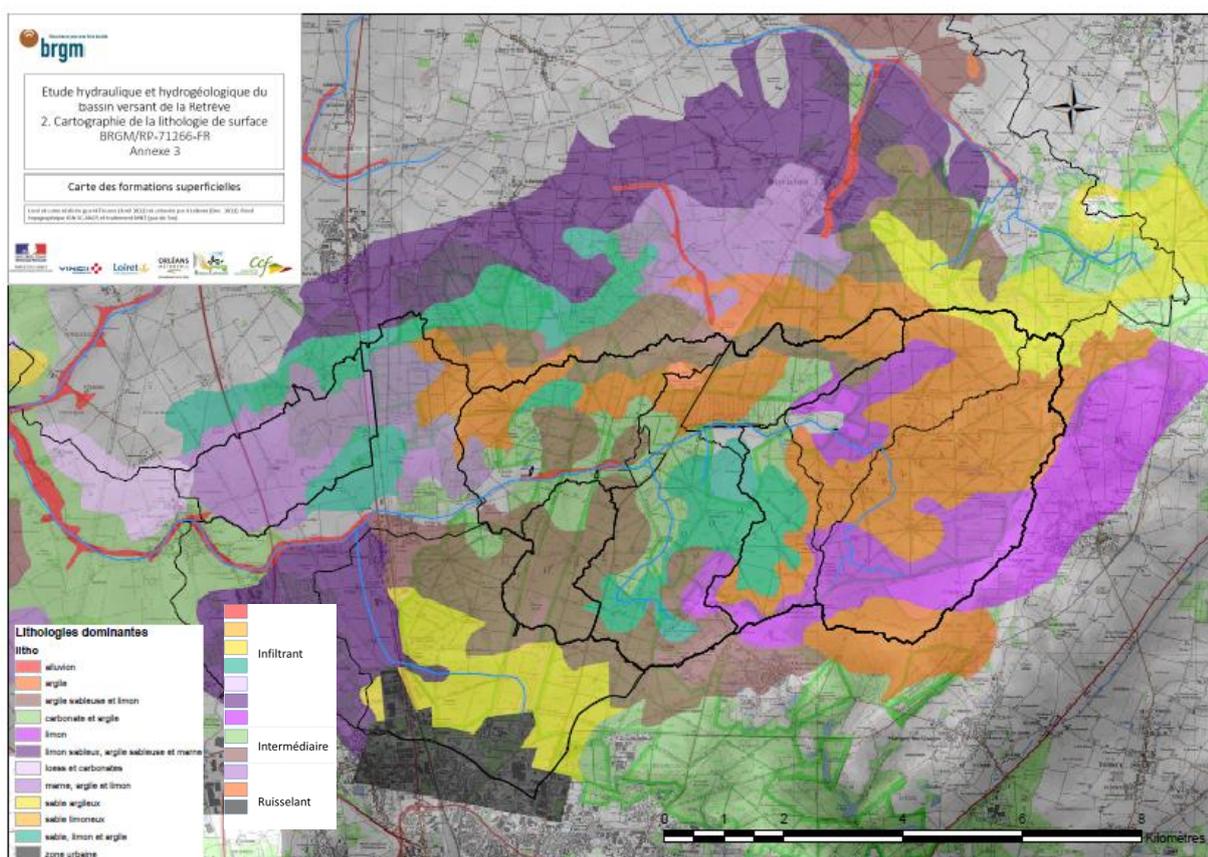
Le coefficient de ruissellement fournit la proportion de pluie qui ruisselle (la pluie « nette ») par rapport à la pluie tombée (la pluie « brute »). Pour le calcul du débit décennal avec la méthode rationnelle, nous cherchons à évaluer ce coefficient de ruissellement pour une pluie décennale.

a) Intégration des données de la carte des sols

L'étude des lithologies de surface (rapport n°2 de la présente étude, Tissoux H., 2021), dont la cartographie est reportée sur la carte Figure 41, a démontré un fort caractère ruisselant sur l'amont du bassin de la Retrève (en orange principalement) et sur les lignes de crête et plus infiltrant au centre (en vert et jaune).

Le bassin du Renard est lui aussi assez contrasté avec des surfaces peu infiltrantes (en mauve et marron) et infiltrantes (en jaune).

Une transcription de la carte en 3 classes a été faite par les pédologues. Elle illustre plus simplement le caractère infiltrant/ruisselant ou intermédiaire du bassin de la Retrève. La carte ne considère pas la présence des gouffres.



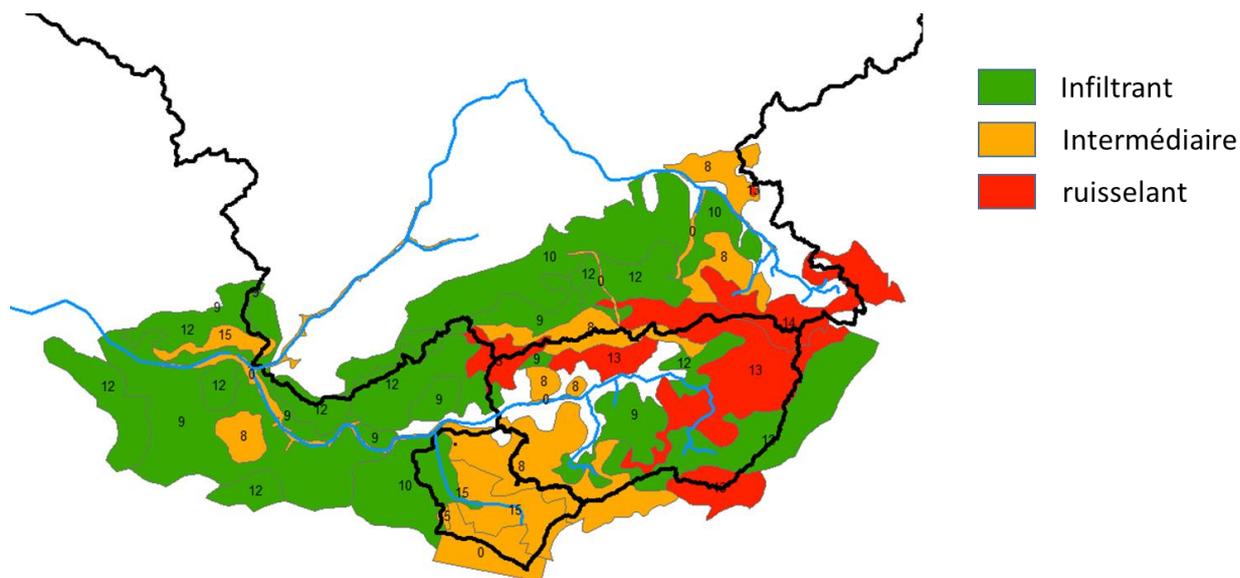


Figure 41 : Carte de la lithologie de surface (rapport BRGM-RP-71266-FR) et transcription en 3 classes.

b) Données d'occupation du sol / Corinne Land Cover

L'estimation du coefficient de ruissellement décennal s'est faite grâce à la cartographie de l'occupation des sols Corinne Land Cover (Figure 42).

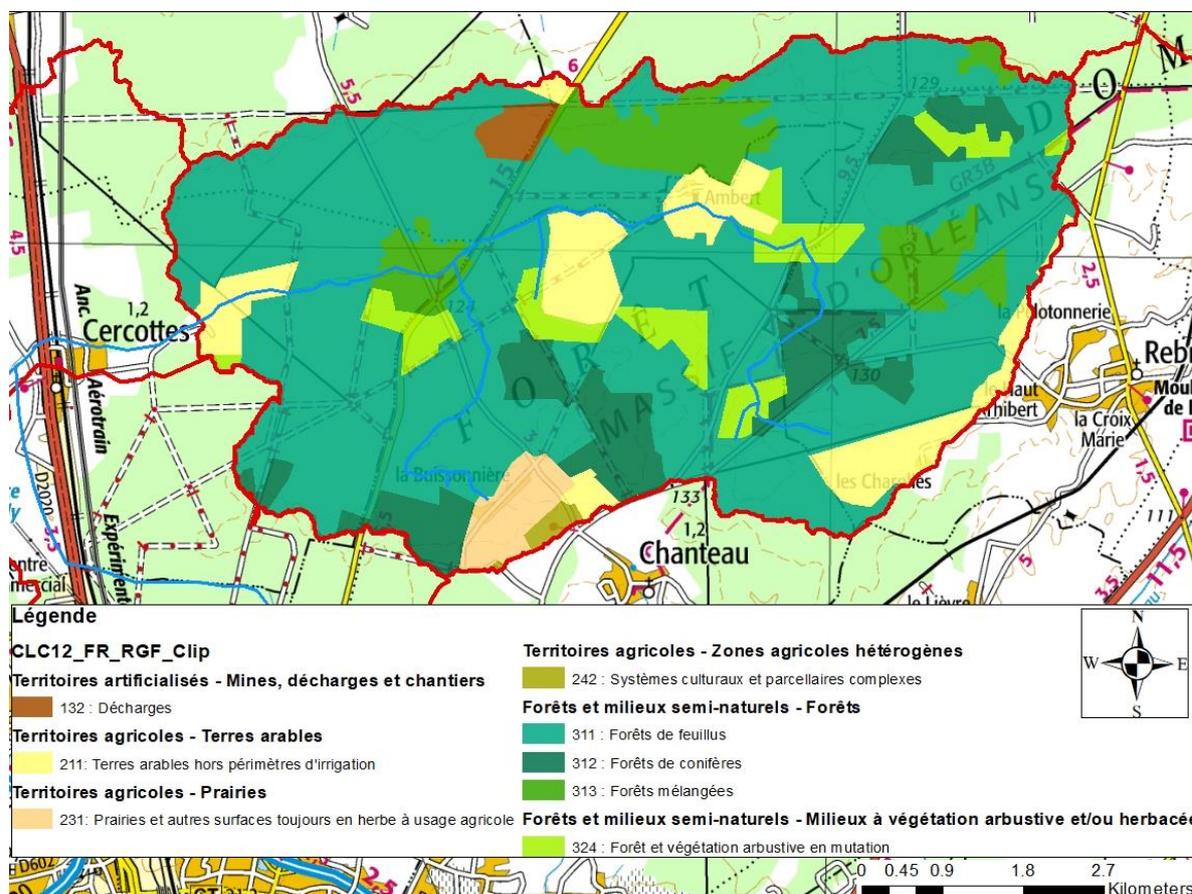


Figure 42 : Carte d'occupation du sol (Corinne Land Cover).

Le Tableau 15 indique les coefficients de ruissellement, pour une pluie décennale, retenus pour chaque type d'occupation du sol de Corine Land Cover (CLC).

Code CLC	Type de parcelle	Coefficient de ruissellement décennal Cr10
111	Tissu urbain continu	0,80
112	Tissu urbain discontinu	0,70
113	Zones urbaines spéciales	0,60
121	Zones industrielles et commerciales	0,70
122	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	0,90
123	Zones portuaires	0,90
131	Extraction de matériaux	0,60
132	Décharges	0,40
133	Chantiers	0,40
141	Espaces verts urbains	0,30
142	Equipements sportifs et de loisirs	0,40
211	Terres arables hors périmètres d'irrigation	0,30
222	Vergers et petits fruits	0,30
231	Prairies	0,15
311	Forêts de feuillus	0,10
312	Forêts de conifères	0,12
321	Pelouses et pâturages naturels	0,20
322	Landes et broussailles	0,08
323	Végétation sclérophylle	0,11
333	Végétation clairsemée	0,30
411	Marais intérieurs	0,30
511	Cours et voies d'eau	1,00
512	Plans d'eau	1,00

Tableau 15 : Coefficients de ruissellement de chaque type de parcelle de l'occupation des sols Corine Land Cover.

D'autres tableaux de correspondances existent dans la littérature. La superficie, la pente et la texture du sol sont également pris en compte dans l'estimation du coefficient de ruissellement (par exemple le Tableau 16).

Utilisation du sol	Pente <u>transversale</u> du bassin versant (perpendiculaire au cours d'eau)	Texture de sol		
		Sable limoneux	Limon	Argile limoneuse
Cultures intensives	0 à 0,5%	0,16	0,25	0,40
	0,5 à 5%	0,22	0,35	0,55
	5 à 10%	0,30	0,45	0,60
	10 à 30%	0,40	0,65	0,70
Cultures fourragères	0 à 0,5%	0,07	0,20	0,35
	0,5 à 5%	0,10	0,28	0,40
	5 à 10%	0,15	0,35	0,45
	10 à 30%	0,22	0,40	0,55
Boisé	0 à 0,5%	0,05	0,18	0,30
	0,5 à 5%	0,08	0,25	0,35
	5 à 10%	0,12	0,30	0,42
	10 à 30%	0,18	0,35	0,52
Lac, marais		0,05	0,05	0,05
		Imperméabilité		
		30%	50%	70%
Roc, asphalte	0 à 5%	0,40	0,55	0,75
	5 à 10%	0,50	0,65	0,80
	10 à 30%	0,55	0,70	0,85

Tableau 16 : Table de coefficients de ruissellement en fonction de la pente et de la texture du sol (source Montas et al., 1990 et McNeely, 1982).

Le coefficient de ruissellement décennal équivalent a été calculé pour chaque sous bassin versant à partir de la surface concernée par chaque type de parcelle et la surface totale du bassin.

Sur l'ensemble d'un BV :

$$C_{(\%) } = \frac{\sum_k C_{(\%) }^k \times S^k}{S_{tot}}$$

Avec C_k : Coefficient de ruissellement par état de surface élémentaire
 S_k : Surfaces élémentaires

Le Tableau 17 indique les coefficients de ruissellement moyens retenus pour chaque sous bassin versant défini précédemment pour une pluie décennale.

Sous bassins	Coefficients de ruissellement moyens retenus pour méthode rationnelle (%)
Retrève	Entre 30% et 40%
Renard	Entre 30% et 40%

Tableau 17 : Coefficients de ruissellement moyen retenus pour la méthode rationnelle (pluie décennale).

Les coefficients de ruissellement décennaux ainsi calculés ont été utilisés pour déterminer le débit décennal pour chaque sous bassin versant.

4.2.3. Estimation des débits de projet

Les estimations des débits de projet pour les débits décennaux sont calculées avec la méthode rationnelle puis avec la méthode du Gradex pour les périodes de retour supérieures. Différentes valeurs sont présentées selon différentes méthodes de calcul de quantiles de pluie (coefficient de Montana et ajustement de Gumbel des pluies à Bricy) et deux valeurs de coefficients de ruissellement. Le choix final de sélection des débits de projet retenus pour la modélisation hydraulique (crue de référence de 2016 et crue de période de retour 50 ans) est fait en concertation avec le CEREMA, suite à des itérations entre modélisation hydraulique et modélisation hydrologique (cf. paragraphe de validation avec le modèle hydraulique 4.4).

a) Bassin de la Retrève

Les estimations des débits de projet de la Retrève sont présentées dans les tableaux suivants. Les différents tableaux présentés tiennent compte des intervalles de confiance sur les débits résultants :

- des valeurs du coefficient de ruissellement de 30 % à 40 % ;
- des quantiles de pluie au poste de Bricy avec l'ajustement de Gumbel : intervalles de confiance à +/-95 % (Tableau 18) et +/-70 % (Tableau 19). Les tableaux présentent ainsi les valeurs inférieures et supérieures qui encadrent la valeur moyenne pour chaque calcul.

Il est à noter que les débits d'absorption par les gouffres sont déjà pris en compte dans les estimations fournies. Conformément au travail réalisé sur l'absorption des gouffres (Chapitre 2), les valeurs considérées sont :

- pour le bassin de la Retrève en amont de Cercottes (Longs Domaines) : 2,2 m³/s ;
- pour le bassin du fossé du Renard : 0,5 m³/s.

b) Bassin du Renard

Pour le bassin du Renard, seuls les débits résultants des quantiles de pluies calculés avec les coefficients de Montana ont pu être estimés. Du fait de l'absence de données sur les hauteurs de précipitation au poste de Bricy au pas de temps horaire, il n'a pas été possible pour ce bassin de calculer les quantiles de pluie correspond au temps de concentration du bassin de 12 h.

Les débits de pointe sur le bassin du Renard sont présentés au Tableau 20.

Débits de pointe de la Retrève aux Longs Domaines en m ³ /s																
GRADEX-->	T10		T20		T50		T70		T80		T100		T150		T200	
	Pluie coefficients de Montana	ajustement Gumbel Pluie Bricy	Pluie coefficients de Montana	ajustement Gumbel Pluie Bricy	Pluie coefficients de Montana	ajustement Gumbel Pluie Bricy	Pluie coefficients de Montana	ajustement Gumbel Pluie Bricy	Pluie coefficients de Montana	ajustement Gumbel Pluie Bricy	Pluie coefficients de Montana	ajustement Gumbel Pluie Bricy	Pluie coefficients de Montana	ajustement Gumbel Pluie Bricy	Pluie coefficients de Montana	ajustement Gumbel Pluie Bricy
Coefficient ruissellement 30 %	6.7	4.2	10.3	6.5	15	9.5	16.7	10.5	17.4	11	18.5	11.7	20.6	13	22	13.9
		4.9		7.9		11.7		13.1		13.7		14.6		16.3		17.5
		5.7		9.3		14		15.8		16.4		17.6		19.6		21.1
Coefficient ruissellement 40 %	9.7	6.3	13.3	8.6	18	11.6	19.7	12.7	20.4	13.1	21.5	13.8	23.5	15.1	25	16
		7.3		10.3		14.1		15.5		16.1		17		18.7		19.9
		8.3		11.9		16.7		18.4		19.1		20.2		22.3		23.7

Tableau 18 : Débits de pointe estimés à la Retrève aux longs Domaines avec intervalle de confiance à 95 % pour un ajustement de Gumbel sur la pluie au poste de Bricy en m³/s

Débits de pointe de la Retrève aux Longs Domaines en m ³ /s																
GRADEX-->	T10		T20		T50		T70		T80		T100		T150		T200	
	Pluie coefficients de Montana	ajustement Gumbel Pluie Bricy	Pluie coefficients de Montana	ajustement Gumbel Pluie Bricy	Pluie coefficients de Montana	ajustement Gumbel Pluie Bricy	Pluie coefficients de Montana	ajustement Gumbel Pluie Bricy	Pluie coefficients de Montana	ajustement Gumbel Pluie Bricy	Pluie coefficients de Montana	ajustement Gumbel Pluie Bricy	Pluie coefficients de Montana	ajustement Gumbel Pluie Bricy	Pluie coefficients de Montana	ajustement Gumbel Pluie Bricy
Coefficient ruissellement 30 %	6.7	4.5	10.3	7.1	15	10.5	16.7	11.8	17.4	12.3	18.5	13.1	20.6	14.6	22	15.6
		4.9		7.9		11.7		13.1		13.7		14.6		16.3		17.4
		5.3		8.7		13		14.6		15.2		16.2		18.1		19.5
Coefficient ruissellement 40 %	9.7	6.8	13.3	9.4	18	12.8	19.7	14	20.4	14.5	21.5	15.3	23.5	16.8	25	17.9
		7.3		10.3		14.1		15.5		16.1		17		18.7		19.9
		7.8		11.2		15.5		17.1		17.7		18.7		20.6		22

Tableau 19 : Débits de pointe estimés à la Retrève aux longs Domaines avec intervalle de confiance à 70 % pour un ajustement de Gumbel sur la pluie au poste de Bricy en m³/s.

Débits de pointe du Fossé du Renard en m ³ /s								
	T10	T20	T50	T70	T80	T100	T150	T200
GRADEX-->	Pluie coefficients de Montana							
Coefficient ruissellement 30 %	4.2	6.4	9.2	10.3	10.7	11.4	12.6	13.5
Coefficient ruissellement 40 %	5.8	8	10.8	11.8	12.2	12.9	14.2	15

Tableau 20 : Débits de pointe estimés au Fossé du Renard en m³/s.

4.3. ESTIMATION DE LA FORME DE L'HYDROGRAMME

4.3.1. Le modèle Gardénia

Le modèle Gardénia (modèle Global A Réservoirs pour la simulation des DÉbits et des Niveaux Aquifères) représente le cycle de l'eau (Figure 43) depuis les précipitations sur un bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire ou au niveau aquifère en un point. Ce modèle est global, car il considère une « entrée » globale (une « lame d'eau » sur le bassin et une évapotranspiration potentielle) et une « sortie » unique qui est suivant le cas, le débit à l'exutoire ou le niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente.

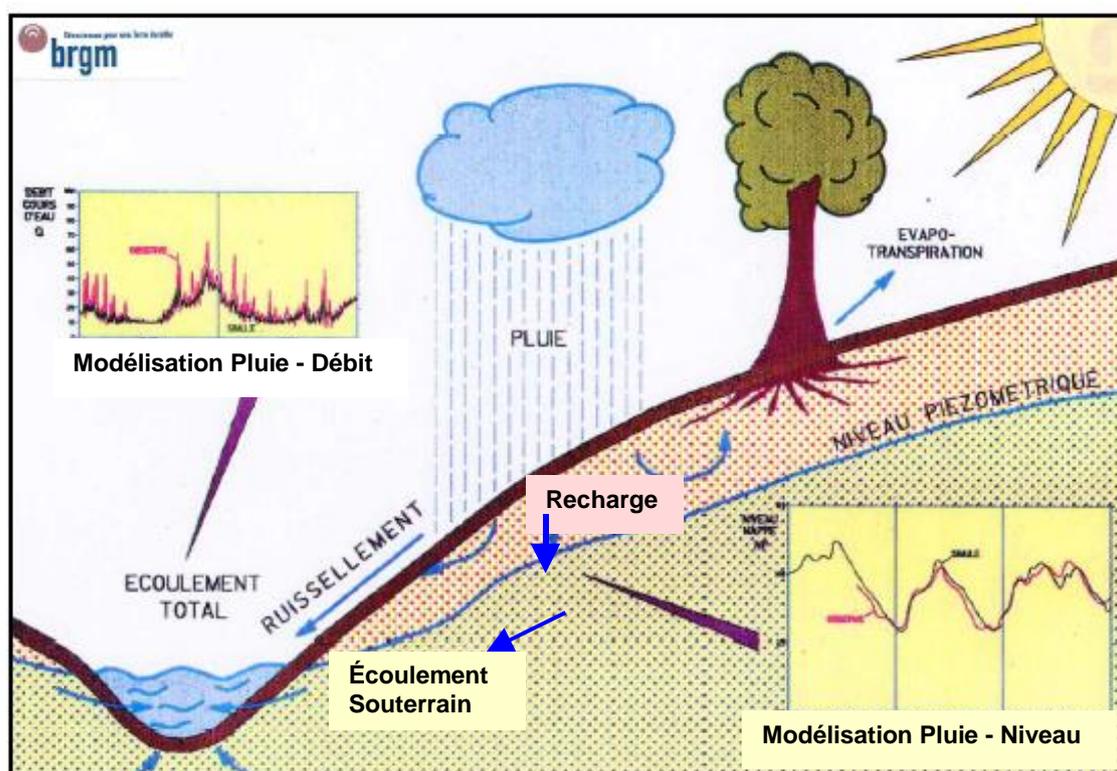


Figure 43 : Schématisation du cycle de l'eau.

Le modèle GARDÉNIA simule le cycle de l'eau, depuis les précipitations sur un bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire et/ou au niveau aquifère en un point. Ce modèle est global, car il considère une "entrée" globale (une "lame d'eau" sur le bassin et une évapotranspiration potentielle) et une "sortie" unique qui est, suivant le cas, le débit à l'exutoire et/ou le niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente. L'analogie entre l'allure exponentielle de la vidange d'un réservoir et celle du tarissement d'une rivière ou d'une source, ou encore de la baisse des niveaux d'une nappe souterraine, permet de représenter le comportement hydraulique d'un bassin versant par un ensemble de réservoirs se vidant les uns dans les autres. Des fonctions de transfert non linéaires sont utilisées pour améliorer cette schématisation.

GARDÉNIA simule le cycle de l'eau par un système de 3 à 4 réservoirs en cascade qui représentent globalement respectivement (Figure 44) :

- les premières dizaines de centimètres du sol, siège des phénomènes d'évapotranspiration (zone d'influence des racines de la végétation) ;
- une zone intermédiaire générant de d'écoulement rapide ;
- une ou deux zones aquifères générant de l'écoulement souterrain lent et retardé.

Les calculs peuvent être réalisés à un pas de temps quelconque.

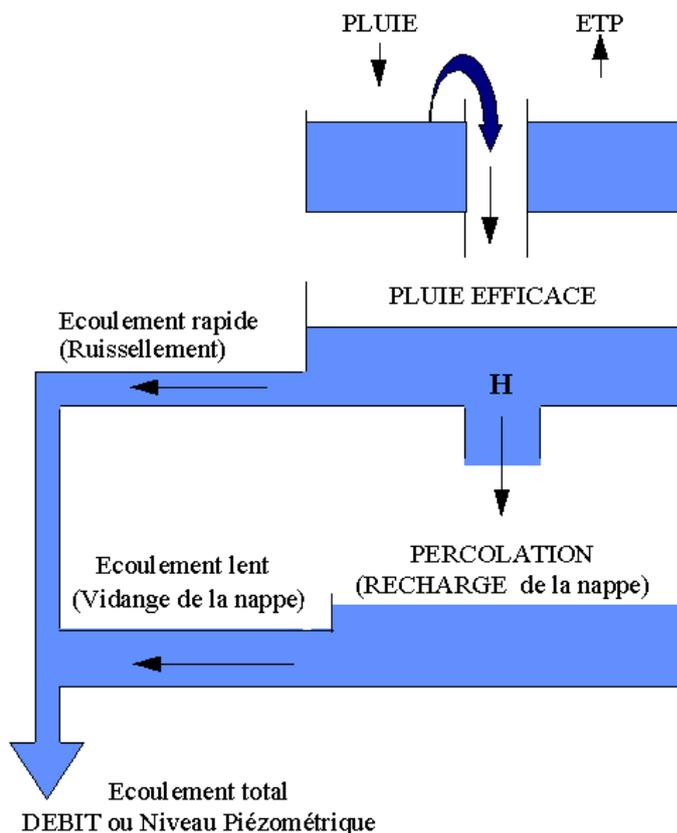


Figure 44 : Représentation du schéma de fonctionnement de Gardénia, modèle global à réservoirs.

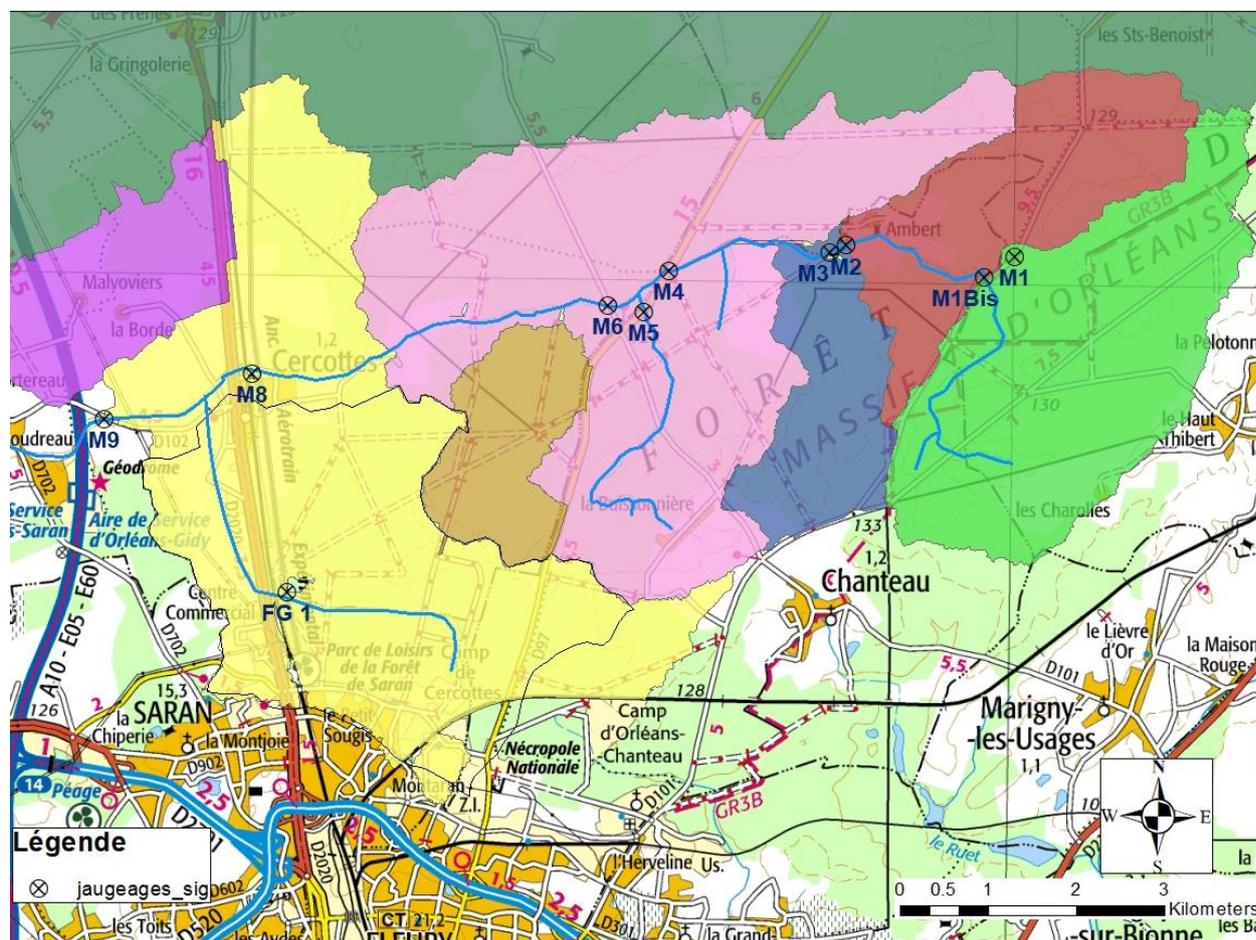
4.3.2. Les simulations réalisées avec Gardénia sur le bassin de la Retrève

Différentes modélisations des débits de la Retrève ont été testées, en se basant sur les données de pluies au poste de Bricy et les données (pluies et ETP) Safran de Météo France et les quelques points de jaugeage réalisés (Figure 45). Les données pluviométriques du poste de Bricy ont été retenues pour la modélisation en raison de leur étendue : elles permettent en effet de remonter jusqu'en 1937. En outre, les modélisations avec les pluies Safran avaient produit des débits de pointes plus faibles.

Les modélisations ont été faites au pas de temps journalier ; ainsi les débits obtenus sont sous-estimés par comparaison aux débits instantanés des crues. Cependant, il est admis que la dynamique de la crue est similaire. La modélisation GARDÉNIA a donc été entreprise dans le but de reconstituer les hydrogrammes de crue qui caractérisent sa dynamique et serviront de base à la modélisation hydraulique du CEREMA.

Plusieurs modèles ont été testés aux différents points de mesures du bassin : M1, M1Bis, M2, M3Bis et Cercottes. Au niveau du gouffre d'Ambert, M3Bis, la reconstitution de la chronique de débits à partir du niveau mesuré dans le gouffre, a été utilisée pour le calage.

Seuls les points M1Bis et M3 ont apporté des résultats exploitables pour la Retrève. Au fossé du Renard, les résultats ne donnent pas satisfaction et ne sont donc pas présentés.



	QM1Bis	Q_M2	Q_M3Bis	Q_M3Bis	Q_M3Bis	M6
SUPERFICIE (km ²)	11	18.0	22	25.6	34	34.4

Figure 45 : Différents points de jaugeages ayant servant aux essais de modélisation.

a) Modélisation à M1Bis et simulation aux longs Domaines

Comme expliqué précédemment, Gardenia tente de reproduire les débits observés et d'optimiser le critère de Nash utilisé comme indicateur de performance⁹. Il y a très peu de points d'observation à M1Bis pour parler de calage à proprement parler, mais à défaut de données complémentaires, la modélisation a tout de même été entreprise.

⁹ Plus le critère de Nash est proche de 1, plus le modèle est performant

La Figure 46 présente les débits simulés avec Gardenia à M1Bis, après calibration à partir des jaugeages ponctuels de la période du projet (cf. Annexe 1). Le débit maximum simulé est de 3,2 m³/s le 30 mai 2016.

À partir des paramètres de calage obtenus, une simulation des débits a été effectuée aux Longs Domaines. Il est donc fait comme hypothèse que le bassin présente des caractéristiques homogènes à M1Bis et aux Longs Domaines. Le débit maximum journalier simulé est de 13,2 m³/s (Figure 47). Il est à noter que les débits maximum journaliers sont moins forts que les débits maximum instantanés (estimés par la méthode rationnelle).

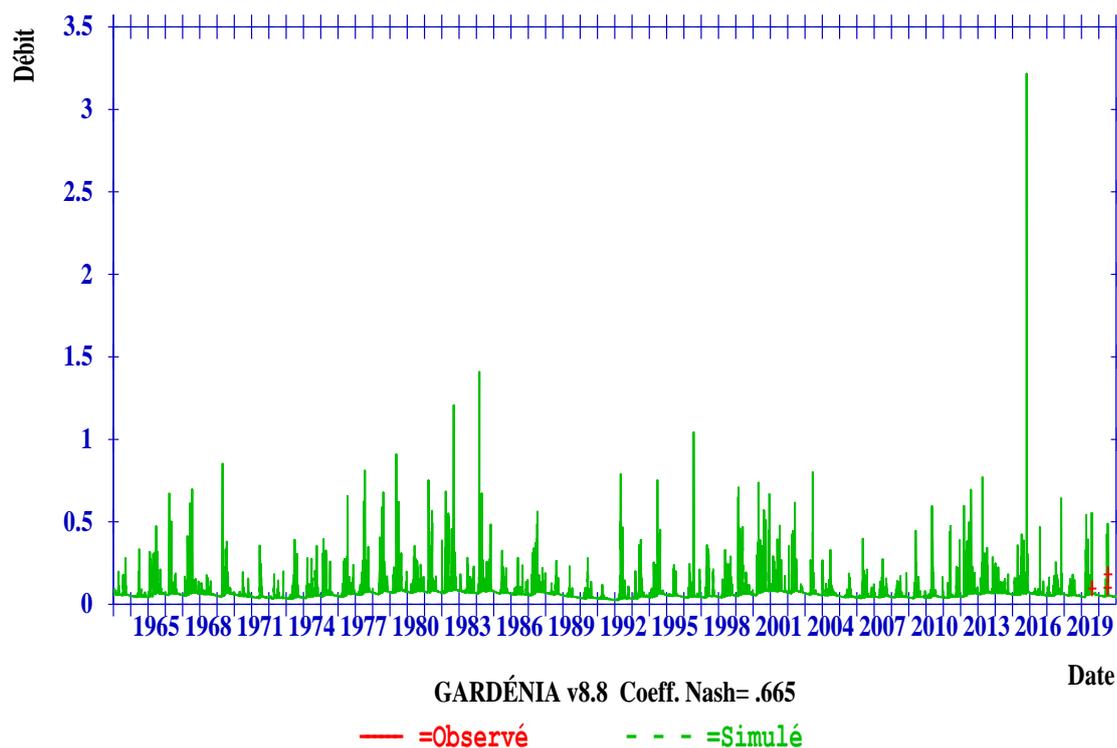


Figure 46 : Résultats de la modélisation Gardenia à M1Bis, comparaison des débits simulés avec les points de jaugeages.

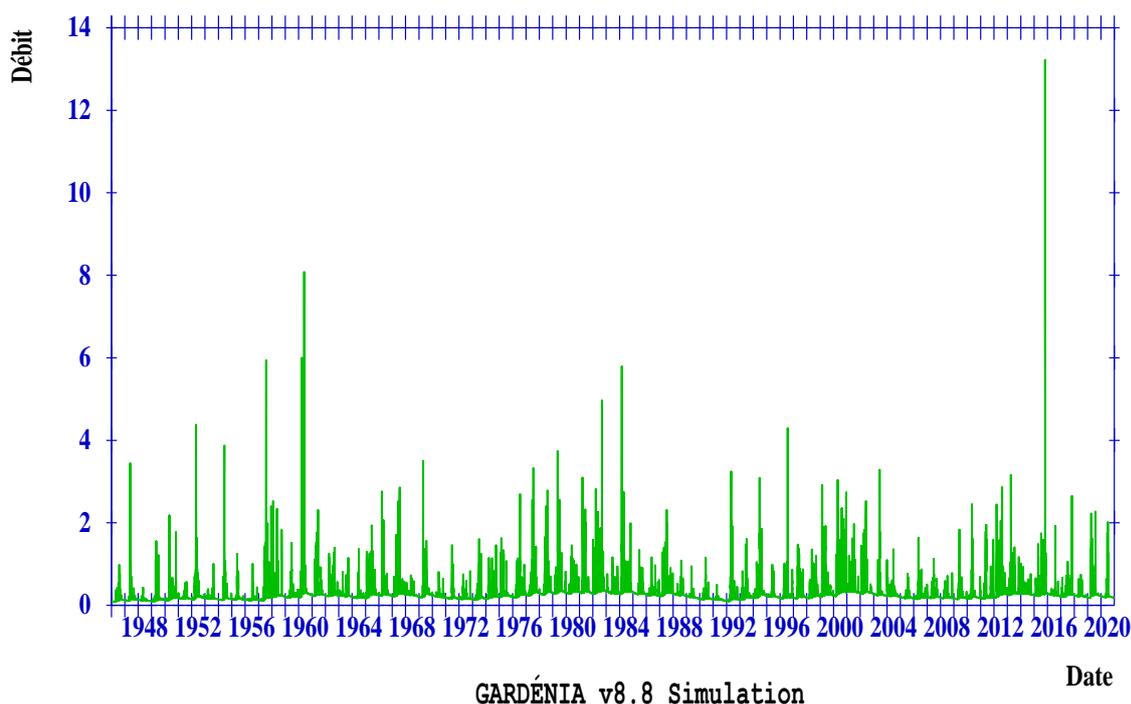


Figure 47 : Simulation aux Longs Domaines à partir des résultats du calage Gardenia à M1Bis.

b) Modélisation à M3Bis et simulation aux longs Domaines

La Figure 48 présente les débits simulés avec Gardenia à M3Bis, après calibration à partir des jaugeages ponctuels et des reconstitutions de débits à partir des hauteurs mesurées au gouffre d'Ambert. Le débit maximum simulé est de 4,8 m³/s le 30 mai 2016.

À partir des paramètres de calage obtenus, une simulation des débits a été effectuée aux Longs domaines. Il est donc fait comme hypothèse que le bassin présente des caractéristiques homogènes à M3Bis et aux Longs Domaines. Le débit maximum journalier simulé est de 9,9 m³/s (Figure 49).

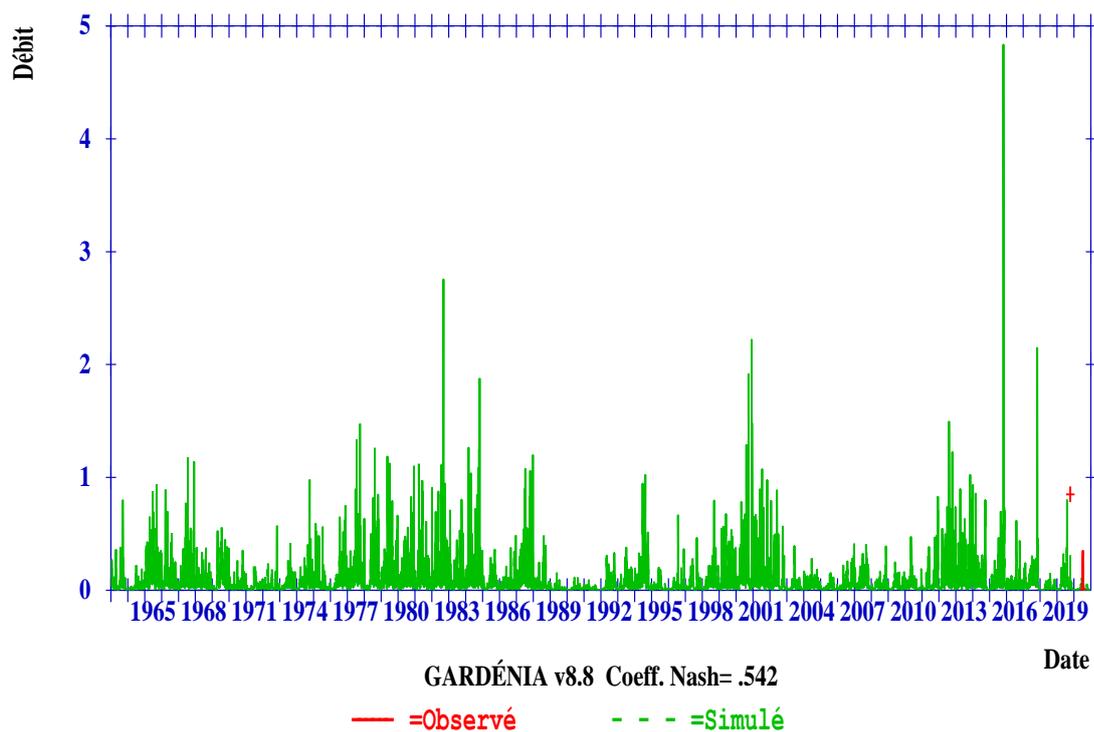


Figure 48 : Résultats de la modélisation Gardenia à M3Bis, comparaison des débits simulés avec les points de jaugeages.

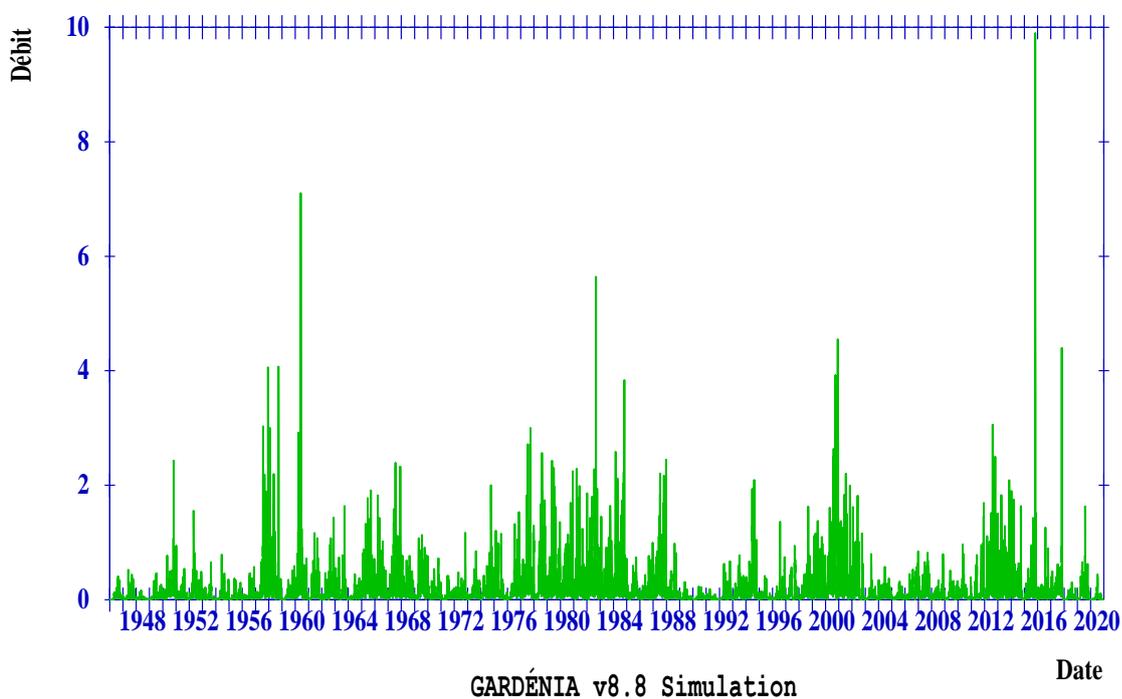


Figure 49 : Simulation aux Longs Domaines à partir des résultats du calage Gardenia à M3Bis.

4.3.3. Analyse des simulations et classification des débits de pointe journaliers

À partir des chroniques simulées avec Gardenia, et malgré les fortes incertitudes de calcul, les quantiles de débits journaliers simulés à M1Bis et M3Bis ont été calculés afin d'établir une classification et une typologie des débits de pointe (Figure 50).

Les Tableau 21 et Tableau 22 répertorient les dates pour lesquelles les débits de pointe journaliers simulés aux Longs Domaines sont supérieurs aux quantiles de référence (QT10, QT20, QT50 et QT100).

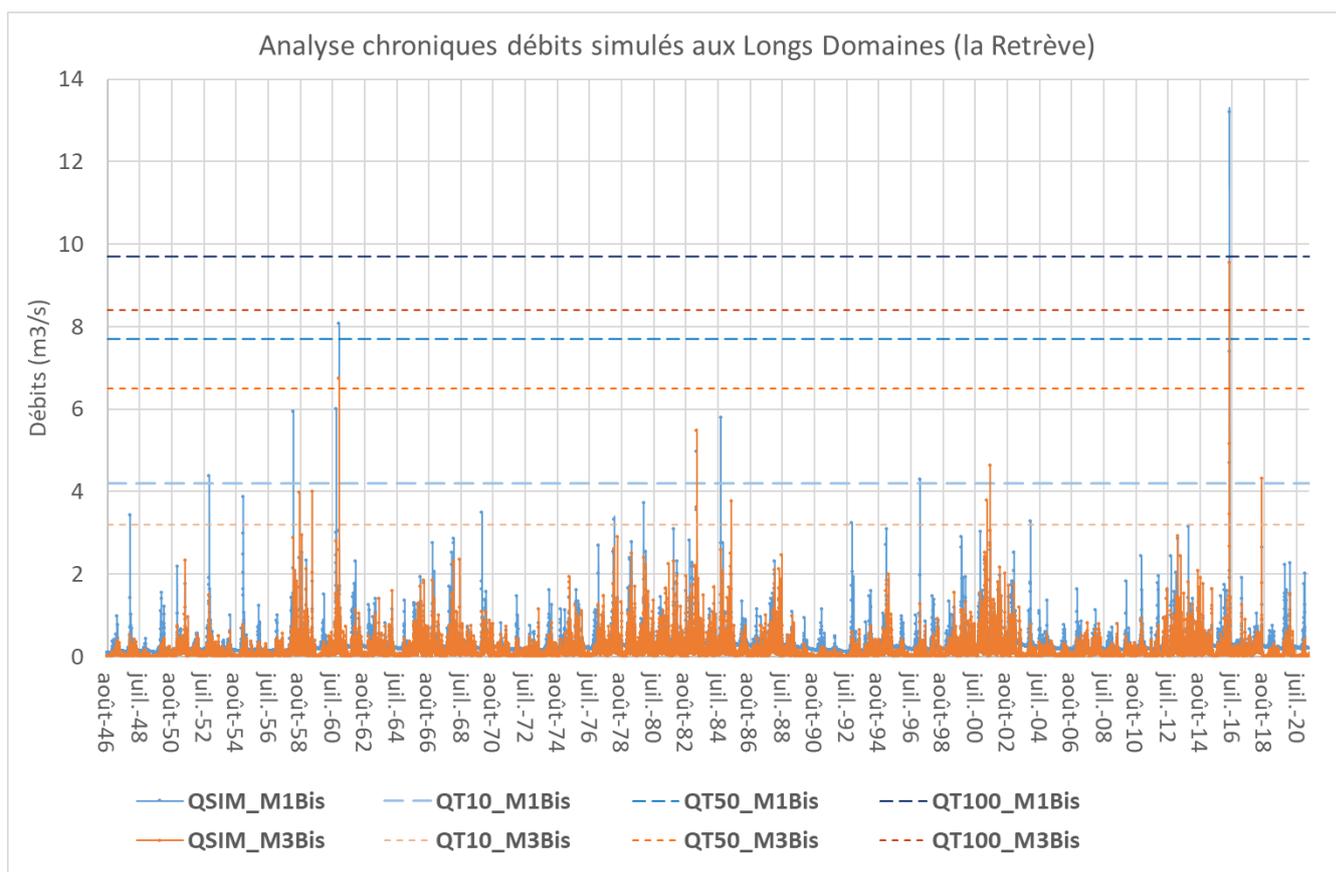


Figure 50 : Chroniques des débits simulés aux Longs Domaines à partir du calage à M1Bis (courbe bleue) et quantiles de débits associés (traits discontinus bleus) et à M3Bis (courbe orange) et traits discontinus orange).

QSIM_M1Bis			
QSIM_M1Bis_T10 - 4.2 m ³ /s	QSIM_M1Bis_T20 - 5.5 m ³ /s	QSIM_M1Bis_T50 - 7.7 m ³ /s	QSIM_M1Bis_T100 - 9.7 m ³ /s
01/12/1952			
	25/02/1958		
	29/10/1960		
		02/01/1961	
08/04/1983			
	01/10/1984		
25/02/1997			
			30/05/2016

Tableau 21 : Classification des débits de pointe simulés aux Longs Domaines à partir du calage à M1bis (QT10 = 4,2 m³/s ; QT20 = 5,5 m³/s ; QT50 = 7,7 m³/s ; QT100 = 9,7 m³/s).

QSIM_M3Bis			
QSIM_M3Bis_T10 - 3.4 m ³ /s	QSIM_M3Bis_T20 - 4.6 m ³ /s	QSIM_M3Bis_T50 - 6.5 m ³ /s	QSIM_M3Bis_T100 - 8.2 m ³ /s
15/07/1958			
29/04/1959			
		02/01/1961	
08/04/1983			
28/05/1985			
30/04/2001			
	06/07/2001		
			30/05/2016
31/05/2018			

Tableau 22 : Classification des débits de pointe simulés aux Longs Domaines à partir du calage à M3Bis (QT10 = 3,4 m³/s ; QT20 = 4,6 m³/s ; QT50 = 6,5 m³/s ; QT100 = 8,2 m³/s).

À partir de cette classification, une analyse de la dynamique de la crue de référence de 2016 et de la crue de période de retour 50 ans est réalisée. Ainsi, il a été choisi (cases jaunes du tableau) :

- la crue de juin 2016 comme hydrogramme de référence, événement très supérieur à une crue centennale ;
- la crue de janvier 1961 comme hydrogramme de référence pour la crue de période de retour 50 ans.

Les hydrogrammes de crue sont extraits et analysés pour étudier la dynamique de montée et de descente.

a) Hydrogramme de référence de juin 2016

Conformément aux résultats de la modélisation GARDENIA (Figure 51), il est considéré pour la crue de référence de 2016 :

- un temps de montée de 3 jours ;
- un temps de descente de 4 jours.

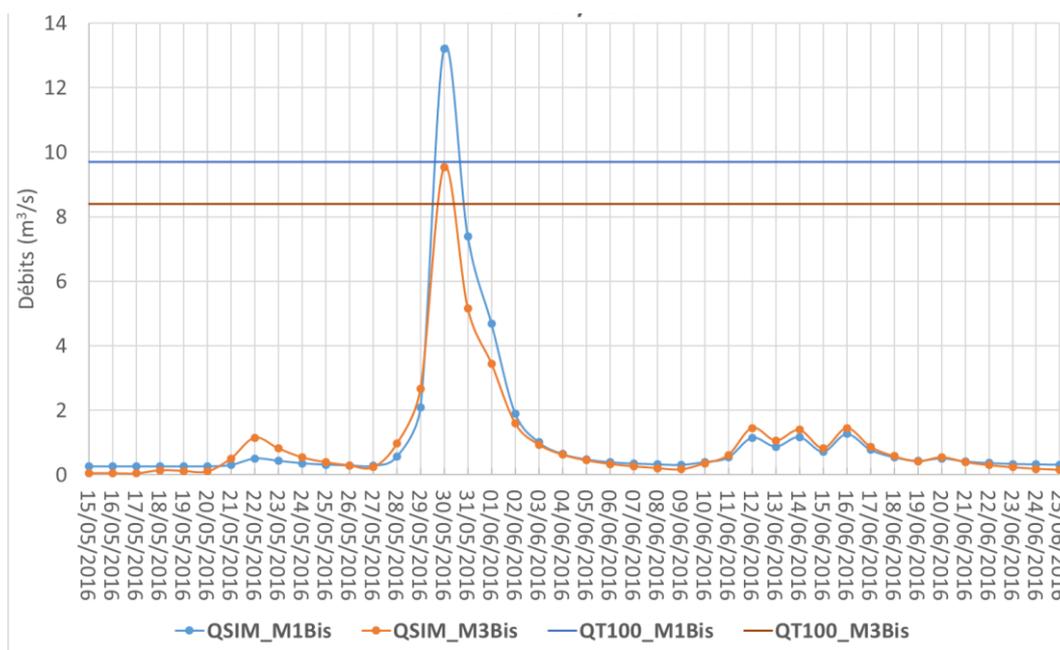


Figure 51 : Crue de 2016 simulée à la Retrève aux Longs Domaines avec le logiciel Gardenia.

Il faut préciser qu'il s'agit de la dynamique de la crue provoquée par les précipitations en forêt et non de la simulation des niveaux d'eau. Ceux-ci dépendent de la configuration du terrain et font l'objet de la modélisation du CEREMA pour la partie Retrève aval. Les inondations peuvent perdurer beaucoup plus longtemps que les 7 jours de l'hydrogramme qui leur a donné naissance.

Pour le fossé du Renard, la modélisation Gardenia n'a pas apporté de résultats exploitables. Il est donc proposé de considérer un temps de montée de 1,5 jours car le temps de concentration du bassin est deux fois plus rapide. Le temps de descente peut être équivalent à celui de la Retrève aux longs Domaines.

b) Hydrogramme de période de retour 50 ans

Le même formalisme utilisé pour la crue de référence a été appliqué pour déterminer la dynamique de l'hydrogramme d'une crue de période de retour 50 ans (T50). À partir des débits simulés avec Gardenia, la crue de janvier 1961 correspondrait à une crue T50 (Figure 52). Il peut donc être considéré pour ce type de crue :

- un temps de montée de 1,5 jours ;
- un temps de descente de 4 jours.

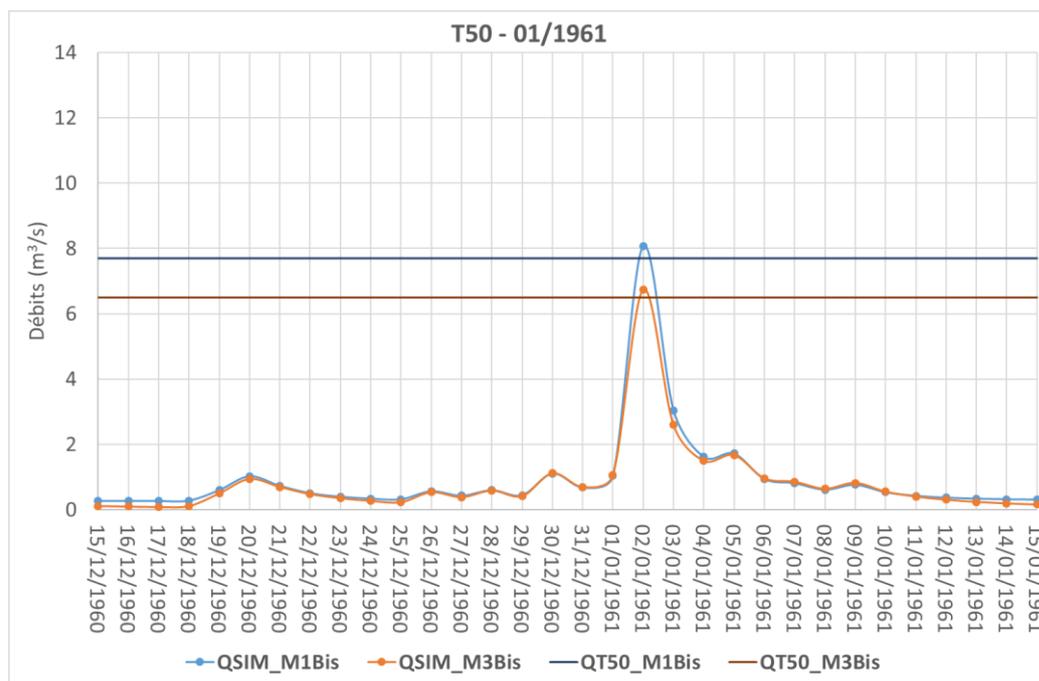


Figure 52 : Crue de janvier 1961 simulée à la Retrève aux Longs Domaines avec le logiciel Gardenia.

Pour le fossé du Renard, il est donc proposé de considérer un temps de montée de moitié par rapport à la Retrève soit de l'ordre 0,75 jours car le temps de concentration du bassin est deux fois plus rapide. Le temps de descente peut être équivalent à celui de la Retrève aux longs Domaines.

4.4. VALIDATION AVEC LE MODÈLE HYDRAULIQUE

Les premières simulations du modèle hydraulique par le CEREMA sur la base des données fournies par le BRGM (calculs sur les pluies de Bricy et hydrogramme issu de la modélisation au pas de temps journalier de Gardenia) se sont avérées insuffisantes pour générer les niveaux de crue observés en 2016 dans la zone modélisée par le CEREMA (Retrève aval). Ces divergences ont conduit les deux organismes à revoir leurs hypothèses et leurs paramètres.

Ces itérations ont permis de retenir les débits de projets correspondant aux quantiles de pluie calculées avec les coefficients de Montana (Tableau 18 et suivants) et un coefficient de ruissellement de 30 %. Pour la crue de 2016, la période de retour prise en compte pour les calculs est de 200 ans.

Au final, les éléments de forçage du modèle pour la crue de 2016 sont :

- pour la Retrève :
 - hydrogramme de 7 jours : 3 jours de montée pour 4 jours de descente,
 - débit de pointe de 22 m³/s ;
- pour le Fossé du Renard :
 - hydrogramme 7 jours : 1,5 jours de montée pour 5.5 jours de descente,
 - débit de pointe de 13,4 m³/s.

Pour la crue de période de retour 50 ans, des hypothèses similaires sont utilisées ; à savoir des intensités de pluie estimées avec les coefficients de Montana et un coefficient de ruissellement de 30 % sur le bassin. Les éléments de forçage injectés au modèle hydraulique sont :

- pour la Retrève :
 - hydrogramme de 5,5 jours : 1,5 jours de montée pour 4 jours de descente,
 - débit de pointe de 15 m³/s ;
- pour le Fossé du Renard :
 - hydrogramme 4,75 jours : 0,75 jour de montée pour 4 jours de descente,
 - débit de pointe de 9,2 m³/s.

Ainsi, pour la crue de référence de 2016, ces débits sont supérieurs à ceux obtenus avec la modélisation Gardenia. Alors que le pic de 2016 retenu est de l'ordre de 22 m³/s, la simulation Gardenia (qui utilise les pluies de Bricy) donnait des pics de crue de l'ordre de 13,6 m³/s.

Deux hypothèses sont émises pour justifier cet écart :

- le pas de temps journalier utilisé introduit un biais sur le modèle Gardenia et sous-estime le débit. Il convient de vérifier qu'un facteur de l'ordre de 1,6 entre un débit journalier et un débit horaire est plausible ;
- les pluies de Bricy sont dans un secteur moins arrosé que le bassin de la Retrève. Nous l'avons déjà mentionné. Les pluies qui sont arrivées du sud-est ont été plus importantes sur la forêt d'Orléans qu'au poste de Bricy.

4.4.1. Passage du débit journalier au débit instantané

a) Application d'un coefficient de passage du débit journalier au débit instantané

Les simulations GARDENIA, conduites au pas de temps journalier, fournissent des débits moyens journaliers. Dans la réalité, les pluies n'ont pas la même intensité tout au long de l'épisode pluvieux. Durant l'épisode pluvieux de mai-juin 2016, l'intensité des précipitations n'a pas été homogène. Le fait d'utiliser le pas de temps journalier sous-estime le débit de pointe calculé, par rapport au débit de pointe réel.

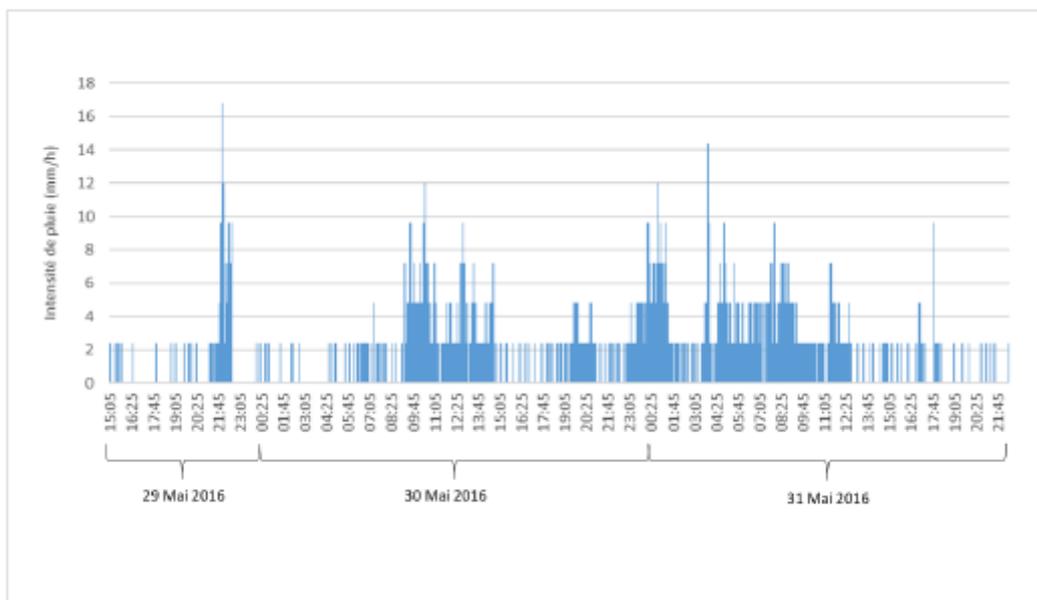


Figure 53 : Hyétogramme de pluie du 29 au 31 mai 2016 (Source: Sépia 2018).

Nous avons donc recherché une manière d'estimer ce débit de pointe par analogie avec une station existante.

Dans les fiches descriptives des stations hydrométriques de l'Hydroportail¹⁰, si des mesures ont pu être acquises, il est possible de retrouver les valeurs de débits instantané maximal et journalier maximal.

Une recherche de « station » et de configuration assez similaire au bassin de la Retrève a été menée afin d'avoir des ordres de grandeur de ces deux débits.

La station hydrométrique de Lieutel à Neauphle-le-Vieux¹¹ présente certaines similitudes. La surface du bassin versant topographique est de 77,4 km², le cours d'eau est court (13 km) et prend naissance en forêt (forêt de Rambouillet) dans un contexte de relief et de climat peu différent de la forêt d'Orléans. Le maximum est obtenu sur le même évènement le 31 mai 2016. Le débit maximal jamais enregistré est de l'ordre de grandeur que nous estimons pour la Retrève en 2016.

Maximums connus (par la banque HYDRO)

Débit instantané maximal (m3/s)	22.50 #	31/05/2016 14:25
Hauteur maximale instantanée (mm)	2390	31/05/2016 14:25
Débit journalier maximal (m3/s)	12.60 #	31/05/2016

En se basant sur les mesures de cette station, on obtient un coefficient pour passage du débit journalier à un débit instantané autour de 1,8 (22,5/12,6).

¹⁰ <https://hydro.eaufrance.fr/>

¹¹ Site hydrométrique - H303 0004 : Le ruisseau du Lieutel à Neauphle-le-Vieux

On voit que la différence d'un facteur de 1,6 que nous avons entre la simulation Gardenia et le débit de projet de 22 m³/s est tout-à-fait plausible.

b) Application d'un facteur correctif sur les pluies

La pluviométrie étant connue plus intense à l'amont du bassin de la Retrève qu'au niveau du poste de Bricy, l'application d'un coefficient correctif sur la pluie (exprimé en pourcentage supplémentaire) a été implémenté dans le modèle. Il suffit d'appliquer un coefficient multiplicatif sur la pluie de +25 % dans la modélisation globale pour obtenir un débit de pointe de l'ordre de 22 m³/s (Figure 54 et Figure 55). Un tel écart sur les pluies est tout à fait plausible. L'écart entre les pluies Safran et Loury est de l'ordre de 30 % et celui entre les pluies Safran et Bricy est de 20 % sur le cumul journalier du 30 mai 2016 (Tableau 10).

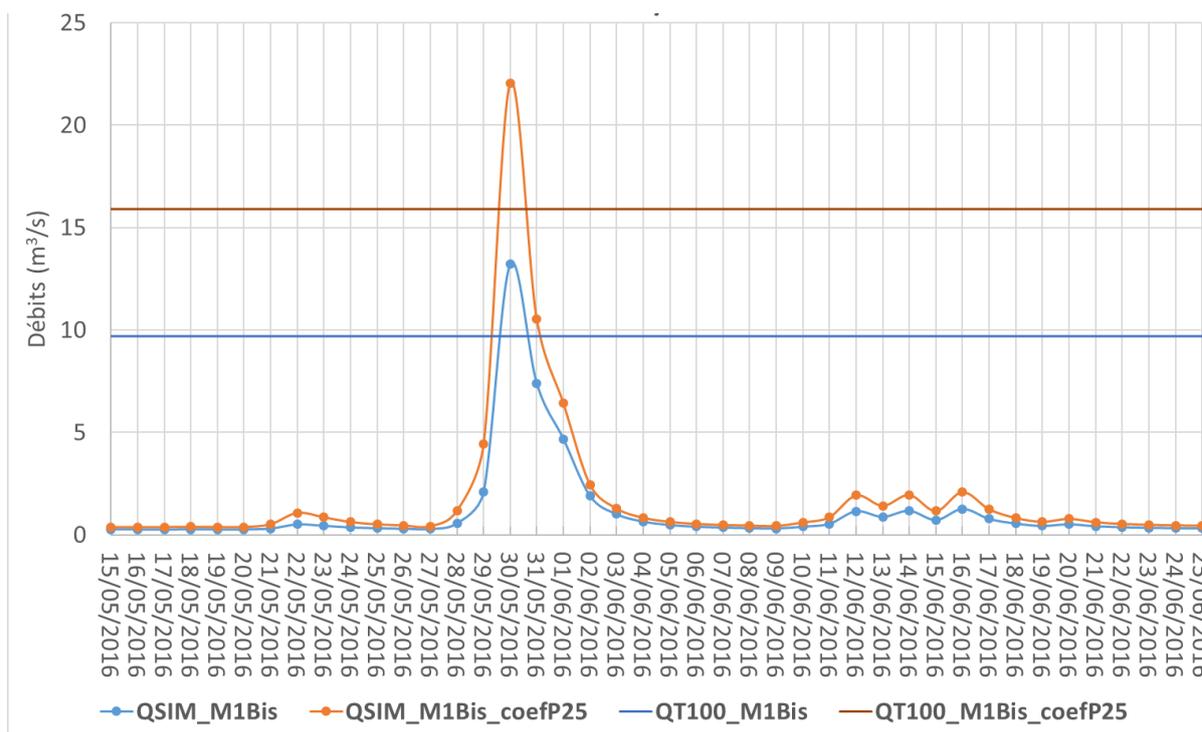


Figure 54 : Simulations Gardenia aux Longs Domaines avec un facteur correctif supplémentaire de +25 % sur la pluie de Bricy à partir du calage à M1Bis pour la crue de référence de juin 2016.

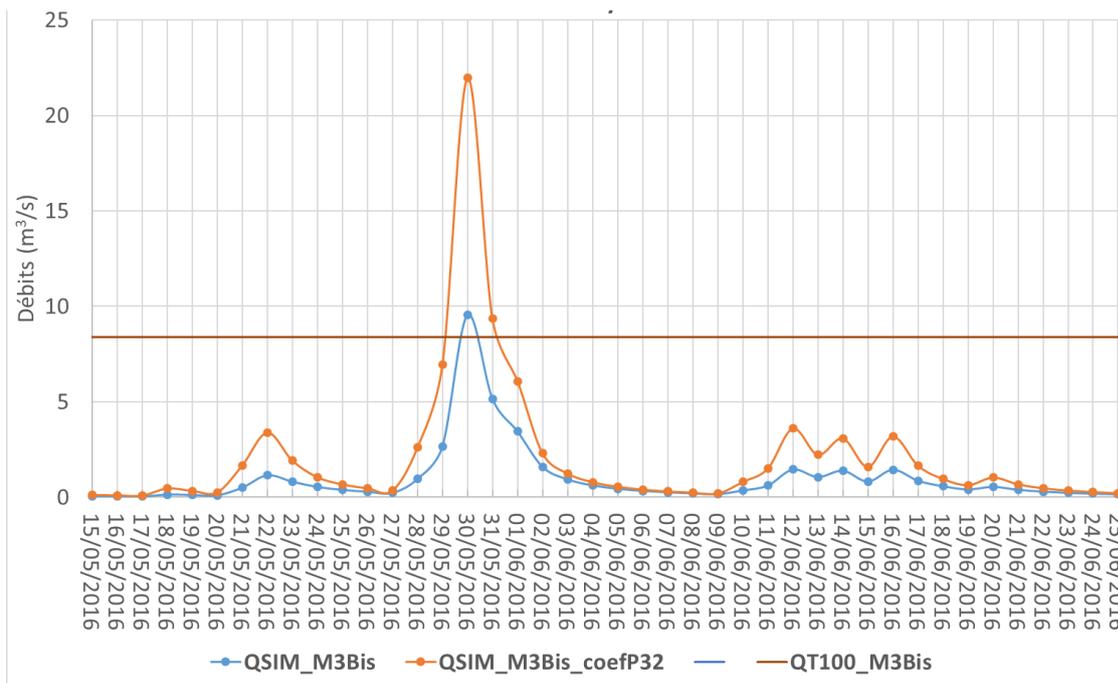


Figure 55 : Simulations Gardenia aux Longs Domaines avec un facteur correctif supplémentaire de +32 % sur la pluie de Bricy à partir du calage à M3Bis pour la crue de référence de juin 2016.

5. Éléments pour la mise en place d'une station d'alerte sur la Retrève

5.1. INTRODUCTION

En matière de crue, la capacité à gérer les crises repose sur l'anticipation des phénomènes hydrométéorologiques. Les inondations de mai-juin 2016 dans la vallée de la Retrève ont surpris tout le monde. Aucune information ne permettait de prévoir l'importance qu'allait prendre ce phénomène. L'étude en cours sur le bassin de la Retrève fait ressortir l'importance de disposer d'une station de mesure qui puisse servir pour mettre en place des dispositifs d'alerte et de mesures.

La gestion de crise est en effet facilitée dès lors que la mobilisation des acteurs et l'information auprès des populations sont anticipées. Le délai disponible pour la prise de mesures d'urgence est allongé, permettant également un retour à la normale plus efficace (par exemple pour assurer l'arrêt et la reprise des activités dans de bonnes conditions, la mise à l'abri des équipements, l'évacuation des personnes et des biens). Elle contribue ainsi à une réduction non négligeable des dommages et des coûts associés.

Le rapport coût-avantage d'un système d'alerte (ou système d'avertissement local aux crues) apparaît particulièrement intéressant, en particulier par rapport aux coûts d'aménagements qui seraient nécessaires pour « évacuer » des crues exceptionnelles du type de celle de 2016.

C'est donc logiquement que cette station d'alerte apparaît comme une recommandation majeure à l'issue de l'étude BRGM. A la demande de la DDT, des éléments de réflexion sont présentés ci-après et doivent être considérés comme une analyse de pré faisabilité. Une étude par un organisme ou un bureau d'étude spécialisé sera nécessaire pour en évaluer la faisabilité et assister le maître d'ouvrage dans le déploiement de ce système.

Justification de la demande au BRGM

L'étude du BRGM sur le bassin versant de la Retrève, en particulier la tâche 1 « inventaire et analyse des indices karstiques » (Rapport BRGM/RP-71330-FR), a montré l'importance de l'absorption par les gouffres dans les phénomènes de crue de la Retrève. C'est lorsque les gouffres ne peuvent plus absorber l'eau de ruissellement que les débordements se produisent. À la suite des présentations des travaux du BRGM en comité de pilotage du projet, celui-ci a demandé au BRGM de proposer des recommandations pour une instrumentation des infiltrations dans les gouffres afin de servir de station d'alerte lorsque ceux-ci se saturent. En fin de compte, la méthode de suivi de la saturation des gouffres ne diffère pas des méthodes de surveillance des phénomènes de crue quel que soit le type de cours d'eau.

Portage du projet

Les collectivités locales sont incitées à mettre en œuvre leur propre système de surveillance. La vallée de la Retrève n'est pas couverte par le service national de prévision des crues. Le syndicat de la Retrève, structure intercommunale, est au bon niveau pour mettre en place ce type de surveillance qui nécessite une vision des territoires amont pour protéger des communes situées à l'aval.

Les différents types de systèmes de surveillance

Le guide sur la prévision des crues du CEPRI (2018) distingue 4 types de systèmes de surveillance :

- la surveillance basée sur l'observation des phénomènes hydrométéorologiques : il s'agit de recueillir des informations de débit et éventuellement de pluie et de les comparer à des seuils. C'est ce type de système qui est examiné ici, car il est considéré comme une base d'information indispensable et minimale ;
- la surveillance basée sur la prévision météorologique : il s'agit d'anticiper à partir d'une alerte météorologique la conséquence hydrologique. Dans le bassin de la Retrève, la relation entre la pluie et les ruissellements est extrêmement complexe. Ce type de système ne saurait donner une prévision fiable des risques de crues ;
- la surveillance basée sur la prévision des crues : elle utilise des modèles de réaction du bassin versant aux précipitations à partir des observations et les prévisions météorologiques. Il n'y a actuellement pratiquement aucune donnée qui permettrait d'établir un modèle prédictif fiable. Un tel système ne sera envisageable qu'après plusieurs années d'observation des débits de la Retrève ;
- la surveillance basée sur la prévision des inondations : par rapport au précédent, ce système modélise non seulement les débits mais aussi les zones susceptibles d'être inondées. Le modèle utilisé par le CEREMA dans le cadre de l'étude en cours pourrait probablement être réutilisé ou repris dans cet objectif mais pas avant de disposer d'un modèle de prévision des crues, lui-même dépendant de la mise en place d'un système d'observation.

La première et indispensable étape est donc le choix et la mise en place d'une (ou plusieurs) station(s) d'observation du débit de la Retrève. En réalité, comme nous le verrons plus loin, c'est le niveau de l'eau qui est mesuré. Sa conversion en débit ne sera pas indispensable pour servir de station d'alerte.

La deuxième étape consistera à définir des seuils d'alerte qui seront revus lorsque suffisamment de données auront été acquises.

Le mode de diffusion de l'information, son stockage et sa mise à disposition pour servir à des travaux ultérieurs seront évoqués bien que ne faisant pas partie de l'étude. En fait, il est d'ores et déjà nécessaire d'y réfléchir.

Les outils de surveillance

Le gouvernement a mis en place à partir de 2015 des systèmes de surveillance et d'avertissement accessibles sur un territoire. Ce sont :

- Vigicrues : c'est le réseau de prévision des crues constitué du Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations (SCHAPI), de 22 services de prévisions de crues (SPC), de 28 unités d'hydrométrie et des cellules de veille hydrologique. Ce réseau émet des bulletins de vigilance crues permettant de prévenir le public et les autorités qu'il existe un risque de crue ;
- Vigicrues Flash, opérationnel depuis mars 2017 sur plus de 10 000 communes.

Ces dispositifs ne peuvent concerner la Retrève. Pour bénéficier des services de Vigicrues/Vigicrues Flash, il faut évidemment qu'il existe une station hydrométrique car les avertissements sont liés à une estimation des crues par modélisation hydrologique.

- les APIC : Avertissement pluies intenses à l'échelle des communes. Ils sont basés sur une analyse des pluies radar. Les APIC sont plus précis que les alertes préfectorales de la vigilance météorologique à l'échelle départementale.

Dans le cas de la Retrève, la prise en compte du seul critère météorologique est insuffisante pour estimer un risque de crue.

Les opérateurs

Au stade de la réflexion, la question se pose de savoir qui sera en charge de l'installation ainsi que d'assurer le bon fonctionnement du système. La question du financement lui est intimement liée, car il ne suffit pas d'acheter le matériel, il faut aussi le contrôler à distance, se déplacer régulièrement sur site, le recalibrer si nécessaire, nettoyer les données afin de les rendre interprétables, *etc.*

Plusieurs possibilités sont avancées :

- le BRGM, qui a déjà en charge le suivi des niveaux de nappe sur environ 200 points d'eau en Région Centre-Val de Loire. Ils sont régulièrement contrôlés par les agents du BRGM et mis en ligne sur ADES, la base de données qui stocke et met à disposition les données des eaux souterraines. Le BRGM a ainsi l'expérience de l'acquisition et du traitement des données issues de la télétransmission. Néanmoins, le suivi des niveaux dans un gouffre ou à l'entrée de celui-ci s'apparente plus au suivi d'une eau de surface. Le pas d'acquisition, de télétransmission et surtout le temps de mise à disposition de la donnée est nettement plus court pour un système de vigilance de crue d'une eau de surface que pour une eau souterraine. Cela nécessiterait des aménagements par rapport au fonctionnement actuel d'ADES. D'autre part, ADES n'a pas vocation à gérer des eaux de surface, il pourrait donc paraître incohérent d'y greffer le suivi des eaux de la Retrève ;
- la DREAL Centre-Val-de-Loire, qui dispose d'un service dédié, le service hydrométrie et prévision des crues et des étiages. Ce service gère une centaine de stations en Région Centre, disposées sur les cours d'eau. Ces données sont télétransmises et mises en ligne. Les agents de la DREAL interviennent régulièrement sur ces stations pour vérifier la cohérence des données et sont habitués à gérer des seuils d'alerte ou de crise tant au niveau des crues que des étiages. Interrogé, le service hydrométrie de la DREAL pourrait envisager d'ajouter une station à l'hydroportail si les équipements et leur installation sont financés par ailleurs ;
- la gestion des stations d'alerte de la Retrève peut également être confiée à une société privée. Il en existe plusieurs qui sont capables de mettre en place un réseau d'observations et d'afficher celles-ci en temps quasi-réel sur des serveurs qu'ils gèrent eux-mêmes pour leurs clients. Ce service a évidemment un coût de fonctionnement non négligeable. La société Hydroservices nous a aidé à dimensionner le coût du matériel, de son installation et de son opération éventuelle.

5.2. CHOIX DU SITE

Au cours de l'étude du bassin de la Retrève, plusieurs sites ont été visités et trois ont été équipés à titre expérimental :

- le gouffre d'Ambert au ravin des grands gouffres ;
- le gouffre des Pas Ronds ;
- les fosses Guillaume.

En complément, l'expérience du suivi dans le cadre de l'étude nous incite à examiner un 4^{ème} site, celui de l'étang de la Retrève.

5.2.1. Le gouffre d'Ambert

Situé au milieu du bassin amont de la vallée de la Retrève, le système d'observation du gouffre d'Ambert revêt une importance hydrologique considérable à plusieurs titres :

- Il est représentatif du drainage du bassin amont ;
- La géomorphologie du ravin des grands gouffres dans lequel il est situé agit comme un barrage à l'écoulement des eaux. Ce barrage est une zone tampon dans laquelle la dynamique de la montée du niveau est un paramètre important en terme d'alerte. Des seuils d'alerte peuvent être mis en œuvre dès lors que le niveau d'eau atteint celui de l'exutoire de ce barrage naturel ;
- La présence du gouffre, qui est le plus absorbant des gouffres de la forêt d'Orléans, joue un rôle dans la vidange du barrage. C'est un bon site d'étude de la relation pluie-ruissellement-absorption ;
- La montée en crue est très nette car le ravin est profond et étroit.

Par ailleurs, le gouffre est relativement facile d'accès (moyennant l'autorisation du propriétaire) et la couverture réseau est excellente, une antenne étant située juste au-dessus.

En contrepartie :

- le site est en propriété privée et l'accès est dépendant de l'autorisation du propriétaire. Cette autorisation avait été accordée pour la durée du projet ;
- l'aménagement nécessitera des travaux de maçonnerie pour stabiliser la prise de pression. Le dispositif installé pendant le projet n'était pas voué à devenir pérenne ;
- le couvert forestier ne permet pas d'envisager l'utilisation de panneaux solaire pour l'alimentation de la station ;
- le transport de sédiments et de débris végétaux associés aux écoulements de la Retrève et à sa perte dans le gouffre peut provoquer des colmatages partiels et des débousses qui perturbent la relation pluie-niveau et son extrapolation. Le site nécessitera un nettoyage régulier ;
- le dénivelé important (plus de 6 m) rend problématique la mise en place d'échelles limnimétriques qui devront être étagées et fixées à la paroi. La végétation devra être contenue pour garder une lisibilité des bas niveaux. L'échelle devra pouvoir être lue même à distance (depuis l'autre berge lorsque l'eau envahie la vallée) ;
- la configuration du site oblige à déporter la mesure du débit de plusieurs centaines de mètres en amont. Le site ne convient pas pour une station hydrométrique ;
- le ravin des grands gouffres reçoit de l'eau non seulement depuis le lit amont de la Retrève (en provenance de l'est), mais également depuis le drainage des champs voisins et le ruissellement sur le chemin et les terrains « à l'aval » en provenance de l'ouest du fait d'une très faible pente du terrain vers le ravin. L'écoulement s'inverse à partir d'une certaine cote de débordement (non identifiée) ;
- une fois que le ravin est rempli (ce qui correspond tout de même à des situations assez exceptionnelles) la crue s'étale dans la forêt. L'hydrogramme forme un plateau et l'interprétation de la crue est difficile.

En conclusion, le site du gouffre d'Ambert présente un intérêt certain dans l'objectif d'établir des seuils d'alerte mais un intérêt plus faible pour de la prévision étant donné la difficulté de relier le niveau mesuré à un débit.

5.2.2. Le gouffre des Pas Ronds

Situé dans la partie aval du bassin amont de la Retrève, le gouffre des Pas Ronds est une zone de perte à la géomorphologie complexe. La coalescence de plusieurs gouffres confère au système une forme étalée qui déborde de l'axe du lit de la Retrève. Comme pour le gouffre d'Ambert, la dépression karstique forme un barrage dont la vitesse et le taux de remplissage peut servir de niveau d'alerte.

Le lit de la Retrève en amont du gouffre Pas Ronds 1 (Figure 56), bien incisé, pourrait être aménagé pour une mesure de débit avec mise en place d'échelles limnimétriques.

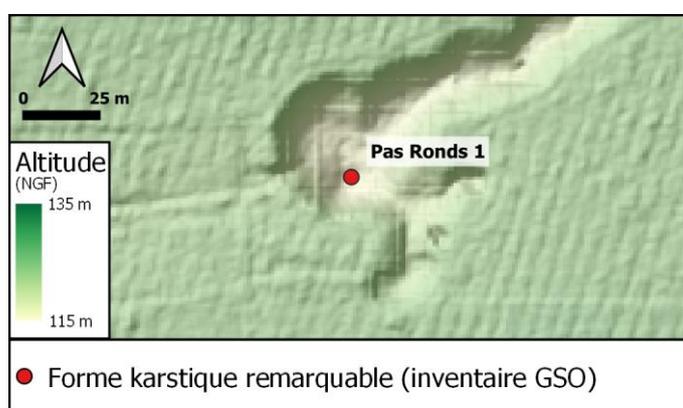


Figure 56 : Les Pas Ronds.

L'accès le plus court se fait à partir du champ de tir. La difficulté d'obtenir des autorisations d'accès sur cette zone a perturbé de manière importante la récupération des données. Le seul jour de visite autorisé était le vendredi, hors période de chasse.

La couverture réseau au gouffre des pas ronds est par ailleurs très mauvaise et le couvert forestier dense. La télétransmission des données y semble problématique.

Ces aspects nous ont amené à abandonner le choix du gouffre des Pas Ronds pour la mise en place d'une station d'observation.

5.2.3. Les fosses Guillaume

Une station sur les fosses Guillaume permettrait de caractériser le sous-bassin du fossé du Renard qui rejoint la Retrève à l'aval de Cercottes.

Les fosses Guillaume forment les dépressions les plus importantes du bassin de la Retrève. Les fosses situées les plus en aval (Fosses Guillaume 1) ont un fonctionnement complexe. Elles reçoivent non seulement les eaux du Renard mais aussi des eaux de ruissellement provenant de la voie ferrée. Elles ont plusieurs exutoires : des gouffres qui se créent et se referment, des puits d'absorption.

Il a été jugé préférable d'installer notre station quelques centaines de mètres en amont, aux fosses Guillaume 2.

Les fosses Guillaume 2 correspondent à une dépression en forme de cuvette. Le point d'absorption principal est situé au sud du bassin dont la paroi est érodée par la circulation de l'eau, faisant apparaître les racines profondes des arbres. Le capteur de pression avait été positionné dans ces racines dénudées.

Cette cuvette est située à l'aval d'un bief rectiligne (artificialisé) du fossé du Renard qui se prête bien aux jaugeages et mesures de débits au flotteur (tant que l'ensemble n'est pas inondé). Il y a peu de système absorbant en amont (excepté Fosses Guillaume 4 qui est un puits absorbant construit en 1989 mais qui semble complètement colmaté). L'installation d'échelles limnimétriques y est envisageable.

Cependant, le site est un lieu de passage (randonneurs, VTT, moto-cross). Sa position péri-urbaine en fait un lieu souvent visité. Après quelques semaines de fonctionnement notre appareil a été vandalisé. Les mesures ont dû être stoppées.

Si une station est installée à cet endroit elle devra être protégée par une cage métallique.

L'utilisation de panneaux solaire n'y est pas envisageable en raison du couvert forestier et l'accès n'y est pas direct (nécessite 5 minutes de marche).

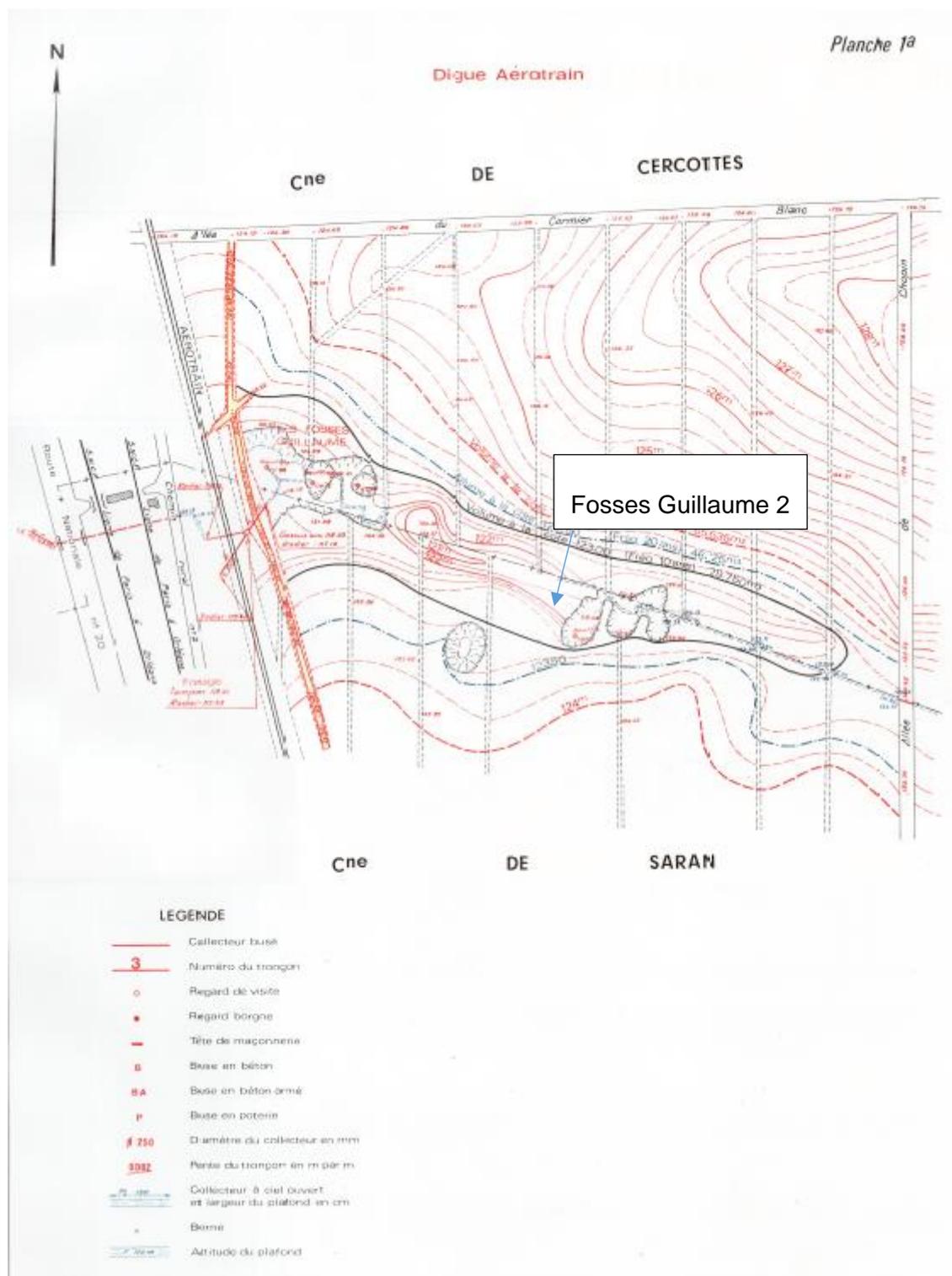


Figure 57 : Les fosses Guillaume (archives de l'ONF – communication de Mr T.Wrobel).

5.2.4. L'étang de la Retrève

Situé entre les gouffres d'Ambert et des Pas Ronds, l'étang de la Retrève est un réservoir artificiel (Figure 58) créé en 1974.

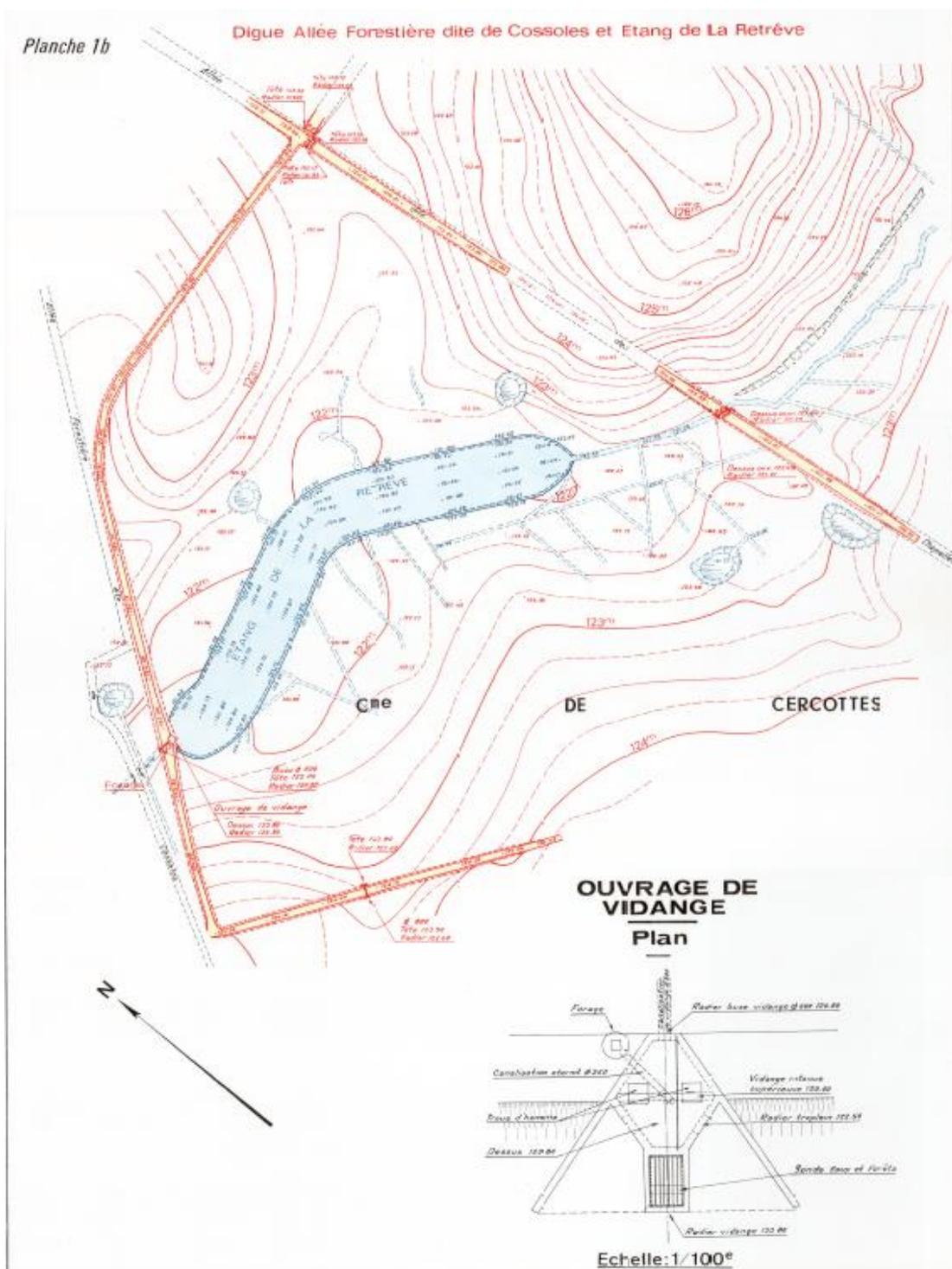


Figure 58 : L'étang de la Retrève (Archives de l'ONF. Communication de Mr. T. Wrobel).

C'est au comité de pilotage du 27 janvier 2022 que l'idée d'équiper l'étang de la Retrève d'un capteur et d'en faire une station d'observation a été présentée. Le syndicat de la Retrève a repris cette suggestion dans ses propositions du 1^{er} février 2022 pour un aménagement de l'étang de la Retrève.



Figure 59 : L'étang de la Retrève à sec (23/07/2019).



Figure 60 : Étang de la Retrève : bief amont.



Figure 61 : Vanne de l'étang de la Retrève : l'alimentation se fait en pied de structure. La vanne est bloquée en position semi-ouverte. Le tuyau avec col de cygne est la prise d'eau qui fonctionne en siphon et envoie l'eau dans le puits absorbant voisin.



Figure 62 : Puits absorbant voisin de l'exutoire de l'étang.

Si le site présente beaucoup d'avantages en terme d'accès et de protection des équipements, la définition de seuils d'alerte pourrait s'y trouver plus délicate. L'étang se remplit rapidement lors des périodes pluvieuses et déborde fréquemment de son lit. Il n'y a pas de relation hauteur-débit facile à établir du fait du volume de stockage, des débordements et des ré-infiltrations dans les puits absorbants. Le débit de fuite est réglable par une vanne.

Le site est à considérer comme une station d'observation d'intérêt mais dont le suivi ne permettra probablement pas d'être modélisé et utilisé pour de la prédiction.

5.2.5. Conclusion sur le choix des sites

Des 4 sites envisagés, aucun ne présente actuellement une configuration propice à l'établissement d'une station hydrométrique, qui seule permettrait l'établissement d'une loi hauteur débit (courbe de tarage). Or, en matière de modélisation hydrologique on se base généralement sur les débits pour établir des prédictions, et non sur des hauteurs d'eau.

Toutefois, dans un objectif d'information de la population sur le risque de débordement de la Retrève, le suivi des niveaux dans le gouffre d'Ambert et à l'étang de la Retrève permettrait de définir des seuils. De même aux fosses Guillaume pour le fossé du Renard. Les vitesses de remplissage de ces retenues naturelles ou artificielles sont par ailleurs des indicateurs probables du risque de débordement en aval, à analyser avec des données de prévision météorologiques.

5.3. CHOIX DES ÉQUIPEMENTS

Rappel des objectifs :

- alerte de la collectivité/autorités locales en cas de dépassement de seuils (par exemple sur différents niveaux de remplissage du ravin des grands gouffres/fosses Guillaume/Étang Retrève) ;
- information en temps réel à la population ;
- capitalisation des données pour leur exploitation future dans un objectif de prédiction.

Cette estimation vise uniquement à donner un ordre de grandeur. La faisabilité technique et le choix définitif des équipements devront être accompagnés par un organisme ou un bureau d'études spécialisé.

Le système d'avertissement aux crues envisagé est composé :

- d'un capteur de pression dont la sensibilité est adaptée à la plage de variation du niveau (0-0,5 bar pour l'étang de la Retrève et les Fosses Guillaume 2, ou 0-1 bar pour Ambert) ;
- d'un tube de tranquillisation dans lequel ce capteur plongera au bout d'un câble. Le tube protège le capteur et limite les batillages ;
- d'un boîtier avec le module de télétransmission et son antenne, disposé en surface pour bien capter les signaux de téléphonie mobile. Il n'est pas prévu de panneau solaire du fait du couvert forestier ;
- d'une échelle limnimétrique couvrant la plage de variation du niveau (jusqu'à 7 m à Ambert). Elle sera fixée à une paroi au-dessus des gouffres ;
- le cas échéant par une cage de protection.

Le poste pluviométrique de Météo France à Bricy peut être utilisé mais l'impact des orages et précipitations très localisés (telles les pluies de 2016) sera sous-estimé. Pour y remédier, un pluviographe pourrait être associé à ce système d'avertissement. L'implantation d'un pluviographe sur site n'est pas forcément la garantie d'une bonne information. En effet, l'environnement forestier n'y est pas favorable. L'installation devra donc se faire sur un site spécifique mieux dégagé tout en restant dans le bassin versant (par exemple au hameau de Ambert, ou aux bois Jean, à proximité du Ravin des Grands Gouffres). Cependant, cela suppose une autre convention, un temps d'accès supplémentaire lors des visites de terrain et des coûts de maintenance et de traitement de la donnée.

Alternativement, une utilisation des données obtenues par les radars de précipitation pourrait être considérée mais la qualité de cette mesure indirecte nécessite d'être contrôlée pour un usage sur le bassin de la Retrève.

Quelques aspects complémentaires apparaissent essentiels :

- les protocoles de transfert des données devront rester compatibles avec les systèmes existants afin de faciliter l'interopérabilité avec des outils comme l'hydroportail ;
- les données doivent pouvoir être consultés par tous. ;
- les équipements devront être disponibles en doublon et facilement interchangeables en cas de panne ou dégradation.

Le coût d'une station est estimé à environ 10 000 € HT, travaux d'installation compris. Vient ensuite le coût de fonctionnement (abonnements, contrôles, maintenance).

Un ordre de grandeur de ces coûts peut être donné par les coûts de fonctionnement du réseau piézométrique régional, estimés à environ 1 500 € HT par an par piézomètre.

Le Guide méthodologique Vigicrues (DGPR, 2018) donne également une estimation de 3000 € à 4500 € HT/an pour deux stations (arrondi à 2000 € par station et par an).

5.4. CONCLUSION

Parmi les sites potentiels identifiés, le site du gouffre d'Ambert (ravin des grands gouffres) constitue le meilleur candidat pour la mise en place d'une station d'alerte aux crues dans le bassin versant de la Retrève.

La mise en place d'un système d'avertissement local aux crues recommandé permettra la mesure des hauteurs d'eau et sa mise à disposition en temps réel. En pratique, le système enverra un message (SMS, e-mail) dès lors que certains seuils de niveau auront été dépassés. La (ou les) personne(s) d'astreinte pourra alors consulter les données du serveur, informer et déclencher différents niveaux de vigilance.

Ces seuils peuvent être arbitrairement choisis (par exemple avec des taux de remplissage de 25, 50, 75, 100 % des retenues naturelles ou artificielles des sites). D'autres paramètres pourront entrer en ligne de compte : vitesse de montée en crue, prévisions météorologiques à court terme.

Ces recommandations visent à mettre en place un système minimal d'observation avec un coût modeste (investissement de 10 000 €/station et coût de fonctionnement d'environ 2000 €/an/station).

La bancarisation de ces informations permettra sans doute de mettre en place des règles empiriques. En effet, l'étude du bassin versant de la Retrève a bien montré la complexité du système hydrologique dans la forêt d'Orléans avec la diversité des sols et le rôle des gouffres. Mais à partir du moment où la Retrève se met à couler, la relation est probablement plus directe entre le débit et la pluviométrie (au poste pluviométrique de Bricy). Dès lors, il est envisageable que quelques années de suivi sur ces stations relativement rudimentaires permettront d'établir des prédictions sur les risques de crues.

6. Conclusion

L'étude hydrologique qui a fait l'objet de ce rapport avait pour but de déterminer des hydrogrammes et des débits caractéristiques de la Retrève, du Renard et du Nan pour servir de données d'entrée au modèle hydraulique du CEREMA. L'absence de données sur le bassin du Nan n'a pas permis d'estimer son débit à la confluence avec la Retrève. Pour les autres cours d'eau, l'étude s'est attachée dans un premier temps à caractériser l'hydrogéomorphologie du bassin, analyser les crues historiques, réaliser des mesures (jaugeages) pendant les rares épisodes d'écoulement.

Il apparaît que le bassin amont de la Retrève présente un comportement hydrologique différent à partir des années 1970, période charnière pendant laquelle divers aménagements (équipements de gouffres, création de l'étang de la Retrève, forages absorbants des fosses Guillaume...) ont vu le jour. Ces aménagements ont joué un rôle bénéfique sur les inondations puisqu'après les années 70, les inondations ont affecté Gidy seulement deux fois en 50 ans contre 12 fois dans les 40 années précédentes.

Le fonctionnement « en cascade » des écoulements dans la Retrève a pu être confirmé par les jaugeages réalisés durant les hivers 2019/2020 (malgré la perturbation du confinement) et 2020/2021. Durant ces périodes, il a pu être constaté que les écoulements naissent et se perdent en forêt d'Orléans à la faveur de barrages naturels (Orfosses mouillées, Ravin des Grands Gouffres, Gouffre des Pas ronds, fosses Guillaume) ou artificiels (Étang de la Retrève). En particulier, l'équipement de certains de ces sites (Gouffre d'Ambert, Fosses Guillaume et Pas Ronds) avec des dispositifs d'acquisition automatique a permis de suivre une crue (Février 2021) et d'en observer la dynamique (hydrogramme).

Les jaugeages réalisés ponctuellement et les informations collectées dans les travaux des spéléologues du Groupe Spéléologique Orléanais ont permis d'évaluer la capacité d'absorption de ces pertes à environ 2,2 m³/s pour la Retrève et 0,5 m³/s pour le Renard. Néanmoins, l'analyse historique des jaugeages réalisés par le GSO a montré que les gouffres absorbaient davantage dans les années 70 qu'actuellement. Ils subissent aujourd'hui une diminution de leur efficacité par manque d'entretien.

Les précipitations ont ensuite été étudiées en détail. Elles apparaissent plus fortes sur la forêt d'Orléans que sur la partie beauceronne du bassin versant. Cette analyse a conduit à écarter le poste de Loury dont la série n'est pas stationnaire et qui a été arrêtée par Météo-France en 2020. Elle a retenu les pluies SAFRAN, issues d'un calcul par Météo France ainsi que les pluies de Bricy, seule station avec une longue chronique (permettant de remonter à 1937). Le poste de Bricy, cependant, sous-estime les pluies sur la partie amont du bassin de la Retrève. Météo-France fournit également des coefficients pour calculer les quantiles de pluies à diverses périodes de retour (les coefficients Montana). Les divers jeux de données ainsi constitués permettent de proposer différentes valeurs de pluies journalières pour plusieurs périodes de retour. Les données confirment que les pluies de 2016 étaient très supérieures à la fréquence centennale et suggère une période de retour de 200 ans.

Ces valeurs de précipitations sont ensuite utilisées pour estimer les débits de projet. La méthodologie est schématisée sur la Figure 63. Les débits sont obtenus à partir de la méthode rationnelle (jusqu'aux débits décennaux) complétée par la méthode du Gradex (pour les périodes de retour supérieures). Ces méthodes nécessitent de connaître le temps de concentration et le coefficient de ruissellement. Le temps de concentration retenu sur les bassins est de 24 h pour la Retrève en amont de Cercottes et 12 h pour le ruisseau du Renard. Le coefficient de

ruissellement est estimé entre 30 % et 40 % à partir d'une analyse des sols (issue de la Tache 2 du projet), des pentes et de l'occupation des sols. C'est une plage de valeur assez élevée qui traduit le fort potentiel de ruissellement du bassin.

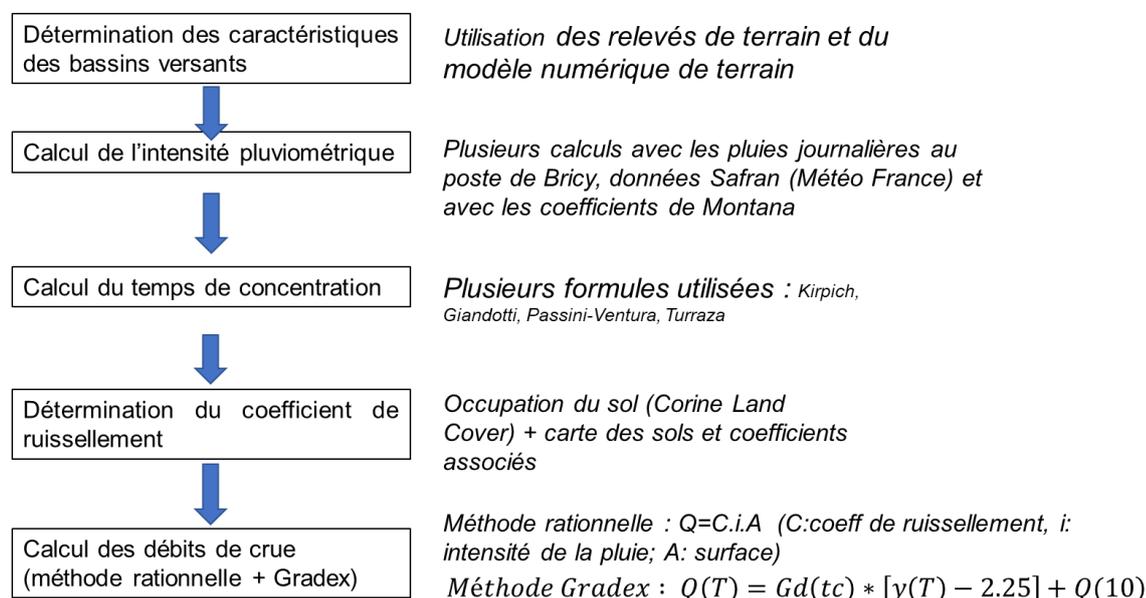


Figure 63 : Méthodologie du calcul des débits de projet.

Considérant les fortes incertitudes des calculs, on a pris soin d'assortir les résultats d'intervalles de confiance. Les plages de valeurs ainsi obtenues constituent des jeux de données d'entrée pour le calage du modèle hydraulique, assorties d'incertitudes, laissant de la place à des ajustements.

L'autre information nécessaire au modèle hydraulique est la forme de l'hydrogramme. Il ne suffit pas de connaître le débit de pointe, il faut aussi indiquer au modèle hydraulique comment la crue monte et décroît pour différentes situations (différentes périodes de retour). C'est le modèle Gardenia qui a été utilisé pour reconstituer l'hydrogramme de la crue de 2016 sur la base des observations de crue enregistrées en particulier au gouffre d'Ambert (station M1bis) et des différents jaugeages réalisés en 2020 et 2021 en plusieurs endroits. Bien qu'il y ait très peu de données de calage, le modèle Gardenia a permis de proposer un hydrogramme de crue cohérent composé de 3 jours de montée et 4 jours de descente pour la Retrève en amont de Cercottes. Les hydrogrammes de crue de 2016 et de périodes de retour T50 ont alors pu être établis et utilisés par le CEREMA.

Toutefois, si la dynamique de la crue semble être bien reproduite par Gardenia, son amplitude reste inférieure aux estimations de débits de projet qui ont été retenues après plusieurs itérations entre les calculs du CEREMA et ceux du BRGM. Le pas de temps journalier du modèle et l'utilisation des données pluviométriques de la station de Bricy sont deux facteurs susceptibles d'expliquer cette sous-estimation.

Au final, ces itérations entre le modèle hydraulique du CEREMA et les outils hydrologiques du BRGM ont permis de retenir les débits de projets correspondant aux quantiles de pluie calculés avec les coefficients de Montana et un coefficient de ruissellement de 30 %. Pour la crue de 2016,

la période de retour prise en compte pour les calculs est de 200 ans et correspond à un débit de 22 m³/s, absorption par les gouffres comprise.

Ce long exercice aurait pu être grandement facilité si le bassin de la Retrève avait disposé de données hydrométriques. Une station de mesure semble indispensable non seulement pour acquérir de la donnée, mais également pour servir de station d'alerte et anticiper les crues importantes. Les sites pilotes mis en place dans la deuxième année du projet ont montré leurs intérêts et leurs limites. Le gouffre d'Ambert, l'étang de la Retrève, et dans certaines conditions (renforcement de la protection des équipements) les fosses Guillaume peuvent être instrumentés et servir de système d'avertissement local aux crues. L'étude suggère des équipements et un mode de fonctionnement qui, dans l'idéal, impliquerait la DREAL afin que les données collectées soient disponibles sur l'hydroportail.

7. Bibliographie

Deprez N., Evrard E., Peter A., Trautman F. (1971). Autoroute A10. Etude préliminaire du tronçon sud B2 de la section Ponthévrard – Orléans (78 - 45). Rapport BRGM 71-SGN-103-BDP.

Gutierrez Alexis (2022) – Étude hydraulique et hydrogéologique du bassin versant de la Retrève. 3 : Écoulements souterrains. Rapport final. BRGM/RP-71804-FR, 49 p.

Langlois D., 1967. Étude hydrogéologique de la Forêt d'Orléans. Bulletin des Naturalistes Orléanais n°36, Janvier 1967.

Moreau J., Munerot J., 1966. Essai pour une solution au problème de la Retrève. Bulletin des Naturalistes Orléanais n°24, Juillet 1966.

Noury G., Gutierrez A., Masson F. (2021) – Étude hydraulique et hydrogéologique du bassin versant de la Retrève. 1. Inventaire et analyse des indices karstiques. Rapport BRGM/RP-71330-FR. Version 0, 108 p., 34 fig., 7 tabl., 5 ann. dont 1 sur USB, 1 carte.

SEPIA (2018) - Étude diagnostic et prospective sur les inondations par ruissellement et débordement de cours d'eau (hors Loire). Modélisation des écoulements exceptionnels. Rapport 17A093.

Tissoux H. (2021). Étude hydraulique et hydrogéologique du bassin versant de la Retrève 2. Cartographie de la lithologie de surface dans le bassin versant de la Retrève. Rapport BRGM/RP-71266-FR.

CEPRI –Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation (2018) Prévision et anticipation des crues et des inondations.

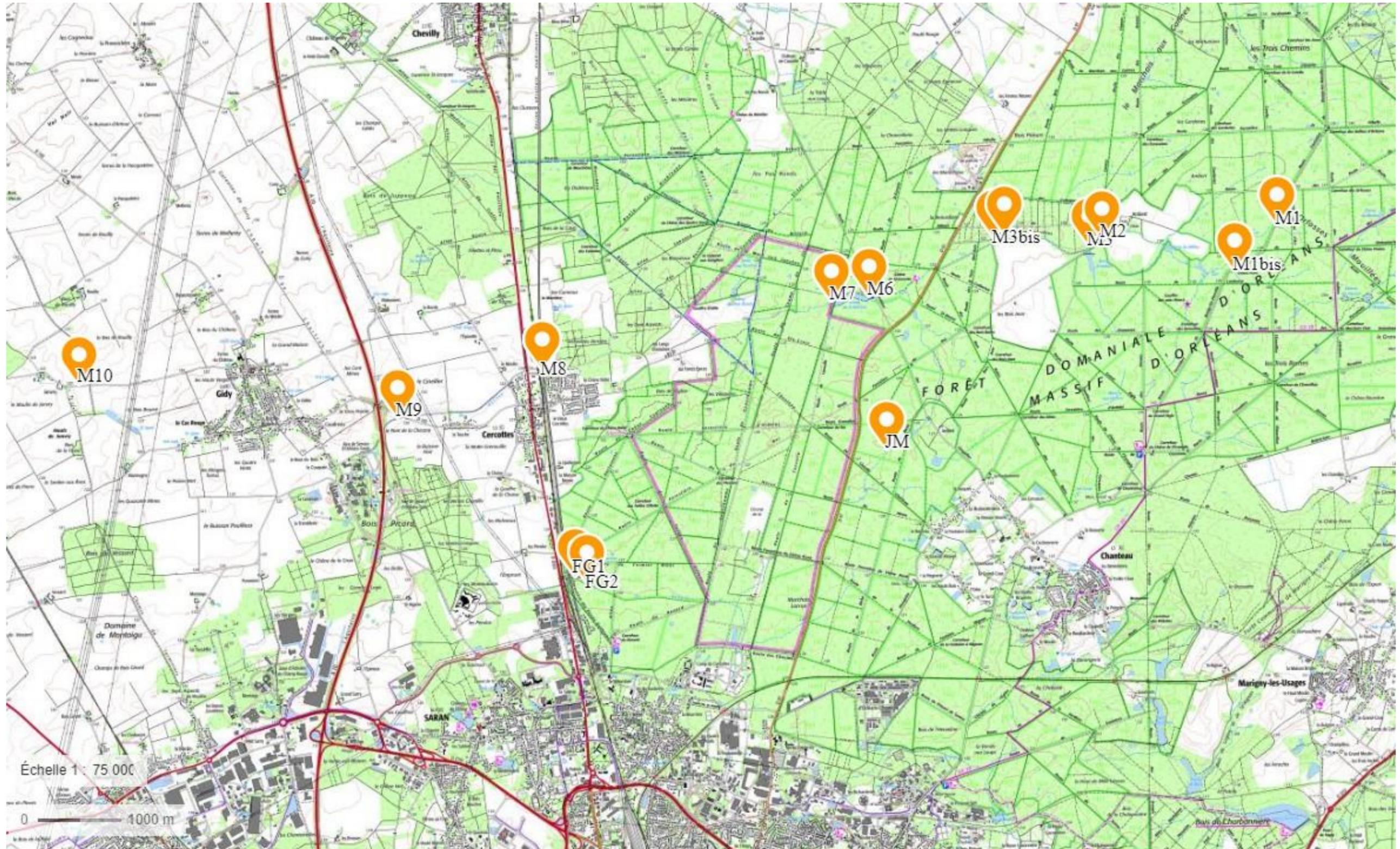
DGPR (2018). Guide Méthodologique conception et mise en oeuvre d'un système d'avertissement local aux crues.

Syndicat de la Retrève (2022). Propositions. Réflexions suite à la réunion du 5° comité de pilotage sur l'étude concernant le bassin versant de la Retrève du Jeudi 27 janvier 2022.

Annexe 1

Campagnes de jaugeages

Points utilisés dans les campagnes de jaugeage



Nom	Lieu	Date	LATITUDE	LONGITUDE	TEMPS	DEBIT_l/s	fil_eau_mNGF	jaugeage	COMMENTAIRE
FG 1	Fosses Guillaume Amont Fosse 1	11/03/2020 14:00	47.967539	1.890395	BEAU	27.0		FG1_2020-03-11.TSV	Mesure avec Gilles au MF-Pro dans le ruisseau juste en amont de la fosse principale
FG1	Fosses Guillaume Amont Fosse 1	11/05/2020 19:30	47.967539	1.890395	BEAU	50.0			Les 2 fosses (1a et 1b) sont en eau. Elles communiquent entre elles. La fosse la plus proche de la voie ferrée reçoit des écoulements d'une canalisation enterrée (20 l/s) qui semble traverser le talu et provenir de la voie ferrée. Elle reçoit aussi <1l/s un petit écoulement du versant nord. La deuxième fosse reçoit le ruissellement qui court dans un lit méandreux où nous avons mesuré le débit en mars (27 l/s). Aujourd'hui il y a plus d'eau (la base du jalon, toujours présent est 7 cm en dessous du niveau actuel). Estimation au flotteur 100 l/s brut => 50l/s maxi
FG1	Fosses Guillaume Amont Fosse 1	11/12/2020 09:00	47.967539	1.890395	PLUIE	0.5			La première fosse reçoit 0.5 l/s de la buse Sud qui draine la voie ferrée et une partie de la RN20 (passe sous le remblais et collecte un réseau de drains)
FG1	Fosses Guillaume Amont Fosse 1	04/01/2021 10:00	47.967539	1.890395					D.Langlois nous indique qu'il y a de l'eau dans le fossé du Renard
FG1	Fosses Guillaume Amont Fosse 1	06/01/2021 10:00	47.967539	1.890395		0.0			Sec partout.
FG1	Fosses Guillaume Amont Fosse 1	28/01/2021 00:00	47.967539	1.890395		0.0			Carnet de D.Langlois: FG1 à sec; FG2:10 l/s; FG3 sec et FG4 un filet d'eau.
FG1	Fosses Guillaume Amont Fosse 1	03/02/2021 10:00	47.967539	1.890395	NUAGEUX	0.5			La première partie de la fosse (Nord) a un peu d'eau claire qui provient de la voie ferrée+route. Elle se déverse dans la deuxième partie (Sud) qui absorbe donc la surverse et une petite arrivée de l'amont (0,5 l/s à l'œil)
FG1	Fosses Guillaume 1	08/02/2021 10:00	47.967539	1.890395	NUAGEUX	28.3		FG1_2021-02-08. FG1_1PT_2021-02-08	Les 2 fosses aval (1a et 1b) forment un seul plan d'eau alimenté au sud par FG2 (25 à 29 l/s) et au nord par un ruissellement le long du remblais (qq l/s)
FG1	Fosses Guillaume Amont Fosse 1	10/02/2021 10:00	47.967539	1.890395	NEIGE / BEAU				La fosse n'est plus alimentée.
FG2	Fosses Guillaume 2 (instrumentée)	06/01/2021 10:00				0.0			Remis la sonde en place et le tube entre les racines (le dispositif a été abîmé par des curieux)
FG2	Fosses Guillaume 2 (instrumentée)	29/01/2021 10:00				10.0			D.Langlois signale que le dispositif mis en place a été vandalisé (coffre ouvert, câble retiré, tube cassé)
FG2	Fosses Guillaume 2 (instrumentée)	03/02/2021 11:00			NUAGEUX	43.0		FOS_G_2021-02-03.TSV Fossé du renard amontFG2.xml	La fosse 2 qui contient 4 pertes en a déjà noyé 3. La 4ème est en cours de remplissage (la + à l'ouest). La fosse 3 ne se remplit que quand le niveau est plus haut (elle est sèche) et la fosse 4 pleine d'eau n'absorbe rien (pas de courant vers la fosse). La mesure de débit est faite sur le tronçon rectiligne en amont de ces fosses au MF-PRO. NB: le câble de la mesure de niveau a été tiré sur 23 cm par un curieux => le zéro de la sonde est à +0,23m au dessus du fond.
FG2	Fosses Guillaume 2 (instrumentée)	08/02/2021 10:00			NUAGEUX	60.0		FG2_2021-02-08	Toutes les fosses sont pleines. Mesure au MF-PRO en amont sur la portion rectiligne (idem 3/02/21)
FG2	Fosses Guillaume 2 (instrumentée)	10/02/2021 10:00			NEIGE / BEAU				Le niveau dans la fosse 2 a baissé de 1,50 m par rapport au 08/02/2. Fosse 3 à sec. Fosse 4: 1 filet d'eau. Le niveau dans le fossé du Renard a baissé de moitié
JM	Gouffre Jean Moreau	17/06/2020 00:00				0.0			2 fosses dont une profonde (~6m) et certainement très active.
JM	Gouffre Jean Moreau	04/12/2020 00:00							D.Langlois nous indique les gouffres Jean Moreau sont alimentés
JM1	Gouffre Jean Moreau 1	28/01/2021 00:00				30.0			D.Langlois indique: L'eau est à 1 m du sol (niveau moyen de la forêt). Moreau 1 reçoit ~30/40 l/s. Moreau 2 à sec, le fossé s'égoutte.
JM1	Gouffre Jean Moreau 1	10/02/2021 00:00			NEIGE / BEAU				gouffres toujours submergés
M1		10/03/2020 10:27	48.002918	2.000238	NUAGEUX	9.3	127.65	M1_2020-03-10.TSV	mesure débit à aval confluence de 3 fossés
M10		11/03/2020 15:30	47.988346	1.810405	BEAU	2.0	118.75	M10_2020-03-11.TSV	debit très faible estimé à 2L/sec par mesure dans 2 buses diametre 400 mm
M10	Gidy - Janvry	11/05/2020 20:38			BEAU	0.0			Pas de flux. Quelques flaques dans les champs, au loin vers le nord et au sud-est vers la Step.
M11		11/03/2020 16:21			BEAU	-			observation à sec
M12		11/03/2020 16:30	48.009787	1.807883	BEAU	-			observation à distance, pas d'écoulement visible
M13		11/03/2020 16:40	48.009109	1.782893	BEAU	-			observation à sec

M1Bis		10/03/2020 11:39	48.000778	1.995540	NUAGEUX	96.3	123.11	M1C_2021-03-10	mesure débit à l'amont du "Grand pont"
M1Bis	Grand Pont	01/02/2021 17:30	48.000778	1.995540		101.0		M1_Grand Pont_01_Fev_21.xml	Jaugeage (OTT C2) sur la face aval du "Grand-Pont". Hauteur d'eau: 50 cm. Profondeur du niveau d'eau sous le tablier du pont: 99 cm. Jaugeage au bouchon sur 15 m (amont/aval du pont: 81 s. soit 185 l/s brut -> m=0.55 NB: h max pour la perche de l'OTT C2
M1Bis	Grand Pont	08/02/2021 16:30	48.002918	2.000238		182.0		M1_2021-02-08 Je ne comprends pas le calcul de S dans ce fichier	Mesure au MF-PRO, 3 verticales, en amont du pont avec la perche rehaussée, depuis le pont. H=0.65 m. section du pont carrée de 2m de large sur 1,5 m de haut (0,65m mouillé). La Retrève en amont du pont est sortie de son lit.
M2		10/03/2020 12:20	48.003900	1.974478	NUAGEUX	126.5	122.33		mesure débit en amont du pont près d'Ambert
M2	Ambert	11/05/2020 18:45	48.003900	1.974478		0.0			estimation/ Il y a de l'eau mais elle semble stagnante. Au pont, l'épaisseur d'eau est de 30 cm. Le niveau par rapport au tablier est 1,18 m (contre 1,07 m le 11 mars)
M2	Ambert	03/02/2021 13:45	48.003900	1.974478	NUAGEUX	114.0	114.00	M2_2021-02-03.TSV	Au bouchon: 21 s pour 6 m. 54 cm dans la conduite Ø90cm.
M2	Ambert	08/02/2021 15:00	48.003900	1.974478		224.0		M2_2021-02-08.TSV	Le niveau est supérieur à celui observé en mars 2020. h dans la conduite=77 cm. Vitesse=6m en 13s; Mesure au MF-PRO en conduite
M2	Ambert	11/02/2021 12:20	48.003900	1.974478		0.0			bouhon corrigé
M3		10/03/2020 13:00	48.003118	1.972066	NUAGEUX	126.7	123.29	M3_2020-03-10.TSV	mesure débit en aval confluence étang Ambert avec Retrève
M3	Aval de l'étang d'Ambert	11/05/2020 18:50	48.003118	1.972066		0.0			Pas d'écoulement. Presque pas d'eau (flaques)
M3	Ambert	08/02/2021 14:00	48.003900	1.974478		224.0			
M3 Bis	(ravin des grands gouffres)	11/03/2020 11:50			BEAU				Le gouffres est saturé. Niveau d'eau au niveau du puits 3m, eau stagnante débit non mesurable
M3bis	Ravin des grands gouffres. Gouffre d'Ambert	11/05/2020 17:40				85.0			estimé entre 70 et 100l/s Le fond de la retrève est occupé par un ruisseau qui court. La totalité du flux engouffre à la base du mur du gouffre d'Ambert en écoulement libre.
M3Ter	Bord sud du Ravin des grands gouffres	11/05/2020 17:54				20.0			Dans le tournant du chemin privé on entend de l'eau qui s'écoule. Elle provient du drainage du champ voisin. Elle coule en cascade vers le ravin mais elle n'y parvient pas. Ce débit semble se perdre dans un fontis situé à une vingtaine de mètres au sud du ravin et environ 3m au dessus de la vallée. A noter, deux fontis similaires sont présents dans le tournant et ont probablement absorbé pendant les grosses inondations. On ne les voyait pas en mars (noyés).
M3bis	Gouffre d'Ambert	17/06/2020 00:00				0.0			Tout est sec. Pertes bien visibles
M3bis	Gouffre d'Ambert	12/10/2020 10:00				0.0			
M3bis	Ravin des grands gouffres. Gouffre d'Ambert	01/02/2021 15:00			NUAGEUX	107.0		Ambert_01_Fev_21.xml	Jaugeage (OTT C2) à 5 mètres en amont de l'entrée du gouffre, dans le lit incisé de la Retrève. Légère augmentation du niveau pendant la mesure. Hauteur d'eau sur le bord gauche du gouffre: 65 cm d'eau à 15 h.
M3bis	Gouffre d'AMBERT	08/02/2021 15:00				344.0		RGG_2021-02-08	Le niveau monte. Toutes les dolines sont au même niveau. La doline la plus proche du chemin du Bois Jean (avec les souches) est en cours de remplissage. Les champs du Bois Jean apportent un bon débit (~10l/s). Le reste provient de la Retrève (mesure au MF-Pro très en amont pour "avoir pied": 344 l/s. Au delà du RGG il n'y a pas d'écoulement.
M4		10/03/2020 14:20	48.001028	1.947657	NUAGEUX		123.28		pas de mesure débit mais léger reflux d'eau stagnante vers l'amont
M4	Route D97 de St-Lye la Foret. Pont sur la Retrève	11/05/2020 19:10	48.001028	1.947657	NUAGEUX	1.0			Très léger écoulement. Il est confirmé que l'écoulement est dirigé vers le NE, cad vers le ravin des GG
M4	Route D97 de St-Lye la Foret. Pont sur la Retrève	08/02/2021 15:30	48.001028	1.947657		0.0			Sous le pont de la route de St-Lyé l'eau est stagnante => l'alimentation de l'étang de la Retrève se fait pas le sous bassin local et le ruisseau de l'Ardelet. Ce dernier, visible sur la route de Chanteau, coule depuis quelques jours seulement.
M5		10/03/2020 14:30	47.996771	1.944018	NUAGEUX				eau stagnante débit non mesurable

M6		10/03/2020 14:40	47.997447	1.938408	NUAGEUX					<i>l'étang de la retrève est sorti de son lit, il y a 20 à 40 cm d'eau sur le chemin. Le piézo installé de 3,5m sans eau</i>
M6	Etang de la Retrève Amont	11/05/2020 16:40	47.997447	1.938408	NUAGEUX					<i>L'eau occupe toute la surface de l'étang mais l'épaisseur d'eau est faible (env. 10 à 20 cm). Les joncs ne sont qu'à moitié noyés. L'eau atteint la base de la bouche du tuyau blanc à l'amont de l'étang Il n'y a pas d'eau arrivant de l'amont de la Retrève (lit humide, flaques mais pas d'écoulement).</i>
M6	Etang de la Retrève	17/06/2020 00:00	47.997447	1.938408		0.0				<i>Etang sec</i>
M6	Etang de la Retrève	12/10/2020 10:00				0.0				
M6	Etang de la Retrève Amont	01/02/2021 00:00	47.997447	1.938408	NUAGEUX	20.2			Etang_Retrève_01_Fev_21.xml	<i>Jaugeage (OTT C2) à l'entrée de l'étang.</i>
M6	Etang de la Retrève Amont	03/02/2021 13:00	47.997447	1.938408	NUAGEUX	16.5 ou 11			M6_RET2_2021-02-03.TSV M6_2021-02-03.TSV	<i>Entrée de buse. Vit. 0.147 m/s au MF-PRO. H=21 cm. D=90 cm</i>
M6	Etang Retrève amont	08/02/2021 00:00	47.997447	1.938408		62.4			M6_2021-02-08.TSV	<i>L'étang de la Retrève se remplit. Mesure au MF-PRO en conduite circulaire. H dans la conduite qui passe sous le chemin=0.5M. Vitesse au bouchon 5 m en 13s</i>
M7	Etang de la Retrève Aval	10/03/2020 14:40			NUAGEUX					<i>accès impossible sans waiders</i>
M7	Etang de la Retrève Aval	11/05/2020 17:00			NUAGEUX	0.0	z-2,40 m			<i>La vanne de l'étang est fermée. Le trop plein n'est pas atteint. Il y a 50 cm d'eau au niveau du ponton, soit le niveau d'eau à 2,40 m sous la plateforme. Un petit fontis (1 m de Ø et 1,10 m de profondeur) s'est créé auprès du ponton. Pas d'écoulement dans le lit de la Retrève à l'aval de l'étang mais il y a un peu d'eau stagnante.</i>
M7	Etang de la Retrève Aval	01/02/2021 16:00				0.0				
M7	Etang de la Retrève Aval	08/02/2021 00:00				0.0				
M8		10/03/2020 15:20	47.989916	1.884615	NUAGEUX	1.8	119.78		M8_2020-03-10.TSV	<i>debit très faible, suspicion évacuation eau usée (odeur forte)</i>
M8	Cercottes. Dernière buse avant le passage de la voie ferrée	11/05/2020 20:05	47.989916	1.884615	BEAU	16.0				<i>A cet endroit il y a des arrivées d'eau souterraines. En amont de la buse le débit est très faible. En aval il est estimé (flotteur) à 16 l/s. Il y a probablement des exutoires (vide cave, drainage du lotissement...). C'est un débit un peu artificiel (c'était également le cas le 11/03/2020). Il y a également un fossé qui donne <1l/s</i>
M8	Cercottes. Dernière buse avant le passage de la voie ferrée	01/02/2021 00:00	47.989916	1.884615		0.0				<i>Pas d'écoulement significatif</i>
M9		11/03/2020 14:30	47.985066	1.862237	BEAU	-				<i>observation à sec</i>
M9	Le Pont de la chicane	11/05/2020 20:25	47.985066	1.862237	BEAU	0.0				<i>Pas d'eau sous la route. De part et d'autre, l'eau est stagnante dans la tranchée artificielle qui canalise la Retrève. Les champs sont légèrement inondés.</i>
PR	Gouffre des Pas Ronds	11/12/2020 12:00				0.0				<i>Installation d'un capteur de pression au dessus de la perte principale. Le 20/02/1977 cette perte absorbait 200 l/s (communicatoin D.Langlois)</i>
STEP		11/03/2020 17:00	47.983060	1.819686	BEAU					<i>PUITS: 19,35 sommet/0,50 tubage/profondeur puits 40,40m</i>

Annexe 2

Fiches de jaugeages

RETREVE - M1 - Les Orfosses Mouillées. Parcelle 1299 - Route forestière de Bougy-les Neuvelles

Nom profil: M1
Nom opérateur: GB
12:09:45 - 10.03.2020
Référence de longueur: 0,000 m

Modèle: MF pro
n/s: 000000337584
Dém: v.1.00
Application: v.1.06

Type capt.: Vitesse et profond.
n/s: 173130338374
Dém: v.1.00
Application: v.1.02

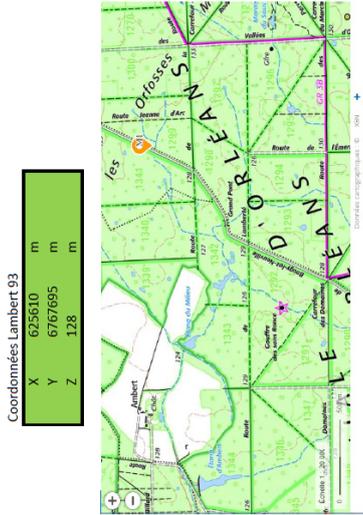
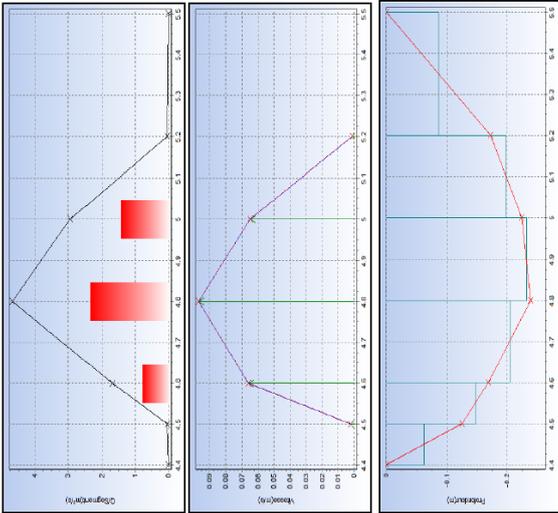
Filtre: MPF Paramètre: 10 s
Pré-filtre: Marche Rang: 5
IEM: 50 Hz

Saisie station: Non fixe
Calcul débit: Section médi.
Rive de départ: Rive droite
Nb de stations: 7
Longeur du flux: 1,100 m
Débit total: 9,344 lps
Surface totale: 0,174 m²
Prof. moy.: 0,158 m

Résultats de mesure:

Tps	Station	Emplac. (m)	Méthode	Prof. (m)	Facteur rive	Surface (m/s)	0,2 (m/s)	0,4 (m/s)	0,6 (m/s)	0,8 (m/s)	Lit (m/s)	Vitesse moyenne (m/ Surface (m ²))	Débit (lps)
12:03:27	1	4,4	0 point	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:04:20	2	4,5	1 point	0,125	0	0	0,002	0	0	0	0	0,002	0,03
12:05:32	3	4,6	2 point	0,169	0	0,128	0	0,005	0	0,005	0	0,066	1,683
12:06:50	4	4,8	3 point	0,239	0	0,197	0	0,074	0	0,074	0	0,097	4,672
12:08:01	5	5	3 point	0,224	0	0,155	0	0,044	0,017	0,044	0	0,065	2,928
12:09:00	6	5,2	1 point	0,172	0	0	0	0,001	0	0,001	0	0,001	0,043
12:09:23	7	5,5	0 point	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Site: M1
Opérateur: GB
Date/Heure: 10-03-2020 12:03:27 > 12:09:45
Débit(m³/s): 9,344 +/- 0,00
Largeur(m): 1,10
Vitesse Moyenne(m/s): 53,639
Surface(m²): 0,174
Profondeur Moyenne(m): 0,158
Niveau d'eau, Débit: 0,00
Niveau d'eau, Fin: 0,00
Méthode pour Section: MEAN
Méthode de mesure: 1 Point
Facteur de Surface: --
Facteur de Glace: --
Vitesse Min(m/s): 0,001
V Max(m/s): 0,097
Périmètre Mouillé(m): 1,232
Rayon Hydr(m): 0,141



Coordonnées Lambert 93

X	625610	m
Y	6767695	m
Z	128	m

RETREVE - M1bis - Grand Pont. Parcelle 1298 - Route forestière de Bougy-les Neuvelles

Nom profil: M1B
Nom opérateur: GB
12-27-57 30.03.2020

Référence de longueur: 0,000 m

Modèle: MF pro
n/c: 000000117584
Date: v.1,00
Application: v.1,06

Type capt.: Vitesse et profond.

Nom profil: M1B
Nom opérateur: GB
12-27-57 30.03.2020

Référence de longueur: 0,000 m

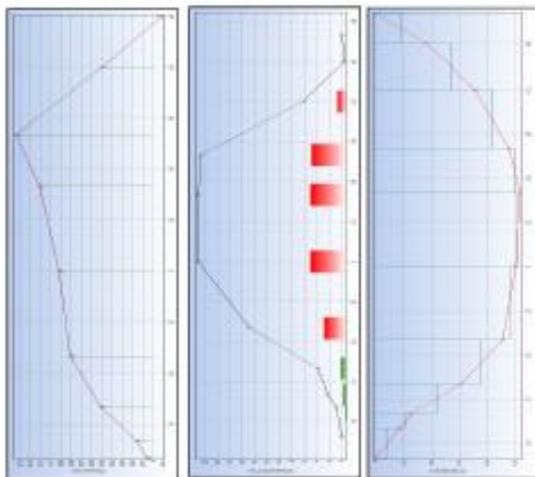
Modèle: MF pro
n/c: 000000117584
Date: v.1,00
Application: v.1,06

Type capt.: Vitesse et profond.

n/c: 121330133374
Date: v.1,00
Application: v.1,00

Filtre: MF: Paramètre: 10 s
P14-filtre Marche: Itag: 5
EM: 30 lit.

Sable station: Non fixe
Calcul débit: Section méd.
Nbr de départ: flux direct
N° de stations: 11
Largeur du flux: 3,000 m
Débit total: 96,33 l/s
Surface totale: 1,152 m²
Prof. moy.: 0,651 m



Coordonnées Lambert 93

X	625564	m
Y	676716	m
Z	125	m

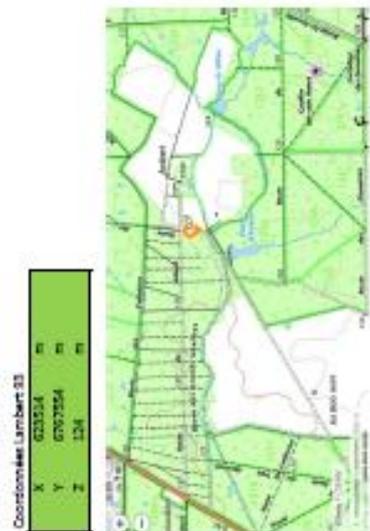
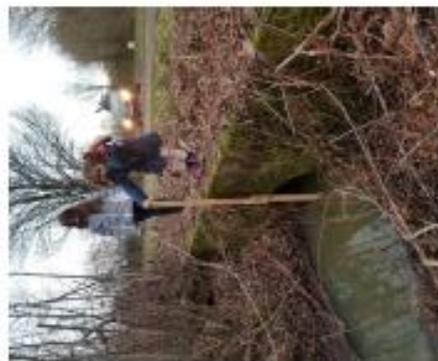
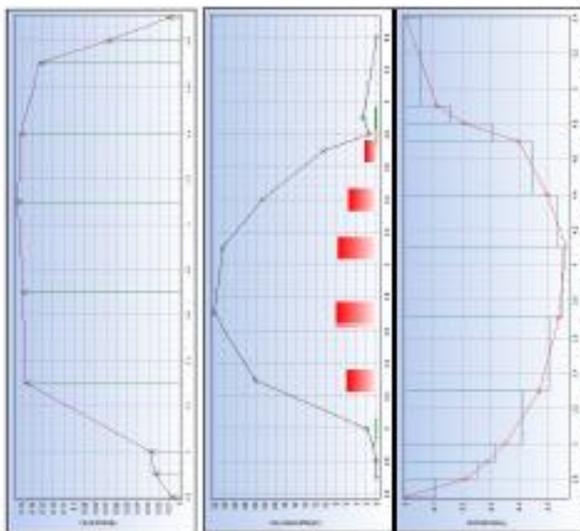


Site: M1B
Opérateur: GB
Date/heure: 10-03-2020 12:23:52 + 12:27:57
Débit(l/s): 96,330 +/- 0,00
Largeur(m): 3,00 Vitesse Moyenne(m/s): 71,239
Surface(m²): 1,152 Profondeur Moyenne(m): 0,651
Niveau d'eau, Débit: 0,00 Niveau d'eau, Pro: -0,00
Méthode pour Section: MEAN Méthode de mesure: 1 Point
Facteur de Surface: 1 -- Facteur de Débit: 1 --
Vitesse Min(m/s): 0,000 V Max(m/s): -0,134
Période Mouille(m): 6,158 Rayon hyd(m): -0,324

Typ	Station	Emplac. (m)	Méthode	Prof. (m)	Facteur ris	Surface (m²)	0,2 (m/s)	0,4 (m/s)	0,6 (m/s)	0,8 (m/s)	1,0 (m/s)	Vitesse moyenne (m/s)	Surface (m²)	Débit (l/s)
1	12-23-53	1,7 0 pointe		0 -	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	12-24-28	1,9 1 pointe	0,085 -	0,085 -	0	0	0	0	0,006	0	0	0,006	0,128	0,89
3	12-25-10	2 1 pointe	0,127 -	0,127 -	0	0	0	0	0,016	0	0	0,016	0,14	2,301
4	12-26-25	2,2 3 pointe	0,305 -	0,305 -	0	0,02	0	0	0,065	0,052	0	0,051	0,076	3,863
5	12-28-08	2,5 3 pointe	0,456 -	0,456 -	0	0,089	0	0	0,083	0,068	0	0,081	0,182	14,8
6	12-30-39	3 3 pointe	0,503 -	0,503 -	0	0,115	0	0	0,091	0,07	0	0,092	0,251	23,06
7	12-32-16	3,5 3 pointe	0,518 -	0,518 -	0	0,129	0	0	0,112	0,091	0	0,113	0,207	23,06
8	12-34-14	4 3 3 pointe	0,478 -	0,478 -	0	0,145	0	0,15	0,094	0	0	0,134	0,167	22,53
9	12-35-50	4,2 3 pointe	0,356 -	0,356 -	0	0,154	0	0,025	0,035	0	0	0,125	0,125	6,225
10	12-36-37	4,5 1 pointe	0,181 -	0,181 -	0	0	0	-0,008	0	0	0	-0,008	0,085	-0,42
11	12-37-23	4,7 0 pointe	0 -	0 -	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

RETRÈVE - M2 - Pont d'Ambert.

Nom profil: M2
Nom opérateur: GB
Date/heure : 13/03/2020 10:03:20
Référence de longueur: 0,000 m
Modèle: MF pro
N°: 00000037554
Clerc v.1,00
Application: v.1,06
Type capt: Vitesse et profond.
N°: 17110103374
Clerc v.1,00
Application: v.1,02
Filtre: MF Paramètre: 20 s
Pré-filtre: Marche Rang 5
IFM: 50 Hz
Sable station: Non file
Calcul sable: Section nald.
Rive de départ: Rive gauche
No de stations: 12
Longeur du fil: 2,700 m
Débit total: 126,2 l/s
Surface totale: 1,222 m²
Prof. moy: 0,622 m



Typ	Station	Emplac. (m)	Méthode	Prof. (m)	Facteur rive	Surface (m ²)	0,2 (m/s)	0,4 (m/s)	0,6 (m/s)	0,8 (m/s)	Lt (m/s)	Vitesse moye Surface (m ²)	Débit (l/s)
1	13-13-49	2,7	0 point	0	0	0	0	0	0,002	-0,011	0	0	0
2	13-21-15	2,8	3 point	0,213	0	0,04	0	0,067	0,011	0,004	0	0,008	0,171
3	13-23-52	2,9	3 point	0,289	0	0,067	0	0,325	0,01	-0,012	0	0,024	0,682
4	13-26-34	3	3 point	0,348	0	0,325	0	0,325	0,106	0,005	0	0,028	1,96
5	13-28-24	3,3	3 point	0,47	0	0,325	0	0,325	0,106	0,005	0	0,146	23,99
6	13-30-26	3,7	3 point	0,537	0	0,325	0	0,325	0,106	0,005	0	0,146	23,99
7	13-32-28	4,1	3 point	0,563	0	0,325	0	0,325	0,106	0,005	0	0,146	23,99
8	13-37-28	4,6	3 point	0,697	0	0,325	0	0,325	0,106	0,005	0	0,146	23,99
9	13-39-13	4,7	3 point	0,398	0	0,325	0	0,325	0,106	0,005	0	0,146	23,99
10	13-40-28	4,8	1 point	0,207	0	0	0	0	0,068	0	0	0,133	10,57
11	13-40-35	4,9	1 point	0,11	0	0	0	0	0,01	0	0	0,068	1,407
12	13-41-20	5	0 point	0	0	0	0	0	0,01	0	0	0,01	2,752

Site : M2
Opérateur : GB
Date/heure : 13/03/2020 10:03:20 > 13/03/20
Débit(m³/s) : 126,500 +/- 0,00
Longeur(m) : 2,70
Vitesse Moyenne(m/s) : 103,502
Surface(m²) : 1,222
Profondeur Moyenne(m) : 0,452
Niveau d'eau, Débit : 0,00
Niveau d'eau, Frc : 0,00
Méthode pour Section : MFAN
Méthode de mesure : 1 Point
Facteur de Surface : --
Facteur de Débit : --
Vitesse Min(m/s) : 0,008
Vitesse Max(m/s) : 0,154
Périmètre Mouillé(m) : 4,270
Rayon Hydr(m) : 0,236

RETREVE - M3 - Aval étang d'Ambert.

Nom profil: M3
Nom opérateur: GB
14:11:55 10.03.2020
Référence de longueur: 0,000 m

Modèle: MF pro
n/s: 00000037584
Dém: v.1.00
Application: v.1.06

Type capt.: Vitesse et profond.
n/s: 17313038374
Dém: v.1.00
Application: v.1.02

Filtre: MPF Paramètre: 10 s
Pré-filtre: Marche Rang: 5
IEM: 50 Hz.

Saisie station: Non fixe

Calcul débit: Section méd.

Rive de départ: Rive droite

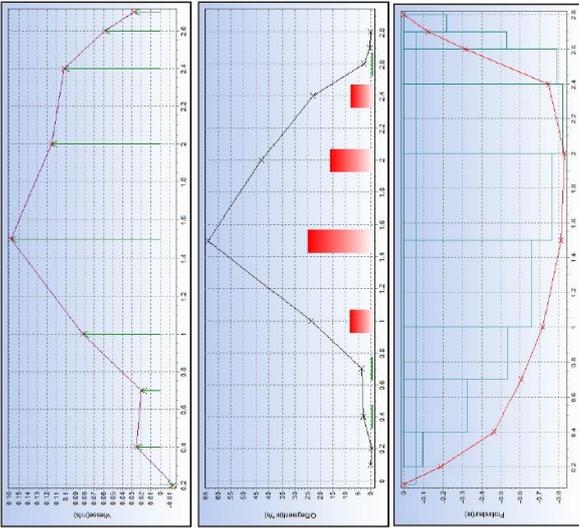
Nb de stations: 11

Largeur du flux: 2,700 m

Débit total: 162,7 lps

Surface totale: 1,673 m²

Prof. moy.: 0,620 m



Coordonnées Lambert 93
X 623359 m
Y 6767473 m
Z 124 m



Tps	Station	Emplac. (m)	Méthode	Prof. (m)	Facteur rive	Surface (m/s)	0,2 (m/s)	0,4 (m/s)	0,6 (m/s)	0,8 (m/s)	Lit (m/s)	Vitesse moyen Surface (m ²)	Débit (lps)
13:56:42	1	2,8 0 point		0 -	0 -	0	0	0	0	0	0	0	0
13:57:24	2	2,7 1 point		0,124 -	0	0	0	0	0,028	0	0	0,012	0,355
13:58:50	3	2,6 3 point		0,314 -	0	0,101	0	0	0,051	0,032	0	0,047	2,776
14:01:01	4	2,4 3 point		0,746 -	0	0,126	0	0,103	0,103	0,075	0	0,102	22,82
14:03:06	5	2 3 point		0,828 -	0	0,15	0	0,115	0,115	0,08	0	0,115	42,93
14:05:38	6	1,5 3 point		0,811 -	0	0,144	0	0,157	0,157	0,173	0	0,158	64,03
14:07:57	7	1 3 point		0,715 -	0	0,081	0	0,1	0,1	0,047	0	0,082	23,51
14:09:35	8	0,7 3 point		0,604 -	0	0,034	0	0,018	0,018	0,01	0	0,02	3,69
14:10:17	9	0,4 1 point		0,465 -	0	0	0	0,025	0	0	0	0,025	2,972
14:11:09	10	0,2 1 point		0,187 -	0	0	0	-0,014	-0,014	0	0	-0,014	-0,389
14:11:30	11	0 1 0 point		0 -	0 -	0	0	0	0	0	0	0	0

Site: M3
Opérateur: GB
Date/Heure: 10-03-2020 13:56:42 > 14:11:55
Débit(m³/s): 162,700 +/- 0,00
Largeur(m): 2,70 Vitesse Moyenne(m/s): 97,239
Surface(m²): 1,673 Profondeur Moyenne(m): 0,620
Niveau d'eau, Débit: 0,00 Niveau d'eau, Fin: 0,00
Méthode pour Section: MEAN Méthode de mesure: 1 Point
Facteur de Surface: -- Facteur de Glace: --
Vitesse Min.(m/s): -0,014 V Max.(m/s): 0,158
Périmètre Mouillé(m): 5,508 Rayon Hydr.(m): 0,304

RETREVE - M3Bis - Gouffre d'Ambert - Ravin des Grands Gouffres

Nom profil: RGG - M3bis
 Nom opérateur: AG
 14.10.53 08.02.2021

Référence de longueur: 0,620 m

Modèle: MF pro
 n/s: 000000337584
 Dém: v.1,00
 Application: v.1,06

Type capt.: Vitesse et profond.
 n/s: 173130338374
 Dém: v.1,00
 Application: v.1,02

Filtre: MPF Paramètre: 30 s
 Pré-filtre: Marche Rang: 5
 IEM: 50 Hz.

Saisie station: Non fixe
 Calcul débit: Section méd.
 Rive de départ: Rive droite
 Nb de stations: 8
 Largeur du flux: 2,500 m
 Débit total: 344,4 lps
 Surface totale: 1,158 m²
 Prof. moy.: 0,463 m

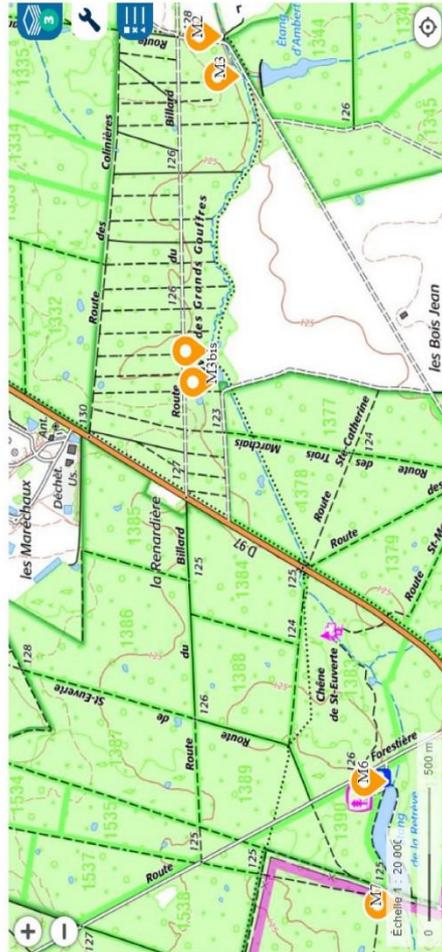


Entrée du gouffre (mesure en basses eaux)
 Coordonnées Lambert 93

X	622227	m
Y	6767596	m
Z	115	m

Mesure déportée vers l'amont en hautes eaux
 Coordonnées Lambert 93

X	622343	m
Y	6767625	m
Z	118	m



Résultats de mesure:		Facteur rive	Surface (m/s)	0,2 (m/s)	0,4 (m/s)	0,6 (m/s)	0,8 (m/s)	Lit (m/s)	Vitesse moyen Surface (m ²)	Débit (lps)	
Tps	Station	Emplac. (m)	Méthode	Prof. (m)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,028	2,926
13:46:29	1	0,200	0 point	0,187	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,130	16,54
13:51:05	2	0,500	3 point	0,318	0,000	0,115	0,113	0,000	0,130	0,274	102,6
13:56:08	3	1,000	3 point	0,548	0,000	0,439	0,326	0,000	0,374	0,278	131,9
13:59:36	4	1,500	3 point	0,556	0,000	0,455	0,419	0,000	0,474	0,285	70,72
14:04:30	5	2,000	3 point	0,633	0,000	0,187	0,214	0,000	0,248	0,139	18,26
14:07:54	6	2,400	3 point	0,464	0,000	0,097	0,074	0,000	0,131	0,027	1,521
14:09:33	7	2,600	1 point	0,183	0,000	0,055	0,000	0,000	0,055	0,000	0,000
14:10:09	8	2,700	0 point	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

RETRÈVE - M6 (et M7) - Etang de la Retreuve - amont

Nom profil: RET
 Nom opérateur: AG
 13:07:59 08.02.2021
 Référence de longueur: 0,220 m
 Modèle: MF pro
 n/s: 00000037584
 Dém: v.1,00
 Application: v.1,06

Entrée de l'étang - M6
 Coordonnées Lambert 93

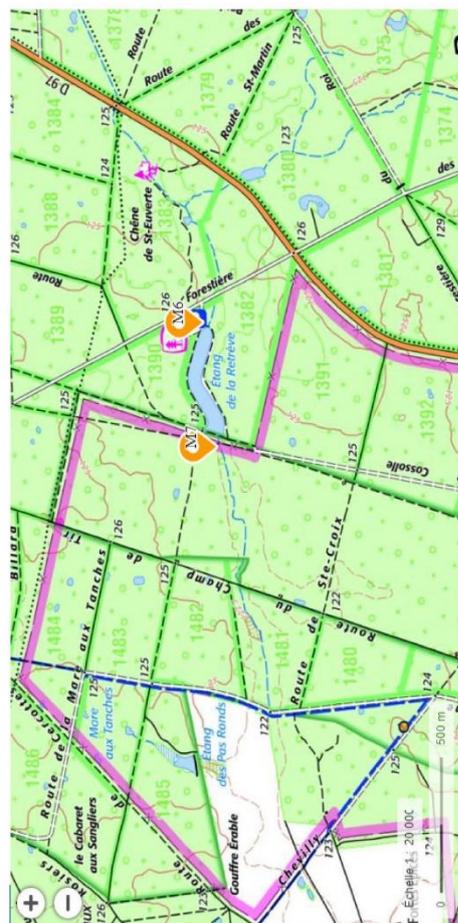
X	620726	m
Y	6766884	m
Z	122	m

Sortie de l'étang - M7
 Coordonnées Lambert 93

X	620264	m
Y	6766857	m
Z	122	m



Type capt.: Vitesse et profond.
 n/s: 173130338374
 Dém: v.1,00
 Application: v.1,02
 Filtre: MPF Paramètre: 30 s
 Pré-filtre: Marche Rang: 5
 IEM: 50 Hz.
 Saisie station: Non fixe
 Calcul débit: Section méd.
 Rive de départ: Rive gauche
 Nb de stations: 7
 Largeur du flux: 1,900 m
 Débit total: 62,40 lps
 Surface totale: 0,303 m²
 Prof. moy.: 0,159 m



Résultats de mesure:													
Tps	Station	Emplac. (m)	Méthode	Prof. (m)	Facteur rive	Surface (m/s)	0,2 (m/s)	0,4 (m/s)	0,6 (m/s)	0,8 (m/s)	Lit (m/s)	Vitesse moyen Surface (m ²)	Débit (lps)
12:51:31		1 0,500	0 point	0,085	0,800	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,013	0,342
12:54:12		2 0,800	2 point	0,152	-	0,000	0,036	0,000	0,000	0,031	0,000	0,045	1,530
12:57:35		3 1,100	3 point	0,187	-	0,000	0,271	0,000	0,284	0,194	0,000	0,065	16,92
13:00:41		4 1,500	3 point	0,217	-	0,000	0,323	0,000	0,332	0,271	0,000	0,076	23,90
13:03:33		5 1,800	3 point	0,185	-	0,000	0,333	0,000	0,285	0,227	0,000	0,055	15,70
13:06:21		6 2,100	2 point	0,084	-	0,000	0,193	0,000	0,000	0,126	0,000	0,025	4,011
13:07:07		7 2,400	0 point	0,019	0,800	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,022	0,000

RETREVE - M8 - Cercottes.

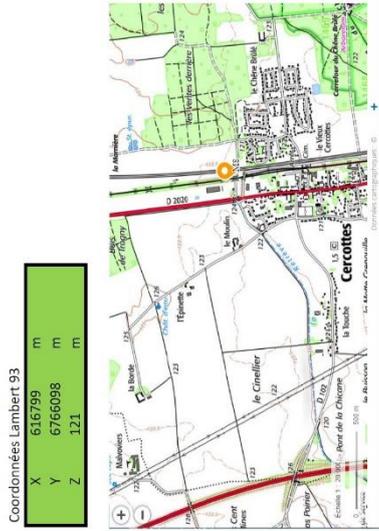
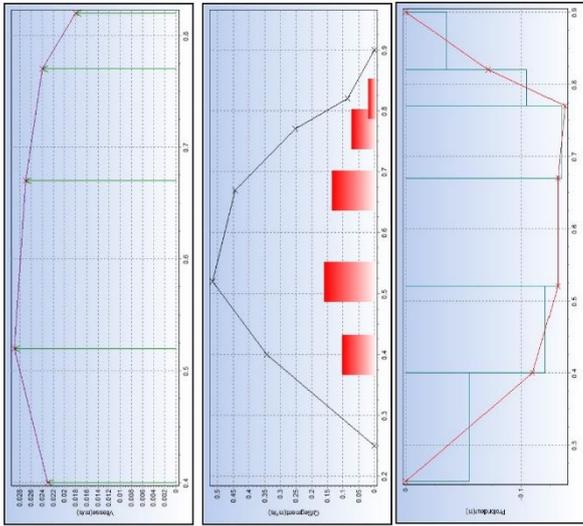
Nom profil: M8
Nom opérateur: LP
16:44:29 10.03.2020
Référence de longueur: 0,000 m

Modèle: MF pro
n/s: 00000037584
Dém: v.1,00
Application: v.1,06

Type capt.: Vitesse et profond.
n/s: 173130338374
Dém: v.1,00
Application: v.1,02

Filtre: MPF Paramètre: 10 s
Pré-filtre: Marche Rang: 5
IEM: 50 Hz.

Saisie station: Non fixe
Calcul débit: Section méd.
Rive de départ: Rive gauche
Nb de stations: 7
Largeur du flux: 0,650 m
Débit total: 1,640 lps
Surface totale: 0,064 m²
Prof. moy.: 0,099 m



Tps	Station	Emplac. (m)	Méthode	Prof. (m)	Facteur rive	Surface (m²)	0,2 (m/s)	0,4 (m/s)	0,6 (m/s)	0,8 (m/s)	Lit (m/s)	Vitesse moyei Surface (m²) Débit (lps)
16:39:36	1	0,25	0 point	0 -	0 -	0	0	0	0	0	0	0
16:41:09	2	0,4	1 point	0,11 -	0	0	0,023	0	0	0	0	0,015
16:42:00	3	0,52	1 point	0,132 -	0	0	0,029	0	0	0	0	0,029
16:42:35	4	0,67	1 point	0,132 -	0	0	0,027	0	0	0	0	0,016
16:43:15	5	0,77	1 point	0,138 -	0	0	0,024	0	0	0	0	0,024
16:43:50	6	0,82	1 point	0,071 -	0	0	0,018	0	0	0	0	0,018
16:44:10	7	0,9	0 point	0 -	0 -	0	0	0	0	0	0	0,005

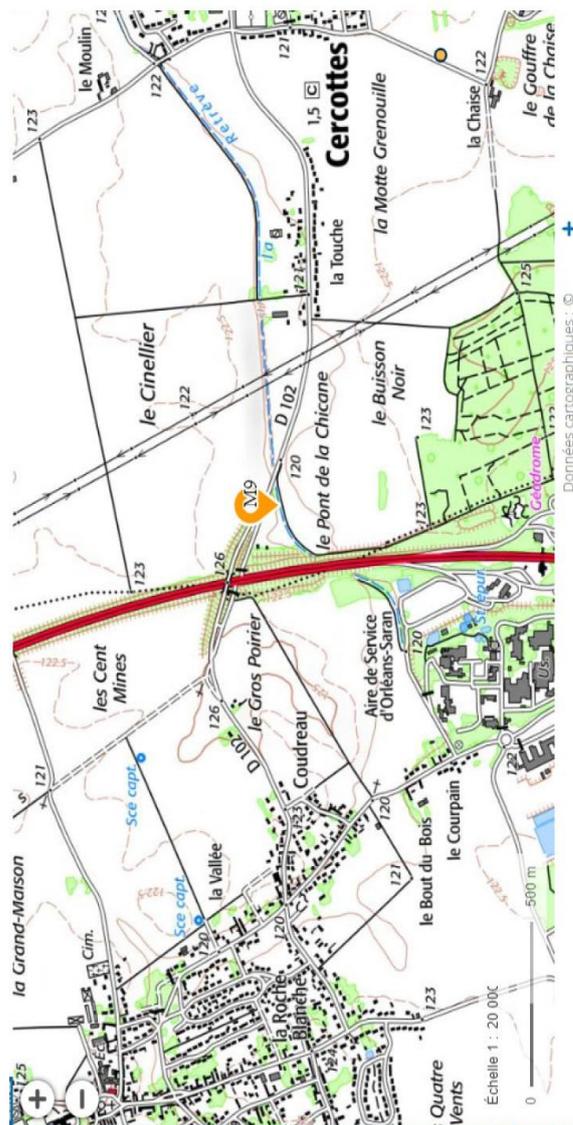
Site: M8
Opérateur: LP
Date/Heure: 10-03-2020 16:39:36 > 16:44:29
Débit(m³/s): 1,640 +/- 0,00
Largeur(m): 0,65 Vitesse Moyenne(m/s): 25,545
Surface(m²): 0,064 Profondeur Moyenne(m): 0,099
Niveau d'eau, Débit: 0,00 Niveau d'eau, Fin: 0,00
Méthode pour Section: MEAN Méthode de mesure: 1 Point
Facteur de Surface: -- Facteur de Glace: --
Vitesse Min.(m/s): 0,018 V Max.(m/s): 0,029
Périmètre Mouillé(m): 0,821 Rayon Hydr.(m): 0,078

RETREVE - M9 -Pont de la Chicane - Cercottes

Coordonnées Lambert 93

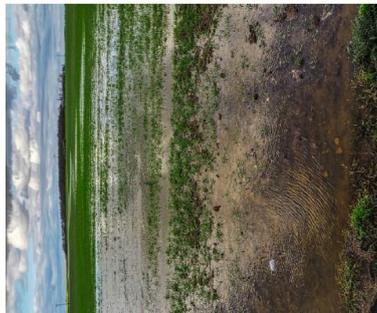
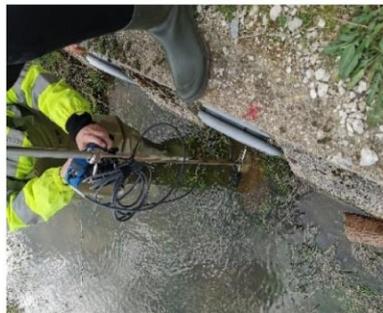
X	615057	m
Y	6765549	m
Z	119	m

Pas de jaugeage
(pas d'écoulement)



RETRÈVE - M10 - Janvry

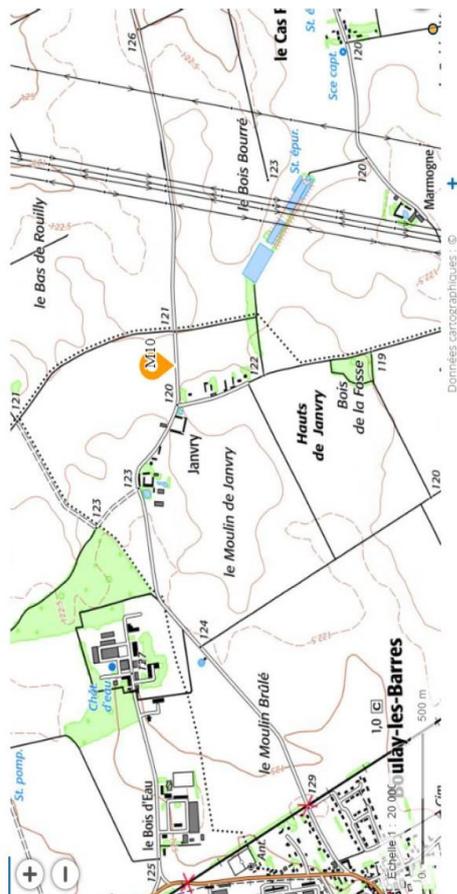
Nom profil: M10A	Nom profil: M10B
Nom opérateur: GB	Nom opérateur: GB
16:59:44 11.03.2020	17:04:28 11.03.2020
Modèle: MF pro	Modèle: MF pro
n/s: 000000337584	n/s: 000000337584
Dém: v.1,00	Dém: v.1,00
Application: v.1,06	Application: v.1,06
Type capt.: Vitesse et profond.	Type capt.: Vitesse et profond.
n/s: 173130338374	n/s: 173130338374
Dém: v.1,00	Dém: v.1,00
Application: v.1,02	Application: v.1,02
Filter: MPF Paramètre: 30 s	Filter: MPF Paramètre: 30 s
Pré-filtre: Marche Rang: 5	Pré-filtre: Marche Rang: 5
IEM: 50 Hz.	IEM: 50 Hz.
Méthode: 0,9 x Vmax	Méthode: 0,9 x Vmax
Forme: Circulaire	Forme: Circulaire
Diamètre (m): 0,400	Diamètre (m): 0,400
Prof. du débit (m): 0,073	Prof. du débit (m): 0,105
Débit (lps): 1,378	Débit (lps): 0,574
Vitesse maximum (m/s): 0,097	Vitesse maximum (m/s): 0,024
Vitesse moyenne (m/s): 0,087	Vitesse moyenne (m/s): 0,022
Surface totale (m²): 0,016	Surface totale (m²): 0,026



Vue vers l'aval de M10 (vallée de la Retrève)

Coordonnées Lambert 93

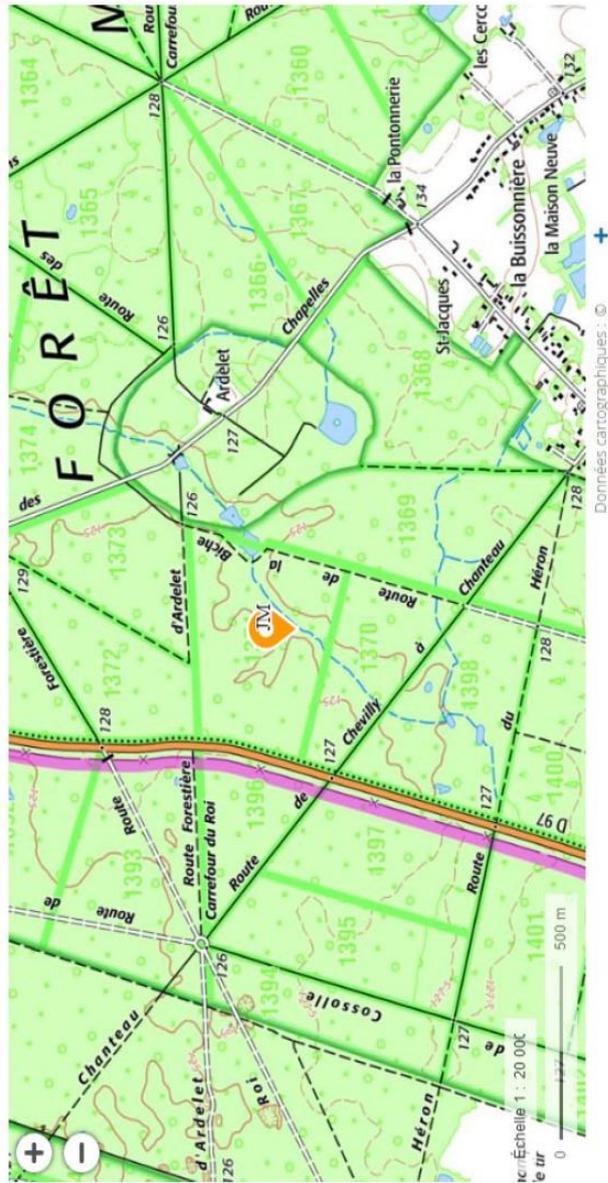
X	611248	m
Y	6765984	m
Z	119	m



RUISSEAU DE L'ARDELET - JM - GOUFFRE JEAN MOREAU 1

Coordonnées Lambert 93

X	620903	m
Y	6765084	m
Z	125	m



FG - Fossé du RENARD - Fosses Guillaume 1 et 2



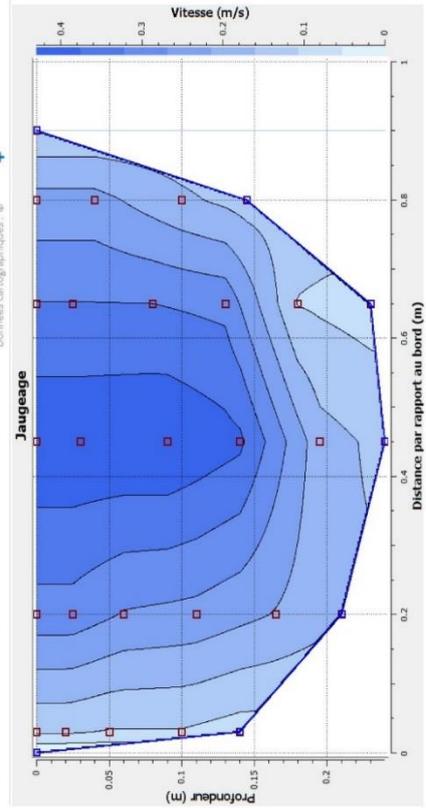
FG1		Coordonnées Lambert 93	
X	617149	m	
Y	6763621	m	
Z	117	m	

FG2		Coordonnées Lambert 93	
X	617291	m	
Y	6763551	m	
Z	121	m	

Depoillement d'un jaugeage à FG2

Coefficients	Distance [m]	Prof. [m]	Impulsion	Vitesse [m/s]	Débit laminaire [m ² /s]
	0	0	0	0	0
Rive gauche 0.8	0.03	0	0	0	0.0144387
Rive droite 0.8	0	0	0.115287	0.115287	
Fond 0.8	0.02	49	0.115287	0.115287	
Zéro au fond Oui	0.05	43	0.103007	0.103007	
	0.1	43	0.103007	0.103007	
	0.14	0	0.0824053	0.0824053	
Matériel	0.2	0	0.30072	0.0516069	
Type	0.025	146	0.30072	0.30072	
Méthode	0.06	126	0.26432	0.26432	
Equation de l'hélice	0.11	119	0.25158	0.25158	
$N < 2.94, V = 0.0614 * N + 0.015$	0.165	97	0.21154	0.21154	
$10.56 > N > 2.94, V = 0.0546 * N + 0.035$	0.21	0	0.169232	0.169232	
$N > 10.56, V = 0.0528 * N + 0.054$	0.45	0	0.42266	0.0818127	
Résultats	0	0	0.42266	0.42266	
Largeur	0.03	213	0.42266	0.42266	
Profondeur moyenne	0.09	217	0.42994	0.42994	0.189 m
Profondeur maximum	0.14	194	0.38808	0.38808	0.24 m
Rayon hydraulique	0.195	82	0.182827	0.182827	0.151 m
Coefficient K11/2	0.24	0	0.146261	0.146261	0.895
Vitesse moy de surface	0.65	0	0.32438	0.0567181	0.103 m/s
Vitesse maximum	0.025	159	0.32438	0.32438	0.43 m/s
Rapport Vmoy/Vmoyx	0.08	158	0.32256	0.32256	2.46
Vitesse moyenne	0.13	150	0.308	0.308	0.254 m/s
Section mouillée	0.18	44	0.105053	0.105053	0.17 m ²
Débit	0.23	0	0.0840427	0.0840427	0.0433 m ³ /s
	0.8	0	0.23338	0.23338	0.285044
	0.04	109	0.23338	0.23338	
	0.1	77	0.172593	0.172593	
	0.145	0	0.138075	0.138075	
	0.9	0	0.117705	0.117705	0.0143761

Mesure à l'amont des fosses Guillaume 2





**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Direction des Actions Territoriales Centre Val de Loire

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm