



HAL
open science

Analyse des risques d'inondation au niveau des systèmes d'endiguement des Hauts-de-Seine (92) dans le cadre d'une étude de dangers

Justine Bonnin

► To cite this version:

Justine Bonnin. Analyse des risques d'inondation au niveau des systèmes d'endiguement des Hauts-de-Seine (92) dans le cadre d'une étude de dangers. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03601567

HAL Id: dumas-03601567

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03601567v1>

Submitted on 8 Mar 2022

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

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

Diplôme d'ingénieur de l'ENGEES

Master 2 Géographie, Aménagement, Environnement et Développement

Parcours : Fonctionnement des Environnements Ruraux et Naturels

Année universitaire : 2020-2021

Analyse des risques d'inondation au niveau des systèmes d'endiguement des Hauts-de-Seine (92) dans le cadre d'une étude de dangers

Par :

BONNIN Justine

Sous le tutorat de :

MICHAUD Alexandra

Mémoire présenté le 1^{er} septembre 2021 devant un jury composé de :

Kenji FUJIKI

Guilhem DELLINGER

Dominique SCHWARTZ

Remerciements

Ce mémoire de fin d'étude est l'aboutissement d'un stage qui a été réalisé entre le 1^{er} février et le 30 juillet 2021 au sein du bureau d'étude ISL Ingénierie. Cette entreprise est composée d'environ 120 employés répartis dans plusieurs agences à travers la France. Je remercie la société de m'avoir permis de participer pour la première fois à la réalisation d'un projet d'une telle envergure. Je tiens à remercier les employés de l'agence de Paris qui ont su m'accueillir avec gentillesse et bienveillance malgré le contexte sanitaire actuel. Je tiens à remercier plus particulièrement toutes les personnes que j'ai rencontré et avec lesquelles j'ai passé de très agréables moments de détente lors des pauses mais également à l'extérieur du bureau.

Je souhaite remercier plus spécifiquement Alexandra MICHAUD, la cheffe de projet de cette affaire mais également ma tutrice qui a su m'accompagner et me conseiller tout au long de ce stage. Je voudrais également remercier Ichrak KHALDI qui m'a beaucoup aidé, notamment lors de la construction du modèle hydraulique. Merci à Guilhem DELLINGER de m'avoir suivi en tant que professeur encadrant pour l'ENGEES.

Enfin, je voudrais remercier mes proches qui ont su m'encourager durant ce stage et la rédaction de ce mémoire. Un petit message particulier à mes amis Antonin, Laure et Quentin pour leurs encouragements et leur soutien lors des moments de doute et à ma mère et ma sœur qui ont pris le temps de relire et corriger ce mémoire.

Résumé

Analyse des risques d'inondation au niveau des systèmes d'endiguement des Hauts-de-Seine (92) dans le cadre d'une étude de dangers

L'objectif de ce mémoire est d'étudier les risques d'inondation au niveau des systèmes d'endiguement prioritaires du département des Hauts-de-Seine : SEI_15, SEI_17 et SEI_19.

Pour cela, il a été décidé de réaliser un modèle numérique en 2D de la zone d'étude. Un modèle hydraulique (appelé ArteSeine) avait déjà été fourni par l'EPTB (Etablissement Public Territorial de Bassin) Grands Lacs de Seine. Mais, celui-ci étant à une échelle bien trop importante, nous avons dû en reconstruire un nouveau avec un maillage plus fin afin d'établir des zones d'inondation plus précises. Une fois calé, le modèle va nous permettre de simuler différents scénarii grâce au logiciel de modélisation Telemac 2D :

- 1- Simulation des scénarii nominaux afin de déterminer la zone protégée selon le niveau de protection
- 2- Simulation des scénarii de défaillances fonctionnelles et structurelles

(1) Alors qu'à l'origine les systèmes d'endiguement ont été construits pour avoir un niveau de protection correspondant à la crue de 1924, nous avons dû, par manque d'informations (sur la résistance et la gestion des ouvrages), réduire ce niveau de protection pour tous les systèmes. Ces niveaux permettent d'assurer la protection de 4850 personnes au niveau du SEI_15, 16100 au niveau du SEI_17 et 33000 au niveau du SEI_19.

(2) Les différents scénarii de défaillance ont été simulés avec la crue de 1924. Les scénarii de défaillances fonctionnelles (pour lesquels les ouvertures n'ont pas été obstruées) et structurelles (digues qui cèdent pendant l'inondation) montrent qu'un mauvais entretien des digues ou une mauvaise gestion en période de crue peut entraîner des inondations tout aussi importantes, voire pires que s'il n'y avait aucune digue.

Afin de préserver le niveau de protection actuel, une surveillance et une gestion régulières sont donc indispensables.

Abstract

Flood risks analysis of the diking systems of the Hauts-de-Seine (92) within the framework of a hazard study

The objective of this report is to study the flood risks next to the priority diking systems of the Hauts-de-Seine department: SEI_15, SEI_17 et SEI_19.

For this purpose, it was decided to produce a 2D digital model of the study area. A hydraulic model (called ArteSeine) had already been provided by the EPTB (Etablissement Public Territorial de Bassin) Grands Lacs de Seine. But, as it was on a much too large scale, we had to reconstruct a new one with a finer mesh to establish more precise flood zones. Once set, the model will allow us to simulate different scenarios using the Telemac 2D modelling software:

- 1- Simulation of nominal scenarios to determine the protected area according to the level of protection
- 2- Simulation of functional and structural failure scenarios

(1) While the diking systems were originally built to have a level of protection corresponding to the 1924 flood, we had to reduce this level of protection for all the systems due to lack of information (On the resistance and management of structures). These levels ensure the protection of 4850 people for SEI_15, 16100 for SEI_17 and 33000 for SEI_19.

(2) The different failure scenarios were simulated with the 1924 flood. The functional failure scenarios (where openings were not blocked) and structural failure scenarios (dikes failing during the flood) show that poor dike maintenance or management during floods can result in flooding that is just as bad or worse than if there were no dikes at all.

Therefore, to maintain the current level of protection, regular monitoring and management is essential.

Sommaire

I.	Introduction.....	5
A.	L'organisme d'accueil.....	6
B.	Contexte.....	6
C.	Objectifs.....	10
D.	Quelques définitions réglementaires.....	10
1.	Système d'endiguement.....	10
2.	Les ouvrages traversants et ouvertures du système d'endiguement.....	11
3.	Niveau de protection et zone protégée.....	12
II.	Etat de l'art de la modélisation des inondations dues aux débordement de cours d'eau.....	13
A.	La pertinence de la représentation bidimensionnelle dans le cas des inondations.....	13
B.	Logiciel de modélisation 2D.....	14
III.	Matériel et méthode.....	16
A.	Données d'entrée.....	16
1.	Données hydrologiques : BV, stations hydro, crues historiques et débits caractéristiques .	16
2.	Données bathymétriques et topographiques du modèle (hypothèses et à quoi ressemble le profil en long).....	19
3.	Profils en long des murettes.....	20
4.	Population en zone protégée.....	21
B.	Construction du modèle.....	22
1.	Choix de la zone d'étude.....	22
2.	Construction du maillage du modèle (hypothèse, pas de triangulation selon les différentes zones, matisées).....	23
3.	Données bathymétriques et topographiques.....	25
4.	Justification du choix des crues pour le calage.....	26
5.	Conditions aux limites : réalisation de la courbe de tarage.....	26
6.	Initialisation du modèle.....	27
7.	Coefficient de rugosité.....	28
8.	Résultats de calage.....	29
C.	Description détaillée des systèmes d'endiguement.....	34
1.	SEI_15 :.....	34
2.	SEI_17 :.....	38
3.	SEI_19 :.....	42
D.	Présentation des différents scénarii.....	46

1.	Scénarii 1 : fonctionnement nominal	46
2.	Scénarii 2 : défaillances fonctionnelles	47
3.	Scénarii 3 : défaillances structurelles	51
IV.	Discussion autour du modèle	55
A.	Préparation du maillage	55
B.	Coefficient de Strickler	55
C.	Murettes : les limites de TELEMAC-2D	57
V.	Résultats et discussions	58
A.	Définition	58
B.	Zone protégée	58
1.	SEI_15	58
2.	SEI_17	59
3.	SEI_19	60
C.	Dangerosité des différents scénarii de défaillance	61
1.	Scénarii de type 2 : ouvertures non obstruées	61
2.	Comparaison des scénarii 2-1 et 2-2	72
3.	Scénarii de type 3 : brèches de 100m	74
VI.	Conclusion et perspectives	80
VII.	Bibliographie	82
VIII.	Annexes	85

Liste des figures

Figure 1 : Carte des Hauts-de-Seine (Source : L-itinaire.com)	5
Figure 2 : Logo de ISL Ingénierie.....	6
Figure 3 : Logo de la MGP.....	6
Figure 4 : Localisation des systèmes d'endiguement sur lesquels ISL doit réaliser une étude de dangers et constituer un dossier d'autorisation	9
Figure 5 : Exemple de système d'endiguement (Source : CEREMA)	11
Figure 6 : Bassin versant de la Seine	16
Figure 7 : Localisation des stations hydrométriques à proximité du territoire d'étude	17
Figure 8 : MNT sur la partie amont de la zone d'étude.....	19
Figure 9 : MNT sur la partie aval de la zone d'étude.....	20
Figure 10 : Profil en long du système d'endiguement 20.....	21
Figure 11 : Emprise des deux modèles.....	22
Figure 12 : Saisie des polygones des éléments structurant la zone d'étude (modèle aval).....	23
Figure 13 : Maillage du modèle Telemac (modèle aval)	24
Figure 14 : Exemples de maillage de la zone d'étude	25
Figure 15 : Hydrogramme de la crue de 1924 à l'entrée du modèle	26
Figure 16 : Courbe de tarage du modèle aval	27
Figure 17 : Choix du coefficient de Strickler sur le modèle aval	29
Figure 18 : Profil en long de la ligne d'eau de la Seine – Crue de 1910	30
Figure 19 : Profil en long de la ligne d'eau de la Seine – Crue de 1924	31
Figure 20 : Profil en long de la ligne d'eau de la Seine – Crue de 1955	32
Figure 21 : Profil en long de la ligne d'eau de la Seine – Crue de 2016	33
Figure 22 : Localisation du système d'endiguement 15.....	34
Figure 23 : Tronçons fonctionnels, homogènes et exutoires d'eaux pluviales sur le SEI_15.....	36
Figure 24 : Profil en long au niveau du SEI_15	37
Figure 25 : Localisation du système d'endiguement 17	38
Figure 26 : Tronçons fonctionnels, homogènes et exutoires d'eaux pluviales sur le SEI_17	40
Figure 27 : Profil en long au niveau du SEI_17	41
Figure 28 : Localisation du système d'endiguement 19	42
Figure 29 : Tronçons fonctionnels, homogènes et exutoires d'eaux pluviales sur le SEI_19.....	44
Figure 30 : Profil en long au niveau du SEI_19	45
Figure 31 : Ouvertures sur le SEI_15	48
Figure 32 : Ouvertures sur le SEI_17	49
Figure 33 : Ouvertures sur le SEI_19	50
Figure 34 : Localisation des brèches du SEI_15.....	52
Figure 35 : Localisation des brèches du SEI_17.....	53
Figure 36 : Localisation des brèches du SEI_19.....	54
Figure 37 : Maillage au niveau d'un croisement	55
Figure 38 : Comparaison des niveaux d'eau, crue de 1910.....	56
Figure 39 : Schéma des résultats TELEMAC-2D selon la configuration des murettes.....	57
Figure 40 : Zone protégée par le SEI_15	59
Figure 41 : Zone protégée par le SEI_17	60
Figure 42 : Zone protégée par le SEI_19	61
Figure 43 : Dangerosité des venues d'eau pour le scénario 2-1, SEI_15.....	62

Figure 44 : Dangerosité des venues d'eau pour le scénario 2-2, SEI_15.....	63
Figure 45 : Dangerosité des venues d'eau pour le scénario 2-1, SEI_17.....	64
Figure 46 : Dangerosité des venues d'eau pour le scénario 2-2, SEI_17.....	65
Figure 47 : Dangerosité des venues d'eau pour le scénario 2-1, SEI_19.....	68
Figure 48 : Dangerosité des venues d'eau pour le scénario 2-2, SEI_19.....	71
Figure 49 : Comparaison des temps de propagation (h) pour les scénarii 2-1 et 2-2 au niveau de la zone 5 du SEI_19	72
Figure 50 : Comparaison des vitesses de montée des eaux (h) pour les scénarii 2-1 et 2-2 au niveau de la zone 5 du SEI_19.....	73
Figure 51 : Dangerosité des venues d'eau pour le scénarii de type 3, SEI_15	74
Figure 52 : Dangerosité des venues d'eau pour le scénarii de type 3, SEI_17	75
Figure 53 : Dangerosité des venues d'eau pour le scénarii de type 3, SEI_19	78

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résumé des différentes informations composant une étude de dangers.....	7
Tableau 2 : Extrait de l'Article R214-113 définissant les critères de classification des systèmes d'endiguement.....	8
Tableau 3 : Répartition des systèmes d'endiguement de la MGP en 3 lots.....	8
Tableau 4 : Caractéristiques des stations hydrométriques autour du territoire d'étude (source : Note de présentation des études contributrices de l'étude de dangers, ISL Ingénierie)	17
Tableau 5 : Débits de pointe historiques, mesurés et calculés à Paris Austerlitz et hauteurs aux échelles d'Austerlitz et Suresnes associées - en bleu : période de mise en place des aménagements Grands Lacs de Seine ; en vert : aménagements tous en place (source : Note de présentation des études contributrices de l'étude de dangers, ISL Ingénierie).....	18
Tableau 6 : Débits de pointe des crues historiques	27
Tableau 7 : Coefficient de Strickler en fonction de l'occupation du sol (Source : "Aide-mémoire d'hydraulique à surface libre", Degoutte).....	28
Tableau 8 : Définition des niveaux de protection	46

I. Introduction

La protection contre les risques d'inondation est un enjeu majeur de notre société. En effet, on estime qu'environ 11% de la population française vit dans une zone présentant un risque d'inondation. Ces zones sont réparties sur 27 000 km² du territoire. Ce risque naturel est donc le plus important par le nombre de personnes concernées et par l'importante étendue de sa zone de risque. Ces inondations peuvent avoir plusieurs origines : ruissellement, débordement d'un cours d'eau, submersion d'un littoral, remontée de nappe ... Ici, nous nous intéressons plus particulièrement aux risques d'inondation liés à la présence de la Seine dans le département des Hauts-de-Seine (92).

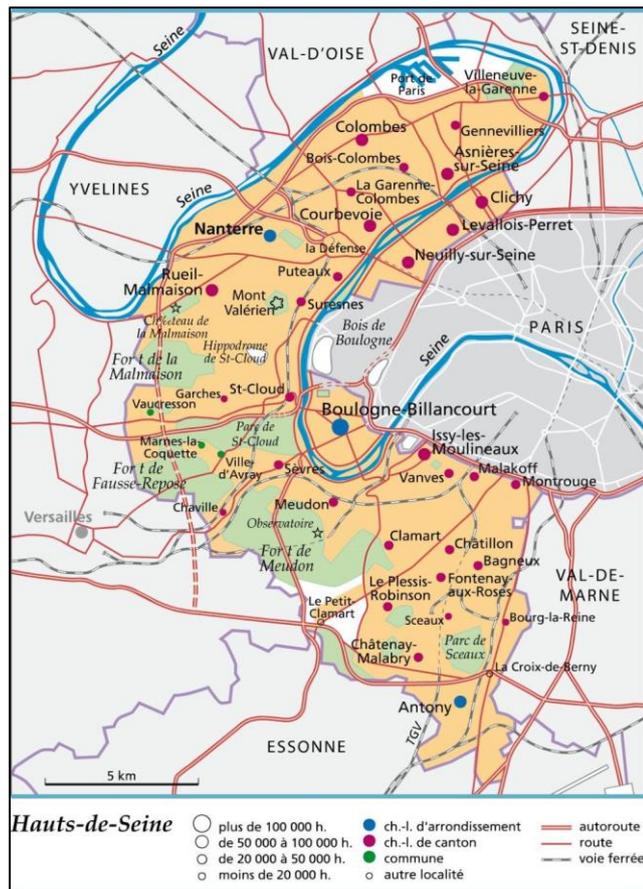


Figure 1 : Carte des Hauts-de-Seine (Source : L-itinaire.com)

Les Hauts-de-Seine est le deuxième département le plus densément peuplé de France pour une population totale de 1.6 million d'habitants. Proche de Paris, ce département est très urbanisé. Or, un paysage urbain induit généralement une bétonisation importante et donc un taux d'infiltration assez faible. Ainsi, il favorise le ruissellement, ce qui augmente le risque d'inondation. De plus, la Seine dans le département possède un bassin versant amont très vaste (cf III.A1) qui est responsable de la majorité du surplus d'eau présent en période de crue. Ici, la Seine traverse la totalité du département sur un linéaire de 38 km. C'est pourquoi, la majeure partie du département est concernée par les risques d'inondation.

Pour protéger cette population, il existe plusieurs systèmes d'endiguement longeant les rives gauches et droites de la Seine. Avec le réchauffement climatique et donc l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes, le risque d'une inondation par une crue importante est plus que

présent. Il est donc important de connaître l'efficacité de nos systèmes de protection et de prévoir les conséquences d'une éventuelle défaillance..

L'objectif de ce travail sera donc d'analyser des risques d'inondation au niveau des systèmes d'endiguement dans le département des Hauts de Seine.

A. L'organisme d'accueil

ISL Ingénierie est un bureau d'étude créé en 1986 par 3 ingénieurs. L'entreprise a pour particularité d'appartenir à des actionnaires salariés. Son objectif est d'apporter des services d'ingénierie (étude, schéma directeur, audit, maitrisés d'œuvre ...) dans les domaines suivants :

- Barrages
- Aménagements hydrauliques et infrastructures
- Energie
- Eau et Environnement
- Mer et côtes
- Calcul scientifique

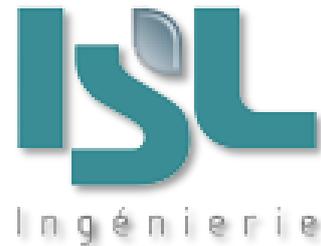


Figure 2 : Logo de ISL Ingénierie

Ce mémoire a été rédigé à partir d'informations obtenues dans le cadre d'une étude confiée en 2020 par la Métropole du Grand Paris à ISL Ingénierie concernant la réalisation d'études de danger et de dossiers d'autorisation. Les informations reportées ont pour principale origine les recherches, constructions de modèles et rapports rédigés dans le cadre de ce projet par des ingénieurs ou par moi-même.

B. Contexte



Figure 3 : Logo de la MGP

La Métropole du Grand Paris (MGP) est un organisme public créé en 2015 (par l'article 59 de la loi n°2015-991 du 7 août 2015) rassemblant 131 communes dont l'entièreté des communes de la Seine-Saint-Denis, les Hauts-de-Seine, du Val-de-Marne ainsi que la commune de Paris et 7 communes du Val-d'Oise et de l'Essonne. La MGP a notamment pour mission de gérer les inondations sur son territoire. Depuis le 1^{er} janvier 2018, la MGP exerce la compétence GeMAPI

(gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations) .

Selon le décret du 12 mai 2015 « Le système d'endiguement est soumis à une autorisation en application des articles L. 214-3 et R. 214-1 dont la demande est présentée par la commune ou l'établissement public de coopération intercommunale compétent ». Ainsi, tout gestionnaire d'ouvrages de protection contre les inondations se doit de constituer un dossier d'autorisation (DA). La MGP doit donc déposer ces dossiers d'autorisation afin de prouver que la gestion de l'ouvrage est claire et efficace en cas d'aléa afin de limiter les risques d'inondation. Selon l'alinéa 4 de l'article D.181-15-1 du code de l'environnement, les différentes pièces devant constituer un dossier d'autorisation sont :

« 1° L'estimation de la population de la zone protégée lorsqu'il s'agit d'un système d'endiguement et l'indication du niveau de la protection au sens de l'article R. 214-119-1 ;

2° La liste, le descriptif et la localisation sur une carte à l'échelle appropriée des ouvrages préexistants qui contribuent à la protection du territoire contre les inondations et les submersions ainsi que, lorsque

le pétitionnaire n'est pas le propriétaire de ces ouvrages, les justificatifs démontrant qu'il en a la disposition ou a engagé les démarches à cette fin ;

3° Dans le cas de travaux complémentaires concernant un système d'endiguement existant, au sens de l'article R. 562-13, la liste, le descriptif et la localisation sur une carte à l'échelle appropriée des digues existantes ;

4° Les études d'avant-projet des ouvrages à modifier ou à construire ou une notice décrivant leur fonctionnalité si ces ouvrages modifiés ou construits concernent des dispositifs de régulation des écoulements hydrauliques ;

5° L'étude de dangers établie conformément à l'article R. 214-116 ;

6° Le document mentionné au 2° du I de l'article R. 214-122. »

Le document auquel fait référence dans la section n°6 est selon l'article R.214-122 « Un document décrivant l'organisation mise en place pour assurer l'exploitation du barrage ou la gestion du système d'endiguement, son entretien et sa surveillance en toutes circonstances, notamment les vérifications et visites techniques approfondies, le dispositif d'auscultation, les moyens d'information et d'alerte de la survenance de crues et de tempêtes conformes aux prescriptions fixées par l'arrêté préfectoral autorisant l'ouvrage et, le cas échéant, les arrêtés complémentaires »

Dans ce mémoire, nous nous intéressons plus particulièrement à la constitution de l'étude de dangers (EDD) de ces dossiers d'autorisation. L'EDD est une analyse des risques d'un ouvrage. Elle a pour objectif de justifier par des arguments techniques la présence et l'efficacité d'un ouvrage. Elle doit aussi permettre de prévoir les dommages encourus sur la population si l'ouvrage cède. L'arrêté du 7 avril 2017 présente en détail la constitution d'une EDD. Voici les principaux éléments dont il est composé :

Document A	1. Renseignements administratifs
	2. Objet de l'étude
	3. Description précise de la zone protégée, du système d'endiguement bénéficiant le cas échéant d'un ou plusieurs aménagements hydrauliques, de son environnement et de ses fonctions de protection contre les inondations et les submersions
Document B	4. Caractérisation des aléas naturels
	5. Description du système d'endiguement
	6. Retour d'expérience concernant la zone protégée et le système d'endiguement
	7. Diagnostic approfondi des éléments constitutifs du système d'endiguement et tenue des ouvrages
	8. Etude des risques de venues d'eau dans et en dehors de la zone protégée
	9. Présentation et analyse de l'organisation mise en place par le gestionnaire pour l'exercice de ses missions
	10. Cartographie

Tableau 1 : Résumé des différentes informations composant une étude de dangers

Ainsi la MGP doit constituer ces dossiers d'autorisation. Les dates limites de rendu de ces rapports varient en fonction de la classe attribuée au système d'endiguement. Selon l'Article R214-113 du code de l'environnement, la détermination de la classe d'un ouvrage se fait selon les critères suivants :

CLASSE	POPULATION PROTÉGÉE par le système d'endiguement
A	Population > 30 000 personnes
B	3 000 personnes population 30 000 personnes
C	Population ≤ 3 000 personnes si le système d'endiguement comporte essentiellement une ou plusieurs digues établies antérieurement à la date de publication du décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques ou, pour les autres systèmes d'endiguement, : 30 personnes ≤ Population ≤ 3 000 personnes

Tableau 2 : Extrait de l'Article R214-113 définissant les critères de classification des systèmes d'endiguement

Il est également précisé dans l'article que « la population protégée correspond à la population maximale, exprimée en nombre de personnes, qui est susceptible d'être exposée dans la zone protégée ».

Plus le nombre de personnes protégées est important, plus la demande est urgente et donc le délai de rendu court. D'après le décret du 12 mai 2015, les demandes d'autorisation des systèmes d'endiguement de classe A et B comportant des digues établies précédemment à 2015 doivent être réalisées avant le 31 décembre 2019, délai pouvant être allongé de 18 mois fixant par conséquent la date de remise au 30 juin 2021. C'est pourquoi, les dossiers d'autorisation devront être déposés le 30 juin 2021 pour les ouvrages de classes A et B. Les dossiers d'autorisation des ouvrages de classe C et D devront eux être déposés avant le 30 juin 2023.

Pour réaliser ces études, l'arrêté du 3 novembre 2017 oblige les entités GeMAPIennes à faire appel à des entités agréées définies et publiées dans le journal officiel. Les connaissances et données étant hétérogènes selon les ouvrages, la MGP a décidé de diviser le territoire en 3 lots répartis le long de la Seine (annexe 1) sur le territoire où l'organisme exerce ses compétences :

<i>Lot 1</i>	<i>Ville de Paris et Val-de-Marne</i>	<i>SEP_SEI* 4, 6,7, 8, 9, 10, 11, 12</i>
Lot 2	Hauts-de-Seine	SEP_SEI 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20
<i>Lot 3</i>	<i>Seine-Saint-Denis</i>	<i>SEP_SEI 21, 22, 23 et SEP_MAR* 1</i>

Tableau 3 : Répartition des systèmes d'endiguement de la MGP en 3 lots

* SEP_SEI=système d'endiguement de protection de la Seine

** SEP_MAR = système d'endiguement de protection de la Marne

Après avoir répondu à un appel d'offre de la MGP, ISL s'est vu attribuer la réalisation des études de dangers et la constitution des dossiers d'autorisation des systèmes d'endiguement du lot n°2.

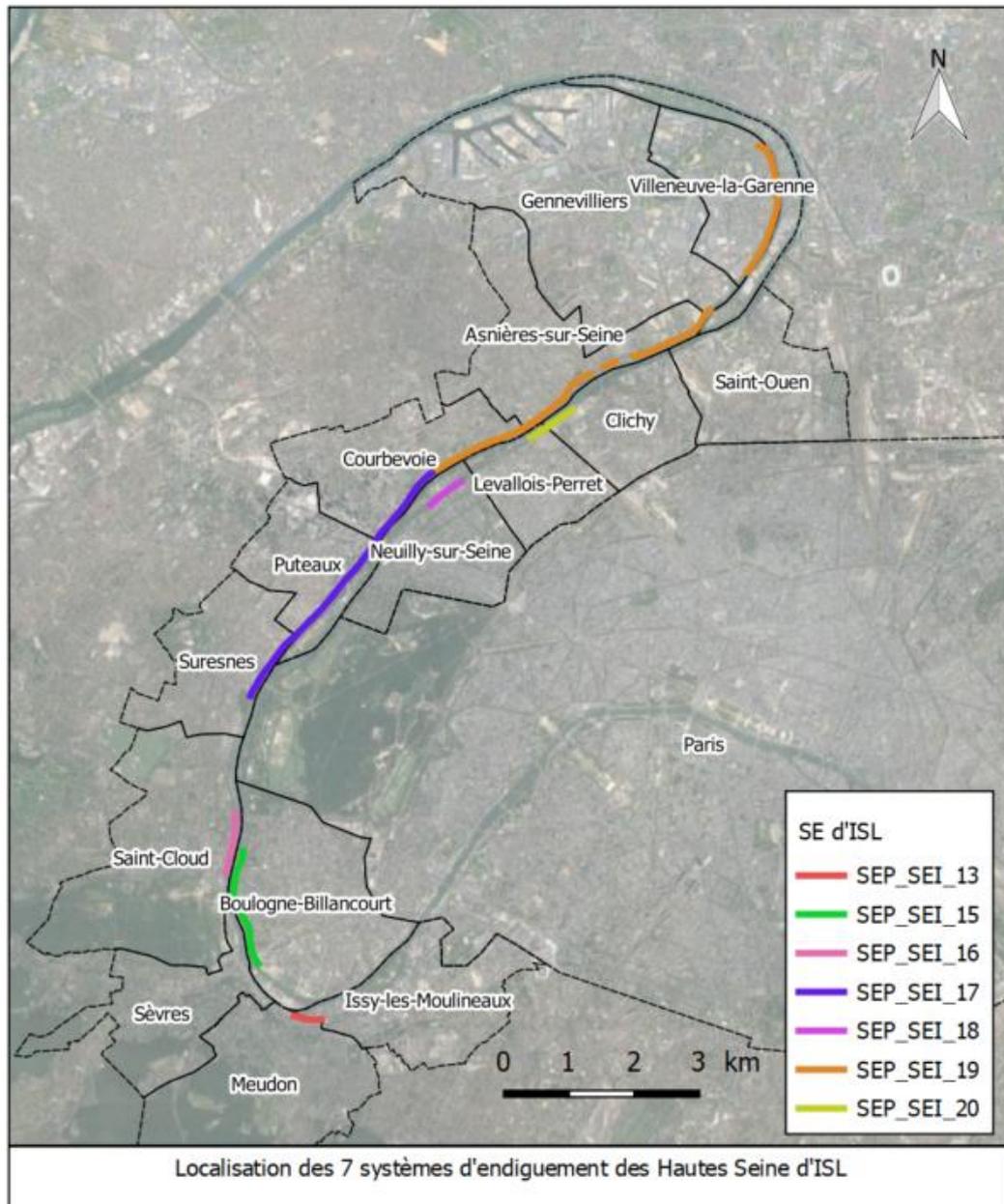


Figure 4 : Localisation des systèmes d'endiguement sur lesquels ISL doit réaliser une étude de dangers et constituer un dossier d'autorisation

Ce lot est constitué de 7 systèmes d'endiguement. Le linéaire de la zone d'étude est d'environ 30 km s'étendant du pont de Issy-les-Moulineaux à l'amont du pont de Bezons. Ce lot a pour spécificité d'être composé très majoritairement d'ouvrages déjà classés et pour lesquels un suivi réglementaire a été fait. De plus, des études de dangers ont déjà été réalisées sur les ouvrages de classes B et C. Pour connaître les ouvrages concernés, vous trouverez en annexe 2, la carte des classements des tronçons et sous-tronçons des systèmes d'endiguement, extraite de l'arrêté préfectoral du 3 avril 2012 concernant les digues fluviales (murette anti-crue) situées en rive droite et gauche de la Seine.

Comme précisé précédemment, certains tronçons des systèmes d'endiguement 15, 17 et 19 sont de classe B. Ces tronçons ont donc un nombre de personnes à protéger supérieur aux autres tronçons

classés en catégorie C ou D. C'est pourquoi, les études de danger des systèmes d'endiguement 15, 17 et 19 doivent être réalisées avant le 30 juin 2021 et sont donc prioritaires.

C. Objectifs

L'objectif principal de cette étude est, comme cela est demandé dans le cadre de la réalisation de l'étude de dangers, d'analyser les risques d'inondation de la Seine au niveau des systèmes d'endiguement des Hauts-de-Seine.

Comme le précise le cahier des clauses techniques particulières rédigé par la MGP, dans le cadre de cette mission il sera nécessaire de pouvoir représenter numériquement la zone d'étude. En effet, la modélisation de la zone permettra de simuler différentes situations en période de crue, appelées scénarii. Connaître l'impact sur le territoire de ces scénarii permettra une meilleure gestion opérationnelle des risques d'inondation.

Après avoir réuni les données nécessaires, le premier objectif sera donc la construction d'un modèle et de le caler à l'échelle locale du secteur d'étude. Un modèle bidimensionnel, appelé modèle ArteSeine a déjà été réalisé par Artelia pour l'établissement public territorial de bassin (EPTB) Grands Lacs de Seine. Il couvre un linéaire de 325 km allant de la Seine à Bray-sur-Seine à la Seine à Poses et inclus le linéaire de 30 km notre modèle. Ce modèle a été remis à ISL, mais le maillage réalisé ayant une taille de 30 m à 60 m dans les zones urbaines, la précision du modèle n'est pas suffisante pour établir des zones d'inondation précises. Il faudra donc reconstruire un modèle avec un degré de précision supérieur. Néanmoins, les conditions aux limites du modèle local pourront être issues des résultats du modèle global.

Ce modèle permettra ensuite de simuler différents scénarii. Les scénarii nominaux vont permettre d'évaluer la **zone protégée et le niveau de protection** pour chaque système d'endiguement. Les scénarii de défaillance auront pour principal objectif de représenter les conséquences d'un fonctionnement dégradé du système d'endiguement. Pour chaque scénario de défaillance, les caractéristiques étudiées lors des inondations sont les suivantes :

- **Hauteur de submersion maximale,**
- **Vitesse d'écoulement instantanée maximale,**
- **Temps de propagation depuis les premières venues d'eau,**
- **Vitesses de montée des eaux,**
- **Dangerosité (au sens réglementaire) des venues d'eau**

Les résultats de ces simulations seront représentés sous forme de cartes. Une comparaison des différents résultats permettra d'évaluer l'efficacité des ouvrages et l'impact de leur dysfonctionnement ou de leur mauvaise gestion face à un risque d'inondation.

D. Quelques définitions réglementaires

1. Système d'endiguement

Un système d'endiguement est un ensemble cohérent de digues, d'ouvrages annexes qui servent à maintenir l'intégrité de la protection s'il y a lieu (type protection contre l'érosion), ou d'ouvrages contributifs anthropiques (type remblais routiers) qui se raccordent à des éléments naturels dont l'altitude permet d'isoler la zone protégée des entrées d'eau extérieures.

Un système d'endiguement peut être composé :

- De digues en terre ou murs,

- D'ouvrages contributifs dont l'usage premier n'est pas la protection contre les inondations,
- D'ouvrages de contrôle empêchant les venues d'eau dans la zone protégée : par exemple des vannes de régulation ou des clapets anti-retour qui peuvent être aménagés en sortie de réseaux d'assainissement traversant le système d'endiguement,
- ...

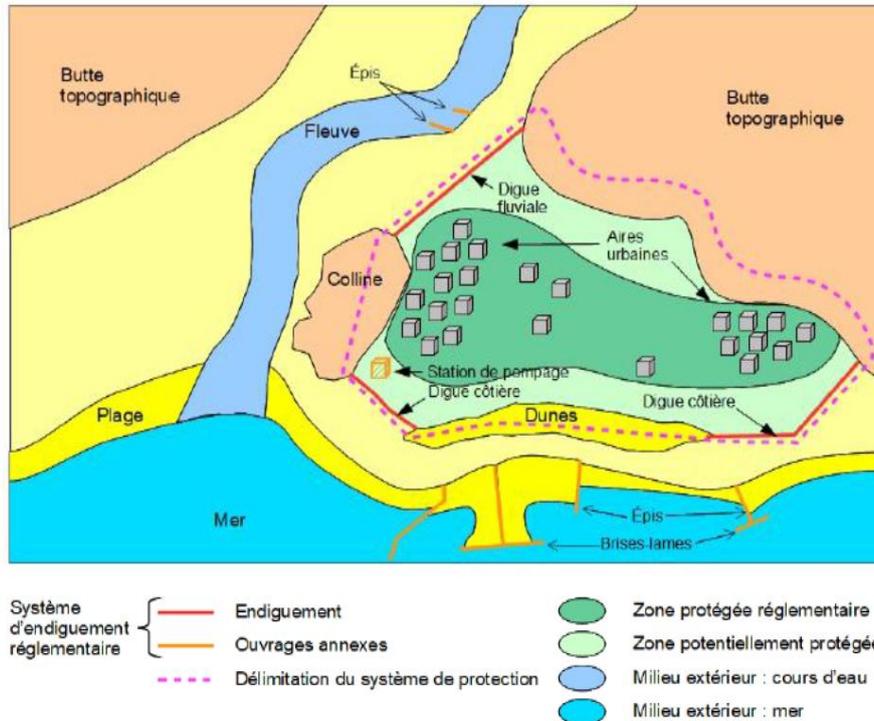


Figure 5 : Exemple de système d'endiguement (Source : CEREMA)

L'ensemble système d'endiguement et éléments naturels forme le système de protection.

2. Les ouvrages traversants et ouvertures du système d'endiguement

Ouvrages traversants

On trouve de nombreux ouvrages traversant les systèmes d'endiguement. Parmi eux, on trouve des petits orifices (comme des barbacanes) qui ne présentent aucun risque d'augmenter l'instabilité des murettes. On trouve aussi régulièrement des exutoires d'eaux pluviales. Tout ouvrage traversant un talus dont le corps est en remblai constitue potentiellement une zone d'écoulement préférentiel et donc favorisant le développement d'un phénomène d'érosion interne.

Le risque est qu'en période de crue, le niveau de la Seine puisse arriver jusqu'à hauteur des déversoirs d'orage situés juste en amont des exutoires dans le réseau d'assainissement. En l'absence de protection, ce cas de figure serait critique puisqu'il reviendrait à faire fonctionner le réseau d'assainissement en sens inverse, l'eau de Seine entrant dans les égouts par les déversoirs, surchargeant les canalisations et finissant par inonder à l'intérieur des terres par refoulement sur les voiries (ce qui, par ailleurs, annule totalement l'effet bénéfique de la protection par endiguement). C'est pourquoi, chaque exutoire est muni d'une vanne qui se ferme progressivement à mesure que la hauteur d'eau dans la Seine monte.

Ouvertures

Plusieurs ouvertures sont présentes le long des systèmes d'endiguement. Des batardeaux sont prévus afin de les obstruer en période de crue. En cas de non-fonctionnement des ouvertures (pose de batardeaux impossible), il est prévu un stock de sacs de sable afin de limiter au maximum les débordements.

3. Niveau de protection et zone protégée

Le GeMAPlen doit s'engager sur un niveau de protection et une zone protégée pour lesquels l'absence de venue d'eau est garantie pour tout événement inférieur ou égal au niveau de protection.

Les responsabilités du GeMAPlen vis-à-vis des systèmes d'endiguement qu'il choisit de classer sont les suivantes :

- Engagement d'entretien et de surveillance des ouvrages déclarés
- Surveillance en crue et hors crue, organisation, moyens dédiés,
- Mise en place de conventions de gestion si nécessaire,
- Études et visites d'organismes agréés réglementaires dont la fréquence est imposée par le classement (étude de dangers, visite technique approfondie)
- Responsabilité en cas d'inondation de la zone protégée déclarée : c'est la raison pour laquelle l'étude de dangers doit justifier la bonne tenue des ouvrages et l'absence de venue d'eau pour le niveau de protection choisi dans la zone protégée.

II. Etat de l'art de la modélisation des inondations dues aux débordement de cours d'eau

Afin de pouvoir réutiliser les données fournies avec le modèle réalisé précédemment par l'EPTB Grands Lacs de Seine, la Métropole Grand Paris impose au bureau d'étude de construire un modèle en 2 dimensions et de réaliser ses simulations avec le logiciel Télémac2D. Mais quel est le véritable intérêt d'une modélisation 2D face à d'autres représentations ? Le logiciel Telemac 2D est-il considéré comme fiable, quels sont ses avantages et ses inconvénients ?

A. La pertinence de la représentation bidimensionnelle dans le cas des inondations

Comme il a été dit précédemment, la protection contre les risques d'inondation est un enjeu primordial dans notre société actuelle. Ainsi, pour pouvoir organiser la gestion face aux risques de débordement de la Seine, la modélisation de ces inondations semblent être pertinente. Comme l'a dit en 1965 le docteur en Mathématiques Marvin Minski : « Pour un observateur B, un objet A* est un modèle d'un objet A dans la mesure où B peut utiliser A* pour répondre à des questions qui l'intéressent au sujet de A ». Ainsi notre modèle n'a pas pour impossible objectif de représenter à la perfection la réalité mais uniquement de la schématiser afin de répondre aux différents objectifs décrits précédemment (voir I. C.). Afin de faire les bonnes hypothèses, il est important de choisir, en amont, le type de modèle le plus adapté à la situation.

Dans le cas de l'analyse des risques inondation, un modèle numérique est utilisé. Ce modèle peut schématiser la réalité de manière plus ou moins complexe : en 1D, 2D ou 3D.

Modélisation en 3D possible ?

Dans sa thèse « Simulations des écoulements en milieu urbain lors d'un événement pluvieux extrême » paru en 2012, Quentin Araud compare les résultats obtenus avec différents modèles en 1D, 2D et 3D. Il en conclut que la modélisation 3D semble donner les résultats les plus proches des résultats expérimentaux. Ce modèle est particulièrement efficace dans les zones d'écoulement les plus complexes, tel que les jonctions de routes et les carrefours. Néanmoins les modèles 3D nécessitent un maillage très complexe et donc induisent des temps de calcul très importants. Ce type de modèle n'est donc pas envisagé dans le cadre d'une modélisation dans le domaine de l'ingénierie. C'est pourquoi on a tendance à se rabattre sur des modèles en 2D, qui donnent quand même des résultats satisfaisants.

Modélisation en 1D :

Mais, il existe une troisième possibilité. En effet, certains logiciels de modélisation 1D tel que CANOE permettent d'obtenir des zones d'inondation. Une modélisation en 1D peut faire gagner beaucoup de temps de calcul. De plus, la construction du modèle est beaucoup plus rapide. Mais pour obtenir des résultats satisfaisants, le modèle doit être accompagné de nombreuses informations telles, que les pertes de charges à chaque carrefour ou la distribution des débits dans le lit majeur lors des crues. Selon les études, ce type de représentation est préféré à la modélisation 2D.

Dans l'article « Comparison of 1D and 2D Hydraulic Models for Floods Simulation on the Medjerda River in Tunisia » publié en 2016 par Gharbi, Soualmia, Dartus et Masbert, les résultats obtenus permettent de distinguer plusieurs critères pouvant aider à choisir la bonne dimension. Ainsi, la 1D a

pour avantage d'être très rapide. Elle est adaptée aux très longs modèles et pour les projets ne nécessitant pas des résultats très précis. Mais pour les études nécessitant une délimitation des zones inondables précise, il est préférable d'utiliser un modèle en 2D, même si le temps de construction et de calcul seront bien plus importants.

Dans notre cas, le modèle ayant justement pour objectif de définir des zones inondées précises afin de pouvoir protéger la population, nous préférons utiliser un modèle en 2D.

Couplage 1D/2D : une bonne alternative ?

En 2013, Marie Thibault publie sa thèse « Modélisation hydrodynamique couplée 1D-2D du delta intérieur du fleuve Niger ». Dans ce document plusieurs solutions alternatives sont proposées pour pallier les inconvénients de la modélisation 2D :-

- Le modèle en casier, permet de garder un modèle en 1D, et donc tous ses avantages. Mais on y ajoute, des zones de stockage au niveau du lit mineur qui seront les zones de débordements. Le reste du lit majeur est défini comme inactif (zone représentée par des casiers). Néanmoins ce type de modélisation dépend des résultats, or il est dans la plupart des cas compliqué de prévoir précisément quels seront les résultats d'un modèle. De plus, si les zones d'inondations changent selon les simulations (ce qui est notre cas) il faudrait refaire le modèle à chaque fois.
- De plus en plus de modèles combinent un modèle 1D et un modèle 2D. Cette méthode a pour principal avantage de réduire considérablement le temps de calcul (par rapport au modèle 2D). Néanmoins, il faut réaliser les deux modèles 1D et 2D, ce qui dans notre cas prendrait finalement plus de temps que de se concentrer uniquement sur un modèle en 2D. De plus, dans le cas d'un cours d'eau très large, on peut se permettre de faire de la 2D car on peut faire des mailles très larges qui n'engendrent pas un temps de calcul démesuré. La perte de temps par rapport à la 1D-2D est alors négligeable.

Ainsi, il a été choisi de réaliser un modèle en 2D pour notre étude.

B. Logiciel de modélisation 2D

Dans le cadre de cette étude, le logiciel de simulation imposé par la MGP est TELEMAT-2D. En effet, les résultats du modèle ArteSeine ayant été obtenus grâce à TELEMAT-2D, il est préférable d'utiliser le même logiciel afin de pouvoir comparer et réutiliser certaines données du modèle ArteSeine. Néanmoins, nous pouvons discuter de la pertinence de ce choix.

Présentation du logiciel Telemac

Le logiciel TELEMAT-2D permet de réaliser les simulations d'hydraulique à surface libre à partir de modèles en 2D. Il a été développé par le Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement (LNHE) de Electricité de France (EDF). Ce logiciel est basé sur la résolution des équations de Barré Saint Venant en 2D dont vous trouverez le système d'équations en annexe 3.

Ces équations sont résolues à partir de la méthode des éléments finis. Chaque maille du modèle représente alors un élément fini. Le maillage permet alors de simplifier la géométrie du modèle. Pour chaque élément fini, il est possible de simplifier les équations jusqu'à ce que l'on puisse obtenir une solution. Mais, les équations étant dépendantes les unes des autres, toutes les équations sont résolues en même temps par le logiciel. En combinant les résultats de chaque maille, on obtient une solution approchée à l'échelle globale.

Fiabilité du logiciel

Plusieurs études ont comparé des résultats de terrain avec les résultats obtenus grâce à TELEMAC-2D. Dans la plupart des cas, les résultats obtenus sont très encourageants. Par exemple, Felts Didier et Gardet Sylvain ont publié « Comparaison dans l'estuaire de la Gironde des résultats issus d'une modélisation hydraulique (TELEMAC-2D) avec les observations terrains, Xynthia, 28 février 2010 ». Dans cette étude ils démontrent que sur leur zone d'étude (un linéaire de 220km de la Garonne divisé en environ 21000 éléments), les résultats sont en général à moins de 15 cm des résultats observés. En comparaison avec la taille du modèle, ces résultats sont plus que satisfaisants.

III. Matériel et méthode

Une grande partie des données hydrauliques d'entrée provient des résultats du modèle hydraulique ArteSeine.

A. Données d'entrée

L'EPTB Seine-Grands Lacs de Seine a fourni toutes les données d'entrée et de construction de leur modèle ainsi que quelques fichiers nécessaires à l'étude de dangers :

- La reconstitution d'une vingtaine de crues historiques sur le bassin versant de la Seine grâce à un modèle hydrologique HYDRA réalisé par Hydratec
- Les données topographiques du modèle et des murettes
- Des fichiers comportant les résultats des simulations de 11 crues historiques : 1910, 1924, 1955, 1970, 1982, 1983, 1993, 1995, 2001, 2016, 2018. Pour les crues de 1910, 1924, 1955, 2016 et 2018 des simulations ont été faites avec murettes et sans murettes. Pour chaque crue, l'hydrogramme et les lignes d'eau sont fournis.

1. Données hydrologiques : BV, stations hydro, crues historiques et débits caractéristiques

Le bassin versant

La Seine est un des principaux cours d'eau de France. Il prend sa source sur le plateau de Langres et s'étend sur un linéaire de 776 km jusqu'au Havre où il se jette dans la Manche. Son bassin versant est de 79 000 km². Au niveau de notre zone d'étude le bassin versant de la Seine est de 44 000 km². Il recouvre 7,6 % de la surface de la France.

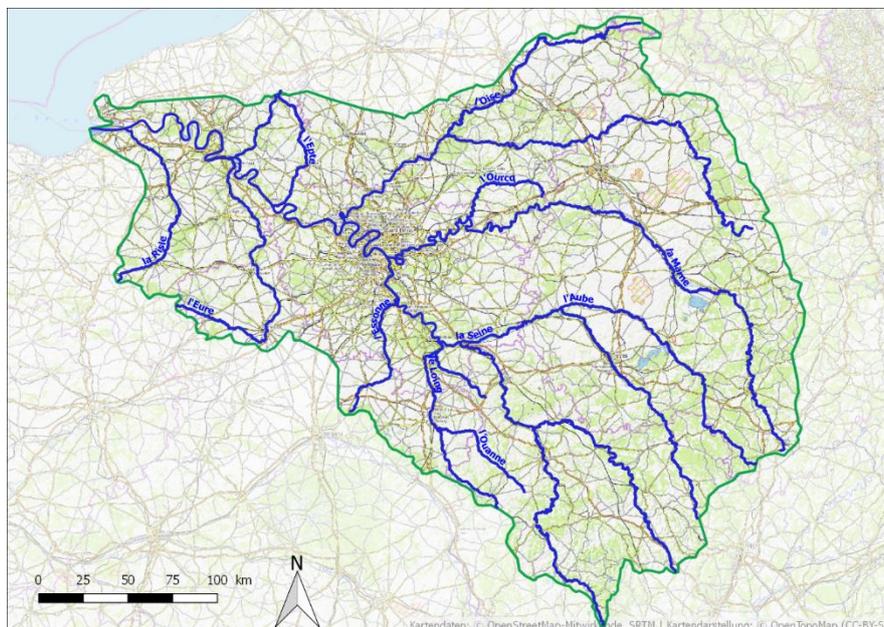


Figure 6 : Bassin versant de la Seine

Station hydrométrique

Il existe 3 stations hydrométriques à proximité de la zone d'étude :

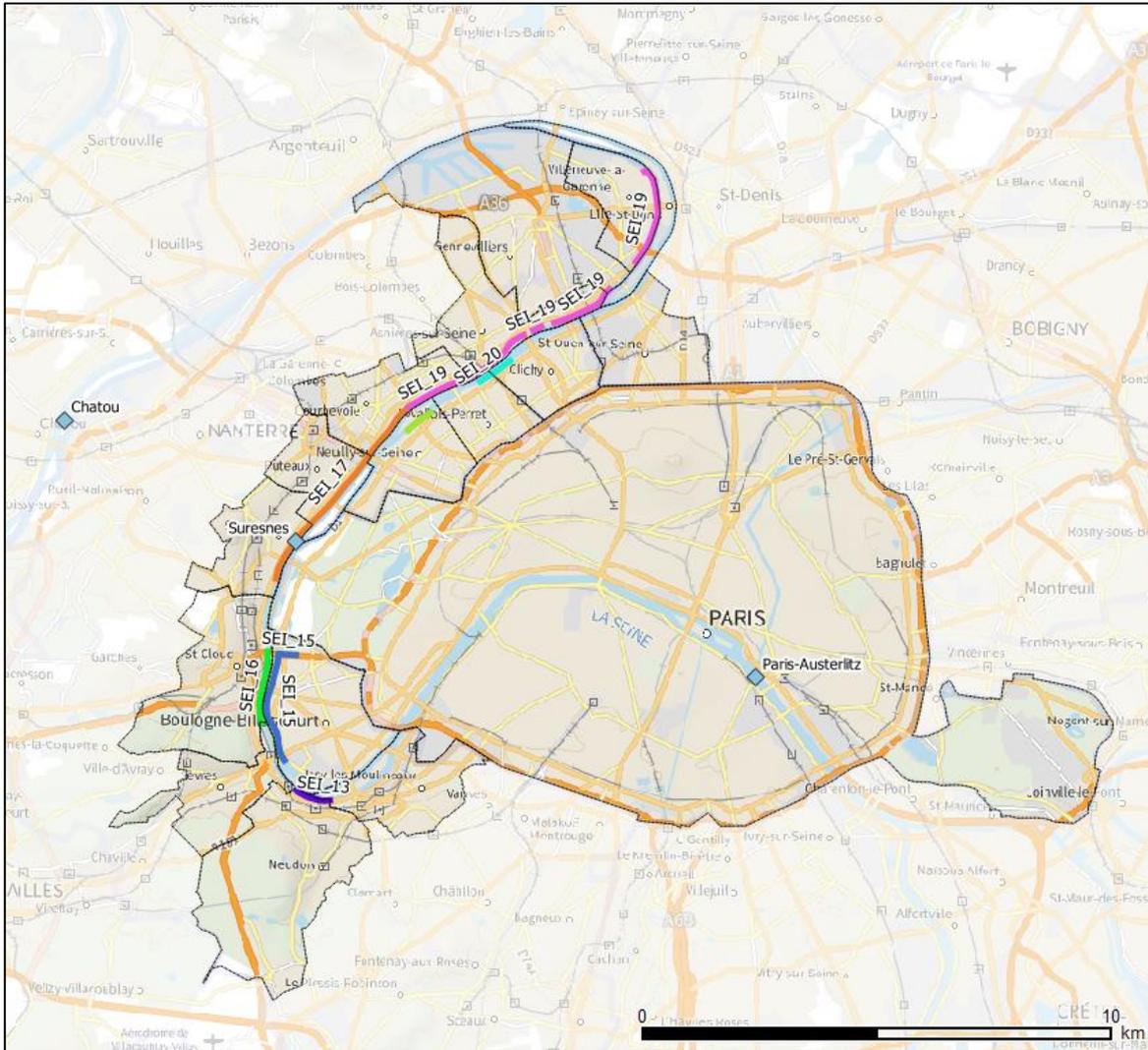


Figure 7 : Localisation des stations hydrométriques à proximité du territoire d'étude

Leurs caractéristiques et leurs localisations sont données ci-après.

	BV (km ²)	Zéro échelle (m NGF)	Données disponibles	Chronique disponible
Paris-Austerlitz	43 800	25,92	Hauteurs Débits	1979 – 2021 (banque Hydro) Depuis ~1900 auprès de la DRIEE/DRIEA
Seine à Suresnes	44 100	21,22	Hauteurs	1986 – 2021 Station a priori en service depuis 1936
Seine à Chatou	44 669	0,37 (1932-2017) 20,37 (depuis 2017)	Hauteurs	2011 – 2021 Station a priori en service depuis 1932

Tableau 4 : Caractéristiques des stations hydrométriques autour du territoire d'étude (source : Note de présentation des études contributives de l'étude de dangers, ISL Ingénierie)

La station de référence en Ile-de-France pour la prévision, la vigilance et l'alerte est la station de Paris Austerlitz.

Crues historiques

Les données de l'EPTB Grands Lacs de Seine nous permettent d'avoir toutes les informations nécessaires sur les principales crues de la Seine de 1910 à 2018. Ces résultats permettront par la suite de caler le modèle.

Crue historique	Débit de pointe mesuré (m³/s)	Hauteur à l'échelle (m)		Débit en configuration historique calculé par ArteSeine (m³/s)	Débit en configuration historique calculé par Hydra (m³/s)	Débit naturalisé calculé par Hydra (m³/s)	Débit Hydra avec fonctionnement des Grands Lacs (m³/s)
		Austerlitz	Suresnes				
janv.-1910	2650	8.62		2488 / 2578 ¹	2393		2156
nov.-1910	1730	5.97			1627		1467
janv.-1919	1770	6.11			1806		1674
janv.-1924	2180	7.32		2184	2132		1804
nov.-1944	1500	5.24			1701		1571
févr.-1945	2010	6.85			2068		1674
janv.-1955	2110	7.12		2228	2149	2168	1779
janv.-1959	1810	6.22			1598	1602	1430
févr.-1970	1630	5.63		1584	1574	1659	1555
févr.-1977	1410				1482	1554	1466
avr.-1978	1650				1625	1805	1578
févr.-1980	1350				1436	1494	1434
janv.-1982	1790	6.15		1827	1773	1815	1774
déc.-1982	1510				1646	1671	1625
avr.-1983	1500	5.22		1532	1570	1579	1569
janv.-1994	1380	4.82	5.76	1421	1410	1513	1412
janv.-1995	1438	5.01	7.03	1478	1460	1503	1459
mars-1999	1300	4.51	6.53		1269	1312	1270
déc.-1999	1480	5.19	7.16		1574	1689	1572
mars-2001	1467	5.18	7.38	1559	1467	1548	1469
mai-2013	915	3.34	5.43		1038	1116	1051
juin-2016	1796	6.1	7.92	1727	1742	1809	1805
janv.-2018	1720	5.88	7.83	1753	1773	1903	1693

Tableau 5 : Débits de pointe historiques, mesurés et calculés à Paris Austerlitz et hauteurs aux échelles d'Austerlitz et Suresnes associées - en bleu : période de mise en place des aménagements Grands Lacs de Seine ; en vert : aménagements tous en place (source : Note de présentation des études contributrices de l'étude de dangers, ISL Ingénierie)

Les crues de la Seine sont généralement causées par : un seul événement pluvieux intense, deux épisodes pluvieux rapprochés ou une suite d'événements pluvieux importants.

¹ Dans le cadre de ses différentes missions, Artelia a modélisé deux versions de cette crue : l'une en se calant sur le modèle HYDRA, l'autre en se calant sur les débits calculés par la DRIEE à l'aide du modèle CASSANDRE.

2. Données bathymétriques et topographiques du modèle (hypothèses et à quoi ressemble le profil en long)

Lit mineur

Le modèle numérique de terrain (MNT) utilisé pour le lit mineur a été transmis avec le modèle ArteSeine. Il a été construit grâce à des semis de points de Voies Navigables de France (VNF) datant de 2014 et ayant une précision de 50 cm.

Lit majeur

Deux MNT étaient disponibles :

- MNT d'un Lidar réalisé en 2014 par le Conseil Départemental des Hauts-de-Seine avec un pas de 1m
- MNT du RGE Alti (référentiel à grand échelle) de l'IGN (institut géographique national) avec un pas de 1m.
- Quelques semis de points réalisés localement.

Ces deux MNT sont comparés et retravaillés afin d'obtenir un MNT en cohérence avec la réalité du terrain et les semis de points. On estime l'incertitude liée aux données de +/- 40 cm.

Après fusion des MNT du lit mineur et majeur, on obtient le résultat suivant :

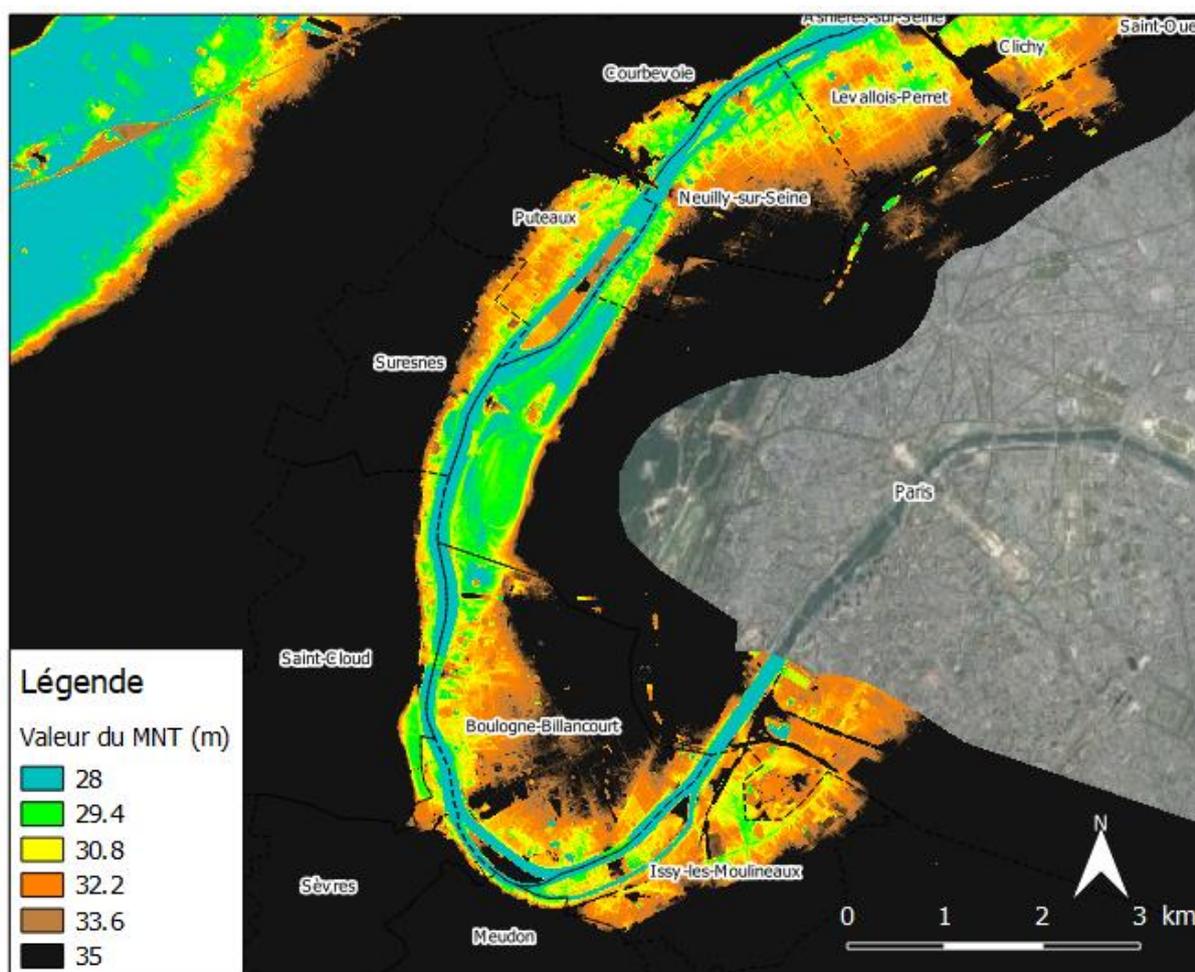


Figure 8 : MNT sur la partie amont de la zone d'étude

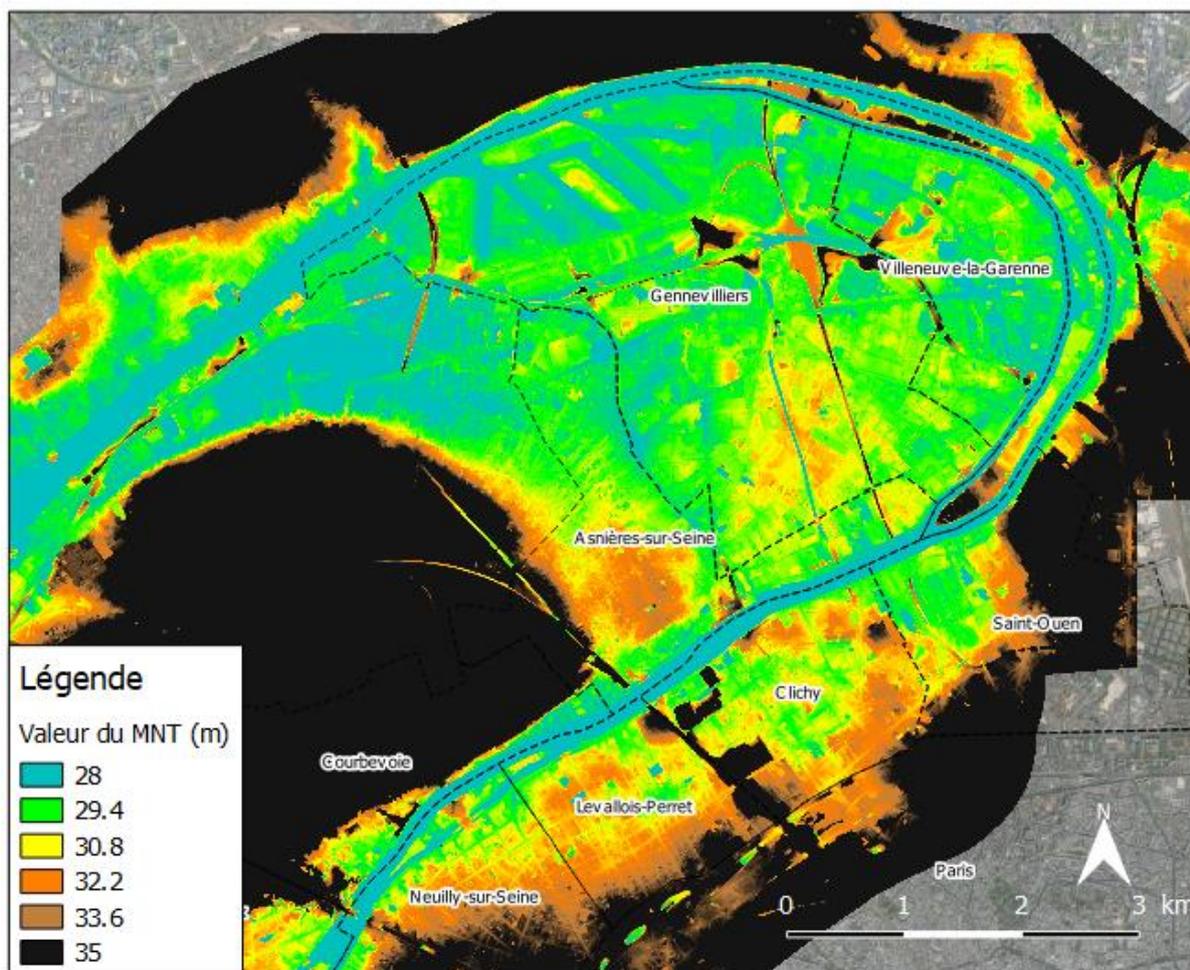


Figure 9 : MNT sur la partie aval de la zone d'étude

Contrairement aux zones montagneuses, on a peu de relief dans le lit majeur, ce qui est typique des plateaux du Bassin parisien.

3. Profils en long des murettes

Les données concernant les murettes proviennent de 3 sources différentes :

- Levés d'ouvrages de 2008 réalisées par FIT Conseils pour le Département des Hauts-de-Seine
- Levés de COLAS de 2014 sur certaines portions qui ont été réhaussées
- Levés complémentaires réalisées en 2021

Les incertitudes sur la mesure des altitudes des murettes sont d'environ +/- 10cm.

La figure ci-dessous est un exemple de tracé de profil en long et de la ligne d'eau maximale des crues historiques de 1910, 1924, 1982, 1993 et 2018.

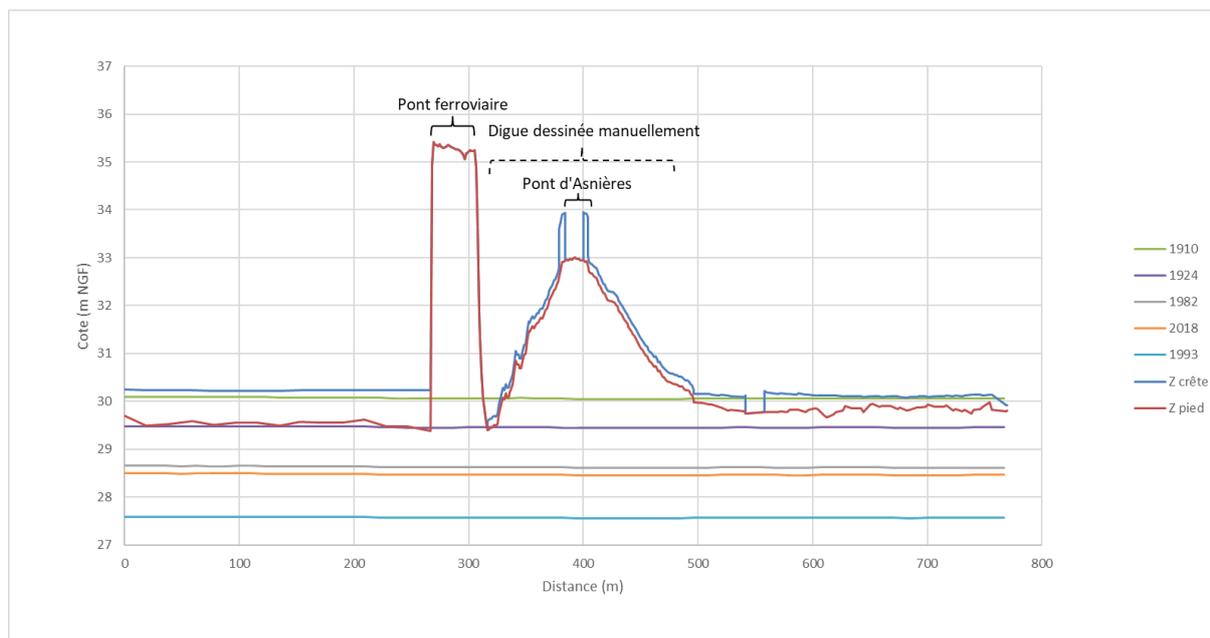


Figure 10 : Profil en long du système d'endiguement 20

Vous trouverez en annexe 4 et 5, les profils en long des systèmes d'endiguement 16 et 18. Les profils en long des systèmes SEI_15, SEI_17 et SEI_19 sont disponibles dans la partie III.C. Les données n'ayant pas encore été reçues pour le SEI_13, le tracé du système n'a pas encore été réalisé. Ainsi, lors de la modélisation des crues avec murettes, ces données seront intégrées et viendront remplacer les valeurs initiales du MNT au niveau des systèmes d'endiguement.

4. Population en zone protégée

Après avoir déterminé la zone protégée par un système d'endiguement, il est important d'estimer le nombre de personnes protégées par ce système. C'est d'ailleurs ce critère qui détermine la classe du système d'endiguement (voir I.B). Pour cela, les sources suivantes ont été utilisées :

- Les données de population France50 éditées par ESRI, construites à partir d'informations sur l'infrastructure extraite d'images satellitaires, de fichiers géographiques de référence de l'IGN, des données de recensement de l'INSEE à l'IRIS, des données INSEE au carroyage 200m, d'inventaires de bâtiments de sources diverses, datées de 2021. Ces données fournissent la population par carrés de 50 m sur 50 m.
- Les données d'emplois FranceBusiness éditées par ESRI, construites à partir de la base de données Sirene de l'INSEE. Ces données sont fournies par carrés de 50 m x 50 m.
- La liste des ERP des Hauts-de-Seine disponibles sur le site de la Préfecture : <https://www.hauts-de-seine.gouv.fr/Politiques-publiques/Environnement-et-prevention-des-risques/Prevention-des-risques>

La population est alors comptée selon 3 catégories :

- Les personnes travaillant dans la zone protégée
- Les personnes vivant dans la zone protégée
- Les ERP (établissement recevant du public), qui accueillent un nombre de personnes variable et qui atteignent rarement leur capacité maximale.

B. Construction du modèle

1. Choix de la zone d'étude

Il a été décidé de réaliser deux modèles distincts pour l'amont et l'aval de la zone d'étude. En effet, la précision du modèle induit une augmentation conséquente du temps de calcul qui ne peut être réduit que par la diminution de l'emprise. Ce type de découpe n'a pas été facile à réaliser. En effet, il n'existe aucun remblai assez haut qui permettrait d'isoler les casiers hydrauliques : on a toujours des routes souterraines sous les ponts et le modèle aval est continué très loin car le MNT est très plat.

Une découpe entre rive droite et rive gauche aurait été envisageable. Mais, dans ce cas, les dynamiques du lit mineur ne seraient pas prises en compte. Il serait également impossible d'étudier deux systèmes se trouvant sur des rives opposées en même temps. Ce choix n'a donc pas été retenu.

Voici une figure représentant l'emprise des deux modèles :

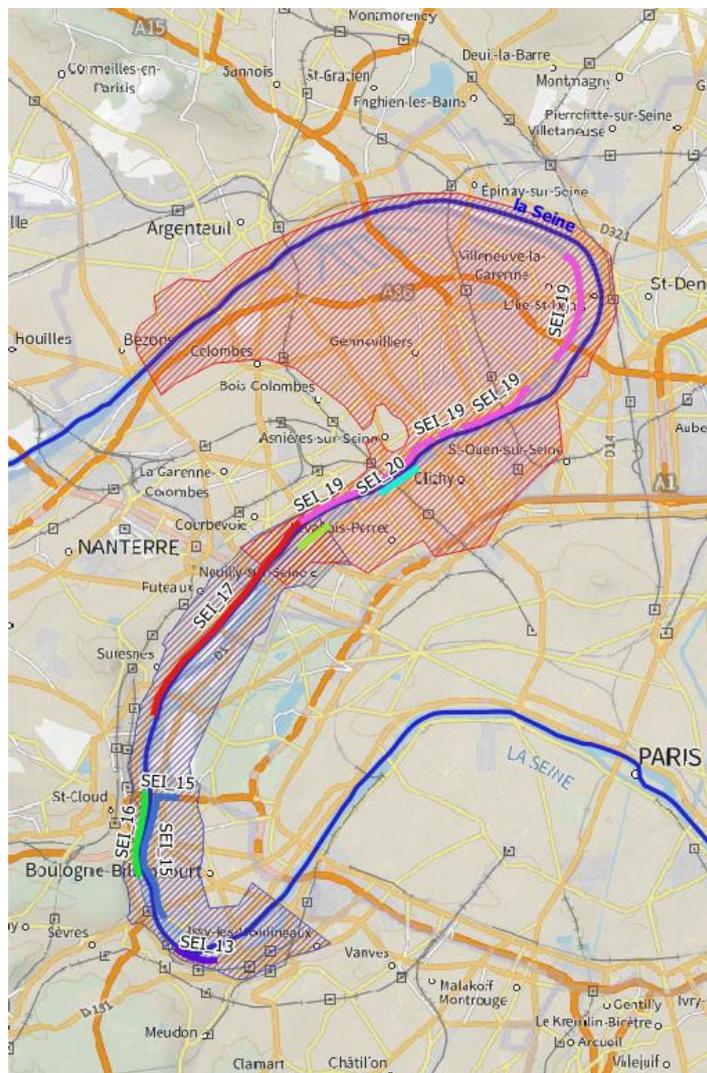


Figure 11 : Emprise des deux modèles

Le modèle dit « modèle amont » sera utilisé pour étudier les systèmes SEI_13, SEI_15, SEI_16 et SEI_17. Le modèle dit « modèle aval » permettra d'étudier les systèmes SEI_18, SEI_19 et SEI_20.

Les limites de l'emprise des deux modèles ont été déterminées grâce aux résultats d'ArteSeine. Ainsi, elles incluent toutes les zones inondables obtenues pour la crue la plus importante jamais observée,

celle de 1910. Le modèle amont s'étend sur une largeur de 2 km environ pour un linéaire de 2,5km. Il est délimité par l'aval du Pont de Issy-les-Moulineaux à l'amont et par le pont de Courbevoie à l'aval. Le modèle aval s'étend sur une largeur moyenne de 5 km pour un linéaire de 19 km environ. Il est délimité par l'aval du pont de Courbevoie à l'amont et le pont de Bezons à l'aval.

La suite de cette partie se concentrera plus particulièrement sur la construction du modèle aval. La méthode de construction du modèle amont est identique.

2. Construction du maillage du modèle (hypothèse, pas de triangulation selon les différentes zones, matisse)

Comme il a été dit précédemment, le maillage du modèle ArteSeine étant trop gros, il a été nécessaire de recréer totalement le maillage.

Géométrie du modèle

Il a donc fallu dans un premier temps redessiner, sous forme de polygones, tous les éléments caractéristiques responsables du relief de la zone d'études sur QGIS. Les principaux éléments dessinés sont :

- Le lit mineur de la Seine
- Les îles
- Les murettes de protection
- Les ouvrages de franchissement (piles de pont)
- Le barrage de Suresnes (au niveau du système d'endiguement 17)
- Les infrastructures du lit majeur : routes, voies ferrées et remblais. Pour simplifier la représentation, les routes de moins de 10m n'ont pas été prises en compte.

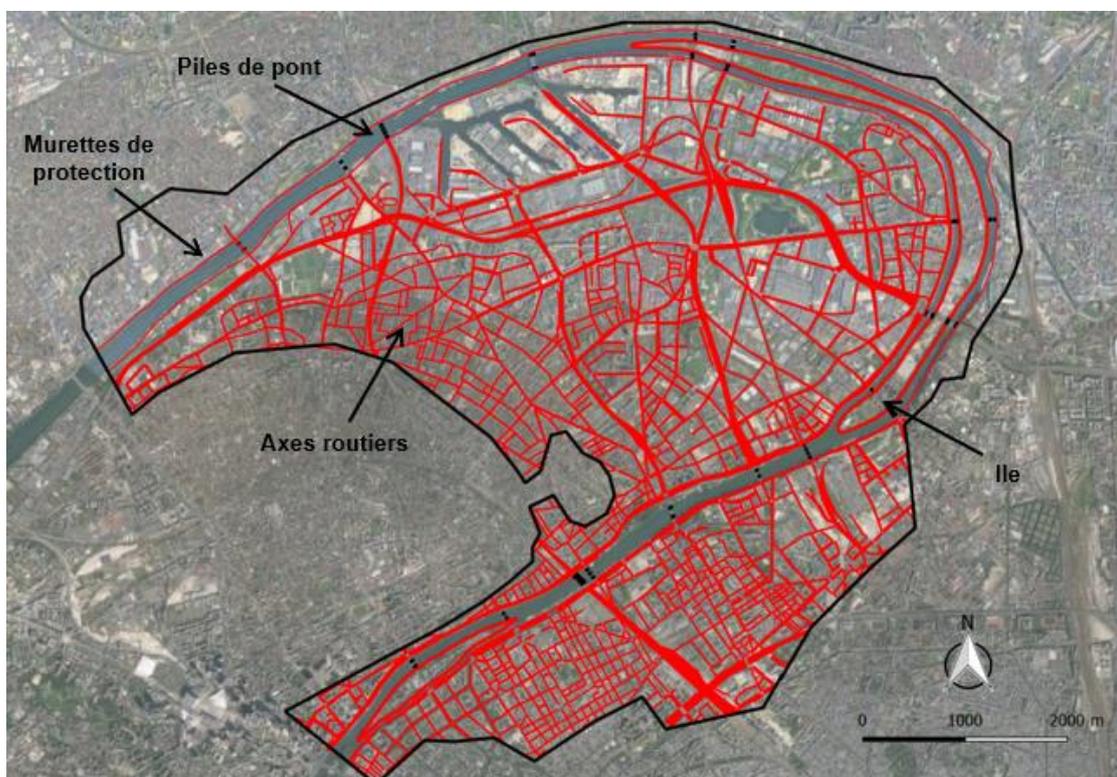


Figure 12 : Saisie des polygones des éléments structurant la zone d'étude (modèle aval)

Maillage

Le maillage du modèle a été réalisé grâce au logiciel Matisse. Ce logiciel est capable de générer un modèle à partir de l'importation de lignes. Pour chaque polygone sera créée une zone à laquelle sera attribuée des critères de maillage permettant de fixer la taille des mailles à générer.

Ici, le maillage est composé d'éléments triangulaires plus ou moins grands selon la précision souhaitée :

- Au niveau des routes, les mailles seront de 5m (ainsi on aura 2 mailles en largeur au minimum) : on a donc un maillage fin
- Au niveau des murettes, les mailles seront de 1m
- Au niveau des zones de franchissement, les mailles seront de 1m
- Au niveau du lit mineur, les mailles seront de 20m
- Au niveau des îles, les mailles seront de 20m. Les inondations ne sont pas étudiées sur les îles. On aura donc un maillage plus grossier, même au niveau des routes.
- Au niveau des zones urbaines, les mailles seront de 10 à 20m (selon leur proximité aux murettes de protection)

Au total, le maillage du modèle aval comporte 288 000 nœuds de calcul.



Figure 13 : Maillage du modèle Telemac (modèle aval)

Voici quelques extraits du maillage :

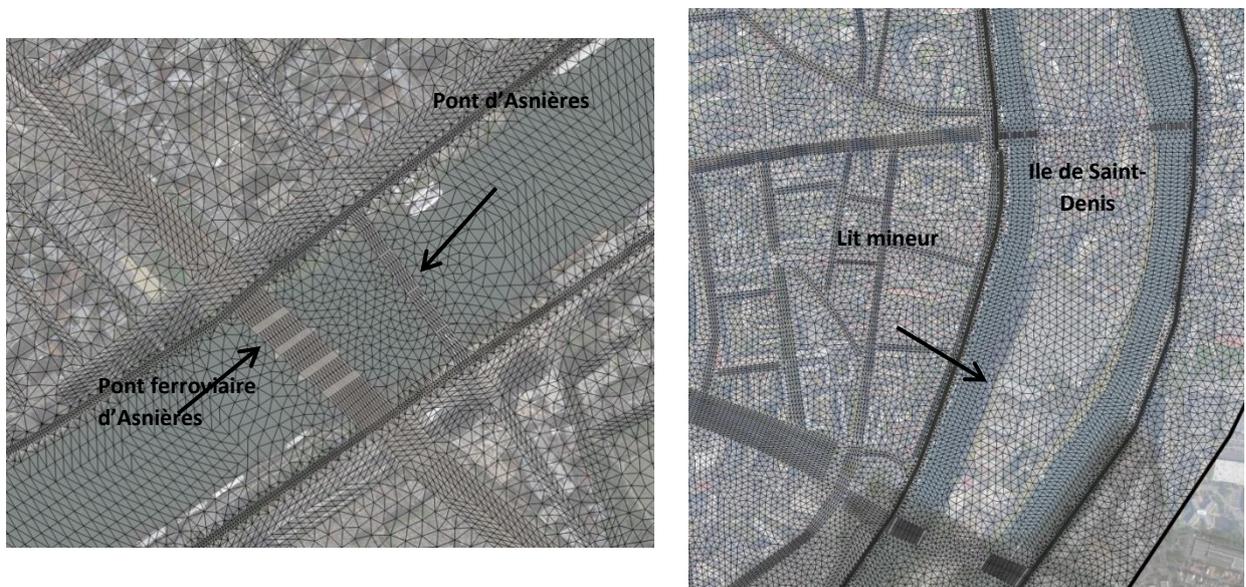


Figure 14 : Exemples de maillage de la zone d'étude

Une fois le maillage généré grâce à Matisse, le résultat est importé sur un logiciel nommé Fudaa. Fudaa est le logiciel qui va permettre à partir des données de créer un projet Telemac. Stocké dans un dossier, le projet se compose de plusieurs fichiers nécessaires lors du calcul avec TELEMAC-2D :

- Le fichier cas : stockant les paramètres de modélisation
- Le fichier géométrie : stockant les données bathymétriques et autres informations concernant le maillage
- Le fichier conditions aux limites
- Le fichier conditions initiales
- Dans le cas d'une modélisation en régime transitoire : l'hydrogramme et la courbe de tarage correspondante
- En cas de modification de la bathymétrie pendant la modélisation : fichier texte indiquant les points à modifier et les nouvelles cotes.

Une fois tous ces fichiers créés, le projet Telemac est fonctionnel. Les simulations peuvent commencer. Il faut néanmoins auparavant modifier ces fichiers à partir de Fudaa afin de simuler ce que l'on souhaite.

3. Données bathymétriques et topographiques

Jusqu'à cette étape de la création du modèle, chaque nœud de calcul ne comportait que deux coordonnées : x et y. Les données bathymétriques et topographiques sont importées dans un second temps. Pour cela, on utilise le MNT réalisé précédemment (voir II.A.2.). Sur QGIS, l'extension « Point Sampling tool » permet alors d'attribuer une valeur de bathymétrie à chaque point du modèle. Une fois cette étape réalisée, les données sont réimportées sur Fudaa.

4. Justification du choix des crues pour le calage

Une fois le MNT généré, il faut intégrer les données hydrauliques dans le modèle. Pour le calage du modèle, on utilisera les données des crues historiques suivantes : 1910, 1924, 1955, 2016 et 2018.

Les trois premières crues ont été choisies car ce sont des crues débordant du lit mineur. Les deux dernières sont les plus récentes.

Le calage du modèle sera réalisé sans la présence des digues car :

- Pour les crues de 1910 et 1924 les murettes n'étaient pas présentes. Elles ne l'étaient que très partiellement en 1955
- Les crues de 2016 et 2018 étant non débordantes, la présence des murettes n'a pas d'impact sur les résultats de simulations

Pour chaque crue, les données fournies avec le modèle ArteSeine nous ont permis de reconstituer les hydrogrammes d'entrée.

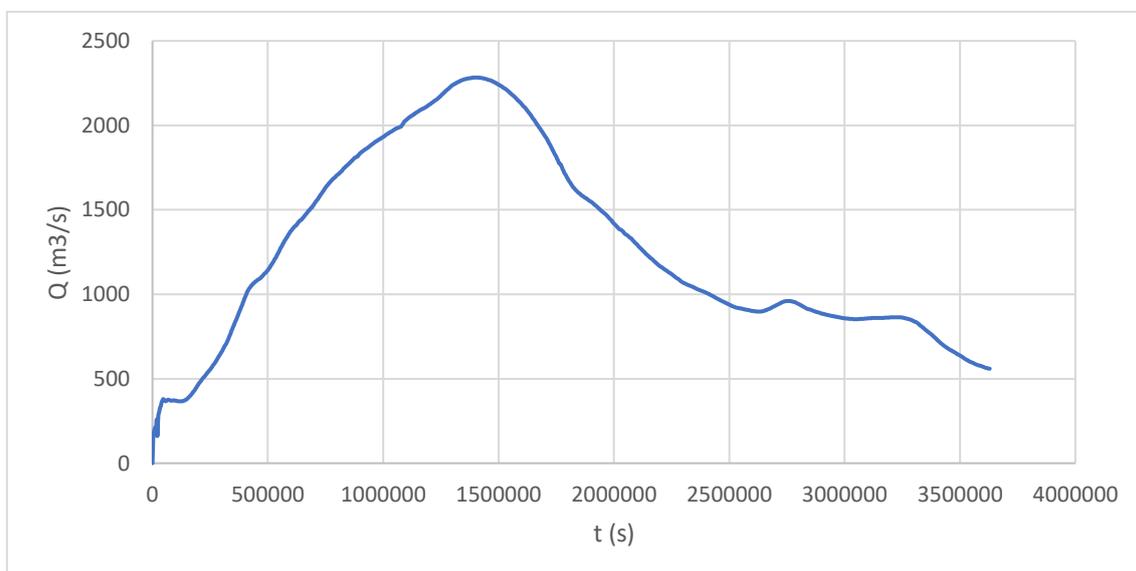


Figure 15 :Hydrogramme de la crue de 1924 à l'entrée du modèle

Les hydrogrammes des autres crues sont disponibles en annexe 6 à 9.

5. Conditions aux limites : réalisation de la courbe de tarage

Pour le calage du modèle, il a été choisi de faire tourner la crue de 1910 (la plus importante) en régime transitoire. A l'amont de notre modèle sera injecté l'hydrogramme reconstitué à partir des données fournies avec le modèle ArteSeine. A l'aval, il a été choisi d'intégrer une courbe de tarage car elle a pour avantage d'être utilisable pour n'importe quelle crue modélisée. Afin de diminuer le temps de simulation, les autres crues seront modélisées en régime semi-permanent. Ainsi la condition amont sera le débit de pointe extrait des crues historiques. A l'aval, la courbe de tarage fera toujours office de condition aux limites.

Une fois calé, toutes les simulations se feront en régime transitoire.

Débits injectés :

	Débit (m ³ /s)
Crue de 1910	2687
Crue de 1924	2283
Crue de 1955	2317
Crue de 2016	1818
Crue de 2018	1893

Tableau 6 : Débits de pointe des crues historiques

Courbe de tarage :

La courbe de tarage a été réalisée à partir des données du modèle ArteSeine à l'aval du modèle et des laisses de crue historiques.

Entre 0 et 1000 m³/s, la courbe a été réalisée grâce aux résultats du modèle ArteSeine qui ont permis d'obtenir une relation numérique hauteur-débit. La seconde partie devrait normalement être issue des résultats d'ArteSeine et des laisses de crue. Néanmoins, pour le modèle aval, le nombre de laisses de crue est insuffisant à l'aval du modèle. Cette courbe a donc été encore une fois construite à partir des données du modèle ArteSeine. Pour chaque crue, le débit de pointe à l'aval du modèle et la hauteur correspondante est représenté en bleu sur la courbe de tarage :

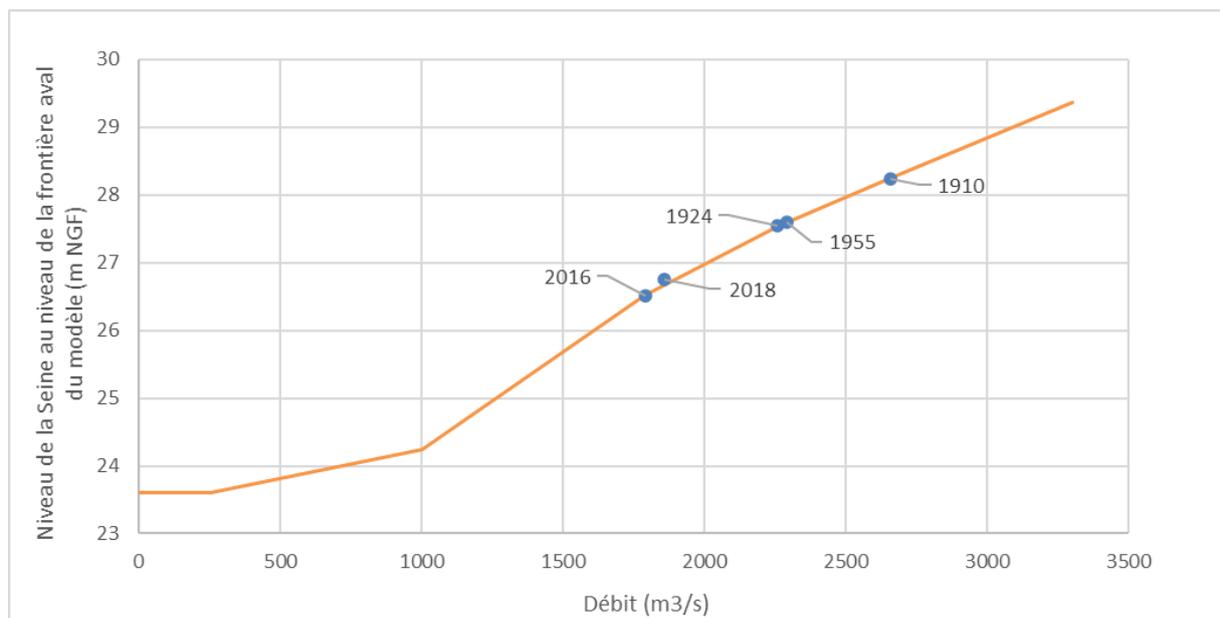


Figure 16 : Courbe de tarage du modèle aval

6. Initialisation du modèle

Pour chaque simulation, le modèle est initialisé à 1000 m³/s. En effet, la courbe de tarage construite nous permet de connaître la hauteur d'eau pour ce débit. L'hydrogramme introduit ensuite devra donc commencer à un débit légèrement supérieur à 1000 m³/s. Afin de limiter la durée de calcul, on arrêtera la simulation 3 jours après le pic de crue (soit 259 200s après le pic de crue).

7. Coefficient de rugosité

Définition

Le coefficient de Strickler permet de prendre en compte les pertes de charge dues aux frottements avec le sol. Les valeurs du coefficient dépendent donc de la nature du sol. Le tableau ci-dessous présente l'ordre de grandeur de ce coefficient en fonction du type de terrain occupé.

Nature des parois	Valeur de K en $m^{1/3} / s$
Béton lisse	75-90
Canal en terre, non enherbé	60
Canal en terre, enherbé	50
Rivière de plaine, sans végétation arbustive	35-40
Rivière de plaine, large, végétation peu dense	30
Rivière à berges étroites très végétalisées	10-15
Lit majeur en prairie	20-30
Lit majeur en vigne ou taillis	10-15
Lit majeur urbanisé	10-15
Lit majeur en forêt	<10

Tableau 7 : Coefficient de Strickler en fonction de l'occupation du sol (Source : "Aide-mémoire d'hydraulique à surface libre", Degoutte)

Coefficient de rugosité du lit majeur

Afin de privilégier l'écoulement dans le lit majeur au niveau des axes routiers (et voies ferrées), le coefficient de Strickler est fixé à 50. On attribue aux surfaces de bâti le coefficient de frottement de 0,1. Les îles auront un coefficient de Strickler de 20.

Coefficient de rugosité du lit mineur

Les coefficients de Strickler attribués au lit mineur ont été déterminés dans l'objectif d'avoir des résultats en cohérence avec les résultats du modèle ArteSeine et les laisses de crue. Après plusieurs essais permettant de trouver la combinaison optimale, les valeurs retenues sont les suivantes :

- 75 de l'amont jusqu'au pont de Gennevilliers
- 65 de l'aval du pont de Gennevilliers jusqu'à l'amont du pont de Saint-Denis
- 55 de l'aval du pont de L'Île-Saint-Denis à l'amont du pont d'Epinay
- 65 de l'aval du pont d'Epinay à l'aval du modèle
- 100 au niveau du pont d'Asnières, du pont ferroviaires d'Asnières, du pont de Clichy, du point de Saint-Ouen et du pont de Gennevilliers.

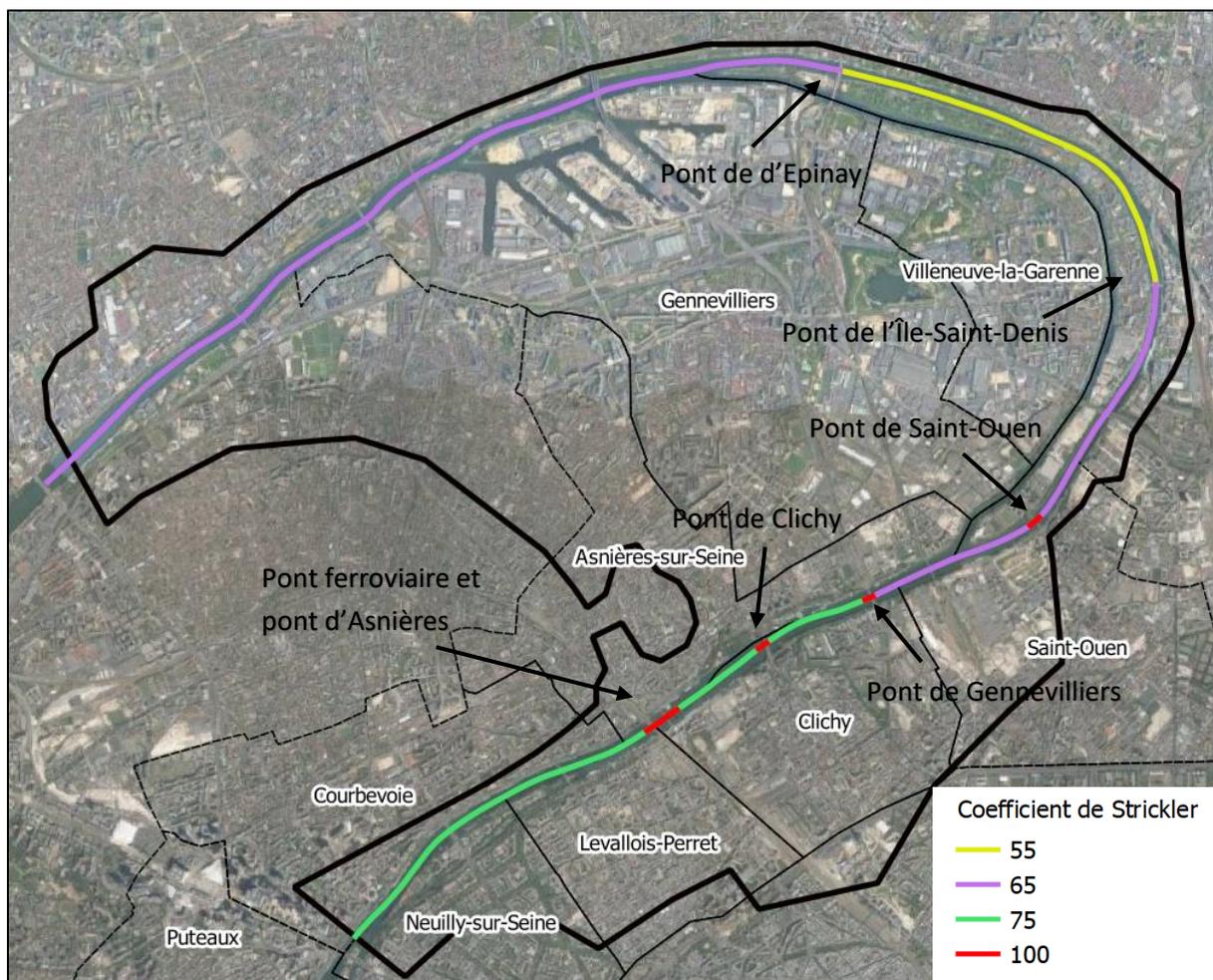


Figure 17 : Choix du coefficient de Strickler sur le modèle aval

Ces valeurs permettent d'obtenir des résultats satisfaisants, en cohérence avec les résultats du modèle ArteSeine et les laisses de crue pour les 5 crues modélisées. Néanmoins, les valeurs de Strickler choisies sont très élevées. Si on les compare aux valeurs de référence du tableau 7, les Strickler choisis correspondent à des canaux en terre non enherbés, voire des canaux en béton lisse. Ces valeurs diffèrent énormément des valeurs utilisées pour le modèle ArteSeine qui sont autour de 40.

8. Résultats de calage

Pour rappel, les crues utilisées pour réaliser le calage sont : 1910, 1924, 1955, 2016 et 2018. Pour chaque crue a été établie la ligne d'eau obtenue grâce à notre modèle. Elle sera alors comparée à la ligne d'eau du modèle ArteSeine et aux laisses de crue disponibles.

Crues de 1910, 1924, 1955 et 2016 :

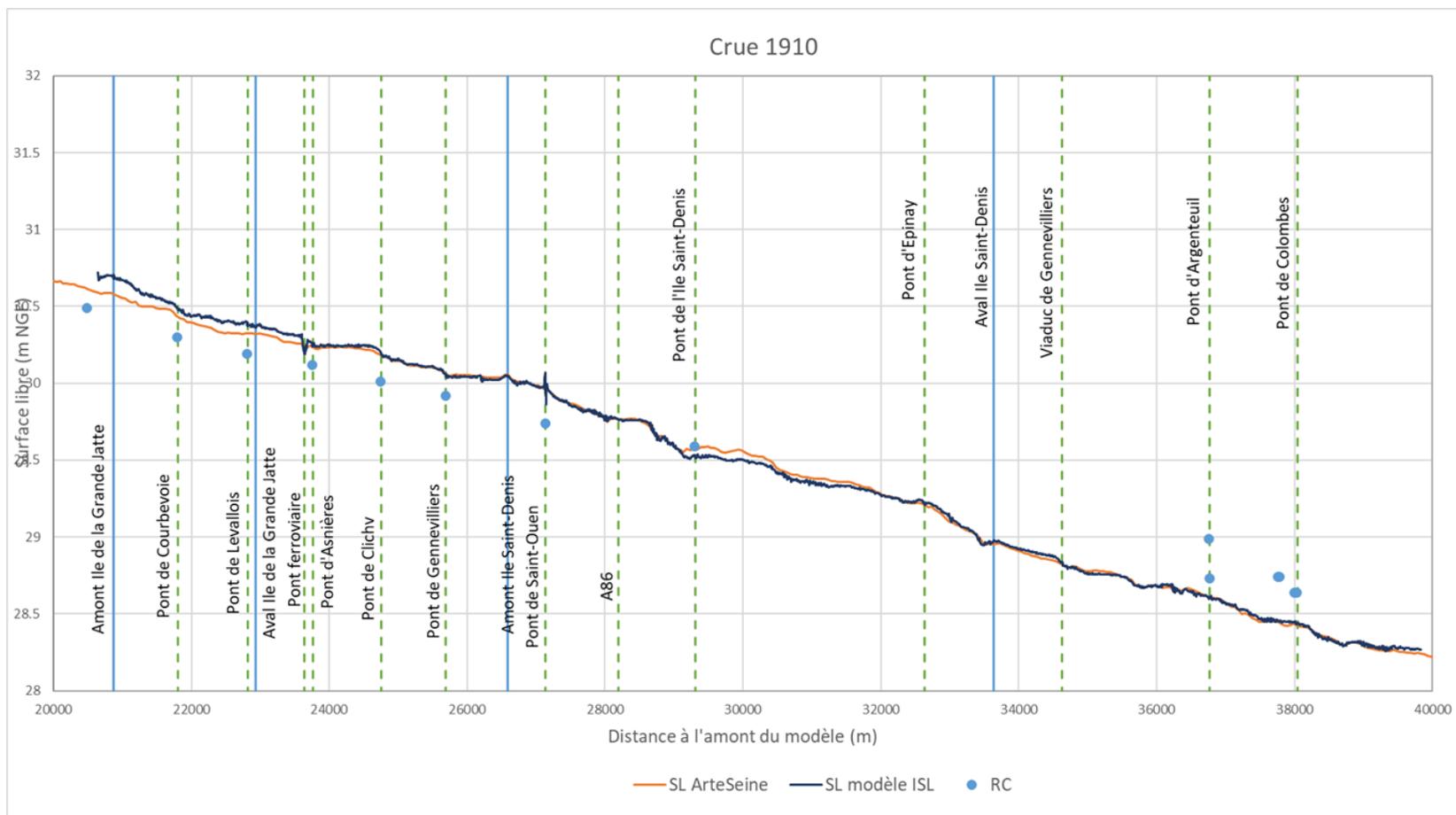


Figure 18 : Profil en long de la ligne d'eau de la Seine – Crue de 1910

Les résultats de notre modèle sont proches des résultats du modèle ArteSeine. A l'amont du modèle, les laisses de crue sont inférieures aux résultats du modèle. A partir du pont de L'Île-Saint-Denis, les laisses de crue sont au-dessus. Globalement, la pente des laisses de crue est plus faible que celle obtenue avec le résultat des deux modèles.

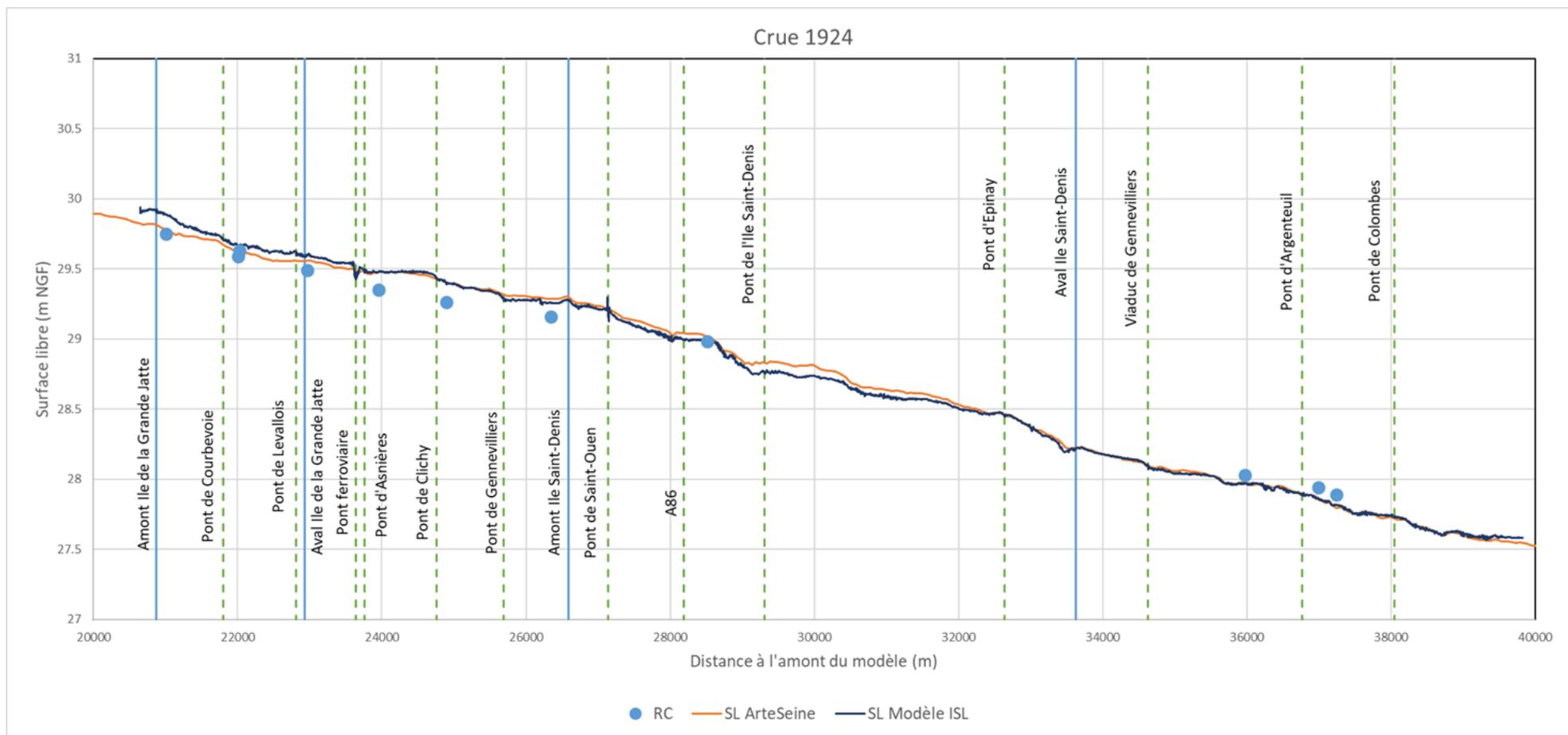


Figure 19 : Profil en long de la ligne d'eau de la Seine – Crue de 1924

On a toujours une ligne d'eau légèrement supérieure à l'amont du modèle. Néanmoins nos résultats semblent assez proches de ceux du modèle ArteSeine et en cohérence avec les laisses de crue.

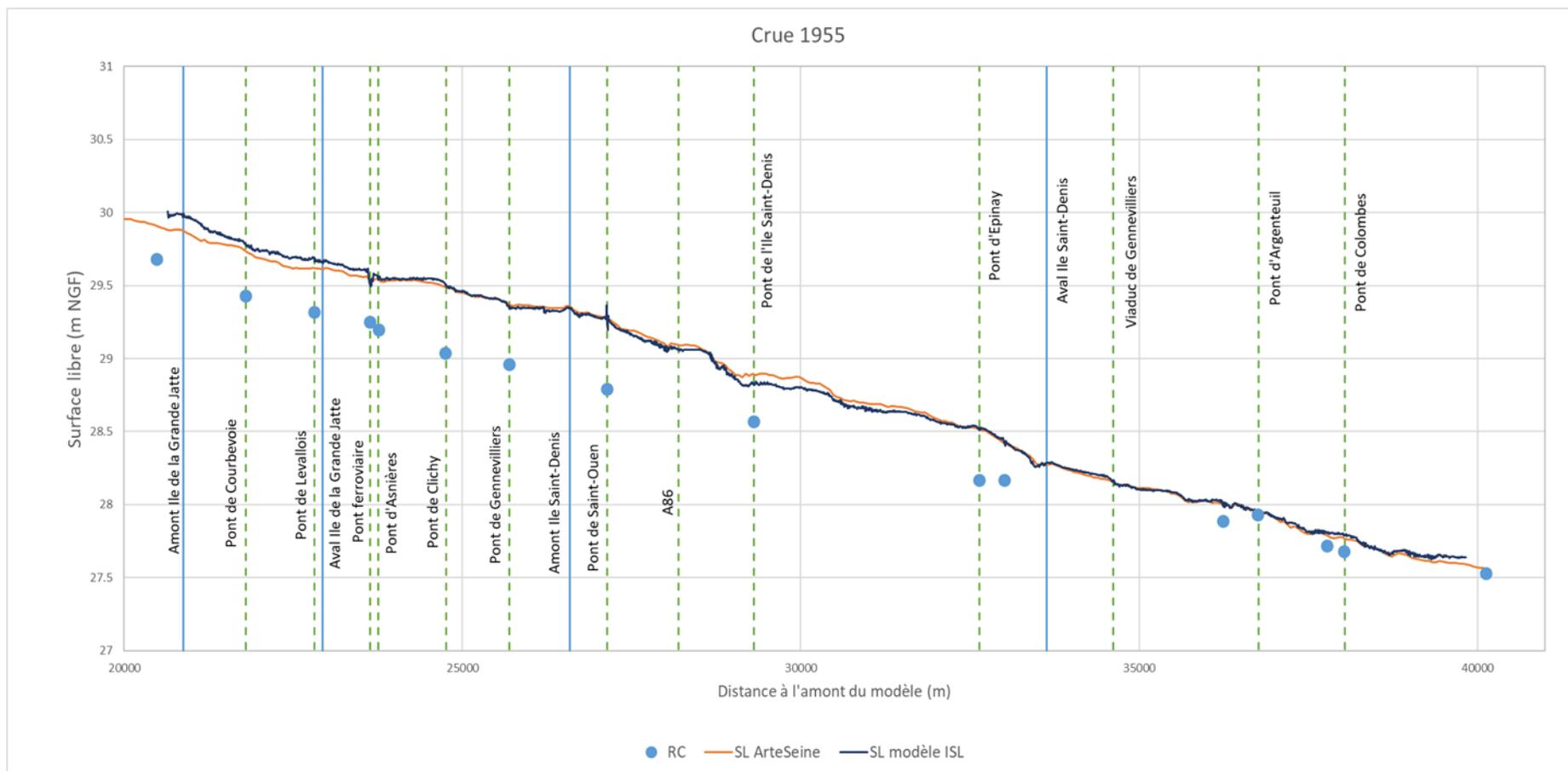


Figure 20 : Profil en long de la ligne d'eau de la Seine – Crue de 1955

Les résultats de deux modèles sont assez proches. Les laisses de crue sont encore en dessous des résultats. Néanmoins, la pente des deux modèles étant plus faibles que celle des laisses de crue, les résultats obtenus à l'aval du modèle se rapprochent des laisses de crue.

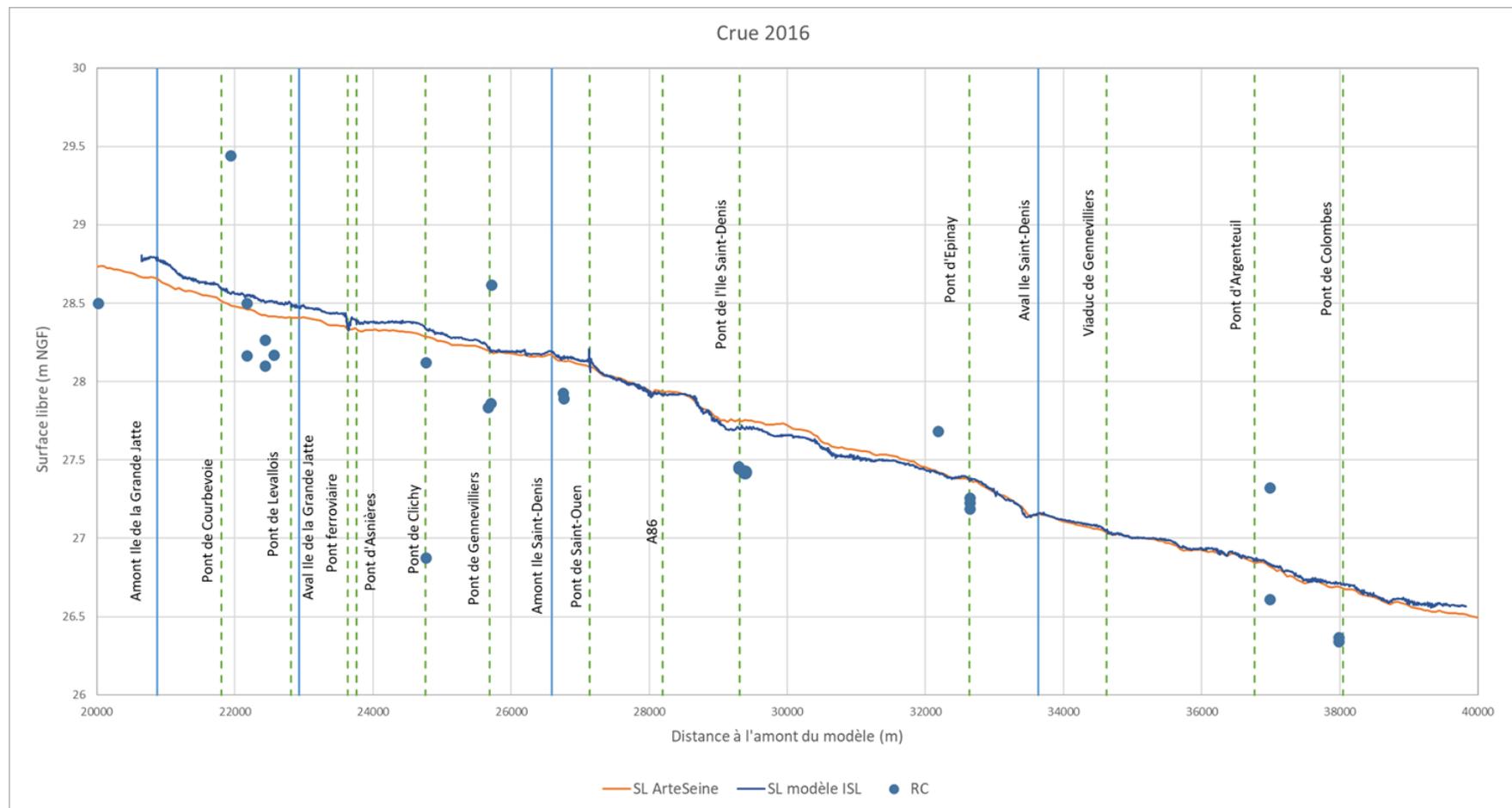


Figure 21 : Profil en long de la ligne d'eau de la Seine – Crue de 2016

Même si la ligne d'eau de notre modèle reste légèrement supérieure à celle d'ArteSeine à l'amont, les résultats des deux modèles sont similaires. Les laves de crue présentent une forte dispersion ce qui rend la comparaison aux résultats des deux modèles impossibles.

Crue de 2018 :

Sur le modèle aval, il n'existe pas de laisses de crue. C'est pourquoi il a été décidé de ne finalement pas utiliser cette crue pour le calage.

Globalement nos résultats sont proches de ceux d'ArteSeine. Vous pourrez trouver en annexe 10 à 13, un tableau pour chaque crue récapitulant les écarts de notre modèle et du modèle ArteSeine par rapport à chaque laisse de crue.

C. Description détaillée des systèmes d'endiguement

Pour rappel, les systèmes 15, 17 et 19 étant de classe A ou B, la réalisation de leur étude de dangers est prioritaire. C'est pourquoi les simulations réalisées et les résultats présentés par la suite ne concernent que ces 3 systèmes d'endiguement. Afin de mieux comprendre le choix des différents scénarii de défaillance, il est d'abord nécessaire de faire une présentation détaillée de ces trois systèmes d'endiguement :

1. SEI_15 :

Localisation

Le système d'endiguement 15 se situe en rive droite de la Seine. L'amont du système se situe à 100 m en amont du pont de Suresnes. Il est délimité à l'aval par le pont autoroutier de l'A13.

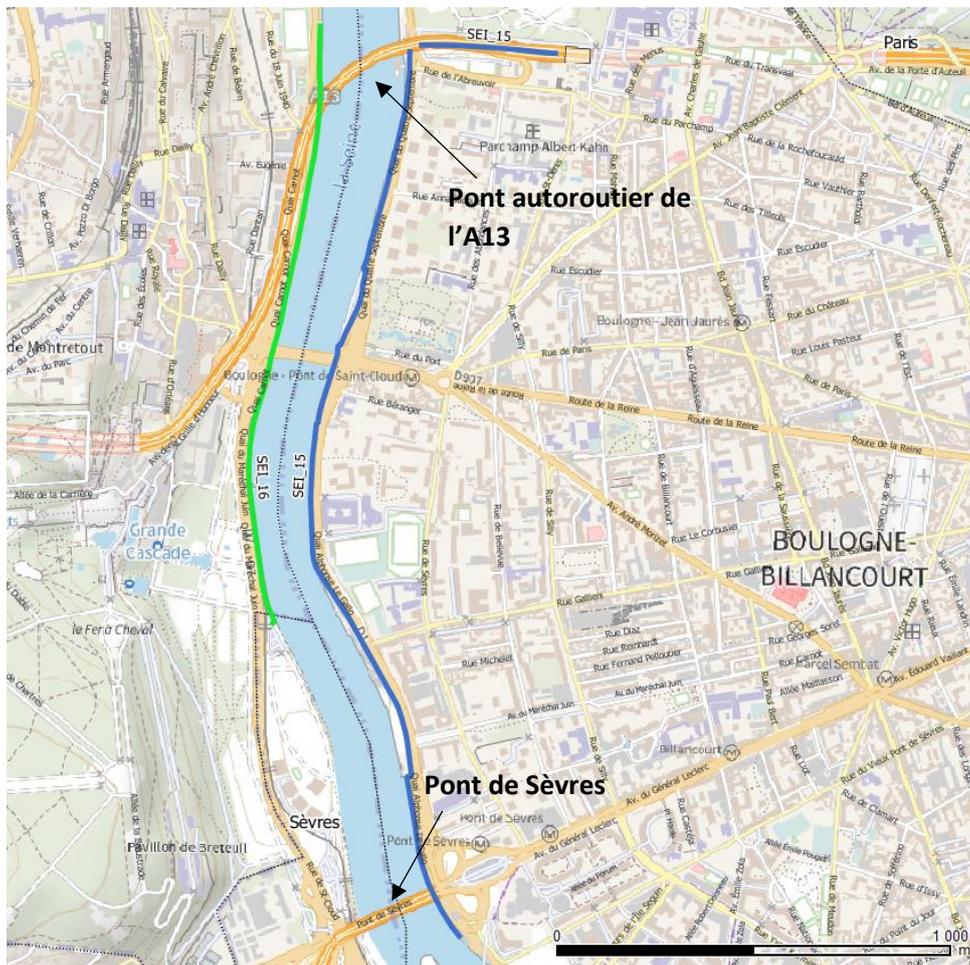


Figure 22 : Localisation du système d'endiguement 15

Description

Au total, le système est réparti sur un linéaire d'environ 2,7 kilomètres. Afin de faciliter la gestion du système d'endiguement, il a été décidé de découper le système en 5 tronçons fonctionnels (TF). Chaque tronçon fonctionnel présente des caractéristiques similaires concernant : la nature, la méthode de gestion ...

Le système d'endiguement a été divisé selon la nature de l'ouvrage. Ainsi, le système 15 a été divisé en 11 tronçons homogènes (TH) (identifié par les lettres A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K) de typologie d'ouvrage différente.

La carte ci-dessous permet de localiser les tronçons fonctionnels et homogènes du système. Vous trouverez également en annexe 14, un résumé détaillé des différentes caractéristiques de chaque tronçon homogène.

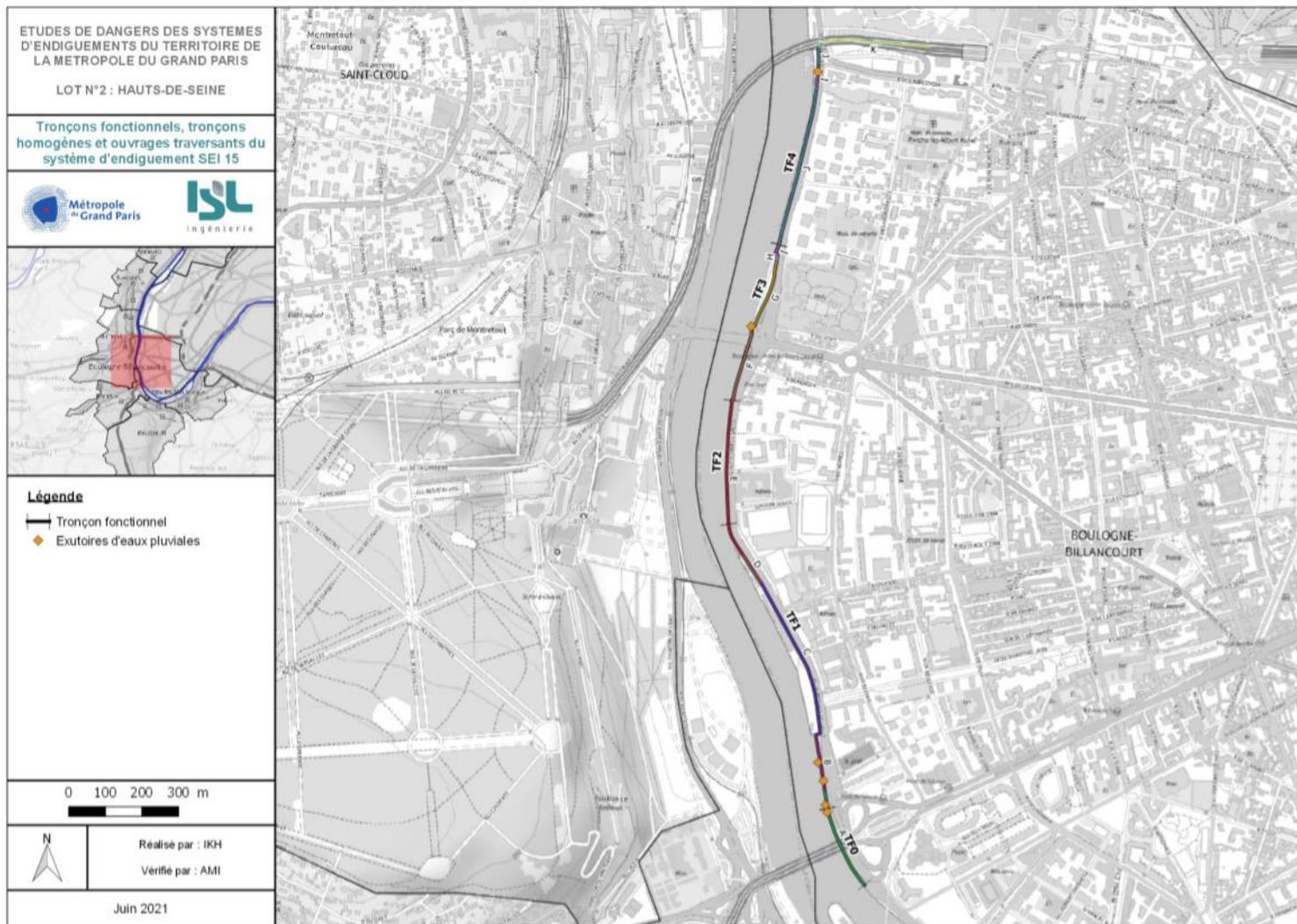


Figure 23 : Tronçons fonctionnels, homogènes et exutoires d'eaux pluviales sur le SEI_15

Lignes d'eau

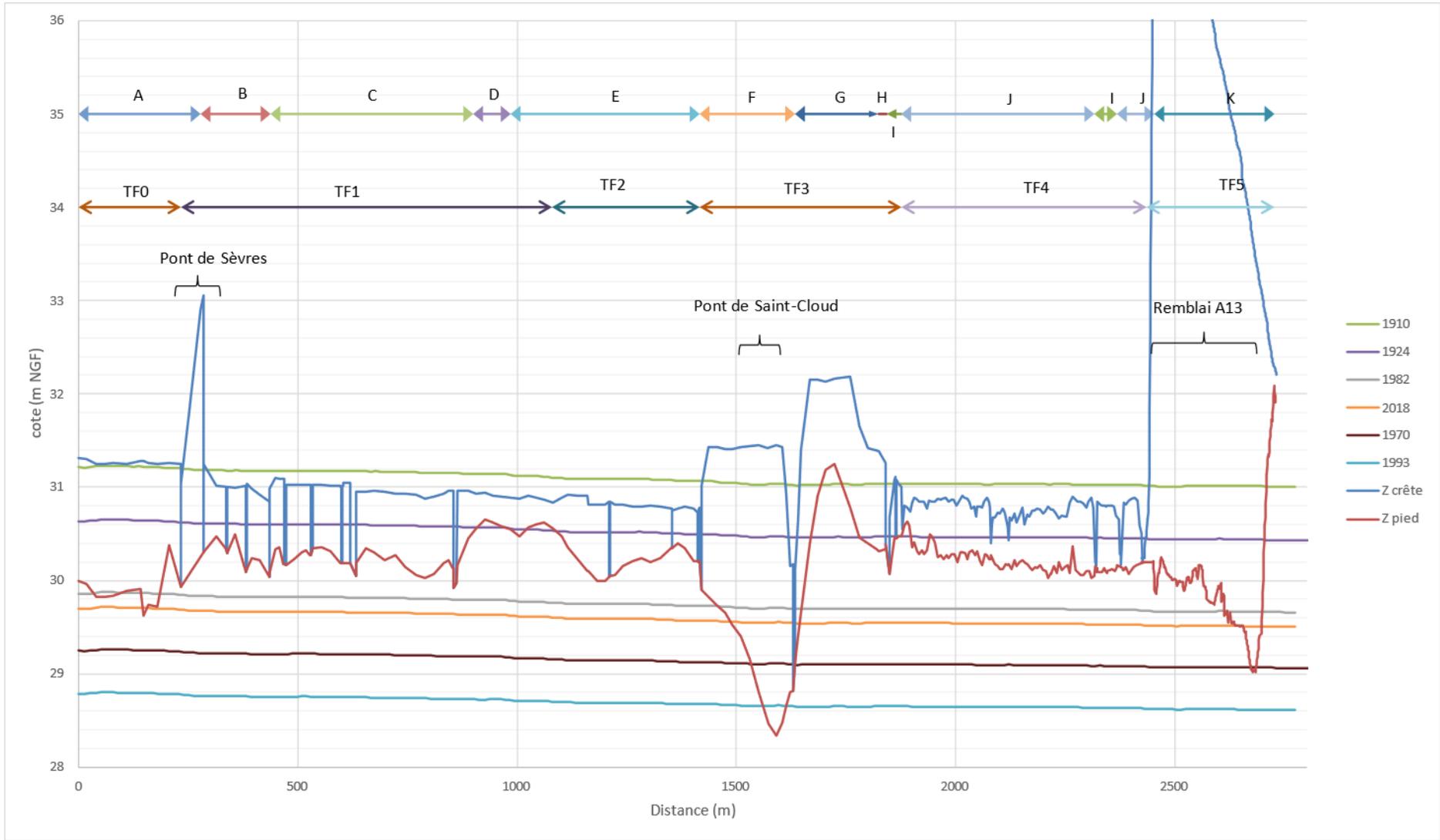


Figure 24 : Profil en long au niveau du SEI_15

La figure ci-dessus représente le profil en long du système d'endiguement superposé aux lignes d'eau des crues historiques. Les ouvertures dans les murettes pour accéder aux berges sont également représentées. Celles-ci sont censées être obstruées par des protections amovibles, donc ne seront pas prises en compte dans l'analyse suivante. Si l'on ne prend pas en compte les passages souterrains au niveau des ponts comme le pont de Saint-Cloud, la crue de début de mise en charge de l'ouvrage est celle de 1982. La crue de 1924 met en charge le système d'endiguement de 75cm sur le TF0. Les hauteurs de charge sont comprises entre 25 et 50 cm sur le reste du système. Le système surverse pour la crue de 1910

2. SEI_17 :

Localisation

Le système d'endiguement 17 se situe en rive gauche de la Seine. L'amont du système se situe à 220m en amont du pont de Suresnes. Il est délimité à l'aval par le pont de Courbevoie.

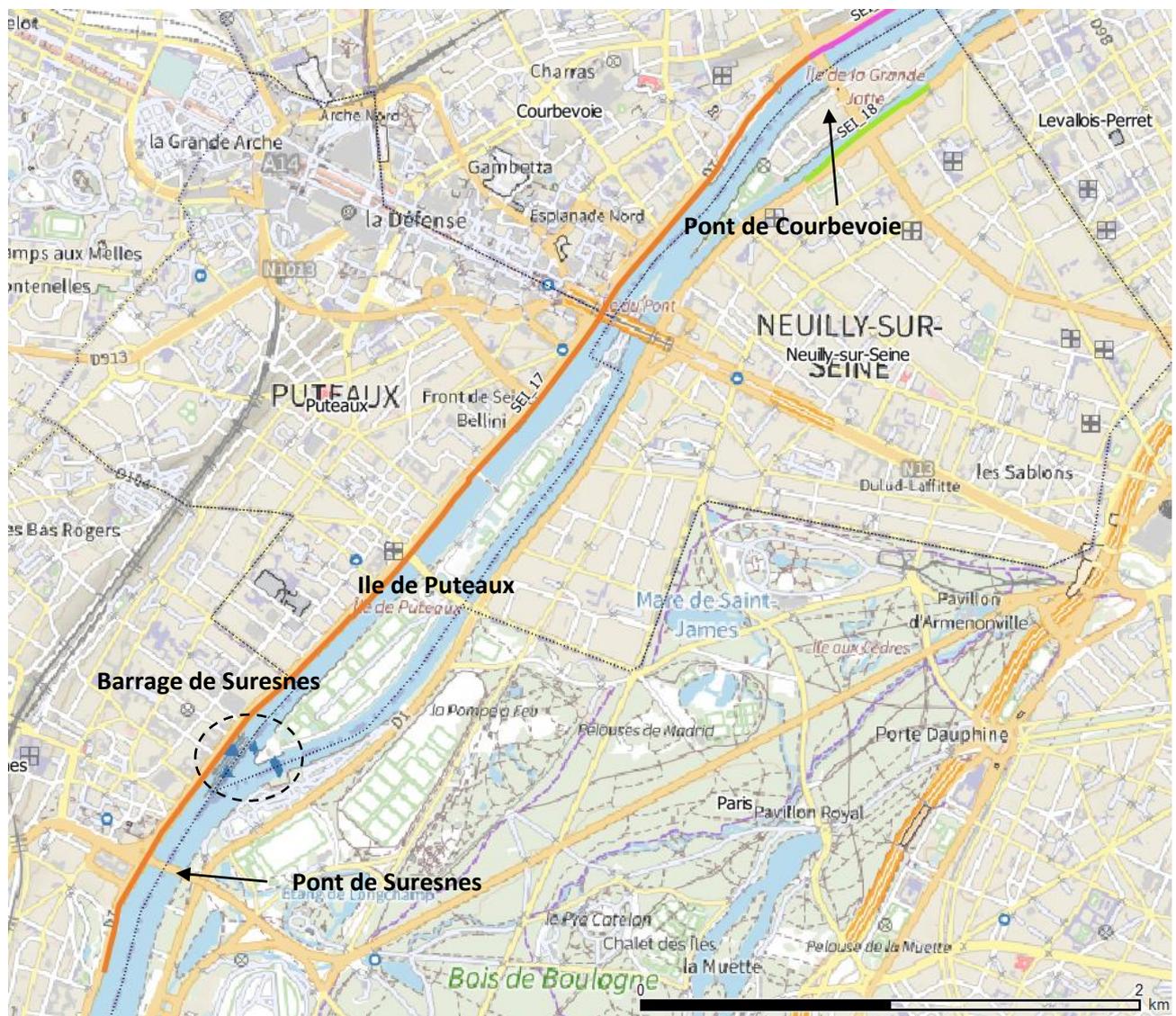


Figure 25 : Localisation du système d'endiguement 17

Description

Ce système d'endiguement a pour spécificité d'être situé le long d'un barrage. Le barrage de Suresnes se situe environ à 1 kilomètre du début du système.

Au total, le système est réparti sur un linéaire d'environ 4,8 kilomètres. Afin de faciliter la gestion du système d'endiguement, il a été décidé de découper le système en 7 tronçons fonctionnels. Chaque tronçon fonctionnel présente des caractéristiques similaires concernant : la nature, la méthode de gestion ...

Le système d'endiguement a été divisé selon la nature de l'ouvrage. Ainsi, le système 17 a été divisé en 10 tronçons homogènes (identifié par les lettres A', B', A1, A2, B, C, D, E1, E2, E3) de typologie d'ouvrage différente.

La carte ci-dessous permet de localiser les tronçons fonctionnels et homogènes du système. Vous trouverez également en annexe 15, un résumé détaillé des différentes caractéristiques de chaque tronçon homogène.

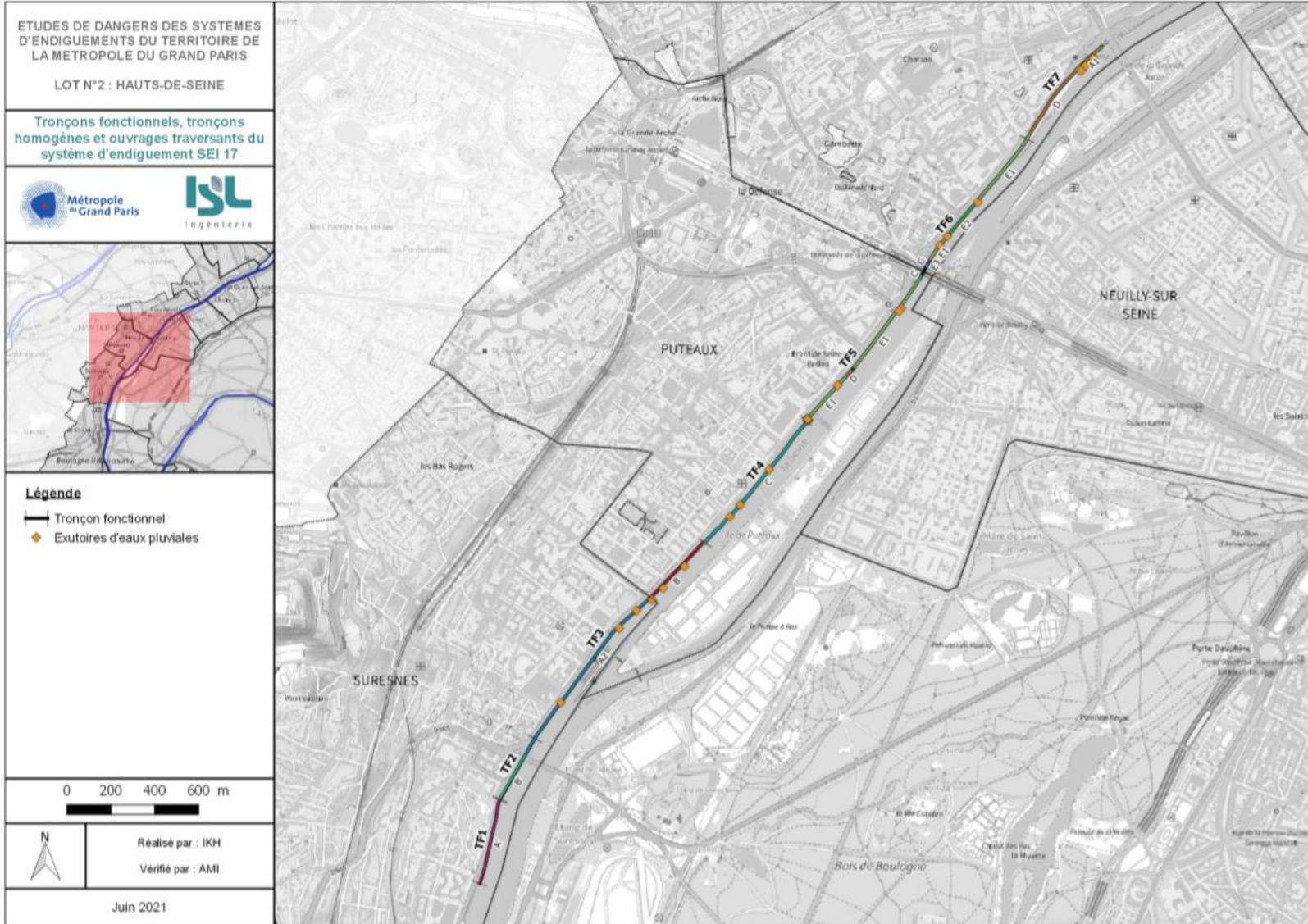


Figure 26 : Tronçons fonctionnels, homogènes et exutoires d'eaux pluviales sur le SEI_17

Lignes d'eau

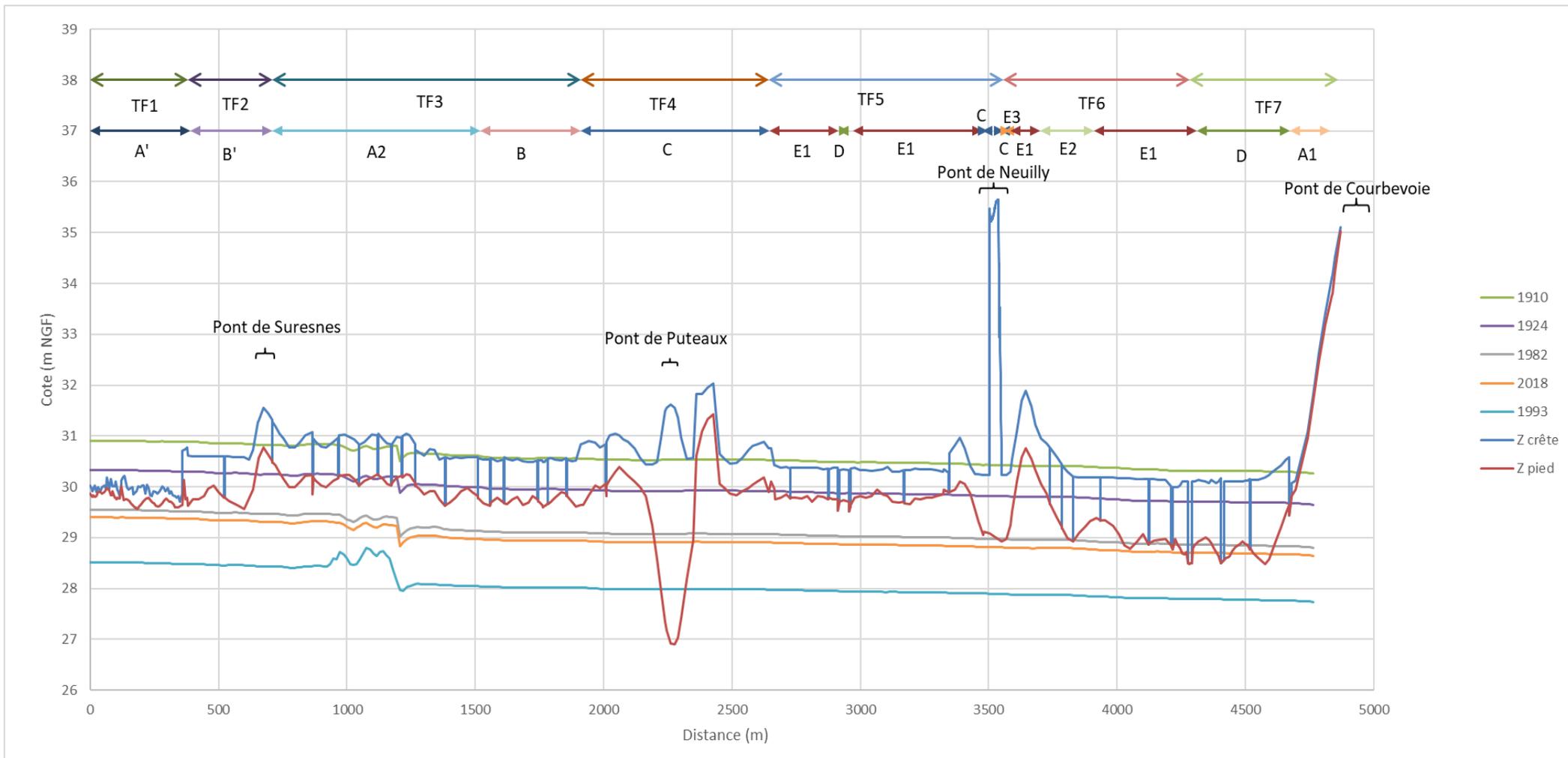


Figure 27 : Profil en long au niveau du SEI_17

La figure ci-dessus représente le profil en long du système d'endiguement superposé aux lignes d'eau des crues historiques. Le barrage de Suresnes provoque une chute d'eau. Les ouvertures dans les murettes pour accéder aux berges sont également représentées. Celles-ci sont censées être obstruées par des protections amovibles, donc ne seront pas prises en compte dans l'analyse suivante. Si l'on ne prend pas en compte les passages souterrains au niveau des ponts comme au niveau du pont de Puteaux, la crue de début de mise en charge de l'ouvrage est celle de 2018. La crue de 1924 met en charge le système d'endiguement de 1m en aval (TF6 et TF7), de 70 cm au niveau du TF2 et de quelques centimètres sur le reste du système. Le système surverse pour la crue de 1910.

3. SEI_19 :

Localisation

Le système d'endiguement 19 se situe en rive gauche de la Seine. Il est délimité à l'amont par le pont de Courbevoie. L'aval du système se situe à 850m en aval du pont de l'Île Saint-Denis.

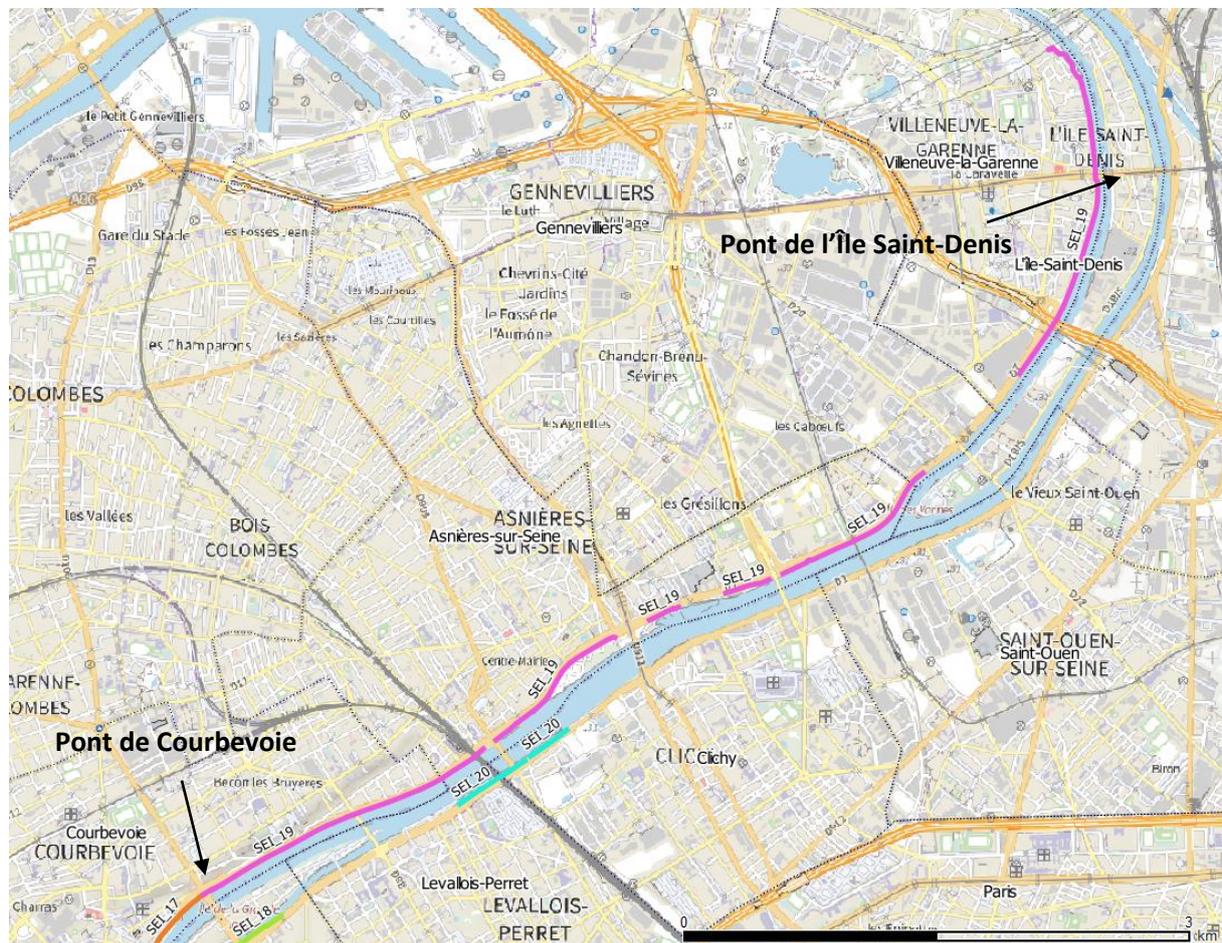


Figure 28 : Localisation du système d'endiguement 19

Description

Le système d'endiguement 19 a pour spécificité d'être discontinu. Les 3 principales interruptions de la digue sont :

- L'interruption entre le pont de Clichy et le pont de Gennevilliers sur un linéaire d'environ 300m

- L'interruption au niveau du pont de Gennevilliers d'environ 80m
- L'interruption au niveau du pont de Saint-Ouen d'environ 850m

Au total, le système est réparti sur un linéaire d'environ 8 kilomètres. Afin de faciliter la gestion du système d'endiguement, il a été décidé de découper le système en 10 tronçons fonctionnels. Chaque tronçon fonctionnel présente des caractéristiques similaires concernant : la nature, la méthode de gestion ...

Le système d'endiguement a été divisé selon la nature de l'ouvrage. Ainsi, le système 19 a été divisé en 14 tronçons homogènes (identifié par les lettres A, B, C, D1, D2, D3, E, F, G, H, I, J, K1, K2) de typologie d'ouvrage différente.

La carte ci-dessous permet de localiser les tronçons fonctionnels et homogènes du système. Vous trouverez également en annexe 16, un résumé détaillé des différentes caractéristiques de chaque tronçon homogène.

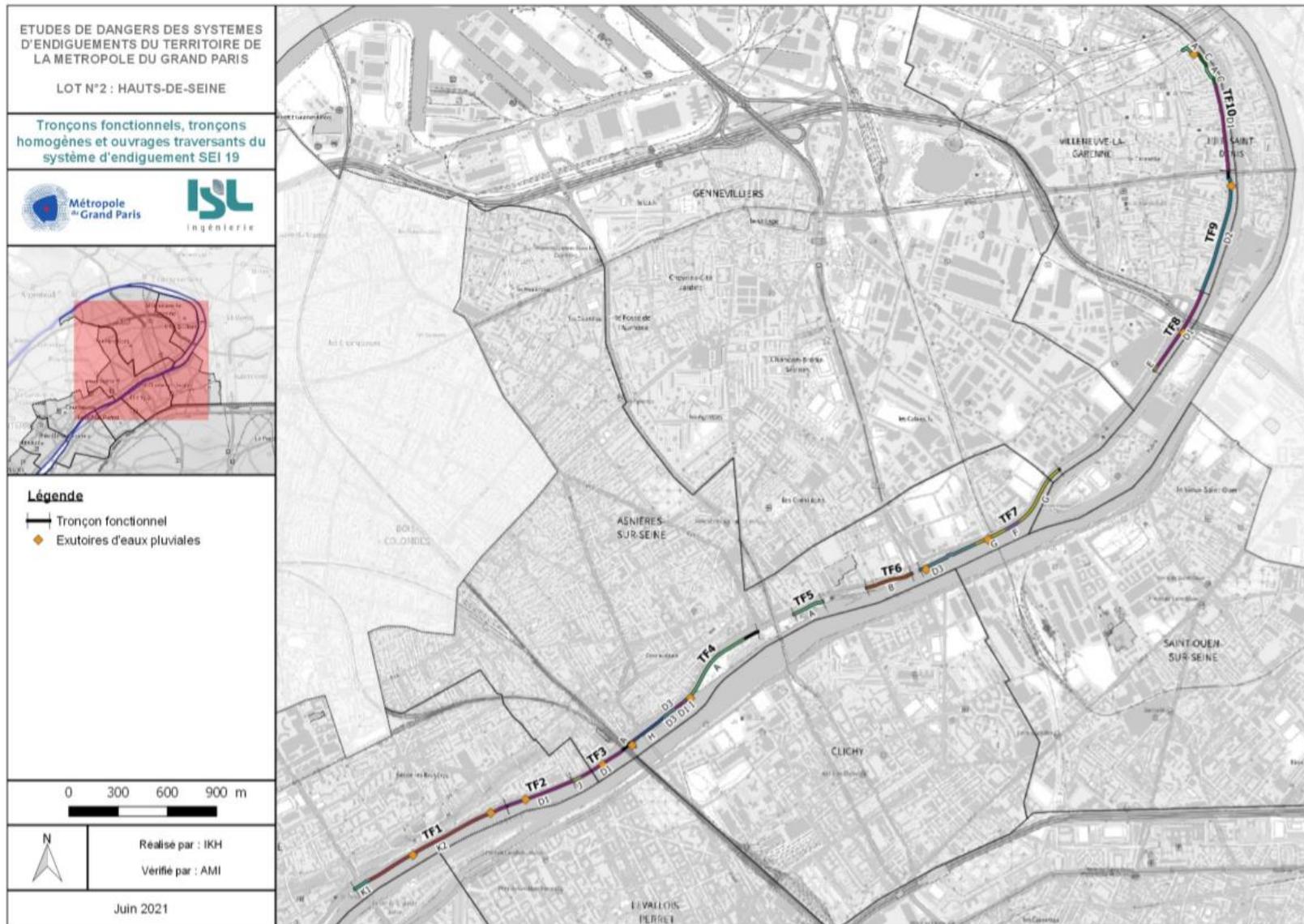


Figure 29 : Tronçons fonctionnels, homogènes et exutoires d'eaux pluviales sur le SEI_19

Lignes d'eau

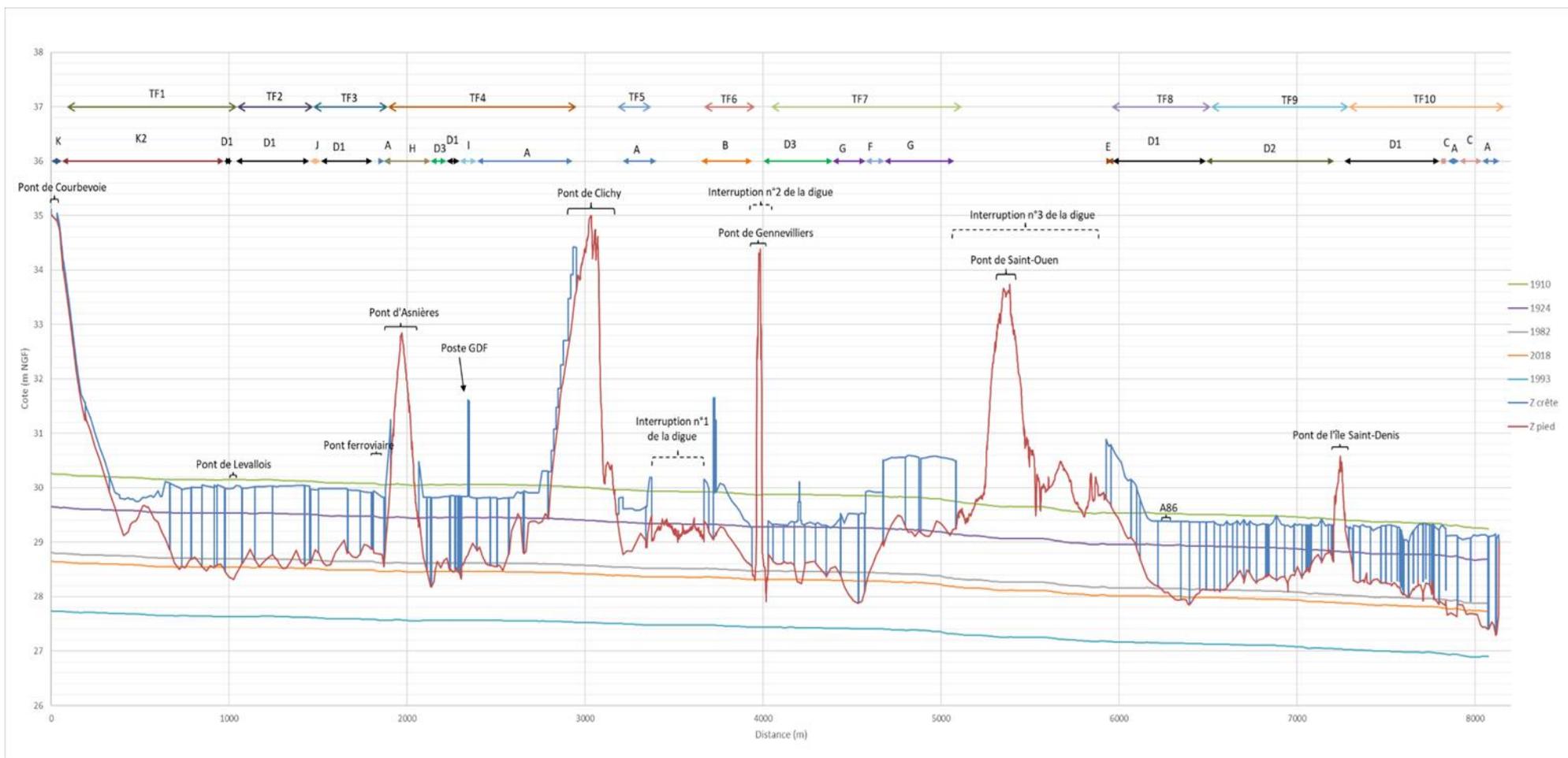


Figure 30 : Profil en long au niveau du SEI_19

La figure ci-dessus représente le profil en long du système d'endiguement superposé aux lignes d'eau des crues historiques. Les ouvertures dans les murettes pour accéder aux berges sont également représentées. Celles-ci sont censées être obstruées par des protections amovibles, donc ne seront pas prises en compte dans l'analyse suivante. On en déduit que la crue de début de mise en charge du lit mineur est celle de 2018. Pour la crue de 1924, on a une hauteur d'eau d'environ 50 cm. Pour la crue de 1910 (la crue historique la plus importante), l'ouvrage surverse.

D. Présentation des différents scénarii

Après avoir préparé le modèle et identifié les systèmes d'endiguement à étudier, chaque système sera soumis à plusieurs scénarii. L'objectif des différents scénarii est d'identifier :

- La zone protégée en fonction du niveau de protection choisi (qui dépend du système)
- Les risques d'inondation dus à une défaillance de gestion (défaillances fonctionnelles)
- Les risques d'inondation en cas de rupture du système (défaillances structurelles)

1. Scénarii 1 : fonctionnement nominal

Ces scénarii correspondent à un fonctionnement normal des systèmes d'endiguement pour la crue correspondant au niveau de protection.

Choix du niveau de protection

Le niveau de protection correspond à la crue pour laquelle aucune venue d'eau n'est possible dans la zone protégée. Jusqu'à ce niveau de protection, le bon fonctionnement des murettes doit être garanti.

La crue de 1924 correspond au niveau théorique pour lequel les murettes ont été dimensionnées. Or, ici, on a un manque de données concernant :

- La présence d'ouvrages traversants, leur gestion, l'absence de venue d'eau en cas de crue,
- le bon fonctionnement des systèmes d'obturation des ouvertures,
- la géotechnique des ouvrages et donc leur résistance effective jusqu'au niveau de dimensionnement.

C'est pourquoi, il a été décidé de choisir un niveau de protection inférieur au niveau initialement prévu pour ces ouvrages (crue de 1924). Les crues choisies n'entraîneront quoiqu'il arrive aucun débordement quel que soit le mode de gestion du système d'endiguement, et des ouvrages traversants. Après analyse des lignes d'eau fournies avec le modèle ArteSeine, les crues retenues comme niveau de protection seront :

	Tronçons fonctionnels concernés	Crue de protection
SEI 15	Tous	1970 (période de retour 5 à 10 ans)
SEI 17	TF1 et TF2	1924 (période de retour de 30 à 50 ans)
	TF3, TF4 et TF5	1982 (période de retour de 10 à 15 ans)
	TF6 et TF7	1970 (période de retour de 5 à 10 ans)
SEI 19	TF1 à TF5	1993- 50 cm
	TF8 à TF10	1993 – 10 cm

Tableau 8 : Définition des niveaux de protection

Détermination de la zone protégée

Le niveau de protection correspond à la crue pour laquelle aucune venue d'eau n'est possible dans la zone protégée. Jusqu'à ce niveau de protection, le bon fonctionnement des murettes doit être garanti. Le GeMAPIen s'engage à ce qu'il n'y ait aucune venue d'eau dans la zone protégée pour le niveau de protection choisi.

Pour des questions d'implication, de communication auprès de la population et dans le cadre d'une vision moyen terme dans laquelle la MGP prévoit de mettre en place les investigations, les modes opératoires et les conventions permettant d'augmenter le niveau de protection au niveau de dimensionnement historique, la MGP choisit de conserver une zone protégée correspondant à une crue supérieure au niveau de protection effectif, soit la crue de 1924.

On a donc ici une décorrélation du niveau de protection déclaré et de la méthode pour définir la zone protégée, ce qui est accepté par les services de l'Etat.

Ainsi la zone protégée est la zone soustraite aux inondations causées par une crue type 1924 en supposant un fonctionnement et une résistance optimale du système d'endiguement : bonne obturation des murettes, absence de venues d'eau via les réseaux traversants, et tenue des ouvrages.

2. Scénarii 2 : défaillances fonctionnelles

Les défaillances fonctionnelles correspondent aux erreurs dues à une mauvaise gestion de la mise en place de protections temporaires au niveau des ouvertures en période de crue. Généralement ces systèmes de protection amovible sont des batardeaux. Ces batardeaux doivent être positionnés au niveau de toutes les ouvertures avant la venue d'une crue.

Comme il a été dit précédemment, le manque d'informations concernant notamment l'obturation en période de crue des ouvertures par des protections amovibles nous a contraint à choisir un faible niveau de protection. Ainsi, quel que soit le mode de gestion, pour les niveaux choisis, on n'aura pas d'inondation dans les zones de protection. Ainsi, les scénarii de défaillances fonctionnelles ne sont pas pertinents et ne seront donc pas étudiés. Néanmoins, il sera proposé, à titre informatif, de simuler ces défaillances fonctionnelles pour la crue de 1924.

Ainsi, pour chaque système d'endiguement, une simulation sera réalisée en prenant en compte toutes les ouvertures de systèmes. Pour les scénarii 2-1, les ouvertures sont toutes ouvertes dès le début de montée des eaux. Les scénarii 2-2 correspondront aux scénarii pour lesquels les dispositifs de protections amovibles deviennent non fonctionnels au débit maximal. Les cartes ci-dessous permettent de localiser les ouvertures présentes sur les trois systèmes d'endiguement étudiés

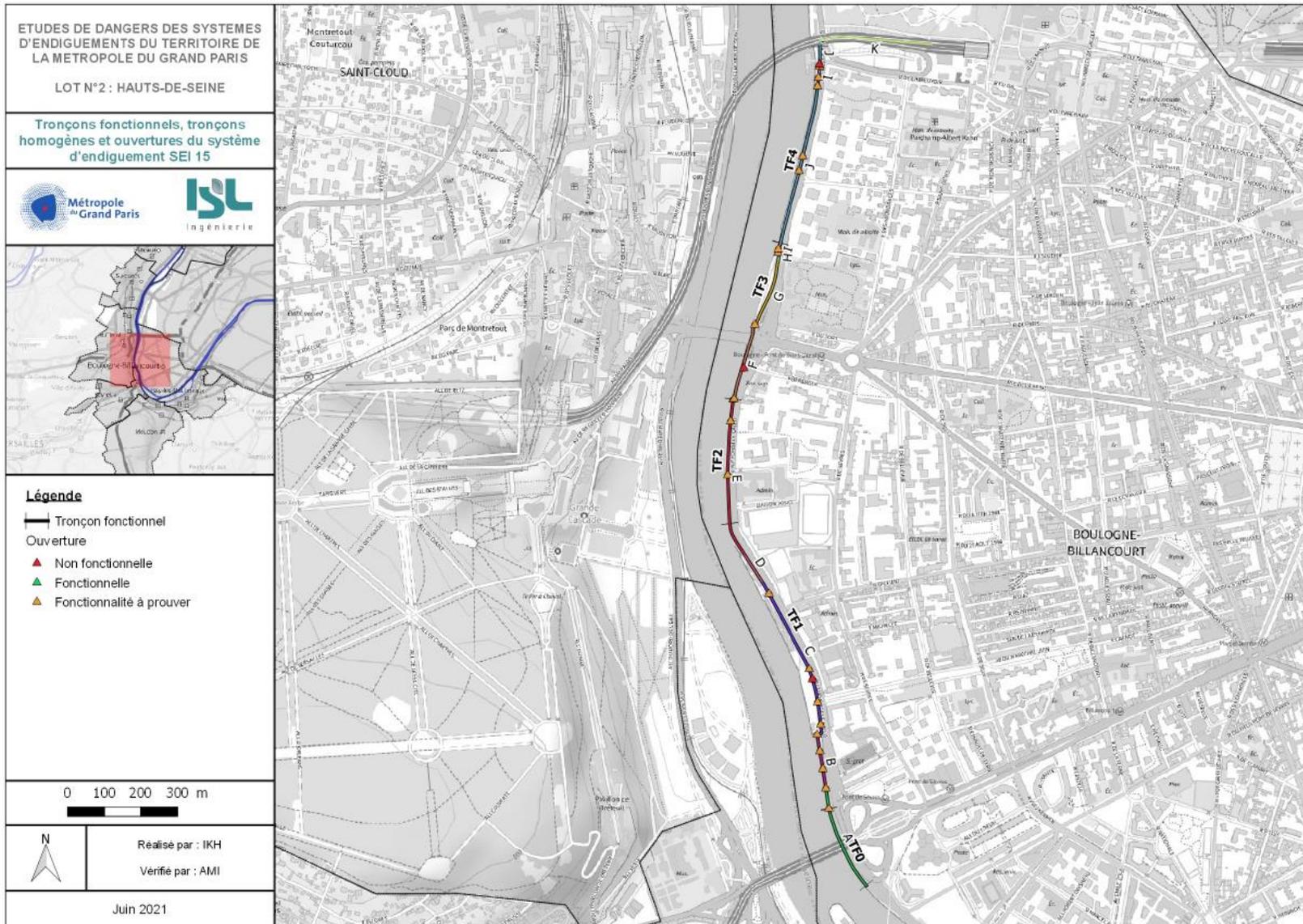


Figure 31 : Ouvertures sur le SEI_15

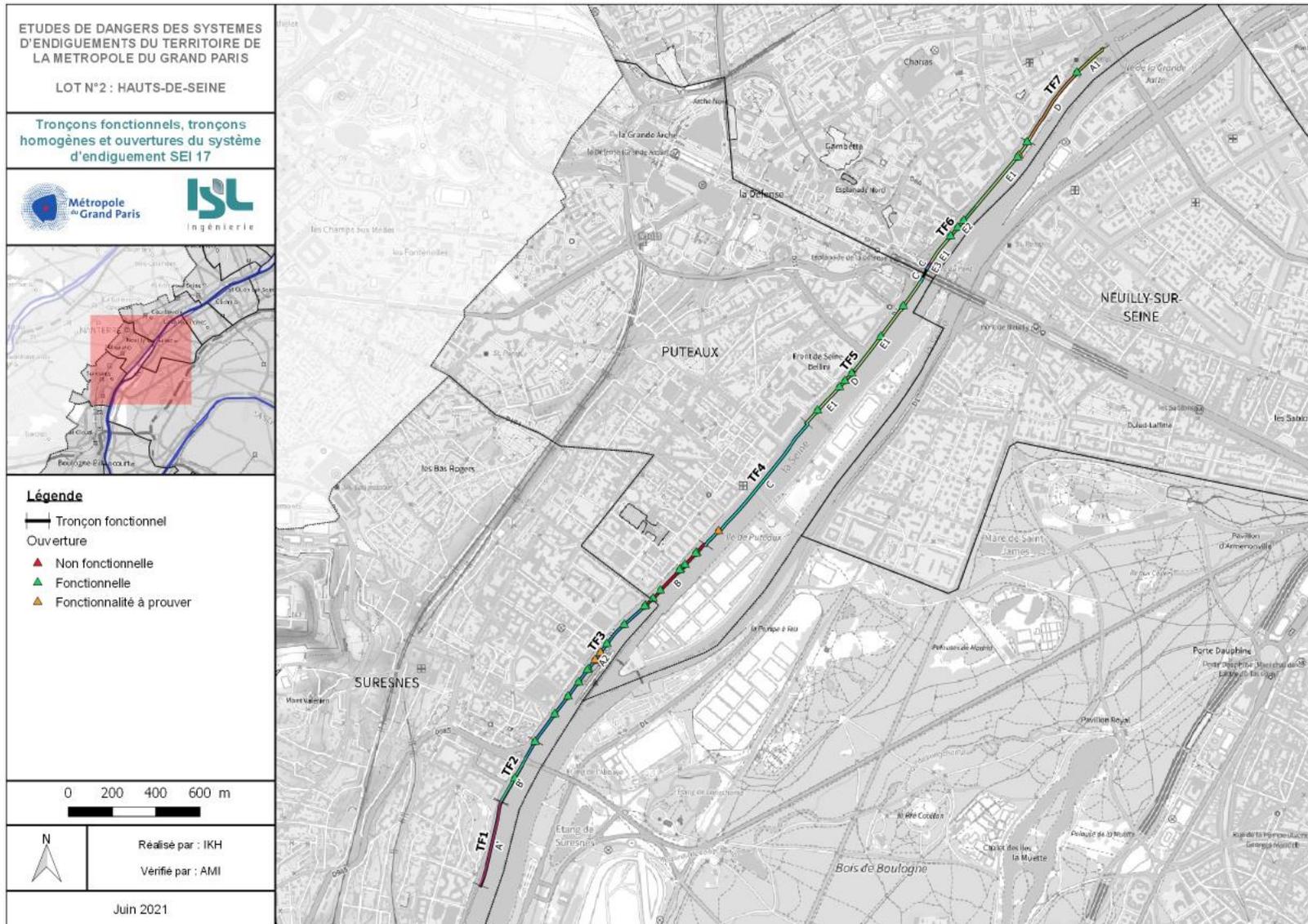


Figure 32 : Ouvertures sur le SEI_17

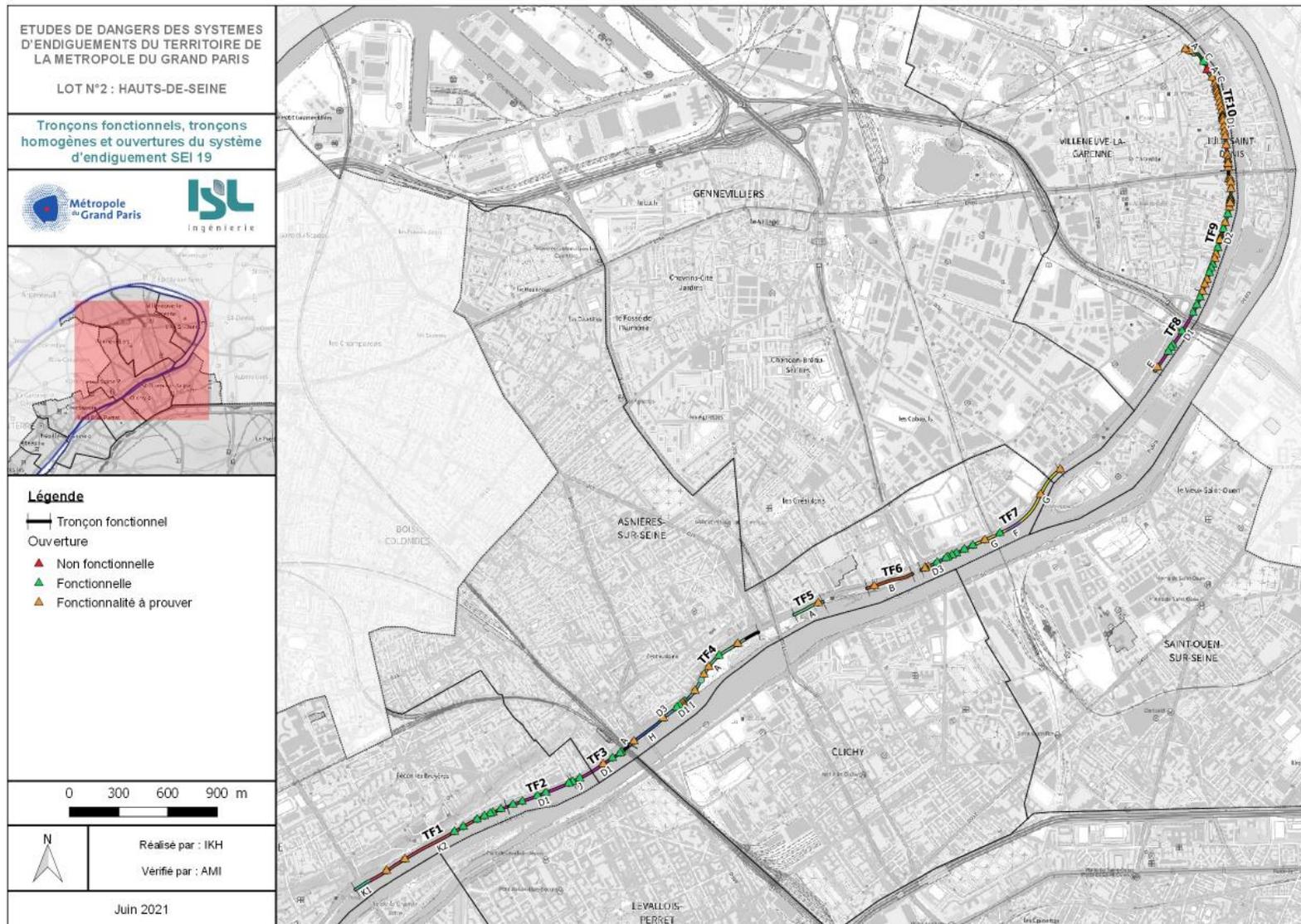


Figure 33 : Ouvertures sur le SEI_19

3. Scénarii 3 : défaillances structurelles

La crue est choisie de tel sorte que le risque de rupture de l'ouvrage soit supérieur à 50%. Ici, la crue choisie sera 1924.

Selon les tronçons homogènes, le risque de rupture est plus ou moins important pour cette crue. Les brèches modélisées se situeront donc sur les tronçons pour lesquels le risque de rupture est le plus important.

Pour chaque système, différents emplacements de brèche ont été testés sur les tronçons homogènes concernés par les risques de ruptures. Ainsi, plusieurs brèches ont été créées pour chaque système d'endiguement. Elles ont toutes pour caractéristiques :

- De rompre instantanément lorsque le maximum de crue est atteint
- D'avoir une longueur de 100 m

L'emplacement d'une brèche est défini selon les critères suivants :

- elle est placée sur un tronçon pour lequel la cote de danger est inférieure ou égale au niveau atteint pour 1924 et ce, indépendamment du mécanisme conduisant à la rupture,
- dans un secteur avec une rupture suffisamment large possible (pas d'interruption du système),
- dans un secteur qui supporte une charge hydraulique plus importante,
- dans un secteur qui majore les enjeux.

Par ailleurs, dans la mesure du possible et si cela ne rentre pas en conflit avec les critères précédents, des brèches sont implémentées dans chaque casier hydraulique indépendant (ou quasi-indépendant) afin d'étudier le maximum de scénarios de propagation possibles.

Les figures ci-dessous permettent de localiser ces brèches pour chaque système d'endiguement.

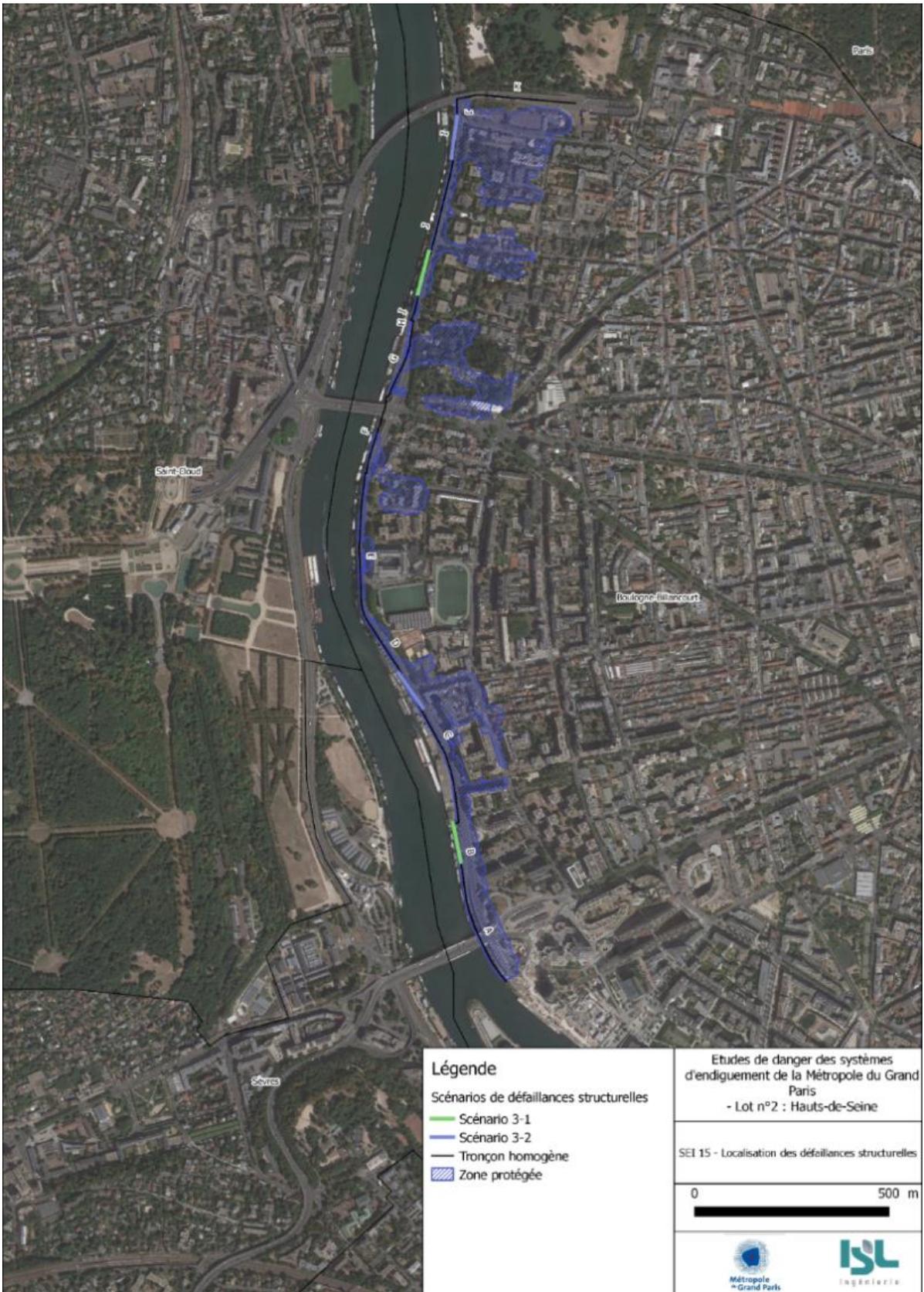


Figure 34 : Localisation des brèches du SEI_15

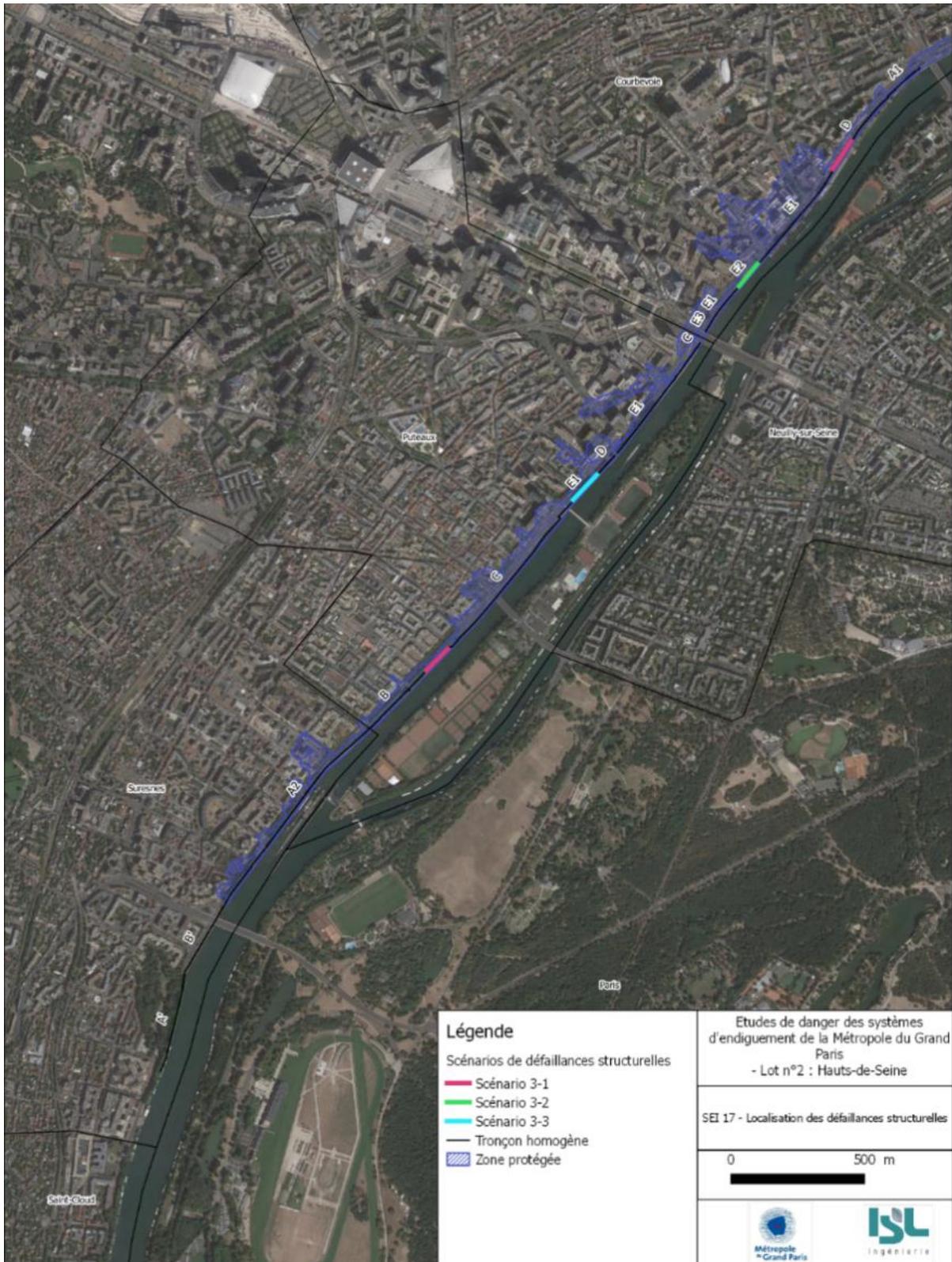


Figure 35 : Localisation des brèches du SEI_17

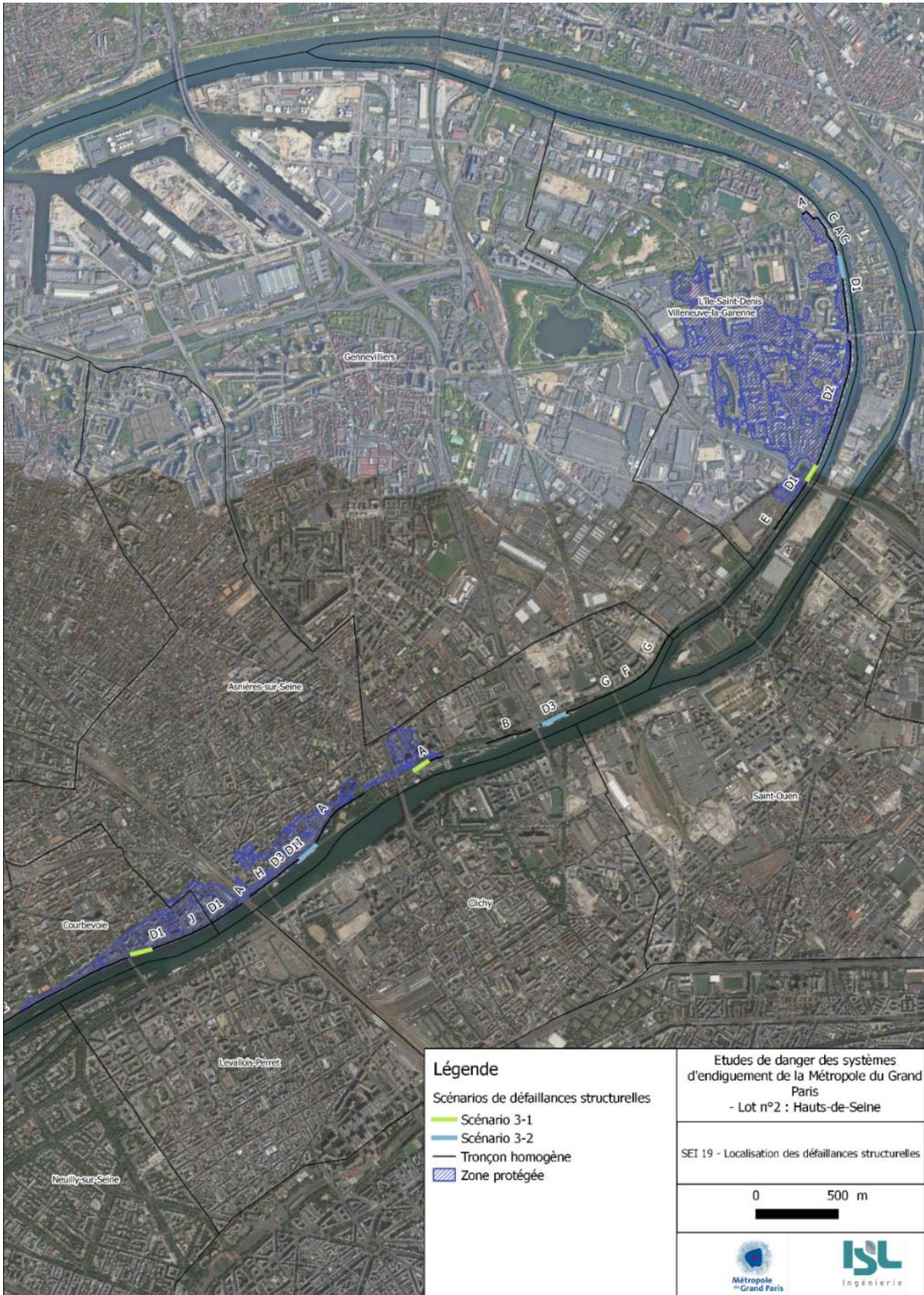


Figure 36 : Localisation des brèches du SEI_19

IV. Discussion autour du modèle

A. Préparation du maillage

Diminution du nombre d'axes routiers

Lors de la réalisation de la géométrie du modèle de nombreuses simplifications ont été faites. En effet, concernant le réseau routier, il a été précisé précédemment que les routes d'une largeur inférieure à 10 mètres n'étaient pas prises en compte. Ce choix a eu pour conséquence de ne pas représenter plus de la moitié des routes existantes. Ce choix a été fait pour plusieurs raisons :

- Ces routes n'appartenaient pas aux zones proches des rives et donc avaient peu de chance d'appartenir aux zones inondables
- Ces routes ne sont pas des axes préférentiels de l'écoulement (déterminé selon les valeurs du MNT)

Initialement il y avait plus de 12 000 tronçons de routes. Il était évidemment impossible de retracer toutes ces routes à la main dans les délais exigés. Après avoir supprimé plusieurs routes et surtout regroupé plusieurs portions de routes, le nombre de tracés est réduit à 1500.

Maillage des croisements

Afin de limiter le temps consacré à la réalisation des modèles, il a été choisi de ne pas reprendre le maillage au niveau des croisements. Ainsi la jonction entre les routes au niveau des croisements aura une ou deux mailles de taille supérieure par rapport à la taille des mailles des routes, comme on peut le voir sur l'image suivante :

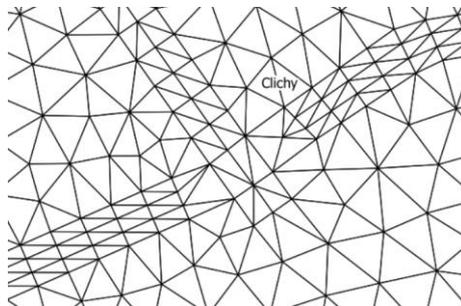


Figure 37 : Maillage au niveau d'un croisement

Ce choix ne concernant qu'une ou deux mailles au niveau des routes au croisement, cela ne devrait pas poser trop de problèmes lors de la modélisation.

B. Coefficient de Strickler

Lors de la réalisation du modèle et la réalisation des simulations, des choix ont été faits. L'objectif de ces choix était de simplifier le modèle tout en gardant une réalité physique suffisante pour représenter avec un maximum de précision les critères que l'on souhaite étudier.

Le choix des coefficients de Strickler a nécessité plusieurs dizaines d'essais. En effet, au début de nombreux essais ont été réalisés avec des Strickler similaires à ceux d'ArteSeine (autour de 40). Néanmoins avec ce type de coefficients, les lignes d'eau étaient beaucoup trop hautes. En général, les lignes d'eau modélisées étaient supérieures à celles d'ArteSeine. L'écart était d'environ 50 cm entre les deux lignes d'eau à l'amont du modèle aval.

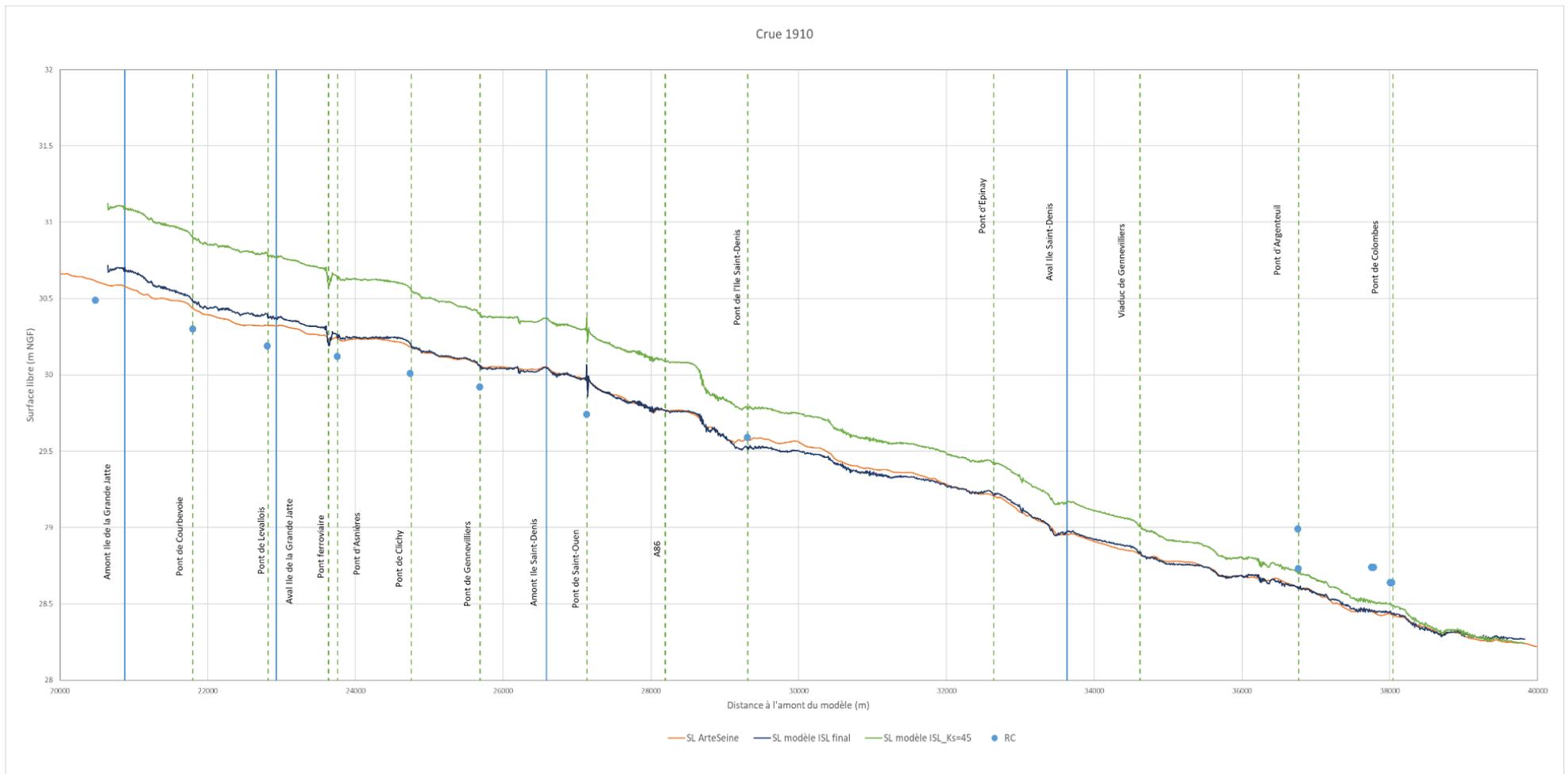


Figure 38 : Comparaison des niveaux d'eau, crue de 1910

Cet écart se réduit bien évidemment jusqu'à être nul en aval (car ici le niveau d'eau était imposé en aval). Ici, la pente de notre ligne d'eau était trop importante. Il faut donc diminuer les pertes de charge pour pouvoir faire baisser la ligne d'eau dans sa globalité.

Après avoir vérifié l'emprise du lit mineur et le MNT, les résultats étaient toujours trop importants. Ensuite, les largeurs des piles de ponts ont été vérifiées. En effet, même si leur emprise en comparaison à la taille du modèle est très faible, la présence de ces piles de pont est capitale. En effet, augmenter la largeur d'une pile de pont a pour conséquences de réduire la section du lit mineur et surtout d'augmenter les pertes de charge localement. Ainsi, la diminution de la largeur de certaines piles de pont a permis de baisser légèrement la ligne d'eau. Néanmoins nous parlons ici uniquement de pertes de charge singulières. Pour modifier la pente de la ligne d'eau, il faut diminuer les pertes de charge globales.

Pour diminuer la pente le seul coefficient que l'on peut faire varier est le coefficient de Strickler. Ainsi, augmenter le coefficient de Strickler indique une diminution de la rugosité et donc une diminution des pertes de charge globales. C'est dans ce but que nous avons fait le choix d'augmenter le coefficient de Strickler sur l'ensemble du modèle. Les coefficients choisis (55, 65 et 75 hors ponts) sont il est vrai très importants. Sur la Seine, les valeurs classiques se situent plutôt entre 40 et 50 ce qui correspond aux valeurs à l'ordre de grandeur des valeurs choisies par ArteSeine. Néanmoins notre modèle est calé et valide plusieurs crues historiques, donc il est robuste malgré les valeurs de Strickler trop importantes.

C. Murettes : les limites de TELEMAC-2D

Lors des modélisations avec murettes, la différence de MNT entre le lit mineur et les murettes était grande. Cette pente était trop importante pour le logiciel. On a donc obtenu des résultats absurdes. Le logiciel faisait augmenter la hauteur d'eau jusqu'à passer au-dessus des murettes même si le niveau d'eau est en réalité bien inférieur. Pour empêcher cela, il a fallu augmenter progressivement la hauteur des digues. Pour rappel, les digues ont été modélisées avec une largeur de 6m, soit avec 3 points espacés de 3m. Ainsi le point le plus proche du lit mineur a été rabaissé de 10cm, le second de 5 cm et le dernier point garde le niveau initial :

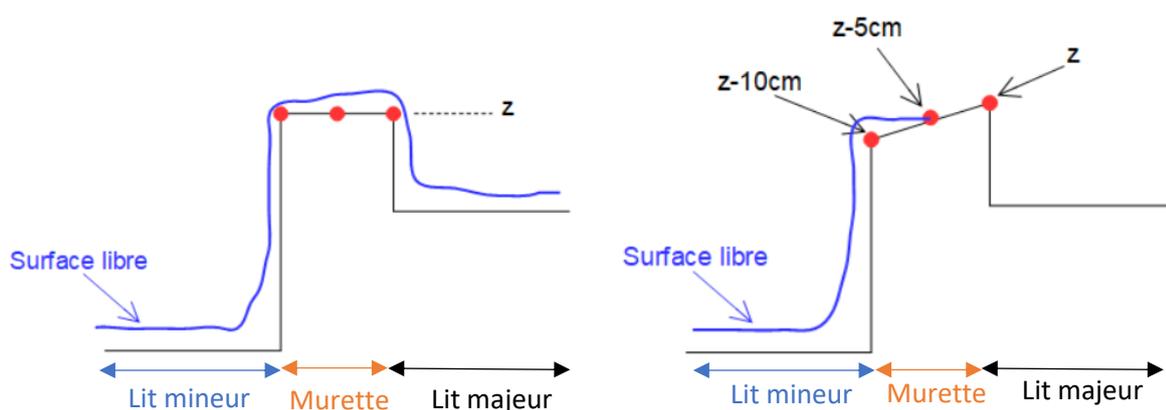


Figure 39 : Schéma des résultats TELEMAC-2D selon la configuration des murettes

Cette petite modification permet d'éviter tout beugue du logiciel. Ainsi, une des limites du logiciel TELEMAC-2D est la modélisation dans les zones très pentues.

V. Résultats et discussions

A. Définition

Afin d'étudier les risques d'inondation le long de nos systèmes d'endiguement, plusieurs variables caractéristiques des venues d'eau sont calculées et cartographiées en chaque point du maillage :

- La hauteur d'eau maximale : les hauteurs sont représentées uniquement lorsqu'elles sont supérieures à 5 cm.
- La vitesse maximale,
- Le temps de propagation : correspond ici au temps nécessaire pour que l'eau atteigne la zone étudiée
- La vitesse de montée des eaux : correspond à la vitesse moyenne pour atteindre la hauteur maximum. Cette vitesse n'étant pas calculée directement par TELEMAC-2D, la formule suivante est utilisée :

$$v_{montée\ des\ eaux} = \frac{h_{max} - h(t = 0)}{TMXZ - T(ouverture)}$$

Où T(ouverture)= temps à partir duquel la brèche est ouverte (en s).

Or, pour la plupart des simulations, il a été décidé de réinitialiser le modèle à l'instant précédant l'ouverture. Ainsi, on aura T(ouverture)= 0 s.

- La dangerosité : selon l'arrêté du 7 avril 2017, les venues d'eaux sont divisées en deux catégories : les zones dangereuses pour lesquelles la hauteur d'eau maximale est supérieure à 1 m ou la vitesse maximale est supérieure à 0,5 m/s et les zones modérément dangereuses.

Selon l'arrêté du 7 avril 2017, les cartes représentant les venues d'eaux dangereuses ou modérément dangereuses doivent être incluses dans le dossier de demande d'autorisation. Les autres critères sont seulement un complément demandé par la MGP à titre informatif. Ainsi, nous étudierons les résultats de dangerosités. Nous étudierons également les temps de propagation car c'est ce qui définit la capacité d'évacuation d'une population.

B. Zone protégée

1. SEI_15

Pour rappel, la zone protégée est la zone soustraite aux inondations causée par une crue type 1924 en supposant un fonctionnement et une résistance optimale du système d'endiguement : bonne obturation des murettes, absence de venues d'eau via les réseaux traversants, et tenue des ouvrages.

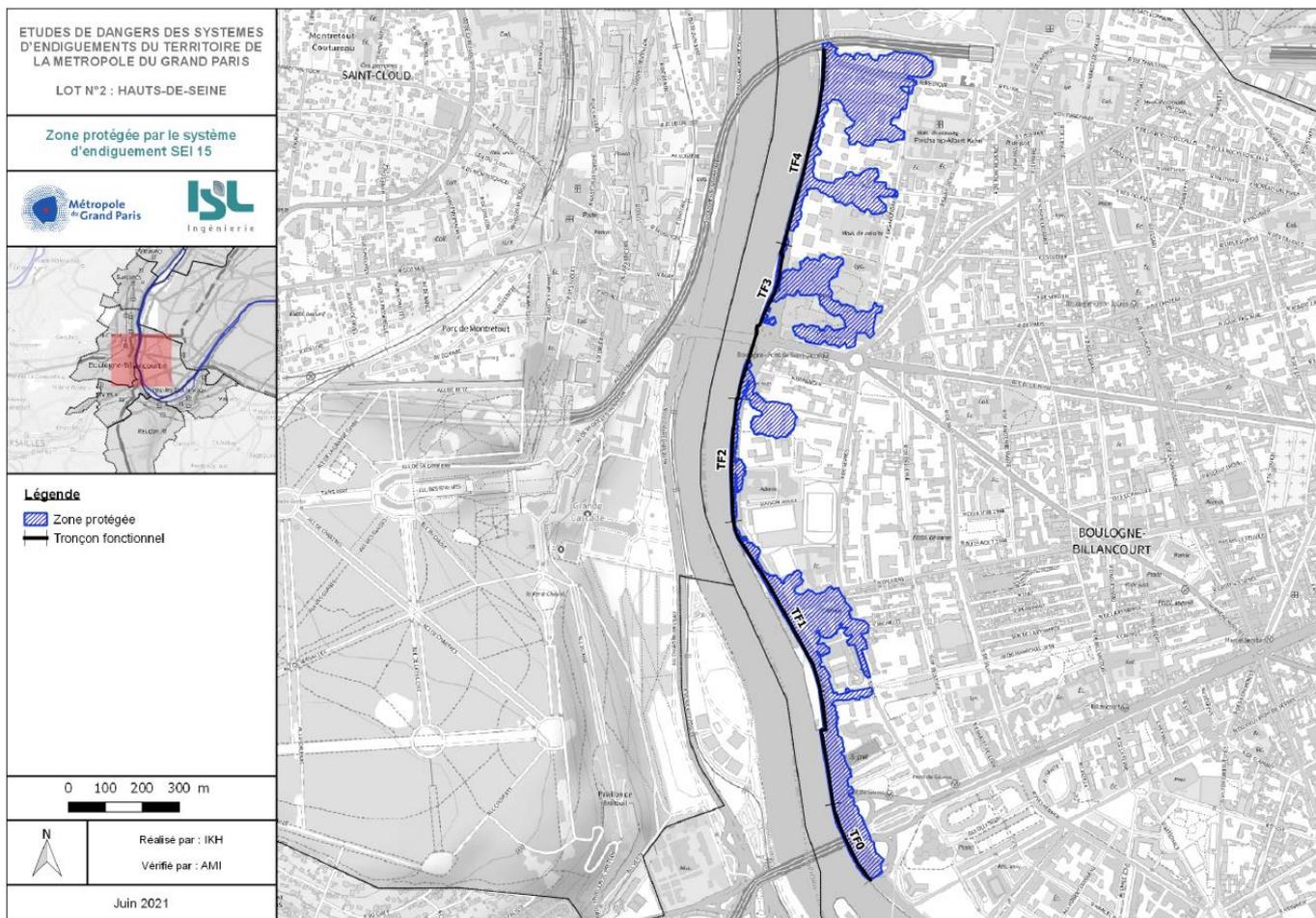


Figure 40 : Zone protégée par le SEI_15

Ainsi, le système d'endiguement assure la protection de 4850 personnes au maximum dans cette zone protégée. Le système est donc bien de classe B (voir I.B.). Parmi ces personnes, on compte 3050 personnes qui travaillent dans cette zone et 1500 qui y vivent. Enfin, les ERP (établissement recevant du public), accueillent 300 personnes.

2. SEI_17

Pour rappel, la zone protégée est la zone soustraite aux inondations causée par une crue type 1924 en supposant un fonctionnement et une résistance optimale du système d'endiguement : bonne obturation des murettes, absence de venues d'eau via les réseaux traversants, et tenue des ouvrages.

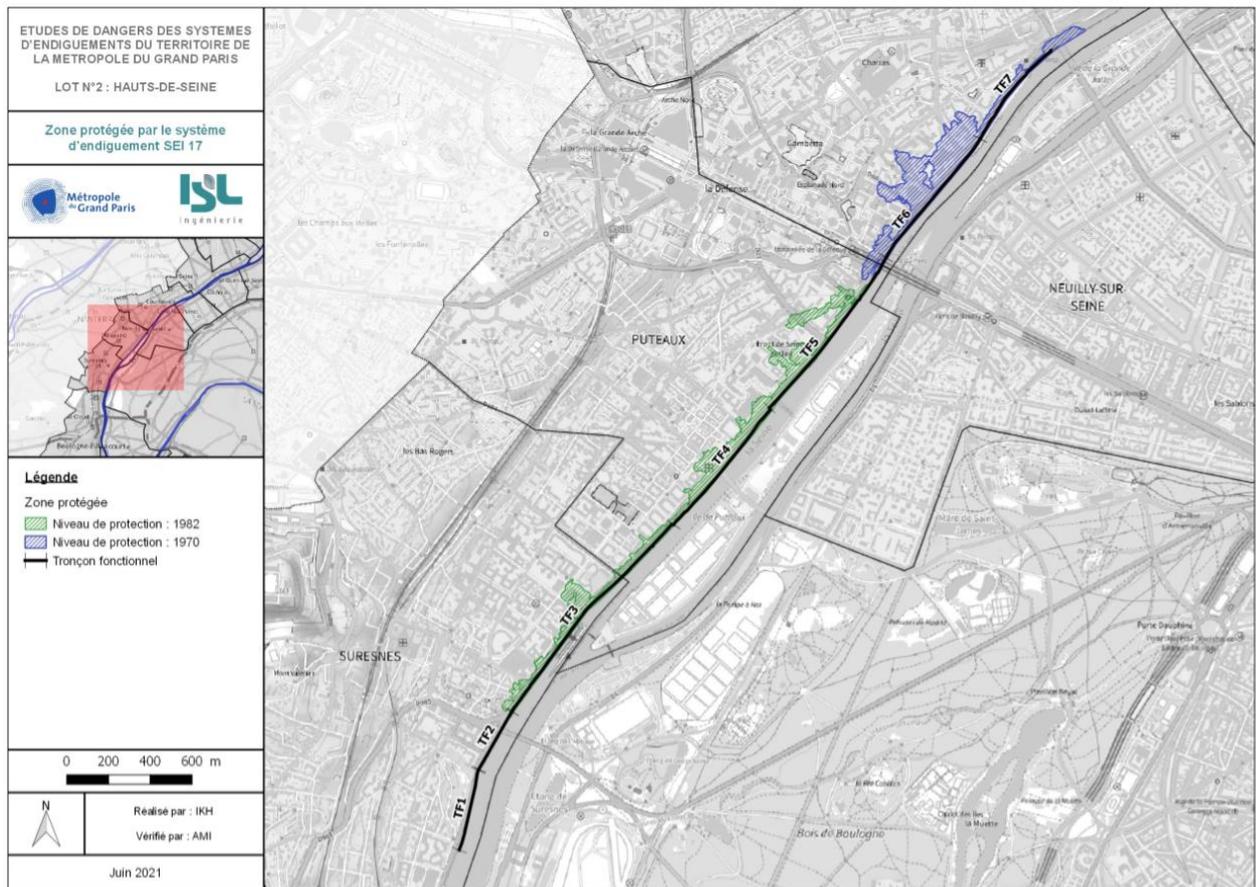


Figure 41 : Zone protégée par le SEI_17

Ainsi, le système d'endiguement assure la protection de 16100 personnes au maximum dans cette zone protégée. Le système est donc bien de classe B (voir I.B.). Parmi ces personnes, on compte 9000 personnes qui travaillent dans cette zone et 2500 qui y vivent. Enfin, les ERP (établissement recevant du public), accueillent 4600 personnes.

Pour les tronçons TF1 et TF2, on peut remarquer qu'il n'y a pas de zone protégée. En effet ces deux tronçons, se situant juste en amont du barrage de Suresnes, ne participent pas à la protection du lit majeur. En effet, la cote de la murette est bien plus basse dans cette zone qu'en aval (voir profil du système II.C.2.), ce qui entraîne une submersion pour un débit bien inférieur au débit de mise au charge du lit mineur. Quels que soient les résultats (avec ou sans murettes), pour la crue de 1924, les murettes sont submergées.

3. SEI_19

Pour rappel, la zone protégée est la zone soustraite aux inondations causée par une crue type 1924 en supposant un fonctionnement et une résistance optimale du système d'endiguement : bonne obturation des murettes, absence de venues d'eau via les réseaux traversants, et tenue des ouvrages.

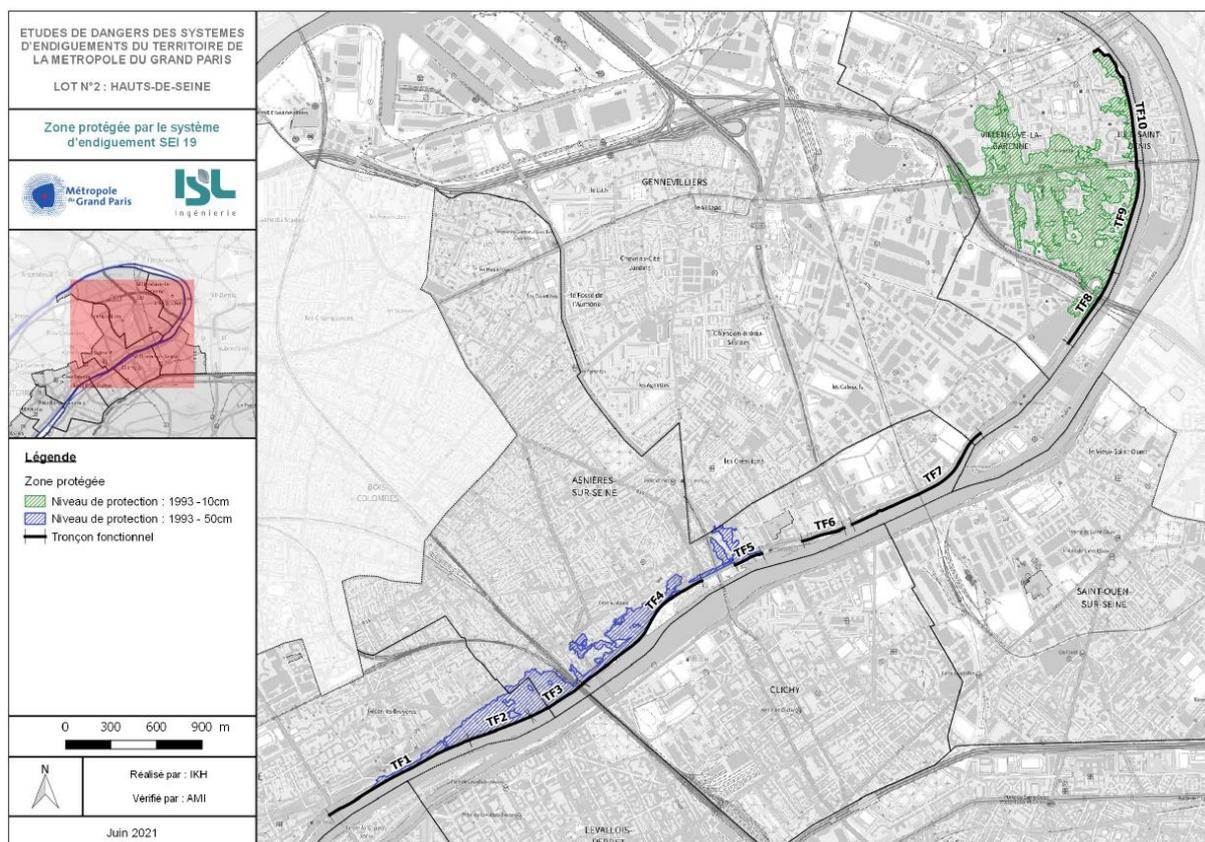


Figure 42 : Zone protégée par le SEI_19

Ainsi, le système d'endiguement assure la protection de 33000 personnes au maximum dans cette zone protégée. Le système est donc bien de classe A (voir I.B.). Parmi ces personnes, on compte 5500 personnes qui travaillent dans cette zone et 12500 qui y vivent. Enfin, les ERP (établissement recevant du public), accueillent 15000 personnes.

Au niveau des tronçons 6 et 7, aucune zone de protection n'a pu être définie. En effet, quelle que soit la crue débordante modélisée, le morcellement du système étant beaucoup trop important dans cette zone, l'eau contourne facilement les murettes et vient inonder les rives pour des crues relativement faibles. Ce phénomène est amplifié avec la présence de points bas au niveau du pont de Gennevilliers situé entre les tronçons fonctionnels 7 et 8.

C. Dangers des différents scénarii de défaillance

Pour rappel, les zones dangereuses correspondent aux zones où la hauteur d'eau maximale est supérieure à 1m ou où la vitesse maximale est supérieure à 0,5 m/s.

1. Scénarii de type 2 : ouvertures non obstruées

SEI_15 :

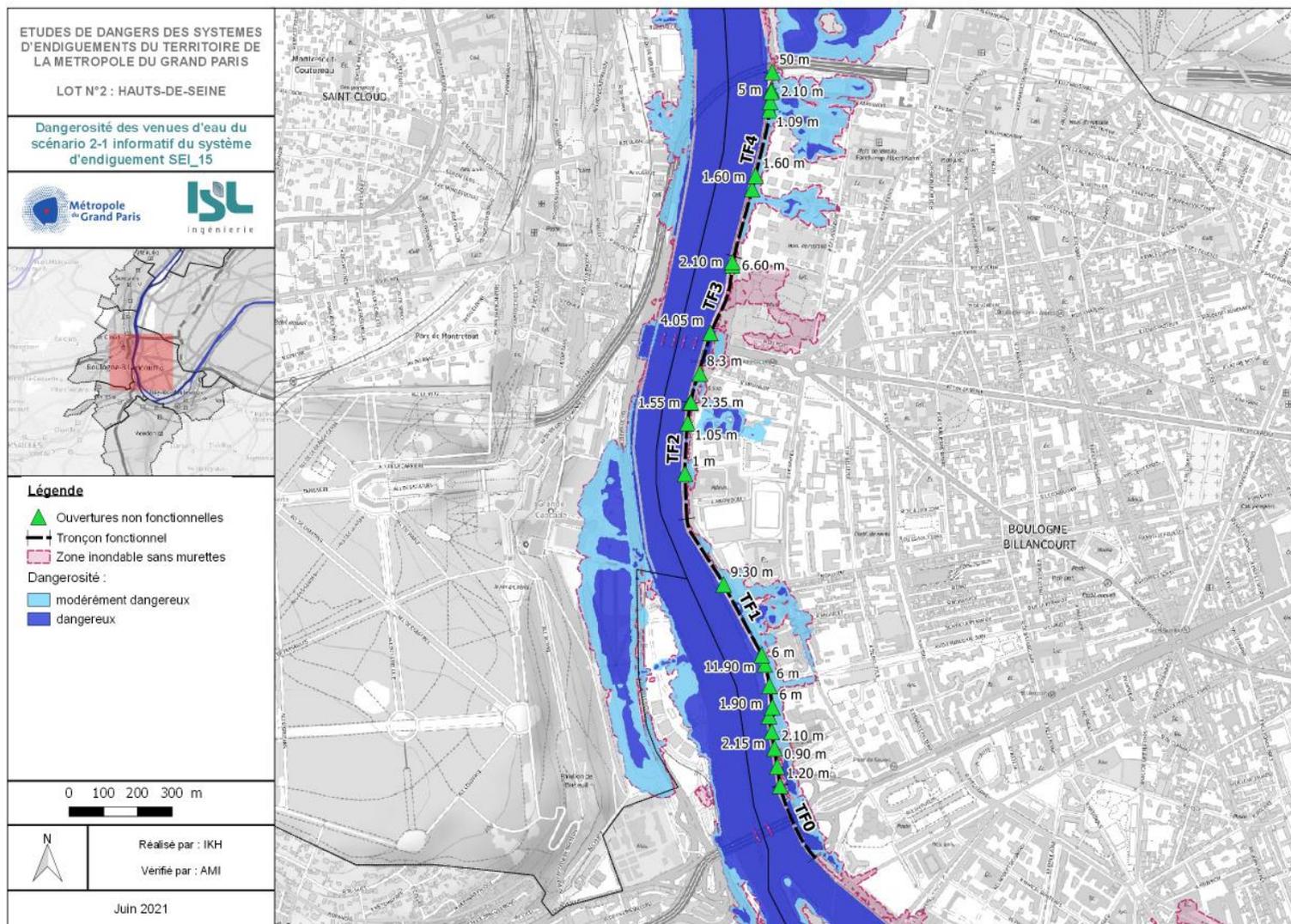


Figure 43 : Dangerosité des venues d'eau pour le scénario 2-1, SEI_15

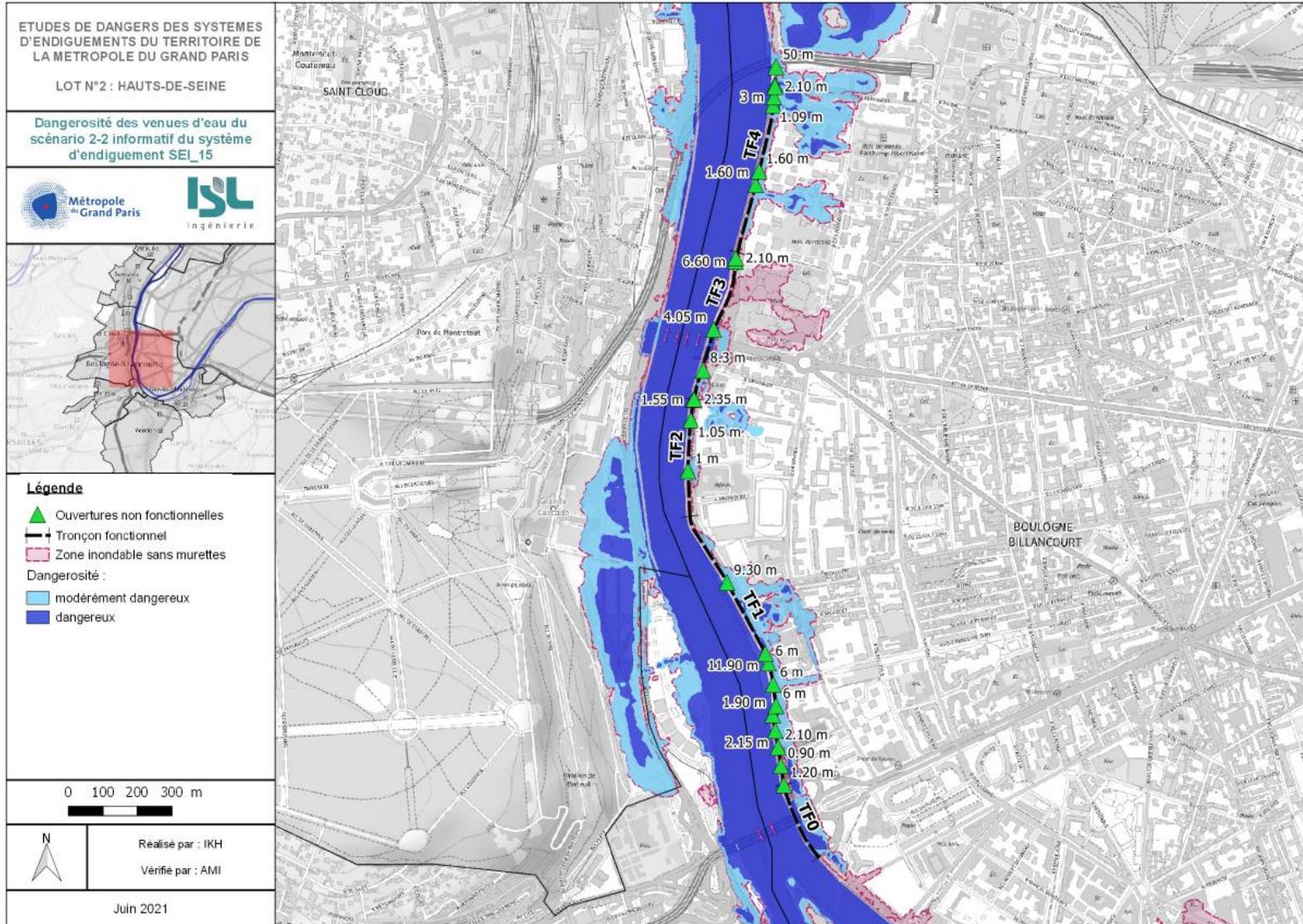


Figure 44 : Dangerosité des venues d'eau pour le scénario 2-2, SEI_15

SEI_17 :

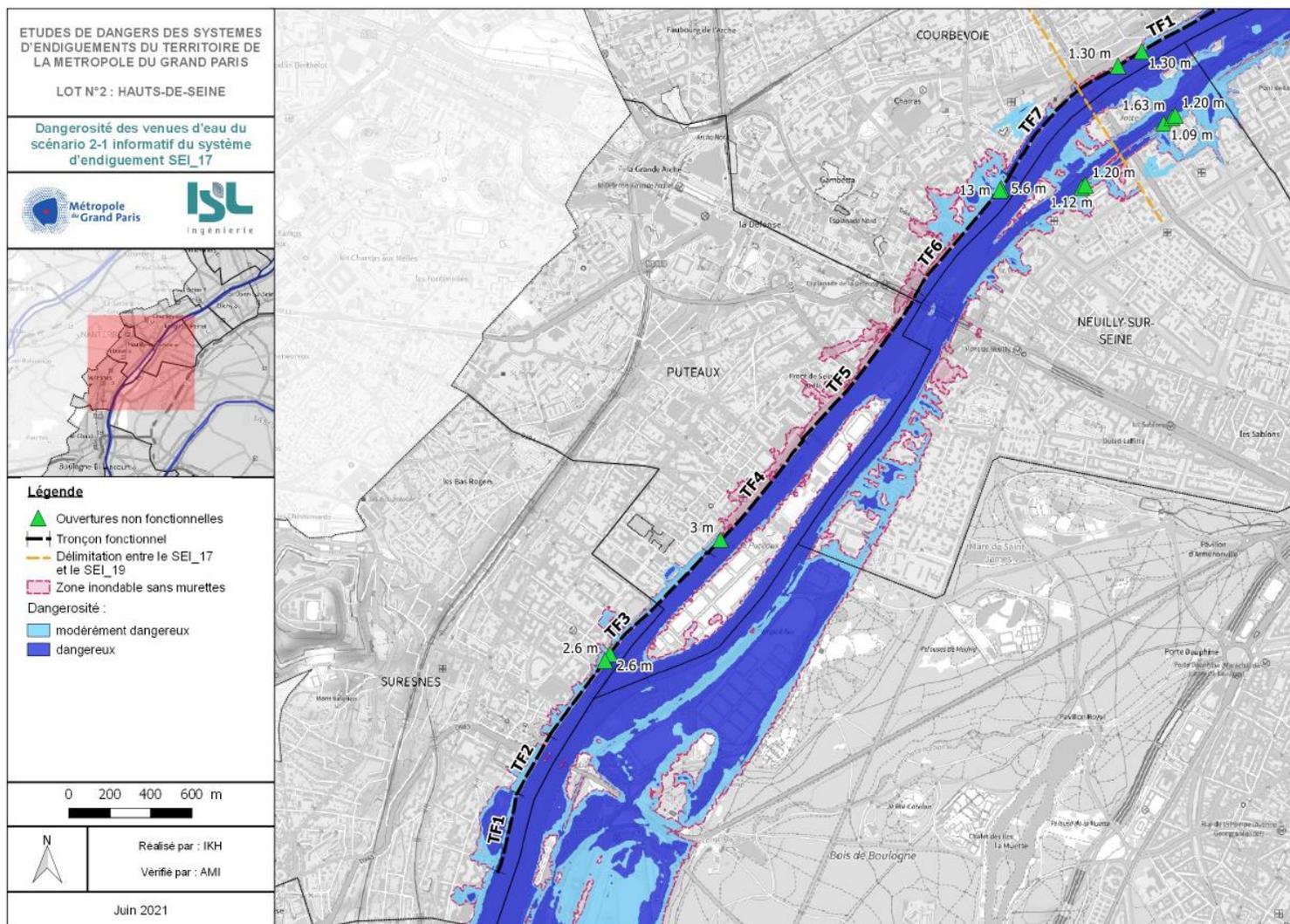
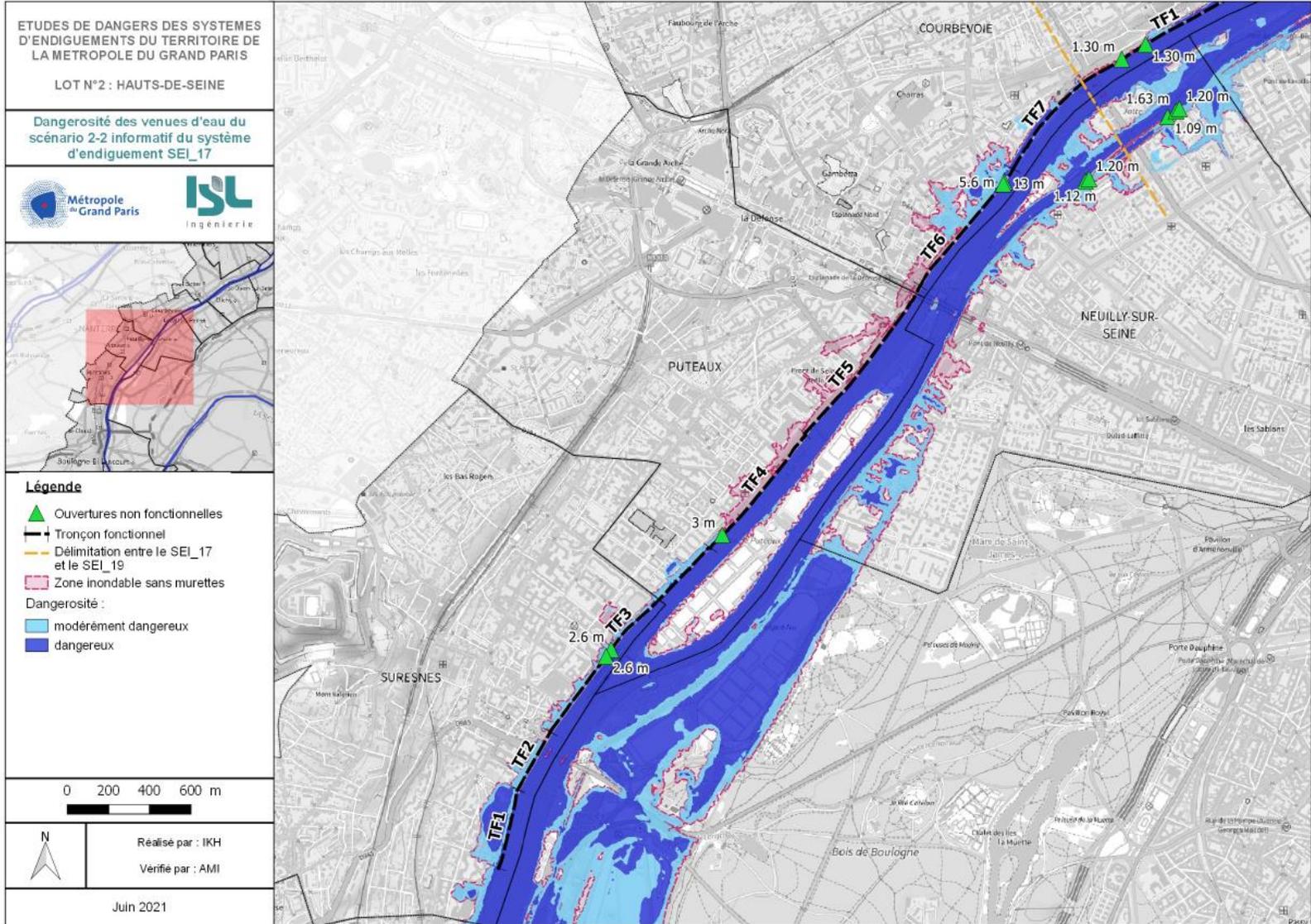
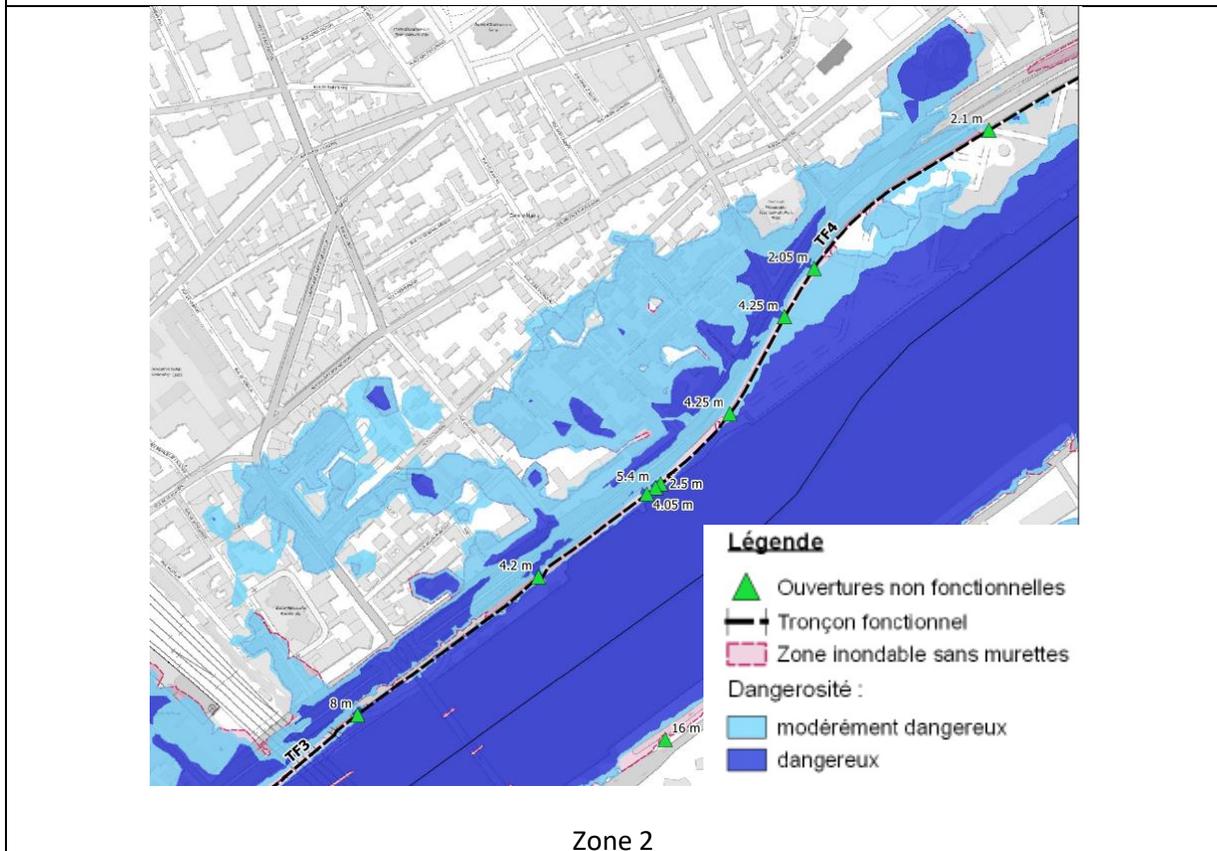
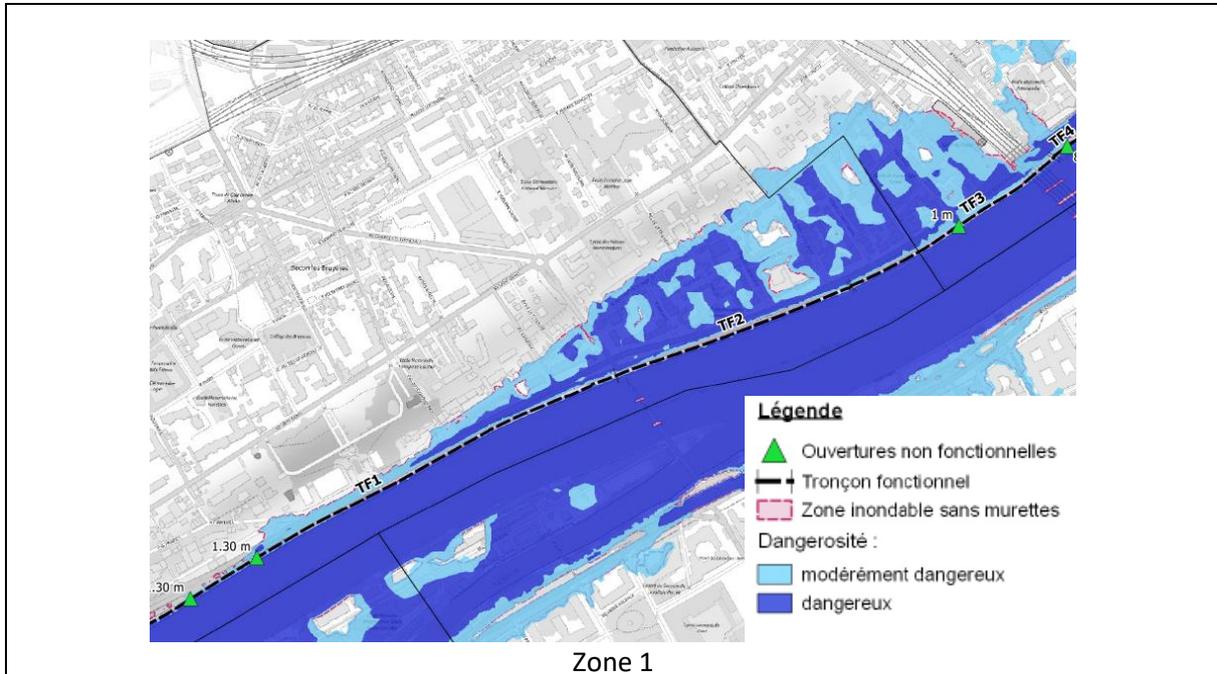


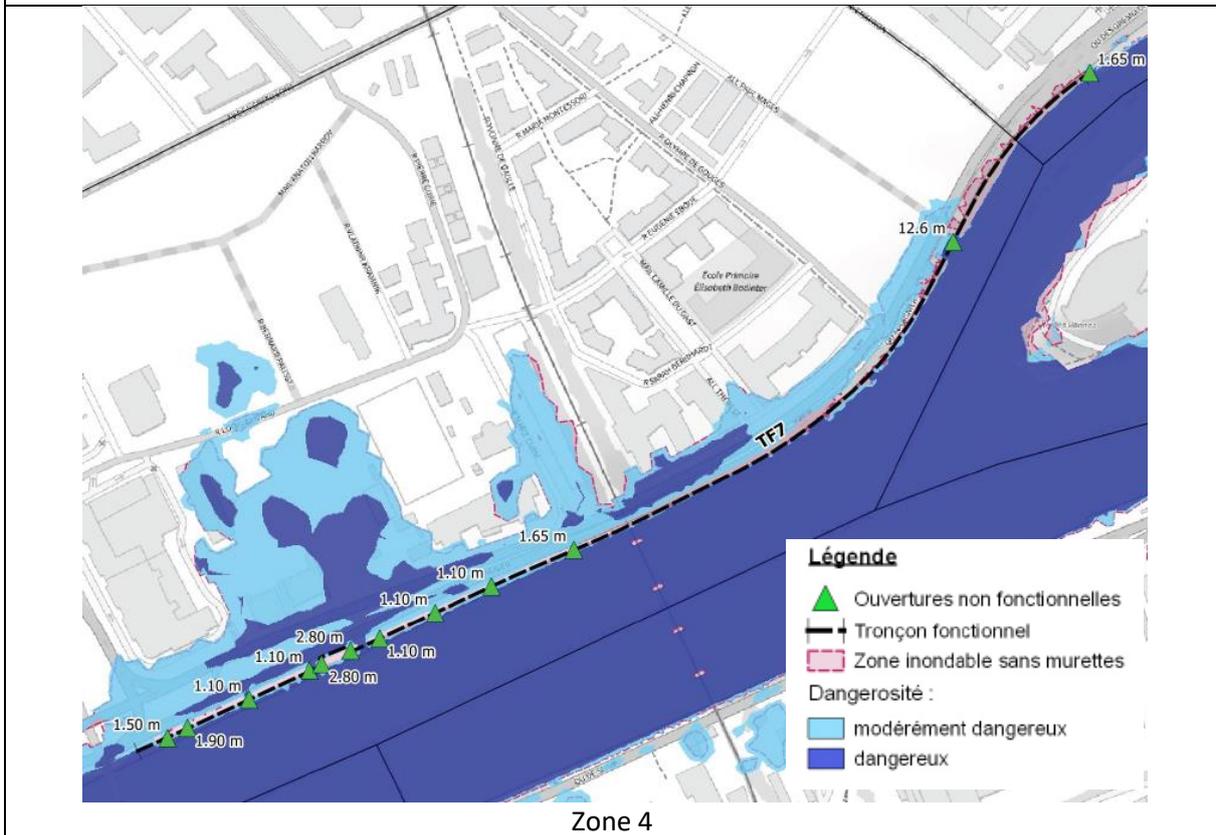
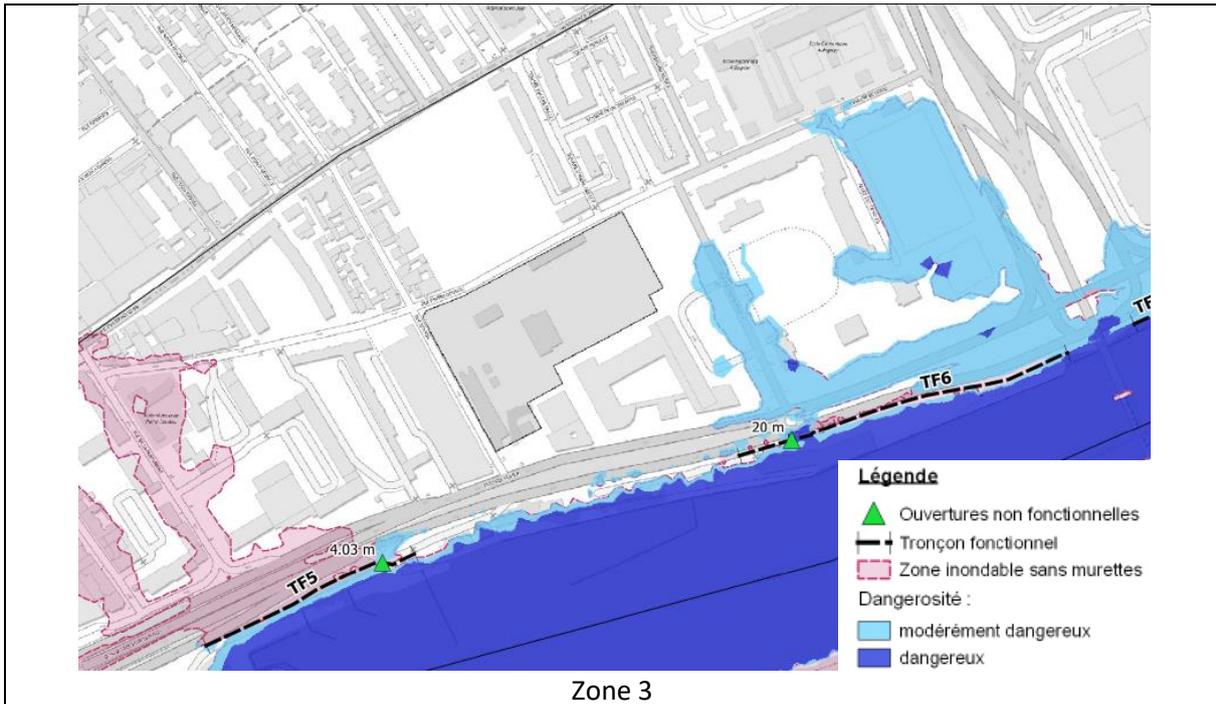
Figure 45 : Dangerosité des venues d'eau pour le scénario 2-1, SEI_17



SEI_19 :

En raison du nombre d'ouvertures important et du linéaire couvert par le SEI_19, les résultats ont été découpés en 5 zones.





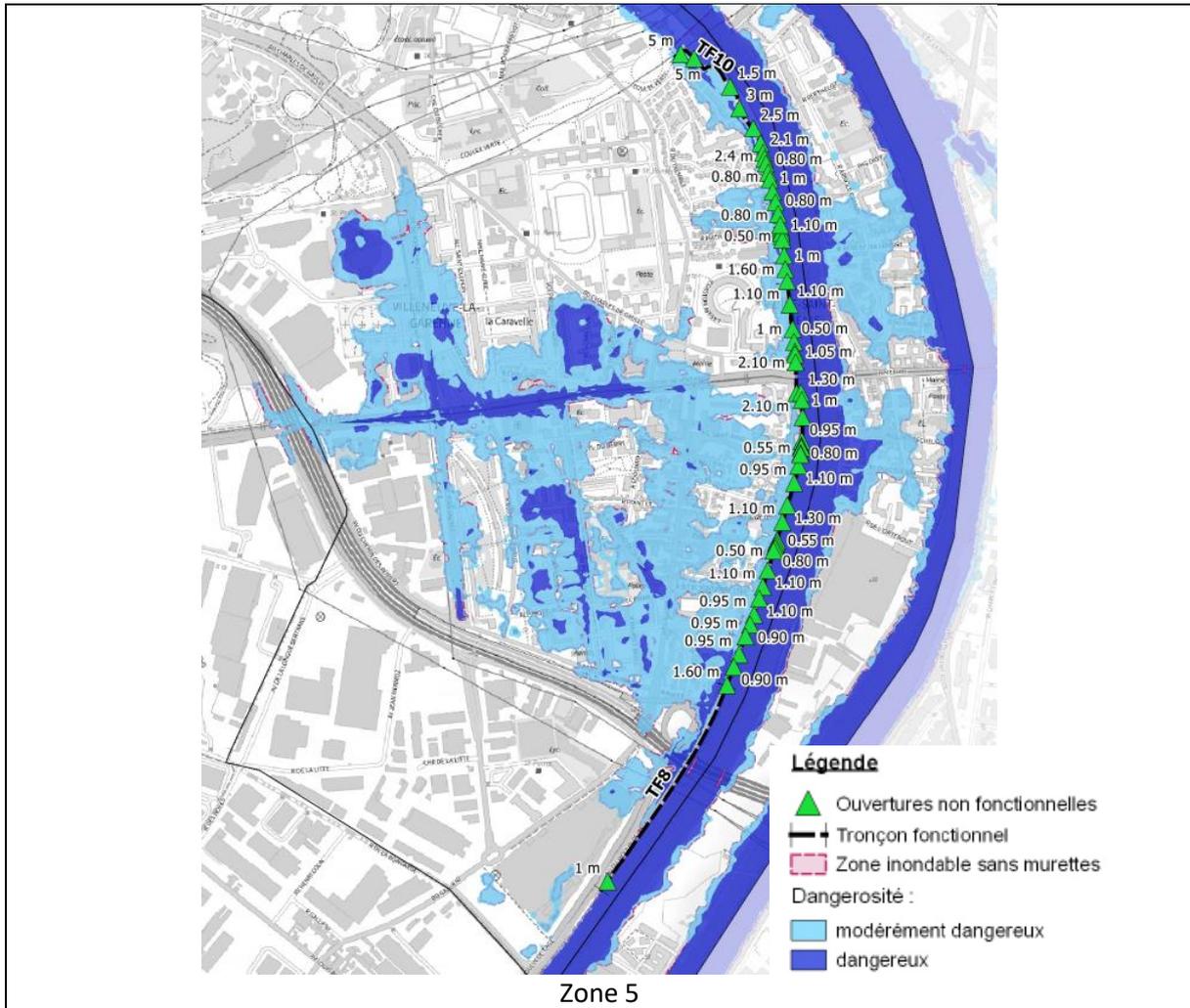
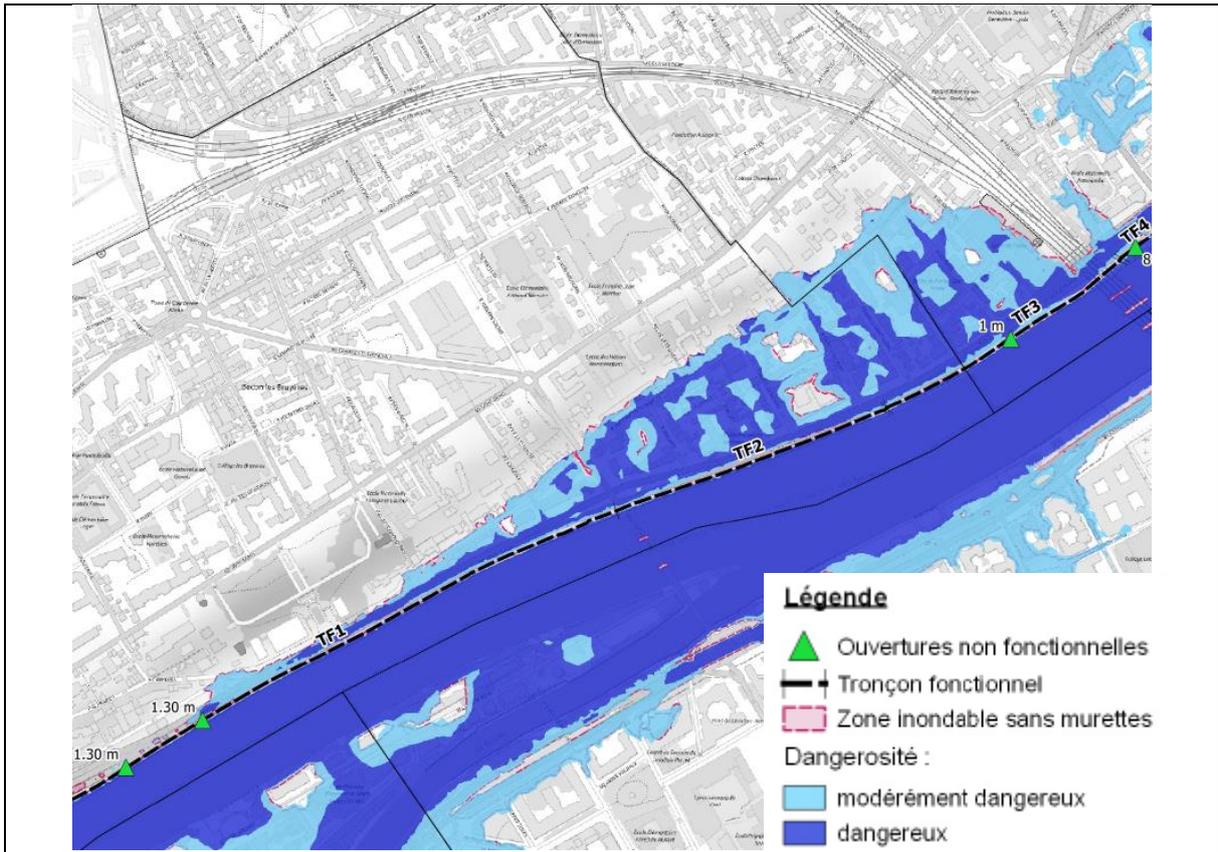
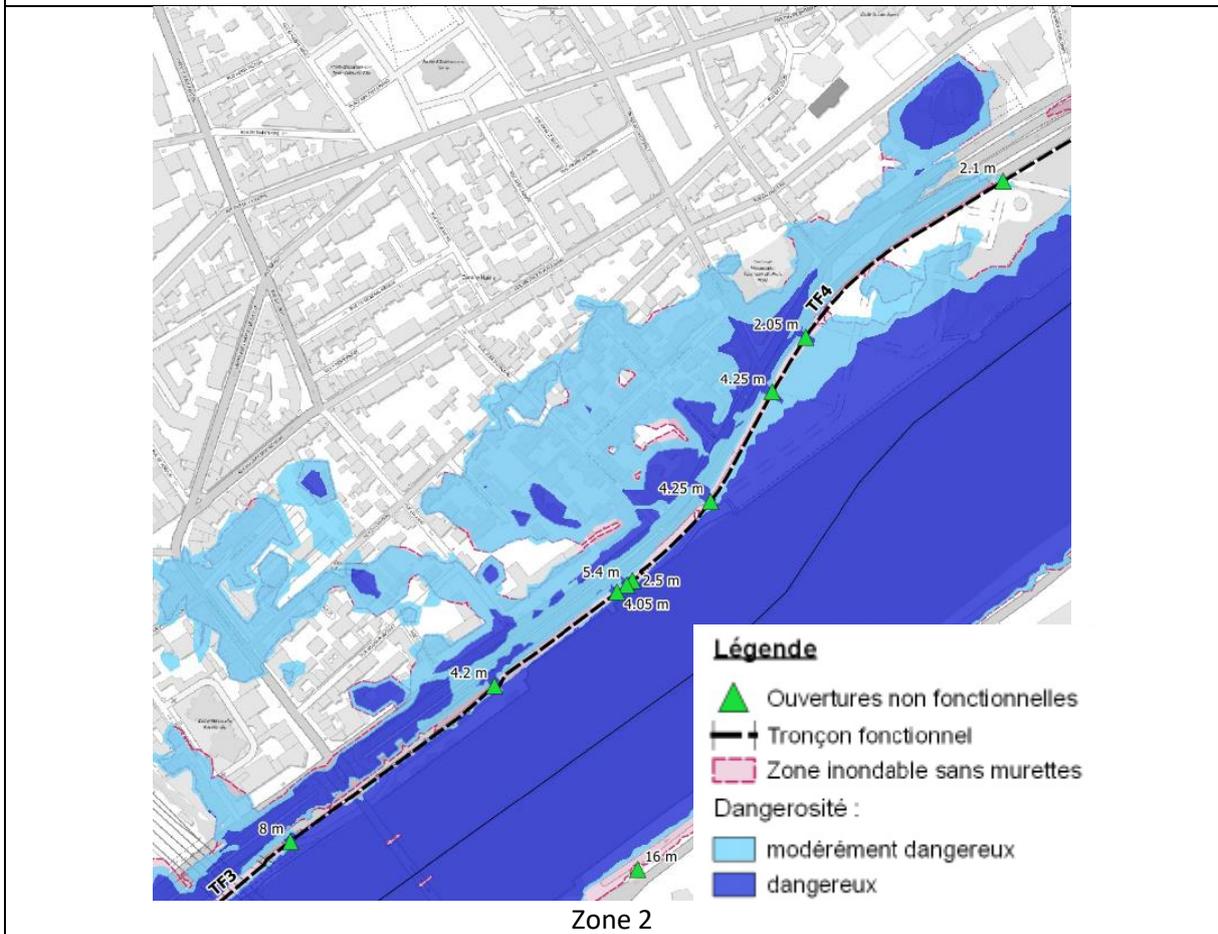


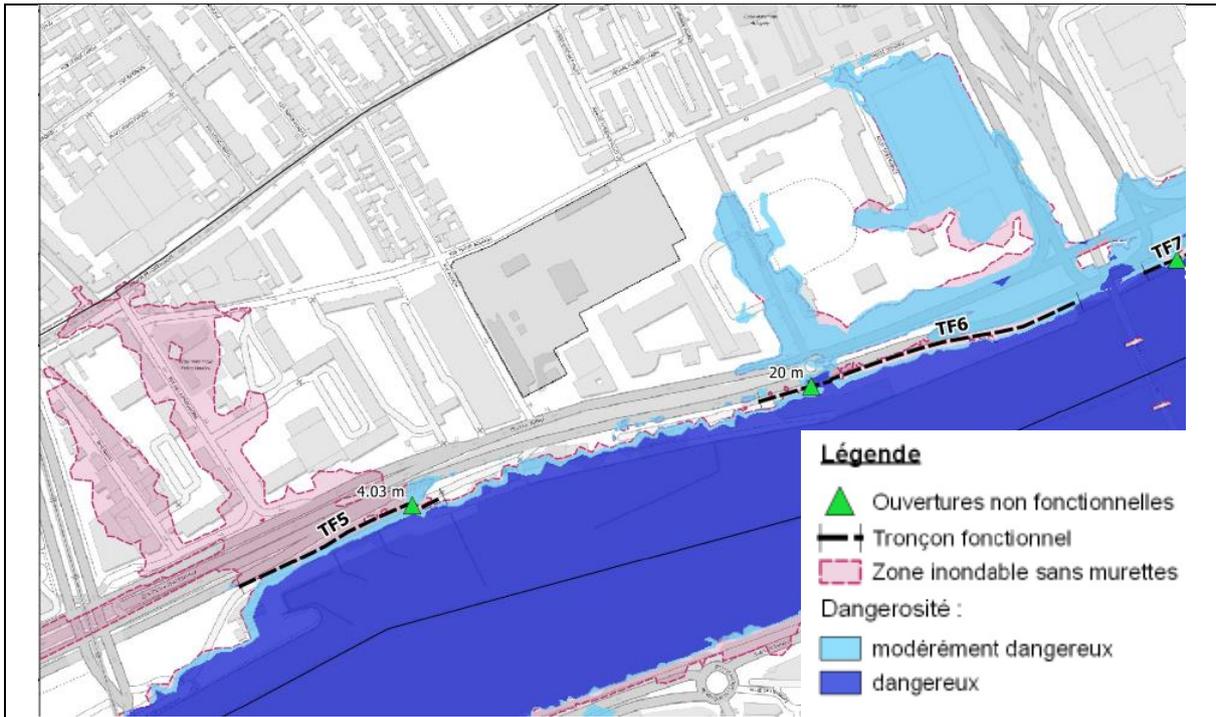
Figure 47 : Dangerosité des venues d'eau pour le scénario 2-1, SEI_19



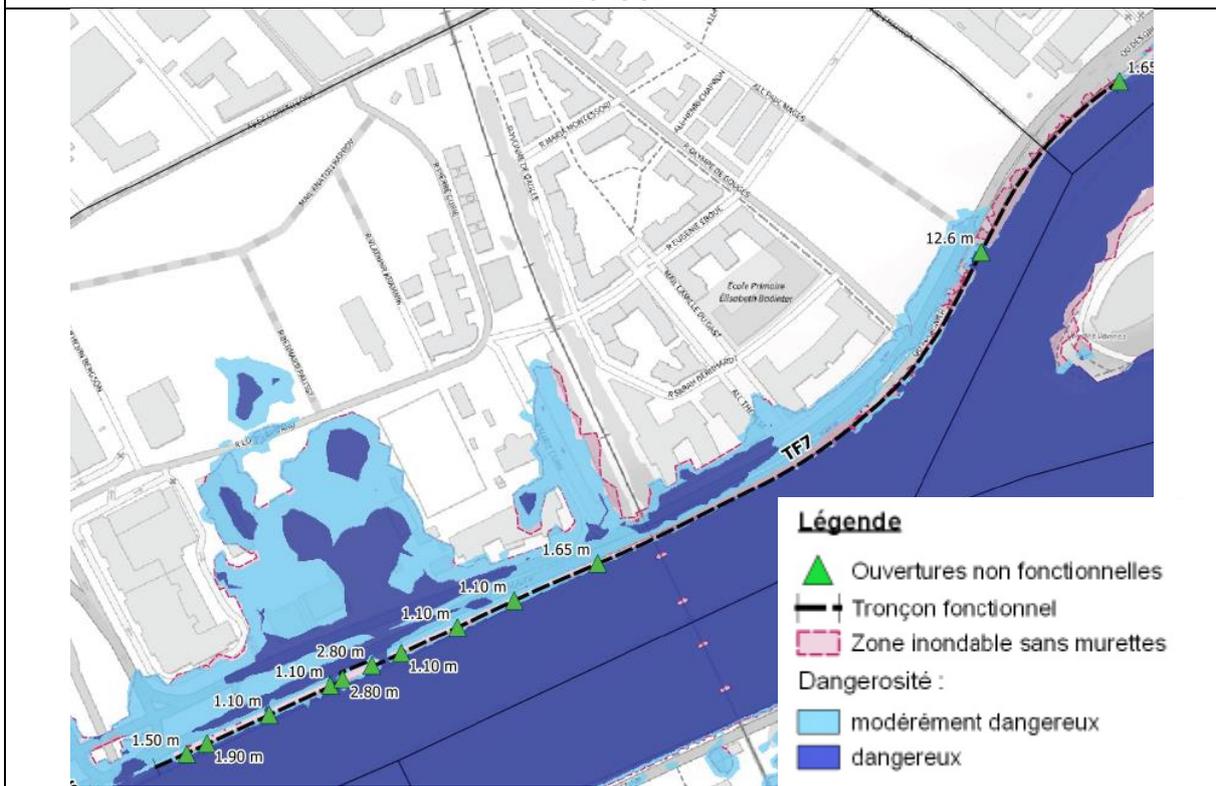
Zone 1



Zone 2



Zone 3



Zone 4

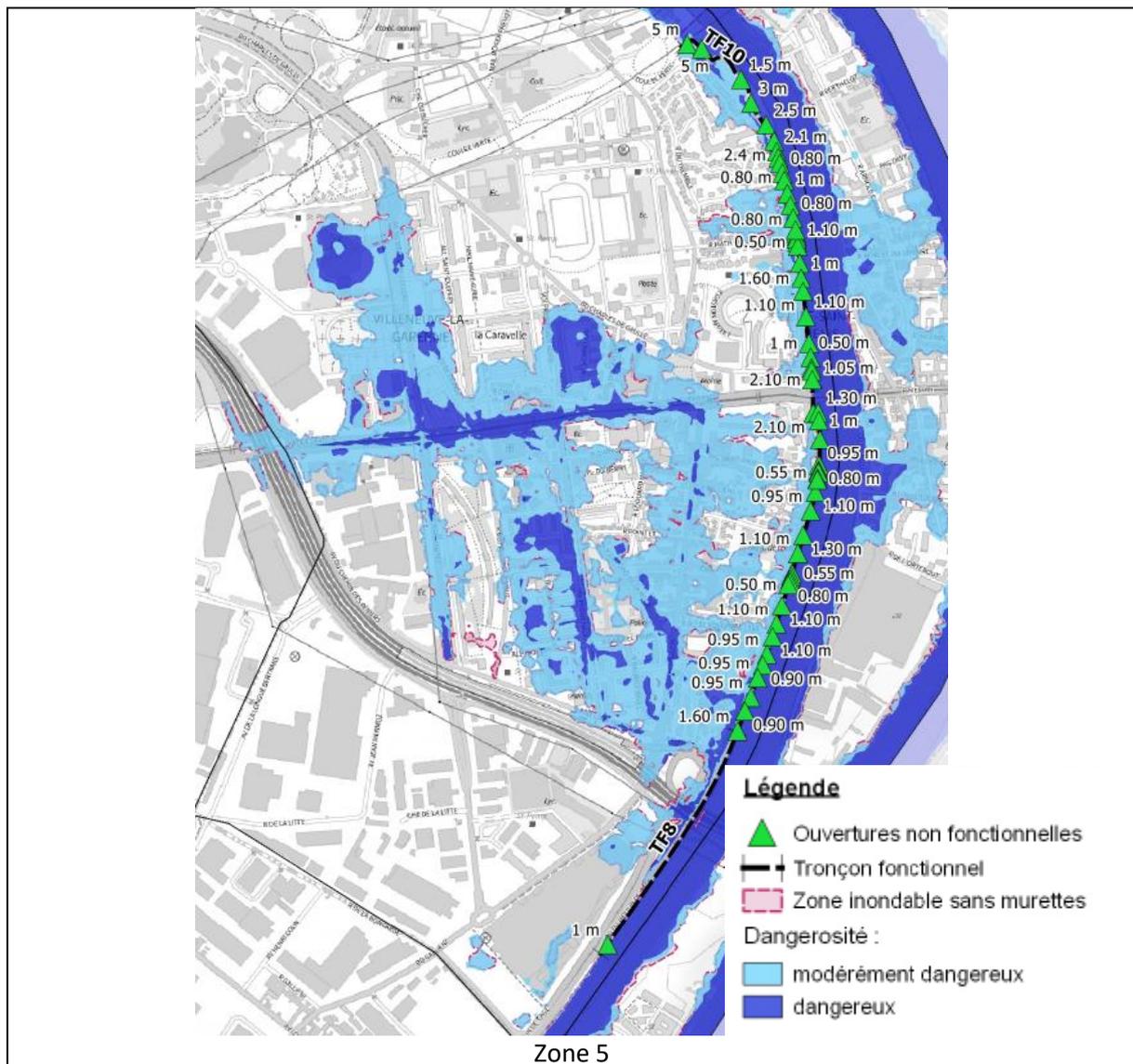


Figure 48 : Dangerosité des venues d'eau pour le scénario 2-2, SEI_19

Un premier résultat, bien qu'évident, est que l'augmentation du nombre d'ouverture augmente les volumes d'eau débordants en lit majeur et donc augmente la surface de la zone inondée. Lorsque l'on compare les résultats de dangerosité, on remarque que quel que soit le moment d'ouverture, les résultats sont quasiment identiques. On en déduit que ces différences de temporalité de défaillance des ouvertures ne semblent pas affecter les résultats. Ce n'est donc pas la durée de l'évènement, mais plutôt son intensité qui provoque ces inondations.

2. Comparaison des scénarii 2-1 et 2-2

Même si les résultats de dangerosité sont identiques, la grande différence entre les deux simulations réside dans le temps de propagation et la vitesse de montée des eaux. En effet, les ouvertures étant déjà présentes pour des débits inférieurs pour le scénario 2-1, l'eau va arriver progressivement dans les zones inondées. L'inondation a alors une cinétique identique à celle de la crue, il faudra plusieurs jours pour que l'eau monte. Ainsi l'échelle du temps de propagation n'est pas la même entre les deux scénarii :

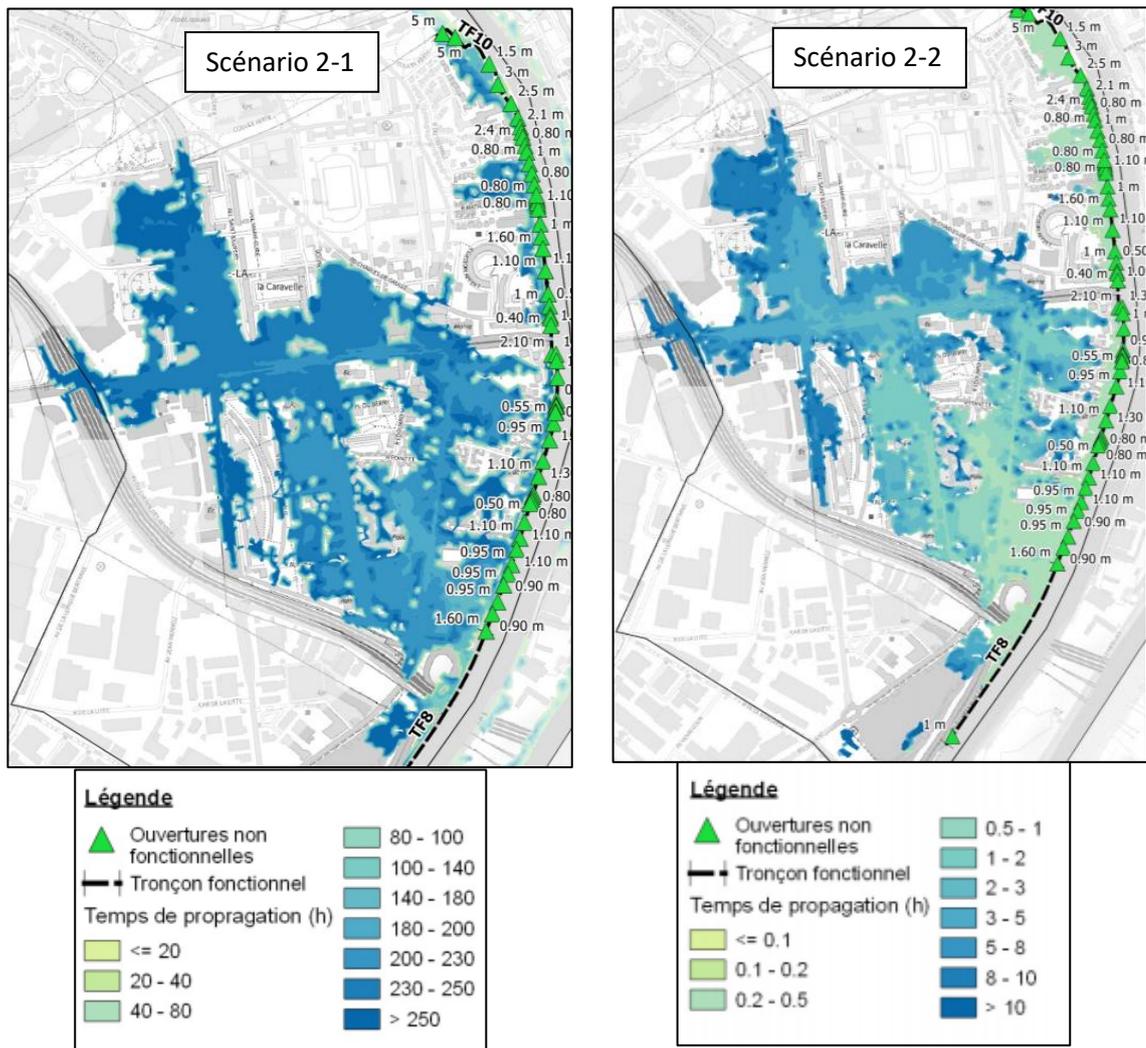


Figure 49 : Comparaison des temps de propagation (h) pour les scénarii 2-1 et 2-2 au niveau de la zone 5 du SEI_19

De même, pour les scénarii 2-2, l'ouverture brutale au débit maximal entraîne une inondation quasi instantanée avec des vitesses beaucoup plus importantes :

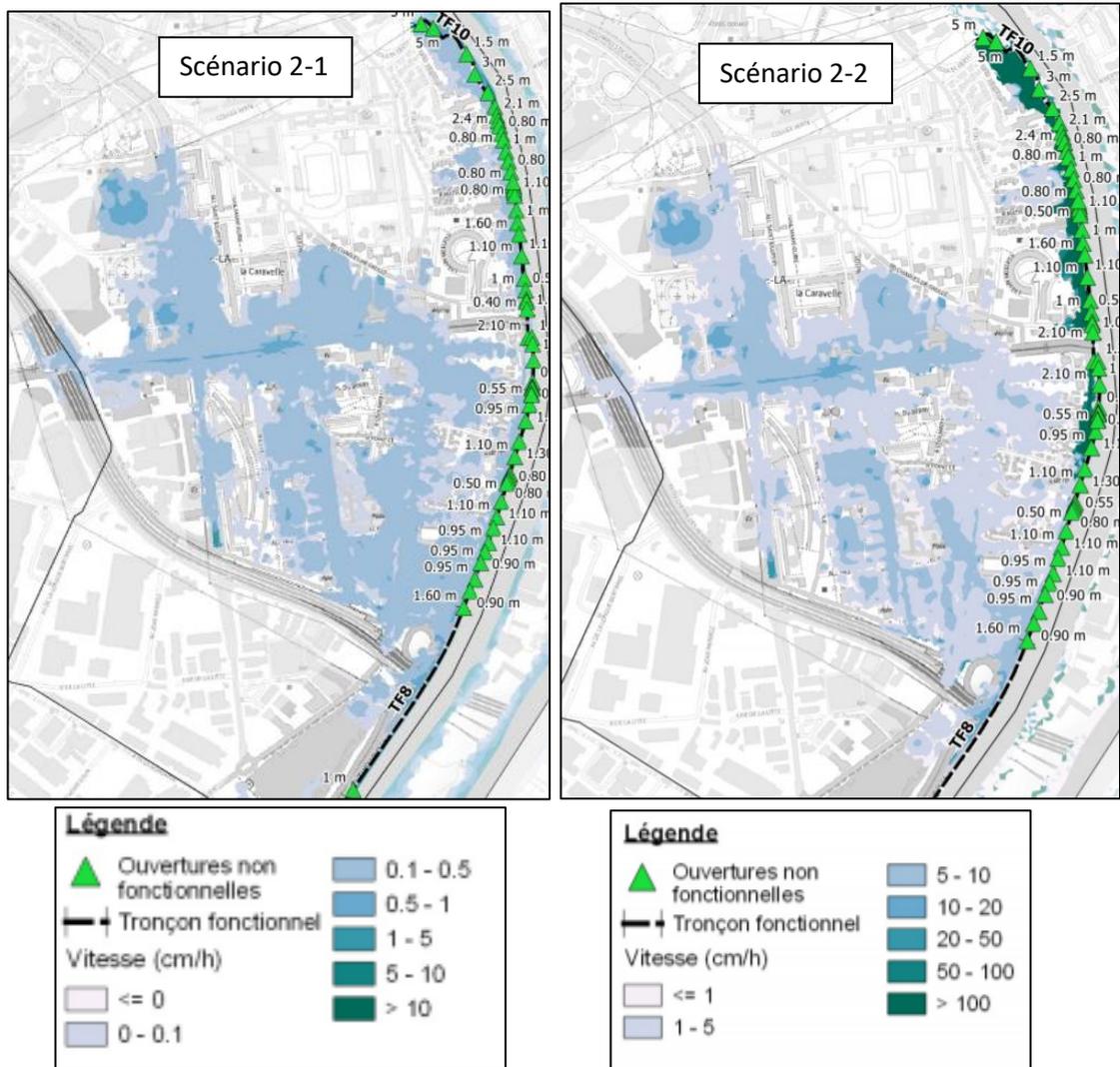


Figure 50 : Comparaison des vitesses de montée des eaux (h) pour les scénarii 2-1 et 2-2 au niveau de la zone 5 du SEI_19

On peut voir dans l'exemple de l'aval (zone 5) du SEI_19 ci-dessus, que l'on a une vitesse de montée des eaux environ 10 fois plus rapide et un temps de propagation environ 10 fois plus faible. Ainsi, on aura une propagation plus lente si les ouvertures ne cèdent pas lors de la crue mais sont ouvertes dès le début de l'événement. Or, un temps de propagation réduit induit une diminution du temps disponible au gestionnaire pour agir. Il faut donc que celui-ci veille au bon fonctionnement des protections amovibles des ouvertures avant de les utiliser afin d'éviter une telle catastrophe en pleine crue.

3. Scénarii de type 3 : brèches de 100m

SEI_15 :

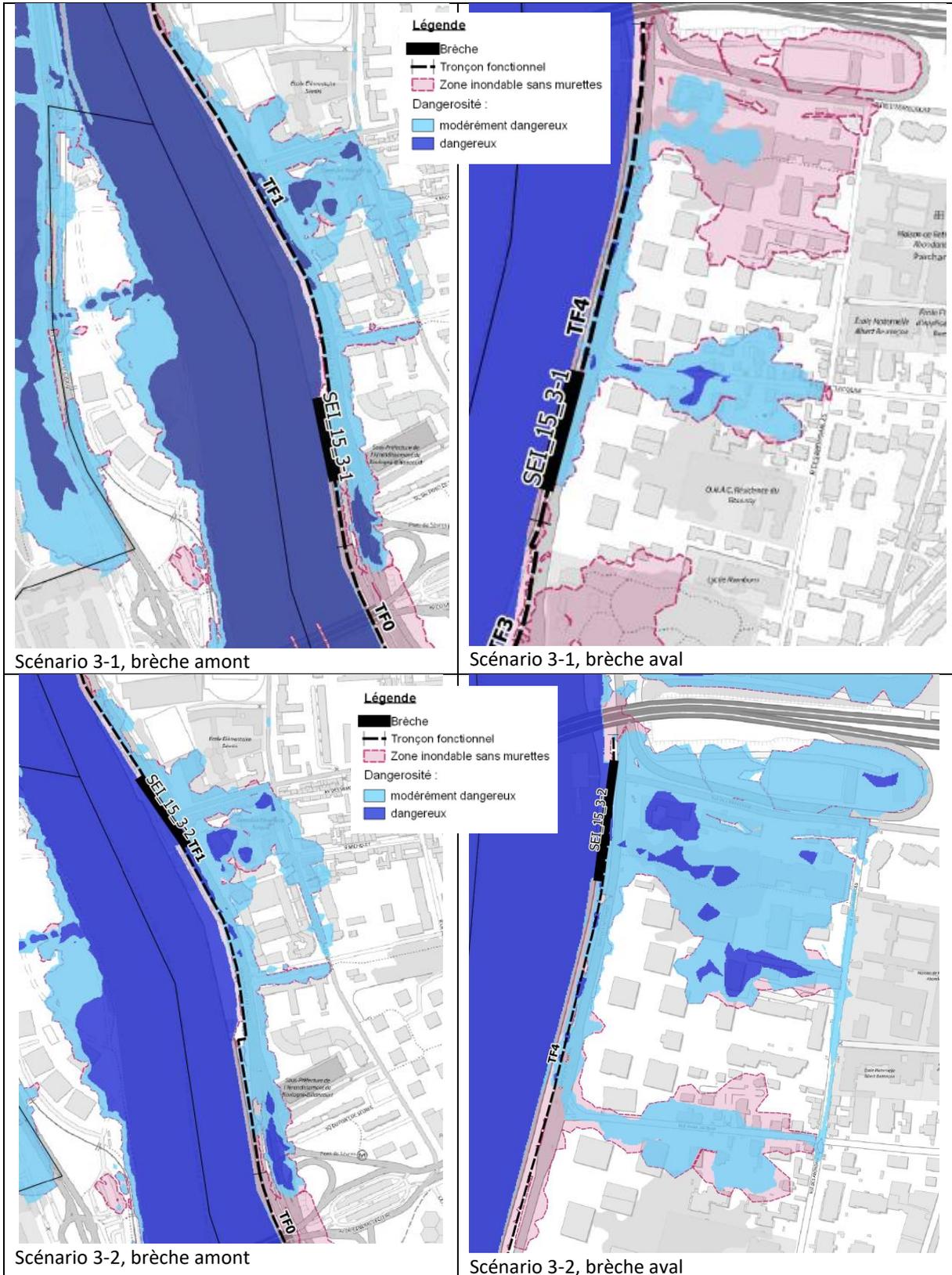


Figure 51 : Dangerosité des venues d'eau pour le scénarii de type 3, SEI_15

SEI_17 :

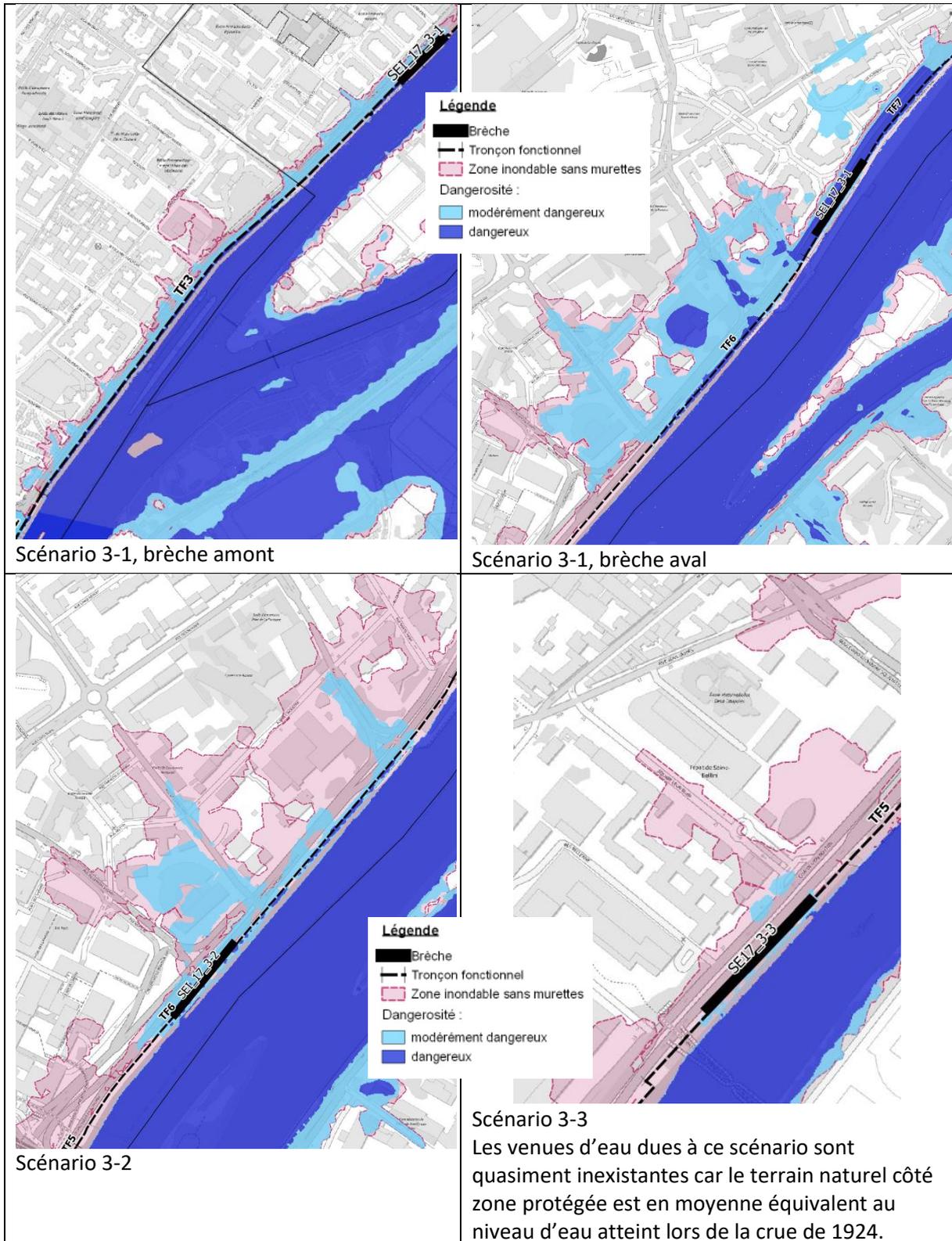
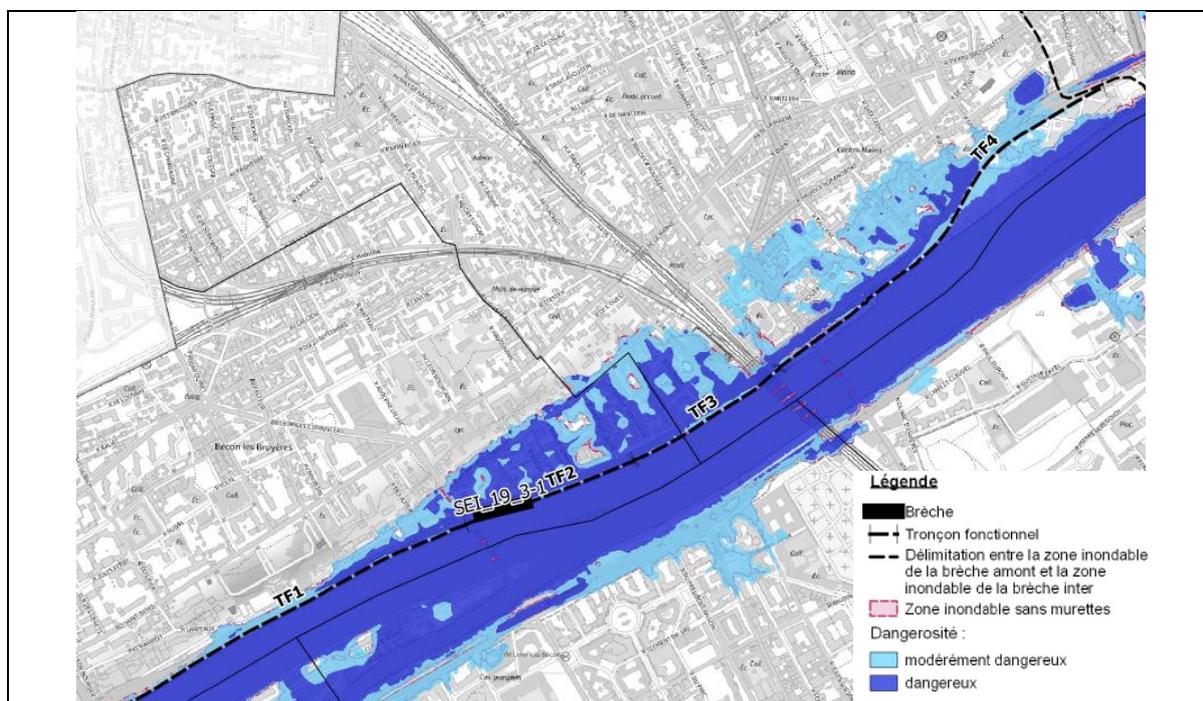
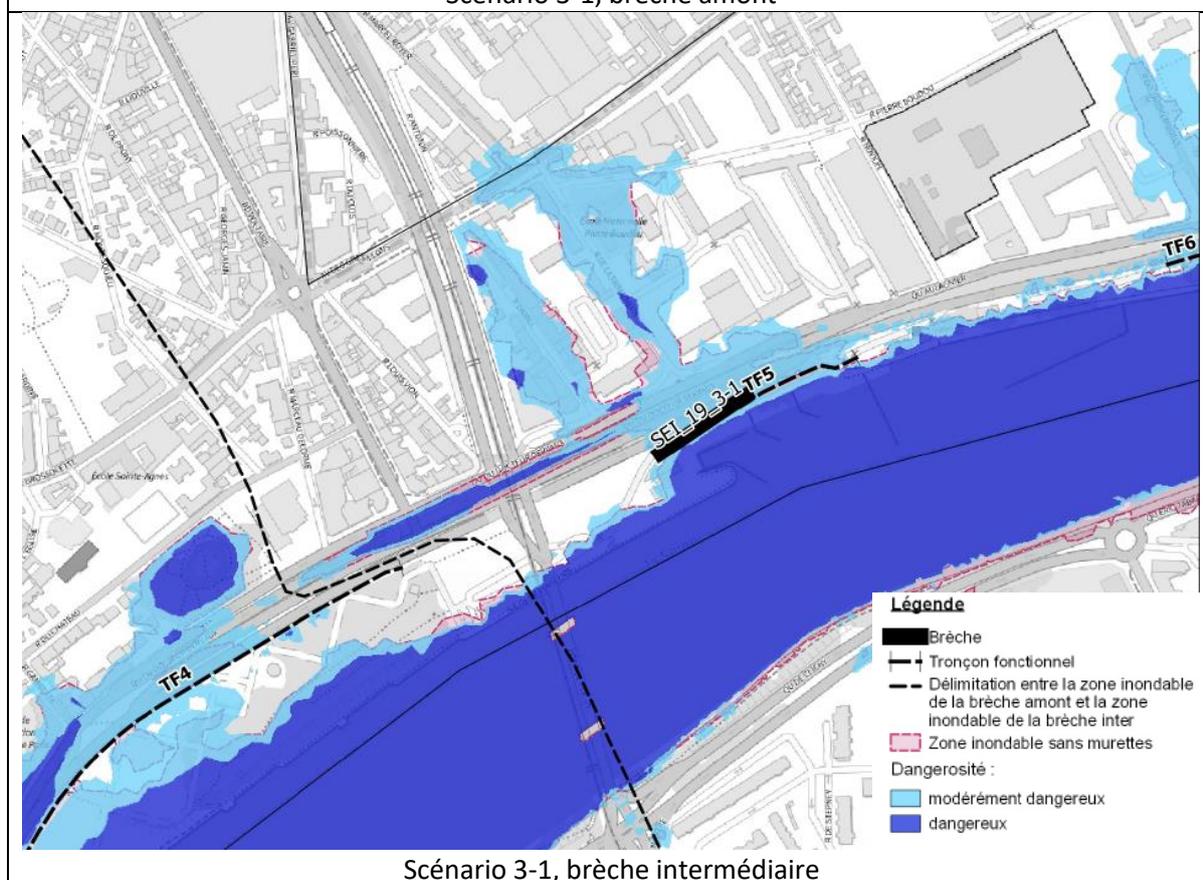


Figure 52 : Dangerosité des venues d'eau pour le scénarii de type 3, SEI_17

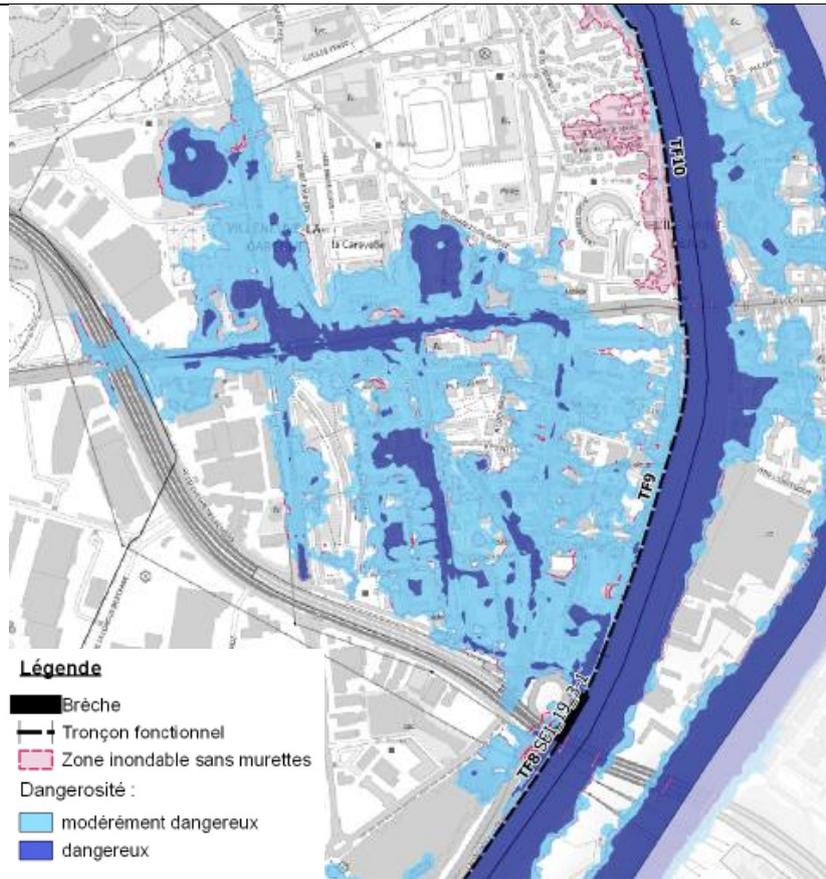
SEI_19 :



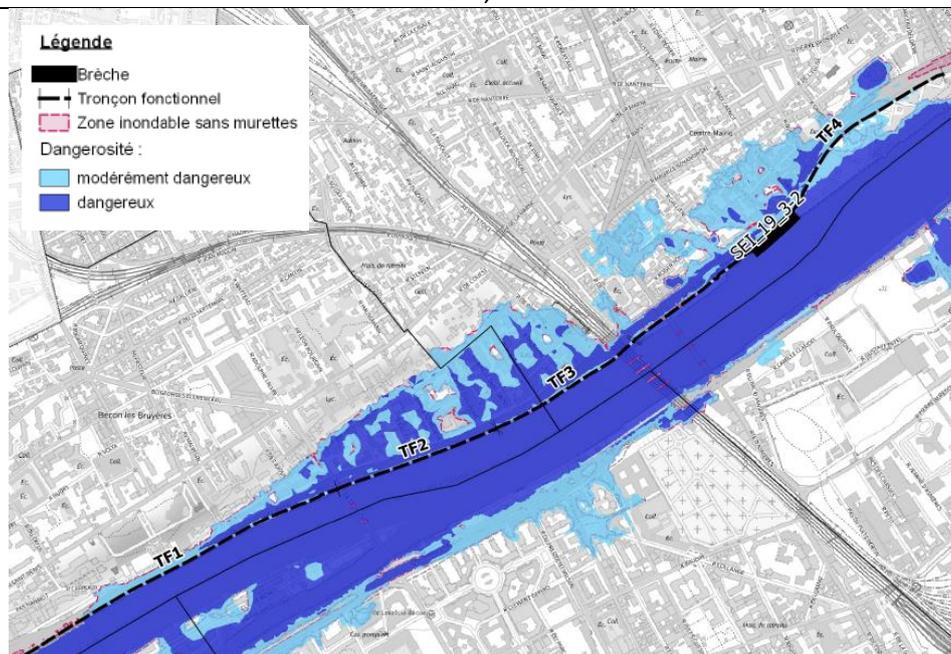
Scénario 3-1, brèche amont



Scénario 3-1, brèche intermédiaire



Scénario 3-1, brèche aval



Scénario 3-2, brèche amont

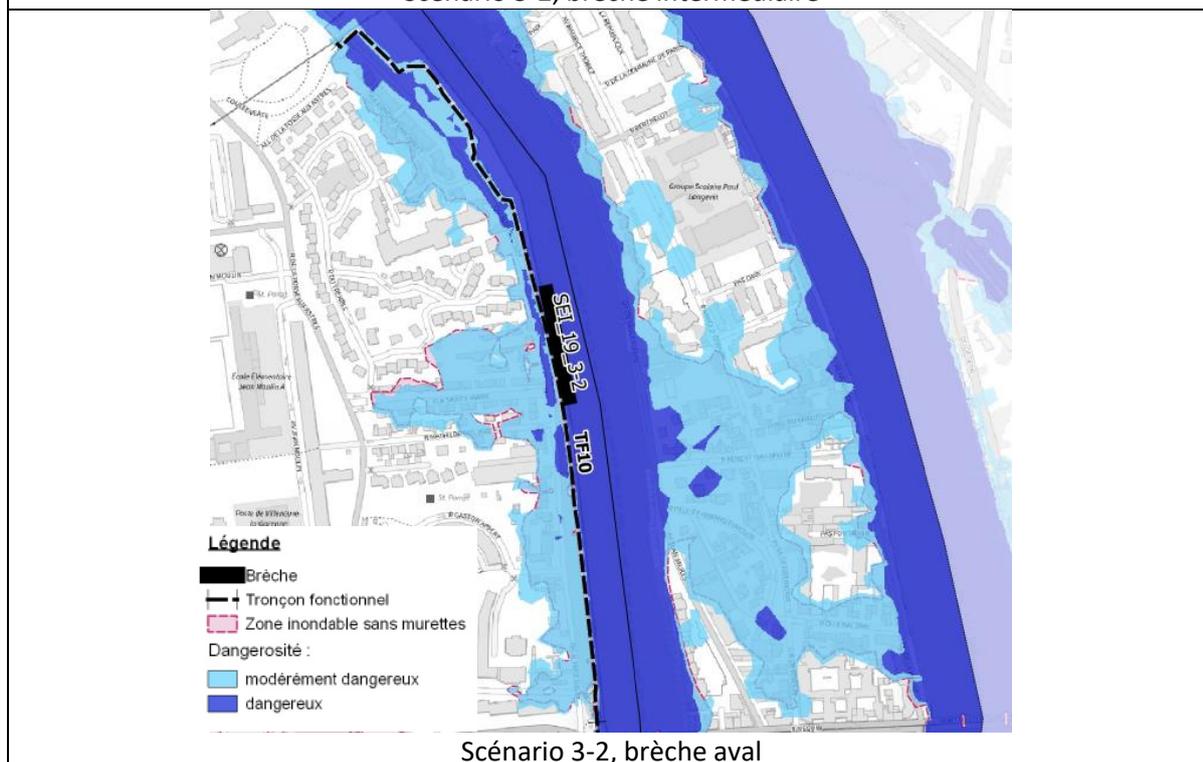
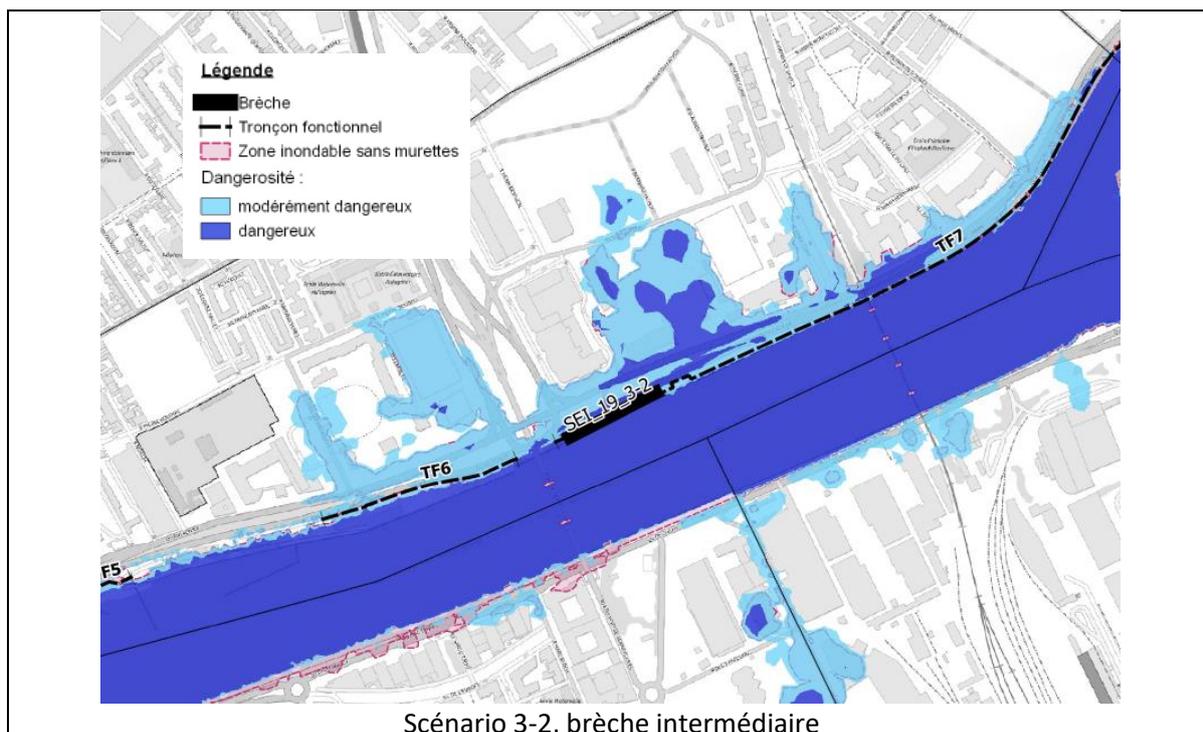


Figure 53 : Dangerosité des venues d'eau pour le scénarii de type 3, SEI_19

On remarque que dans tous les cas, une brèche de 100m entraîne une inondation sur les rives du système d'endiguement. Dans ces zones, on compte certains points bas, pour lesquels, les hauteurs d'eau sont supérieures à 1m. D'autres zones ayant une pente importante, induisent une augmentation de la vitesse qui parfois dépassent 0,5 m/s. Ainsi, on compte quelques zones dangereuses aux cœurs des zones normalement protégées par le système. Dans certains cas, comme la brèche aval du scénario 3-1 du système d'endiguement 19, les inondations sont plus importantes avec une brèche que lorsque l'on n'a pas du tout de murettes. Ce phénomène est dû à une partie des eaux qui une fois sortie du lit mineur y retourne en aval (ou en amont) après avoir, par exemple, rencontré un point bas proche du

lit mineur. La présence des murettes en amont et aval de la brèche empêche le ressuyage des eaux (retour au lit mineur). Ces venues d'eaux sont donc forcées de rester dans le lit majeur.

Ce phénomène prouve que l'entretien des murettes est très important. Comme pour le SEI_19, toute brèche entraîne un morcellement du système qui rend non seulement cette partie inefficace mais qui en plus peut aggraver les inondations sur le reste du système d'endiguement.

VI. Conclusion et perspectives

Cette étude des inondations permet de montrer combien la présence d'un système d'endiguement fonctionnel est important. Les murettes lorsqu'elles sont en bon état permettent d'assurer la protection de plusieurs milliers de personnes jusqu'au niveau de protection. Mais, la définition des zones protégées nous permet également de montrer qu'un système morcelé comme le SEI_19 perd beaucoup d'intérêt car l'eau non seulement passe entre les tronçons mais en plus inonde des zones se situant derrière les murettes. Cette conclusion est la même pour les autres systèmes d'endiguement, toute brèche dans un système entraîne des inondations qui parfois sont même plus importantes qu'une inondation sans système d'endiguement.

Ainsi, pour qu'un système soit efficace, l'entretien des ouvrages et la gestion des protections amovibles au niveau des ouvertures pendant les périodes de crue sont essentiels. Des systèmes de protections défaillants induisent également un risque qu'ils cèdent lorsque la pression est la plus forte, c'est-à-dire au pic de crue. Or, on a vu que si ces protections cèdent pendant la crue, les vitesses de montée des eaux seront beaucoup plus importantes et donc le temps laissé au gestionnaire pour réagir sera beaucoup plus faible. C'est pourquoi dans toutes études de dangers, une partie est réservée exclusivement aux consignes d'organisation du gestionnaire du système d'endiguement. Ces consignes se divisent en deux parties :

- Tout d'abord, la surveillance du bon état de fonctionnement des systèmes de protection. Tout au long de l'année des visites sont réalisées pour : vérifier le bon état des ouvrages et batardeaux, déceler toute anomalie. Le gestionnaire doit réaliser ces visites de surveillance au moins une fois par an et également après tout événement exceptionnel (crue, accident ...). En plus des visites régulières du gestionnaire, des rapports de surveillance doivent être établis tous les 3 ans pour les ouvrages de classe A (SEI_19) et tous les 5 ans pour les ouvrages de classe B (SEI_15 et SEI_17). De plus, des visites techniques d'approfondissement réalisées par des bureaux d'études ont lieu entre les deux rapports de surveillance. Selon les résultats de ces différents rapports, des travaux d'entretien peuvent être engagés. De plus dès qu'ils sont utilisés, un inventaire des batardeaux est effectué. Le bon fonctionnement de la protection ne peut se faire sans un entretien régulier des ouvrages de contrôle en sortie des réseaux traversants.

- Le plan de gestion doit également indiquer comment agir en période de crue. De nombreux moyens existent pour prévenir une crue. Des informations via le site Vigicrues sont à disposition du gestionnaire. Cela permet d'anticiper les crues quelques jours à l'avance afin d'avoir le temps de prendre les mesures nécessaires. La particularité des systèmes d'endiguement des Hauts-de-Seine étant la présence d'ouvertures batardables, il s'agit du point de gestion essentiel à anticiper et organiser. On a estimé qu'il fallait environ 48h pour mettre en place l'ensemble des batardeaux dans le 92. Plusieurs seuils d'alertes ont été identifiés en fonction du niveau d'eau mesuré à Austerlitz. Le gestionnaire est tenu de réaliser une veille sur ces seuils d'alerte et de prendre les mesures qu'il a lui-même défini en fonction des seuils atteints.

Pour tous les systèmes, cette procédure doit être mise en place en cas de crue.

Pour chaque système, des recommandations concernant la gestion des crues et les travaux à effectuer sont déterminées. Afin de limiter les dégâts que pourrait engendrer une protection défaillante face à une crue, ces travaux devraient être effectués au plus vite. Afin d'assurer une protection totale du département des Hauts-de-Seine, l'analyse des risques d'inondation devra aussi être faite au niveau des autres systèmes d'endiguement (SEI_13, 16, 18 et 20) afin d'établir un plan de gestion adapté.

VII. Bibliographie

Araud Quentin, Simulations des écoulements en milieu urbain lors d'un événement pluvieux extrême, Thèse, Université de Strasbourg, paru en 2012, consulté le 16/07/2021

Cerema, Réalisation d'une EDD de système d'endiguement, Propositions pour un cahier des clauses techniques particulières, paru en avril 2019, consulté le 15/07/2021, https://www.cerema.fr/system/files/documents/2019/06/201904_cerema_aide_elaboration_cctp_e_dd_v3.pdf

Département des Hauts-de-Seine, Tronçons et sous-tronçons de murettes classées B-C-D, consulté le 01/03/2021

Felts Didier, Gardet Sylvain. Comparaison dans l'estuaire de la Gironde des résultats issus d'une modélisation, hydraulique (Telemac 2D) avec les observations terrains, Xynthia, 28 février 2010. In: Evénements extrêmes fluviaux et maritimes. Leurs variabilités spatiales et chronologiques dans l'ouest de l'Europe. 34èmes journées de l'hydraulique, Paris, 1 et 2 février 2012, consulté le 16/07/2021

ISL Ingénierie, Dossier réglementaires des digues du département des Hauts-de-Seine, consignes écrites, 26/09/2016, consulté le 02/02/2021

ISL Ingénierie, Modélisation hydraulique 2D, mai 2021, consulté le 03/07/2021

ISL Ingénierie, Note de définition des systèmes d'endiguement, février 2021, consulté le 01/03/2021

ISL Ingénierie, Plaquette ISL, consulté le 18/05/2021

ISL Ingénierie, REALISATION DES EDD DES SE DE LA METROPOLE DU GRAND PARIS - LOT N°2 : HAUTS-DE-SEINE Etude de dangers du système d'endiguement SEI 15, juin 2021, consulté le 03/07/2021

ISL Ingénierie , REALISATION DES EDD DES SE DE LA METROPOLE DU GRAND PARIS - LOT N°2 : HAUTS-DE-SEINE Etude de dangers du système d'endiguement SEI 17, juin 2021 consulté le 03/07/2021

ISL Ingénierie , REALISATION DES EDD DES SE DE LA METROPOLE DU GRAND PARIS - LOT N°2 : HAUTS-DE-SEINE Etude de dangers du système d'endiguement SEI 19, juin 2021, consulté le 03/07/2021

ISL Ingénierie, Réalisation des EDD des SE de la Métropole du Grand Paris, Grand Paris-Lot n°2 : Hauts-de-Seine, Evaluation des données d'entrée, le 15 janvier 2021, consulté le 08/02/2021

ISL Ingénierie, Site internet d'ISL Ingénierie, consulté le 01/02/2021, <https://www.isl.fr/>

J. Vasquez, Hydrologie et Hydraulique des réseaux d'assainissement, Ecole nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg, paru en avril 2016, consulté le 31/05/2021

Jean-Michel Hervouet, Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the Finite Element Method, edition John Wiley & Sons, 2007, 360 pages, 0470319631, 9780470319635, consulté le 18/07/2021

La Chaîne Météo, Crues éclairs et crues lentes, quelles différences ?, paru le 21/11/19, consulté le 20/05/2021, <https://actualite.lachainemeteo.com/actualite-meteo/2020-03-09/cruces-eclairs-et-cruces-lentes-quelles-differences-53153>

M. Dufresne et J. Vasquez, Hydraulique à Surface Libre, Ecole nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg, paru en janvier 2016, consulté le 31/05/2021

M. Erlich, C. Girard, E. David, Intégration du modèle hydraulique 2D dans la chaîne de prévision des crues-éclaircies en temps réel, Symposium Européen, paru en mars 2012, consulté le 25/07/2021

M. Gharbi, A. Soualmia, D. Dartus et L. Masbert, Comparison of 1D and 2D Hydraulic Models for Floods Simulation on the Medjerda River in Tunisia, paru en 2016, consulté le 16/07/2021

Métropole du Grand Paris, Réalisation des Etudes de dangers des systèmes d'endiguements du territoire de la Métropole du Grand Paris et accompagnement à la constitution, au dépôt et au suivi des dossiers d'autorisation initiales, Cahier de Clauses Administratives Particulières, 2020, consulté le 01/02/2021

Métropole du Grand Paris, Réalisation des Etudes de dangers des systèmes d'endiguements du territoire de la Métropole du Grand Paris et accompagnement à la constitution, au dépôt et au suivi des dossiers d'autorisation initiales, Cahier de Clauses Techniques Particulières, 2020, consulté le 01/02/2021

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, Banque hydro, consulté le 19/05/2021, <http://www.hydro.eaufrance.fr/>

Ministre de l'environnement, de l'énergie et de la mer, chargée des relations internationales sur le climat, Arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers des digues organisées en systèmes d'endiguement et des autres ouvrages conçus ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions, paru au journal officiel n°0092 du 19/04/2017, consulté le 28/03/2021, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000034438478>

Ministère de la Transition Ecologique, Prévention des risques naturels, paru le 02/08/2021, consulté le 05/08/2021, <https://www.ecologie.gouv.fr/prevention-des-risques-naturels#:~:text=En%20France%2C%20le%20risque%20inondation,000%20communes%20dont%20300%20agglom%C3%A9rations>

Netdif, Les dossiers Ma Primaire, consulté le 03/07/2021, https://www.maprimaire.fr/pages/Dossiers_fiches/la_seine.htm

P. Salze, Simulation des processus environnementaux, Université de Strasbourg, 2020, consulté le 31/05/2021

P-Y Lagrée, Equations de Saint-Venant et application aux mouvements de fonds érodables "MU4MEF04 - Ondes et _Ecoulements en milieu naturel", M1 SU, CNRS & Sorbonne Université, paru le 23/03/2021, consulté le 09/08/2021

Pierre Lang, Système de modélisation Telemac, Hydrodynamique bidimensionnelle, Logiciel TELEMAC-2D version 6.0, Manuel de l'utilisateur, paru en octobre 2010, consulté le 03/07/2021

Préfet des Hauts-de-Seine. Arrêté préfectoral n°2012-64 du 3 avril 2012 portant complément à l'autorisation délivrée au titre de l'article L.214-6 de l'Environnement concernant les digues fluviales (murettes anti-crue) située en rive droite et gauche de la Seine et dont le Conseil Général des Hauts-de-Seine est propriétaire et gestionnaire, consulté le 28/03/2021, <https://www.hauts-de-seine.gouv.fr/content/download/2759/17475/file/AP%20Conseil%20g%C3%A9n%C3%A9ral%20murettes%20anti%20crue.pdf>

Premier ministre, Article D.181-15-1 du code de l'environnement, alinéa 4, 01/03/2017, consulté le 28/03/2021, https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000033931220/2017-03-01

Premier ministre, Article R. 214-122 du code de l'environnement, alinéa 2, 31/08/2019, consulté le 28/03/2021, https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000039001241/

Premier ministre, Article R.214-113 du code de l'environnement du 01/01/2008, consulté le 31/05/2021, https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006074220/LEGISCTA000017663477?init=true&page=1&query=Article+R214-113+-+Code+de+l%27environnement&searchField=ALL&tab_selection=all&anchor=LEGIARTI000039001179#LEGIARTI000039001179

Premier ministre, Décret n°2017-1532 du 3 novembre 2017 modifiant le dispositif d'agrément des organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques, paru au journal officiel n° 0259 le 05/11/17, consulté le 20*06/2021,

<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000035967835/#:~:text=intervenant%20pour%20..>

,D%C3%A9cret%20n%C2%B0%202017%2D1532%20du%203%20novembre%202017%20modifiant,la%20s%C3%A9curit%C3%A9%20des%20ouvrages%20hydrauliques

Premier ministre, Décret n°2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques, paru au journal officiel n°0111 du 14/05/2015, consulté le 20/06/2021,

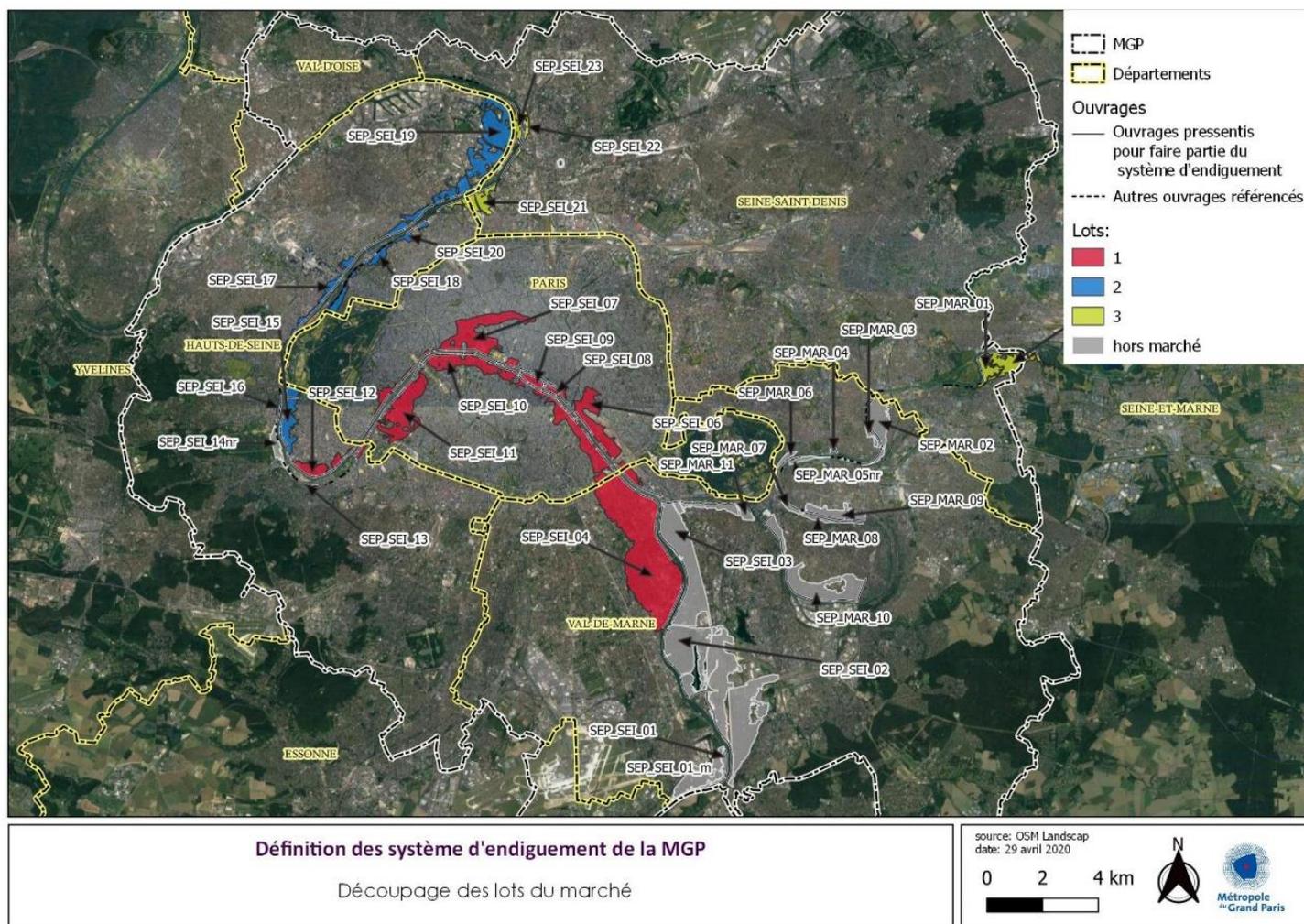
<https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf?id=LSSp7cVIXT0vqsrw2NuqKBD-20XFtDEHKJ4-bzXY1sc=>

T. Marie, Modélisation hydrodynamique couplée 1D-2D du delta intérieur du fleuve Niger, Thèse, Sciences agricoles, paru en 2013, consulté le 16/07/2021

Techno-Science, Méthode des éléments finis - Définition et Explications, <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Methode-des-elements-finis.html>, paru le 30/04/2021, consulté le 25/07/2021

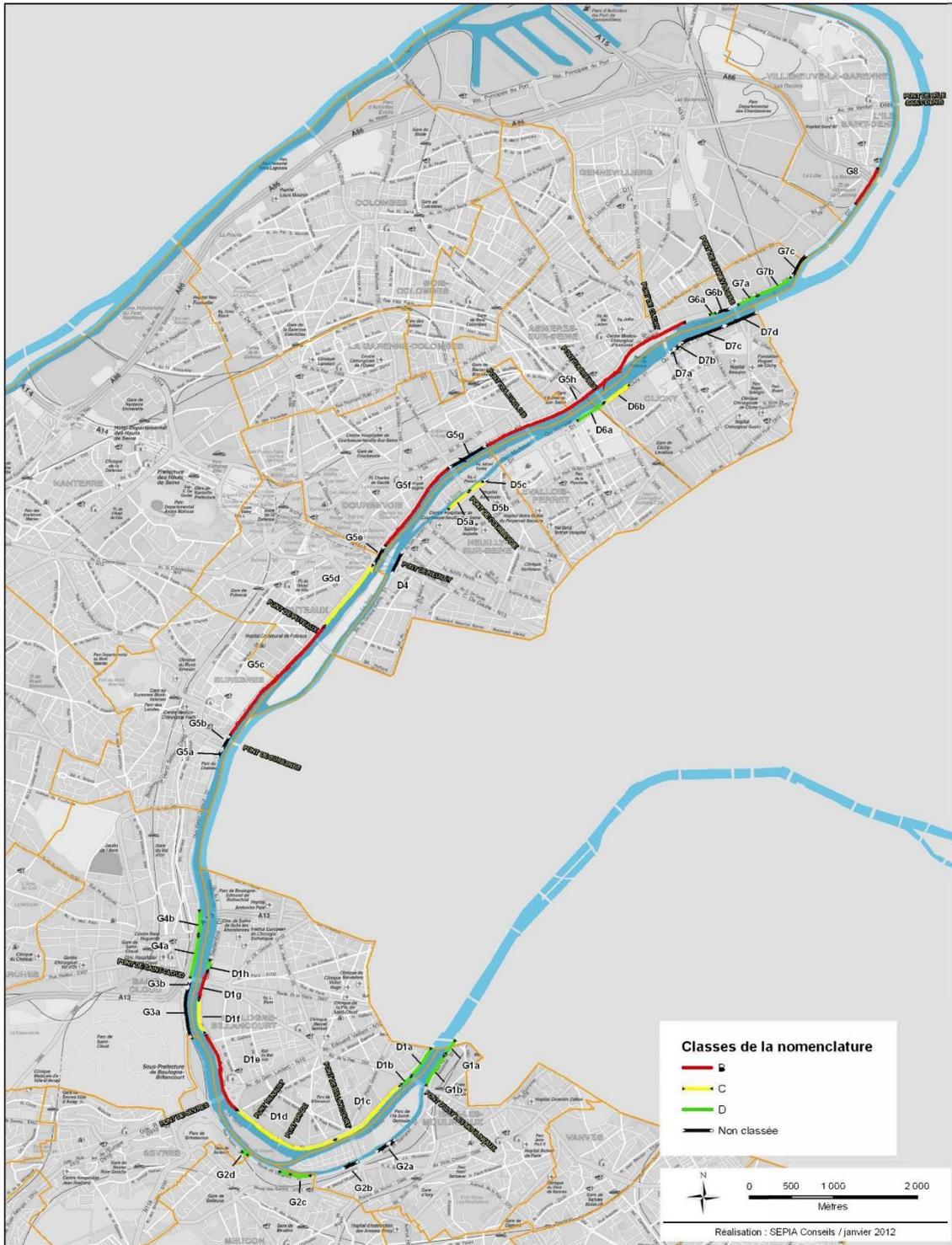
VIII. Annexes

Annexe 1 : Division des systèmes d'endiguements gérés par la MGP en trois lots



Annexe 2 : Classement des sous-trançons des murettes anti-crues du Département des Hauts-de-Seine
(source : département des Hauts-de-Seine)

Classement des sous-trançons des murettes anti-crues du Département des Hauts-de-Seine



Annexe 3 : Equations de Barré Saint-Venant

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2 + g\frac{h^2}{2}) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2 + g\frac{h^2}{2}) = 0 \end{cases} \quad \text{de la forme} \quad \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} = 0$$

Où:

$h(x,y,t)$ =hauteur d'eau

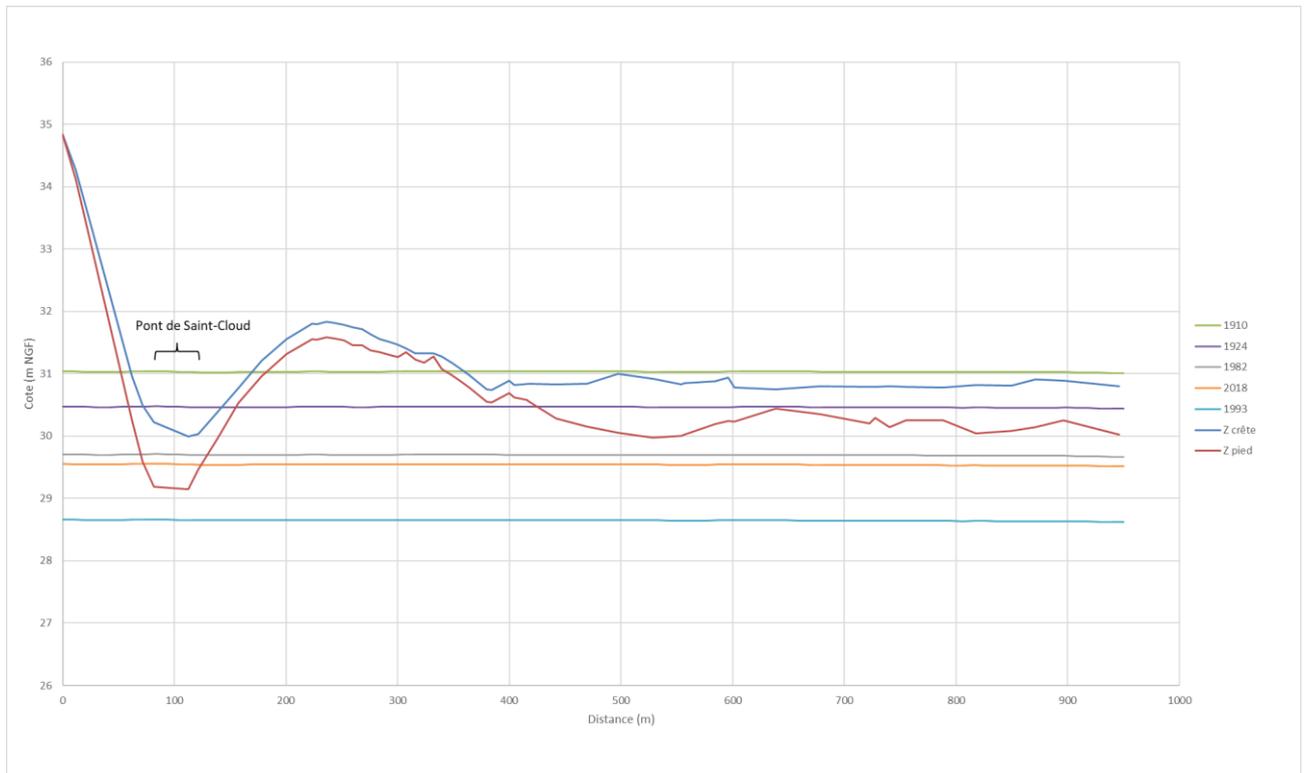
u = vitesse moyenne selon x

v = Vitesse Moyenne selon y

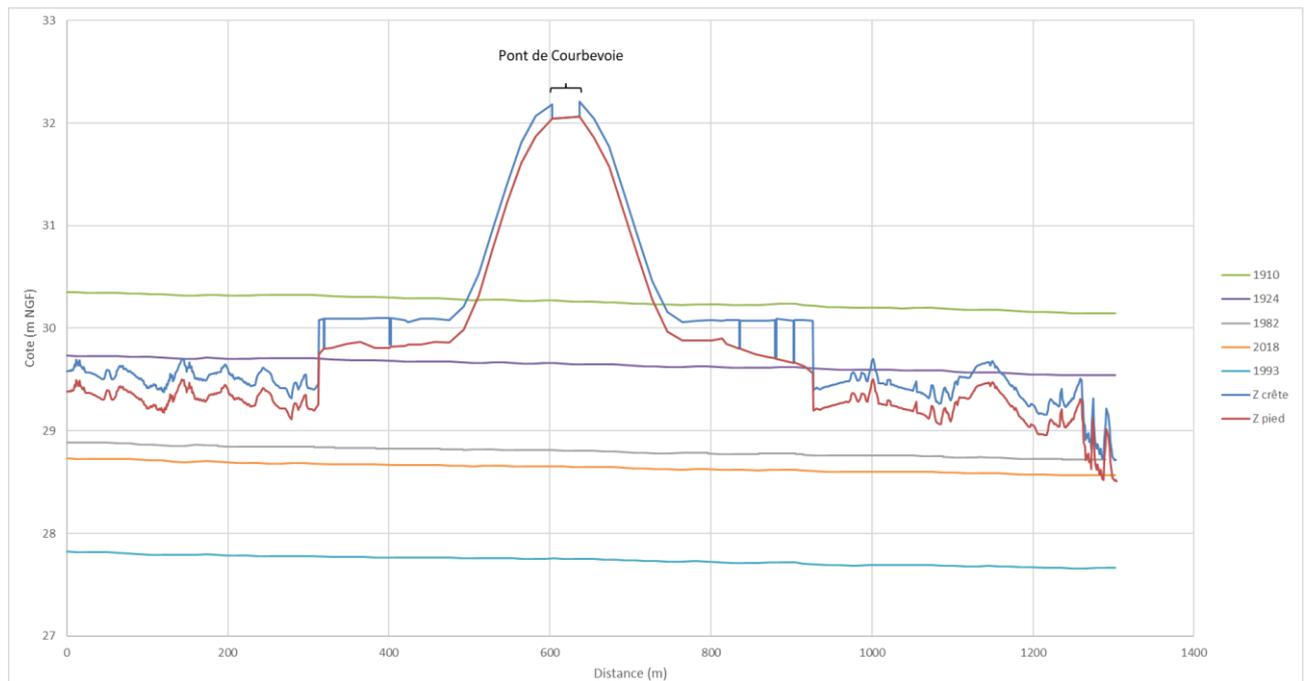
F_x et F_y = forces volumiques

g = accélération de la pesanteur

Annexe 4 : Profil en long du système d'endiguement 16

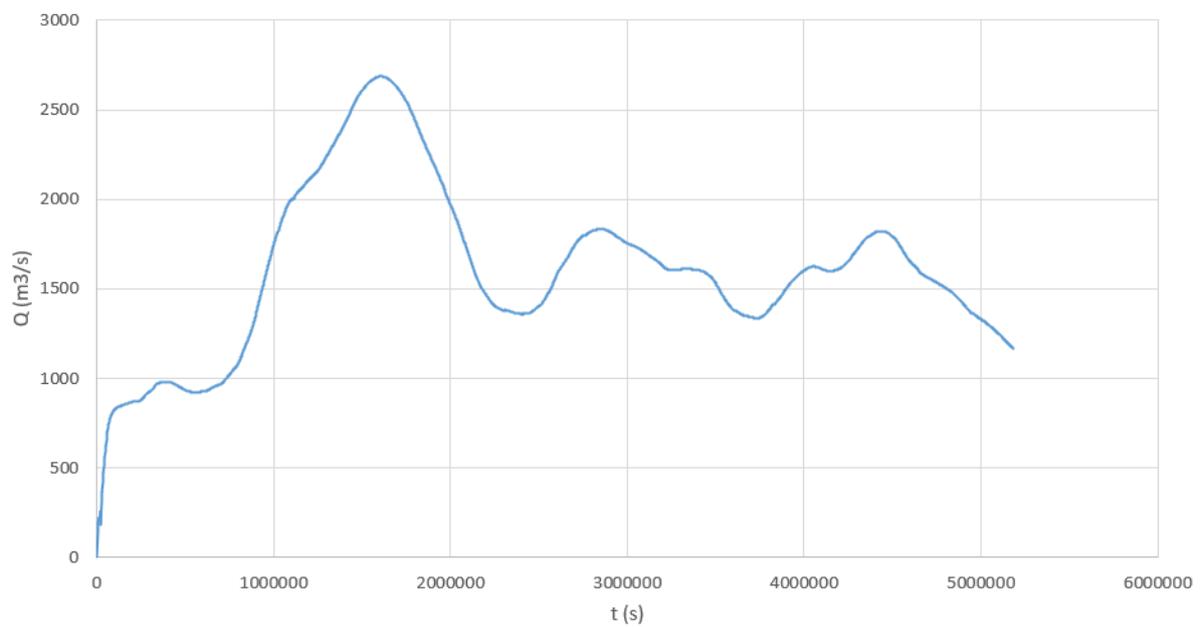


Annexe 5 : Profil en long du système d'endiguement 18

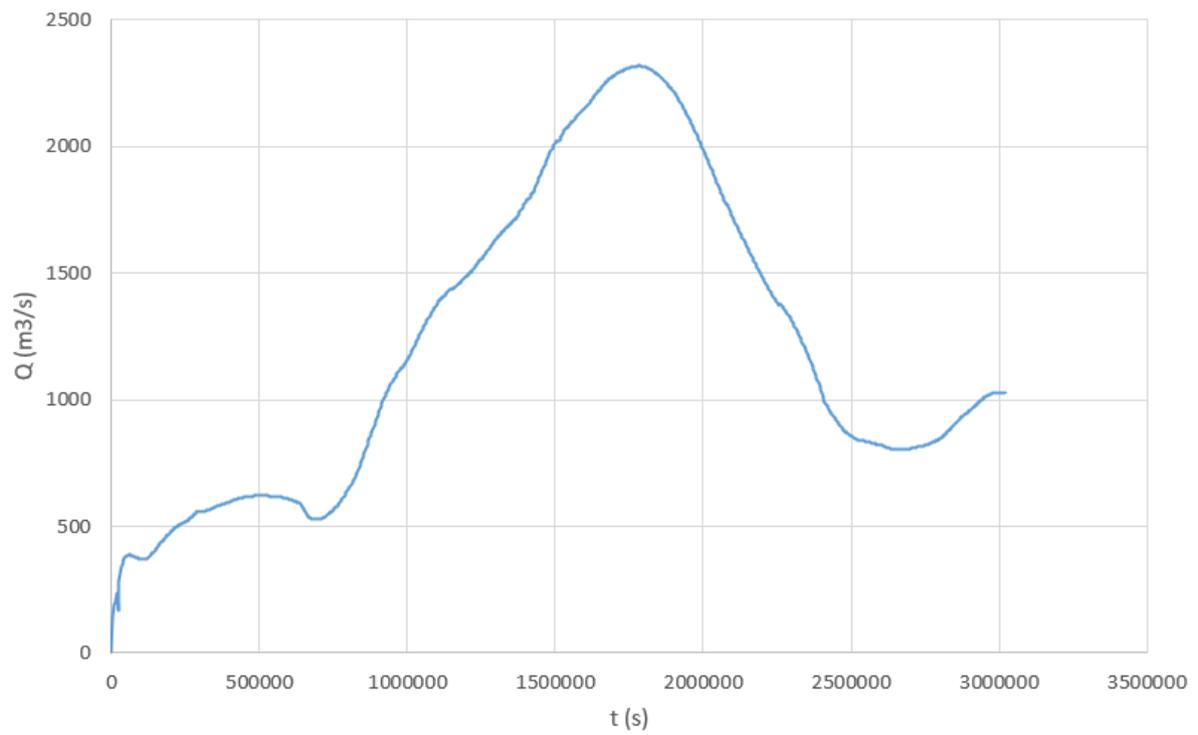


Profil en long du système d'endiguement 18

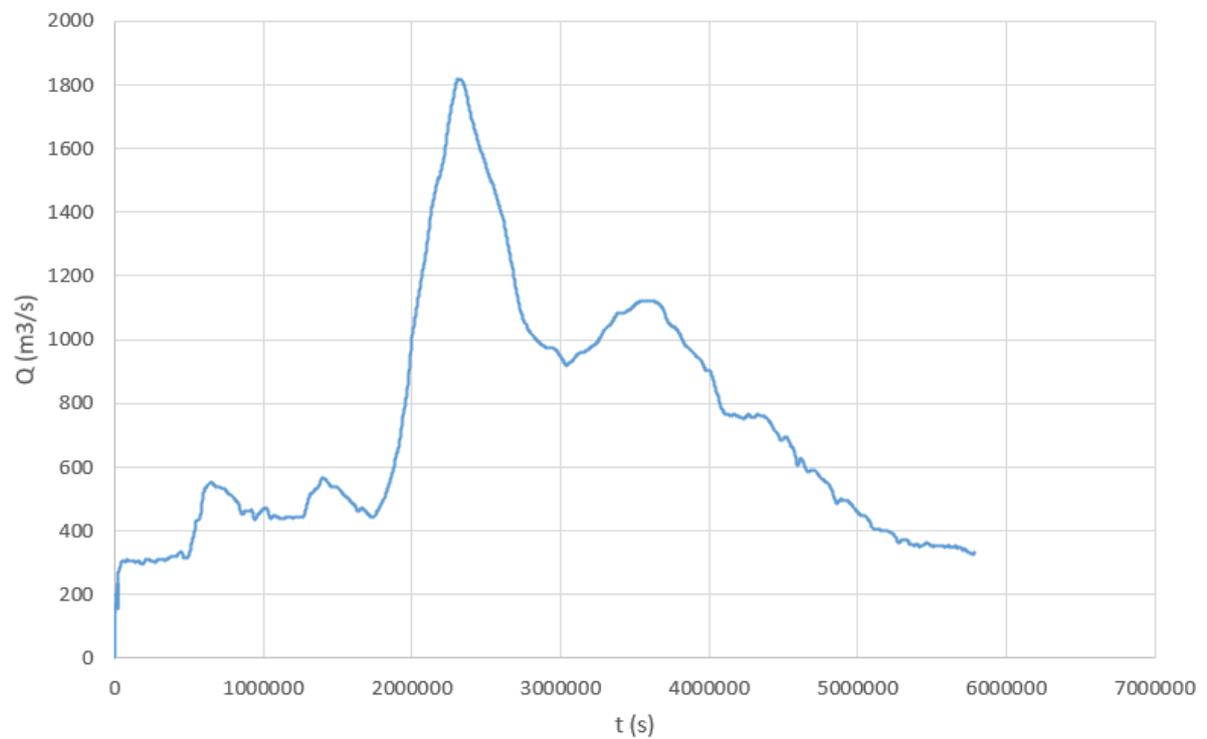
Annexe 6 : Hydrogramme de la crue de 1910



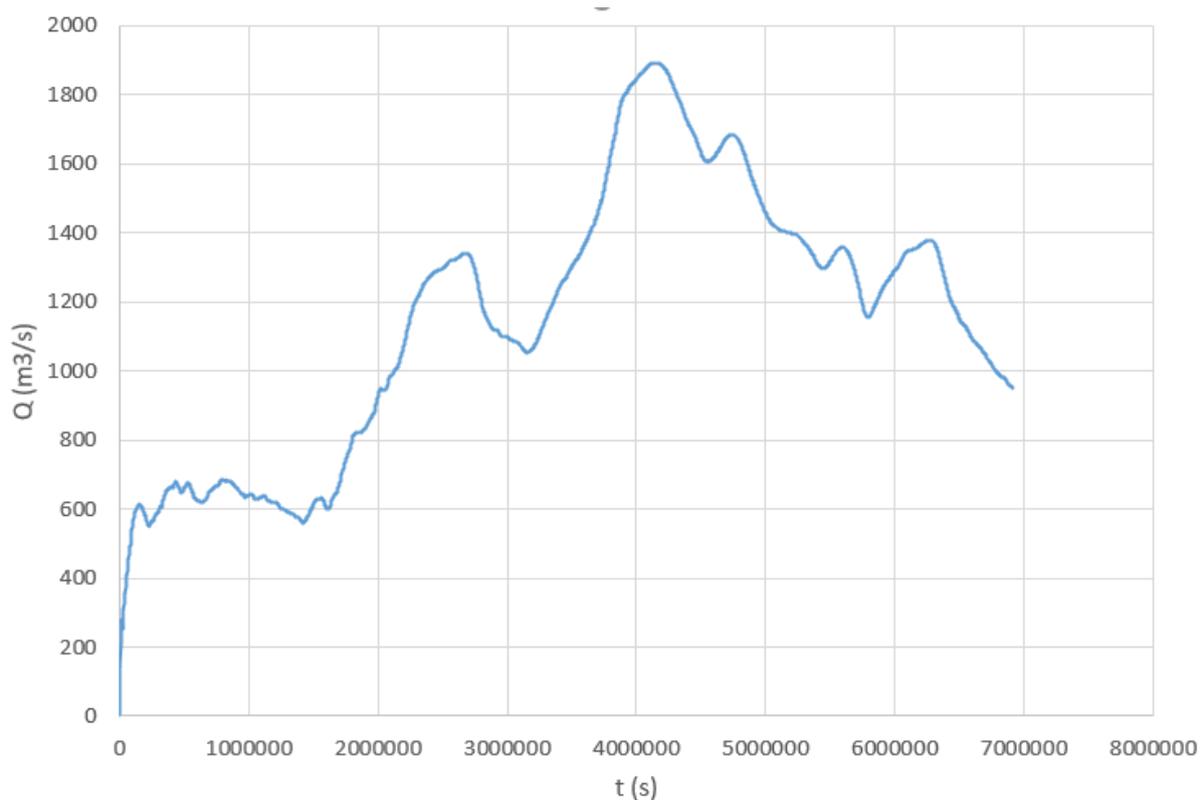
Annexe 7 : Hydrogramme de la crue de 1955



Annexe 8 : Hydrogramme de la crue de 2016



Annexe 9 : Hydrogramme de la crue de 2018



Annexe 10 : Tableau récapitulatif des résultats du calage avec la crue de 1910

Ecart de la Seine avec les repères de la Crue de janvier 1910					
		ArteSeine		ISL	
Moyenne (cm)			-4.9		-2.8
Moyenne absolue (cm)			19.0		20.9
Écart maximum (cm)			38.6		38.1
Écart minimum (cm)			1.3		6.4
Distance à l'amont (m)	RC (m NGF)	Cote calculée ArteSeine (m NGF)	Ecart ArteSeine-RC (cm)	Cote calculée ISL (m NGF)	Ecart ISL-RC (cm)
21796.70	30.30	30.44	13.57	30.49	18.64
22809.00	30.19	30.32	13.23	30.39	20.37
23756.40	30.12	30.24	12.30	30.25	13.25
24743.29	30.01	30.18	17.05	30.21	19.53
25684.90	29.92	30.06	13.58	30.06	14.01
27130.81	29.74	29.96	21.79	30.06	31.56
29302.90	29.59	29.58	-1.27	29.53	-6.45
36753.30	28.99	28.60	-38.59	28.61	-38.09
36763.21	28.73	28.59	-13.66	28.60	-12.85
37753.00	28.74	28.45	-29.30	28.46	-28.00
37778.89	28.74	28.44	-30.24	28.45	-29.02
38003.00	28.64	28.43	-20.85	28.45	-19.18
38030.40	28.64	28.42	-21.75	28.44	-20.40

Annexe 11 : Tableau récapitulatif des résultats du calage avec la crue de 1924

Ecart de la Seine avec les repères de la Crue de janvier 1924					
		ArteSeine		ISL	
Moyenne (cm)			-4.5		4.7
Moyenne absolue (cm)			8.9		8.7
Écart maximum (cm)			18.7		13.6
Écart minimum (cm)			1.3		1.5
Distance à l'amont (m)	RC (m NGF)	Cote calculée ArteSeine (m NGF)	Ecart ArteSeine-RC (cm)	Cote calculée ISL (m NGF)	Ecart ISL-RC (cm)
21009.09	29.75	29.7	-6.2	29.89	13.6
22006.55	29.59	29.6	-1.3	29.67	8.0
22021.41	29.63	29.6	-5.7	29.67	3.8
22968.83	29.49	29.5	1.3	29.60	10.7
23955.64	29.35	29.4	9.6	29.48	12.9
24897.23	29.26	29.3	6.9	29.39	13.4
26343.14	29.16	29.2	6.8	29.26	9.7
28515.24	28.98	28.8	-13.1	29.00	1.5
35975.56	28.03	27.9	-13.4	27.97	-5.9
36991.27	27.94	27.8	-18.7	27.86	-8.4
37242.77	27.89	27.7	-15.6	27.82	-7.4

Annexe 12 : Tableaux récapitulatifs des résultats du calage avec la crue de 1955

Ecart de la Seine avec les repères de la Crue de janvier 1955					
		ArteSeine		ISL	
Moyenne (cm)			27.4		28.3
Moyenne absolue (cm)			27.4		28.3
Écart maximum (cm)			48.4		56.7
Écart minimum (cm)			1.5		2.6
Distance à l'amont (m)	RC (m NGF)	Cote calculée ArteSeine (m NGF)	Ecart ArteSeine-RC (cm)	Cote calculée ISL (m NGF)	Ecart ISL-RC (cm)
21796.96	29.43	29.74	30.9	29.78	34.9
22809.27	29.32	29.62	30.3	29.68	36.4
23634.21	29.25	29.54	28.9	29.51	25.7
23756.69	29.20	29.55	35.2	29.55	35.3
24743.51	29.04	29.49	45.4	29.51	47.4
25685.10	28.96	29.38	41.6	29.36	40.1
27131.00	28.79	29.27	48.4	29.36	56.7
29303.11	28.57	28.90	32.8	28.83	25.9
32634.35	28.17	28.52	35.0	28.52	34.7
33004.14	28.17	28.43	25.7	28.43	25.8
36236.40	27.89	28.0	11.3	28.0	10.8
36753.40	27.93	27.95	1.50	27.96	2.6

37779.14	27.72	27.79	7.25	27.81	8.6
38030.63	27.68	27.77	9.22	27.79	11.1

Annexe 13 : Tableau récapitulatif des résultats du calage avec la crue de 2016

Ecart de la Seine avec les repères de la Crue de janvier 2016					
		ArteSeine		ISL	
Moyenne (cm)			16.2		18.5
Moyenne absolue (cm)			34.3		35.6
Écart maximum (cm)			141.3		146.2
Écart minimum (cm)			3.8		5.0
Distance à l'amont (m)	RC (m NGF)	Cote calculée ArteSeine (m NGF)	Ecart ArteSeine-RC (cm)	Cote calculée ISL (m NGF)	Ecart ISL-RC (cm)
21937.85	29.44	28.49	-95.5	28.56	-88.19
22178.21	28.50	28.46	-3.8	28.55	5.02
22178.22	28.17	28.46	29.7	28.55	38.53
22440.23	28.10	28.42	32.4	28.50	40.34
22440.25	28.26	28.42	16.1	28.50	24.04
22568.07	28.17	28.42	24.9	28.51	34.20
24769.23	26.88	28.29	141.3	28.34	146.22
24769.23	28.12	28.29	16.8	28.34	21.72
25669.45	27.83	28.19	36.0	28.22	38.27
25709.02	27.86	28.19	33.4	28.20	33.92
25715.36	28.62	28.19	-42.3	28.19	-42.57
26753.50	27.92	28.13	20.9	28.15	22.46
26765.35	27.89	28.13	24.3	28.16	26.91
29299.88	27.45	27.76	30.2	27.70	24.69
29299.94	27.44	27.76	31.5	27.70	26.00
29387.62	27.42	27.76	33.3	27.70	27.26
32186.92	27.68	27.42	-26.1	27.42	-26.25
32647.92	27.25	27.37	12.0	27.37	11.85
32647.92	27.23	27.37	14.9	27.37	14.75
32648.67	27.19	27.37	18.8	27.37	18.54
36991.50	27.32	26.82	-49.5	26.83	-48.84
36991.50	26.61	26.82	21.6	26.83	22.26
37984.51	26.34	26.69	35.7	26.71	37.52
37984.62	26.36	26.69	33.0	26.71	34.82

Annexe 14 : Caractéristiques des tronçons homogènes du SEI_15

Tronçon	Tronçon fonctionnel	Typologie d'ouvrage	Type de soutènement (si pertinent)	PM début (m) – PM fin (m)	Largeur et hauteur max	Commentaire
A	TF0-TF1	Parapet en béton armé sur mur de pente raide	Mur en béton ou en maçonnerie de pente raide	0 – 278 ;	Epaisseur parapet : 20 cm Hauteur max sur TN : 1,2 m	
B	TF1	Parapet en béton armé avec talus	Talus revêtu en béton, enrochements en pied	278 – 437	Epaisseur parapet : 26 cm Hauteur max sur TN : 0,55 m	Mauvais état (désalignements, tassements, amarrages sur parapet)
C	TF1	Murette en maçonnerie	Pas de soutènement, murette en retrait de la berge	437 – 900	Epaisseur parapet : 35 cm Hauteur max sur TN : 0,55 m	Mauvais état (dislocations, fissures)
D	TF1	Parapet en maçonnerie sur mur de pente raide	Mur de pente raide (soutènement de la route) en pierres sèches	900 – 986	Epaisseur parapet : 35 cm Hauteur max sur TN : 0,55 m	
E	TF1-TF2	Parapet en maçonnerie avec talus	Talus en remblai non revêtu, parfois présence de contreforts en béton	986 – 1417	Epaisseur parapet : 35 cm Hauteur max sur TN : 0,50 m	Etat moyen (fissures), talus non entretenu
F	TF3	Parapet en béton armé sur mur en béton armé, avec banquette en console	Mur vertical béton armé	1417 – 1633	Epaisseur parapet : 20 cm Hauteur max sur TN : 3 m	
G	TF3	Mur en béton armé	Pas de soutènement, mur légèrement en retrait de la berge (elle-même dotée d'un mur de quai)	1633 – 1825	Epaisseur parapet : 22 cm Hauteur max sur TN : 1,8 m	

H	TF3	Mur de route en béton	Pas de soutènement	1825 – 1842	Epaisseur parapet : 15 cm Hauteur max sur TN : 1 m	Mauvais état (fracturation)
I	TF3 TF4	Parapet en béton armé	Talus non revêtu	1842 – 1877 ; 2317 – 2368	Epaisseur parapet : 12 à 20 cm Hauteur max sur TN : 0,7 m	Quai de pied amont déformé, talus non entretenu
J	TF4	Digue en terre	Talus non revêtu, enrochements ou palplanches en pied	1877 – 2317 ; 2368 – 2453 ;	Largeur crête : 1,8 m Hauteur max sur TN : 0,6 m	Couronnement de pied amont déformé, talus non entretenu, signes d'affouillement
K	TF5	Autoroute A13	Pas de soutènement	2453-2760	Largeur crête : 30 m Hauteur max sur TN : 4 m	Ouverture non batardable sous l'autoroute Autoroute non construite pour protéger contre les inondations

Annexe 15 : Caractéristiques des tronçons homogènes du SEI_17

Amont du pont de Suresnes :

Tronçon	Tronçon fonctionnel	Typologie d'ouvrage	Type de soutènement (si pertinent)	PM début (m) – PM fin (m)	Commentaire
A'	TF1	Merlon en terre	Talus revêtu en perré maçonné à l'amont du tronçon, quai à l'aval ; palplanches en pied	0 – 391	Vestige de digue (merlon)
B'	TF2	Parapet en béton armé avec quai et talus	Talus revêtu en perré maçonné	391 – 709	Mauvais état (terre-plein déformé), indices d'érosion interne et de glissement

Aval du pont de Suresnes :

Tronçon	Typologie d'ouvrage	Type de soutènement (si pertinent)	PM début (m) – PM fin (m)	Commentaire
A1	Parapet en béton armé avec quai et talus	Talus revêtu en perré maçonné	3964 – 4123	
A2	Parapet en béton armé avec quai et talus	Talus revêtu en perré maçonné	0 – 811	Mauvais état (terre-plein déformé), talus très raide
B	Parapet en béton armé avec deux talus	Talus revêtus en perré maçonné	811 – 1202	Risberme en remblai
C	Mur de soutènement de la route	Mur béton armé vertical sans quai	1202 – 1937 ; 2765 – 2788 ; 2836 – 2851	
D	Murette en béton armé	Pas de soutènement, murette en retrait de la berge	2206 – 2247 ; 3601 – 3964	
E1	Parapet en béton armé avec talus	Talus revêtu en perré maçonné	1937 – 2206 ; 2263 – 2765 ; 2875 – 2991 ; 3203 – 3601	
E2	Parapet en béton armé avec talus	Talus revêtu en perré maçonné	2991 – 3203	Mauvais état (glissements de talus)
E3	Parapet en béton armé avec talus	Talus revêtu en perré maçonné	2851 – 2875	Mur très fin (stabilité douteuse)

Annexe 16 : Caractéristiques des tronçons homogènes du SEI_19

Tronçon	Tronçon fonctionnel	Typologie d'ouvrage	Type de soutènement (si pertinent)	PM début (m) – PM fin (m)	Commentaire
A	TF3 TF4 TF5 TF10 TF10	Murette en béton armé	Pas de soutènement, murette éloignée de la berge	1868 – 1873 ; 2394 – 2929 ; 3209 – 3401 ; 7845 – 7912 ; 8040 – 8137	
B	TF6	Murette en briques	Pas de soutènement, murette éloignée de la berge	3651 – 3939	Mauvais état
C	TF10 TF10	Parapet en béton armé avec talus	Talus revêtu en pavés béton secs	7798 – 7845 ; 7912 – 8040	
D1	TF1 TF1-TF2 TF3 TF4 TF8 TF9-TF10	Parapet en béton armé avec talus	Talus revêtu en perré maçonné	970 – 1018 ; 1038 – 1449 ; 1515 – 1805 ; 2220 – 2295 ; 5963 – 6489 ; 7264 – 7798	
D2	TF8-TF9	Parapet en béton armé avec talus	Talus revêtu en perré maçonné	6489 – 7208	Mauvais état (mur fin et fissuré)
D3	TF4 TF7	Parapet en béton armé avec talus	Talus revêtu en perré maçonné	2132 – 2220 4000 – 4390	Mauvais état (cavités, affaissements de talus, gonflements)
E	TF8	Parapet en béton armé partiellement en console avec talus	Talus non revêtu	5932 – 5963	
F	TF7	Parapet en béton armé avec plateforme en console	Mur vertical béton armé	4575 – 4681	
G	TF7 TF7	Mur en béton armé sur quai poids	Quai poids	4390 – 4575 ; 4681 – 5073	Mur de soutènement de la route sur une certaine longueur
H	TF3-TF4	Mur en béton armé sur quai poids	Palplanches	1873 – 2132	Mur de soutènement de la route
I	TF4	Parapet en béton armé avec deux talus	Talus revêtus en perré maçonné/béton projeté	2295 – 2390	

J	TF2-TF3	Parapet en béton armé avec deux quais	Talus revêtus en perré maçonné, très raides	1454 – 1515	
K1	TF0	Mur en béton armé avec quai et talus	Talus revêtu en dalles maçonnées	0 – 60	Mur de soutènement de la route
K2	TF0-TF1	Mur en béton armé avec quai et talus	Talus revêtu en perré maçonné	60 – 970	Mur de soutènement de la route ; mauvais état (tassements, affaissements, cavités...)

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Diplôme(s) : Ingénieur de l'ENGEES

Master 2 Géographie, Aménagement, Environnement et Développement

Spécialité : Master Géographie, Aménagement, Environnement et Développement – Université de Strasbourg / Parcours : Fonctionnement des Environnements Ruraux et Naturels

Auteur : Justine BONNIN

Année : 2021

Titre : Analyse des risques d'inondation au niveau des systèmes d'endiguement des Hauts-de-Seine (92) dans le cadre d'une étude de dangers

Nombre de pages texte : 76 annexes : 13

Nombre de références bibliographiques : 36

Structure d'accueil : ISL Ingénierie, Paris (75)

Maître de stage : Alexandra MICHAUD

Résumé :

Ce mémoire est une étude des risques d'inondation au niveau de trois systèmes d'endiguement du département des Hauts-de-Seine. La construction d'un modèle en 2D a permis de simuler différents scénarii d'inondation grâce au logiciel de modélisation TELEMAC-2D. Les scénarii nominaux ont permis d'établir un niveau de protection assurant ainsi la protection de plusieurs milliers de personnes le long des digues. Les nombreux scénarii de défaillance simulés prouvent que un mauvais entretien des digues ou une mauvaise gestion lors des crues peuvent entraîner des inondations toutes aussi importantes voire plus importantes que s'il n'y avait pas de digue.

Mots-clés : cours d'eau, inondation, maillage, modélisation, niveau de protection, risques naturels, simulation, systèmes d'endiguement, TELEMAC-2D, zone inondable