

Syndicat Interdépartemental



du SAGE de la Nonette



14DHF001

Version n°5

Avril 2016



# Étude de dangers

Digues de Senlis et Villemétrie

**SAFEGE**  
*Ingénieurs Conseils*



SIÈGE SOCIAL  
PARC DE L'ÎLE - 15/27 RUE DU PORT  
92022 NANTERRE CEDEX  
Agence de NANTERRE

## RÉSUMÉ NON-TECHNIQUE

---

Le système de digues étudié dans le présent rapport est constitué des digues de Villemétrie, mesurant environ 1100 m, et de Senlis, mesurant environ 350 m, situées en rive gauche de la Nonette et localisée dans la commune de Senlis.

La digue dite « digue de la Nonette à Senlis » est propriété de 21 propriétaires publics et privés. La gestion et l'exploitation de ce domaine sont réalisées par le SISN.

**L'arrêté préfectoral du 13 mars 2013** portant sur la digue de Villemétrie et la digue de Senlis qui longe la Nonette a classé ce système d'endiguement en **classe C** comme ouvrage présentant une hauteur supérieure à 1 m et une zone protégée comprenant plus de 10 personnes.

La digue de Senlis mesure de 1.8 à 2.9 m de haut et a une crête d'une largeur diminuant d'amont en aval pour passer de 4 m de large à environ 2 m de large.

La digue de Villemétrie est plus hétérogène avec des dimensions assez variables. Elle passe d'une largeur en crête de 2.5 m pour une hauteur de 1.5 m à une largeur d'un peu plus de 3 m pour une hauteur d'environ 2 m. Les pentes du parement aval sont globalement de 3H/1V.

Les matériaux constitutifs de cette digue sont hétérogènes (limons, sablo-argileux) et de tenue mécanique médiocre. Les alluvions sous le remblai sont constituées d'alluvions récentes mécaniquement très mauvaises et d'alluvions anciennes compactes.

La zone protégée est représentée sur la figure ci-dessous :

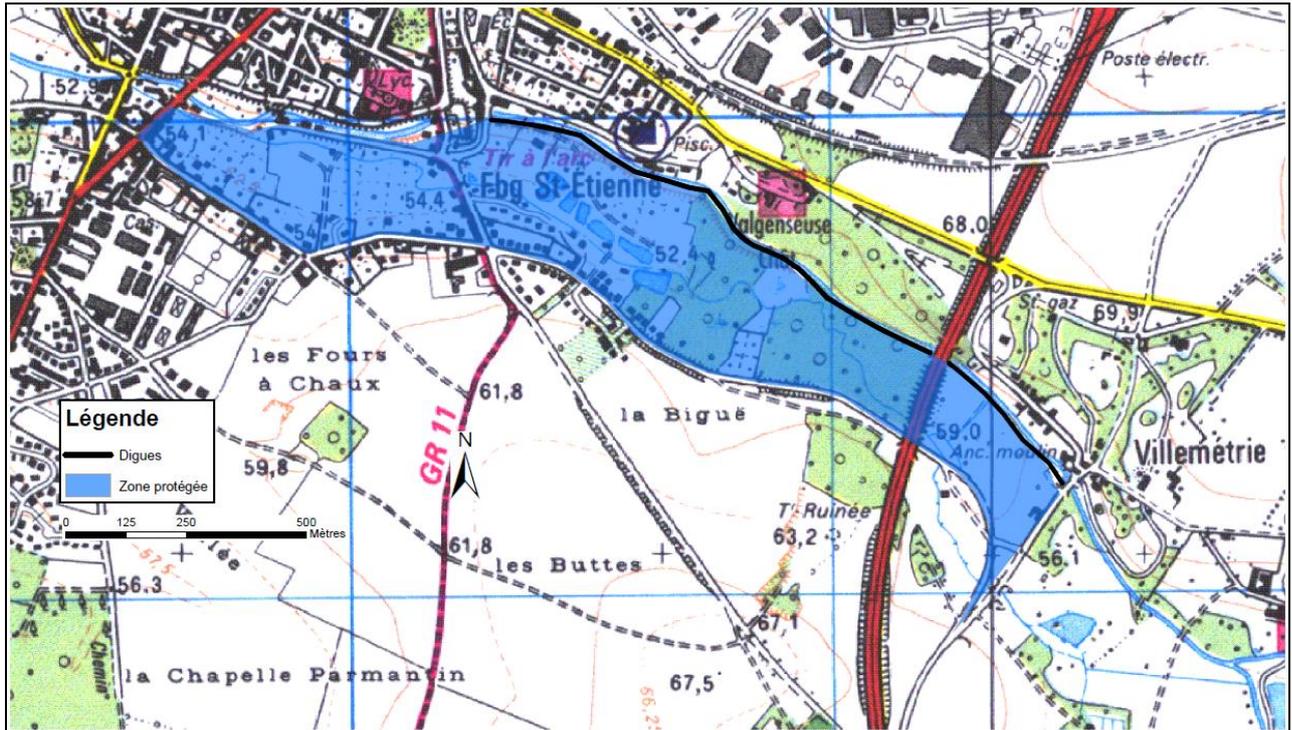


Figure 1. Localisation de la zone protégée

On obtient donc **une estimation de la population totale de 178 habitants** dans la zone protégée théorique (estimation pour 2,5 personnes par bâtiment).

Concernant le fonctionnement hydraulique du site, la digue de Senlis comprend un ouvrage de déverse vers le Saint-Urbain dont la cote est à **55.70 m NGF**. Cette cote correspond pour ce système endigué à son niveau de protection.

Néanmoins, il est également à noter que la zone de point bas liée à un glissement de talus amont (autour du PM 550 de la digue) constitue la zone de première surverse de la digue (**55.80 m NGF**). Cette cote correspond pour ce système endigué à son niveau de sûreté et son niveau de danger. Par conséquent la digue n'assure plus la protection du val pour un débit entre celui du module et de la crue biennale.

Les potentiels de dangers considérés dans cette étude résultent de la libération de tout ou partie de l'eau retenue, suite à une rupture partielle ou totale de la digue en un secteur unique pour chaque scénario.

Les conséquences potentielles de la rupture des digues de Senlis et de Villemétrie ont été estimées à partir d'une étude d'onde de rupture comprenant 4 scénarios de défaillance de la digue.

Le mécanisme de rupture de la digue considérée dans le calcul de l'onde de submersion correspond à une rupture progressive de la digue par formation d'un

renard hydraulique (scénario 1) ou d'une brèche (scénario 2, 3 et 4) avec un débit dans le Nonette correspondant au débit décennal soit pour un débit de pointe de 3,1 m<sup>3</sup>/s.

La localisation des scénarios a été déterminée à partir des observations réalisées lors de la Visite Technique Approfondie (réalisée le 18/02/2014). Des désordres d'urgence 3 ont été relevés, ceux-ci sont liés à la présence d'une ancienne zone de surverse, de glissements de talus, de renards hydrauliques par exemple. Une rupture de digue pour 4 différents points de faiblesse relevés de la digue a donc été modélisée.

L'analyse du fonctionnement existant du système d'endiguement et de son comportement prévisible en période de crue et de décrue montre que les scénarios à considérer car susceptibles de conduire à l'inondation des terrains protégés côté val sont les suivants :

- ◆ Scénario 1 : rupture par érosion interne
  - dans le corps de digue (1A)
  - dans la fondation (1B)
- ◆ Scénario 2 : rupture par glissement du talus aval en période de crue
- ◆ Scénario 3 : rupture par glissement du talus amont suite à une décrue rapide
- ◆ Scénario 4 : rupture par surverse (ouverture de brèche par érosion externe)
- ◆ Scénario 5 : rupture par érosion externe du talus amont en période de crue

**Il est à noter qu'une campagne géotechnique et des simulations de stabilité de la digue et n'ont pas été incluses dans cette Étude de Dangers. L'analyse du fonctionnement du système d'endiguement et les probabilités d'occurrence des scénarios sont donc basées sur des observations terrain et selon un jugement d'expert.**

Le croisement entre la probabilité d'occurrence d'un scénario et la gravité de ses conséquences permet de constater sa criticité. L'ensemble des scénarios analysés sont positionnés en fonction de leur criticité dans les grilles de criticité suivantes :

**Digue de la Nonette à Senlis**

Criticité			Probabilité				
			Scénario extrêmement peu probable	Scénario très peu probable	Scénario peu probable	Scénario probable	Scénario très probable
			1	2	3	4	5
Gravité	Désastreux	5					
	Catastrophique	4					
	Important	3			3	2 - 5	1A - 1B - 4
	Sérieux	2					
	Modéré	1					

**Positionnement des scénarios en fonction de leur criticité**

- Scénario 1A : rupture par érosion interne en remblai  
 Scénario 1B : rupture par érosion interne en fondation  
 Scénario 2 : rupture par glissement en période de crue  
 Scénario 3 : rupture à la suite d'une décrue  
 Scénario 4 : rupture par surverse  
 Scénario 5 : rupture par érosion externe du talus amont

Les mesures de réduction des risques portent notamment sur :

- Réalisation d'un filtre sur le parement aval de la digue au niveau des renards hydrauliques afin de stopper le phénomène. La mise en place d'un rideau de palplanches pourrait également être envisagé après analyse des phénomènes de glissement observés sur le linéaire de digue où un rideau est présent ;
- Engager des travaux de reprise complète de l'ouvrage de déverse ;
- Retaluter le parement aval et la crête des secteurs les plus abîmés et notamment au niveau des mouvements ;
- Éliminer la végétation identifiée comme dangereuse dans ce diagnostic.

---

## TABLE DES MATIERES

---

<b>1 Renseignements administratifs</b>	<b>1</b>
1.1 Propriétaire / Exploitant	1
1.2 Classement de l'ouvrage	1
1.3 Rédacteurs de l'étude de dangers	2
<b>2 Objet de l'étude</b>	<b>3</b>
2.1 Références réglementaires	3
2.2 Périmètre de l'étude	3
2.2.1 Ouvrages	3
2.2.2 Zone protégée	4
2.3 Documents de références	5
<b>3 Analyse fonctionnelle de l'ouvrage et de son environnement</b>	<b>6</b>
3.1 Analyse fonctionnelle externe – Description de l'environnement de l'ouvrage	6
3.1.1 Localisation géographique	6
3.1.2 Description de la Nonette et son bassin versant	8
3.1.2.1 Le bassin versant de la Nonette	8
3.1.2.2 La Nonette	8
3.1.2.3 Géologie	9
3.1.2.4 Hydrogéologie	10
3.1.2.5 Ouvrages hydrauliques	11
3.1.2.6 Le relief de la zone endiguée	12
3.1.3 Objectif de protection des digues de la Nonette à Senlis	14
3.1.3.1 Généralités	14
3.1.3.2 Niveau de protection actuel	15
3.1.3.3 Détermination des cotes de protection, de sûreté et de danger	18
3.1.4 Zone protégée de la digue	19
3.1.5 Caractérisation des enjeux	20
3.1.5.1 Estimation de la population présente dans la zone protégée et les alentours	20
3.1.5.2 Activités industrielles, agricoles, forestières, commerciales et touristiques susceptibles d'être impactées	21
3.1.5.3 Infrastructures susceptibles d'être impactées	22

3.1.6	Synthèse de l'analyse fonctionnelle externe/ Enjeux sensibles.....	22
<b>3.2</b>	<b>Analyse fonctionnelle interne – Description des ouvrages .....</b>	<b>23</b>
3.2.1	Caractéristiques dimensionnelles de la digue de Villemétrie.....	24
3.2.2	Caractéristiques dimensionnelles de la digue de Senlis .....	24
3.2.3	Profils en long de la digue .....	25
3.2.4	Profils en travers de la digue .....	25
3.2.5	Lithologie .....	25
3.2.6	Travaux de renforcements de la digue de Senlis réalisés en 2001 .....	25
3.2.7	Synthèse de l'analyse fonctionnelle interne .....	27
<b>4</b>	<b>Présentation de la politique de prévention des accidents majeurs (PPAM) et du système de gestion de la sécurité (SGS) .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1</b>	<b>Organisation du gestionnaire des digues .....</b>	<b>28</b>
4.1.1	Obligations réglementaires .....	28
4.1.2	Les intervenants .....	29
<b>4.2</b>	<b>Consignes écrites .....</b>	<b>30</b>
<b>4.3</b>	<b>Surveillance .....</b>	<b>31</b>
4.3.1	Organisation de l'inspection visuelle périodique .....	31
4.3.2	Rapport de surveillance .....	31
<b>4.4</b>	<b>Actions en cas d'urgence.....</b>	<b>31</b>
<b>4.5</b>	<b>Procédure d'évaluation du risque .....</b>	<b>32</b>
<b>4.6</b>	<b>Consignes d'exploitation de l'ouvrage en crue .....</b>	<b>32</b>
<b>4.7</b>	<b>Dossier d'ouvrage.....</b>	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>Identification et caractérisation des potentiels de dangers .....</b>	<b>34</b>
<b>5.1</b>	<b>Rupture de la digue de Villemétrie.....</b>	<b>34</b>
<b>5.2</b>	<b>Rupture de la digue de Senlis .....</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>Caractérisation des aléas naturels.....</b>	<b>36</b>
<b>6.1</b>	<b>Hydrologie : crues de la Nonette .....</b>	<b>36</b>
6.1.1	Données hydrologiques disponibles .....	36
6.1.1.1	Station de la Nonette à Courteuil (Saint Nicolas d'Acy).....	36
6.1.1.2	Stations hydrométriques avoisinantes .....	37
6.1.2	Estimation du débit décennal au droit de la zone d'étude .....	40
6.1.3	Estimation des débits supérieurs au débit décennal.....	40
6.1.4	Construction d'hydrogrammes synthétiques .....	42
<b>6.2</b>	<b>Les séismes.....</b>	<b>44</b>

6.3	Les vents.....	44
<b>7</b>	<b>Étude accidentologique et retour d'expérience.....</b>	<b>48</b>
7.1	Accidents survenus sur des installations similaires.....	48
7.1.1	Digues en général .....	48
7.2	Accidents, incidents, évolutions lentes survenues sur les digues.....	50
7.2.1	Désordres relevés lors de la réalisation de la Visite Technique Approfondie (VTA).....	50
7.2.2	Accidents, incidents, évolutions lentes relevés par le syndicat de la Nonette .....	52
7.2.2.1	Travaux été 2012.....	52
7.2.2.2	Travaux printemps 2013.....	53
7.2.3	Événements naturels exceptionnels .....	54
7.3	Gestion du retour d'expérience .....	54
<b>8</b>	<b>Identification et caractérisation des risques en termes de probabilité d'occurrence, d'intensité et de cinétique des effets, et de gravité des conséquences.....</b>	<b>55</b>
8.1	Démarche générale .....	55
8.1.1	L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) .....	56
8.1.2	La modélisation des scénarios de défaillance.....	56
8.1.3	L'analyse de criticité .....	57
8.2	Identification des scénarios de défaillance .....	59
8.3	Modélisation et évaluation de l'occurrence des scénarios de défaillance des digues de la Nonette .....	60
8.3.1	Scénario 1 : Rupture de digue par érosion interne.....	60
8.3.1.1	Scénario 1A : Érosion interne dans le corps de digue .....	60
8.3.1.2	Scénario 1B : Érosion interne des matériaux de fondation.....	64
8.3.2	Scénario 2 : Rupture de digue par glissement du talus aval en période de crue .....	67
8.3.3	Scénario 3 : Rupture de digue par glissement du talus amont suite à une décrue.....	70
8.3.4	Scénario 4 : Rupture de digue par surverse .....	73
8.3.5	Scénario 5 : Rupture par érosion externe du talus amont en période de crue .....	75
8.4	Évaluation des conséquences potentielles : étude d'onde de rupture.....	79
8.4.1	Rappel sur le diagnostic de la VTA.....	79
8.4.2	Détermination des zones de brèche .....	80
8.4.3	Résultats de la simulation 1 .....	81

8.4.3.1	Hydrogramme de rupture .....	81
8.4.3.2	Propagation des flux dans la zone modélisée en 2D.....	82
8.4.3.3	Cartographies des isohauteurs et isovitesses maximales dans la zone 2D.....	85
8.4.3.4	Cartographies de l'enveloppe d'inondation dans la zone 1D .....	87
8.4.4	Résultats de la simulation 2 .....	88
8.4.4.1	Hydrogramme de rupture .....	88
8.4.4.2	Propagation des flux dans la zone modélisée en 2D.....	88
8.4.4.3	Cartographies des isohauteurs et isovitesses maximales dans la zone 2D.....	92
8.4.4.4	Cartographies de l'enveloppe d'inondation dans la zone 1D .....	93
8.4.5	Résultats de la simulation 3 .....	94
8.4.5.1	Hydrogramme de rupture .....	94
8.4.5.2	Propagation des flux dans la zone modélisée en 2D.....	94
8.4.5.3	Cartographies des isohauteurs et isovitesses maximales dans la zone 2D.....	98
8.4.5.4	Cartographies de l'enveloppe d'inondation dans la zone 1D .....	99
8.4.6	Résultats de la simulation 4 .....	100
8.4.6.1	Hydrogramme de rupture .....	100
8.4.6.2	Propagation des flux dans la zone modélisée en 2D.....	100
8.4.6.3	Cartographies des isohauteurs et isovitesses maximales dans la zone 2D...	104
8.4.6.4	Cartographies de l'enveloppe d'inondation dans la zone 1D .....	105
8.5	Synthèse – Criticité des scénarios .....	106
<b>9</b>	<b>Étude de réduction des risques .....</b>	<b>108</b>
9.1	Efficacité du système digues .....	108
9.2	Amélioration des barrières de sécurité .....	108
9.2.1	Inspection visuelle .....	108
9.2.2	Entretien de la végétation .....	109
9.2.3	Ouvrages incrustés.....	109
9.2.4	Consignes .....	109
9.2.5	Actions en cas d'urgence.....	110
9.3	Travaux de réparation ou confortement .....	110
9.4	Criticité résiduelle après mise en place des mesures proposées de réduction des risques.....	114
<b>10</b>	<b>Cartographie .....</b>	<b>116</b>

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1. Localisation de la zone protégée .....	2
Figure 1. Classes des digues selon les caractéristiques géométriques et la population protégée .....	1
Figure 2. Localisation du système d'endiguement - Source : SISN .....	4
Figure 3. Localisation de la zone protégée dans l'arrêté préfectoral du 13 mars 2013 .....	5
Figure 4. Localisation des digues de la Nonette à Senlis .....	7
Figure 5. La Nonette et son bassin versant .....	9
Figure 6. Localisation des levés topographiques réalisés au droit de la digue de la Nonette.....	12
Figure 7. Profils en travers amont et aval levés au droit de la digue de la Nonette .....	13
Figure 8. Ensemble des levés topographiques effectués par HYDROTOPO .....	14
Figure 10. Localisation de la zone protégée .....	19
Figure 11. Cadastre parcellaire de la zone d'étude.....	20
Figure 12. Occupation du sol sur la zone d'étude – Source : CORINE Land Cover 2006 .....	21
Figure 13. Identification des voiries dans la zone d'étude .....	22
Figure 15. Localisation des simulations de rupture de digue .....	35
Figure 16. Échantillon des débits instantanés mesurés à la station de Courteuil sur la Nonette - Source : Banque Hydro	37
Figure 18. Débits décennaux calculés à différentes stations hydrométriques en fonction de la superficie du bassin versant drainé – Source : Banque Hydro .....	39
Figure 19. Exemples de résultat obtenu par la mise en œuvre du Gradex brut et du Gradex esthétique	42
Figure 20. Hydrogramme de crue pour la période de retour 10 ans par la méthode de SOCOSE .....	43
Figure 21. Carte d'aléa sismique de la France –nouveau zonage (source : www.planseisme.fr) .....	44
Figure 22. Carte de vitesse moyenne du vent (Source : www.valceane.com) .....	45
Figure 23. Carte des zones de vents de la France (Carte NV65).....	46
Figure 25 : Photos de la fuite sur la digue de Villemétrie (source : SISN, juillet 2012).....	52
Figure 26 : Photo des travaux sur la fuite de la digue de Villemétrie (source : SISN, août 2012).....	53
Figure 27 : Photos des dommages engendrés par la surverse sur la digue de Villemétrie (source : SISN, mars 2013)	53
Figure 28 : Photos suite aux travaux de restauration sur la digue de Villemétrie (source : SISN, juin 2013)	54
Figure 8-1 : Grille de criticité .....	58
Figure 2. Arbre d'événements – Scénario 1A : rupture de la digue De la Nonette par érosion interne dans le corps de digue.....	61
Figure 3. Quantification du scénario 1A : rupture de la digue par érosion interne .....	64
Figure 4. Arbre d'événements – Scénario 1B : rupture de la digue de la Nonette par érosion interne dans la fondation	65
Figure 5. Quantification du scénario 1B : rupture de la digue par érosion interne en fondation .....	67
Figure 6. Arbre d'événements – Scénario 2 : rupture de la digue De la Nonette par glissement en période de crue	68
Figure 7. Quantification du scénario 2 : rupture de la digue par glissement.....	70
Figure 8. Arbre d'événements – Scénario 3 : rupture de digue De la Nonette par glissement du talus amont suite à une décrue.....	71
Figure 9. Quantification du scénario 1B : rupture de la digue par glissement du talus amont .....	72

Figure 10. Arbre d'événements - Scénario 4 : rupture par surverse de la digue de la Nonette.....	73
Figure 11. Quantification du scénario 4 : rupture de la digue par surverse.....	74
Figure 12. Arbre d'événements – Scénario 5 : rupture de digue de la Nonette par érosion externe.....	76
Figure 13. Quantification du scénario 5 : rupture de digue de la Nonette par érosion externe .....	77
Figure 14. Localisation des simulations de rupture de digue .....	80
Figure 15. Hydrogramme passant par la brèche - Simulation 1 .....	81
Figure 16. Hydrogramme passant par la brèche - Simulation 2.....	88
Figure 17. Hydrogramme passant par la brèche - Simulation 3.....	94
Figure 18. Hydrogramme passant par la brèche - Simulation 4.....	100
Figure 19. Positionnement des scénarios en fonction de leur criticité .....	107
Figure 20. Positionnement des scénarios en fonction de leur criticité .....	115

## LISTE DES ANNEXES

---

Annexe 1 **Propriétaires de la digue de la Nonette à Senlis (Extrait du cadastre)**

Annexe 2 **Levés topographiques réalisés par un géomètre**

Annexe 3 **Profils en travers des digues de la Nonette**

Annexe 4 **Construction du modèle et hypothèses hydrauliques**

## 1

## Renseignements administratifs

### 1.1 Propriétaire / Exploitant

La digue dite « digue de la Nonette à Senlis » est propriété de 21 propriétaires publics et privés donc les coordonnées sont précisées en **Annexe 1**.

La gestion et l'exploitation de ce domaine sont réalisées par le SISN :

Syndicat Interdépartemental du SAGE de la Nonette (SISN)  
11, rue de Meaux  
60 300 MONT-L'ÉVÊQUE  
Tél : 03.44.32.99.80

### 1.2 Classement de l'ouvrage

Les digues de protection contre les inondations construites latéralement aux cours d'eau sont considérées comme des digues au regard du décret du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques.

Les classes de digues définies par le code de l'environnement sont présentées dans l'article R214-112 :

CLASSE	CARACTÉRISTIQUES DE L'OUVRAGE et populations protégées
A	Ouvrage pour lequel $H \geq 1$ et $P \geq 50\ 000$
B	Ouvrage non classé en A et pour lequel : $H \geq 1$ et $1\ 000 \leq P < 50\ 000$
C	Ouvrage non classé en A ou B et pour lequel : $H \geq 1$ et $10 \leq P < 1\ 000$
D	Ouvrage pour lequel soit $H < 1$ , soit $P < 10$

Figure 1. Classes des digues selon les caractéristiques géométriques et la population protégée

Où :

- H : la hauteur de l'ouvrage exprimée en mètres et définie comme la plus grande hauteur mesurée verticalement entre le sommet de l'ouvrage et le terrain naturel à l'aplomb de ce sommet ;
- P : Population résidant dans la zone protégée par la digue de façon permanente et saisonnière.

**L'arrêté préfectoral du 13 mars 2013** portant sur la digue de Villemétrie, qui s'étend de la rue du pont Saint-Urbain à l'autoroute A1 et la digue de Senlis qui longe la Nonette de l'Autoroute A1 à la rue du Moulin Saint-Etienne a classé ce système d'endiguement en **classe C** comme ouvrage présentant une hauteur supérieure à 1 m et une zone protégée comprenant plus de 10 personnes.

## 1.3 Rédacteurs de l'étude de dangers

### **SAFEGE Ingénieurs Conseils**

Parc de l'Île - 15-27 rue du Port - 92022 Nanterre

Tél : +33.(0)1.46.14.71.00

Fax : +33.(0)1.47.24.77.88

Email: [contact@safege.fr](mailto:contact@safege.fr)

Site Web: <http://www.safege.fr>

## 2

# Objet de l'étude

## 2.1 Références réglementaires

Textes applicables :

- décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques et modifiant le code de l'environnement ;
- articles R. 214-115 à R. 214-117 du code de l'environnement ;
- arrêté ministériel du 29 février 2008, fixant les prescriptions relatives à la sécurité et à la sûreté des ouvrages hydrauliques ;
- arrêté ministériel du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu.

L'arrêté préfectoral du 13 mars 2013 prescrit la réalisation d'une étude de dangers sur le système d'endiguement formé par la digue de Villemétrie et la digue de Senlis avant le 31 décembre 2014.

La présente étude constitue la première étude de dangers pour un ouvrage existant.

Enfin, pour information, aucun Plan de Prévention des Risques d'Inondation de la Nonette n'a été réalisé à ce jour sur la Nonette.

## 2.2 Périmètre de l'étude

### 2.2.1 Ouvrages

Le système analysé dans la présente étude est constitué des digues de Villemétrie, mesurant environ 1100 m, et de Senlis, mesurant environ 350 m, situées en rive gauche de la Nonette et localisée dans la commune de Senlis.

Localisation de l'ouvrage en coordonnées Lambert 93 :

X1 = 670 284,8 m ; Y1=6 900 355,1 m ;

X2 = 671 204,9 m ; Y2 = 6 899 851,7 m.

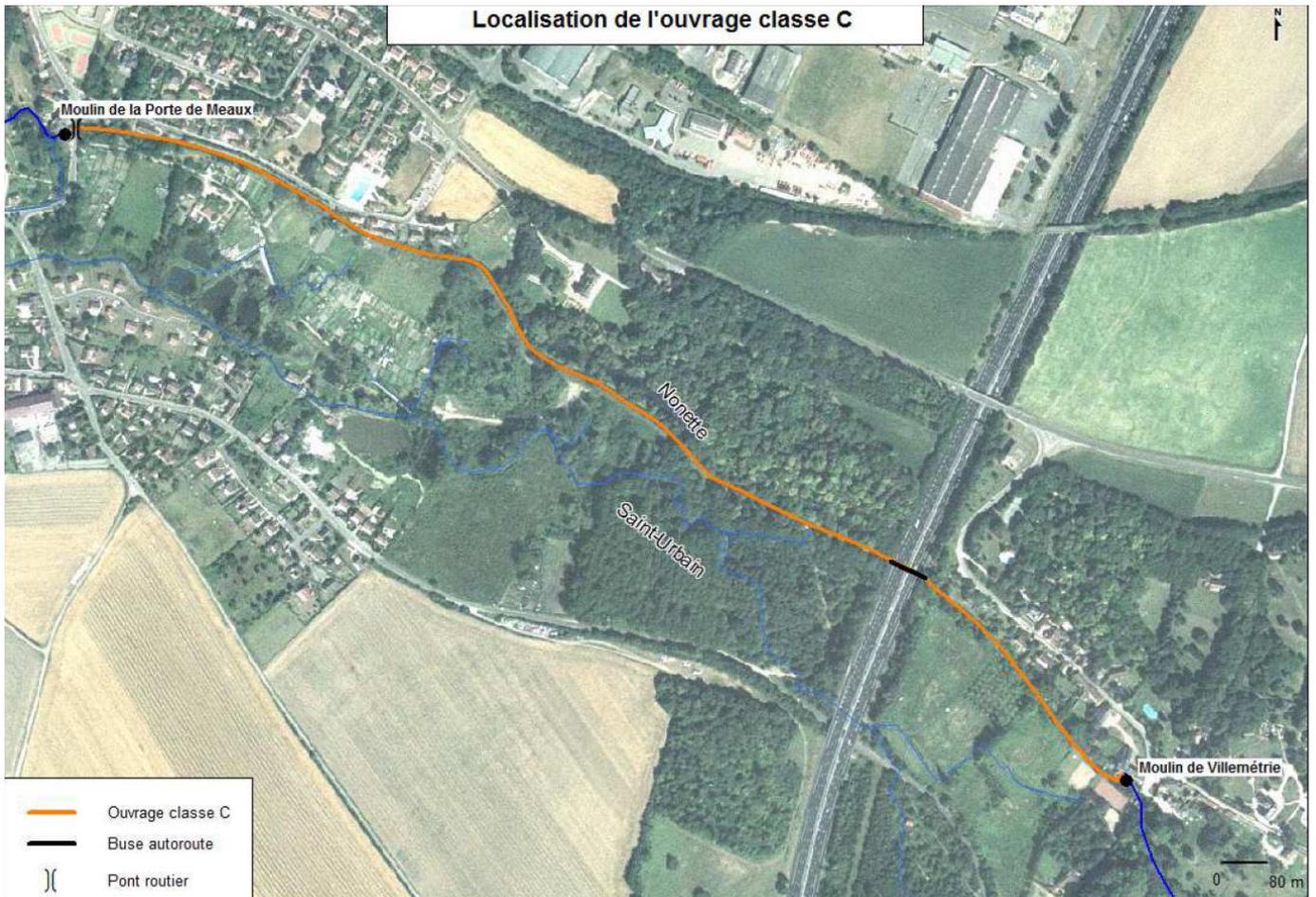


Figure 2. Localisation du système d'endiguement - Source : SISN

### 2.2.2 Zone protégée

La zone protégée est, selon l'annexe 1 de la circulaire du 8 juillet 2008, la zone soustraite à l'inondation qui serait causée par la crue de projet de protection de l'ouvrage. C'est en d'autres termes la zone qui serait submergée en l'absence du système d'endiguement pour un débit correspondant au débit de plein bord du lit endigué.

L'arrêté préfectoral du 13 mars 2013 définit une évaluation de la zone protégée qui est représentée en bleu sur la cartographie ci-après.

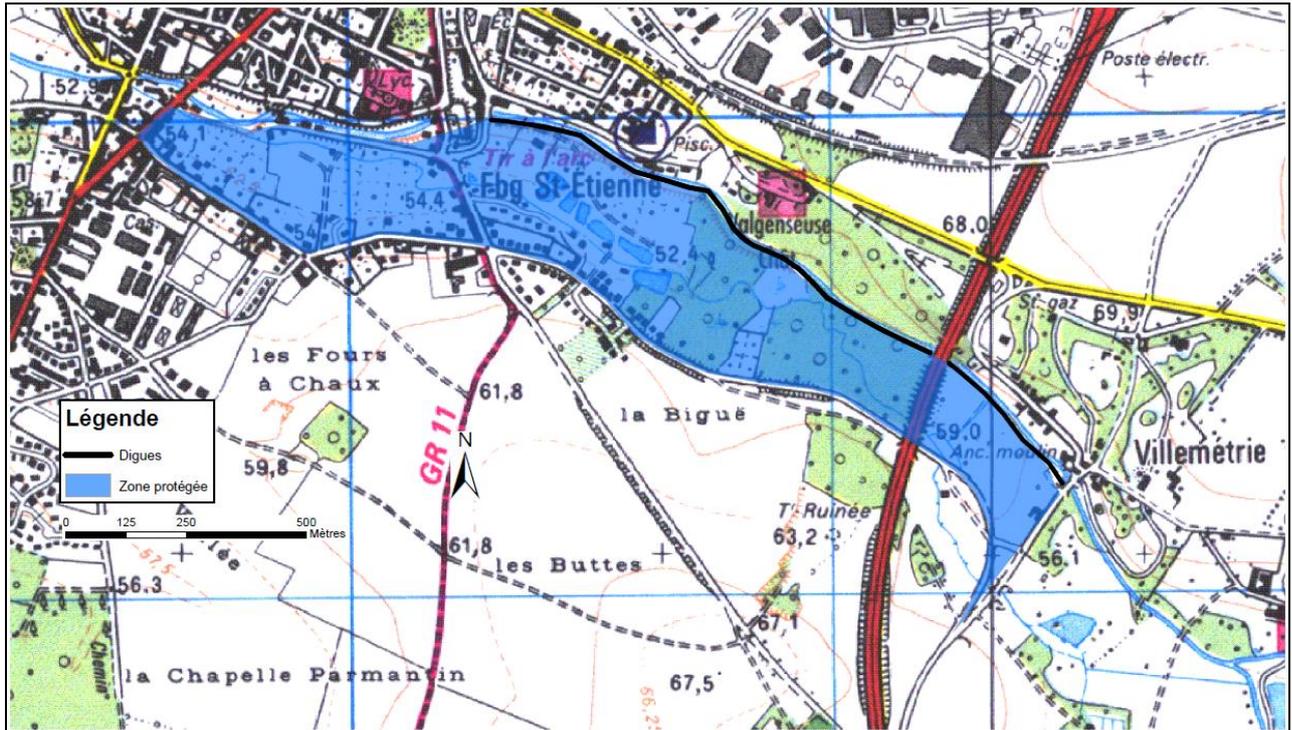


Figure 3. Localisation de la zone protégée dans l'arrêté préfectoral du 13 mars 2013

## 2.3 Documents de références

La présente étude s'est appuyée sur différents documents lors de sa réalisation. Ces documents sont cités ci-dessous :

- ✓ [1] – « Révision du SAGE de la Nonette – Phase 1 : Actualisation de l'état des lieux et du diagnostic », SISN, SAFEGE, approuvé par la CLE le 03/09/2013 ;
- ✓ [2] – « Dossier d'ouvrage des digues de classe C de Senlis », SISN, 2013 ;
- ✓ [3] – « Consignes écrites des digues de classe C de Senlis », SISN, 2013 ;
- ✓ [4] – « Diagnostic initial de sûreté et compte-rendu de VTA – Digues de Senlis et de Villemétrie », SISN, SAFEGE, Avril 2014 ;
- ✓ [5] – « DCE – Renforcement de la berge rive gauche à Senlis entre l'autoroute A1 et le Moulin Saint-Etienne - Profils en travers », SISN, SOGREA, 1997 ;
- ✓ [6] – « Étude de l'amélioration des conditions d'écoulement de la Nonette », Syndicat Intercommunal du Bassin versant de la Nonette, Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1983-1984.

## 3

# Analyse fonctionnelle de l'ouvrage et de son environnement

L'analyse fonctionnelle de l'ouvrage permet de recenser les différents composants de l'ouvrage, ce qui permettra de définir les relations et interactions les uns par rapport aux autres et par rapport à leur environnement. Cette analyse aboutira à la définition des fonctions du système et de ses composants.

## 3.1 Analyse fonctionnelle externe – Description de l'environnement de l'ouvrage

Les objectifs principaux de cette analyse sont les suivants :

- Mettre en évidence les fonctions du système ;
- Définir les relations et interactions de type impacts/enjeux par rapport aux différents milieux extérieurs.

### 3.1.1 Localisation géographique

Le système d'endiguement étudié dans la présente étude de dangers est situé sur la commune de Senlis, en région Picardie dans le département de l'Oise. Sa localisation est présentée sur la figure ci-après.

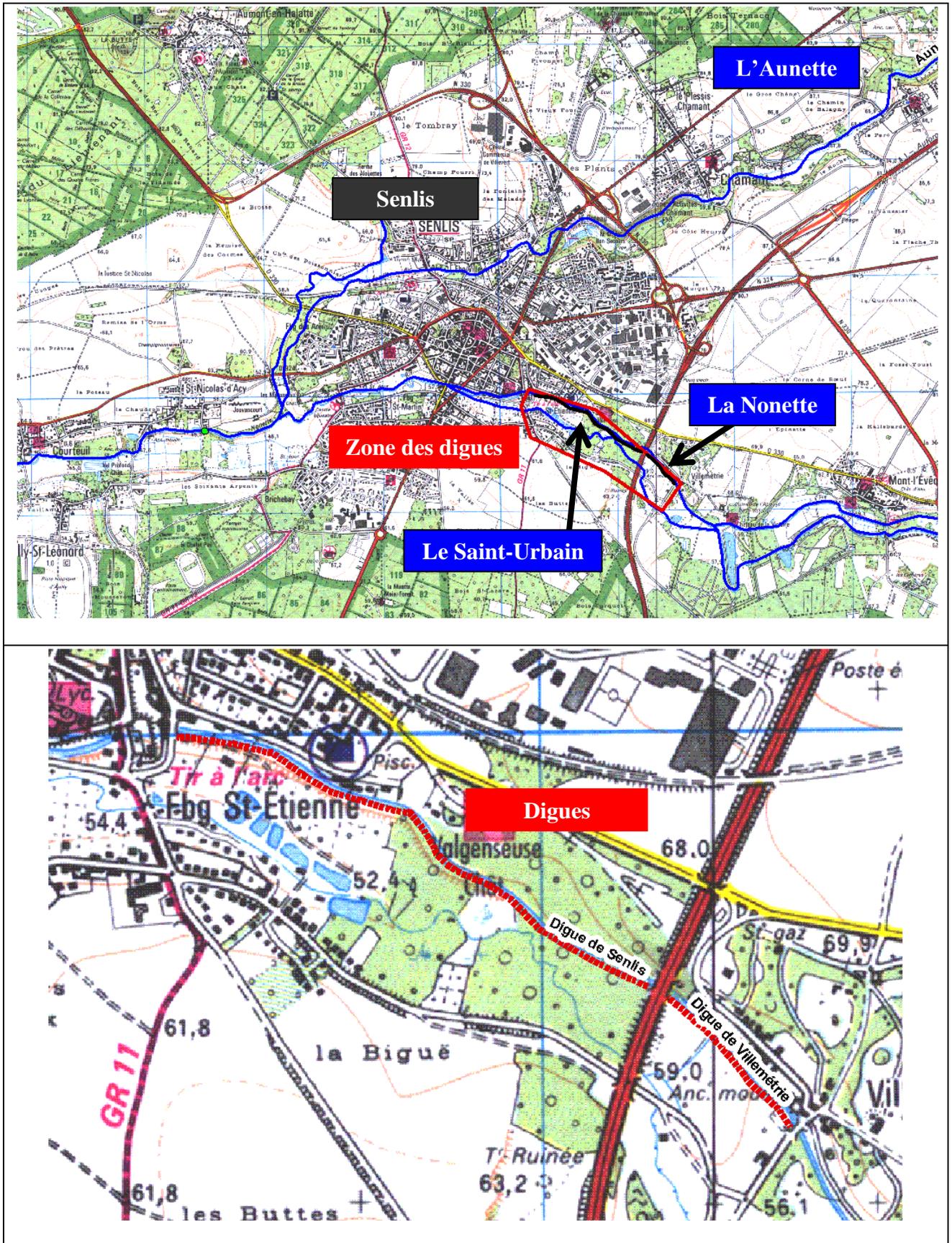


Figure 4. Localisation des digues de la Nonette à Senlis

## 3.1.2 Description de la Nonette et son bassin versant

### 3.1.2.1 Le bassin versant de la Nonette

D'une superficie de 410 km<sup>2</sup> environ, le bassin versant de la Nonette s'étend sur deux départements, l'Oise et la Seine-et-Marne, et couvre deux régions la Picardie et l'Île-de-France. Il est composé de 52 communes, 46 dans l'Oise et 6 en Seine-et-Marne.

Ce bassin versant est drainé par un linéaire de 181 km de cours d'eau environ, dont le chevelu hydrographique relativement peu développé est découpé en quatre masses d'eau principales.

Tableau 1. Caractéristiques de la Nonette et de ses affluents

Cours d'eau	Linéaire (km)
Nonette	41
Launette	21
Aunette	14
Ru de Coulerly	3

La densité de drainage (linéaire total / surface drainée) est de l'ordre de 0,2 km<sup>-1</sup>, ce qui traduit un développement très limité du chevelu et un écoulement centralisé.

Le point le plus haut se situe au nord du bassin versant, sur les communes de Villeneuve-sur-Verberie et Villers-Saint-Frambourg. Il atteint une altitude de 220 m environ. Le point le plus bas du bassin versant se situe sur la commune de Gouvieux, au niveau de la confluence avec l'Oise. Il atteint une altitude de 30m environ.

### 3.1.2.2 La Nonette

La Nonette est une rivière du département de l'Oise et de la région Picardie. Elle prend sa source à Nanteuil-le-Haudouin, à une altitude de 97m. Après un parcours de 41 km, d'est en ouest, elle se jette dans l'Oise au niveau de la commune de Gouvieux à 30 m d'altitude environ. La pente moyenne du cours d'eau, de l'ordre 0,16%, est douce et le dénivelé est d'environ 67 m.

La rivière traverse 13 communes dont la ville de Senlis et arrose le parc du Château de Chantilly où elle est canalisée.

Les deux principaux affluents de la Nonette sont l'Aunette et la Launette.

Le linéaire de la Nonette situé dans la zone d'intérêt de la présente étude est caractérisé par un lit perché artificialisé, une digue ayant été construite dans le but principal d'alimenter d'anciens moulins.

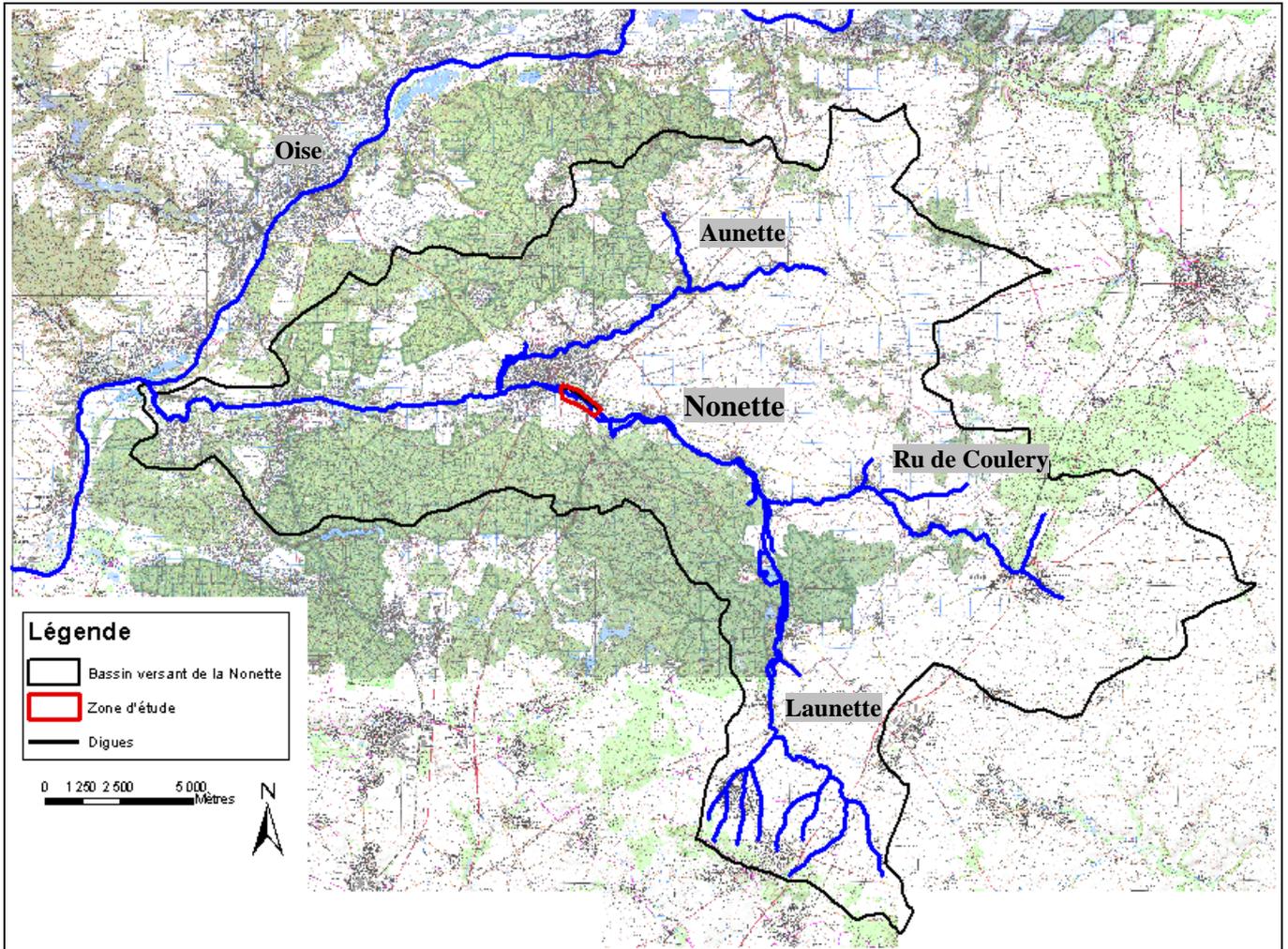


Figure 5. La Nonette et son bassin versant

### 3.1.2.3 Géologie

La vallée de la Nonette s'établit sur le plateau du Valois-Multien, formé par les calcaires du Lutétien et dominé par des buttes de formations du Bartonien et de l'Oligocène (Stampien), alignées selon une direction nord-ouest / sud-est.

Les principales formations rencontrées sur le bassin versant de la Nonette sont présentées ci-après de la plus ancienne à la plus récente.

- **Le secondaire constitué de la Craie Séno-turonienne.** Ces formations constituent le substratum du bassin versant de la Nonette.
- **Le tertiaire avec :**
  - ✓ **Le Thanétien ou les sables de Bracheux.** Ce sont des sables marins assez fins de couleur gris vert et glauconieux. Cette formation n'affleure pas sur le bassin versant de la Nonette.

- ✓ **L'Yprésien** pour laquelle deux niveaux sont distingués : l'inférieur (Sparnacien) constitué de différents niveaux d'argiles, présents dans les vallées de la Nonette et de l'Oise et le supérieur (Cuisien).
- ✓ **Le Lutétien** constitue la base solide et compacte des assises de la plateforme structurale du Nord-est de l'Île-de-France. Cet étage est subdivisé en trois parties : le Lutétien inférieur (Nummulites), le lutétien moyen (calcaire grossier) et le Lutétien supérieur (calcaire à Cérithes puis Marnes et Caillasses).
- ✓ **Le Bartonien** décomposé en trois couches. La couche inférieure ou Auversien comporte trois faciès : les sables d'Auvers, les sables et grès de Beauchamp et enfin les argiles de Villeneuve-sur-Verberie. Le Bartonien moyen ou Marinésien a trois formations : de Ducy, les sables de Mortefontaine et les calcaires de Saint-Ouen. Cette formation est présente dans la haute vallée de la Nonette sur la montagne de Rosière, au Pont Pagnotte, au mont Alta et à la Haute Pommeraie. Enfin le Bartonien supérieur ou le Ludien composé de marnes supragypseuses. Ces formations couronnent les collines du bassin versant.
- ✓ **Le Stampien** affleure sur les buttes en limites nord et sud du bassin versant, au niveau du Mont Pagnotte et à la montagne Saint-Christophe : Cette formation comporte trois éléments bien individualisés les marnes à Cyrènes (inférieur), les sables de Fontainebleau (moyen) et les meulières de Montmorency (supérieur).
- **Les dépôts récents de l'ère quaternaire sont constitués :**
  - ✓ D'éboulis et de colluvions de versants et de fonds de vallons, circonscrits sur la haute vallée de la Launette (Othis, Rouvres et Dammartin-en-Goële) ;
  - ✓ D'alluvions modernes composées essentiellement de sables cuisiers, de colluvions remaniées et de tourbes qui remplissent les fonds de vallée humide ;
  - ✓ De sables dunaires et fluviéo-éolien, notamment sur la butte de la Haute pommeraie, dans la forêt de Chantilly et de Coye.
  - ✓ Des limons sur le plateau calcaire structural du Valois situé entre l'Aunette, la haute vallée de la Nonette et celui entaillé par Launette.

### 3.1.2.4 Hydrogéologie

Le bassin versant de la Nonette est composé de plusieurs aquifères superposés, séparés par des niveaux argileux plus ou moins imperméables et continus. Les deux aquifères principalement exploités sont :

- **L'aquifère complexe du Calcaire de Saint-Ouen et des Sables de Beauchamp**, libre sous la surface de plateau (Bartonien Inférieur – Auversien) ;
- **L'aquifère calcaires du Lutétien et des sables de Cuise**, qui forme l'aquifère complexe du Valois-Soissonnais ou de l'Éocène moyen (Yprésien Supérieur et Lutécien moyen et inférieur). La couche imperméable formée par les argiles du

Laon a disparu (érosion) et les sables de Cuise sont directement en contact avec les calcaires du Lutécien. Ces formations contiennent ainsi une seule nappe.

Par ailleurs, **la nappe perchée des sables de Fontainebleau** est présente localement dans les formations superficielles. Elle assure l'alimentation des sources et des fontaines à la périphérie du Mont Pagnotte.

Enfin, **la nappe captive de la craie et des sables de Bracheux** est localement exploitée pour l'Alimentation en Eau Potable sous le plateau de Chamant. La nappe n'entretient aucune liaison avec les vallées humides et ne participe pas à l'alimentation de la Nonette.

### 3.1.2.5 Ouvrages hydrauliques

La Nonette et ses affluents sont des rivières particulièrement artificialisées et jalonnées de nombreux ouvrages hydrauliques. Une partie de ces ouvrages est recensée dans le Référentiel des Obstacles à l'Écoulement (ROE), établi par l'ONEMA. Ce référentiel ne constitue pas un inventaire exhaustif des ouvrages présents sur le territoire. Il liste uniquement les principaux ouvrages infranchissables identifiés sur les cours d'eau. Les ouvrages hydrauliques recensés dans le ROE sont présentés dans le tableau ci-après.

Tableau 2. Référentiel des obstacles à l'écoulement (Source : ONEMA)

Cours d'eau	Commune	Nom obstacle	Vannage
Fossé du Prince	Avilly-Saint-Léonard	Seuil du marais – ouvrage Grenelle	
	Avilly-Saint-Léonard	Buse de l'ancienne blanchisserie – ouvrage Grenelle	
Nonette	Avilly-Saint-Léonard	Ancien moulin de la blanchisserie	
	Avilly-Saint-Léonard	Chute d'Avilly	
	Baron	Ancien moulin	
	Borest	Pont de Saint Martin	
	Borest	Ancien moulin	
	Chantilly	Pavillon de Manse - Ancienne machine hydro	Vannes levantes
	Chantilly	Parc de Chantilly - Sortie du grand canal	Vannes levantes
	Courteuil	Moulin de la chaussée	
	Courteuil	Moulin de Courteuil	Vannes levantes
	Courteuil	Moulin Denise	
	Fontaine-Chaalis	Ancien moulin	Vannes levantes
	Gouvieux	Ancien moulin de Laurette	Vannes levantes
	Gouvieux	Moulin de Gouvieux	Vannes levantes
	Gouvieux	Ancien moulin de Chaumont	Vannes levantes
	Gouvieux	La chaussée	
	Gouvieux	Retenue pour les canaux du parc du château	
	Gouvieux	Ancien moulin Lagache	Vannes levantes
	Gouvieux	Ancien moulin-ruines	
	Gouvieux	Ancienne usine OGER - Seuil	Vannes levantes
	Gouvieux	Ancienne usine OGER - Seuil	Vannes levantes
	Gouvieux	Usine	
	Mont l'Évêque	Seuil du château de la victoire	Vannes levantes
	Mont l'Évêque	Seuil pour étang château	
Montlognon	Ancien moulin	Vannes levantes	
Nanteuil-le-Haudouin	Buse		

Cours d'eau	Commune	Nom obstacle	Vannage
	Nanteuil-le-Haudouin	Seuil du ru Marquant	
	Nanteuil-le-Haudouin	Le petit Moulin	Vannes levantes
	Senlis	Ancien moulin de Villemétrie	Vannes levantes
	Senlis	Ancien moulin de Jouvancourt	Vannes levantes
	Senlis	Buse	
	Senlis	Ancien moulin du Roi	
	Senlis	Ancien moulin Saint Etienne	
	Versigny	Ancien moulin	
	Versigny	-	
	Versigny	-	

Le ROE identifie 38 ouvrages infranchissables sur la Nonette. Ils correspondent en majorité à des anciens moulins et sont les témoins d'une ancienne exploitation de l'énergie hydraulique sur le territoire. L'abandon de l'énergie hydraulique au fil des années s'est accompagné de l'abandon de l'entretien des ouvrages.

### 3.1.2.6 Le relief de la zone endiguée

Des levés topographiques ont été effectués le 12/02/2014 par le prestataire HYDROTOPO notamment pour caractériser le relief de la vallée de la Nonette.

La figure ci-après présente la localisation des levés réalisés au droit des digues. L'ensemble de données topographiques levées au droit des digues est consultable en Annexe 2 du rapport. L'annexe 3 représente les profils en travers levés sur la digue de la Nonette uniquement, dans un souci de lisibilité des données.

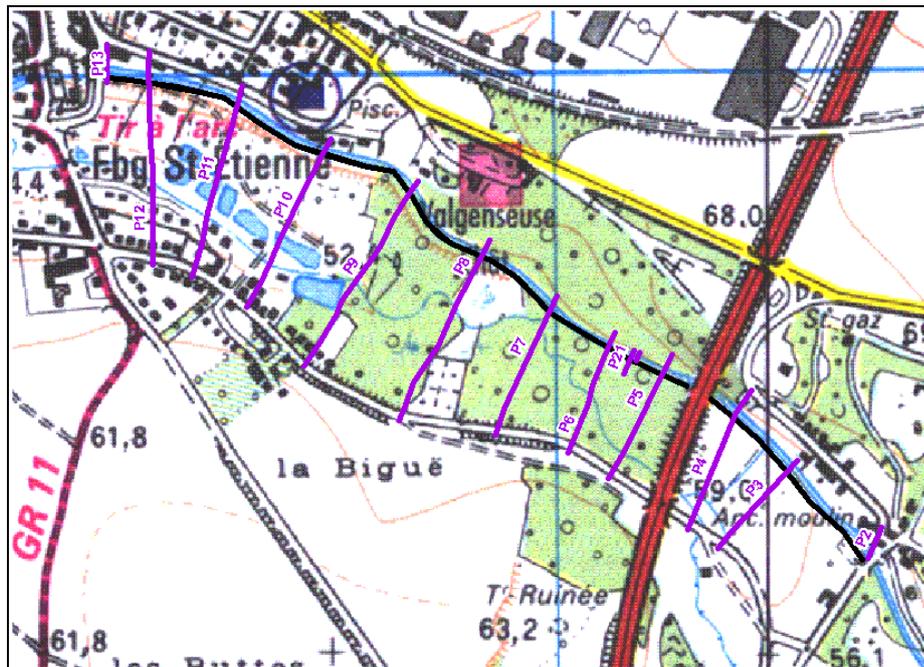


Figure 6. Localisation des levés topographiques réalisés au droit de la digue de la Nonette

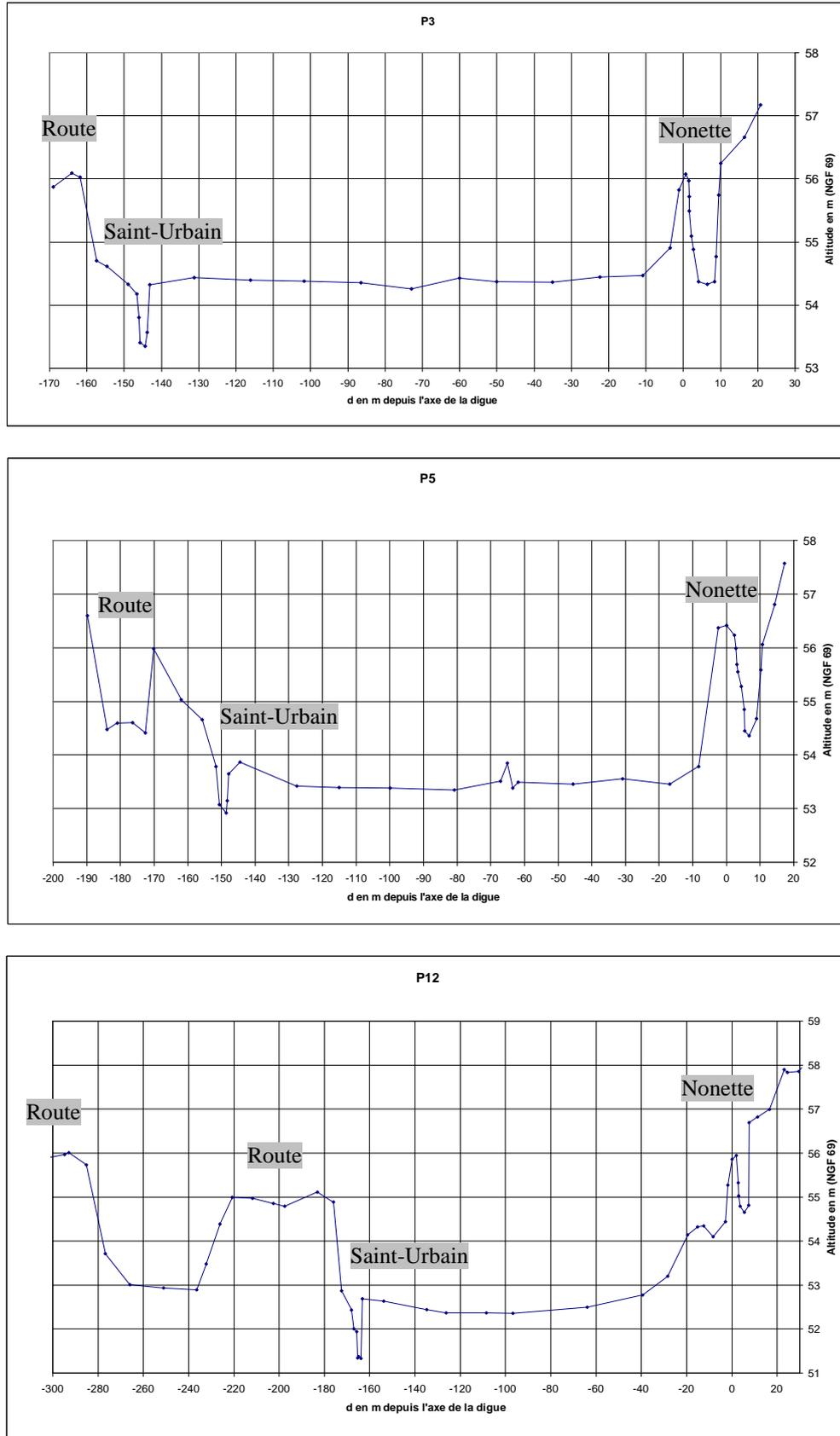


Figure 7. Profils en travers amont et aval levés au droit de la digue de la Nonette

On peut ainsi remarquer que les routes encadrant la zone d'étude sont généralement surélevées par rapport au terrain naturel et constituent des obstacles à l'écoulement. De plus, on peut noter que le fond de vallée est relativement plat avec une cote assez homogène (54,4 m NGF pour le profil P3, 53,4 m NGF pour P5 et 52,4 m NGF pour P12). De la même façon, la pente entre le profil P5 et P12 peut être évaluée à 0,1% ce qui est relativement faible.

Il est à noter que des levés supplémentaires ont été réalisés le 13/06/2014 concernant un secteur à l'aval du moulin de la Porte de Meaux. L'ensemble des levés topographiques et bathymétriques sont localisés sur la cartographie de la figure suivante.

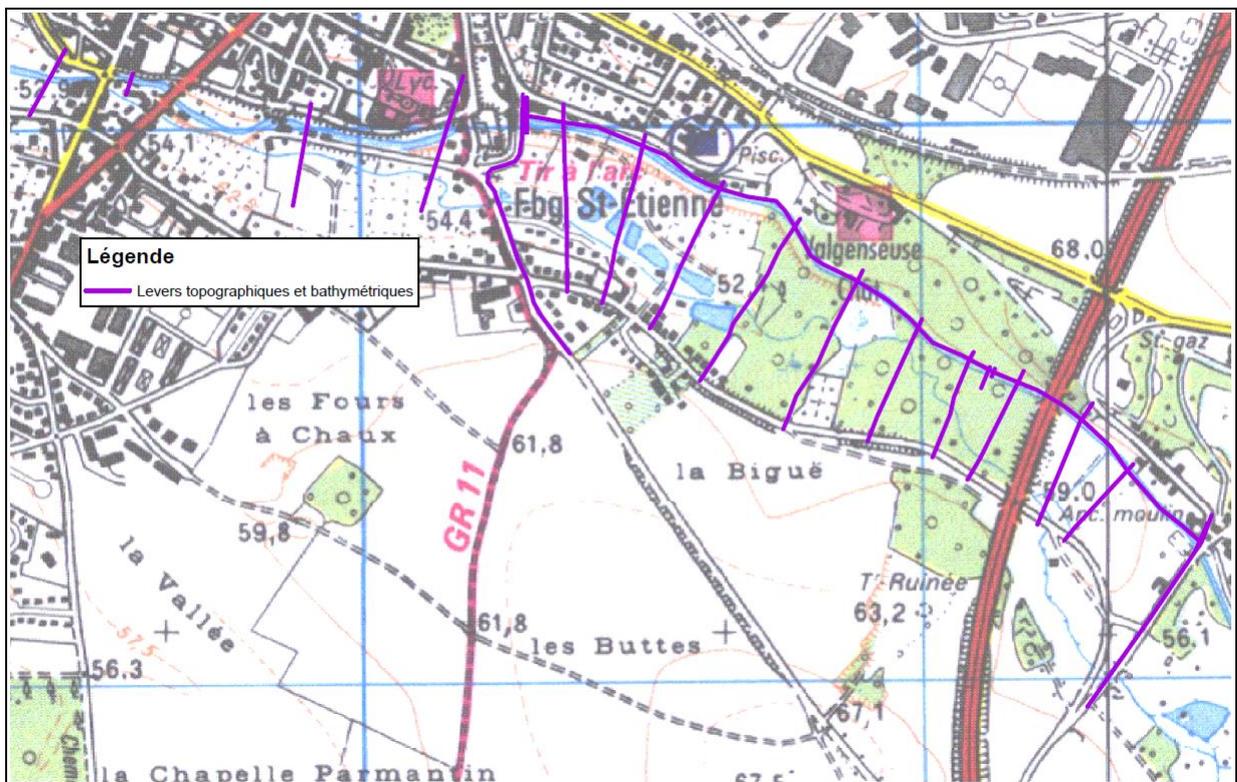


Figure 8. Ensemble des levés topographiques effectués par HYDROTOPO

### 3.1.3 Objectif de protection des digues de la Nonette à Senlis

#### 3.1.3.1 Généralités

Pour caractériser le degré de protection d'un système d'endiguement, la considération de différentes notions est nécessaire :

- **Le niveau de protection** : niveau d'eau du cours d'eau au-dessus duquel la zone protégée commence à être inondée sans rupture préalable de la digue, par débordement au-dessus du sommet de la digue ou par un déversoir.
- **Le niveau de sûreté** : niveau d'eau du cours d'eau au-dessus duquel la probabilité de rupture de l'ouvrage n'est plus considérée comme négligeable ;
- **Le niveau de danger** : niveau d'eau du cours d'eau pour lequel la sécurité de l'ouvrage n'est plus garantie, impliquant un risque de rupture élevé (de l'ordre de 50%).

Un ouvrage rigoureusement construit doit présenter un niveau de sûreté nettement supérieur à son niveau de protection. La résistance de la digue est alors garantie, pour un ouvrage moderne, jusqu'à la surverse voire au-delà, ce qui confère à l'ouvrage un niveau élevé de fiabilité.

Les digues de la Nonette ne peuvent être définies comme des digues fiables. En effet, dans le cas de ce système d'endiguement, les données disponibles sur l'ouvrage ne permettent pas d'affirmer qu'il pourrait supporter une surverse sans rupture. Au contraire, l'état de dégradation avancé de l'ouvrage, ses pentes de talus élevées et l'événement de surverse passé (cf. chapitre 7.2.2.2) tendent à considérer la ruine de l'ouvrage lors d'une surverse.

Ainsi, le niveau de sûreté, donnée intrinsèque à la structure interne d'une digue, est considéré inférieur ou égal au niveau de crête. Pour une digue équipée d'un déversoir, comme les digues de Senlis et de Villemétrie, la cote de protection correspond à la cote du seuil de l'ouvrage déversant (soit ici le seuil vers le Saint Urbain).

On a donc bien pour ces ouvrages un niveau de sûreté supérieur au niveau de protection néanmoins, ces digues ne présentent pas un niveau de fiabilité élevé.

### 3.1.3.2 Niveau de protection actuel

Sur le secteur d'étude, la Nonette correspond à un cours d'eau perché dont la rive droite suit le terrain naturel et la rive gauche est constituée par une digue. L'objectif premier de cet aménagement était la création d'un bief d'amenée d'eau pour les moulins. Néanmoins, lors de la construction de la digue de la Nonette, la hauteur de cet ouvrage a dû être étudiée pour éviter sa surverse en crue, déterminant ainsi un objectif de protection initial.

Aucune donnée sur l'objectif de protection initial lors de la création des digues étudiées n'est disponible dans les documents d'archives.

Dans l'étude datant de 1984 (Réf [6]), des calculs hydrologiques avaient été réalisés pour les débits décennaux et cinquantennaux. Le but de cette étude était d'étudier les dispositions à prendre pour assurer la sécurité de Senlis contre les risques susceptibles d'être engendrés par des crues de fréquence rare (ruptures de digue, débordements,...).

En conclusions de l'étude, il avait notamment été préconisé de surélever les cotes de digue sur le secteur Villemétrie/Courteuil pour atteindre un objectif de protection contre la crue cinquantennale.

A la suite de cette étude, des travaux ont été réalisés en 2001 sur la digue de Senlis. Malgré ces travaux, la cote de protection cinquantennale n'est pas atteinte dans ce secteur de la Nonette.

En effet, l'analyse hydrologique des débits de la Nonette et la construction d'un modèle hydraulique à l'aide de MIKE ont permis de réaliser une comparaison entre le profil en long de la digue et les niveau d'eau du cours d'eau.

Ces lignes d'eau sont représentées sur la Figure 10 page suivante.

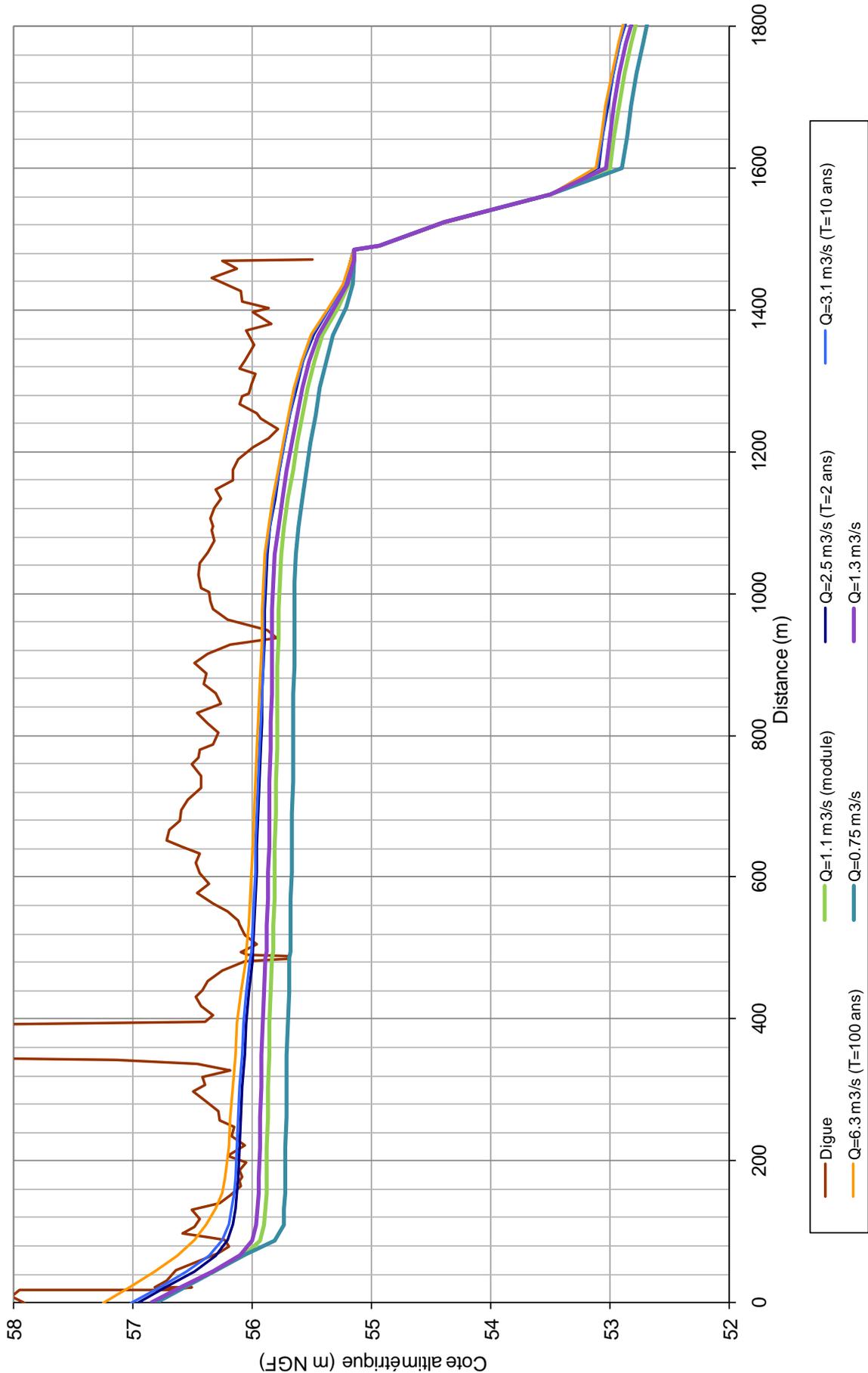


Figure 10. Lignes d'eau pour différents débits et profils en long de la digue

Le point le plus bas du système endigué est situé sur la digue de Senlis au droit du glissement le plus important relevé lors de la VTA à la cote **55.80 m NGF**. Celui-ci entraîne l'apparition d'une surverse pour un débit de **1.3 m<sup>3</sup>/s** soit un débit légèrement supérieur au module de 1.1 m<sup>3</sup>/s (cf. 6.1).

**Les premières surverses observées de la digue de la Nonette apparaissent aux points bas de la digue de Senlis à la cote 55.80m NGF au droit du glissement de talus.**

La digue de Senlis étant équipée d'un déversoir, la cote de protection est égale à la cote du seuil de l'organe déversant soit **55.70 m NGF**. Il est à noter que cet ouvrage est en fonctionnement de façon quasi-continue puisqu'il est en fonctionnement dès le module et la cote de son seuil relativement basse par rapport à la crête de digue amène à considérer un niveau de protection relativement bas.

Il est également à noter que pour le débit de **0.75 m<sup>3</sup>/s**, la ligne d'eau dans la Nonette est en limite de surverse dans le Saint-Urbain. Ce débit peut être comparé au QMNA5 de la Nonette transposé au moulin de Villemétrie (estimé à **0.64 m<sup>3</sup>/s**) et au module de **1.1 m<sup>3</sup>/s**.

### 3.1.3.3 Détermination des cotes de protection, de sûreté et de danger

**Le niveau de protection de la Nonette peut donc être considéré comme compris entre le QMNA5 et le module en prenant en compte la mise en fonctionnement du déversoir du Saint Urbain et le niveau de sûreté comme entre le module et la crue biennale en prenant en compte la zone de glissement du talus amont de la digue de Senlis.**

En absence d'informations supplémentaires concernant les matériaux constitutifs de la digue et donc la stabilité de l'ouvrage, on considère la cote de danger comme équivalente au niveau de sûreté.

Le tableau suivant permet donc de récapituler les différentes cotes :

Tableau 3. Cotes caractéristiques de la digue de la Nonette

Cote	Niveau altimétrique (m NGF)
Cote de danger	55.80
Cote de sûreté	55.80
Cote de protection	55.70

### 3.1.4 Zone protégée de la digue

Réglementairement, la zone protégée est définie par cet extrait de l'Annexe I de la circulaire du 8 juillet 2008 relative au contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques au titre des dispositions mises en place par le décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 :

« (...) La zone protégée est donc la zone soustraite à l'inondation qui serait causée par la crue de projet de protection de l'ouvrage. Ce n'est pas la zone plus restreinte, où suite à une rupture de la digue la population serait en danger du fait des hauteurs et des vitesses d'eau. Ce n'est pas non plus la zone inondée pour la crue de référence du PPRi, par les plus hautes connues, la crue centennale ou l'emprise maximale inondable. »

La zone protégée est celle qui serait inondée par des crues de période de retour inférieure à celle de la crue de projet en l'absence de système d'endiguement.

L'arrêté préfectoral du 13 mars 2013 définit une évaluation de la zone protégée qui est représentée en bleu sur la cartographie ci-après. Cette zone protégée correspond à une superficie d'environ 0.46 km<sup>2</sup>.

Cette estimation de la zone protégée est relativement importante au vu des résultats des simulations (Chapitre 8) et en particulier pour la partie à l'aval de la rue du vieux-chemin de Meaux. Néanmoins, ces résultats correspondent à une crue décennale, dans le cas d'une crue exceptionnelle, les inondations seraient plus conséquentes et pourraient toucher l'ensemble de cette zone.

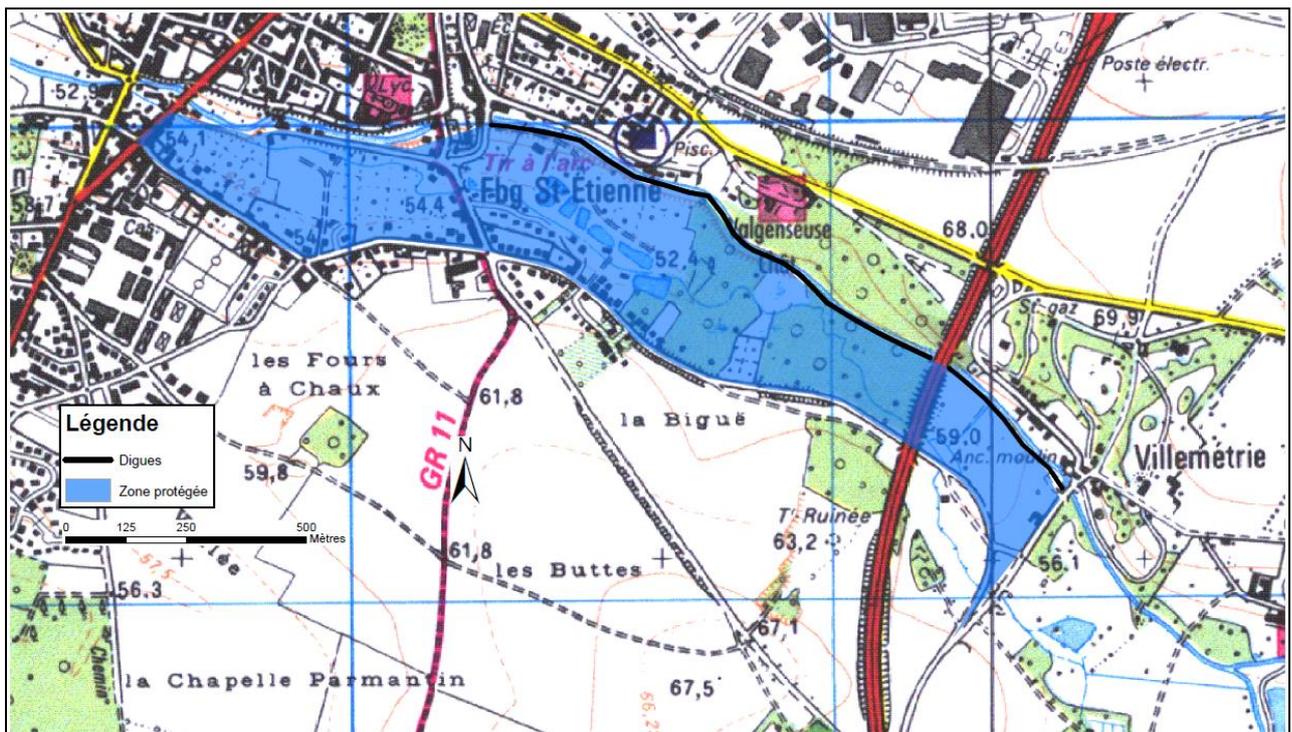


Figure 10. Localisation de la zone protégée

### 3.1.5 Caractérisation des enjeux

#### 3.1.5.1 Estimation de la population présente dans la zone protégée et les alentours

La population de Senlis estimée par l'INSEE en 2011 est de **16 514 habitants**.

La Figure suivante présente le cadastre de la zone d'étude. Une approximation de la population située dans la zone d'étude peut être effectuée en considérant le nombre de parcelles et une moyenne de 2,5 personnes par habitations.

Ainsi, pour 36 parcelles présentant un bâtiment, on peut estimer **une population de 90 personnes dans la zone protégée au droit de la digue de la Nonette**.



Figure 11. Cadastre parcellaire de la zone d'étude

Pour la partie située en aval de la rue du vieux-chemin de Meaux, on peut estimer également 35 bâtiments situés dans la zone protégée soit **une population de 88 personnes environ**.

On obtient donc **une estimation de la population totale de 178 habitants dans la zone protégée**.

### 3.1.5.2 Activités industrielles, agricoles, forestières, commerciales et touristiques susceptibles d'être impactées.

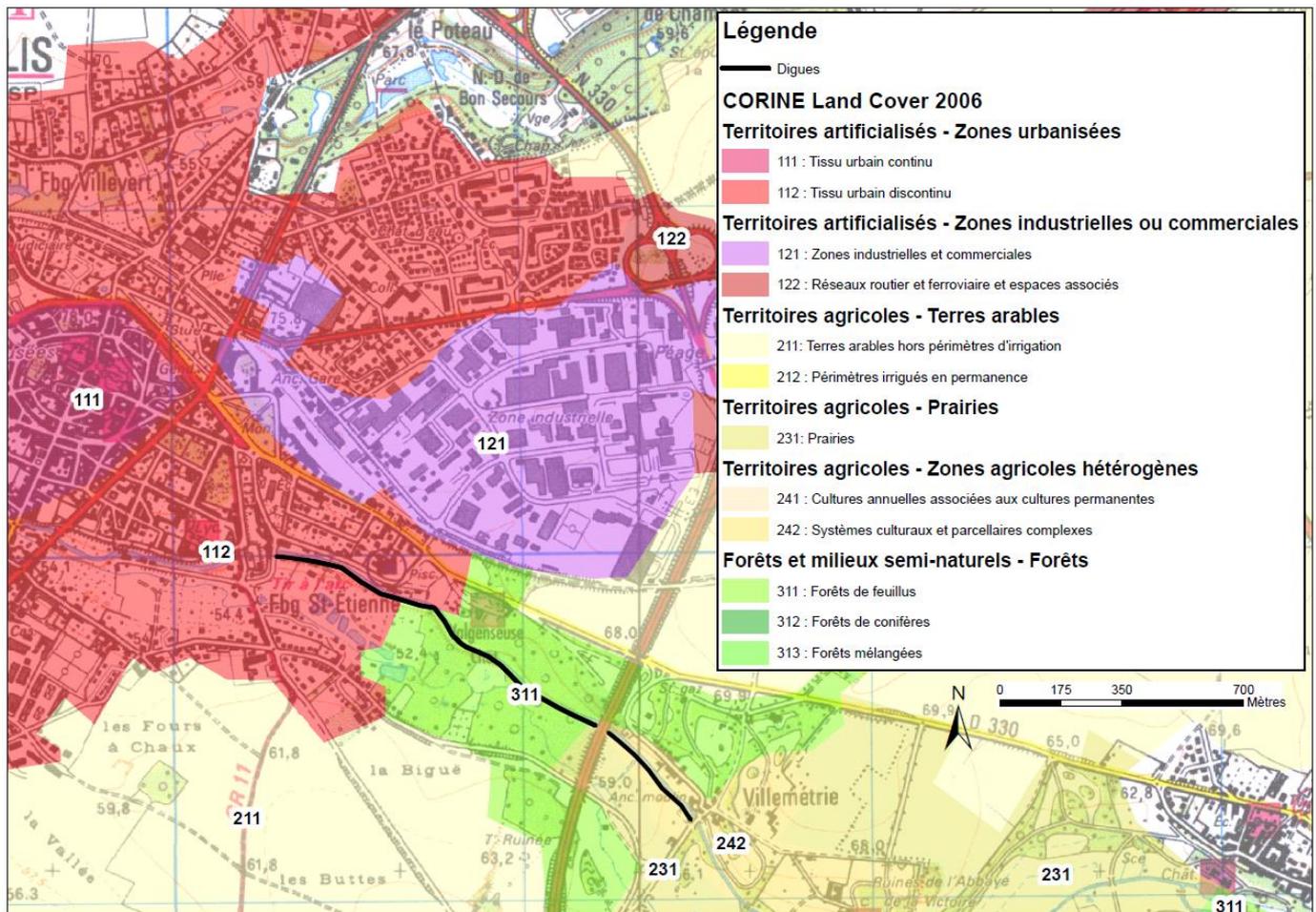


Figure 12. Occupation du sol sur la zone d'étude – Source : CORINE Land Cover 2006

On peut noter que 4 différents types d'occupation des sols pourraient être impactés par la rupture de la digue de la Nonette à Senlis :

- 242 : Systèmes culturaux et parcellaires complexes ;
- 231 : Prairies ;
- 311 : Forêts de feuillus ;
- 112 : Tissu urbain discontinu.

Aucune zone industrielle ni commerciale ne serait touchée, celles-ci étant situées au-dessus de la zone d'étude sur un secteur présentant une topographie plus élevée.

Les enjeux les plus sensibles sont les habitations situées en aval de la zone d'étude au niveau du Faubourg Saint-Etienne sur la Figure ci-dessus.

### 3.1.5.3 Infrastructures susceptibles d'être impactées

Les infrastructures susceptibles d'être impactées en cas de rupture de digue sont peu nombreuses et principalement des chemins (Square de la Fontaine Saint-Urbain, Square de la Fontaine Noé, Chemin de la Bigüe, Chemin de la Poterne).

La route de la Bigüe est surélevée par rapport au terrain naturel et suit environ les cotes de la digue. La rue du vieux-chemin de Meaux, la rue du Pont Saint-Urbain, l'impasse Sainte-Marguerite et la rue de Jardiniers sont également surélevées par rapport au fond de la vallée de la Nonette. Ces routes sont donc relativement peu susceptibles d'être touchées par des inondations en cas de rupture de la digue.

L'autoroute A1 est construite sur un remblai très élevé par rapport au terrain naturel, elle ne sera donc pas touchée en cas de rupture de la digue.

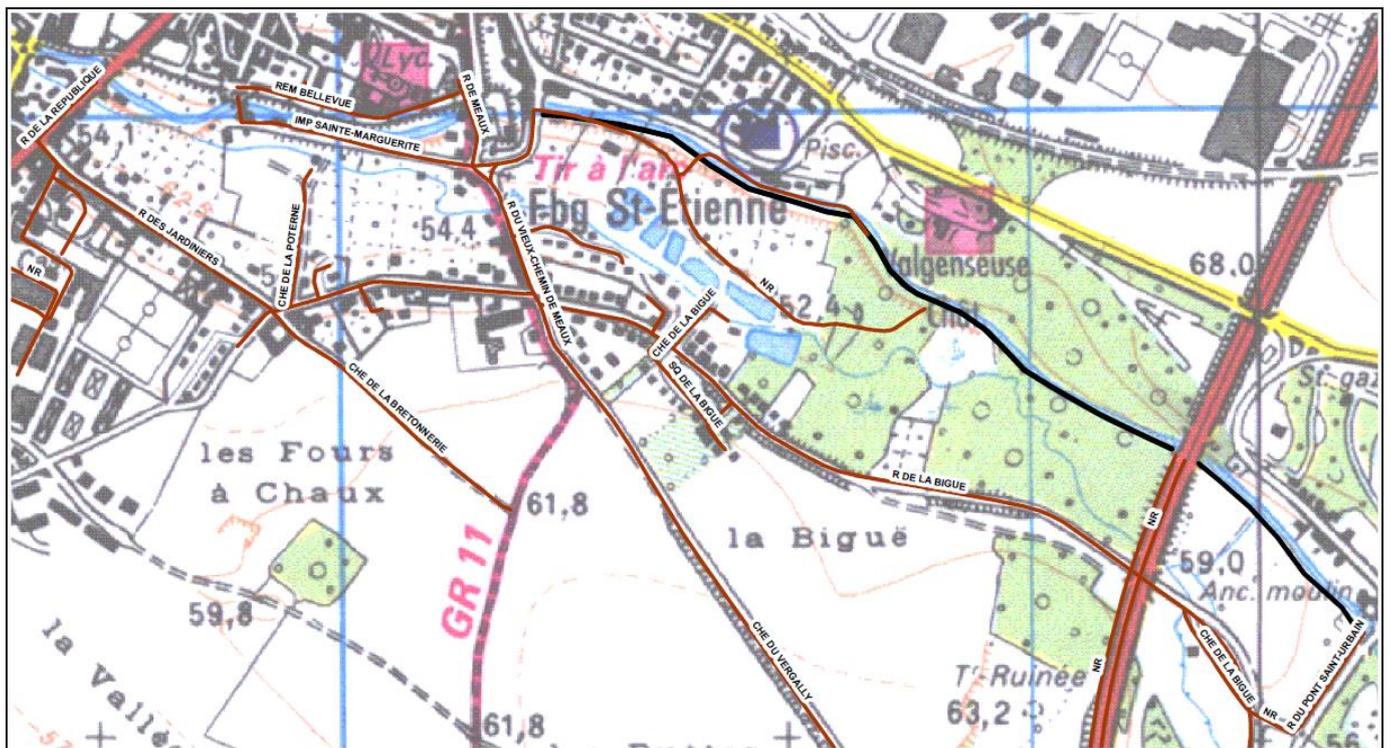


Figure 13. Identification des voiries dans la zone d'étude

### 3.1.6 Synthèse de l'analyse fonctionnelle externe/ Enjeux sensibles

Les milieux extérieurs et leurs interactions avec les deux digues de la Nonette, la digue de Senlis et la digue de Villemétrie, sont synthétisés dans le tableau suivant :

Milieux extérieurs au système	Interactions avec le système
Habitations et populations environnantes	- Enjeux en cas de rupture de digue : risque d'inondation en cas de rupture de

Milieux extérieurs au système	Interactions avec le système
	digue
<b>Établissement recevant du public</b>	- Enjeux en cas de rupture de digue : aucun
<b>Infrastructures</b>	- Peu d'enjeux en cas de rupture de digue
<b>Ouvrages hydrauliques environnants</b>	- Peu d'enjeux en cas de rupture de digue
<b>Relief et occupation du sol environnant</b>	- Conditionne l'intensité et la cinétique d'une onde de submersion en cas de rupture de digue : relief plat, cinétique peu marquée
<b>Géologie du site</b>	- Introduit l'aléa sismique : ouvrage peu vulnérable
<b>Bassin versant</b>	- Introduit l'aléa hydrologique

### 3.2 Analyse fonctionnelle interne – Description des ouvrages

Les ouvrages composant le système d'endiguement et faisant l'objet de la présente étude de dangers sont les deux digues suivantes :

- la digue de Villemétrie ;
- la digue de Senlis.

La digue de Senlis mesure environ 1100 m et celle de Villemétrie environ 350 m. Elles font partie du même système de protection classé C, mais sont séparées par l'autoroute. Les digues se trouvent principalement sur des parcelles privées.

Le profil des digues est relativement homogène sur l'ensemble du linéaire avec des pentes du parement aval le plus souvent de 3H/2V.

Ces deux ouvrages sont présentés plus précisément ci-après.

### 3.2.1 Caractéristiques dimensionnelles de la digue de Villemétrie

La digue de Villemétrie est plus hétérogène avec des dimensions assez variables. Elle passe d'une largeur en crête de 2.5 m pour une hauteur de 1.5 m à une largeur d'un peu plus de 3 m pour une hauteur d'environ 2 m. Les pentes du parement aval sont globalement de 3H/1V.

Le descriptif suivant donne des informations supplémentaires sur les caractéristiques géométriques de l'ouvrage.

Descriptif de la digue de Villemétrie
<p><b>Date de construction de la digue</b> : inconnue  <b>Nature</b> : remblai hétérogène (limons, sablo-argileux)  <b>Type</b> : poids  <b>Hauteur maximale au-dessus du terrain naturel</b> : 2.5 m  <b>Longueur développée en crête</b> : 350 m  <b>Largeur en crête</b> : 1.5 m à 3.5 m  <b>Fruit du parement amont</b> : variable de 1,5H/1V à 2H/1V  <b>Fruit du parement aval</b> : autour de 3H/1V  <b>Cote moyenne en crête</b> : 56.48 mNGF  <b>Cote minimale en crête</b> : 56.08 mNGF  <b>Canalisations</b> : 3 conduites de gaz  <b>Dispositifs d'auscultation</b> : aucun</p>

### 3.2.2 Caractéristiques dimensionnelles de la digue de Senlis

La digue de Senlis mesure de 1.8 à 2.9 m de haut et a une crête d'une largeur diminuant d'amont en aval pour passer de 4 m de large à environ 2 m de large.

Le descriptif suivant donne des informations supplémentaires sur les caractéristiques géométriques de l'ouvrage.

Descriptif de la digue de Senlis
<p><b>Date de construction de la digue</b> : inconnue  <b>Nature</b> : remblai hétérogène (limons, sablo-argileux)  <b>Type</b> : poids  <b>Hauteur maximale au-dessus du terrain naturel</b> : 2.9 m  <b>Longueur développée en crête</b> : 1100 m  <b>Largeur en crête</b> : 2 m à 4 m  <b>Fruit du parement amont</b> : variable de 1H/1V à 1.5H/1V  <b>Fruit du parement aval</b> : variable de 1.5H/1V à 2H/1V  <b>Cote moyenne en crête</b> : 56.24 mNGF  <b>Cote minimale en crête</b> : 55.70 mNGF (déversoir)  <b>Canalisations</b> : 1 conduite de gaz et 1 conduite AEP  <b>Dispositifs d'auscultation</b> : aucun</p>

### 3.2.3 Profils en long de la digue

Cf. Annexe 3.

### 3.2.4 Profils en travers de la digue

Cf. Annexe 2 & 3.

### 3.2.5 Lithologie

La digue de Senlis a fait l'objet d'une restauration en 2001 par l'entreprise Fudali. Des sondages géotechniques ont alors été réalisés lors de ce renforcement et ont permis de conclure les points suivants :

- Les matériaux constitutifs de cette digue sont hétérogènes (limons, sablo-argileux) et de tenue mécanique médiocre ;
- Les alluvions sous le remblai sont constituées d'alluvions récentes mécaniquement très mauvaises et d'alluvions anciennes compactes.

### 3.2.6 Travaux de renforcements de la digue de Senlis réalisés en 2001

Un programme de travaux de renforcement de la digue de Senlis a été lancé en 2001 et réalisé par l'entreprise FUDALI. Néanmoins, des incohérences ont été relevées entre les observations terrain et le programme de travaux fournis par l'entreprise, en particulier concernant la localisation de palplanches dans la digue. Les plans des travaux définitifs réalisés sur la digue n'ont pas pu être recueillis.

Une campagne géophysique a donc été effectuée pour valider ou non la présence de palplanches dans le corps de digue. Les conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Dans les 500 derniers mètres de la digue de Senlis, des désordres magnétiques ont perturbé les mesures géophysiques ce qui rend les résultats non interprétables. Il n'est donc pas possible de confirmer la présence ou non de palplanches dans ce secteur.
- Le secteur situé entre les PM 770 et 840 (référence de PM du rapport de géophysique) est probablement équipé de palplanches. Ce secteur se situe entre le déversoir (Id 35 et 36 de la VTA) et les fuites de la digue de Senlis (Id 43, 44 et 45). Le reste du linéaire ne semble pas présenter de palplanches.

La Figure 15 cartographie la localisation des palplanches dans le programme de travaux de 2001 ainsi que les résultats de la campagne géophysique.

On peut remarquer que la campagne géophysique détecte des palplanches sur une zone plus restreinte que celle indiquée dans le programme de travaux au niveau des fuites.

On peut également noter qu'une palplanche est visible autour de l'Id 42 de la VTA et que celle-ci n'est pas indiquée dans le programme de travaux.

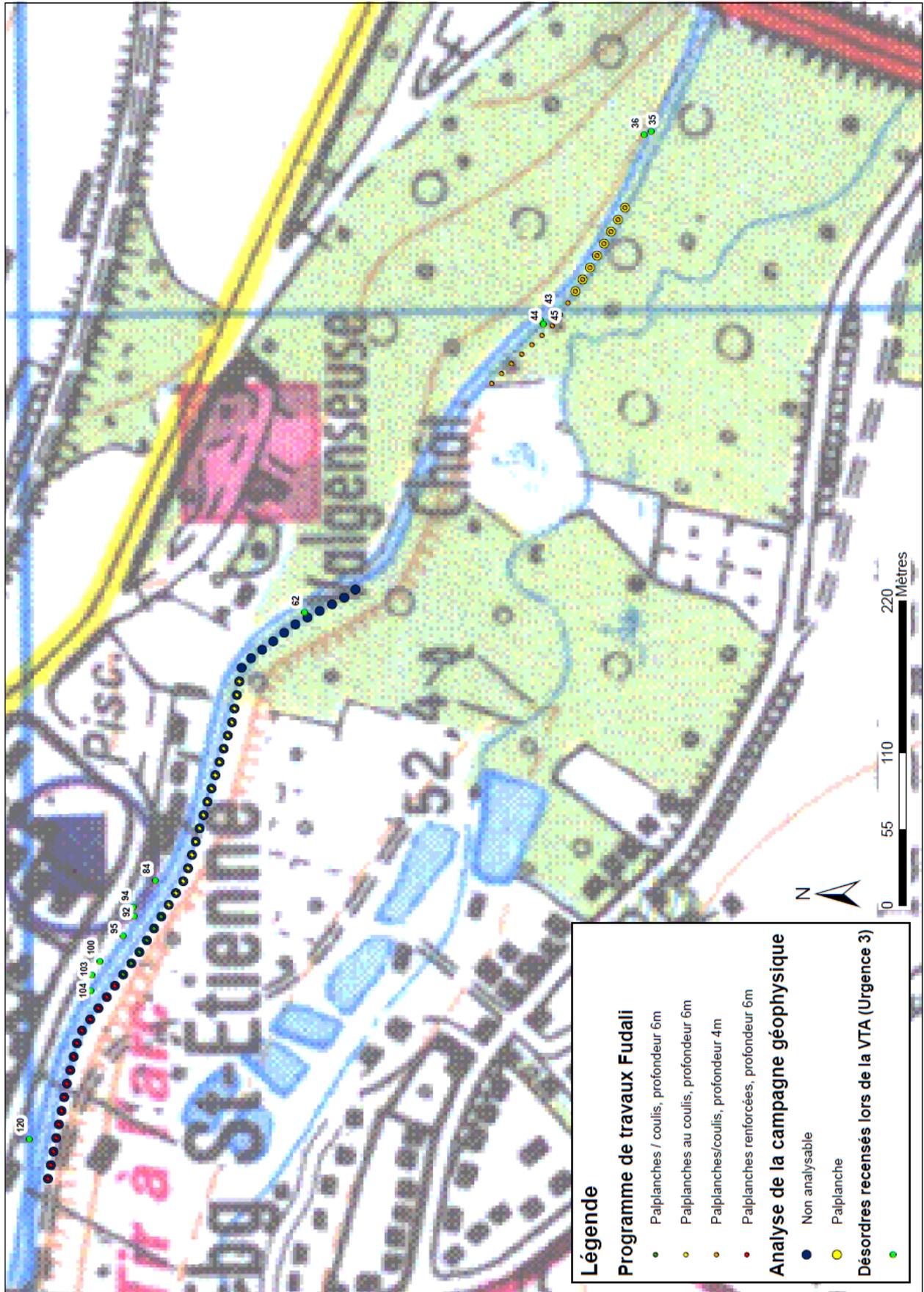


Figure 15. Comparaison entre le programme de travaux d'installation des palplanches et les résultats de la campagne géophysique – Source : SAFEGE, FUDALI

### 3.2.7 Synthèse de l'analyse fonctionnelle interne

L'analyse fonctionnelle aboutit à l'identification des fonctions de chaque composant du système. La synthèse de cette analyse est présentée ci-dessous :

Composant	Fonction principale	Fonction technologique / Contrainte
<b>Digue</b>	Empêcher l'entrée de l'eau dans la zone protégée	Contenir les eaux jusqu'à la crête
Corps de digue	Assurer la stabilité mécanique de la digue  Assurer l'étanchéité de la digue	Résister à l'érosion interne Résister aux contraintes de cisaillement Résister à l'érosion externe (parements) Présenter une perméabilité homogène suffisamment faible
Crête	Permettre la circulation en crête (engins d'entretien)  Assurer une revanche	Résister à l'érosion externe et aux contraintes d'exploitation  Résister aux phénomènes de tassement
<b>Ouvrage hydraulique</b>		
Ouvrage de déverse vers le Saint Urbain	Écrêter les crues et contrôler les inondations dans la zone protégée	Résister aux sollicitations extérieures

## 4

# Présentation de la politique de prévention des accidents majeurs (PPAM) et du système de gestion de la sécurité (SGS)

La PPAM est définie par le responsable de l'ouvrage en cohérence avec les accidents envisagés dans l'étude de dangers, pour prévenir ces derniers et en limiter les conséquences pour l'homme et l'environnement.

Le SGS décrit l'ensemble des moyens mis en œuvre par le responsable de l'ouvrage pour répondre à la PPAM qu'il a définie. Le SGS définit l'organisation, les fonctions des personnels, les procédures et les ressources partie prenante à la PPAM, y compris les mesures de surveillance de l'ouvrage.

## 4.1 Organisation du gestionnaire des digues

### 4.1.1 Obligations réglementaires

Ce paragraphe rappelle les obligations auxquelles est tenu le propriétaire ou l'exploitant de l'ouvrage concernant la surveillance et l'entretien des digues.

A ce sujet, l'article R.214-123 du décret 2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la Sécurité des Ouvrages Hydrauliques et au Comité Technique Permanent des Barrages et des Ouvrages Hydrauliques et modifiant le Code de l'Environnement rappelle l'obligation légale de surveillance et d'entretien d'une digue :

***« Le propriétaire ou l'exploitant de tout barrage ou digue surveille et entretient l'ouvrage et ses dépendances. Il procède notamment à des vérifications du bon fonctionnement des organes de sécurité et à des visites techniques approfondies de l'ouvrage. »***

Outre cette obligation, il doit établir des documents et des rapports particuliers en fonction de la classe de l'ouvrage (rapports de surveillance, rapports d'auscultation, visites techniques approfondies, examens techniques complets, études de dangers, revues de sûreté).

## 4.1.2 Les intervenants

L'exploitation et la surveillance des digues de Villemétrie et de Senlis sont réalisées par le Syndicat.

### *Exploitation et surveillance des ouvrages :*

Syndicat Interdépartementale du SAGE de la Nonette  
11, rue de Meaux  
60 300 MONT-L'EVEQUE  
03.44.32.99.80

En août 2014, le Syndicat est organisé de la manière suivante :

Tableau 4 Organisation interne au sein du SISN - Source : Dossier d'ouvrage, SISN

Personne concernée	Fonction au S.I.S.N	Rôle concernant la gestion des digues
<b>Monsieur Fèvre</b>	Président	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ S'assure de la bonne gestion des digues</li> <li>▪ Mandate les entreprises</li> </ul>
Monsieur Gicquel	Secrétaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Assure le suivi administratif de l'intervention des entreprises</li> <li>▪ Rédige les dossiers nécessaires à la réalisation des travaux d'urgence</li> </ul>
Madame Morvan	Directrice du S.A.G.E	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ S'assure de la réalisation des contrôles de terrain</li> <li>▪ S'assure de la cohérence des interventions</li> <li>▪ Veille aux respects des exigences demandées par le service de contrôle</li> </ul>
<b>Monsieur Forissier</b>	Technicien de rivière	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Effectue les contrôles de l'état des digues</li> <li>▪ Met à jour les fiches de suivi</li> <li>▪ Effectue le suivi des entreprises de débroussaillage, de faucardage et d'intervention d'urgence</li> <li>▪ Sensibilise les riverains aux animaux fouisseurs <b>et met à disposition des cages.</b></li> </ul>

### *Gestion et entretien des ouvrages :*

Les missions de gestion et d'entretien de la digue sont réparties entre les riverains propriétaires de la digue et le syndicat.

En août 2014, la répartition de ces missions s'effectuait selon le tableau suivant :

**Tableau 5. Répartition des missions de gestion et d'entretien entre le SISN et les riverains - Source : Dossier d'ouvrage, SISN**

Mission de gestion et d'entretien	Identité en charge	Période de réalisation
Lutte contre les animaux fouisseurs	SISN + riverain	Toute l'année
Fauchage et débroussaillage (+ éradication de la végétation ligneuse)	SISN	1 passage (de juillet à octobre)
	riverain	1 passage (reste de l'année)
Recharge et épaissement de tronçons de digue	<b>Non déterminé</b>	<b>Non déterminé</b>
Désenvasement	<b>Non déterminé</b>	<b>Non déterminé</b>
Faucardage	SISN	1 passage

Les différents rôles du Syndicat, sont les suivants :

- Responsable de la mise en sécurité de l'ouvrage ;
- Veille au respect du décret n°2007-1735 ;
- Responsable de l'application des consignes d'exploitation et de surveillance ;
- A en charge l'exploitation et l'entretien des ouvrages ;
- Met en œuvre les consignes écrites.

Le Syndicat fait également appel à des prestataires extérieurs qui assurent des missions d'assistance technique au Syndicat.

## 4.2 Consignes écrites

Le gestionnaire a élaboré des consignes écrites qui fixent les dispositions qu'il met en œuvre pour surveiller le système d'endiguement dont il a la charge.

Elles précisent l'organisation prévue afin de répondre aux exigences demandées par le décret 2007-1735 du 11 décembre 2007 à tout gestionnaire d'ouvrage en période normale et en période de crue.

Conformément à l'arrêté du 29 février 2008 fixant les prescriptions relatives à la sécurité et à la sûreté des ouvrages hydrauliques, elles décrivent :

- Une description de l'organisation mise en place pour assurer l'exploitation et la surveillance de l'ouvrage en toutes circonstances ;
- Des consignes dans lesquelles sont fixées les instructions de surveillance de l'ouvrage en toutes circonstances ainsi que celles concernant son exploitation en période de crue. Ces consignes précisent le contenu des visites techniques approfondies ainsi que le rapport de surveillance transmis périodiquement au préfet.

La dernière version des consignes écrites a été rédigée en juin 2014 et proposée à la validation de la D.R.E.A.L. Picardie.

## 4.3 Surveillance

Comme précisé ci-dessus, la surveillance de la digue de la Nonette à Senlis est organisée et décrite dans les consignes écrites qui précisent notamment la surveillance continue et la surveillance en crue.

### 4.3.1 Organisation de l'inspection visuelle périodique

De façons générales, des visites sur ouvrage sont effectuées selon les conditions suivantes :

Tableau 6. Conditions d'inspection visuelle périodique - Source : Consignes écrites, SISN

<b>Périodicité (hors période de crue)</b>	Tous les 15 jours
<b>Crue (vigilance jaune)</b>	1 fois par jour
<b>Crue forte (vigilance orange)</b>	2 fois par jour
<b>Crue exceptionnelle (vigilance rouge)</b>	Surveillance constante
<b>Mode des observations</b>	A pied
<b>Parcours effectué</b>	Digue de Villemétrie et de Senlis (voir annexe 1)
<b>Méthode de restitution</b>	Fiches (voir annexe 1)

### 4.3.2 Rapport de surveillance

Un rapport de surveillance doit être rédigé tous les 5 ans par le syndicat de la Nonette. Ce rapport comprend les éléments suivants :

- L'exploitation de l'ouvrage au cours de la période ;
- Les incidents d'exploitations ;
- Le comportement de l'ouvrage ;
- Les événements survenus (à partir des fiches d'analyses et de déclaration d'E.I.S.H) ;
- Les autres documents publiés ;
- Les travaux effectués.

## 4.4 Actions en cas d'urgence

Lors d'un événement exceptionnel entraînant une montée importante du niveau d'eau, ou causant des dommages à la digue concernée (séisme, précipitations élevées, vents violents entraînant des chûtes d'arbres,...), des dispositions seront engagées :

- Prévenir la mairie et la D.R.E.A.L Picardie ;
- Adaptation de la surveillance (augmentation de la fréquence des inspections) ;
- Consignation des conséquences sur la digue sur les fiches d'analyses et de déclaration d'E.I.S.H ;
- Information de l'évènement à la D.R.E.A.L Picardie.

Si l'anomalie subie par la digue est grave ou dangereuse, le syndicat de la Nonette mettra en place des travaux pour stabiliser la digue après avoir appliqué les consignes de crue si nécessaire.

Un rapport de l'incident sera transmis à la D.R.E.A.L Picardie et l'exemplaire papier sera conservé dans les archives de l'ouvrage.

Ce rapport comprendra les éléments suivants :

- Nature, lieu et date de l'évènement ;
- Constatations des faits ;
- Du mauvais ou bon fonctionnement de la consigne ;
- Des mesures prises dans l'immédiat et/ou à envisager ;
- Des enseignements à tirer (modification de la consigne de surveillance).

## 4.5 Procédure d'évaluation du risque

La présente étude constitue la première Étude de dangers de la digue de la Nonette. Elle sera actualisée dans les dix ans, soit avant le 31 décembre 2024. Elle pourra faire l'objet d'une actualisation avant cette date si la situation l'exige, notamment en cas de crue forte ou de séisme important.

## 4.6 Consignes d'exploitation de l'ouvrage en crue

**Cette partie reprend les consignes écrites rédigées par le syndicat en date d'août 2014.**

L'objectif principal en cas de crue est de garantir un niveau assez bas pour éviter toute érosion de la crête par surverse éventuelle et l'agrandissement des fuites existantes.

Cependant, le niveau des eaux à la hauteur de la digue ne peut pas être régulé à cause de l'absence de vannes de régulation sur les moulins situés en amont de la digue. Seule l'ouvrage de déverse via le Saint-Urbain régule le niveau d'eau. Un dispositif d'inondation à environ 1 kilomètre en amont peut être néanmoins mis en place en cas d'extrême nécessité.

L'état de veille sera enclenché lorsque des précipitations soutenues seront présentes depuis au moins quatre jours et qu'aucune accalmie n'est prévue par les services météorologiques. Cet état de veille pourra de même être déclenché lorsque des vigilances oranges « orages » sera communiqué par les prévisions météorologiques.

Lorsque l'état de crue sera déclenché, le technicien de rivière procédera à la surveillance quotidienne de la digue et informera Monsieur Depontalba de la nécessité de retenir partiellement et temporairement l'eau dans son marais afin de limiter la montée de la hauteur d'eau sur l'ouvrage.

En période de crue, l'ouvrage de surverse fera l'objet d'un entretien s'il présente des embâcles obstruant l'écoulement de la Nonette dans le Saint-Urbain.

## 4.7 Dossier d'ouvrage

La constitution du dossier d'ouvrage sur support papier a été commencée début 2013. Il s'agit d'extraire, de regrouper et de classer toutes les informations sur les digues dont le gestionnaire dispose dans les archives et dossiers divers :

- plans ;
- études ;
- travaux réalisés ;
- etc.

Une vérification du dossier d'ouvrage par le service de contrôle a été réalisée en août 2014.

## 5

# Identification et caractérisation des potentiels de dangers

Ce chapitre vise à identifier l'ensemble des potentiels de dangers associés aux digues de Villemétrie et de Senlis, du fait de leur présence ou de leur fonctionnement.

Les potentiels de dangers considérés dans cette étude résultent de la libération de tout ou partie de l'eau retenue, suite à une rupture partielle ou totale de la digue. Ce phénomène peut provenir de différents mécanismes à savoir :

- Ouverture d'une brèche partielle ou totale sur un tronçon de la digue (la création d'une brèche peut provenir de multiples mécanismes et facteurs aggravants tels l'érosion interne, l'érosion externe de digue, le glissement de talus, etc.) ;
- Surverse au-dessus de la crête d'un tronçon de levée (ce mécanisme entraîne généralement la création d'une brèche par érosion régressive du talus côté val puis de la crête) ;
- Entrée d'eau via le fonctionnement ou la ruine de l'ouvrage de déverse vers le Saint-Urbain

**Ces différents mécanismes seront analysés plus précisément dans le chapitre 8 « Identification et caractérisation des risques » de l'étude de dangers.**

Pour analyser les conséquences d'une rupture des digues de la Nonette, **un modèle hydraulique a été construit**. La construction de ce modèle ainsi que les hypothèses hydrauliques et hydrologiques effectuées sont développées **en Annexe 4 de ce rapport**.

## 5.1 Rupture de la digue de Villemétrie

Les conséquences potentielles de la rupture de la digue de Villemétrie ont été estimées à partir d'une étude de rupture de l'ouvrage (Simulation n°3).

Le mécanisme de rupture de la digue considérée dans le calcul de l'onde de submersion correspond à une rupture par la formation d'une brèche quasi-instantanée de la digue de Villemétrie, avec un débit de rupture évalué à  $2.1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 5.2 Rupture de la digue de Senlis

Les conséquences potentielles de la rupture de la digue de Senlis ont été estimées à partir de plusieurs simulations de rupture de la digue en différents tronçons (Simulation n°1, 2 et 4).

Le mécanisme de rupture de la digue considérée dans le calcul de l'onde de submersion correspond à :

- **Pour la simulation 1** : un mécanisme de rupture par la formation d'un renard hydraulique et un débit de rupture maximal à  $2.9 \text{ m}^3/\text{s}$  ;
- **Pour la simulation 2** : un mécanisme de rupture par la formation d'une brèche et un débit de rupture maximal à  $5.1 \text{ m}^3/\text{s}$  ;
- **Pour la simulation 4** : un mécanisme de rupture par la formation d'une brèche et un débit de rupture maximal à  $3.3 \text{ m}^3/\text{s}$ .

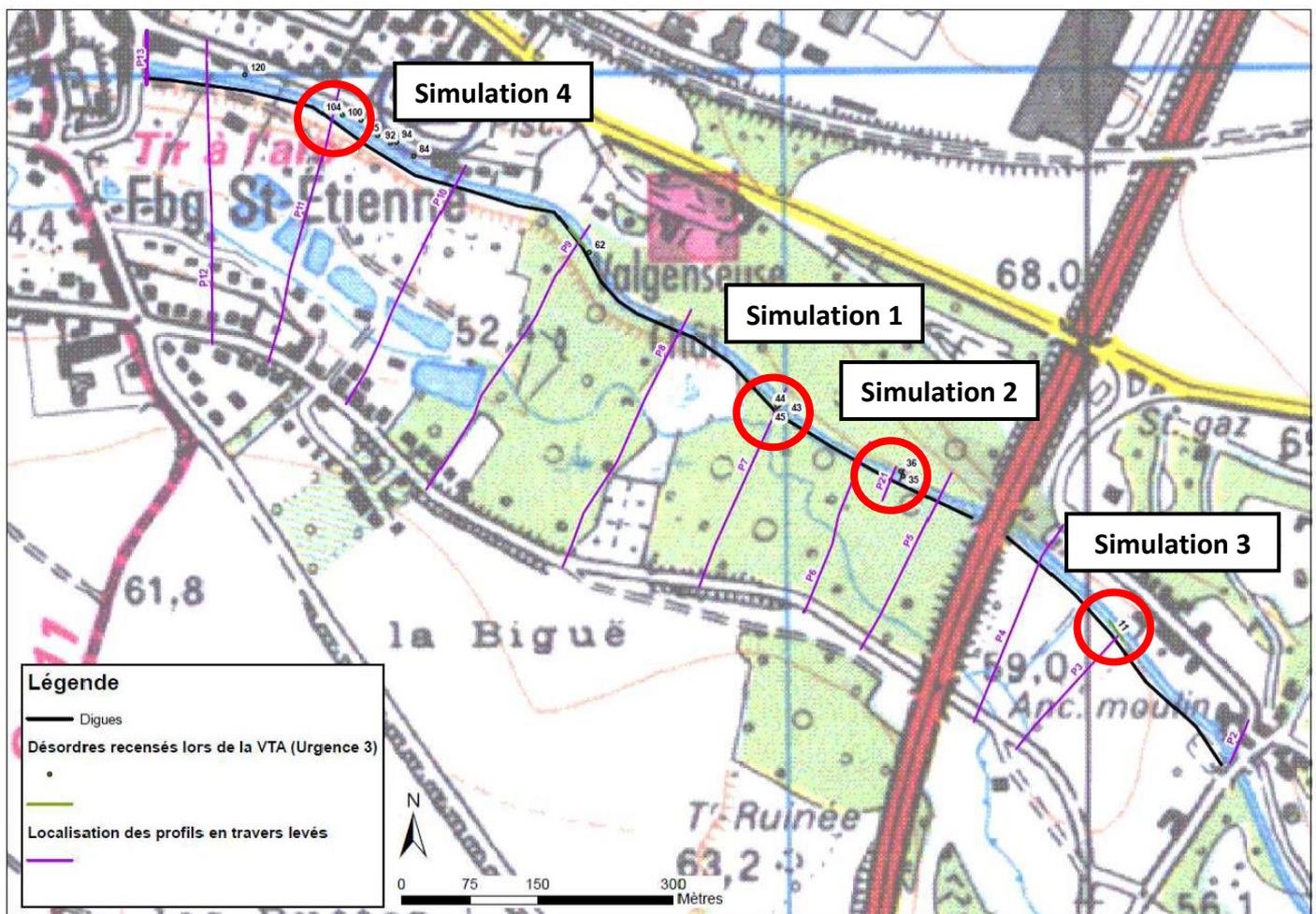


Figure 15. Localisation des simulations de rupture de digue

## 6

## Caractérisation des aléas naturels

### 6.1 Hydrologie : crues de la Nonette

#### 6.1.1 Données hydrologiques disponibles

##### 6.1.1.1 Station de la Nonette à Courteuil (Saint Nicolas d'Acy)

L'hydrométrie de la Nonette est suivie par une station de jaugeage gérée par la DREAL Picardie. Cette station « à une échelle » a récemment été remplacée par une station « à débits mesurés » mise en service en avril 2013. Les caractéristiques de ces stations sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 7. Stations hydrométriques de la Banque Hydro sur la Nonette

Code station	Nom station	Bassin versant topographique	Altitude	Débit -Données disponible
H7813010	La Nonette à Courteuil [Saint-Nicolas d'Acy]	338	48 m	1968 - 2011
H7813011	La Nonette à Courteuil [Saint-Nicolas d'Acy]	338	48 m	2011 - 2013

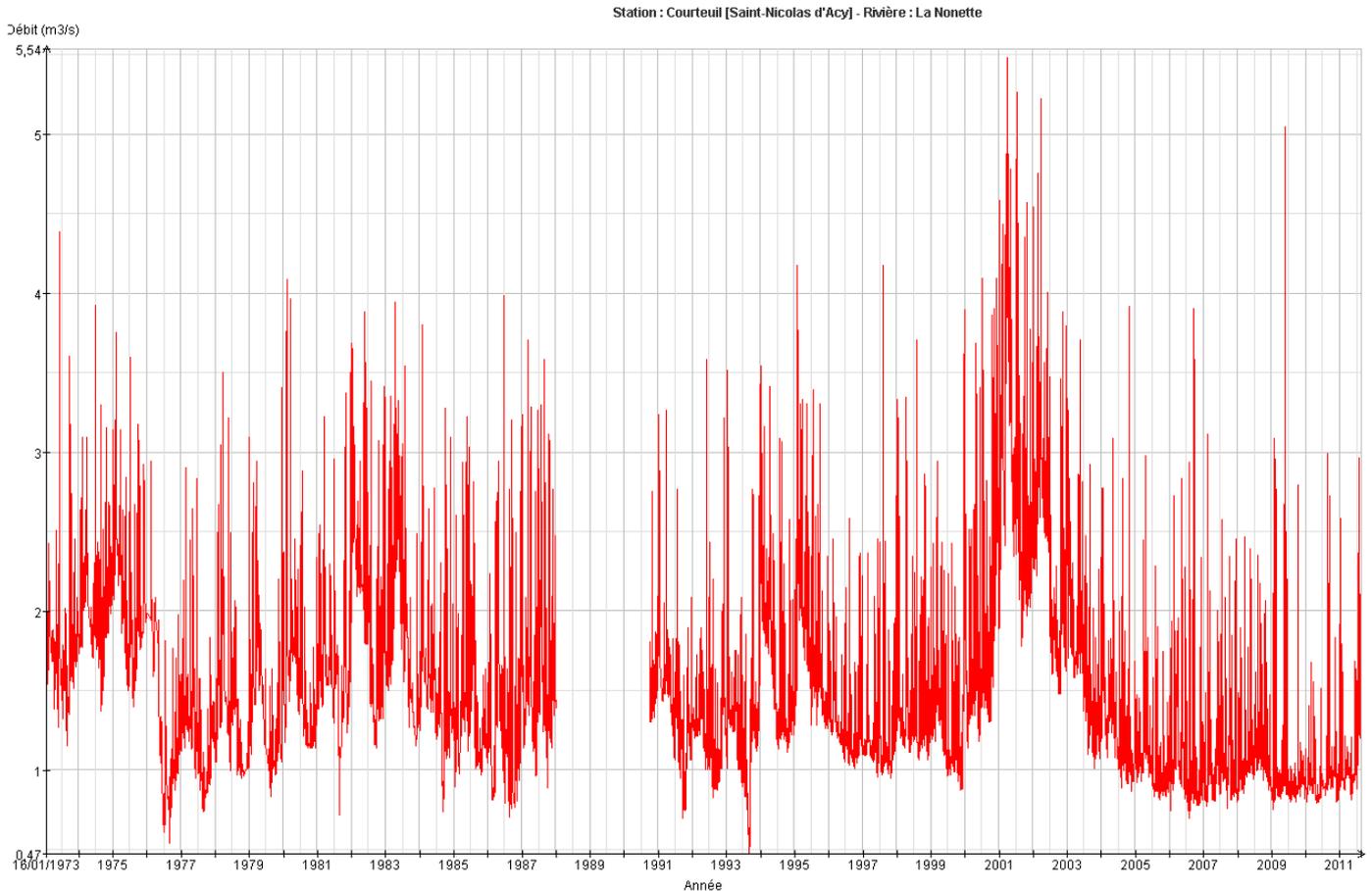
Il est à noter que la station de Courteuil a été modifiée car elle présentait des incertitudes dans les valeurs de débits estimés. En effet, la courbe de tarage utilisée par la DREAL pour calculer le débit de la Nonette était modifiée très régulièrement. C'est pourquoi, la station limnimétrique a été remplacée par une station débitmétrique.

Le territoire de la Nonette dispose de très peu d'informations permettant de caractériser le fonctionnement hydrologique du bassin versant et de quantifier correctement la ressource en eau. En effet, à part cette station, seule la Launette présente un suivi hydrométrique.

Le tableau et la figure page suivante caractérisent les débits calculés à la station de Courteuil.

**Tableau 8. Débits caractéristiques de la Nonette mesurés à Courteuil - Source : Banque Hydro, Station H7813010 1968-2011**

Station	Bassin versant (km <sup>2</sup> )	Module (m <sup>3</sup> /s)	Qmna5 (m <sup>3</sup> /s)	Débit instantané de crue (m <sup>3</sup> /s) (loi de Gumbel)				
				Biennale	Quinquennale	Décennale	Vicennale	Cinquantennale
Courteuil (Saint-Nicolas d'Acy)	344	1.58	0.94	3.7	4.2	4.6	4.9	5.4

**Figure 16. Échantillon des débits instantanés mesurés à la station de Courteuil sur la Nonette - Source : Banque Hydro**

### 6.1.1.2 Stations hydrométriques avoisinantes

Une recherche a également été conduite sur les stations avoisinantes celle de la Nonette pour comparaison. La localisation de ces stations est indiquée par des points verts et roses sur la cartographie page suivante. Le Tableau 9 caractérise une sélection de stations disponibles sur la Banque Hydro (indiquées par un point vert sur la Figure 18) par la superficie de leur bassin versant et leur module.

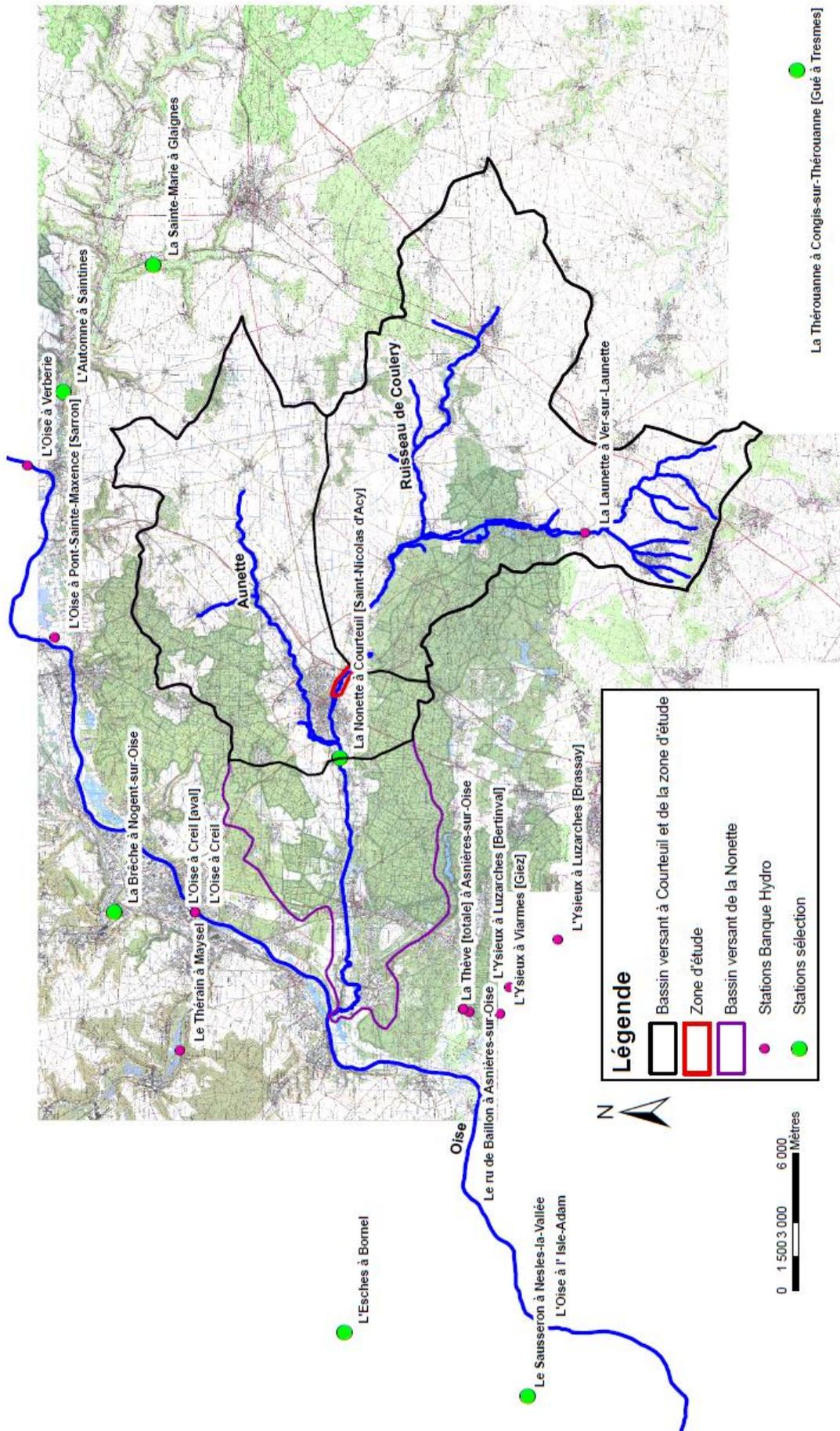


Figure 18. Localisation des stations hydrométriques disponibles – Source Banque Hydro

Tableau 9. Caractéristiques des stations hydrométriques disponibles

	Superficie BV (km <sup>2</sup> )	Module (m <sup>3</sup> /s)
La Nonette à Courteuil [Saint-Nicolas d'Acy]	344	1.58
<b>La Théroouanne à Congis-sur-Théroouanne [Gué à Tresmes]</b>	167	0.58
<b>L'Automne à Saintines</b>	279	2.04
La Sainte-Marie à Glaignes	99	0.72
La Brèche à Nogent-sur-Oise	468	2.27
L'Esches à Bornel	106	0.66
Le Sausseron à Nesles-la-Vallée	101	0.54

Les stations identifiées présentant une superficie de bassin versant d'un ordre de grandeur proche de celui drainé par la station à Courteuil, une comparaison entre les débits décennaux calculés dans la Banque Hydro a pu être effectuée. La Figure 18 représente les débits de pointe décennaux des stations du Tableau 9 tracés en fonction de la superficie de leurs bassins versants.

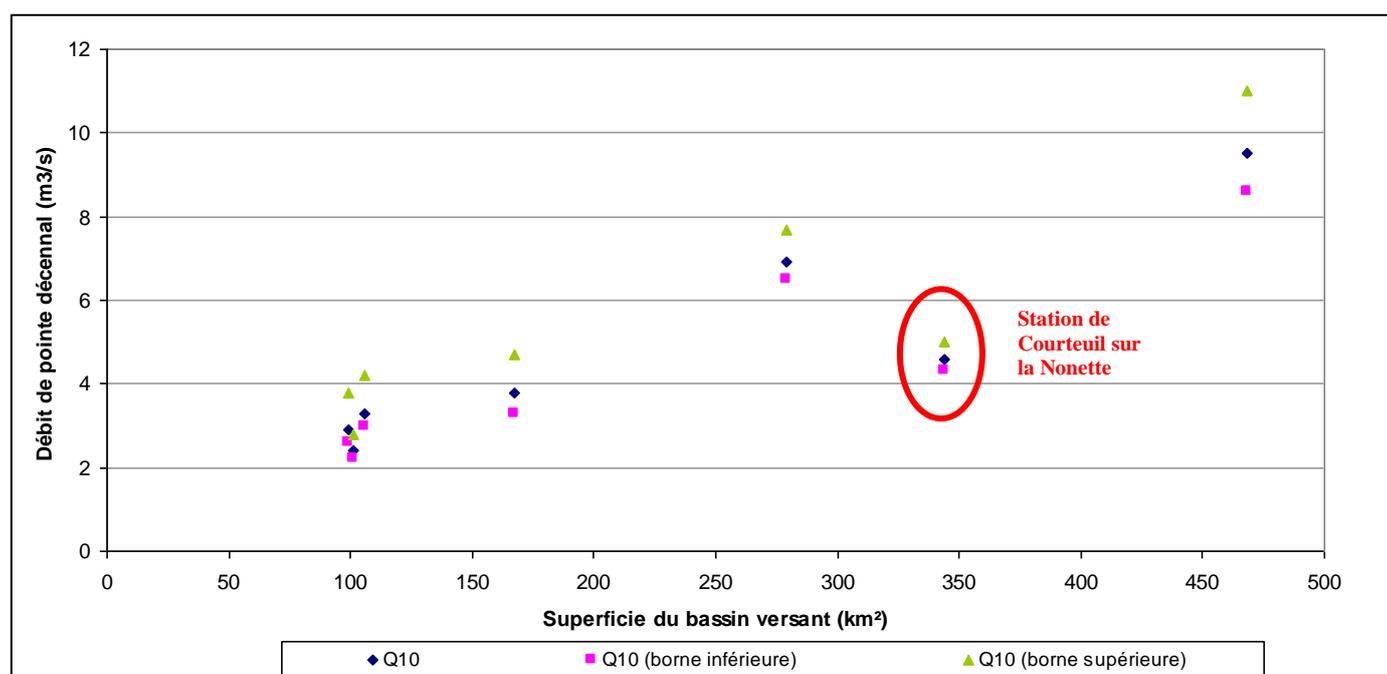


Figure 18. Débits décennaux calculés à différentes stations hydrométriques en fonction de la superficie du bassin versant drainé – Source : Banque Hydro

On peut constater que le débit décennal calculé à la station de Courteuil semble relativement bas par rapport aux débits calculés aux autres stations.

De plus, il est à noter que le bassin versant de la Nonette est **peu touché par des risques d'inondation par débordement de cours d'eau**. Jusqu'à présent, les crues survenues ont engendré relativement peu de dégâts sur les personnes et sur les biens.

**Malgré des incertitudes concernant les débits estimés à la station de Courteuil, il a été décidé d'utiliser ces valeurs.** En effet, une première approche avait été d'augmenter le débit décennal de la station de Courteuil pour suivre la tendance des bassins versants voisins. Néanmoins, suite à des échanges avec la DREAL et les acteurs locaux (Entente Oise-Aisne notamment), cette approche semble surévaluer le débit dans la Nonette. De plus, étant un cours d'eau particulièrement artificialisé, il est envisageable que son débit soit influencé et donc moindre que celui des bassins versants voisins.

### 6.1.2 Estimation du débit décennal au droit de la zone d'étude

Le débit de périodes de retours inférieures et égales à 10 au droit du Moulin de Villemétrie a été estimé à partir de la **formule de Myer**.

La valeur du débit décennal a été transposée de la station hydrométrique de Courteuil en considérant le rapport des surfaces des bassins versants (notés BV dans la formule suivante) à la puissance 0,8.

$$Q_{projet} = Q_{station} \left( \frac{BV_{projet}}{BV_{station}} \right)^{0.8}$$

Le bassin versant drainé au niveau du Moulin de Villemétrie a été estimé à 212 km<sup>2</sup>.

Les valeurs ainsi calculées sont récapitulées dans le Tableau 10.

Tableau 10. Débits instantanés calculés au Moulin de Villemétrie pour une période de retour inférieures ou égales à 10 ans

Bassin versant	Débit instantané (m <sup>3</sup> /s)			
	Biennale	Quinquennale	Décennale	Module
Courteuil	3.7	4.2	4.6	1.58
Moulin de Villemétrie	2.5	2.9	3.1	1.07

### 6.1.3 Estimation des débits supérieurs au débit décennal

Pour les périodes de retour supérieures à 10, la méthodologie du Gradex a été mise en œuvre.

#### **Principe**

La méthode du Gradex est depuis une trentaine d'année la méthode de référence pour l'estimation des débits de crue rares et extrêmes. Elle repose sur l'« extrapolation des débits par les pluies » dès lors que le bassin versant est saturé. L'application rigoureuse de cette méthode constituera le cœur de l'étude. Nous en rappelons ici le principe général et les différentes variantes.

La méthode du Gradex repose sur une hypothèse forte : **lorsque le bassin versant est saturé, tout accroissement de précipitation ruisselle en intégralité et produit un accroissement de débit en conséquence.**

On considère que le bassin versant est saturé au delà d'une période de retour « pivot », prise ici égale à 10 ans. Au delà de cette période et selon l'hypothèse mentionnée plus

haut, le comportement asymptotique des débits est donc similaire à celui des pluies. Sur un graphe de Gumbel, et après prise en compte de la surface du bassin versant, cela se traduit par le fait que la pente d'extrapolation (Gradex) des débits est identique à la pente d'extrapolation des pluies.

### **Deux variantes pour la partie extrapolée**

Pour la partie extrapolée, deux variantes sont possibles :

- **Mise en œuvre de la méthode du Gradex Brut** : il s'agit de la méthode originelle, qui a l'inconvénient de présenter une cassure dans la formulation des débits au droit de la période de retour pivot. Sa formulation est la suivante :

$$VCX_d(T) = VCX_d(T_g) + a_p \times \ln\left(\frac{T}{T_g}\right)$$

Avec : T période de retour  
 V débit ou volume  
 a<sub>p</sub> Gradex des pluies  
 d durée d'échantillonnage

- **Mise en œuvre de la méthode du Gradex esthétique** : cette formulation plus progressive a été mise en œuvre par la suite pour palier à l'inconvénient du Gradex brut. Sa formulation est la suivante :

$$VCX_d(T) = VCX_d(T_g) + [a_p]_d \times \ln\left(1 + \frac{[a_q]_d}{[a_p]_d} \cdot \frac{T - T_g}{T_g}\right)$$

Avec : notations idem précédemment et a<sub>q</sub> Gradex des faibles débits

La Figure 19 permet d'apprécier la différence d'extrapolation générée par les deux méthodes (courbe bleue : extrapolation par le Gradex brut / courbe rouge : extrapolation par le Gradex esthétique).

**Dans le cadre de la présente étude, l'extrapolation par le Gradex esthétique a été mise en œuvre car elle est considérée plus fiable du fait de son caractère progressif.**

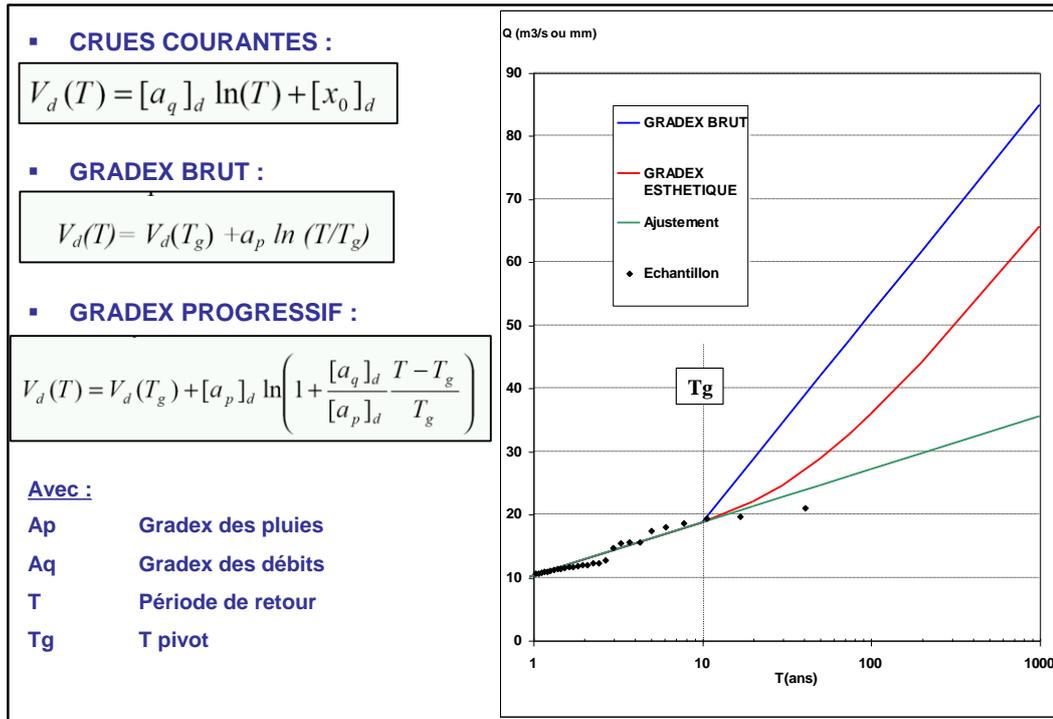


Figure 19. Exemples de résultat obtenu par la mise en œuvre du Gradex brut et du Gradex esthétique. Les débits résultants de ce calcul sont récapitulés dans le tableau suivant.

Tableau 11. Débits instantanés calculés au moulin de Villemétrie

Période de retour (ans)	Qix (m3/s) au moulin de Villemétrie
2	2.5
5	2.9
<b>10</b>	<b>3.1</b>
20	3.5
50	4.6
100	6.3
200	9.2
500	15.9

#### 6.1.4 Construction d'hydrogrammes synthétiques

Pour modéliser la rupture des digues, un hydrogramme de crue synthétique a été construit par la méthode de SOCOSE.

La durée caractéristique de SOCOSE a été calculée pour le bassin versant drainé au Moulin de Villemétrie (212 km<sup>2</sup>) à 38,5 h.

Le débit est injecté en amont du modèle au niveau du moulin de Villemétrie. L'hydrogramme type d'entrée choisi a été celui de la crue synthétique construit par la méthode de SOCOSE pour un débit de pointe décennal de 3,1 m<sup>3</sup>/s (Cf. 6.1 « Hydrologie : crues de la Nonette »).

L'hydrogramme injecté en entrée du modèle est donc celui présenté sur la figure suivante.

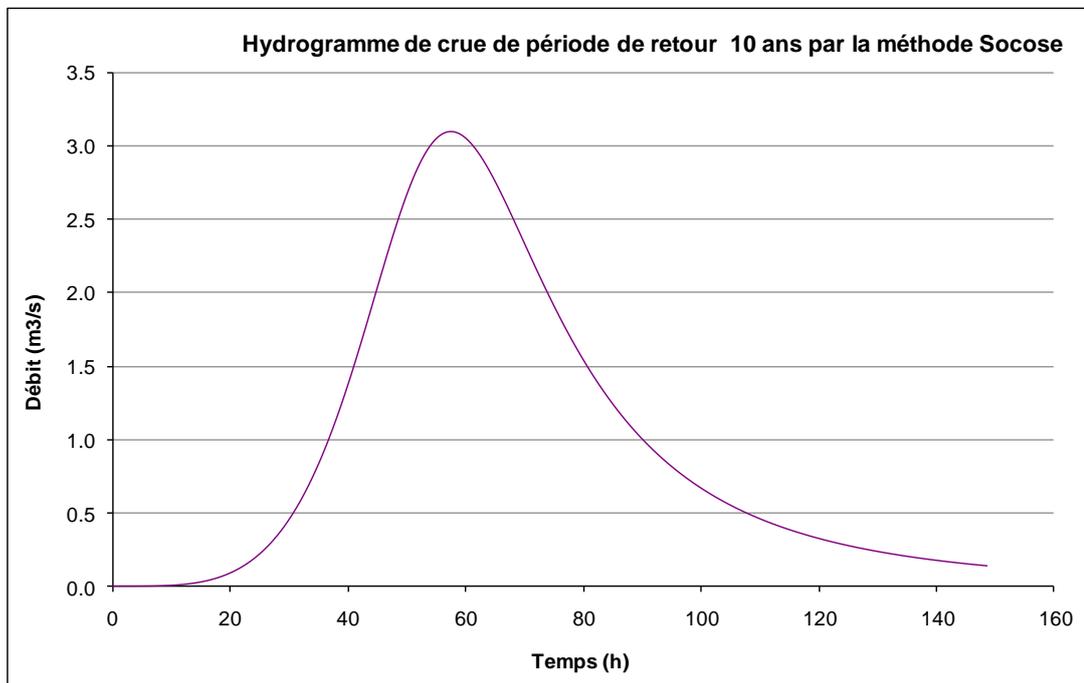


Figure 20. Hydrogramme de crue pour la période de retour 10 ans par la méthode de SOCOSE

## 6.2 Les séismes

Le nouveau zonage sismique français est entré en vigueur à compter du 1<sup>er</sup> Mai 2011. Il est défini dans les décrets n° 2010-1254 et 2010-1255 du 22 octobre 2010, et codifié dans les articles R.563-1 à 8 et D.563-8-1 du Code de l'Environnement.

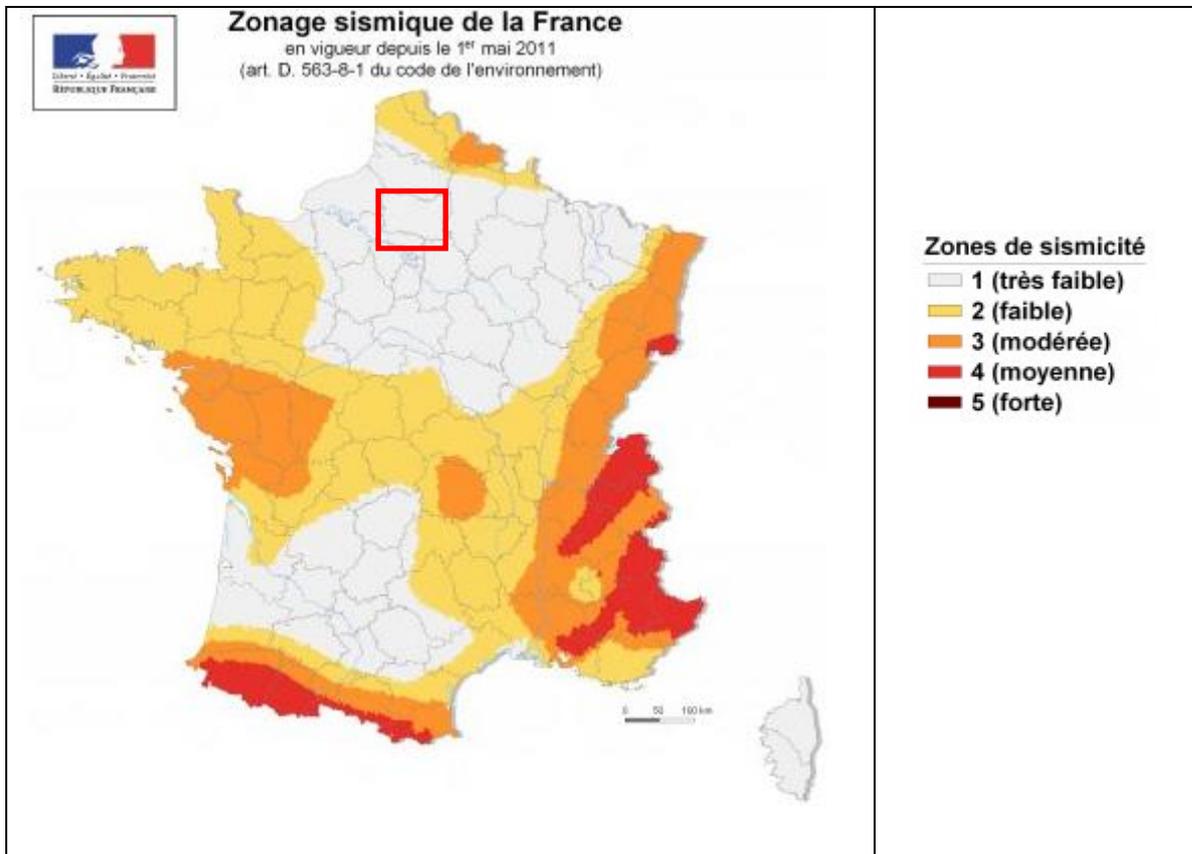


Figure 21. Carte d'aléa sismique de la France –nouveau zonage (source : www.planseisme.fr)

Les digues de la Nonette à Senlis, localisés en Oise, se situent en zone d'aléa « très faible » d'après la figure ci-dessus.

Compte tenu de la faiblesse de l'aléa sismique du site et de la faible hauteur des ouvrages, l'aléa sismique n'a pas fait l'objet d'une étude spécifique.

## 6.3 Les vents

Selon la carte de vents présentée dans la Figure 22, la vitesse moyenne du vent sur la zone géographique de la rivière de l'Orge est de 7,3 m/s (soit 26 km/h), ce qui peut être considéré comme plutôt faible.

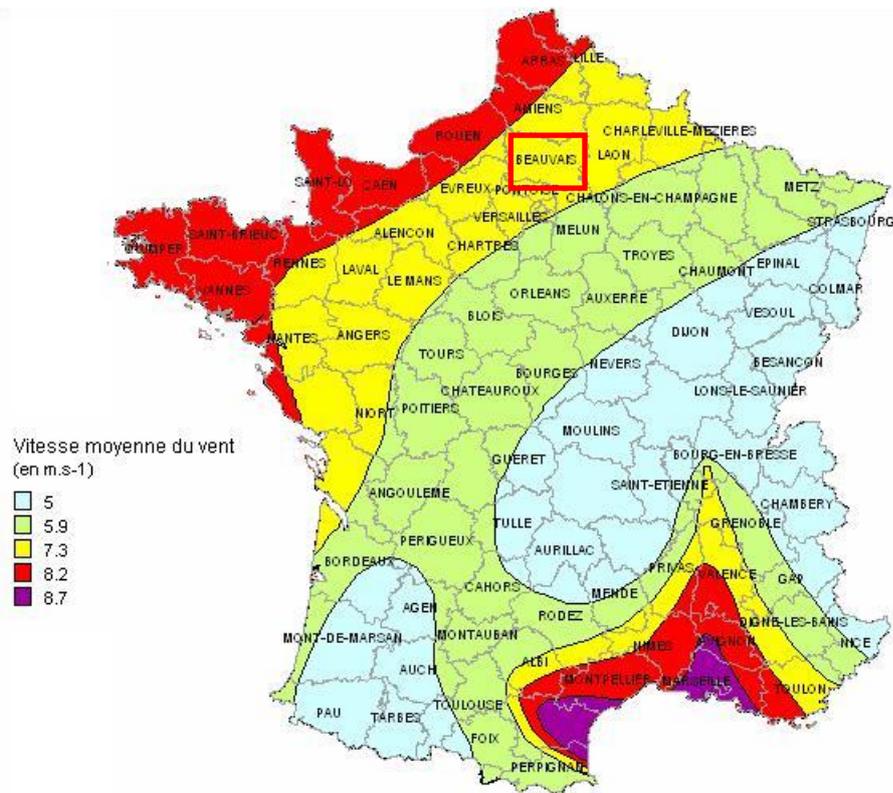


Figure 22. Carte de vitesse moyenne du vent (Source : [www.valceane.com](http://www.valceane.com))

Pour la prise en compte de l'occurrence de phénomènes rares ou exceptionnels, les règles NV65 définissent les effets de la neige et du vent sur les constructions et annexes. Ces règles ont pour objet de fixer les valeurs des surcharges climatiques (neige et vent) et de donner des méthodes d'évaluation des efforts correspondant sur l'ensemble d'une construction ou sur ses différentes parties.

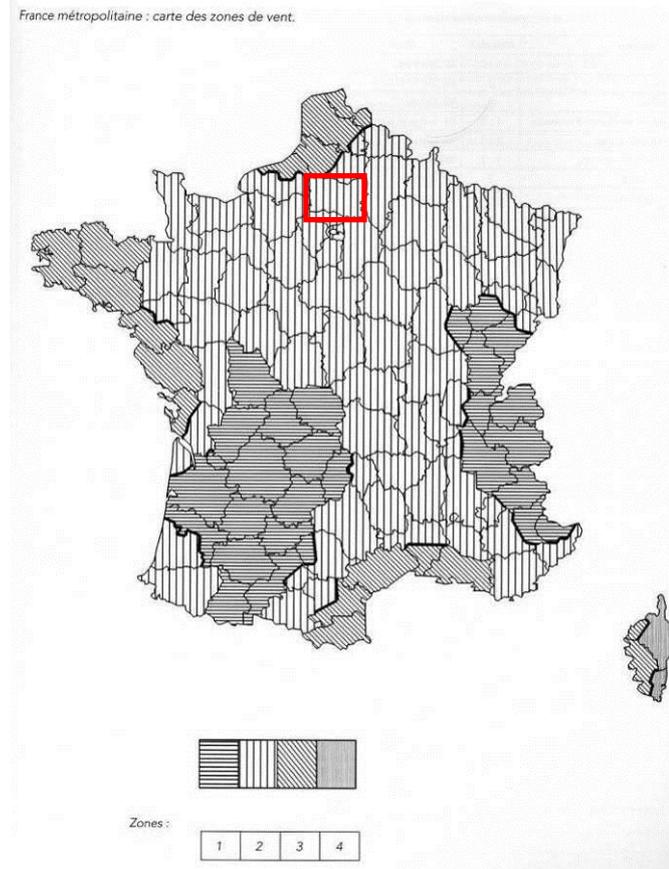


Figure 23. Carte des zones de vents de la France (Carte NV65)

Selon la carte des zones de vents de la France NV65 (2009), les digues de la Nonette à Senlis se situent dans la zone 2. Le tableau suivant présente les valeurs de pressions et vitesses de vent normal ou extrême adoptées par les règles NV65 pour la zone 2.

Tableau 12. Règles NV65 – pressions et vitesses de vent normal ou extrême

Zone	Site	Pression normale (Pa)	Pression extrême (Pa)	Vitesse normale (km/h)	Vitesse extrême (km/h)
II	protégé	480,0	840,0	100,8	133,3
	normal	600,0	1050,0	112,7	149,1
	exposé	780,0	1365,0	128,5	169,9

Pressions de référence à 10 m au dessus du niveau du sol

La définition de types de sites en fonction de leur exposition au vent est dans le tableau suivant.

**Tableau 13. Définition de types de sites en fonction de leur exposition au vent**

Site protégé	Exemple : fond de cuvette bordé de collines sur tout son pourtour et protégé ainsi pour toutes les directions du vent
Site normal	Exemple : plaine ou plateau de grande étendue pouvant présenter des dénivellations peu importantes, de pente inférieure à 10%
Site exposé	Exemple: au voisinage de la mer : le littoral en général (sur une profondeur d'environ 6km); le sommet des falaises ; les îles ou presqu'île étroites.

Pour les digues de la Nonette à Senlis, la vitesse de vents à prendre en compte varie entre 113 et 149 km/h selon les règles NV65.

L'occurrence d'un phénomène de cette magnitude peut faire tomber des arbres en mauvais état situés sur les rives de la rivière et générer de désordres les crêtes et les talus des digues.

## Étude accidentologique et retour d'expérience

### 7.1 Accidents survenus sur des installations similaires

#### 7.1.1 Digues en général

Une recherche bibliographique des défaillances significatives qui peuvent se produire sur ce type d'aménagement a été réalisée. Elle porte principalement sur les accidents évoqués au colloque d'Orléans de novembre 2004 (Orléans 2004).

Tableau 14. Incidents majeurs survenus sur ce type d'aménagements

Description de l'incident	Date	Causes de l'incident	Travaux réalisés a posteriori	Observations
<b>Digue d'Aramon</b> Digue submergée lors de la crue (lame d'eau de 40 à 80 cm sur la crête) => Ouverture de plusieurs brèches totales et partielles sur tout le linéaire de la digue (1,8 km).	<b>Crue de Septembre 2002</b>	La crue a révélé l'état médiocre de cette digue ancienne mais a surtout mis en évidence une lacune majeure : l'absence de déversoir	Reconstruction totale de toute la digue et présence d'un tronçon déversant permettant d'éviter la surverse de la digue.  La digue est en matériaux homogènes fondée au terrain naturel sur une clé d'ancrage.	La crue de décembre 2003 survenue juste après la fin des travaux a permis de constater le bon comportement de l'ouvrage.
<b>Canal de dérivation EDF de Strasbourg</b> Les digues ont une fonction d'endiguement du canal et de fermeture de bassins de rétention utilisés pour le laminage des crues. Lors des crues de 1999, le remplissage d'un bassin a été stoppé pour cause de mauvaise étanchéité des digues.	<b>1999</b>	Écoulement de la nappe sous les digues.	Sous l'endiguement du canal, un écran étanche de 22 m de hauteur et de 58 000 m <sup>2</sup> de surface a été réalisé. La solution retenue est l'écran mince vibré.	Problèmes techniques rencontrés sur le chantier notamment à cause de la nature du terrain rencontré (horizon alluvionnaire) : baisse de rendement, pertes de coulis, pannes matériels.
<b>Digues perméables de la Compagnie Nationale du</b>		Vétusté des digues.	Réhabilitation par géomembrane.	

Description de l'incident	Date	Causes de l'incident	Travaux réalisés a posteriori	Observations
<b>Rhône</b>  Digues vétustes (construction à la fin du 19 <sup>ème</sup> siècle) : signes de fuites, ruptures et phénomènes d'érosion				
<b>Digues de l'Agly</b>  Submersion de la digue qui ne présentait pas de partie déversante => brèche totale de 50 m.	<b>Fin 1999</b>	Submersion de la digue	Réfection totale de la digue + réalisation d'une partie déversante	Fréquence probable d'occurrence de plusieurs fois par siècle en l'absence de déversoir de sécurité.
<b>Canal d'aménée de l'aménagement de Caderousse</b>  Les talus amont des berges du canal sont protégés par un revêtement bitumineux qui s'est dégradé au fil des années : fissuration, affaissement localisé de la couche sous jacente au revêtement bitumineux.		Batillage, contraintes météorologiques, faibles mouvements du corps de la digue	Substitution du revêtement bitumineux par une protection en enrochements libres, recouverte de matériaux limono-graveleux et terre végétale.	

D'une manière générale, les incidents produits sur ce type d'ouvrage ont pour origines principales :

- Un niveau d'eau supérieur à celui prévu ;
- L'absence de dispositif permettant de contrôler ce niveau d'eau (déversoir) ;
- Un défaut d'étanchéité du corps de digues et de la fondation ;
- Un défaut de protection mécanique des digues.

## 7.2 Accidents, incidents, évolutions lentes survenues sur les digues

### 7.2.1 Désordres relevés lors de la réalisation de la Visite Technique Approfondie (VTA)

**Cette partie reprend les observations et conclusions réalisées lors de la VTA effectuée le 18/02/2014. Les « Id » font référence à des identifiants caractérisant les désordres relevés et recensés dans un tableau en annexe du rapport de VTA.**

La digue de Senlis compte plus de désordres préoccupant que celle de Villemétrie, mais toutes les deux sont dans un **état médiocre, voire critique** et doivent être réparées rapidement (au moins sur certaines parties).

Les **désordres sont nombreux et les plus courants et problématiques** sont des **glissements** du parement aval ou amont, des **fuites**, des **terriers**, des **désordres liés aux végétaux**.... De plus, l'ouvrage de déverse de la digue de Senlis est très dégradé.

Les zones les plus critiques de la **digue de Villemétrie** sont sa partie centrale qui compte des mouvements préoccupant (Id 11, urgence 3) et la partie amont où le muret se dégrade (Id 2, urgence 2).

Les zones les plus critiques de la **digue de Senlis** qui correspondent à des désordres d'urgence 3 sont :

- Au niveau de l'ouvrage de déverse (Id 35 et 36) ;
- Au niveau des deux renards hydrauliques, soit autour de PM225 (Id 43, 44 et 45) ;
- Autour de PM550 avec le plus important mouvement de terrain (Id 62 et 64) ;
- Entre les PM 700 et 1000, du fait de nombreux désordres d'urgence importantes (Id 84, 92, 94, 95, 100, 103, 104).

L'ensemble des désordres d'urgence 3 qui ont été relevés lors de la VTA sur la digue de Villemétrie et de Senlis sont localisés sur la cartographie de la Figure 25.



Figure 25. Localisation des profils en travers levés par le géomètre et des désordres d'urgence 3 relevés

## 7.2.2 Accidents, incidents, évolutions lentes relevés par le syndicat de la Nonette

**Cette partie reprend les événements et travaux recensés par le syndicat de la Nonette en Annexe du dossier d'ouvrage de la digue de Senlis.**

### 7.2.2.1 Travaux été 2012

Sur la digue de Villemétrie, plusieurs fuites ont été identifiées lors de la visite du 20/07/2012 par l'équipe du syndicat en amont et aval du moulin de Villemétrie.

Une très forte pluviométrie a entraîné la mise en place d'actions d'urgence. Un faucardage a été réalisé les 18, 19 et 20 juillet afin de faire baisser la hauteur d'eau de la Nonette (abaissement de 10 cm).

Le 24 Juillet, un chemin d'accès à la digue à travers le marais de Mme DE LAMORLAY a été créé afin qu'une entreprise puisse intervenir pour combler cette importante fuite.

Les photos suivantes illustrent les dégâts occasionnés et les travaux réalisés.



**Figure 25 : Photos de la fuite sur la digue de Villemétrie (source : SISN, juillet 2012)**



Figure 26 : Photo des travaux sur la fuite de la digue de Villemétrie (source : SISN, août 2012)

### 7.2.2.2 Travaux printemps 2013

Une surverse a fortement endommagé la digue de Villemétrie début 2013. Des travaux de restauration ont été réalisés en juin 2013. Ils ont consisté en la mise en place de palplanches au niveau du parement amont et un apport de terre sur le côté val pour reconstituer la crête et le parement aval.

Les photos suivantes illustrent les dégâts occasionnés et les travaux réalisés.



Figure 27 : Photos des dommages engendrés par la surverse sur la digue de Villemétrie (source : SISN, mars 2013)



Figure 28 : Photos suite aux travaux de restauration sur la digue de Villemétrie (source : SISN, juin 2013)

### 7.2.3 Événements naturels exceptionnels

Les seuls événements naturels exceptionnels connus pour les digues de la Nonette correspondent aux crues enregistrées par la station hydrométrique de la Nonette à Courteuil (Saint Nicolas d'Acy). Les informations disponibles concernant les maximums connus sont donc les suivantes :

Tableau 15. Maximums connus à la station hydrométrique de la Nonette à Courteuil

Débit instantané maximal (m <sup>3</sup> /s)	5.49	24/03/2001 20:01
Hauteur maximale instantanée (mm)	892	26/05/2009 01:01
Débit journalier maximal (m <sup>3</sup> /s)	5.39	25 mas 2001

## 7.3 Gestion du retour d'expérience

Les travaux et entretiens réalisés sur la Nonette sont recensés dans le dossier d'ouvrage de la digue à partir des fiches d'analyses et de déclaration d'E.I.S.H.

Il n'existe pas à ce jour des dispositions particulière relatives à la gestion du retour d'expérience sur les accidents, incidents et évolutions lentes survenues sur les digues de la Nonette à Senlis si ce n'est une inspection plus fréquente sur les tronçons connus comme « fragiles » de la digue.

## 8

# Identification et caractérisation des risques en termes de probabilité d'occurrence, d'intensité et de cinétique des effets, et de gravité des conséquences

## 8.1 Démarche générale

La démarche adoptée pour l'analyse de risques comprend les étapes classiques de la sûreté de fonctionnement :

- l'analyse fonctionnelle. Elle a été traitée dans le chapitre 3 de notre étude ;
- l'analyse des modes de défaillance du bassin et des ouvrages s'y rattachant, proposée à partir de la méthode AMDE – analyse des modes de défaillance et de leurs effets ;
- la modélisation de la sûreté de fonctionnement du système et des scénarios de défaillance. Elle est proposée à partir de la méthode des arbres d'événements qui permet de construire les scénarios de défaillance ;
- l'analyse quantitative des scénarios. Elle inclut une synthèse des trois premières étapes (y compris l'analyse fonctionnelle – chapitre 3) et une évaluation quantitative experte des probabilités des défaillances technologiques des composants de l'ouvrage. Les scénarios de défaillance sont évalués et associés à une probabilité d'occurrence et une description qualitative des conséquences (débits relâchés en aval du barrage).
- l'analyse de la criticité des scénarios de défaillance par le croisement de l'évaluation de leur probabilité d'occurrence et leurs conséquences.

Il est nécessaire de préciser que cette probabilité d'occurrence est faite sur la base du dire d'expert et à partir des données disponibles au moment de l'EDD. Une étude géotechnique de la digue peut amener une modification de la cotation des scénarios de défaillance concernés.

### 8.1.1 L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)

L'AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles d'un système. Elle considère systématiquement, l'un après l'autre, chaque ouvrage du système et analyse ses modes de défaillance (un mode de défaillance est la non réalisation d'une fonction dans des conditions prévues : pas, perte ou dégradation d'une fonction, fonctionnement intempestif) et leurs effets.

### 8.1.2 La modélisation des scénarios de défaillance

Lorsque les modes de défaillance ont été identifiés, les méthodes pour la modélisation des scénarios de défaillance permettent de construire les enchaînements de modes de défaillance – les scénarios de défaillance – pouvant conduire à la défaillance globale du système.

Parmi les différentes méthodes de modélisation des scénarios de défaillance, la méthode de l'arbre d'événements constitue une des principales méthodes utilisées dans le génie-civil. La séquence des événements de l'arbre se déroule de façon inductive, à partir de l'événement initiateur jusqu'aux événements finaux. L'objectif de la méthode de l'arbre d'événements est de décrire les scénarios de fonctionnement du système à partir d'un événement initiateur.

Le développement de l'arbre se fait de façon inductive, en étudiant le comportement (fonctionnement ou dysfonctionnement) de chaque composant du système. Le fonctionnement ou le dysfonctionnement d'un composant correspond alors à un événement et un scénario est formé de plusieurs événements qui se combinent. Les arbres d'événements permettent de déterminer l'enchaînement des événements jusqu'à l'événement final.

Lors d'une analyse quantitative des risques, on évalue la probabilité d'apparition de chaque événement de l'arbre et la probabilité d'apparition d'un scénario est alors égale au produit des probabilités d'apparition des événements constituant ce scénario.

La grille de probabilité d'**événements** utilisée dans cette étude, définie selon un jugement d'expert, est présentée dans le tableau suivant.

Tableau 16 : Grille de probabilité d'Événements définie selon un jugement d'expert

Appréciation experte de la probabilité d'occurrence d'un événement	Traitement quantitatif des dires d'expert
Virtuellement impossible	0,001
Très peu probable	0,01
Peu probable	0,05
Probable	0,10
Très probable	0,25
Quasiment certain	1

### 8.1.3 L'analyse de criticité

L'analyse de criticité permettra de classer les scénarios analysés en fonction de leur probabilité d'occurrence et de la gravité de leurs conséquences.

Les classes de probabilité d'occurrence des **scénarios** de défaillance utilisées dans cette étude sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 17 : Classes de probabilité d'occurrence des scénarios de défaillance

Échelle de probabilité	Description de la probabilité d'occurrence	Probabilité associée (P)
1	Scénario extrêmement peu probable	$P < 10^{-5}$
2	Scénario très peu probable	$10^{-5} \leq P < 10^{-4}$
3	Scénario peu probable	$10^{-4} \leq P < 10^{-3}$
4	Scénario probable	$10^{-3} \leq P < 10^{-2}$
5	Scénario très probable	$10^{-2} \leq P$

L'évaluation de la gravité des conséquences des scénarios analysés est réalisée dans cette étude selon les classes de gravité proposées dans le guide de lecture des études de dangers de digues (Tableau 18).

Dans le cas de notre système d'endiguement, le nombre de personnes dans la zone protégée étant inférieur à 100, la gravité ne peut être supérieure à la classe « Important ».

Tableau 18 : Classes de gravité des conséquences

Échelle de gravité	Classes de gravité des conséquences	Nombre de personnes exposées en zone à cinétique rapide	Nombre de personnes exposées en zone à cinétique lente
5	Désastreux	$\geq 1\ 000$	$\geq 10\ 000$
4	Catastrophique	$\geq 100$ et $< 1\ 000$	$\geq 1\ 000$ et $< 10\ 000$
3	Important	$\geq 10$ et $< 100$	$\geq 100$ et $< 1\ 000$
2	Sérieux	$\geq 1$ et $< 10$	$\geq 10$ et $< 100$
1	Modéré	-----	$\geq 1$ et $< 10$

Le classement et hiérarchisation des scénarios analysés sont effectués finalement à partir d'une grille de criticité, définie en fonction de leur probabilité d'occurrence et de la gravité de leurs conséquences. La grille de criticité utilisée dans cette étude est présentée à la Figure 8-1.

Criticité			Probabilité				
			Scénario extrêmement peu probable	Scénario très peu probable	Scénario peu probable	Scénario probable	Scénario très probable
			1	2	3	4	5
Gravité	Désastreux	5					
	Catastrophique	4					
	Important	3					
	Sérieux	2					
	Modéré	1					

Figure 8-1 : Grille de criticité

Finalement, les mesures de réduction des risques présentées au chapitre 9 visent à réduire la criticité des scénarios analysés par la réduction de leur probabilité d'occurrence et/ou par la diminution de leur gravité.

## 8.2 Identification des scénarios de défaillance

Les résultats de l'Analyse des Modes des Défaillance et de leurs Effets, AMDE, (cf. annexe 1) montrent que les seuls scénarios susceptibles de provoquer une libération d'un volume d'eau non contrôlée vers l'aval sont les suivants :

- Scénario 1 : rupture par érosion interne
  - dans le corps de digue (1A)
  - dans la fondation (1B)
- Scénario 2 : rupture par glissement du talus aval en période de crue
- Scénario 3 : rupture par glissement du talus amont suite à une décrue rapide
- Scénario 4 : rupture par érosion externe du talus amont en période de crue
- Scénario 5 : rupture par surverse (ouverture de brèche par érosion externe)

Les scénarios analysés ci-après concernent les événements pouvant impacter la sécurité publique conformément au décret du 11 décembre 2007.

### **Remarque sur la détermination des probabilités d'occurrence des événements :**

Il est à noter que des renards hydrauliques et des zones de glissement de talus amont et aval ont été relevés sur le système d'endiguement lors de la VTA. Ces désordres et l'absence d'une étude géotechnique actuelle amènent à considérer **des probabilités de rupture élevées**. La réalisation d'une étude géotechnique pourra amener une modification dans les calculs de probabilités des scénarios de défaillance.

### **Remarque sur la présence de palplanches dans la digue de Senlis :**

L'installation de palplanches dans le corps de digue jusqu'à sa fondation permet de pallier le risque de formation de renard hydraulique. Néanmoins, la localisation de ces palplanches n'étant pas certaine en aval de la digue de Senlis et réduite dans sa partie amont, il a donc été décidé de ne pas considérer la présence de ces palplanches dans les calculs de probabilité d'occurrence (Cf. chapitre 3.2.6). De plus, des phénomènes de glissement de talus ont été observés sur certains secteurs présentant une palplanche. Ces secteurs peuvent donc être « fragiles ». Cette hypothèse est donc sécuritaire pour la caractérisation des scénarios de défaillance.

## 8.3 Modélisation et évaluation de l'occurrence des scénarios de défaillance des digues de la Nonette

### 8.3.1 Scénario 1 : Rupture de digue par érosion interne

#### 8.3.1.1 Scénario 1A : Érosion interne dans le corps de digue

##### A- Description du scénario 1A

En période normale d'exploitation et en crue, les digues sont soumises à des sollicitations hydrauliques induisant des infiltrations d'eau dans le corps de digue et en fondation. La présence de drain/filtre permet de drainer les percolations et filtrer les éventuels transports de fines. La performance de ces filtres et drains détermine le niveau de sous-pression dans le corps de digue et la fondation et la position de la ligne de saturation correspondante, mais empêche la migration des fines à travers la couche drainante en cas de mécanisme de suffusion dans le corps de digue ou en fondation.

En absence de drain/filtre ou de défaillance du composant, les fines peuvent être entraînées de façon incontrôlée en cas de suffusion dans le corps de digue dans des zones plus perméables, provoquant alors un mécanisme d'érosion interne.

Lorsque l'ouvrage est exposé à une charge hydraulique, l'hétérogénéité de perméabilité au sein du corps peut être aussi à l'origine de zones de circulations préférentielles. Selon la charge hydraulique et la nature des matériaux, le gradient hydraulique critique peut être atteint et ceci peut provoquer localement une érosion interne ou renard hydraulique conduisant à la formation d'une brèche.

Les principaux facteurs susceptibles d'entraîner une érosion sont :

- l'ensemble des éléments participant à la réduction de la longueur du chemin hydraulique (excavation, galerie de fousseur, dégradation d'une coupure d'étanchéité,...) ;
- une mauvaise étanchéité à la jonction entre remblai et ouvrages transversaux, constituant souvent le siège d'une érosion interne ;
- l'hétérogénéité dans les couches de matériaux constitutifs du remblai (cf. paragraphe précédent) ;
- le non-respect des règles de filtre à l'interface remblai / couche drainante.

Ces différents facteurs peuvent se combiner entre eux, rendant de fait la distinction de la part de chacun des facteurs délicate.

L'inspection visuelle de la digue, en pré-crue, en crue et en post-crue, constitue le principal moyen de détection d'une amorce d'érosion interne.

Ce dispositif de surveillance constitue une barrière de sécurité importante qui devrait permettre d'engager des mesures de conservation et de remise à niveau des composants défaillants. Si le système d'auscultation ne remplit pas son rôle de surveillance (ou si l'exploitant ne prend pas les mesures nécessaires), l'érosion interne du corps de digue peut conduire à l'érosion et à la déstabilisation du corps de remblai.

## B- Modélisation du scénario 1A : Érosion interne dans le corps de digue

Le scénario 1A d'érosion interne dans le corps de digue en période de crue comporte trois modes de défaillance successifs et une barrière de sécurité susceptible également de connaître des défaillances ; l'événement initiateur est la charge hydraulique. Les modes de défaillance succédant à l'événement initiateur sont les suivants :

- défaillance d'étanchéité de la digue ;
- défaillance du système de drainage ;

→ *Barrière de sécurité : Surveillance et inspection visuelle.*

- érosion des matériaux du corps de digue ;

Ce scénario peut être modélisé par l'arbre d'événements suivant :

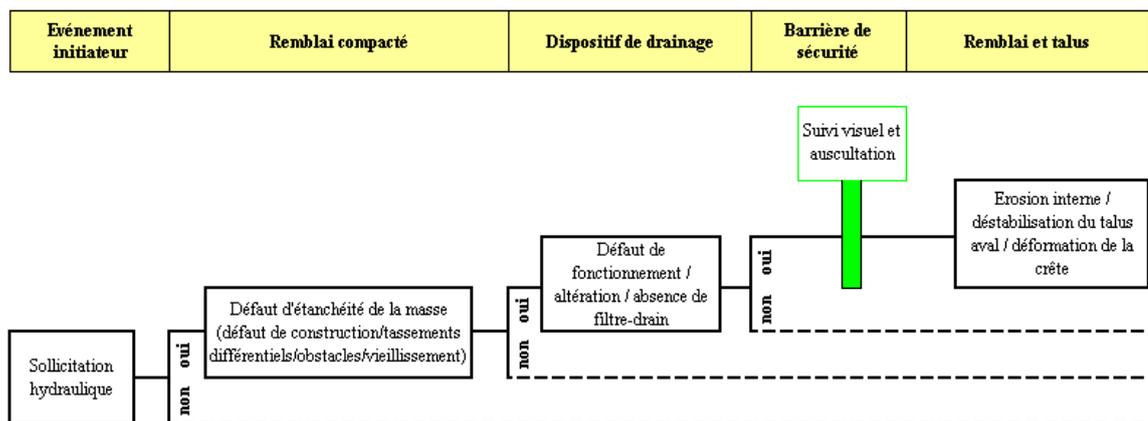


Figure 2. Arbre d'événements – Scénario 1A : rupture de la digue De la Nonette par érosion interne dans le corps de digue

## C- Quantification des probabilités d'occurrence

### a- Évaluation de l'occurrence de la sollicitation hydraulique

La Nonette étant un cours d'eau « perché » dans la zone d'étude, le système d'endiguement est continuellement en charge et la sollicitation hydraulique est constante (**Probabilité P = 1**).

### b- Évaluation de la défaillance d'étanchéité au niveau du corps de digue

La perte d'étanchéité du corps de digue peut résulter d'un défaut de construction ou d'un tassement différentiel significatif.

La nature hétérogène du corps de digue peut entraîner des variations dans la perméabilité du corps de digue. Par exemple, des perméabilités plus importantes pourront être localement rencontrées à la faveur de zone limono-sableuses et/ou riches en blocs. De telles zones peuvent constituer des chemins préférentiels d'écoulement au sein de la digue pouvant aboutir à l'apparition de phénomène d'entraînement de particules fines et de phénomènes de renard in fine.

Les données disponibles sur la perméabilité du corps de digue ne sont pas suffisantes pour analyser plus finement son étanchéité.

De plus, la présence de conduites traversantes dans le corps de digue, de terriers d'animaux fouisseurs ou de systèmes racinaires peuvent constituer le siège d'une érosion de contact ou d'un chemin préférentiel d'écoulement d'eau.

Sur la base de ces éléments, nous jugeons le défaut d'étanchéité du remblai comme « Quasi certaine » (**Probabilité : 1** ; cf. Tableau 16).

### c- Évaluation de la défaillance du dispositif de drainage

La défaillance du dispositif de drainage (perte de capacité drainante) peut résulter de :

- un défaut de conception : granulométrie inadaptée pour les matériaux drainants,
- un colmatage du dispositif de drainage (non respect des conditions de filtre),
- une mauvaise mise en œuvre.

Aucun dispositif de drainage n'équipe la digue de la Nonette.

Dans ces conditions, nous considérons que la probabilité de défaillance par colmatage de l'ensemble du système de drainage / filtration est « certaine » (**Probabilité : 1** ; cf. Tableau 16).

**d- Fiabilité de la barrière de sécurité « Surveillance et inspection visuelle »**

La surveillance visuelle du système d'endiguement constitué sur la digue de la Nonette permet de détecter tout désordre ou anomalie sur l'ouvrage.

Il s'agit ici d'évaluer la potentialité de défaillance de la barrière de sécurité « Surveillance et inspection visuelle », c'est-à-dire la probabilité qu'une anomalie sur l'ouvrage puisse échapper à l'exploitant par le suivi de l'ouvrage en termes d'observation visuelle.

Actuellement, une surveillance et inspection visuelle de la digue a été mise en place par l'Exploitant et formalisé dans le cadre de consignes écrites de surveillance et d'entretien.

Dans ces conditions, nous considérons que la probabilité de défaillance de la barrière de sécurité « surveillance » est « probable » (**Probabilité : 0,1** ; cf. Tableau 16).

**e- Évaluation de l'érosion interne du corps de digue**

Il s'agit ici d'évaluer l'érodabilité des matériaux du remblai et de la recharge aval de la digue de la Nonette, et leur potentialité à provoquer une érosion interne (« renard hydraulique »).

Les matériaux constitutifs de cette digue sont hétérogènes (limons, sablo-argileux) et de tenue mécanique médiocre

La géométrie de la recharge est en pente légèrement abrupte (comprise entre 1.5H/1V à 2H/1V pour Senlis et environ de 3H/1V à Villemétrie), rendant le chemin hydraulique relativement court et donc l'érodabilité facile.

Plusieurs renards ont été observés sur la digue de Senlis.

Dans ces conditions, on estime que la probabilité de défaillance du corps de digue par érosion interne, est « Quasi certaine » (**Probabilité : 1** ; cf. Tableau 16).

**D- Synthèse concernant le scénario 1A**

L'agrégation des probabilités des différents modes de défaillance indique la Probabilité d'occurrence du scénario.

La Probabilité d'occurrence du scénario 1A est estimée à :

$$P_{\text{scénario 1A}} = 1 \times 1 \times 1 \times 0,1 \times 1 = 1.10^{-1}.$$

Le scénario 1A d'érosion interne dans le corps de digue est jugé « **Très Probable** » (cf. Tableau 17).

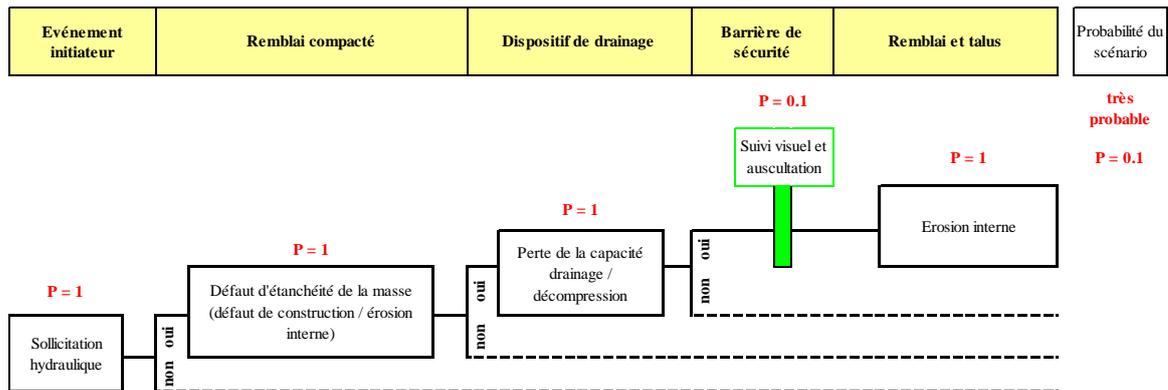


Figure 3. Quantification du scénario 1A : rupture de la digue par érosion interne

## E- Conséquences

La conséquence potentielle de ce scénario est la rupture de la digue avec libération d'eau vers l'aval.

### 8.3.1.2 Scénario 1B : Érosion interne des matériaux de fondation

#### A- Description du scénario 1B

Le mécanisme physique d'érosion interne dans les fondations meubles est quasi identique à celui d'érosion interne du corps de la digue (décrit ci-dessus). Toutefois, il faut mentionner qu'un tel mécanisme est plus insidieux en fondation que dans le remblai car il est plus difficilement détectable et le comportement du sol en place est a priori moins bien connu que pour le remblai.

Une barrière de sécurité identifiée dans ce scénario est le dispositif de surveillance sondant la piézométrie en fondation. Si la barrière de sécurité ne remplit pas son rôle de détection et d'alerte, l'érosion interne de la fondation peut conduire à la ruine de l'ouvrage.

#### B- Modélisation du scénario 1B

Le scénario 1B d'érosion interne dans la fondation suite à une crue comporte trois modes de défaillance successifs et une barrière de sécurité susceptible de connaître également une défaillance ; l'événement initiateur est la charge hydraulique. Les modes de défaillance succédant à l'événement initiateur sont les suivants :

- défaillance d'étanchéité de la fondation ;
- défaillance du système de drainage ;

➔ *Barrière de sécurité : suivi de la piézométrie en fondation*

- érosion interne de la fondation ;

Ce scénario peut être modélisé par l'arbre d'événements suivant :

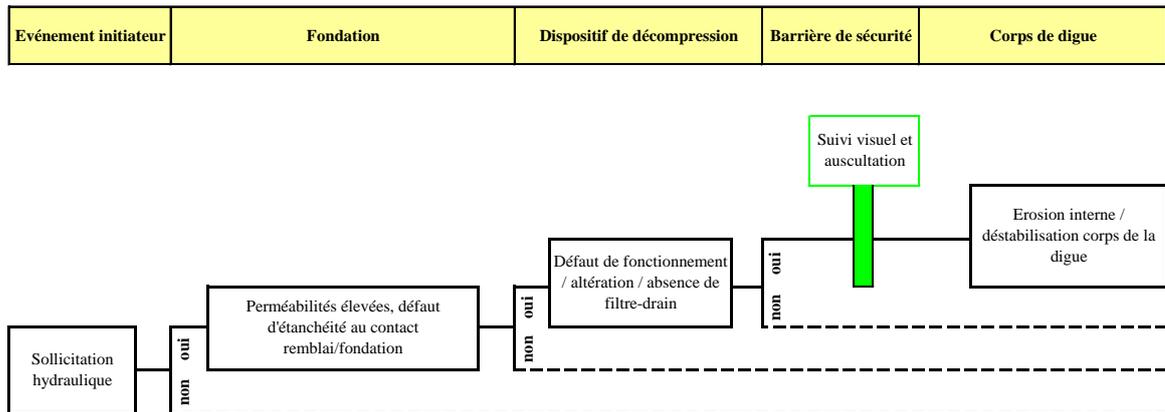


Figure 4. Arbre d'événements – Scénario 1B : rupture de la digue de la Nonette par érosion interne dans la fondation

## C- Quantification des probabilités d'occurrence (1B)

### a- Évaluation de l'occurrence de la sollicitation hydraulique

La Nonette étant un cours d'eau « perché » dans la zone d'étude, le système d'endiguement est continuellement en charge et la sollicitation hydraulique est constante (**Probabilité P = 1**).

### b- Évaluation de la défaillance d'étanchéité en fondation et au contact remblai/fondation

Les alluvions sous le remblai constituant la digue sont constituées d'alluvions récentes mécaniquement très mauvaises et d'alluvions anciennes compactes.

Des circulations d'eau superficielles et anarchiques pourront avoir lieu au sein de la fondation. Ces circulations d'eau sont susceptibles de former des poches d'eau réparties de manière aléatoire au sein de ces matériaux. Elles dépendent également des conditions météorologiques locales.

Les données disponibles sur la perméabilité de la fondation de la digue ne sont pas suffisantes pour analyser plus finement son étanchéité.

Aucune information sur le traitement de l'étanchéité au contact de la fondation (clé d'étanchéité, autre) n'est disponible.

Dans ces conditions, nous considérons que la probabilité de défaillance de l'étanchéité en fondation est « très probable » (**Probabilité : 0,25** ; cf. Tableau 16).

### c- Évaluation de la défaillance du dispositif de drainage

Aucun dispositif de drainage en fondation (décompression, tapis aval) n'a été identifié sur la digue de la Nonette.

Dans ces conditions, nous considérons que la probabilité de défaillance du drainage des fondations est « certaine » (**Probabilité : 1** ; cf. Tableau 16).

### d- Fiabilité de la barrière de sécurité « Surveillance et inspection visuelle »

La surveillance visuelle du système d'endiguement constitué sur la digue de la Nonette permet de détecter tout désordre ou anomalie sur l'ouvrage.

Il s'agit ici d'évaluer la potentialité de défaillance de la barrière de sécurité « Surveillance et inspection visuelle », c'est-à-dire la probabilité qu'une anomalie sur l'ouvrage puisse échapper à l'exploitant par le suivi de l'ouvrage en termes d'observation visuelle.

Actuellement, une surveillance et inspection visuelle de la digue a été mise en place par l'Exploitant et formalisé dans le cadre de consignes écrites de surveillance et d'entretien.

Dans ces conditions, nous considérons que la probabilité de défaillance de la barrière de sécurité « surveillance » est « probable » (**Probabilité : 0,1** ; cf. Tableau 16).

### e- Évaluation de l'érosion interne en fondation

Les données disponibles sur la nature et la cohésion des matériaux de la fondation de la digue ne sont pas suffisantes pour analyser finement sa probabilité d'érosion interne.

Nous considérons donc, par sécurité, que la probabilité de défaillance des terrains de fondation par érosion interne est « très probable » (**Probabilité 0,25**; cf. Tableau 16).

## D- Synthèse concernant le scénario 1B

L'agrégation des probabilités des différents modes de défaillance indique la Probabilité d'occurrence du scénario.

La Probabilité d'occurrence du scénario 1B est estimée à :

$$P_{\text{scénario 1B}} = 1 \times 0,25 \times 1 \times 0,1 \times 0,25 = 2,5 \cdot 10^{-2}$$

Le scénario 1B d'érosion interne en fondation est jugé « Très Probable » (cf. Tableau 17).

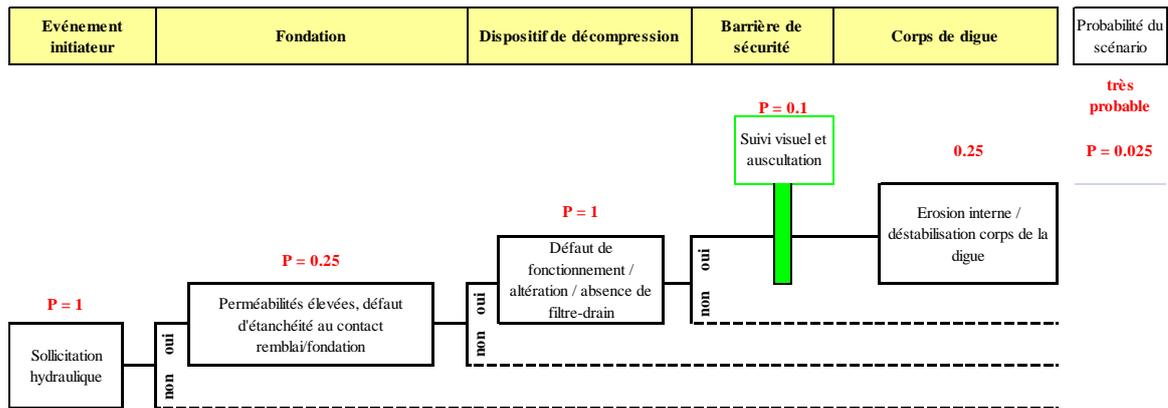


Figure 5. Quantification du scénario 1B : rupture de la digue par érosion interne en fondation

## E- Conséquences

La conséquence potentielle de ce scénario est la rupture de la digue avec libération d'eau vers l'aval.

## 8.3.2 Scénario 2 : Rupture de digue par glissement du talus aval en période de crue

### A- Description du scénario 2

Les digues sont soumises à des sollicitations hydrauliques en période de crue, induisant des infiltrations d'eau dans le corps de digue et en fondation et provoquant également des érosions à la base latérale externe de l'ouvrage (talus amont).

La réduction des percolations dans le corps de digue est assurée directement par l'étanchéité dans la masse du corps de digue et en fondation. Une perte d'étanchéité du corps de digue (par érosion interne ou par tassements différentiels) se traduit par une augmentation des percolations vers l'aval.

Le dispositif de drainage, s'il existe, a pour fonction d'intercepter et de drainer les percolations provenant de la recharge amont. Une capacité de drainage insuffisante se traduirait par une augmentation des infiltrations vers la recharge aval.

Les percolations aval peuvent entraîner une augmentation significative de la piézométrie et une augmentation des débits de fuite vers l'aval des digues.

Le glissement du talus aval est causé par l'augmentation des contraintes de cisaillement dans le talus aval liée à une augmentation du niveau piézométrique dans le corps de digue ou à une perte de résistance au cisaillement (changement de la géométrie de la digue par érosion externe, érosion interne, ...).

Des érosions et glissements successifs coté val peuvent conduire à une ouverture de brèche dans le corps de digue.

## B- Modélisation du scénario 2

Le scénario 2 de rupture par glissement suite à une crue comporte deux modes de défaillance successifs et une barrière de sécurité susceptible également de connaître des défaillances ; l'événement initiateur est la charge hydraulique. Les modes de défaillance succédant à l'événement initiateur sont les suivants :

- défaillance d'étanchéité du corps de digue ;
- défaillance du dispositif de drainage : perte de la capacité drainante et augmentation de la piézométrie dans le talus aval ;

➔ *Barrière de sécurité : inspection visuelle des glissements et des fuites au niveau du talus aval*

- glissement au niveau du talus aval ;

Ce scénario peut être modélisé par l'arbre d'événements suivant :

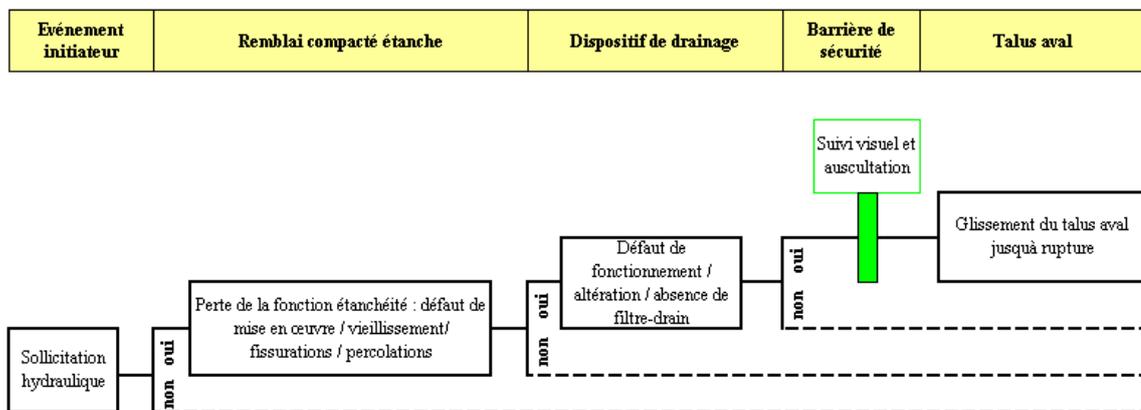


Figure 6. Arbre d'événements – Scénario 2 : rupture de la digue De la Nonette par glissement en période de crue

## C- Analyse de stabilité

Une analyse et une vérification de stabilité de la digue vis-à-vis de l'état-limite de glissement du talus aval n'a pas été réalisée dans le cadre de la présente étude.

Les probabilités sont donc estimées à dire d'expert et de façon sécuritaire.

La réalisation d'une étude géotechnique pourra amener une modification des estimations de probabilités d'occurrence des événements.

## D- Quantification des probabilités d'occurrence

### a- Évaluation de l'occurrence de la sollicitation hydraulique

La Nonette étant un cours d'eau « perché » dans la zone d'étude, le système d'endiguement est continuellement en charge et la sollicitation hydraulique est constante (**Probabilité P = 1**).

### b- Évaluation de la défaillance d'étanchéité au niveau du remblai compacté étanche

Sur la base des éléments présentés au paragraphe 8.3.1.1C-b-, nous jugeons le défaut d'étanchéité du remblai comme « Quasi certain » (**Probabilité : 1** ; cf. Tableau 16).

### c- Évaluation de la défaillance du dispositif de drainage

Cette analyse a déjà été effectuée au paragraphe 8.3.1.1C-c- « Évaluation de la défaillance du dispositif de drainage / filtration du corps de digue » et a abouti à considérer la défaillance du système de drainage comme « Certaine » (**Probabilité : 1** ; cf. Tableau 16).

### d- Fiabilité de la barrière de sécurité « Surveillance et inspection visuelle »

La surveillance visuelle du système d'endiguement constitué sur la digue de la Nonette permet de détecter tout désordre ou anomalie sur l'ouvrage.

Il s'agit ici d'évaluer la potentialité de défaillance de la barrière de sécurité « Surveillance et inspection visuelle », c'est-à-dire la probabilité qu'une anomalie sur l'ouvrage puisse échapper à l'exploitant par le suivi de l'ouvrage en termes d'observation visuelle.

Actuellement, une surveillance et inspection visuelle de la digue a été mise en place par l'Exploitant et formalisé dans le cadre de consignes écrites de surveillance et d'entretien.

Dans ces conditions, nous considérons que la probabilité de défaillance de la barrière de sécurité « surveillance » est « probable » (**Probabilité : 0,1** ; cf. Tableau 16).

### e- Évaluation de la rupture par glissement du corps de digue

La digue présente plusieurs secteurs de glissement du talus aval.

Nous jugeons comme « Très Probable » (**Probabilité : 0,25** ; cf. Tableau 16) que la marge associée au coefficient de sécurité soit insuffisante vis-à-vis de la rupture par glissement du corps de digue dans cette situation.

## E- Synthèse concernant le scénario 2

L'agrégation des probabilités des différents modes de défaillance indique la Probabilité d'occurrence du scénario.

La Probabilité d'occurrence du scénario 2 est estimée à :

$$P_{\text{scénario 2}} = 1 \times 1 \times 1 \times 0,1 \times 0,25 = 5.10^{-3}$$

Le scénario 2 de rupture de digue par glissement par augmentation significative de la piézométrie dans le corps de digue est jugé « Probable » (cf. Tableau 17).

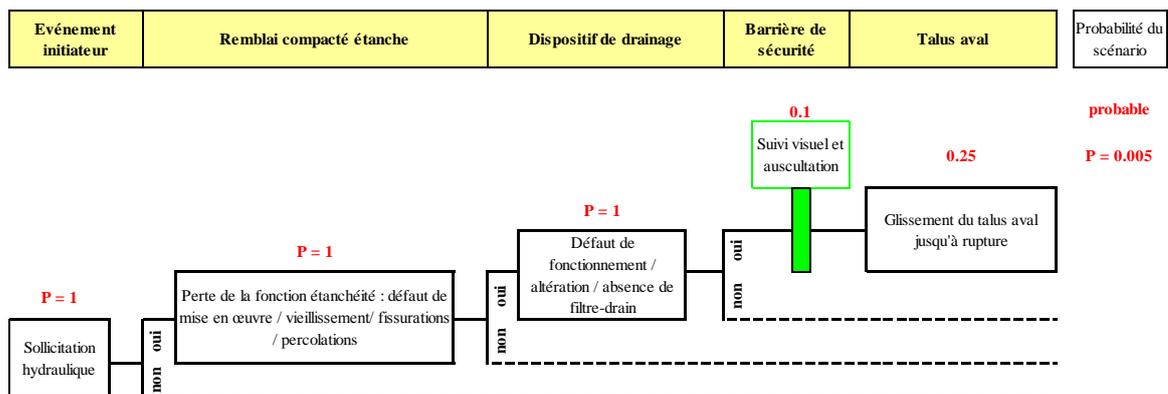


Figure 7. Quantification du scénario 2 : rupture de la digue par glissement

## F- Conséquences

La conséquence potentielle de ce scénario est la rupture de la digue avec libération d'eau vers l'aval.

### 8.3.3 Scénario 3 : Rupture de digue par glissement du talus amont suite à une décrue

#### A- Description du scénario 3

Le phénomène de décrue rapide, suite à une sollicitation hydraulique, peut conduire à un niveau piézométrique élevé au sein du corps de digue et à une instabilité du talus amont.

Des glissements du talus amont peuvent être alors possibles et provoquer la rupture du corps de digue. Cependant, ce scénario envisage une libération d'eau vers l'aval décalée par rapport au pic de crue, la décrue s'étant déjà réalisée.

## B- Modélisation du scénario 3

Le scénario 3 de rupture par glissement suite à une décrue rapide comporte deux modes de défaillance successifs ; l'événement initiateur est la décrue. Les modes de défaillance succédant à l'événement initiateur sont les suivants :

- défaillance de la recharge amont ;
- défaillance de résistance du corps de digue ;

Ce scénario peut être modélisé par l'arbre d'événements suivant :

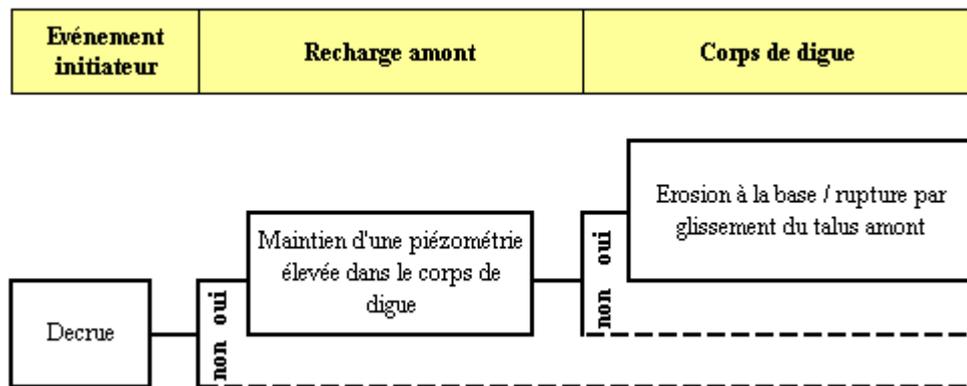


Figure 8. Arbre d'événements – Scénario 3 : rupture de digue De la Nonette par glissement du talus amont suite à une décrue

## C- Analyse de stabilité

Une analyse et une vérification de stabilité de la digue vis-à-vis de l'état-limite de glissement du talus amont n'a pas été réalisée dans le cadre de la présente étude.

Les probabilités sont donc estimées à dire d'expert et de façon sécuritaire.

La réalisation d'une étude géotechnique pourra amener une modification des estimations de probabilités d'occurrence des événements.

## D- Quantification des probabilités d'occurrence

### a- Évaluation de l'occurrence de la sollicitation hydraulique

La Nonette étant un cours d'eau perché et très artificialisé sur ce secteur, les crues rencontrées sont relativement faibles et lentes.

Par conséquent, nous considérons que l'occurrence d'une crue suivi d'une décrue rapide est « peu probable » (**Probabilité : 0,05** ; cf. Tableau 16).

**b- Évaluation d’une piézométrie élevée suite à une décrue**

La Nonette étant un cours d’eau perché et très artificialisé sur ce secteur, la piézométrie dans le corps de digue semble relativement constante au regard du marnage du cours d’eau.

Le temps de décrue semble suffisamment long pour que le talus amont de la digue se draine en même temps que la descente.

Par conséquent, nous considérons que le maintien d’une piézométrie élevée dans le talus amont est « peu probable » (**Probabilité : 0,05** ; cf. Tableau 16).

**c- Évaluation de la rupture par glissement du corps de digue**

En regard des secteurs de la Nonette où des glissements de talus amont ont été observés, nous considérons que le glissement du talus amont à l’issue d’une décrue est « très probable » (**Probabilité : 0,25** ; cf. Tableau 16).

**E- Synthèse concernant le scénario 3**

L’agrégation des probabilités des différents modes de défaillance indique la Probabilité d’occurrence du scénario.

La Probabilité d’occurrence du scénario 3 est estimée à :

$$P_{\text{scénario 3}} = 0,05 \times 0,05 \times 0,25 = 6,25.10^{-4}$$

Le scénario 3 de rupture de digue par glissement du talus amont suite à une décrue est jugé peu probable (cf. Tableau 17).

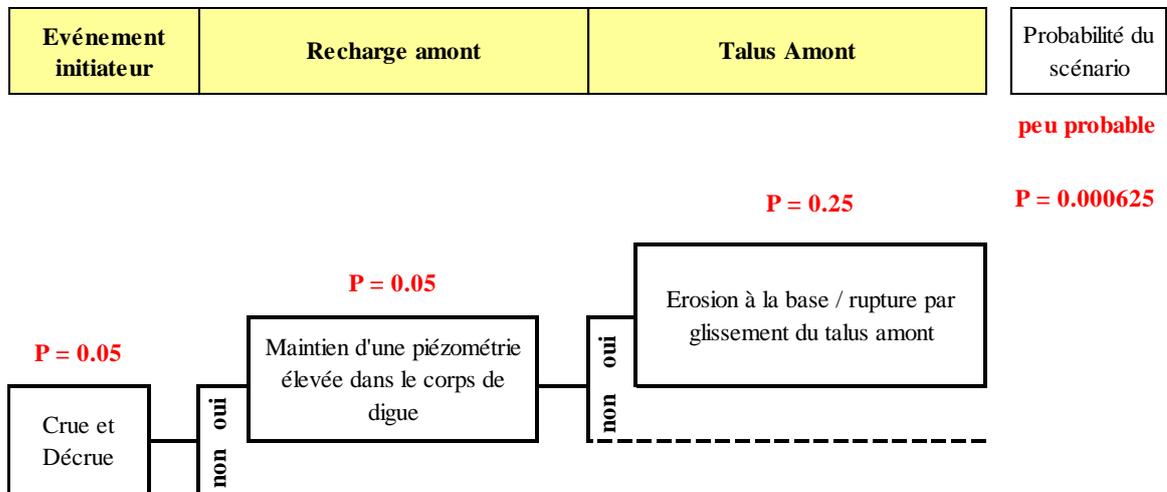


Figure 9. Quantification du scénario 1B : rupture de la digue par glissement du talus amont

## F- Conséquences

La Nonette étant une digue perchée et donc continuellement soumise à une charge hydraulique, la conséquence potentielle de ce scénario est la rupture de la digue avec libération d'eau vers l'aval.

### 8.3.4 Scénario 4 : Rupture de digue par surverse

#### A- Description du scénario 4

Lorsque d'une crue, la rivière peut dépasser la crête de la digue : nous parlons alors de phénomène de surverse. L'eau s'écoule du côté val et inonde alors la zone protégée. La surverse entraîne généralement l'érosion externe du talus aval puis une ouverture de brèche par auto-accélération rapide du phénomène. La rupture peut alors se produire.

La protection du talus aval et une faible pente peuvent freiner le phénomène d'érosion.

#### B- Modélisation du scénario 4

Le scénario 4 de rupture par surverse suite à une crue comporte deux modes de défaillance successifs l'événement initiateur est la crue. Les modes de défaillance succédant à l'événement initiateur sont les suivants :

- défaillance de la hauteur de crête ;
- défaillance de la résistance du corps de digue.

Ce scénario peut être modélisé par l'arbre d'événements suivant :

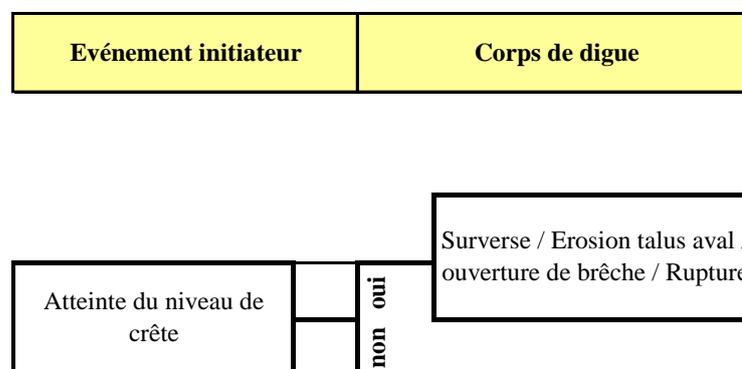


Figure 10. Arbre d'événements - Scénario 4 : rupture par surverse de la digue de la Nonette

## C- Quantification des probabilités d'occurrence

### a- Évaluation de la potentialité d'une montée d'eau au dessus de la hauteur de la crête

Selon les résultats des modélisations hydrauliques réalisées, la digue de la Nonette est surversée pour un débit de 1,3 m<sup>3</sup>/s soit pour une période de retour comprise entre celle du module et de la crue biennale (Module = 1,1 m<sup>3</sup>/s et Q<sub>2</sub> = 2,5 m<sup>3</sup>/s).

Compte tenu de ces éléments, nous jugeons comme « Très probable » (**Probabilité : 0,25**; cf. Tableau 16) l'occurrence d'un dépassement de la crête de la digue.

### b- Évaluation de l'érosion par surverse de la crête et du talus aval

La digue de la Nonette étant un ouvrage en remblai, la probabilité de ruine de l'ouvrage par surverse est considérée comme « quasi certaine » (**Probabilité : 1** ; cf. Tableau 16).

## D- Synthèse concernant le scénario 4

La Probabilité du scénario de rupture de la digue par surverse est estimé à :

$$P_{\text{scénario 4}} = 0,25 \times 1 = 2,5 \cdot 10^{-1}$$

Le scénario 4 de rupture de digue par surverse est jugé « très probable » (cf. Tableau 17).

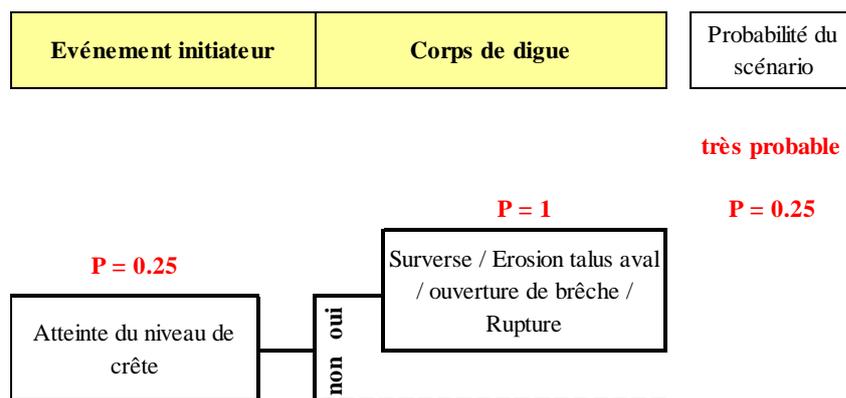


Figure 11. Quantification du scénario 4 : rupture de la digue par surverse

## E- Conséquences

La conséquence potentielle de ce scénario est la rupture de la digue avec libération d'eau vers l'aval.

### 8.3.5 Scénario 5 : Rupture par érosion externe du talus amont en période de crue

#### A- Description du scénario 5

De façon générale pour ce secteur de la Nonette et en particulier en période de crue, le talus amont des digues subit les effets des contraintes d'arrachement créées par les courants hydrauliques, susceptibles d'entraîner l'érosion sur la partie la plus sollicitée du parement amont (généralement à la base du talus). Il en résulte un raidissement de la pente locale qui, associé à l'affaiblissement des caractéristiques mécaniques, entraîne des glissements favorisant à leur tour les perturbations hydrauliques et la diminution du chemin hydraulique. Par rupture successives du talus amont, l'ouverture d'une brèche peut se produire.

Les principaux facteurs susceptibles d'entraîner cette dégradation sont :

- vitesse moyenne de l'eau le long du talus amont, qui est liée à la distance de la digue par rapport au lit mineur, et/ou à la berge ;
- perturbations hydrauliques locales pouvant entraîner des courants et tourbillons avec des vitesses locales plus élevées que la vitesse moyenne du tronçon ;
- nature et la protection du talus amont. Un perré en bon état est réputé pouvoir résister à une vitesse moyenne de 4 m/s tandis qu'un talus simplement enherbé ne supportera pas des vitesses dépassant 1,5 m/s.

#### B- Modélisation du scénario 5

Le scénario 5 de rupture du talus amont par érosion externe comporte deux modes de défaillance successifs ; l'événement initiateur est le flux hydraulique du cours d'eau, générant une énergie spécifique. Les modes de défaillance succédant à l'événement initiateur sont les suivants :

- défaillance de la protection du talus apportée par le parement ;

➔ *Barrière de sécurité : présence d'engrochements sur le talus amont*

- défaillance de résistance des matériaux du corps de digue jusqu'à l'ouverture d'une brèche.

Ce scénario peut être modélisé par l'arbre d'événements suivant :

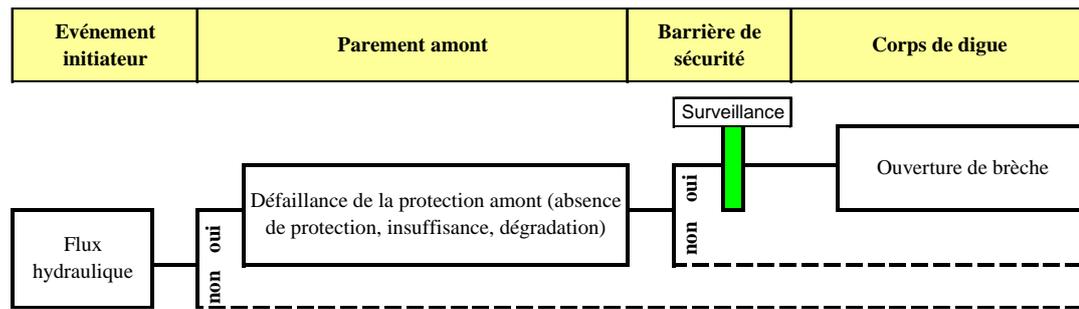


Figure 12. Arbre d'événements – Scénario 5 : rupture de digue de la Nonette par érosion externe

### a- Occurrence de la sollicitation hydraulique

La Nonette étant un cours d'eau « perché » dans la zone d'étude, le système d'endiguement est continuellement en charge et la sollicitation hydraulique est constante (**Probabilité P = 1**).

### b- Défaillance de la protection amont

Un dispositif de protection du talus amont a été mis en place sur certains secteurs de la digue de Senlis par l'installation de « matelas de type RENO » lors des travaux de renforcements de 2001. Néanmoins, ces renforcements ne concernent qu'un linéaire de 600 m sur les 1100 m de la digue de Senlis.

Le secteur de l'ancienne surverse de la digue de Villemétrie a également été renforcé côté amont par la mise en place d'une palplanche. Ce linéaire de renforcements est également relativement restreint.

Dans ces conditions, nous considérons que la probabilité de défaillance ou l'insuffisance de la protection amont est « probable » (**Probabilité : 0,1** ; cf. Tableau 16).

### c- Fiabilité de la barrière de sécurité « Surveillance et inspection visuelle »

La surveillance visuelle du système d'endiguement constitué sur la digue de la Nonette permet de détecter tout désordre ou anomalie sur l'ouvrage.

Il s'agit ici d'évaluer la potentialité de défaillance de la barrière de sécurité « Surveillance et inspection visuelle », c'est-à-dire la probabilité qu'une anomalie sur l'ouvrage puisse échapper à l'exploitant par le suivi de l'ouvrage en termes d'observation visuelle.

Actuellement, une surveillance et inspection visuelle de la digue a été mise en place par l'Exploitant et formalisé dans le cadre de consignes écrites de surveillance et d'entretien.

Dans ces conditions, nous considérons que la probabilité de défaillance de la barrière de sécurité « surveillance » est « probable » (**Probabilité : 0,1** ; cf. Tableau 16).

**d- Ouverture de brèche**

La digue de la Nonette étant toujours en eau, il n'existe pas de franc-bord assurant une protection contre l'érosion latérale de la digue par diminution des vitesses de circulation et des sollicitations dynamiques.

Nous jugeons comme « Probable » (**Probabilité : 0,1** ; cf. Tableau 16) l'ouverture d'une brèche dans le corps de digue par érosion externe lors d'une crue.

**C- Synthèse concernant le scénario 5**

L'agrégation des probabilités des différents modes de défaillance indique la Probabilité d'occurrence du scénario.

La Probabilité d'occurrence du scénario 5 est estimée à :

$$P_{\text{scenario 5}} = 1 \times 0,1 \times 0,1 \times 0,1 = 10^{-3}$$

Le scénario 5 de rupture de digue par érosion externe du talus amont est jugé « peu probable » (cf. Tableau 17).

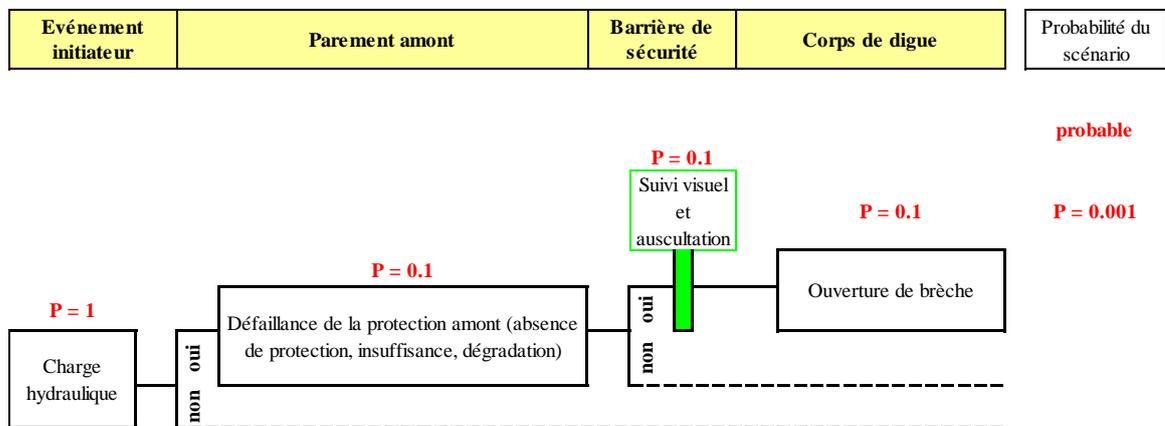


Figure 13. Quantification du scénario 5 : rupture de digue de la Nonette par érosion externe

**D- Conséquences**

La conséquence potentielle de ce scénario est la rupture de la digue avec libération d'eau vers l'aval.



## 8.4 Évaluation des conséquences potentielles : étude d'onde de rupture

Les conséquences potentielles de la rupture des digues ont été estimées à partir d'une étude d'ondes de rupture.

L'étude d'onde de submersion fait partie intégrante de l'étude de dangers qui vise à analyser les risques et enjeux associés au système digue étudié.

Elle étudie plus particulièrement les conséquences suite à la rupture de l'ouvrage et vise à qualifier et quantifier les impacts hydrauliques (propagation de l'onde, hauteurs d'eau, débits et vitesses atteintes) côté val, et plus spécifiquement sur les zones de défaillances suivantes :

1. Une défaillance localisée en un secteur qui conduit à l'inondation de toute la zone protégée ;
2. Une défaillance localisée en un secteur pour lequel la rupture est identifiée comme particulièrement probable ;
3. Une défaillance localisée en un secteur identifié comme particulièrement vulnérable pour la sécurité publique (typiquement, au droit d'une zone très habitée).

L'**Annexe 4** du présent rapport décrit la méthodologie employée pour construire le modèle hydraulique ainsi que les principales hypothèses considérées.

La localisation des simulations de rupture a été déterminée à partir des observations réalisées lors de la Visite Technique Approfondie (VTA) réalisée le 18/02/2014.

### 8.4.1 Rappel sur le diagnostic de la VTA

Des désordres d'urgence 3 ont été relevés, ceux-ci sont liés à la présence d'une ancienne zone de surverse, de glissements de talus, de renards hydrauliques, par exemple.

Les zones les plus critiques de la digue de Villemétrie sont sa partie centrale qui compte des mouvements préoccupant (Id 11, urgence 3) et la partie amont où le muret se dégrade (Id 2, urgence 2).

Les zones les plus critiques de la digue de Senlis qui correspondent à des désordres d'urgence 3 sont :

- Au niveau de l'ouvrage de déverse (Id 35 et 36) ;
- Au niveau des deux renards hydrauliques, soit autour de PM225 (Id 43, 44 et 45) ;
- Autour de PM550 avec le plus important mouvement de terrain (Id 62 et 64) ;

- Entre les PM 700 et 1000, du fait de nombreux désordres d'urgence importantes (Id 84, 92, 94, 95, 100, 103, 104).

L'ensemble des désordres d'urgence 3 qui ont été relevés lors de la VTA sur la digue de Villemétrie et de Senlis sont localisés sur la cartographie de la Figure 18. Les profils en travers qui ont été levés par un géomètre sont également représentés sur cette carte.

Une rupture de digue pour 4 différents points de faiblesse relevés de la digue a été modélisée. La Figure 18 cartographie également la localisation des simulations de rupture réalisées.

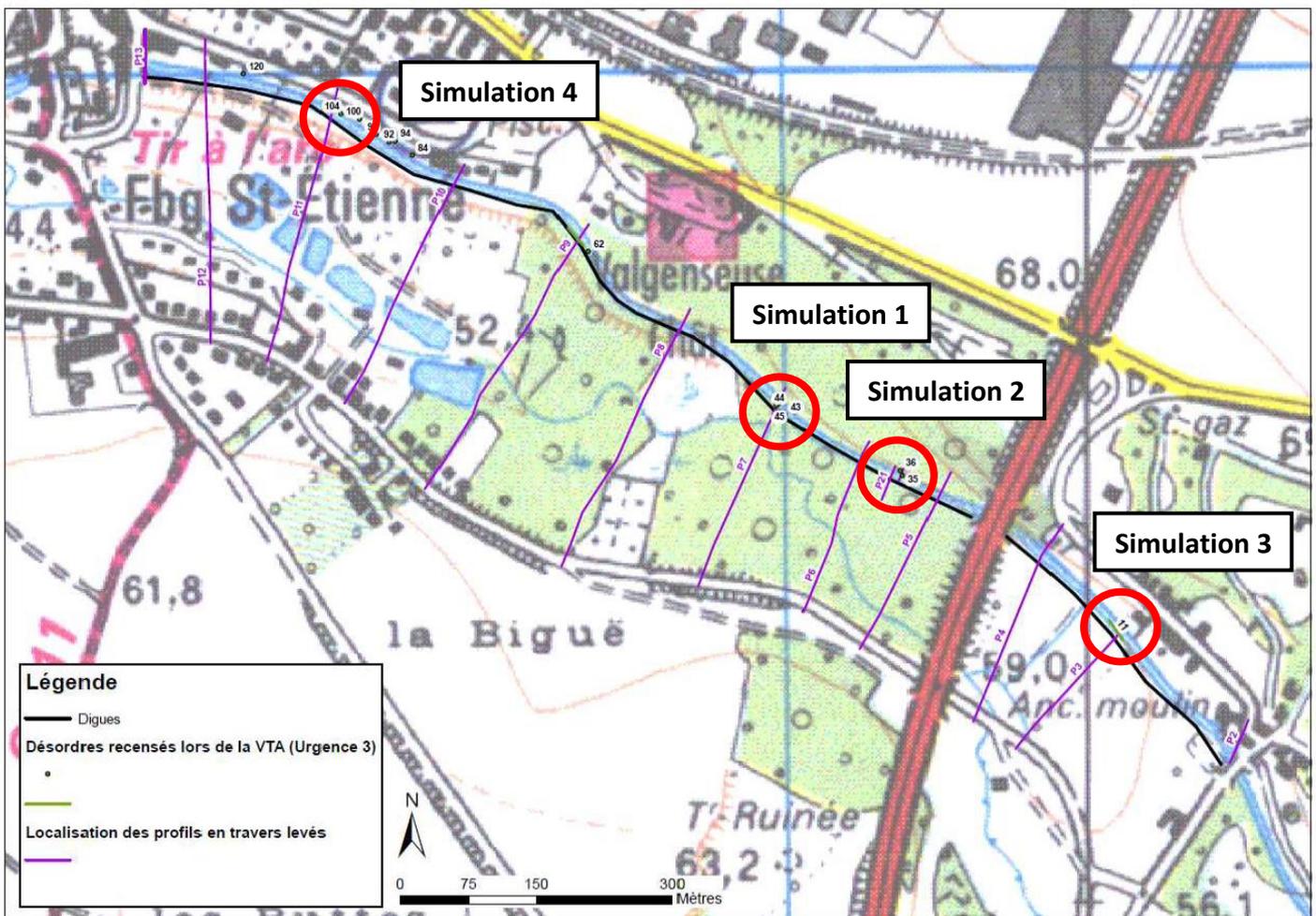


Figure 14. Localisation des simulations de rupture de digue

## 8.4.2 Détermination des zones de brèche

La détermination des simulations a suivi la démarche suivante :

- Les **simulations 1 et 2** localisées au droit du déversoir et des renards hydrauliques sont modélisées car elles semblent être les plus probables en termes de rupture et correspondent à des mécanismes de rupture différents.

- La **simulation 3** situé à Villemétrie présente peu d'enjeux mais ce scénario est modélisé car cette section de digue fait partie du classement réalisé par la DREAL et il est intéressant de connaître l'impact d'une rupture en amont de l'autoroute pour connaître son influence éventuelle sur les écoulements.
- La **simulation 4** le plus en aval au droit de la zone la plus urbanisée est modélisée car proche des enjeux du secteur urbanisé de la zone d'étude.

L'**Annexe 4** du présent rapport présente les caractéristiques des brèches simulées à l'aide du modèle hydraulique.

### 8.4.3 Résultats de la simulation 1

Les bâtis ont été rajoutés sur la cartographie des résultats des simulations pour analyser l'impact sur ces enjeux. Un certain décalage peut apparaître entre le Scan25 et ces bâtis car les Orthophotos ont été utilisées pour dessiner la couche, celles-ci ayant été estimées comme plus précises.

#### 8.4.3.1 Hydrogramme de rupture

L'hydrogramme de rupture consécutif à la rupture de la digue de Senlis au droit des désordres observés des renards hydrauliques présenté ci-dessous.

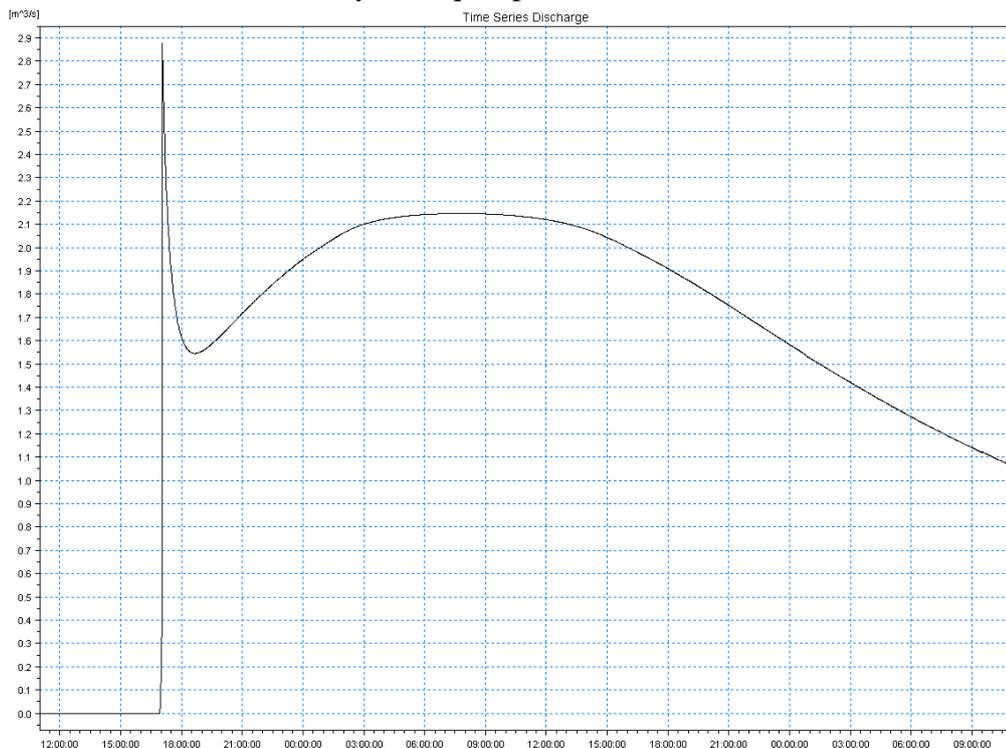


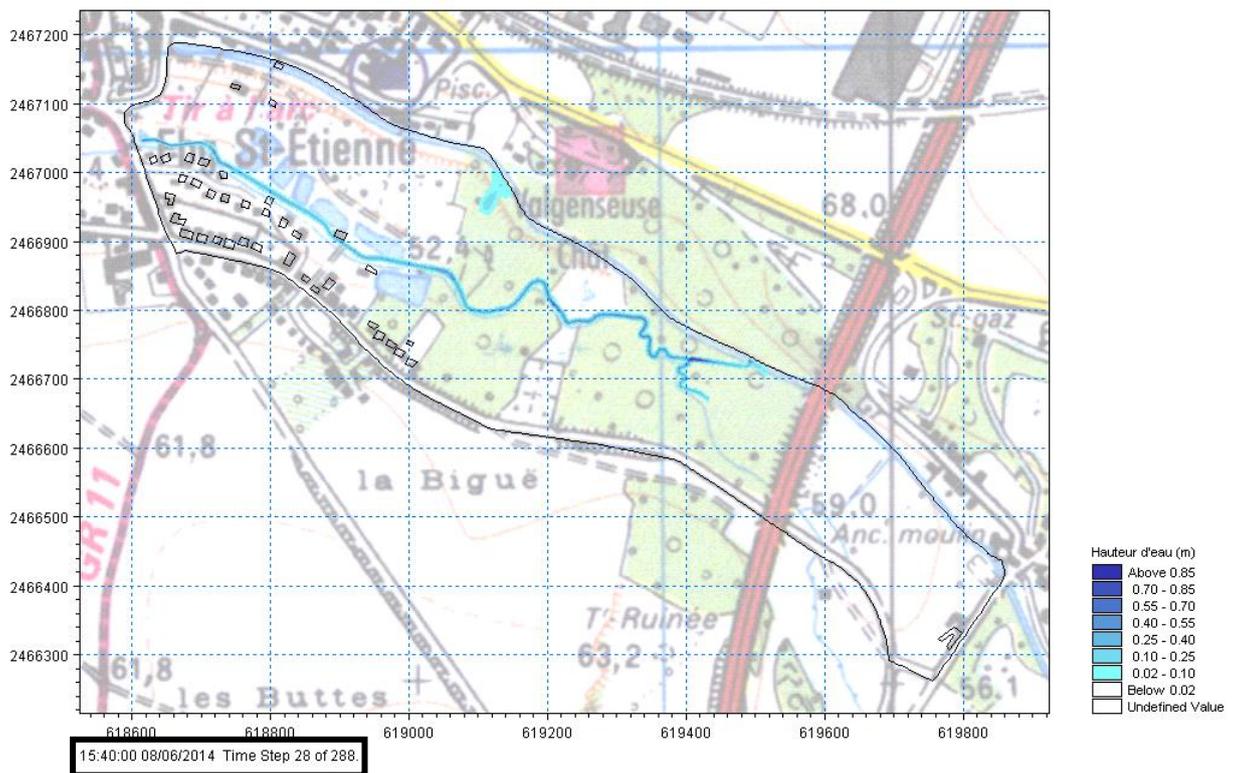
Figure 15. Hydrogramme passant par la brèche - Simulation 1

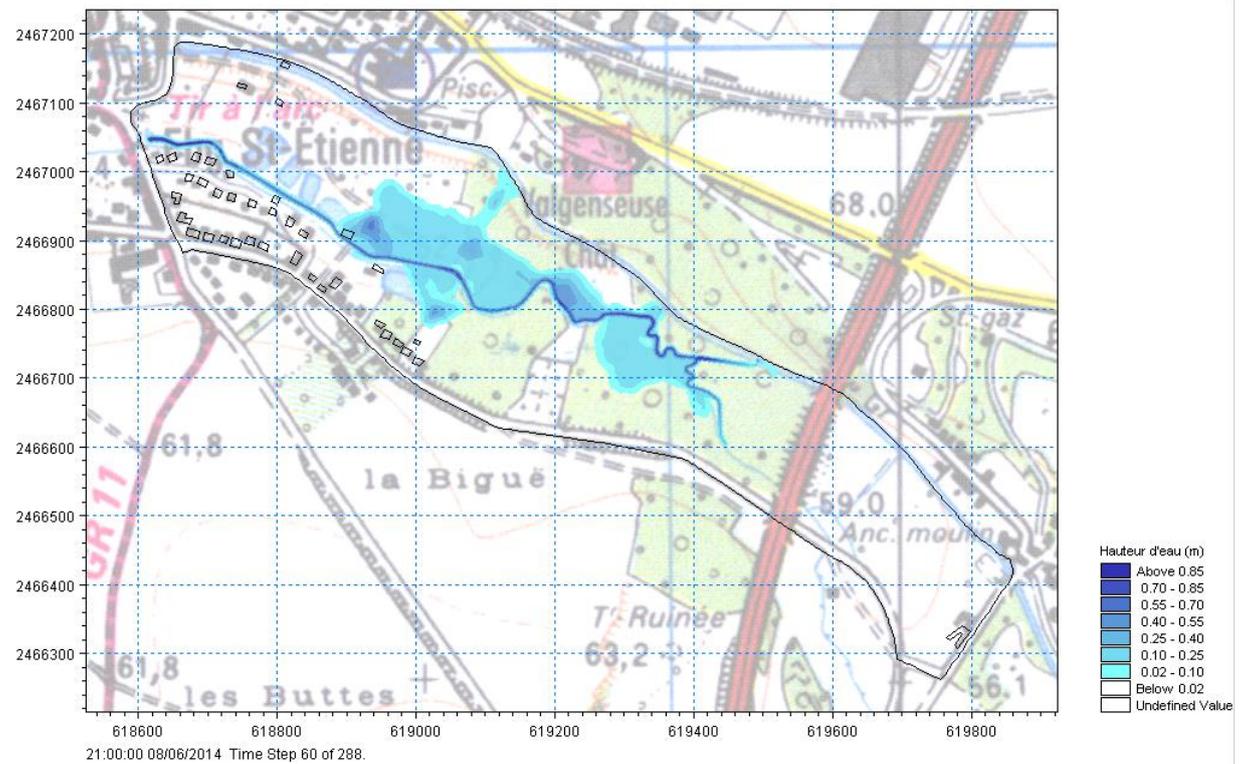
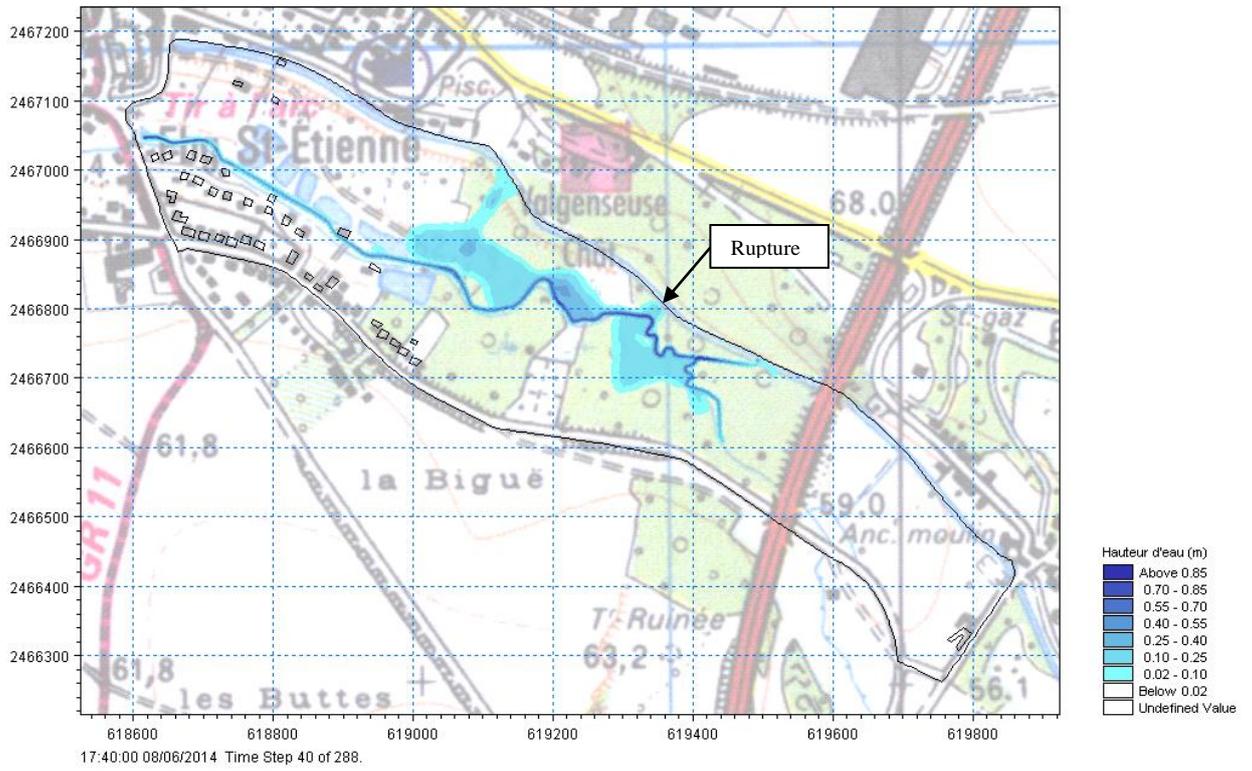
Le débit de pointe est de **2.9 m<sup>3</sup>/s**. Celui-ci est atteint **10 minutes** après l'initialisation de la rupture.

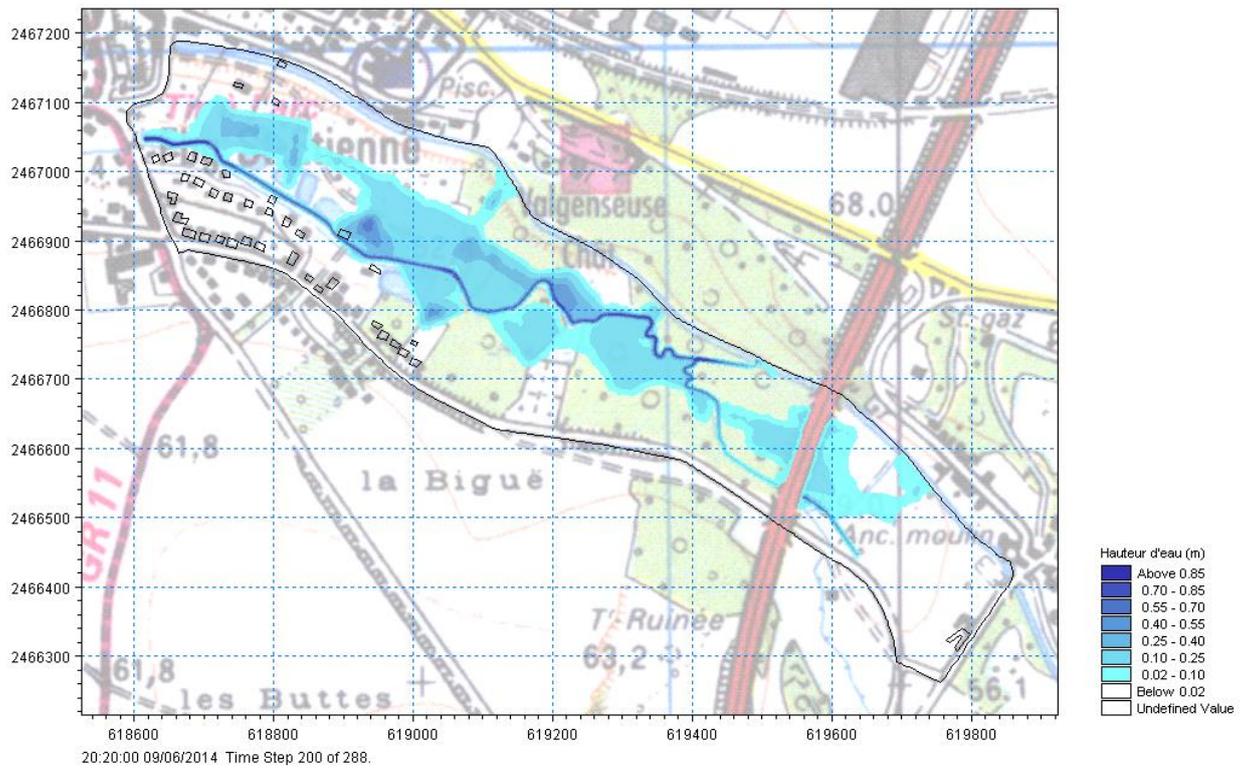
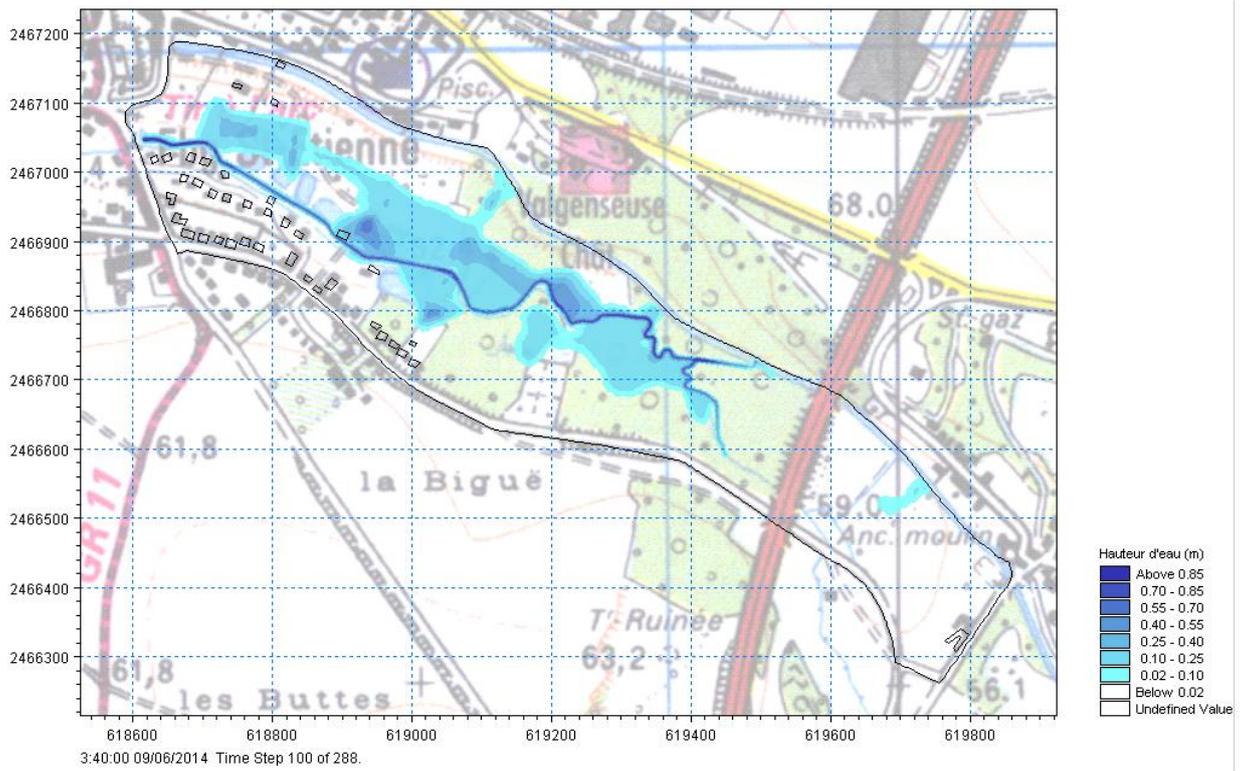
### 8.4.3.2 Propagation des flux dans la zone modélisée en 2D

Les figures suivantes représentent la propagation des flux en lit majeur suite à la rupture de la digue. La date et l'heure des cartographies suivantes sont indiquées en bas à gauche.

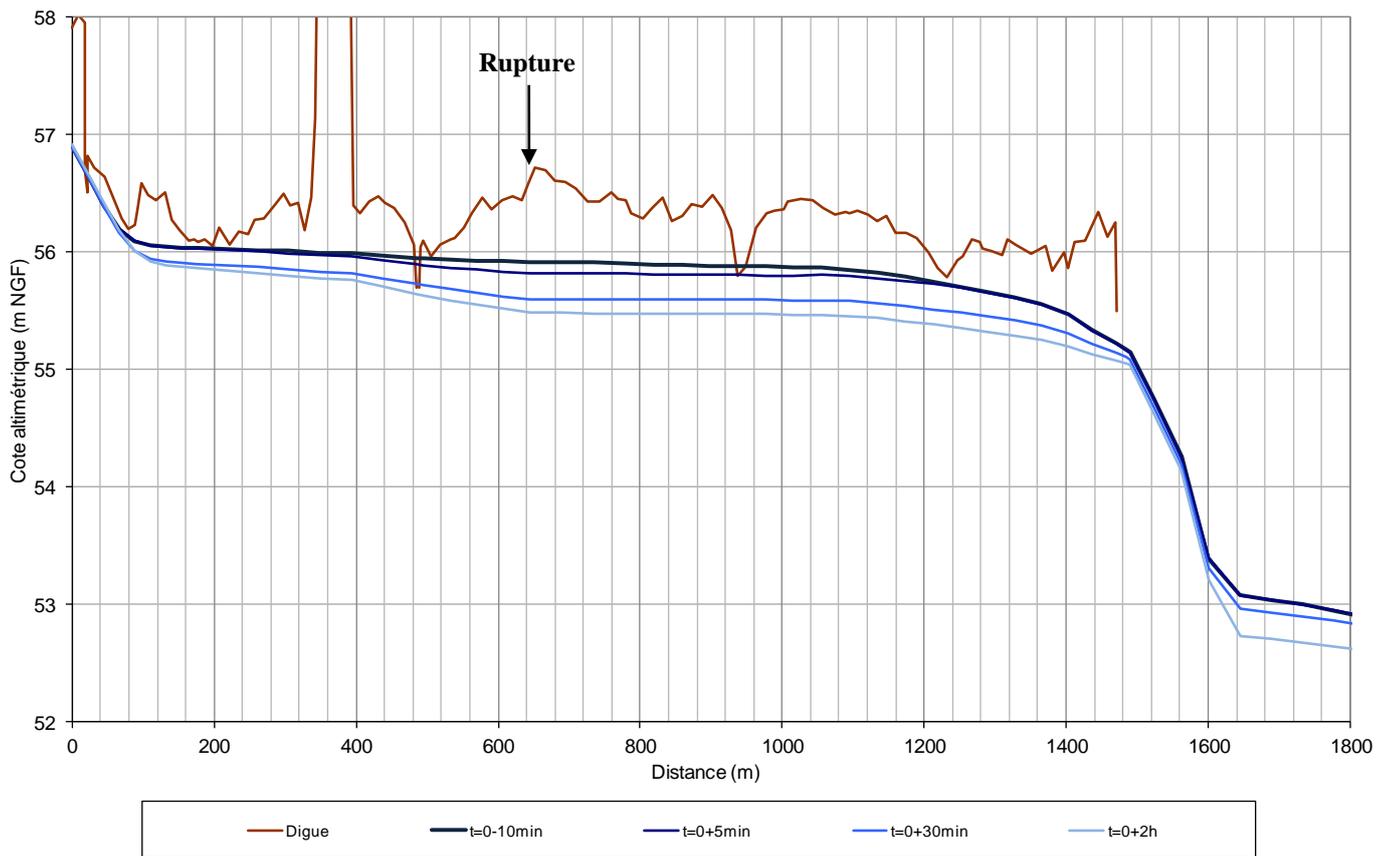
La première cartographie correspond aux hauteurs d'eau atteintes 40 minutes après le début de la surverse. La deuxième cartographie correspond aux hauteurs d'eau atteintes 40 minutes après la rupture de digue.







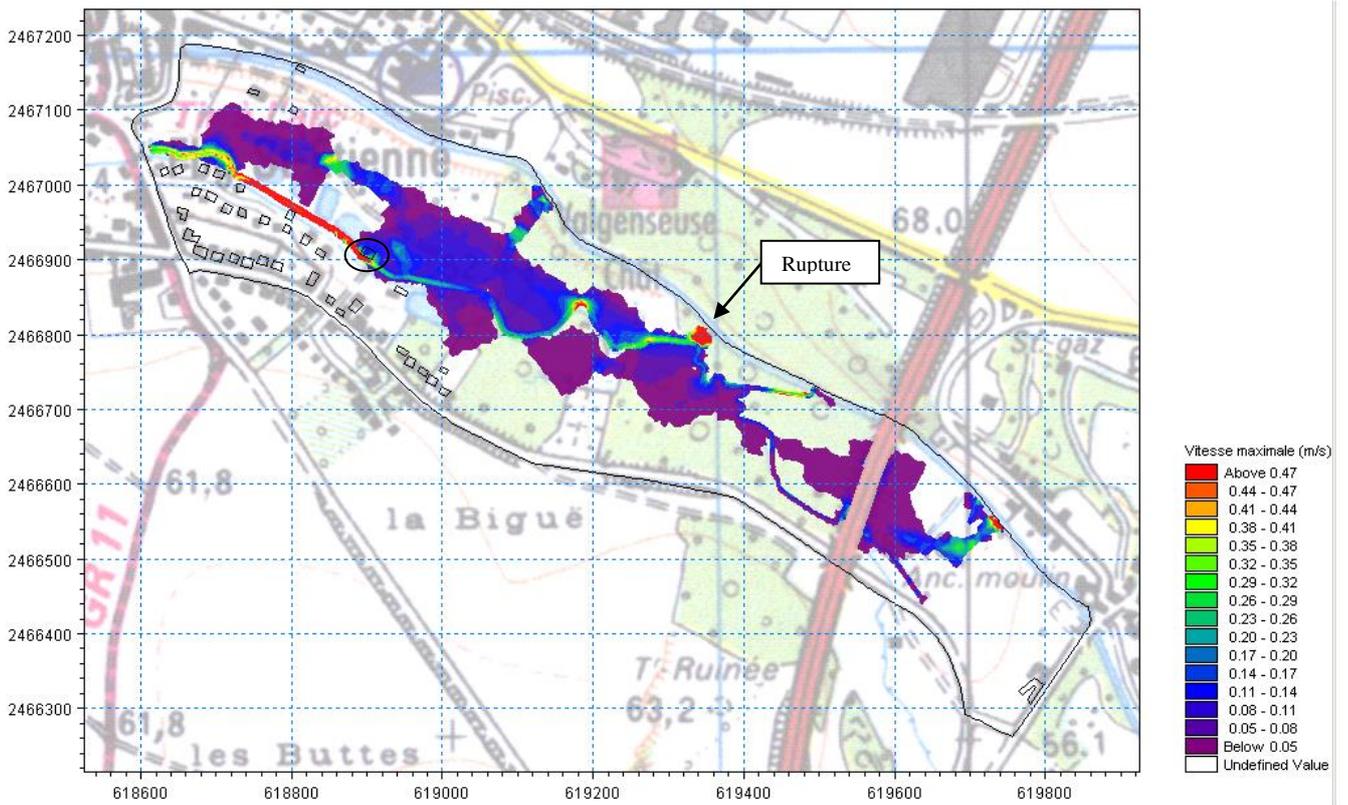
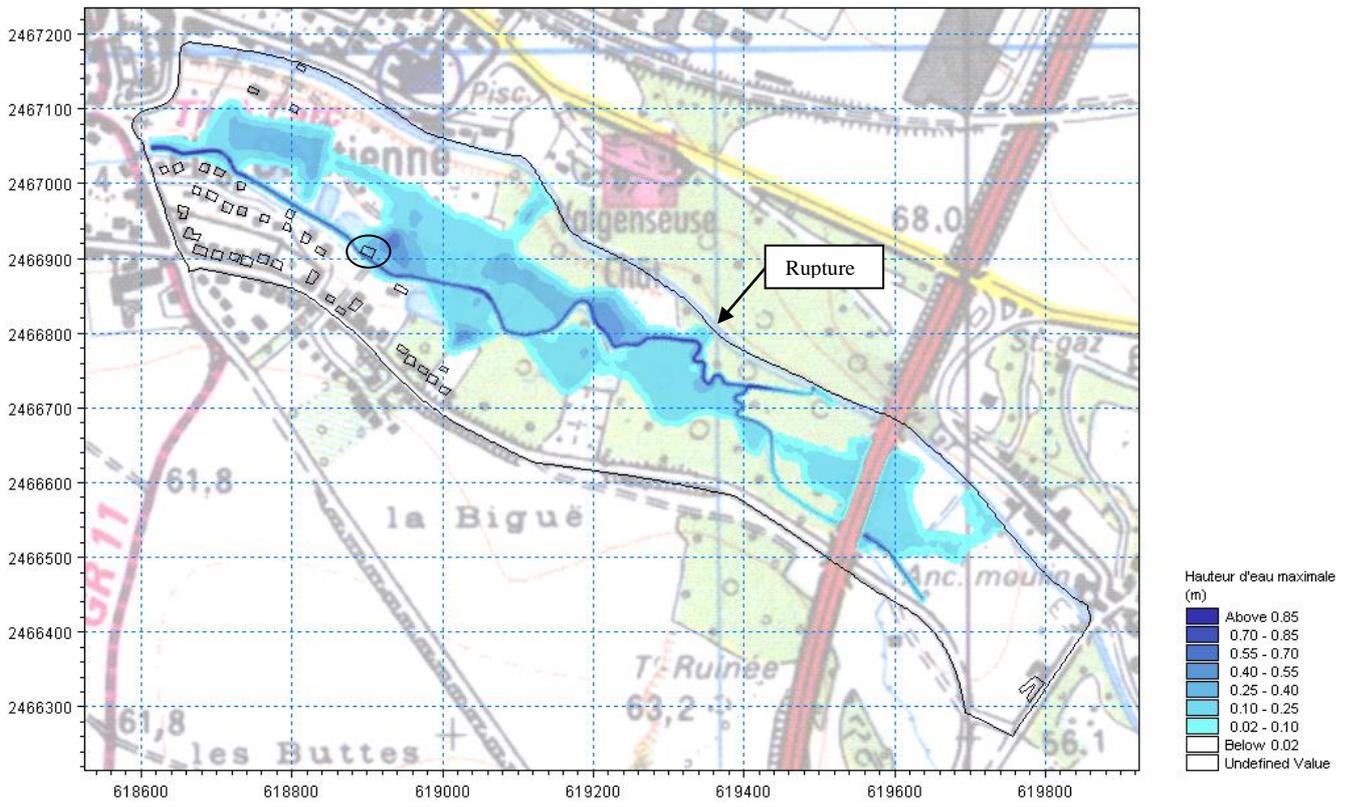
La ligne d'eau dans la Nonette est la suivante :



### 8.4.3.3 Cartographies des isohauteurs et isovitesses maximales dans la zone 2D

La cartographie ci-après présente les isohauteurs maximales atteintes par l'onde en aval du site de rupture.

Les habitations touchées par les inondations ont été entourées en noir sur les cartes suivantes (soit 1 habitation).

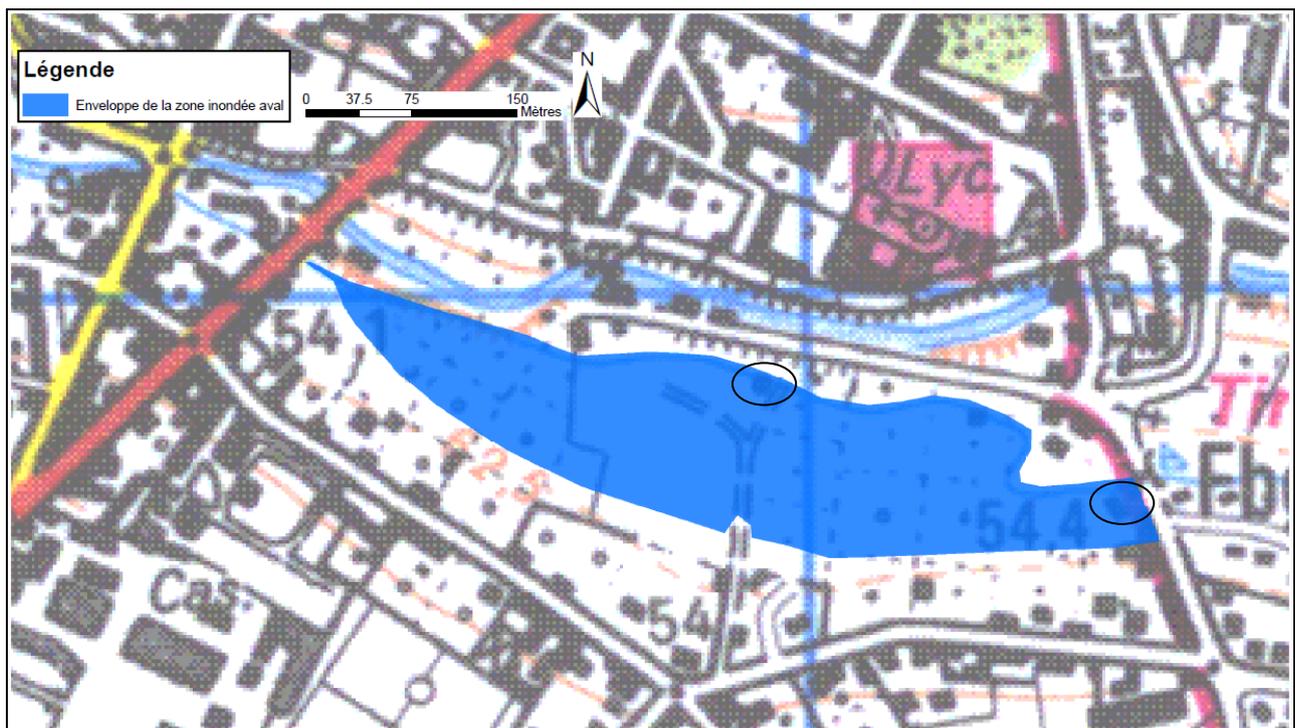


### 8.4.3.4 Cartographies de l'enveloppe d'inondation dans la zone 1D

Cette cartographie représente l'**enveloppe de la zone inondée** en aval du pont de la rue du vieux-chemin de Meaux, ce secteur ayant été modélisé en 1D et non en 2D comme les zones cartographiées précédemment.

L'absence de MNT sur ce secteur ne permet pas de réaliser une cartographie des hauteurs d'eau. Néanmoins, on peut noter que **la hauteur d'eau maximale atteinte est de 35-40 cm** dans le lit majeur.

Les habitations touchées par les inondations ont été entourées en noir sur la carte suivante (soit 2 habitations).



**Pour ce scénario, on a donc en tout 3 habitations soit environ  $3 \times 2,5 = 7,5$  personnes touchées par les inondations en cas de rupture de la digue.**

## 8.4.4 Résultats de la simulation 2

### 8.4.4.1 Hydrogramme de rupture

L'hydrogramme de rupture consécutif à la rupture de la digue de Senlis au droit du déversoir est présenté ci-dessous.

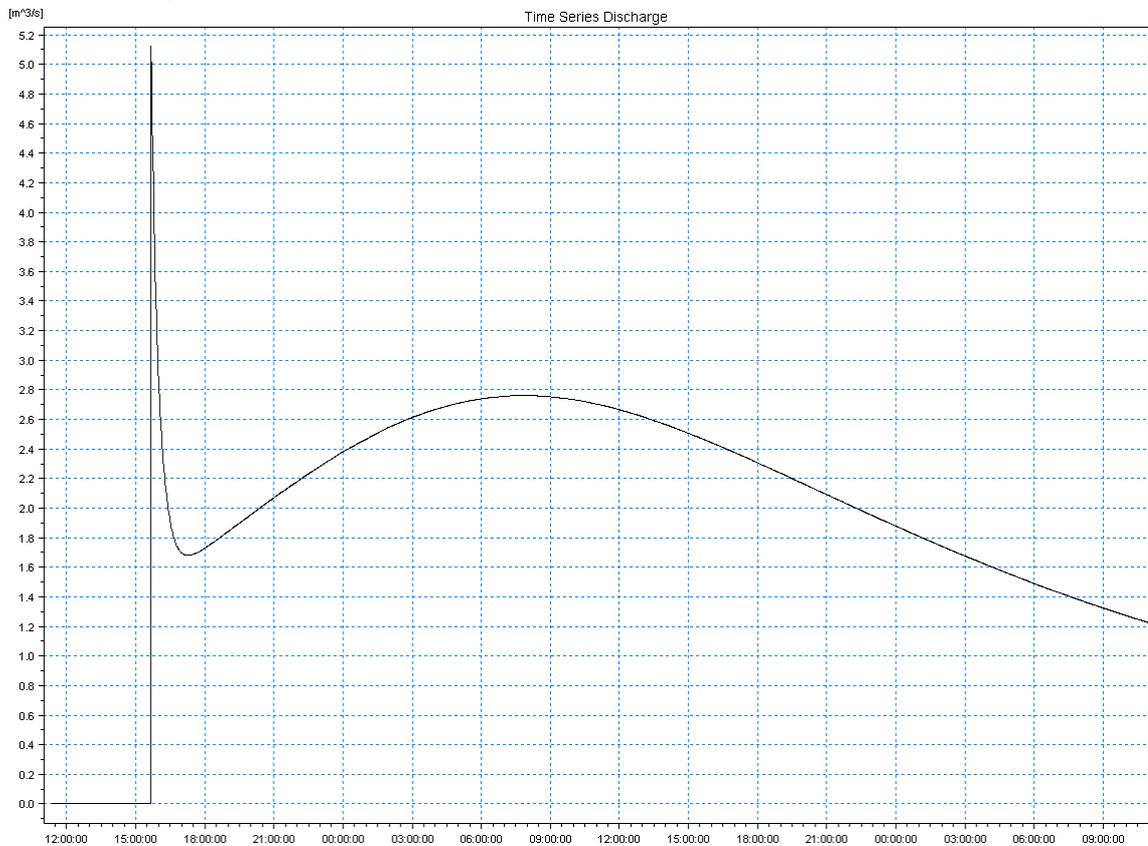


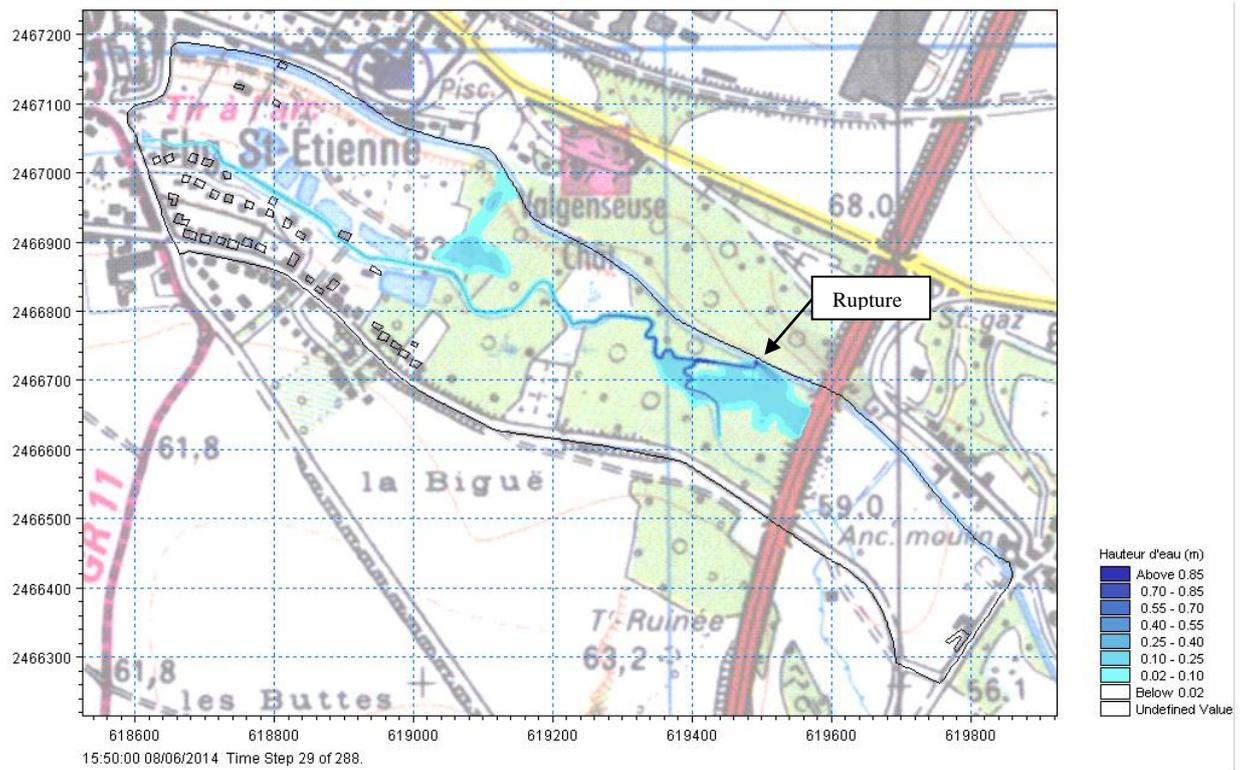
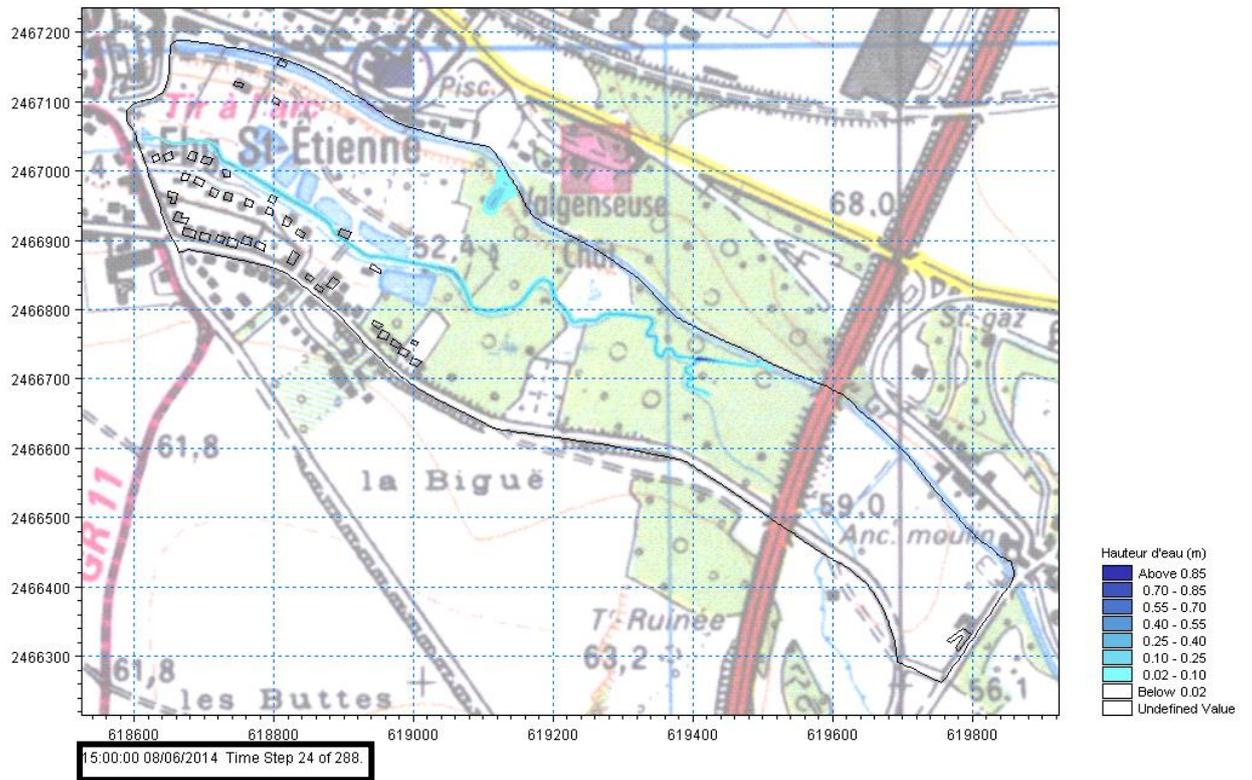
Figure 16. Hydrogramme passant par la brèche - Simulation 2

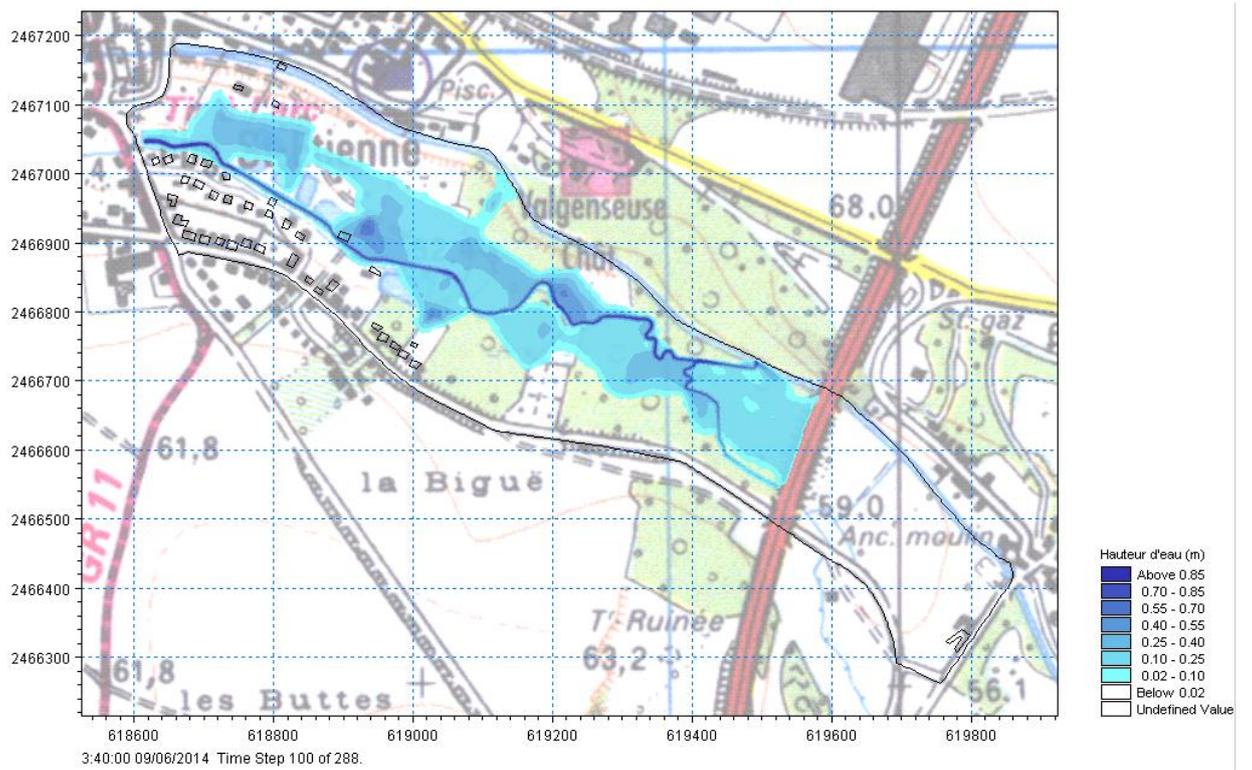
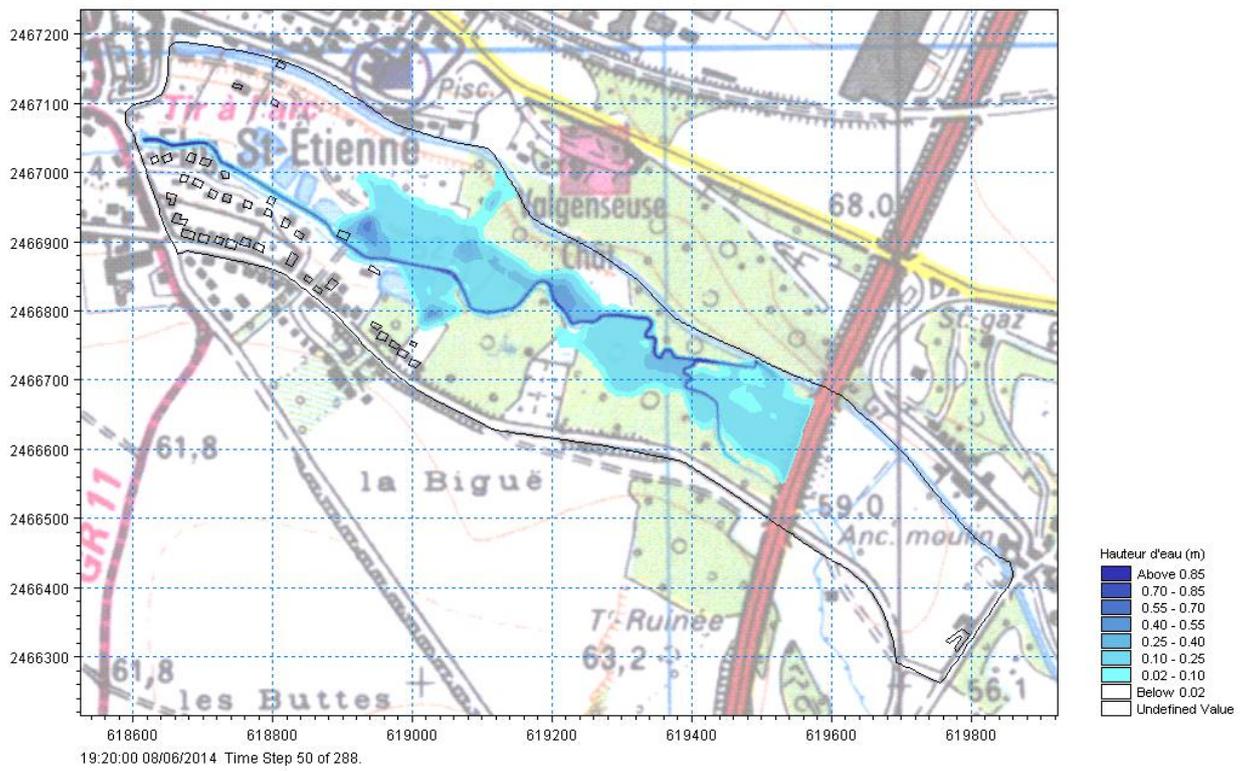
Le débit de pointe est de **5.1 m³/s**. Celui-ci est atteint **de façon quasi instantanée** après l'initialisation de la rupture.

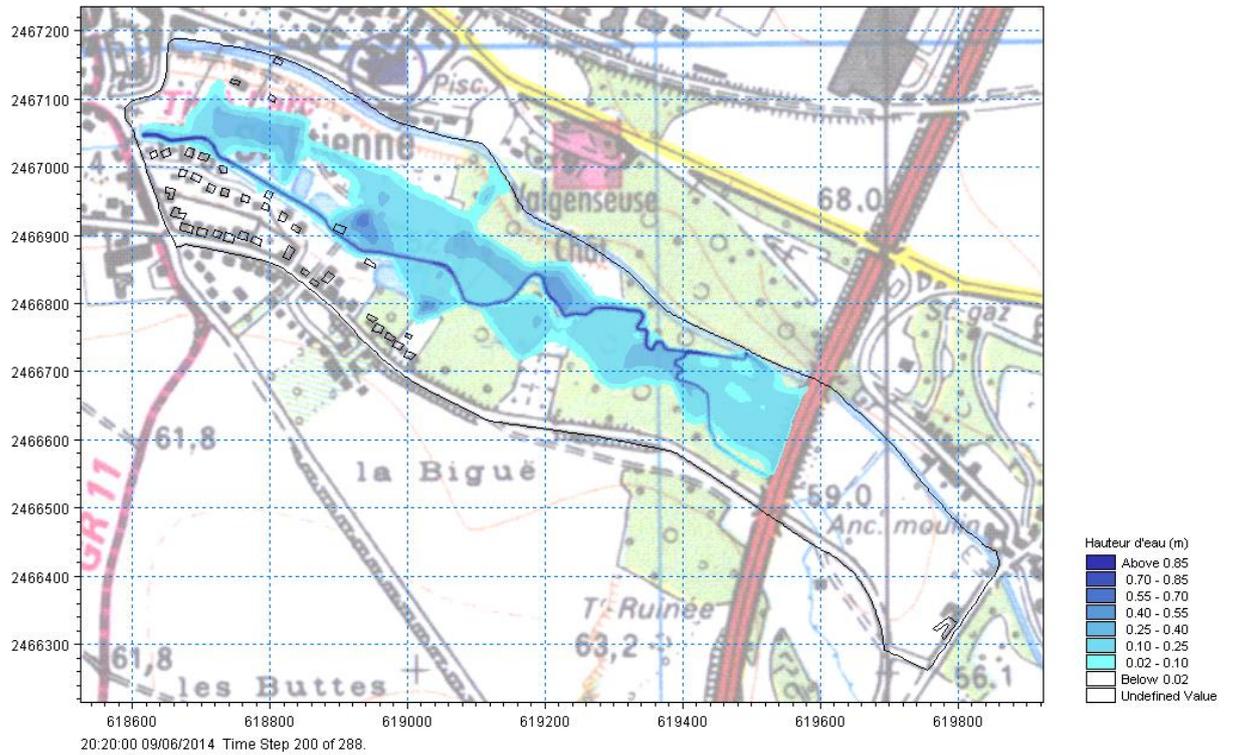
### 8.4.4.2 Propagation des flux dans la zone modélisée en 2D

Les figures suivantes représentent la propagation des flux en lit majeur suite à la rupture de la digue. La date et l'heure des cartographies suivantes sont indiquées en bas à gauche.

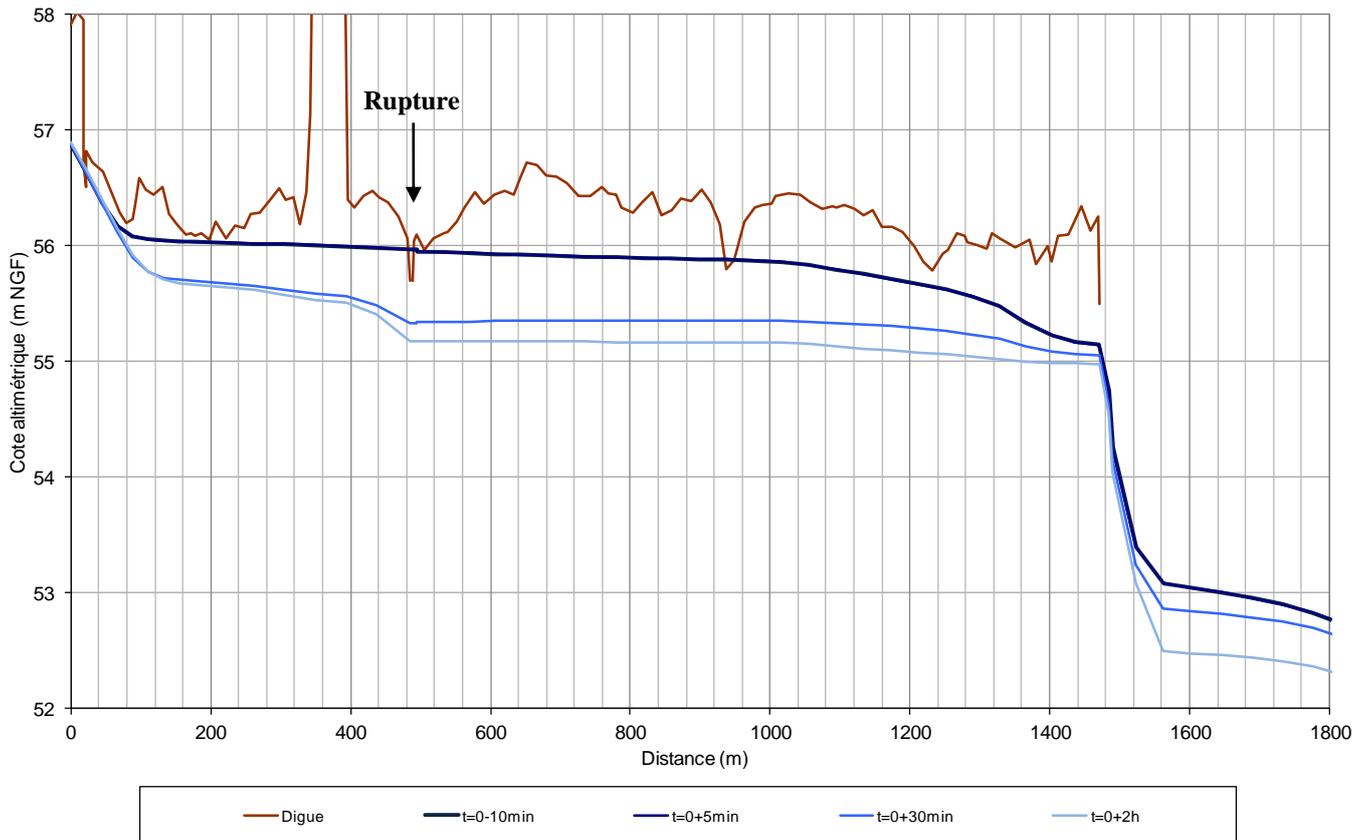
La première cartographie correspond aux hauteurs d'eau atteintes 40 minutes après le début de la surverse. La deuxième cartographie correspond aux hauteurs d'eau atteintes 20 minutes après la rupture de digue.





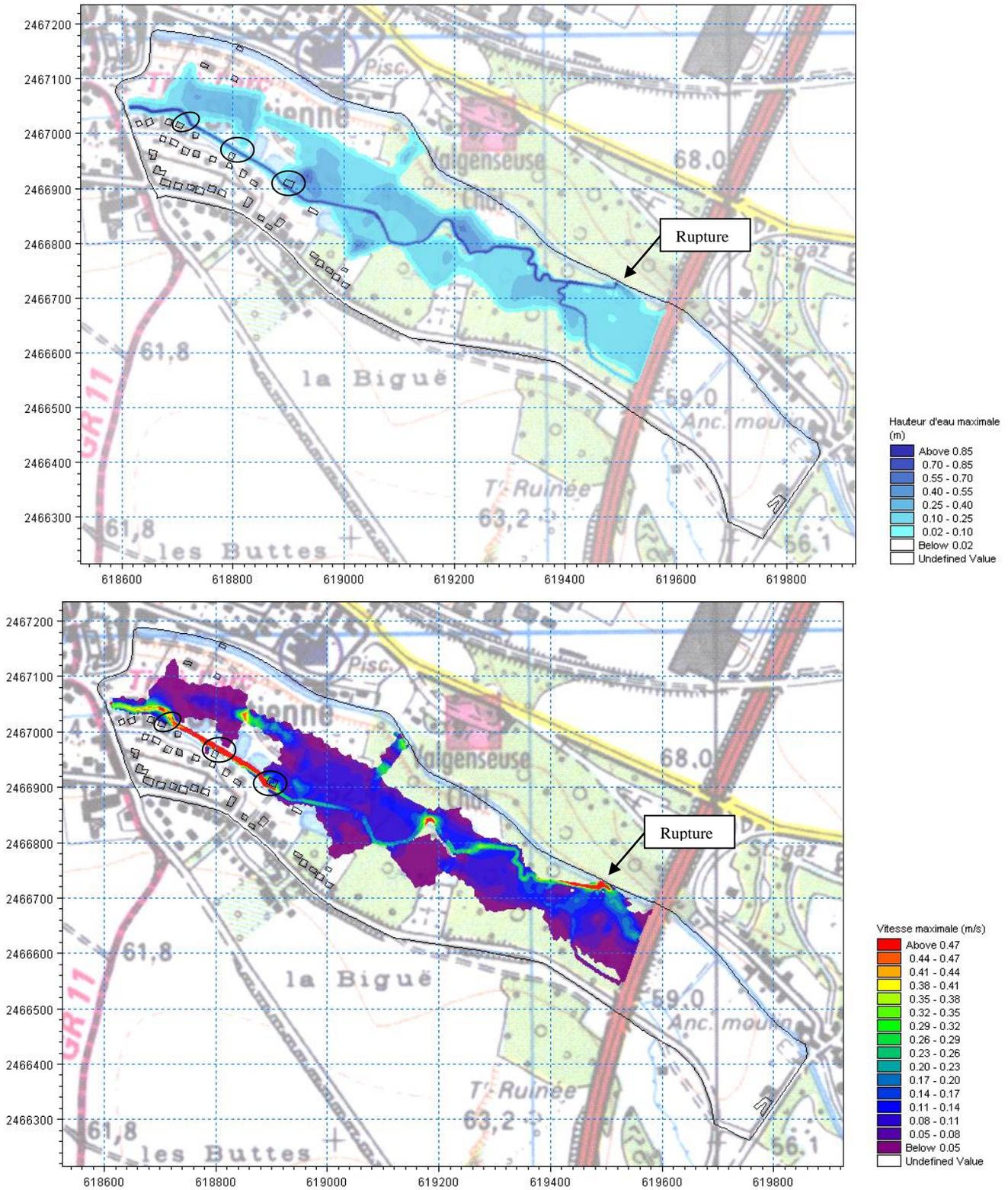


La ligne d'eau dans la Nonette est la suivante :



### 8.4.4.3 Cartographies des isohauteurs et isovitesses maximales dans la zone 2D

La cartographie ci-après présente les isohauteurs maximales atteintes par l'onde en aval du site de rupture. Les habitations touchées par les inondations ont été entourées en noir sur les cartes suivantes (soit 3 habitations).

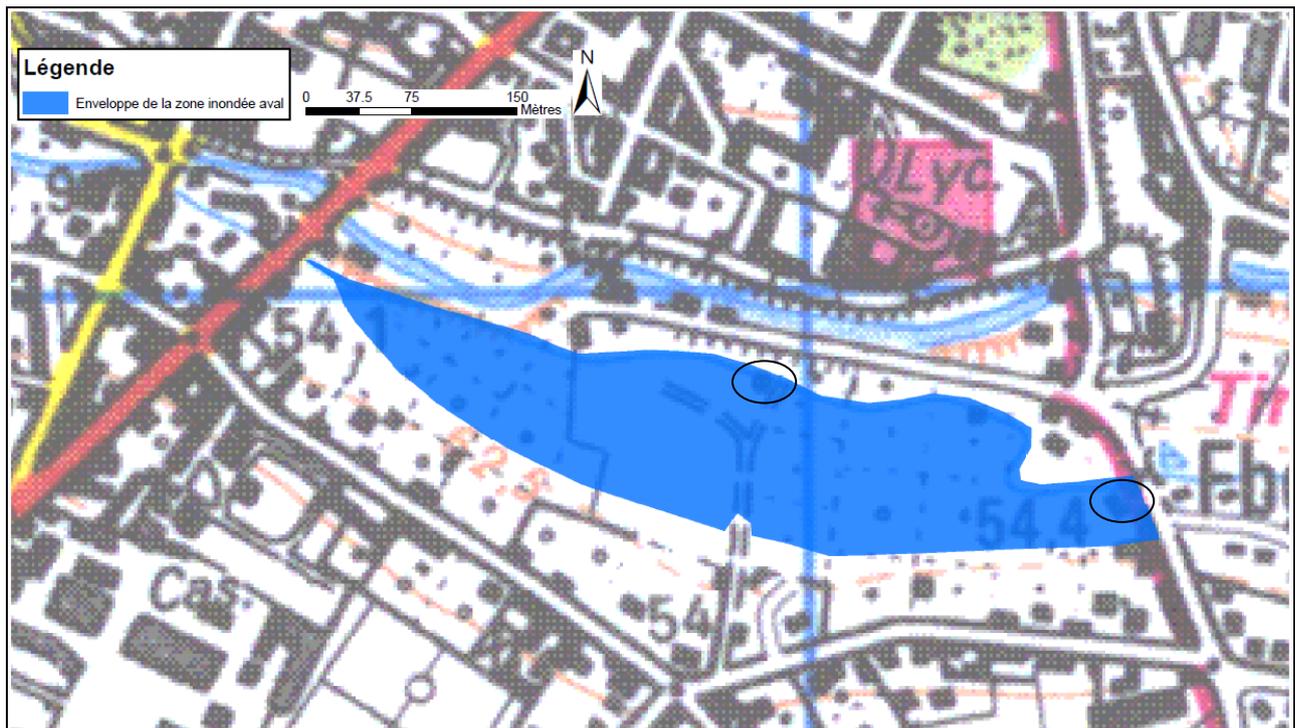


#### 8.4.4.4 Cartographies de l'enveloppe d'inondation dans la zone 1D

Cette cartographie représente l'**enveloppe de la zone inondée** en aval du pont de la rue du vieux-chemin de Meaux, ce secteur ayant été modélisé en 1D et non en 2D comme les zones cartographiées précédemment.

L'absence de MNT sur ce secteur ne permet pas de réaliser une cartographie des hauteurs d'eau. Néanmoins, on peut noter que **la hauteur d'eau maximale atteinte est de 35-40 cm** dans le lit majeur.

Les habitations touchées par les inondations ont été entourées en noir sur la carte suivante (soit 2 habitations).



**Pour ce scénario, on a donc en tout 3 habitations soit environ  $5 \times 2,5 = 12,5$  personnes touchées par les inondations en cas de rupture de la digue.**

## 8.4.5 Résultats de la simulation 3

### 8.4.5.1 Hydrogramme de rupture

L'hydrogramme de rupture consécutif à la rupture de la digue de Villemétrie au droit de l'ancienne surverse est présenté ci-dessous.

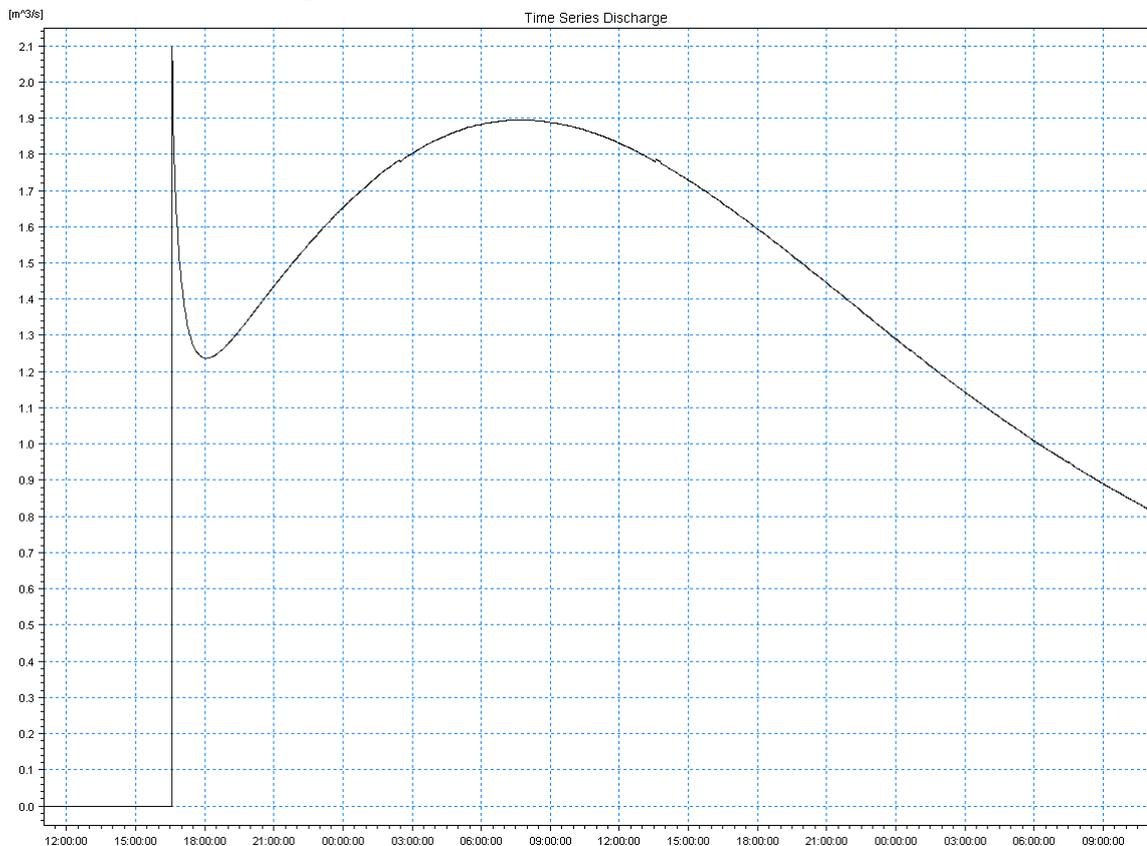


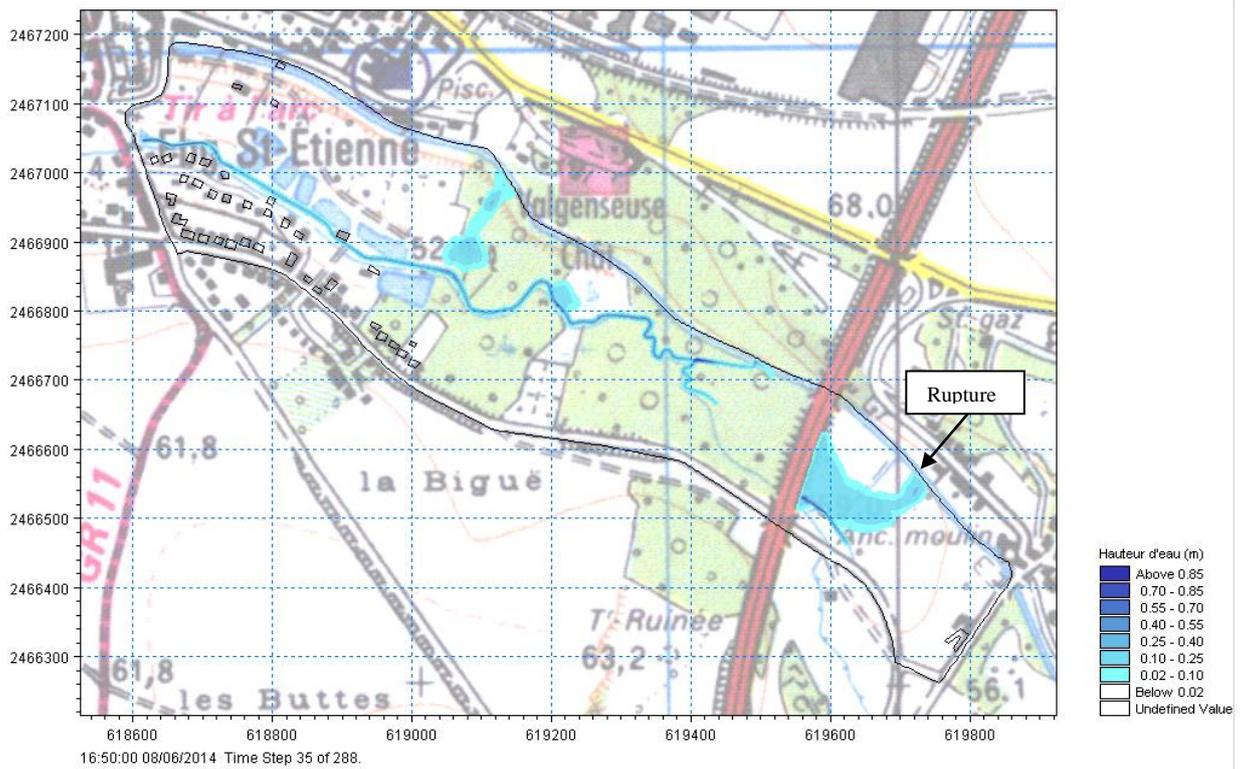
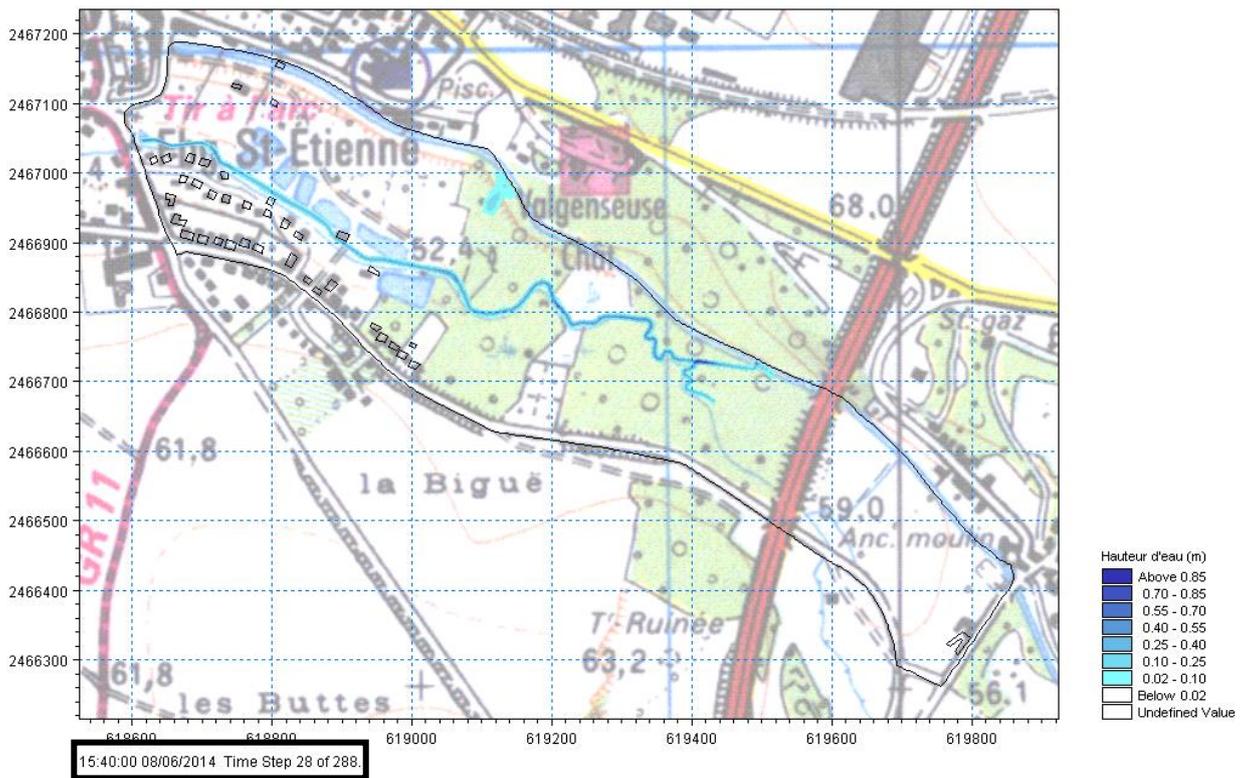
Figure 17. Hydrogramme passant par la brèche - Simulation 3

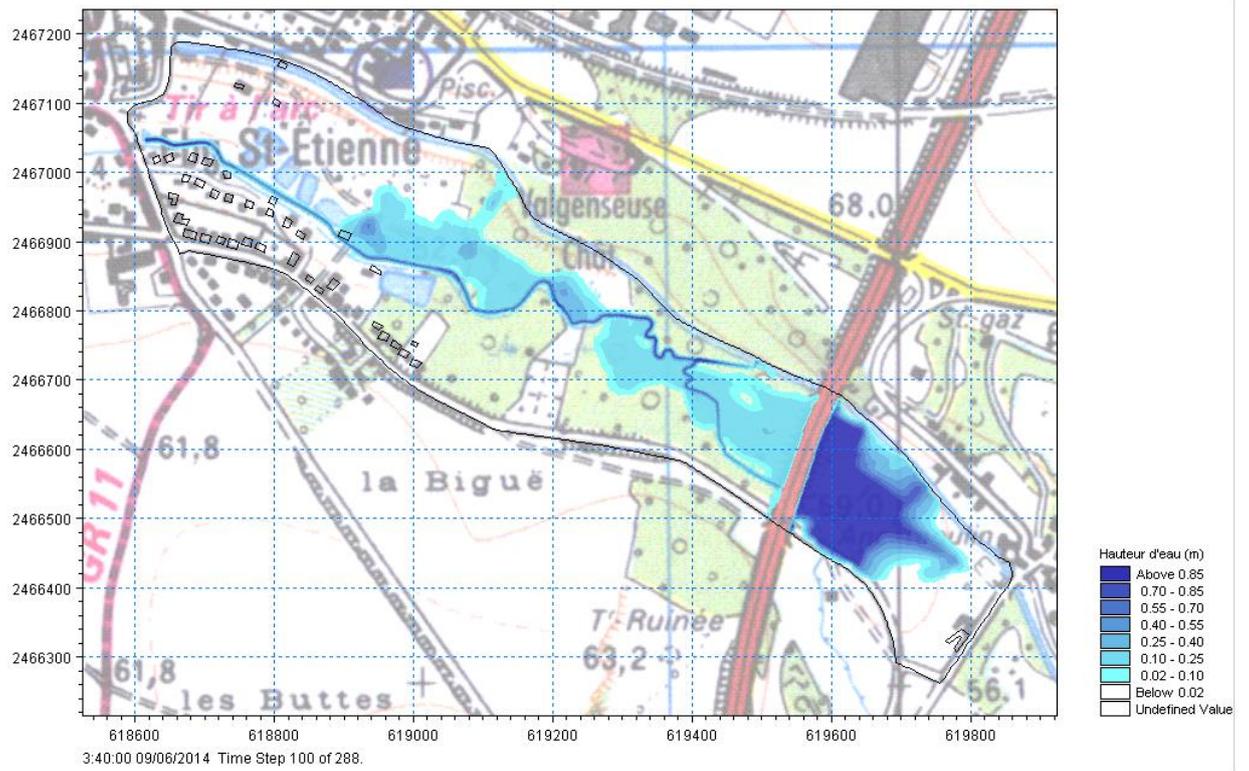
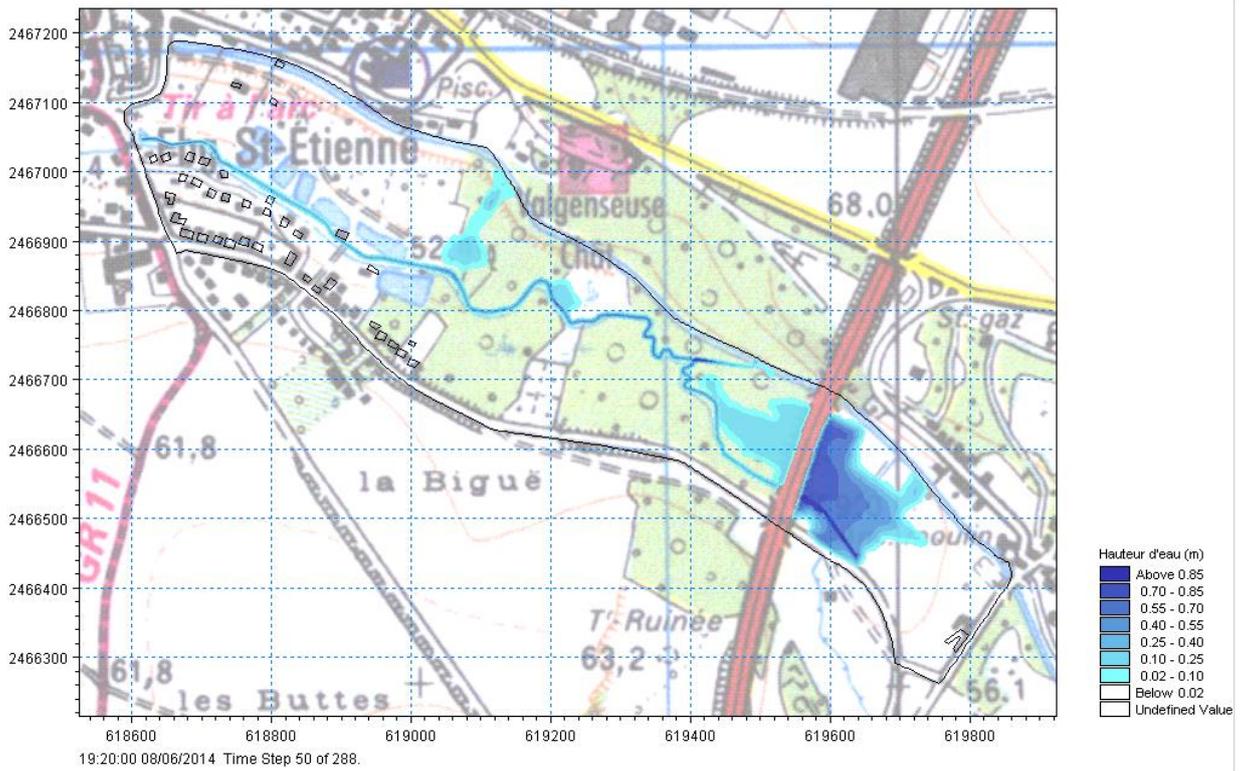
Le débit de pointe est de **2.1 m<sup>3</sup>/s**. Celui-ci est atteint **de façon quasi instantanée** après l'initialisation de la rupture.

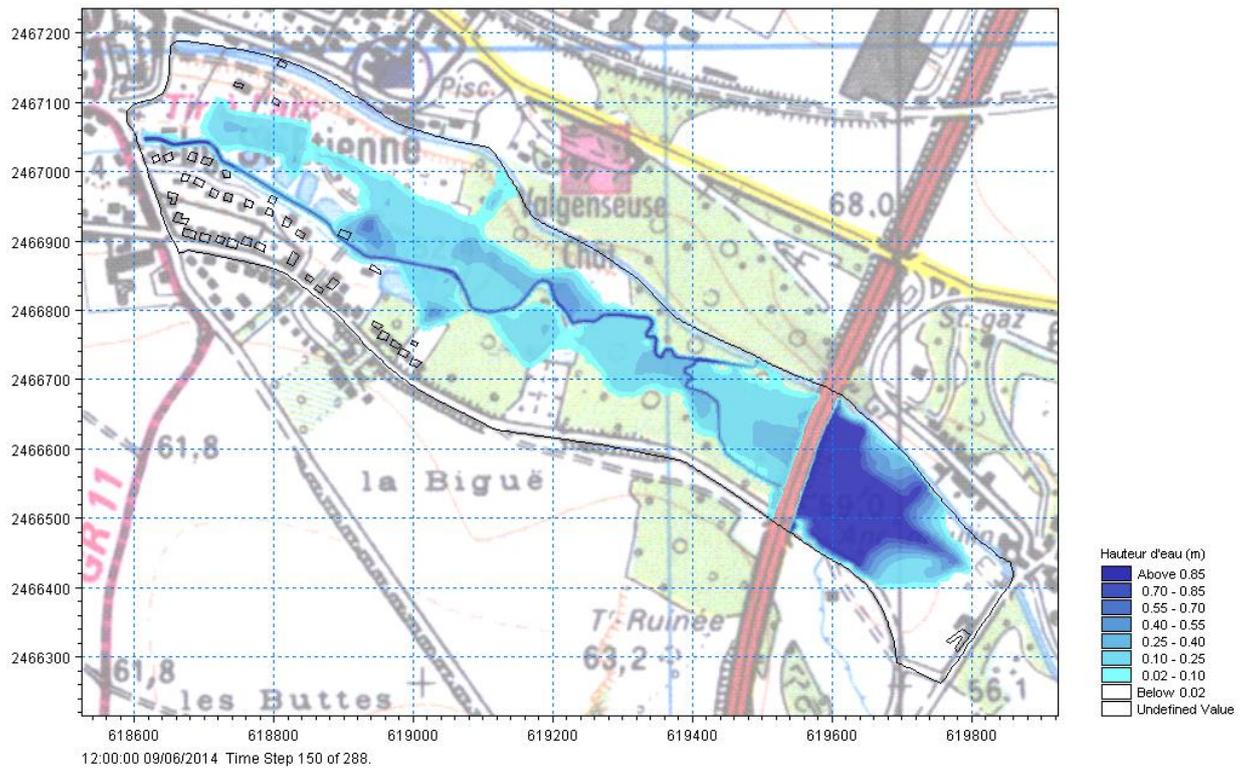
### 8.4.5.2 Propagation des flux dans la zone modélisée en 2D

Les figures suivantes représentent la propagation des flux en lit majeur suite à la rupture de la digue. La date et l'heure des cartographies suivantes sont indiquées en bas à gauche.

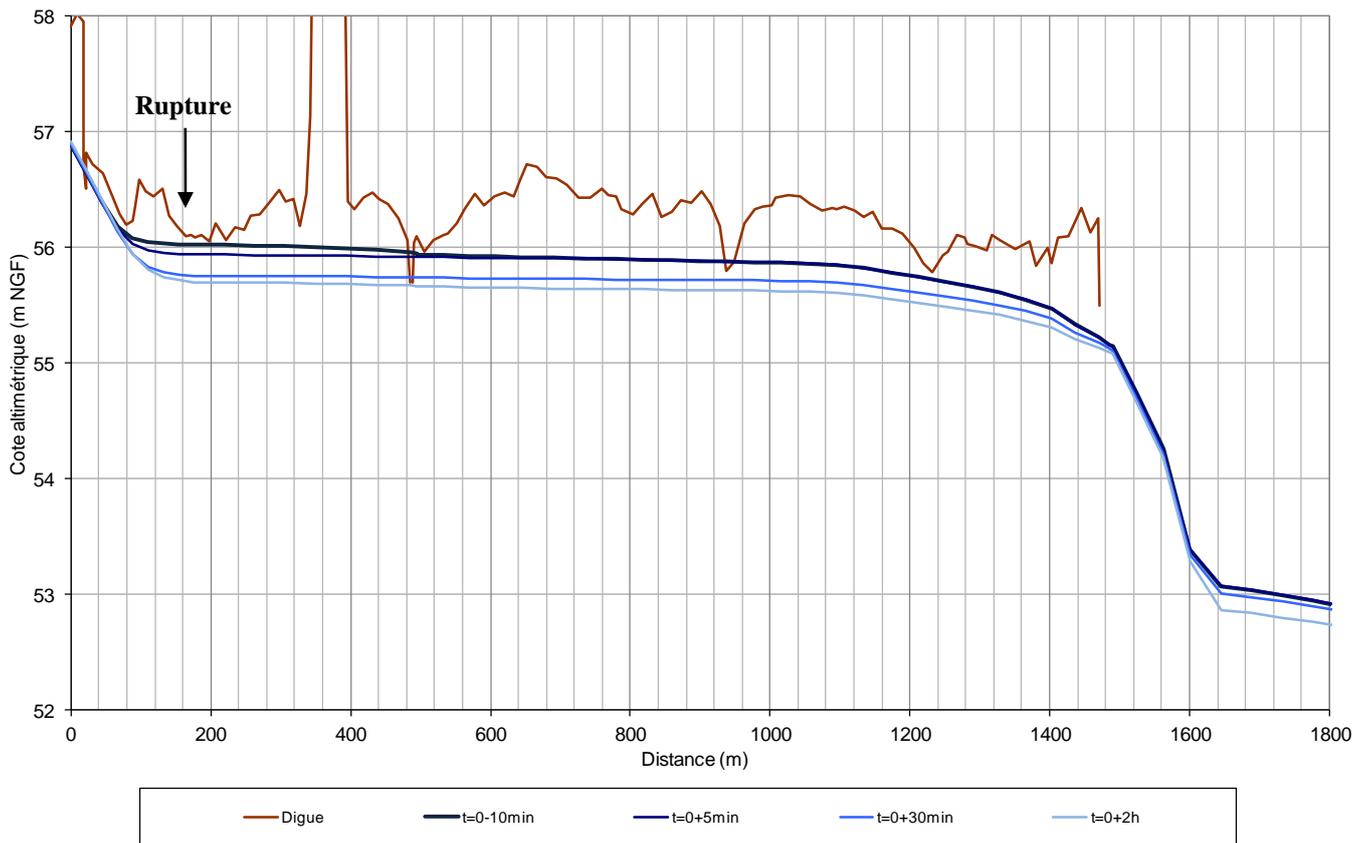
La première cartographie correspond aux hauteurs d'eau atteintes 40 minutes après le début de la surverse. La deuxième cartographie correspond aux hauteurs d'eau atteintes 20 minutes après la rupture de digue.





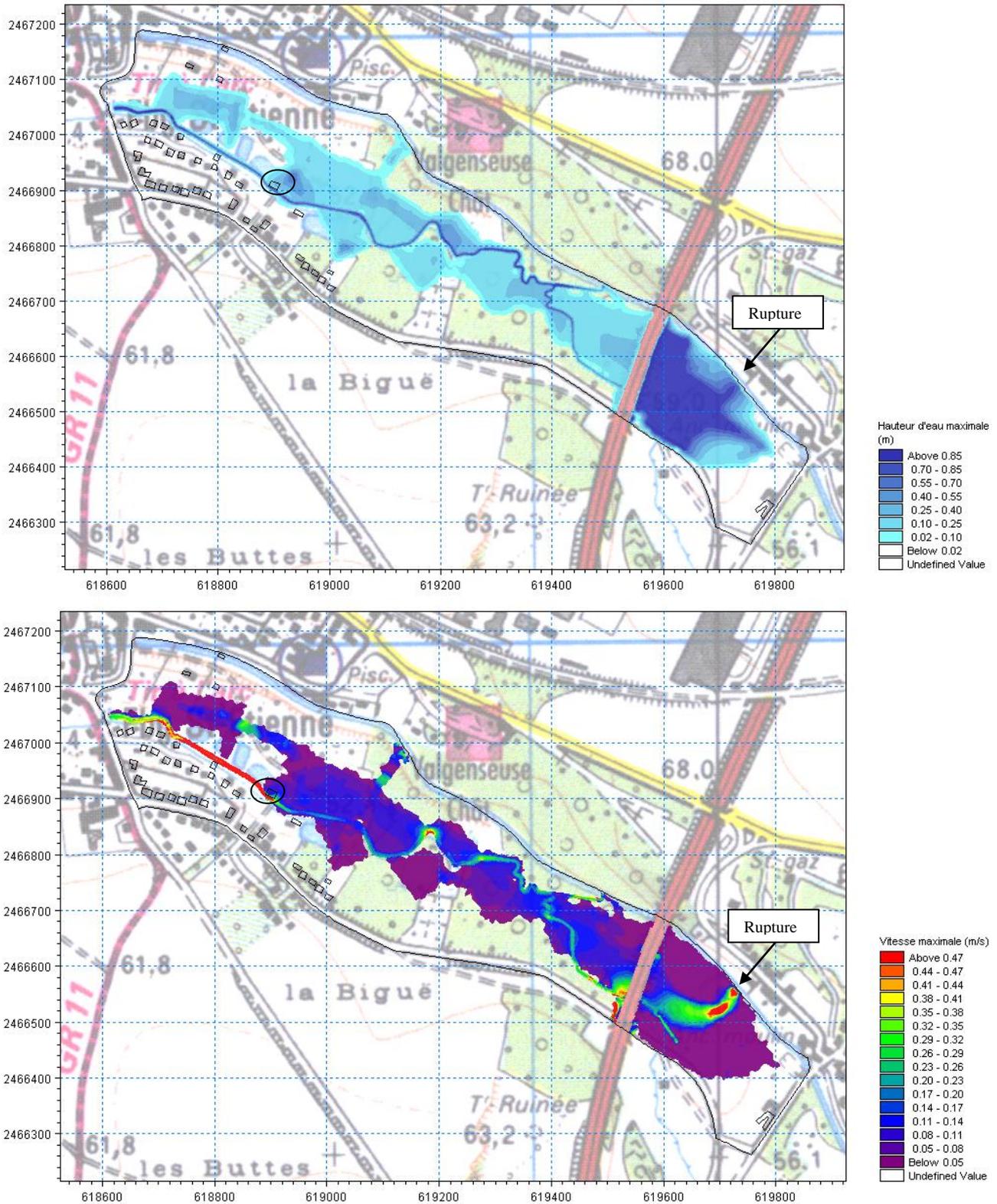


La ligne d'eau dans la Nonette est la suivante :



### 8.4.5.3 Cartographies des isohauteurs et isovitesses maximales dans la zone 2D

La cartographie ci-après présente les isohauteurs maximales atteintes par l'onde en aval du site de rupture. Les habitations touchées par les inondations ont été entourées en noir sur les cartes suivantes (soit 1 habitation).

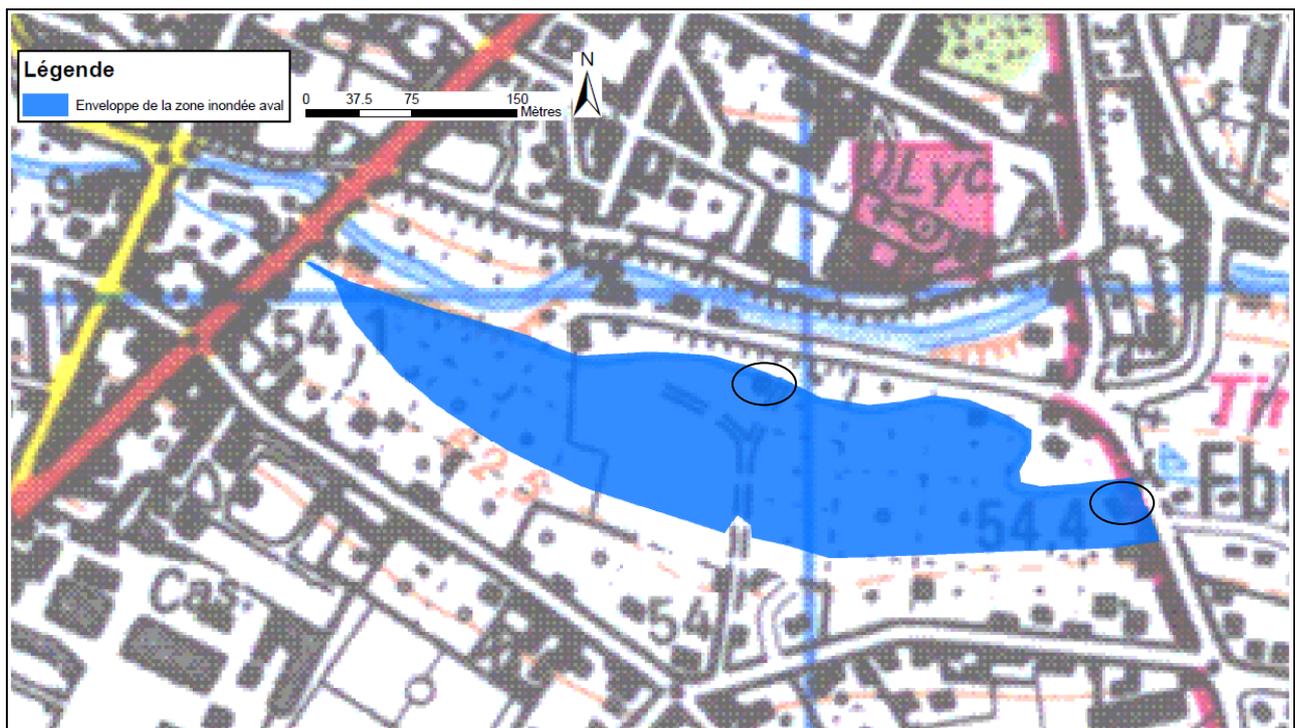


#### 8.4.5.4 Cartographies de l'enveloppe d'inondation dans la zone 1D

Cette cartographie représente l'**enveloppe de la zone inondée** en aval du pont de la rue du vieux-chemin de Meaux, ce secteur ayant été modélisé en 1D et non en 2D comme les zones cartographiées précédemment.

L'absence de MNT sur ce secteur ne permet pas de réaliser une cartographie des hauteurs d'eau. Néanmoins, on peut noter que **la hauteur d'eau maximale atteinte est de 35-40 cm** dans le lit majeur.

Les habitations touchées par les inondations ont été entourées en noir sur la carte suivante (soit 2 habitations).



**Pour ce scénario, on a donc en tout 3 habitations soit environ  $3 \times 2,5 = 7,5$  personnes touchées par les inondations en cas de rupture de la digue.**

## 8.4.6 Résultats de la simulation 4

### 8.4.6.1 Hydrogramme de rupture

L'hydrogramme de rupture consécutif à la rupture de la digue de Senlis au droit des désordres situés dans la zone la plus urbanisée est présenté ci-dessous.

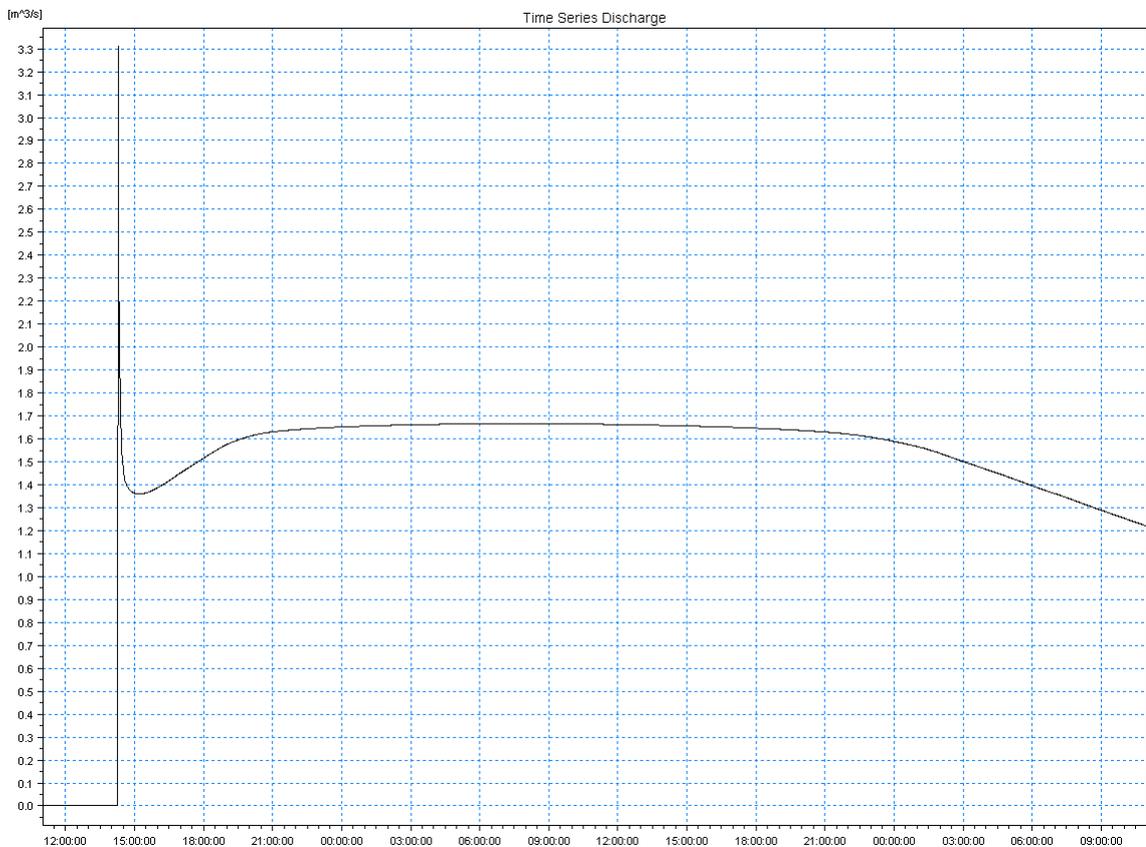


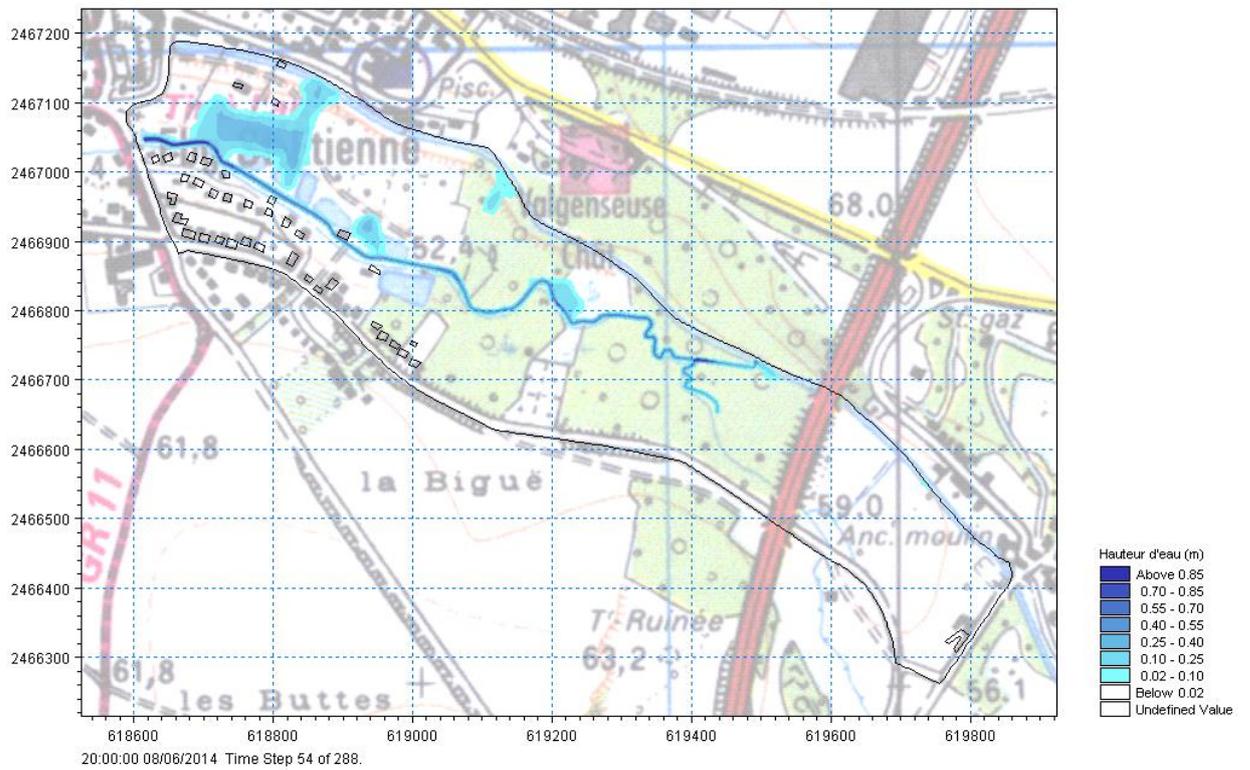
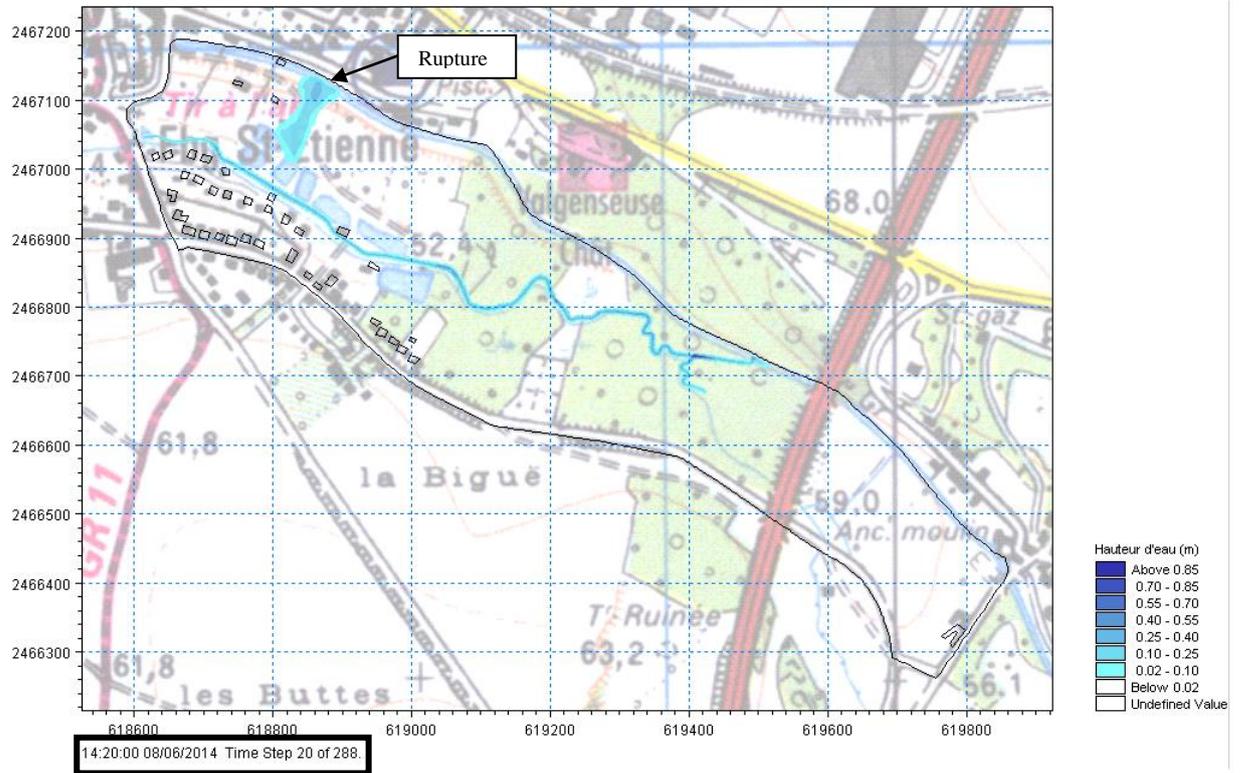
Figure 18. Hydrogramme passant par la brèche - Simulation 4

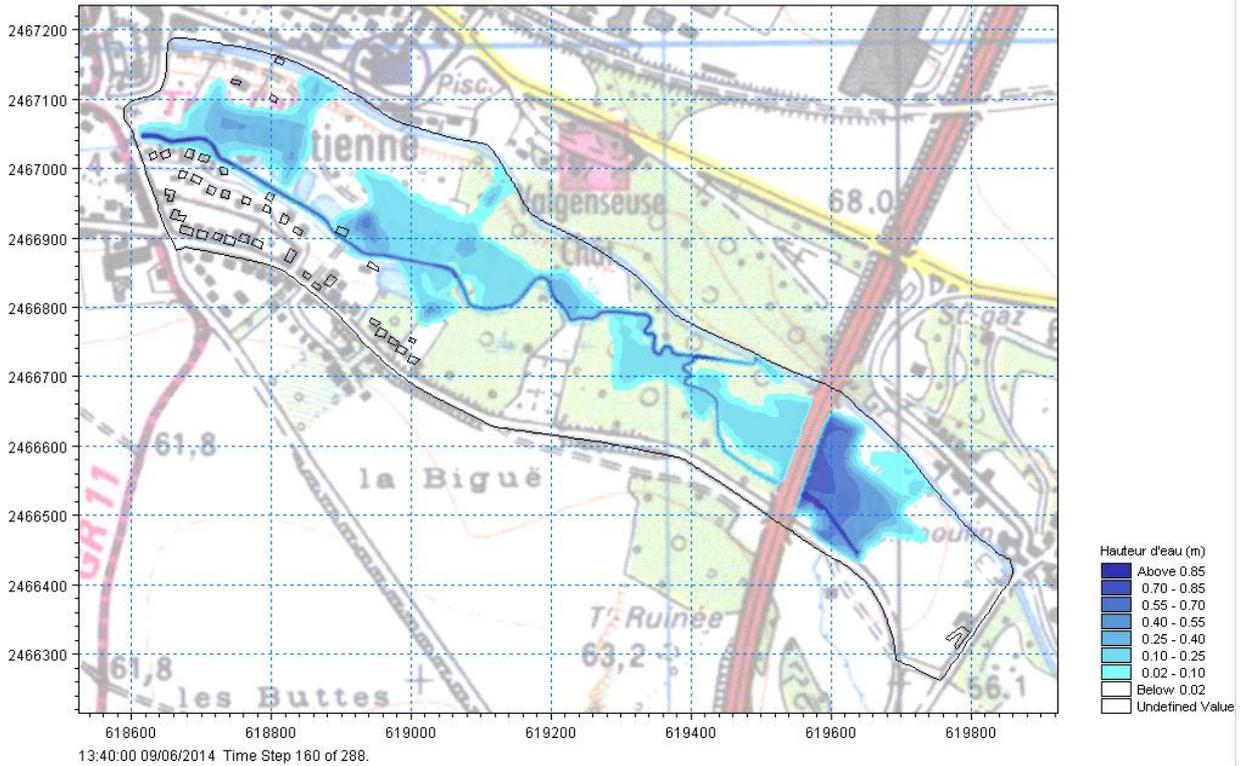
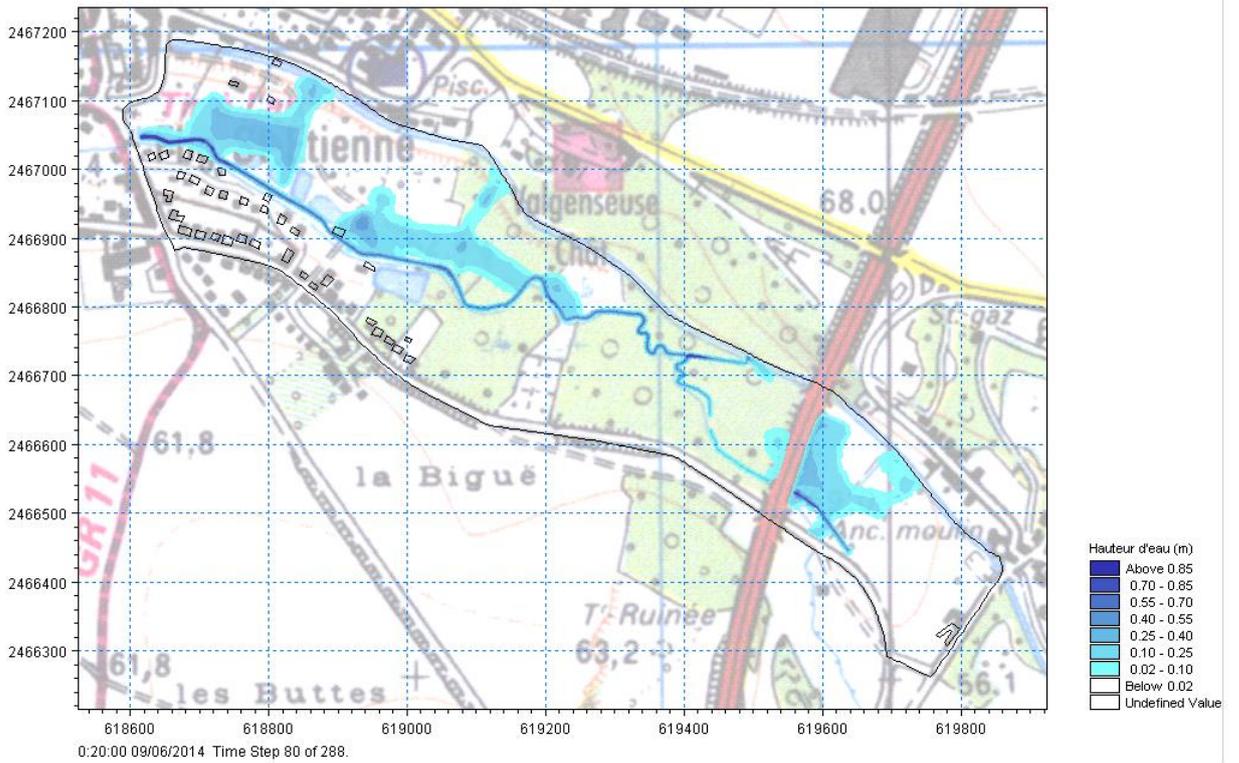
Le débit de pointe est de **3.3 m³/s**. Celui-ci est atteint **de façon quasi instantanée** après l'initialisation de la rupture.

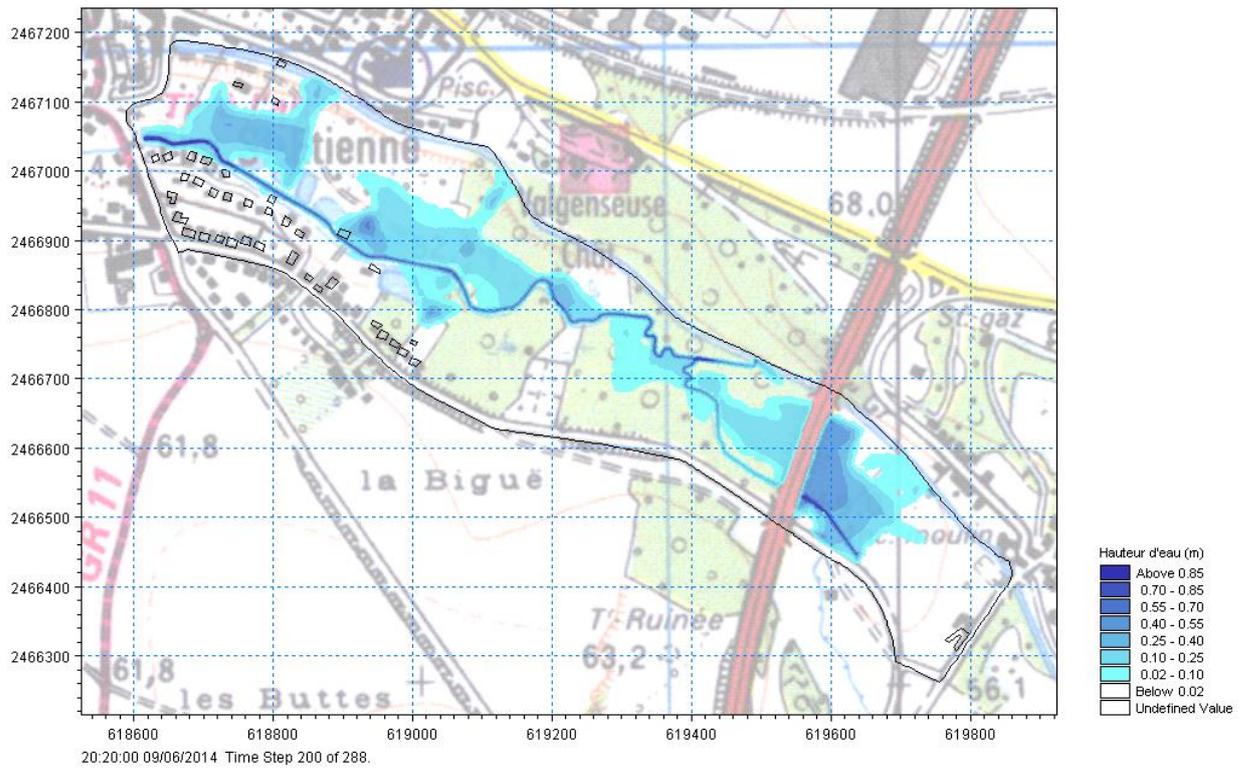
### 8.4.6.2 Propagation des flux dans la zone modélisée en 2D

Les figures suivantes représentent la propagation des flux en lit majeur suite à la rupture de la digue. La date et l'heure des cartographies suivantes sont indiquées en bas à gauche.

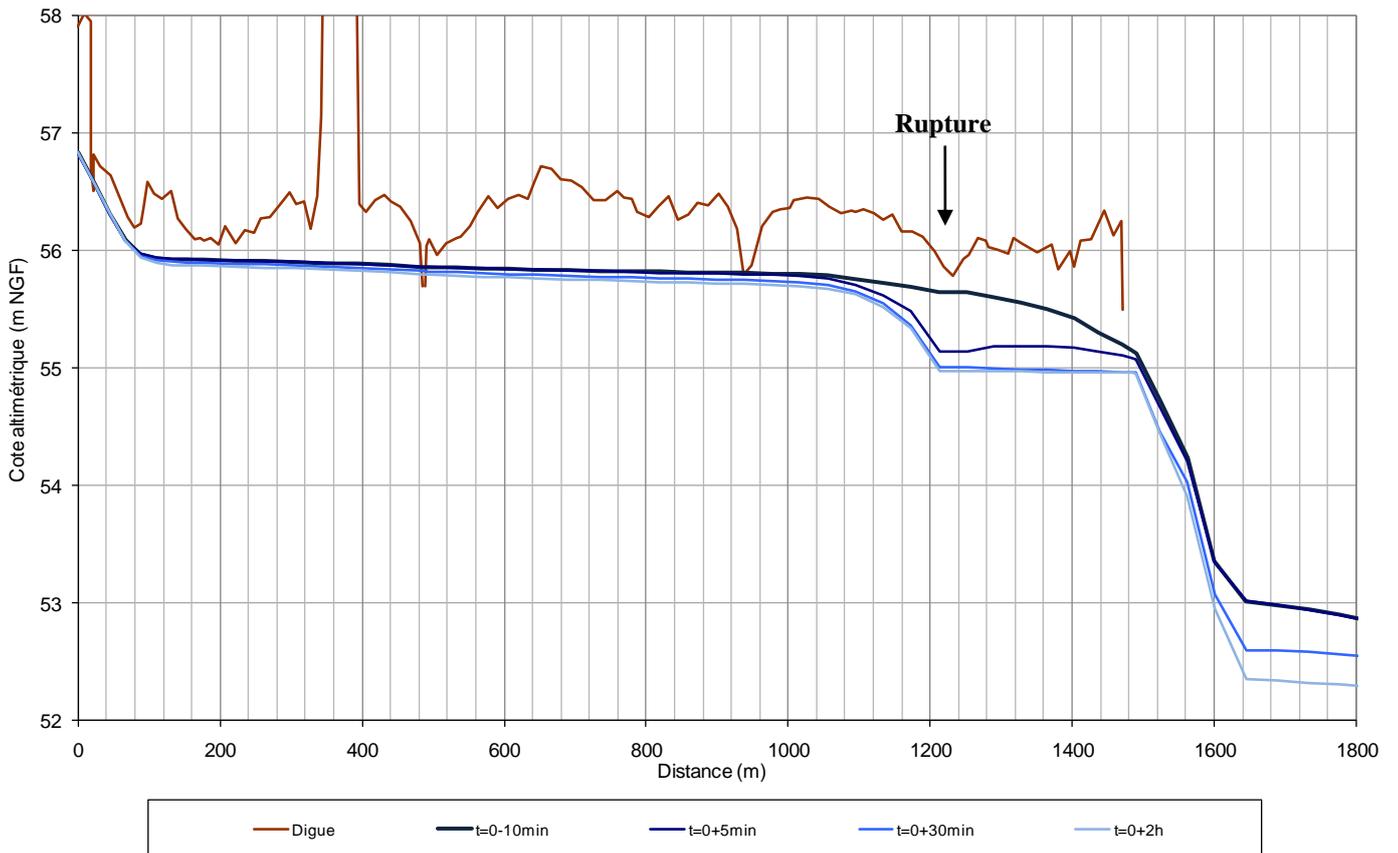
Dans cette simulation, la rupture de la digue intervient plus rapidement que pour les simulations précédentes et avant l'apparition de surverse sur la digue. La première cartographie correspond donc aux hauteurs d'eau atteintes 10 minutes après la rupture de digue après le début de la surverse. La deuxième cartographie correspond aux hauteurs d'eau atteintes 40 minutes après le début de la surverse.





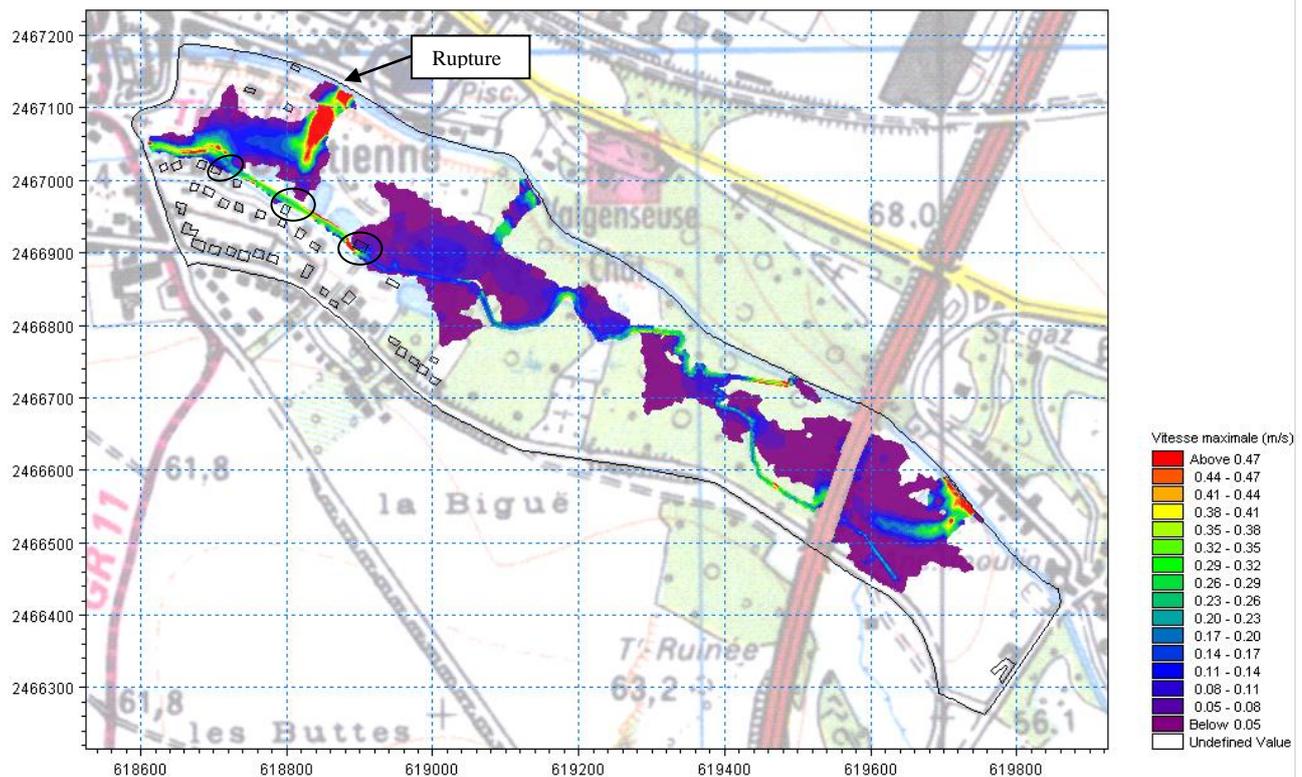
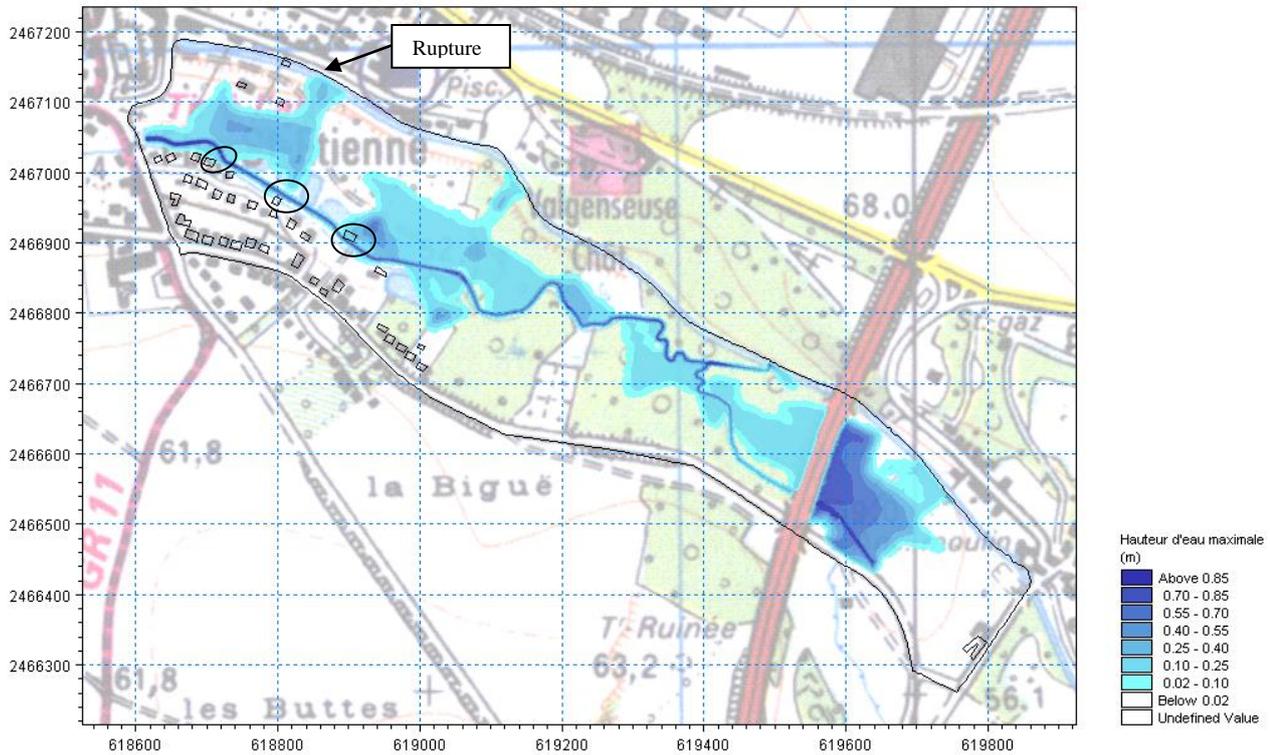


La ligne d'eau dans la Nonette est la suivante :



### 8.4.6.3 Cartographies des isohauteurs et isovitesses maximales dans la zone 2D

La cartographie ci-après présente les isohauteurs maximales atteintes par l'onde en aval du site de rupture. Les habitations touchées par les inondations ont été entourées en noir sur es cartes suivantes (soit 3 habitations).

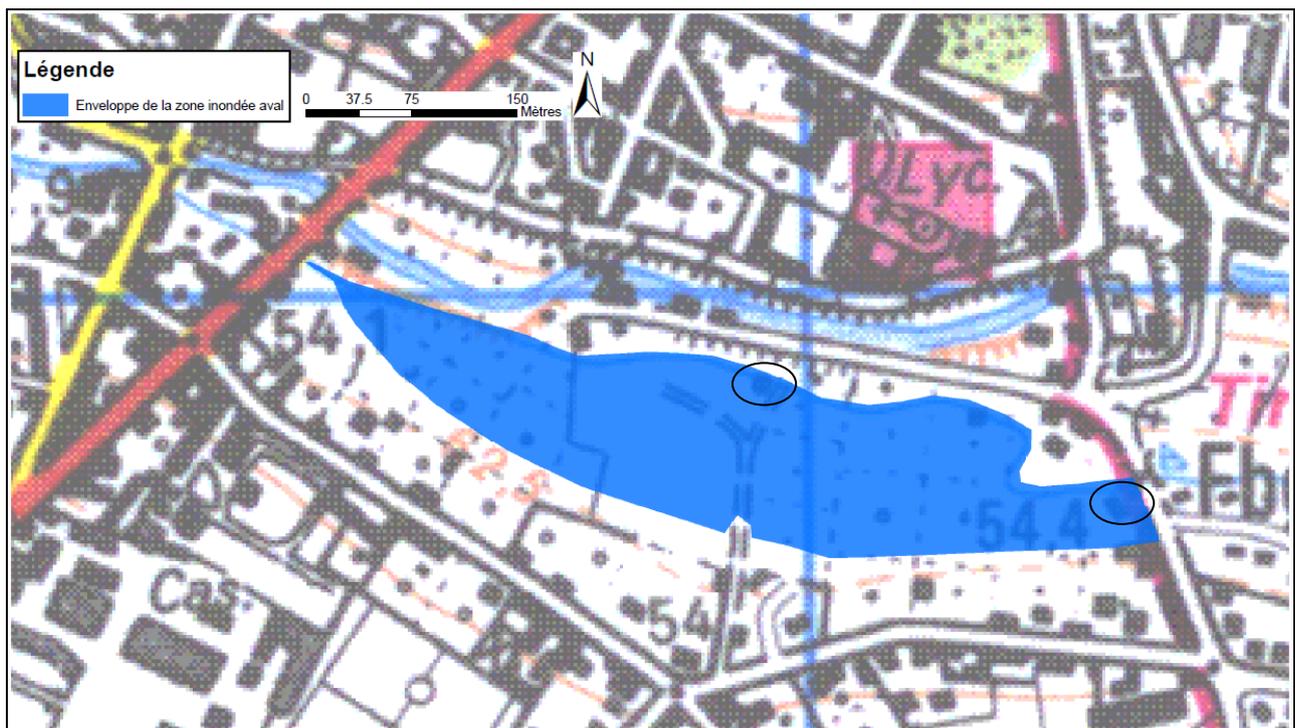


#### 8.4.6.4 Cartographies de l'enveloppe d'inondation dans la zone 1D

Cette cartographie représente l'**enveloppe de la zone inondée** en aval du pont de la rue du vieux-chemin de Meaux, ce secteur ayant été modélisé en 1D et non en 2D comme les zones cartographiées précédemment.

L'absence de MNT sur ce secteur ne permet pas de réaliser une cartographie des hauteurs d'eau. Néanmoins, on peut noter que **la hauteur d'eau maximale atteinte est de 35-40 cm** dans le lit majeur.

Les habitations touchées par les inondations ont été entourées en noir sur la carte suivante (soit 2 habitations).



**Pour ce scénario, on a donc en tout 5 habitations soit environ  $5 \times 2,5 = 12,5$  personnes touchées par les inondations en cas de rupture de la digue.**

## 8.5 Synthèse – Criticité des scénarios

Le croisement entre la probabilité d'occurrence d'un scénario et la gravité de leurs conséquences permet de constater sa criticité. La figure suivante présente l'évaluation de la criticité des scénarios pouvant conduire à une libération non-maîtrisée d'eau vers l'aval.

Les modélisations hydrauliques réalisées présentent un nombre de personnes exposées en zone cinétique rapide relativement restreint. Les simulations n°2 et 4 présentent, toutes les deux, 5 maisons comme potentiellement inondées lors des mécanismes de rupture simulés soit  $5 \times 2,5 = 12,5$  personnes exposées.

Pour réaliser le classement de gravités des scénarios, la démarche a été de prendre en compte la simulation la plus impactante en termes d'enjeux et donc de considérer une classe de gravité des conséquences équivalente à « **important** ».

Scénario	Classe de probabilité	Description	Classe de gravité	Description	Criticité
Scénario 1A : rupture par érosion interne en remblai	5	Très probable	3	Important	..
Scénario 1B : rupture par érosion interne en fondation	5	Très probable	3	Important	..
Scénario 2 : rupture par glissement en période de crue	4	Probable	3	Important	..
Scénario 3 : rupture à la suite d'une décrue	3	Peu probable	3	Important	..
Scénario 4 : rupture par surverse	5	Très probable	3	Important	..
Scénario 5 : rupture par érosion externe	4	Probable	3	Important	..

La figure suivante présente l'ensemble des scénarios positionnés en fonction de leur criticité.

Criticité			Probabilité				
			Scénario extrêmement peu probable	Scénario très peu probable	Scénario peu probable	Scénario probable	Scénario très probable
			1	2	3	4	5
Gravité	Désastreux	5					
	Catastrophique	4					
	Important	3			3	2 - 5	1A - 1B - 4
	Sérieux	2					
	Modéré	1					

Figure 19. Positionnement des scénarios en fonction de leur criticité

- Scénario 1A : rupture par érosion interne en remblai
- Scénario 1B : rupture par érosion interne en fondation
- Scénario 2 : rupture par glissement en période de crue
- Scénario 3 : rupture à la suite d'une décrue
- Scénario 4 : rupture par surverse
- Scénario 5 : rupture par érosion externe du talus amont

Les mesures de réduction des risques présentées au chapitre 9 visent à réduire la criticité des scénarios analysés par la réduction de leur probabilité d'occurrence et/ou par la diminution de leur gravité.

## 9

## Étude de réduction des risques

### 9.1 Efficacité du système digues

Il apparaît selon les modélisations hydrauliques réalisées que la digue de la Nonette assure la protection de sa zone protégée jusqu'à un débit légèrement supérieur au module (1.3 m<sup>3</sup>/s pour 1.1 m<sup>3</sup>/s au module) en considérant la zone de glissement de talus amont la plus importante de la digue de Senlis.

Une révision du fonctionnement hydraulique du système digues devra faire l'objet d'une réflexion de la part du Maître d'ouvrage afin de vérifier son adéquation avec les objectifs de protection escomptés.

### 9.2 Amélioration des barrières de sécurité

La majorité des principaux désordres observés sur les digues sont généralement précédés par des signes précurseurs, ce qui met en évidence l'importance de la surveillance des ouvrages.

Sur ce type d'ouvrage, cette surveillance doit être basée sur une inspection visuelle périodique dont l'objectif est de déceler des anomalies perceptibles à l'œil.

#### 9.2.1 Inspection visuelle

L'inspection visuelle doit porter particulièrement sur les points suivants :

- Repérage de signes de déformation, tassement, anse de glissement, etc. en crête et sur talus ;
- Repérage de terriers d'animaux fouisseurs ;
- Analyse des signes d'érosion latérale sur talus amont ;
- Vérification du développement de la végétation ;

- Suivi des points singuliers, notamment les jonctions avec réseaux et ouvrages béton.

Une fiche de visite, indiquant les points particuliers à observer, peut servir de support pour la réalisation de ces inspections visuelles.

La fréquence des visites d'inspection visuelle doit faire l'objet de consignes écrites (cf. § 9.2.4).

## 9.2.2 Entretien de la végétation

L'entretien courant a pour objectif de garantir l'accès aux ouvrages et une bonne visibilité des talus et crête des digues.

L'important réseau racinaire présent à l'intérieur du corps de digue est de par leur seule existence une source de danger, constituant une multitude de cheminements hydrauliques préférentiels que pourrait emprunter l'eau lors de la mise en charge de la digue en situation de défaillance de l'étanchéité de la digue (situation actuelle) et de pourrissement des racines. Dans ce cas, une destruction partielle ou totale de la digue par ouverture de brèche suite au développement de renard hydraulique (phénomène d'érosion interne) pourrait se produire.

Le retrait des souches avant comblement des cavités créées par un remblai compacté est à prévoir.

Le déboisement des pieds aval des digues est à réaliser afin de permettre la circulation piétonne le long des ouvrages lors des visites de surveillance. Un chemin de 3 m de large permettra l'accès d'engins en cas de réalisation de travaux.

## 9.2.3 Ouvrages incrustés

L'implantation en altimétrie des réseaux présents au droit de la digue devra être vérifiée. Dans tous les cas, une attention particulière devra être portée sur les points de sortie des réseaux en période de crue afin de s'assurer de l'absence de résurgence le long des tuyaux, susceptible de traduire un phénomène d'érosion interne.

De nombreux blocs rocheux ont été observés en surface des talus. Ces points durs devront être extraits avant recompactage de matériaux afin de restituer l'étanchéité de la digue.

## 9.2.4 Consignes

Conformément à la nouvelle réglementation relative aux ouvrages hydrauliques (décret du 11 décembre 2007 et ses arrêtés), les dispositions relatives à surveillance et à l'entretien doivent être formalisées par des consignes écrites. L'article R. 214-122 du décret du 11 décembre 2007 signale que :

« I. - Le propriétaire ou l'exploitant de tout barrage ou digue tient à jour un dossier qui contient :

- (...) une description de l'organisation mise en place pour assurer l'exploitation et la surveillance de l'ouvrage en toutes circonstances ;
- des consignes écrites dans lesquelles sont fixées les instructions de surveillance de l'ouvrage en toutes circonstances ainsi que celles concernant son exploitation en période de crue ; ces consignes précisent le contenu des visites techniques approfondies mentionnées à l'article R. 214-123 ainsi que, le cas échéant, du rapport de surveillance et du rapport d'auscultation ou du rapport de contrôle équivalent transmis périodiquement au préfet. Elles font l'objet d'une approbation préalable par le préfet sauf pour les barrages et digues de classe D. »

Les consignes de surveillance des digues de la Nonette et de Clos de Beaumont ont été formalisées dans un document officiel par le syndicat et sont en cours de validation par les services instructeurs.

### 9.2.5 Actions en cas d'urgence

La mise en place d'un marché public d'entretien dans lequel seraient prévues des interventions en cas d'urgence permettrait au gestionnaire de digue de pouvoir agir plus rapidement en cas de dégradations avérées des ouvrages ou d'indices de commencement de rupture.

Par exemple, ce marché pourrait prévoir la mise à disposition d'un stock d'enrochements ainsi que de film d'étanchement en géo-membrane, de tissus géo-filtre en géotextile et de sacs de sable. La durée d'intervention de l'entreprise en cas de déclenchement des actions d'urgence pourrait également être indiquée.

Ce type d'intervention ne pourra être réalisé que lorsque la vie des personnels ne serait pas mise en danger par la situation.

Dans le cas d'annonce d'une crue imminente, des réparations ou renforcement ponctuels pourraient être exécutés au droit de désordres ou cas particuliers particulièrement défavorables pour la tenue de la digue (comme les canalisations traversantes ou les terriers d'animaux fouisseurs par exemple). Ces interventions pourraient consister en la mise en place d'un système limité d'étanchéité côté Nonette et d'un filtre côté val.

## 9.3 Travaux de réparation ou confortement

La visite d'inspection a permis de constater l'existence de désordres de type géomécaniques (renards hydrauliques, affaissements, anses de glissement côté amont et aval) et morphodynamiques (affouillements, érosion latérale) susceptibles d'impacter la sécurité des ouvrages.

Afin de définir un programme de travaux plus précis, des **sondages géotechniques ainsi qu'une étude de stabilité au glissement de la digue** sont nécessaires.

**Les recommandations émises dans le cadre de la visite technique approfondie sont rappelées dans la présente étude de danger** car elles constituent autant de mesures de réduction des risques :

- Réalisation d'un filtre sur le parement aval de la digue au niveau des renards hydrauliques afin de stopper le phénomène. **La mise en place d'un rideau de palplanches pourrait également être envisagé après analyse des phénomènes de glissement observés sur le linéaire de digue où un rideau est présent ;**
- Engager des travaux de reprise complète de l'ouvrage de déverse ;
- Retaluter le parement aval et la crête des secteurs les plus abîmés et notamment au niveau des mouvements ;
- Éliminer la végétation identifiée comme dangereuse dans ce diagnostic.

Concernant les délais de réalisation des différentes mesures :

- **Des travaux pour stopper le mécanisme des fuites observés** sont nécessaires et il est souhaitable que les études de MOE et la campagne géotechnique associée soient engagées **d'ici fin 2015**. D'ici la réalisation de ces travaux, des travaux d'urgence pour colmater les fuites temporairement devront être réalisés dans les plus brefs délais ;
- **La reprise de l'ouvrage de déverse** est nécessaire et il est souhaitable que les études de MOE et la campagne géotechnique associée soient engagées **d'ici fin 2015** ;
- **Une étude sur la stabilité générale de l'ensemble de la digue** est nécessaire pour comprendre les mécanismes en vigueur sur les secteurs présentant des glissements de talus amont et aval. Il est souhaitable que les études de MOE et la campagne géotechnique associées soient engagées **d'ici fin 2015**. Ces études peuvent conclure à la nécessité, entre autres, de reprendre les pentes de la digue et donc entraîner un engraissement des talus amont et aval de l'ouvrage.

Concernant l'estimation de coûts des travaux :

*Précaution préalable : il est important de noter que le coût des travaux est difficilement estimable sans les études préalables de maîtrise d'œuvre et les résultats de la campagne géotechnique. Néanmoins, un premier chiffrage a été réalisé constituant une bonne fourchette d'estimation des travaux.*

**Pour les deux fuites observées :**

- Maîtrise d'œuvre (dimensionnement et suivi des travaux) : 15 k€ HT

- Levés topographiques complémentaires à faire à proximité des fuites chiffré sur 100 ml : environ 2 à 3 k€ HT
- Campagne géotechnique minimum à réaliser : 8 k€ HT environ pour 1 sondage carotté à proximité des fuites (avec analyses en laboratoire et essai d'eau)
- Travaux : 60 k€ HT

**Des travaux d'urgence de confortement de la digue peuvent être envisagés via la mise en place de palplanches sur le linéaire de digue qui n'en comporte pas à l'heure actuelle. Des études de maîtrise d'œuvre devront être réalisées pour vérifier le bon dimensionnement des travaux de renforcement.**

#### **Pour la reprise de l'ouvrage de surverse vers le Saint-Urbain :**

Une estimation des travaux et de la maîtrise d'œuvre à effectuer peut être comprise entre 160 et 200 k€ HT (cette fourchette comprend la mise en place d'un batardage pour effectuer les travaux hors d'eau).

#### **Pour la remise en bon état de l'ensemble de la digue de Senlis et de Villemétrie (1450 m) :**

A ce stade de l'étude et en absence d'éléments tels que, par exemple, une campagne géotechnique et une étude de stabilité, la démarche utilisée pour estimer les travaux de réfection de la digue a été de considérer un coût global moyen par mètre linéaire de digue. Cette estimation s'appuie principalement sur une recherche bibliographique et le retour d'expérience.

	Source : Littérature			
	Coût (€HT/ml)		Coût (€HT) (pour la longueur totale des digues : 1450 ml)	
	estimation basse	estimation haute	estimation basse	estimation haute
Reconstruction quasi complète	800	1 110	1 160 000	1 609 500
Reconstruction complète	600	1 800	870 000	2 610 000
Étanchéité palplanches	900	2 300	1 305 000	3 335 000
Réfection crête	10	10	14 500	14 500
Maçonnerie (reconstruction avec fourniture de matériaux)	200	1 100	290 000	1 595 000

Néanmoins, au vu de :

- la faible hauteur,
- l'incertitude sur les travaux à réaliser de reconstruction quasi-complète ou de simple restauration,
- la prise en compte de techniques standards (retalutages, rehausse, végétal, passages ponctuels en palplanches),
- la contrainte du cours d'eau à niveau haut constant,

une fourchette de 1300 – 1900 €HT/ml avec une valeur moyenne de **1600 €HT/ml** peut être retenue, soit pour 1450 m : **2 320 000 €HT**.

Dans cette estimation, le coût de la reprise du déversoir est inclus dans le montant global (négligeable par rapport au total).

***Précaution : Il est important de noter qu'un dépassement concernant la valeur haute est possible s'il est nécessaire de réaliser une coupure étanche tout le long de la digue pour effectuer les travaux hors d'eau.***

## 9.4 Criticité résiduelle après mise en place des mesures proposées de réduction des risques

Après mise en place des mesures proposées de réduction des risques, nous présentons dans le tableau suivant notre estimation de la criticité résiduelle des scénarios de défaillance du système digues étudié.

Scénario	Classe de probabilité	Description	Classe de gravité	Description	Criticité
Scénario 1A : rupture par érosion interne en remblai	1	Extrêmement peu probable	3	Important	..
Scénario 1B : rupture par érosion interne en fondation	1	Extrêmement peu probable	3	Important	..
Scénario 2 : rupture par glissement en période de crue	1	Extrêmement peu probable	3	Important	..
Scénario 3 : rupture à la suite d'une décrue	1	Extrêmement peu probable	3	Important	..
Scénario 4 : rupture par surverse	1	Extrêmement peu probable	3	Important	..
Scénario 5 : rupture par érosion externe	1	Extrêmement peu probable	3	Important	..

Criticité			Probabilité				
			Scénario extrêmement peu probable	Scénario très peu probable	Scénario peu probable	Scénario probable	Scénario très probable
			1	2	3	4	5
Gravité	Désastreux	5					
	Catastrophique	4					
	Important	3	1A - 1B 2 - 3 - 4 - 5				
	Sérieux	2					
	Modéré	1					

Figure 20. Positionnement des scénarios en fonction de leur criticité

- Scénario 1A : rupture par érosion interne en remblai  
 Scénario 1B : rupture par érosion interne en fondation  
 Scénario 2 : rupture par glissement en période de crue  
 Scénario 3 : rupture à la suite d'une décrue  
 Scénario 4 : rupture par surverse  
 Scénario 5 : rupture par érosion externe du talus amont

## 10

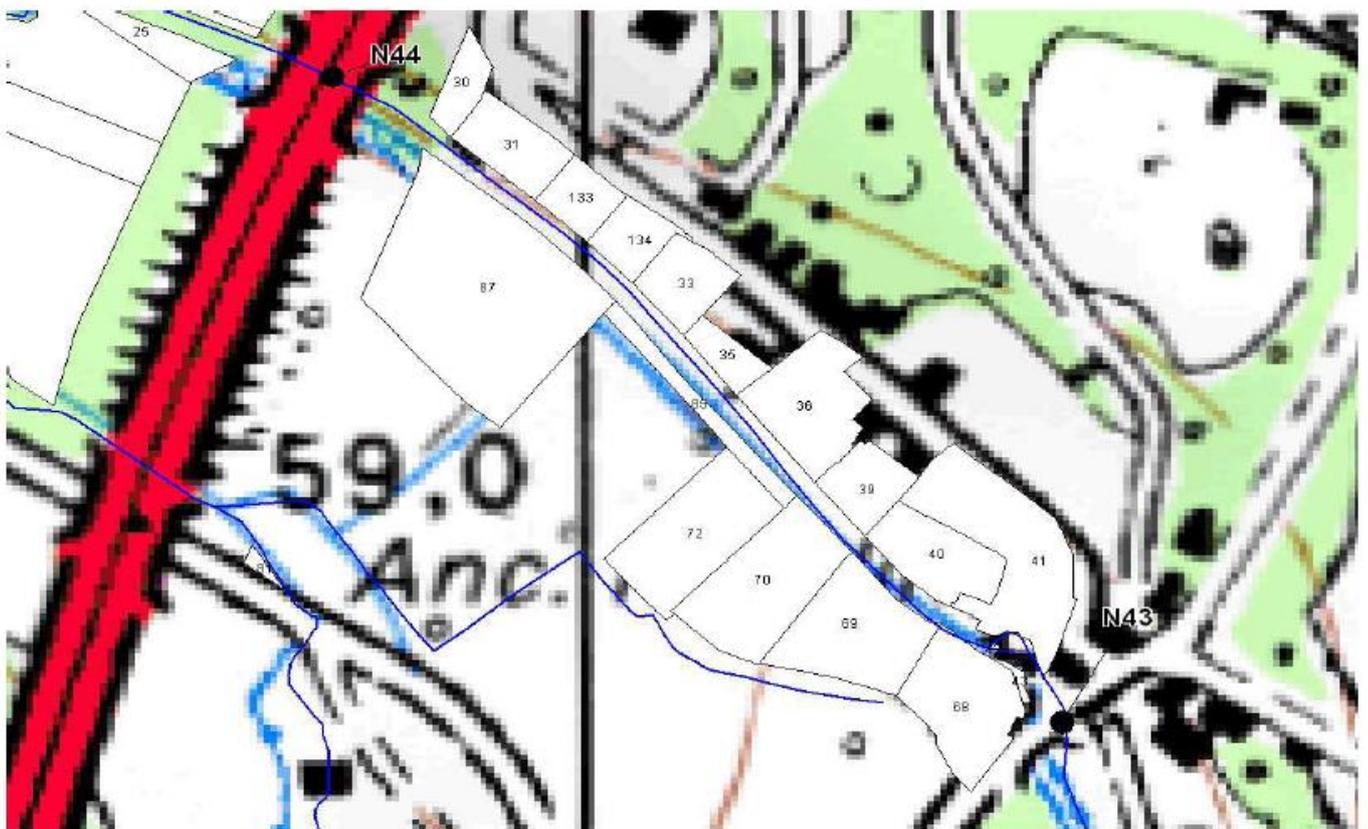
# Cartographie

Les éléments cartographiques intégrés dans cette étude de dangers correspondent aux cartographies obtenues lors de l'étude de propagation de l'onde de rupture des digues de Senlis et de Villemétrie. **Ces cartographies sont présentées dans la partie 8.4 « Évaluation des conséquences potentielles : étude d'onde de rupture ».**

## ANNEXE 1

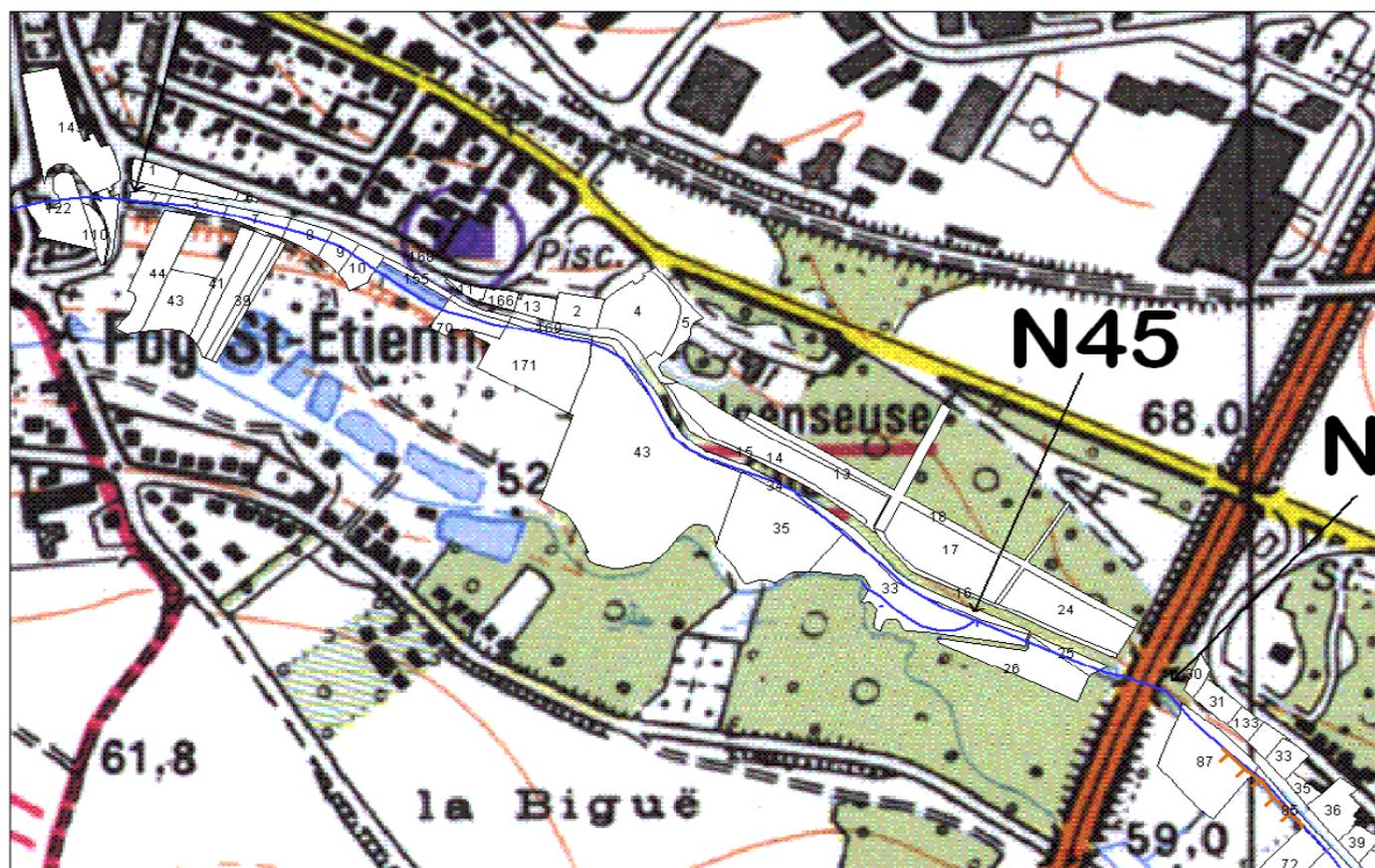
# PROPRIETAIRES DE LA DIGUE DE LA NONETTE A SENLIS (EXTRAIT DU CADASTRE)

- Digue de Villemétrie (Amont au pont de l'autoroute A1)



Section	N°	Civilité	Dénomination	Adresse	Code postal	Ville	Contact
BD	30	Société	Société Civile de Valgenceuse (Mr AMIAUD)	18 rte de Nanteuil	60300	SENLIS	
BD	31	Madame	VIEL Jean	20 rue de Villemétrie	60300	SENLIS	03.44.53.24. 94
BD	33	Monsieur	WOICICKI François	23 rue de Villemétrie	60300	SENLIS	
BD	35	Monsieur	CALOT Thierry	21 rue de Villemétrie	60300	SENLIS	
BD	36	Monsieur	LOACK Philippe	19 rue Villemétrie	60300	SENLIS	
BD	39	Société	SCI Rieulette (Mme de la Morlais)	13 rue de Villemétrie	60300	SENLIS	03.44.53.04.61
BD	40	Société	SCI LMV	Les 15 saules	60270	GOUVIEUX	06.25.74.00.37
BD	41	Société	SCI LMV	Les 15 saules	60270	GOUVIEUX	06.25.74.00.37
BD	42	Société	SCI LMV	Les 15 saules	60270	GOUVIEUX	06.25.74.00.37
BD	43	Société	SCI LMV	Les 15 saules	60270	GOUVIEUX	06.25.74.00.37
BD	67	Société	EDF	11 rue Victor Leroy	62010	ARRAS	
BD	68	Société	SCI LMV	Les 15 saules	60270	GOUVIEUX	06.25.74.00.37
BD	69	Société	SCI LMV	Les 15 saules	60270	GOUVIEUX	06.25.74.00.37
BD	70	Société	SCI Rieulette (Mme de la Morlais)	13 rue de Villemétrie	60300	SENLIS	03.44.53.04.61
BD	85	Société	SCI Rieulette (Mme de la Morlais)	13 rue de Villemétrie	60300	SENLIS	03.44.53.04.61
BD	87	Monsieur	DE LEUSSE Guy	2 rue de Villiers	92300	LEVALLOIS-PERRET	
BD	133	Madame	MARTIN Thérèse (épouse VIEL)	20 rue de Villemétrie	60300	SENLIS	03.44.53.24. 94
BD	134	Madame	MARTIN Jacqueline (épouse SAVIGNAC)	28 rue de Villemétrie	60300	SENLIS	

■ **Digue de Senlis (Aval au pont de l'autoroute A1)**



Section	N°	Civilité	Dénomination	Adresse	Code postal	Ville	Contact
AZ	1	Monsieur	CURT Louis	2 rue St-Etienne	60300	SENLIS	06.21.42.94.48
AZ	2	Monsieur	CURT Louis	2 rue St-Etienne	60300	SENLIS	06.21.42.94.48
AZ	3	Monsieur	JOHANSEN Kim	12 rue St-Etienne	60300	SENLIS	06.24.66.14.45
AZ	4	Monsieur	JOHANSEN Kim	12 rue St-Etienne	60300	SENLIS	06.24.66.14.45
AZ	5	Monsieur	MAIDON Yvonnick	18 rue St-Etienne	60300	SENLIS	
AZ	6	Monsieur	MAIDON Yvonnick	18 rue St-Etienne	60300	SENLIS	
AZ	7	Monsieur	JOHANSEN Kim	12 rue St-Etienne	60300	SENLIS	06.24.66.14.45
AZ	8	Monsieur	DA SILVA Americo	Prés et Marais de la Bigue	60300	SENLIS	
AZ	9	Monsieur	CHAMPEAUX Antoine	2 sq de la Croix des Veneurs	60300	SENLIS	
AZ	10	Monsieur	CHAMPEAUX Antoine	2 sq de la Croix des Veneurs	60300	SENLIS	
AZ	11	Monsieur	MARIN Gisèle	20 rue St-Etienne	60300	SENLIS	
AZ	13	Madame	MAILLET Fabrice / VICTOR Jack	28 rue St-Etienne	60300	SENLIS	
AZ	155	Mairie	Commune de SENLIS	Hotel de Ville Place Henri IV	60300	SENLIS	03.44.53.00.80
AZ	157	Mairie	Commune de SENLIS	Hotel de Ville Place Henri IV	60300	SENLIS	03.44.53.00.80
AZ	166	Monsieur	DECIMA Olivier	22 rue St-Etienne	60300	SENLIS	03.44.53.27.65
AZ	168	Monsieur	DECIMA Olivier	22 rue St-Etienne	60300	SENLIS	03.44.53.27.65
AZ	169	Madame	POTEL Dominique (épouse PEDRON)	30 rue St-Etienne	60300	SENLIS	03.44.54.41.94
BC	2	Madame	POTEL Dominique (épouse PEDRON)	30 rue St-Etienne	60300	SENLIS	03.44.54.41.94
BC	4	Société	Société Civile de Valgenceuse (Mr AMIAUD)	18 rte de Nanteuil	60300	SENLIS	03.44.53.02.46

Section	N°	Civilité	Dénomination	Adresse	Code postal	Ville	Contact
BC	5	Société	Société Civile de Valgenceuse (Mr AMIAUD)	18 rte de Nanteuil	60300	SENLIS	03.44.53.02.46
BC	6	Société	Société Civile de Valgenceuse (Mr AMIAUD)	18 rte de Nanteuil	60300	SENLIS	03.44.53.02.46
BC	14	Société	Société Civile de Valgenceuse (Mr AMIAUD)	18 rte de Nanteuil	60300	SENLIS	03.44.53.02.46
BC	16	Société	Société Civile de Valgenceuse (Mr AMIAUD)	18 rte de Nanteuil	60300	SENLIS	03.44.53.02.46
BC	17	Société	Société Civile de Valgenceuse (Mr AMIAUD)	18 rte de Nanteuil	60300	SENLIS	03.44.53.02.46
BC	17	Société	Société Civile de Valgenceuse (Mr AMIAUD)	18 rte de Nanteuil	60300	SENLIS	03.44.53.02.46
BC	25	Société	Société Civile de Valgenceuse (Mr AMIAUD)	18 rte de Nanteuil	60300	SENLIS	03.44.53.02.46
BC	34	Société	Société Civile de Valgenceuse (Mr AMIAUD)	18 rte de Nanteuil	60300	SENLIS	03.44.53.02.46
BC	35	Société	Société Civile de Valgenceuse (Mr AMIAUD)	18 rte de Nanteuil	60300	SENLIS	03.44.53.02.46
BC	43	Société	Société Civile de Valgenceuse (Mr AMIAUD)	18 rte de Nanteuil	60300	SENLIS	03.44.53.02.46
BD	30	Société	Société Civile de Valgenceuse (Mr AMIAUD)	18 rte de Nanteuil	60300	SENLIS	03.44.53.02.46
BD	31	Madame	VIEL Jean	20 rue de Villemétrie	60300	SENLIS	03.44.53.24.94
BD	33	Monsieur	WOICICKI François	23 rue de Villemétrie	60300	SENLIS	

## ANNEXE 2

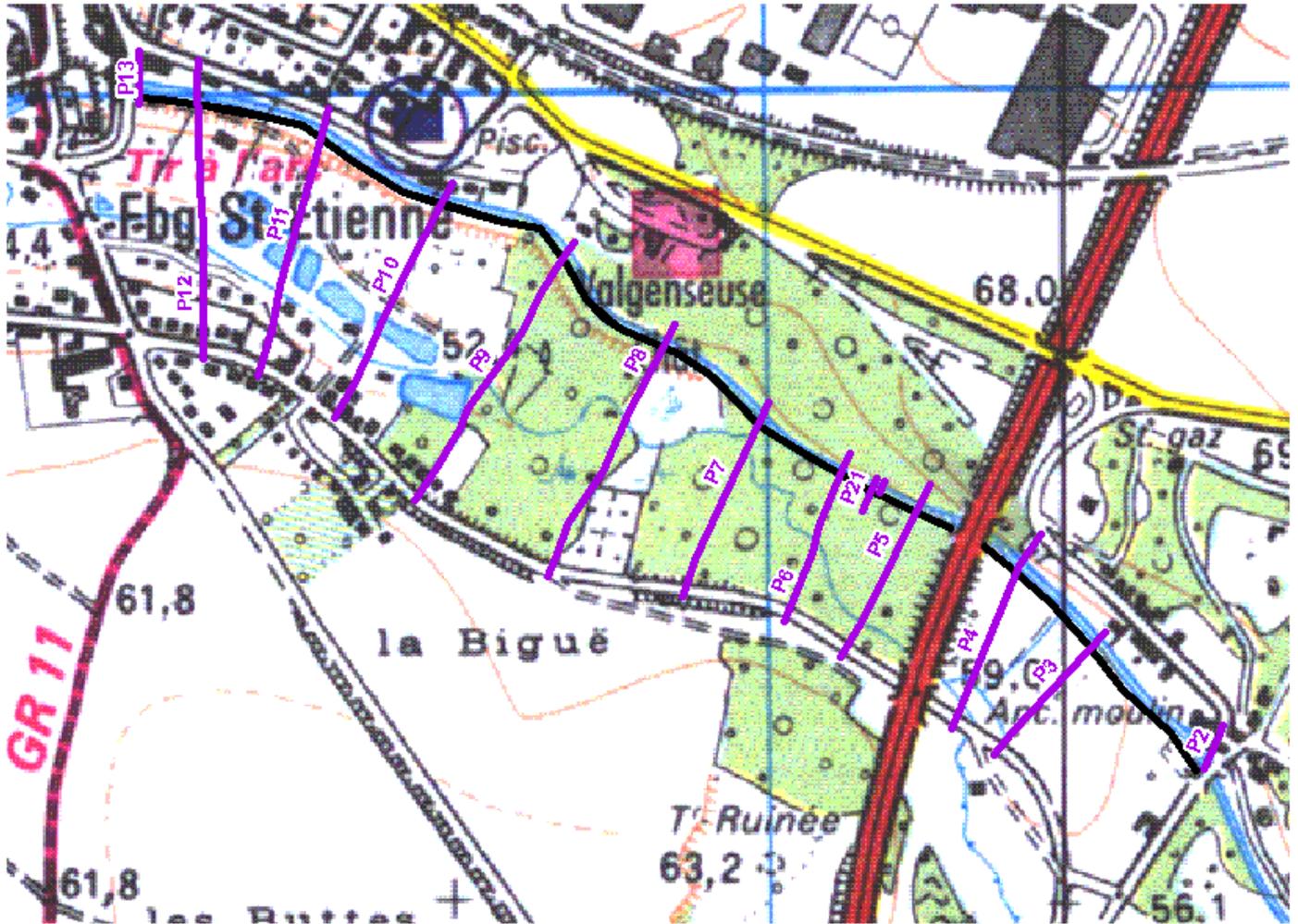
# **LEVES TOPOGRAPHIQUES REALISES PAR UN GEOMETRE**

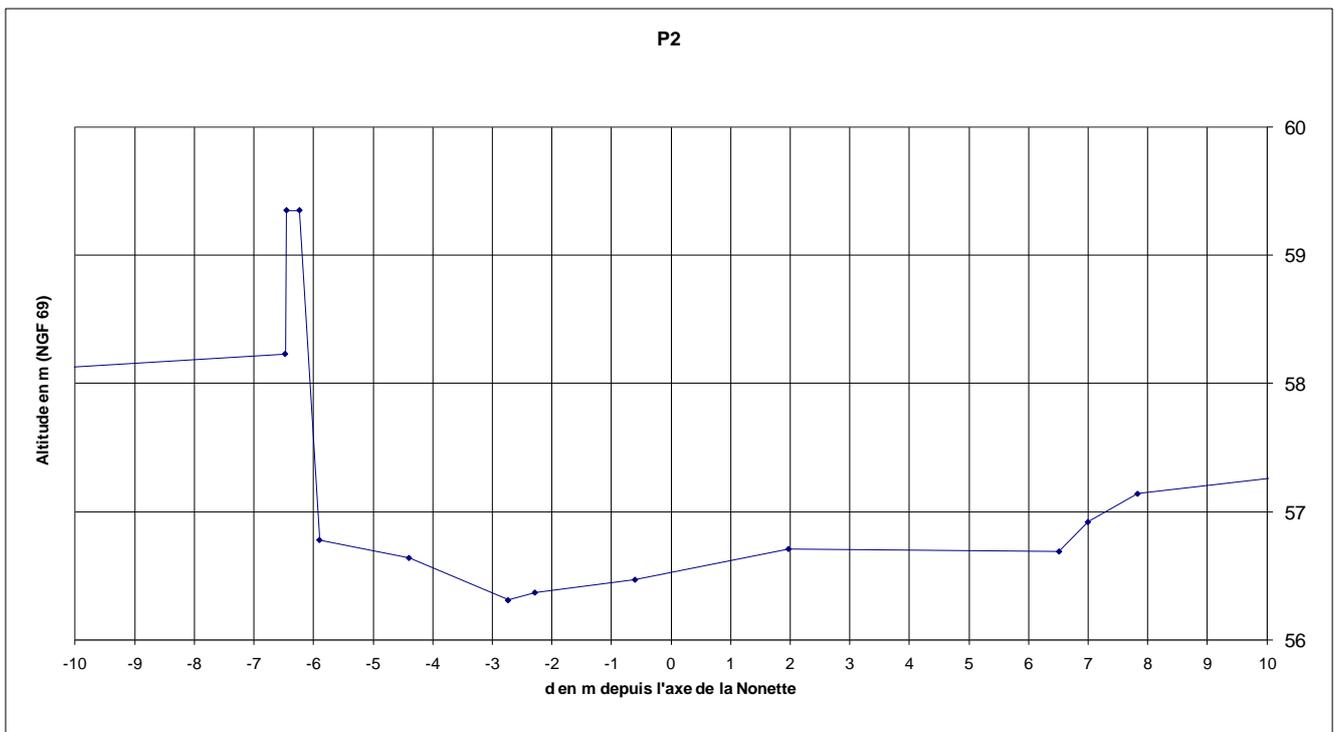
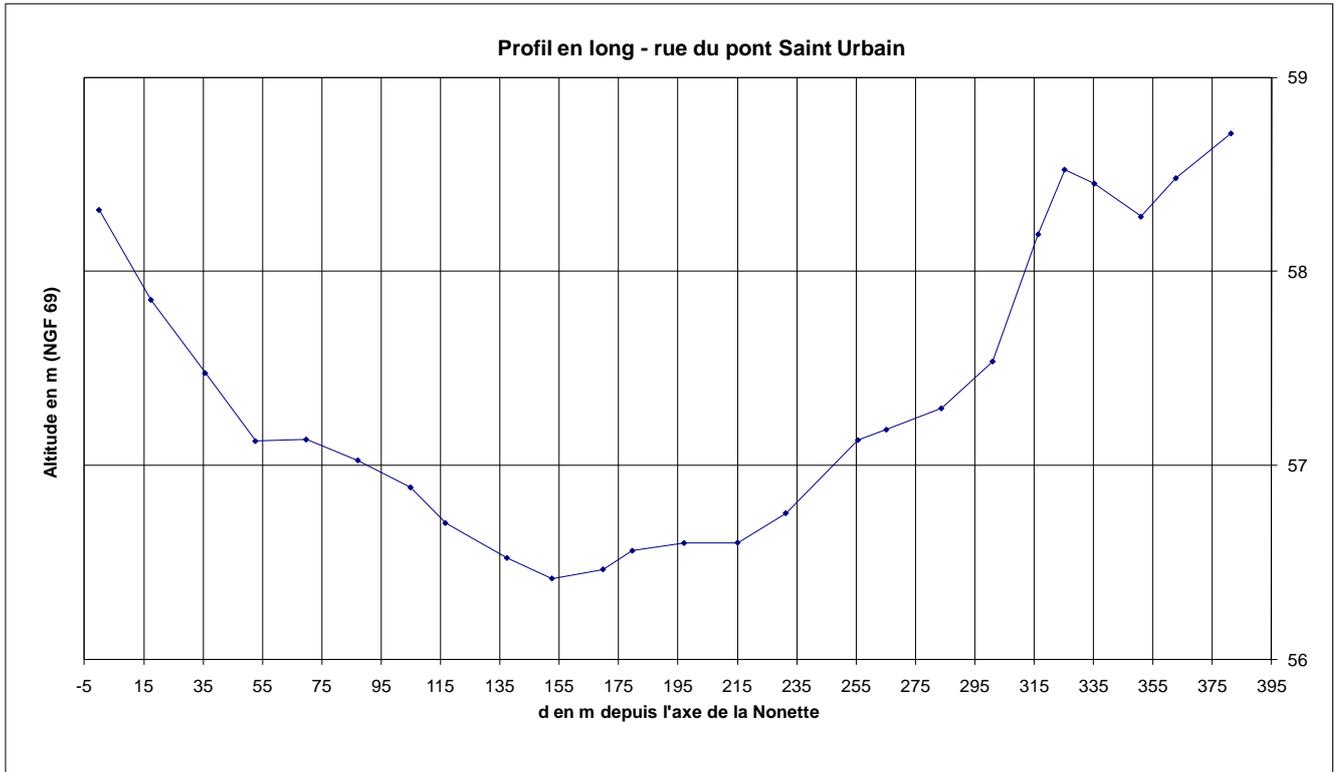
---

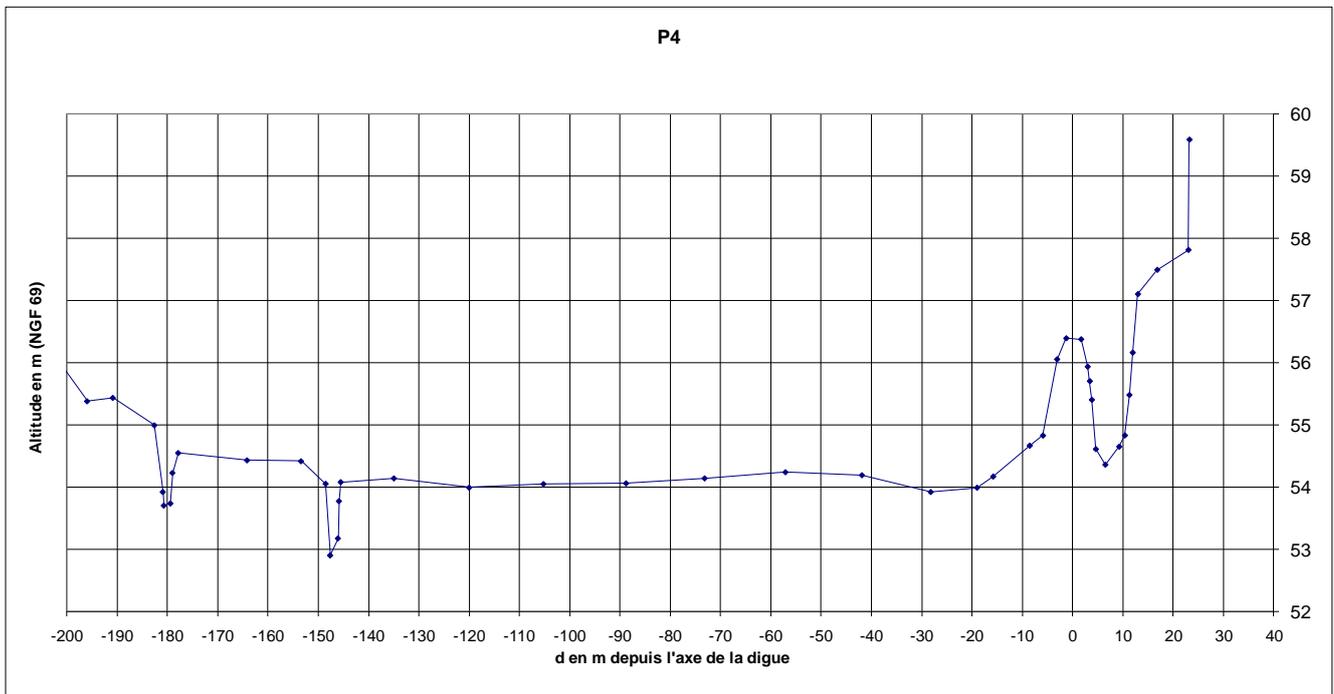
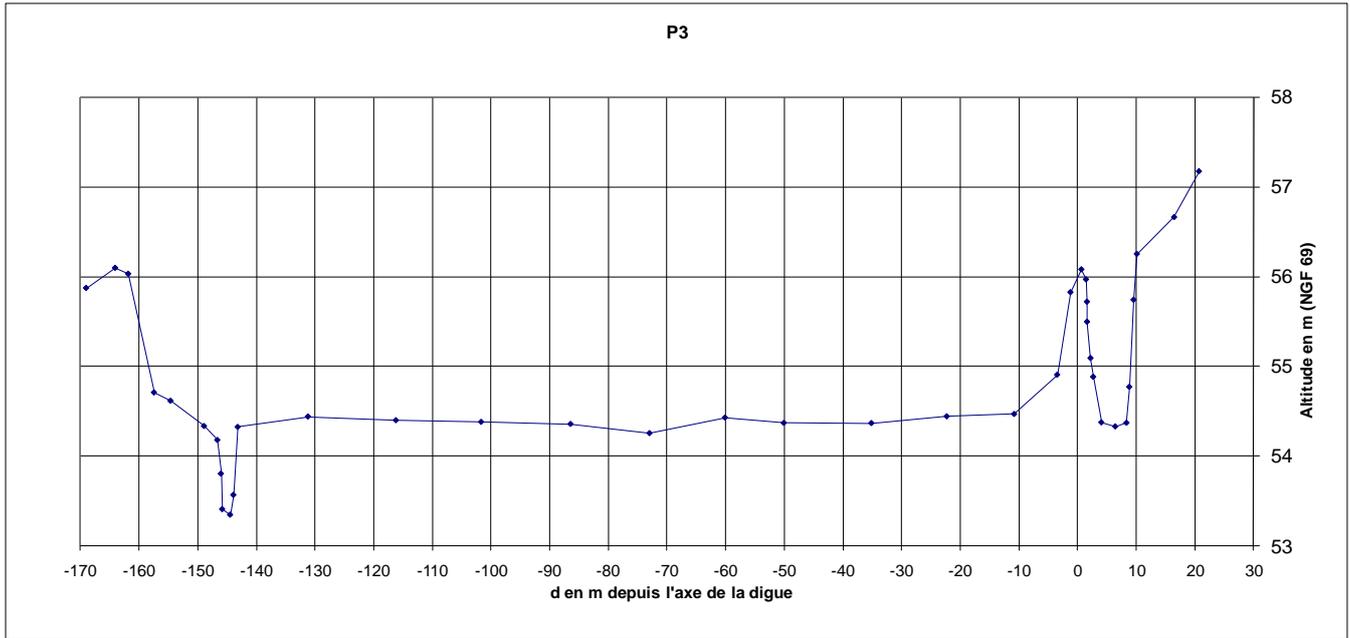
Levés topographiques effectués par HYDROTOPO le 14/02/2014 représentés de l'amont vers l'aval de la Nonette

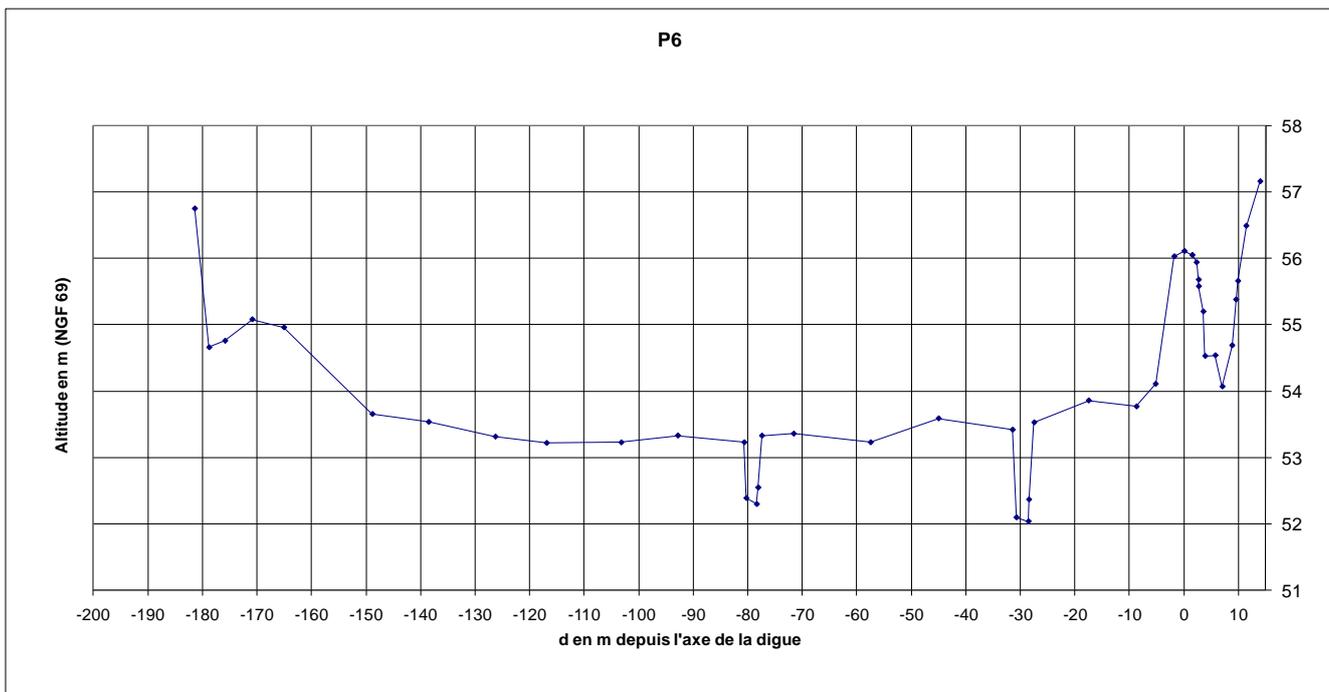
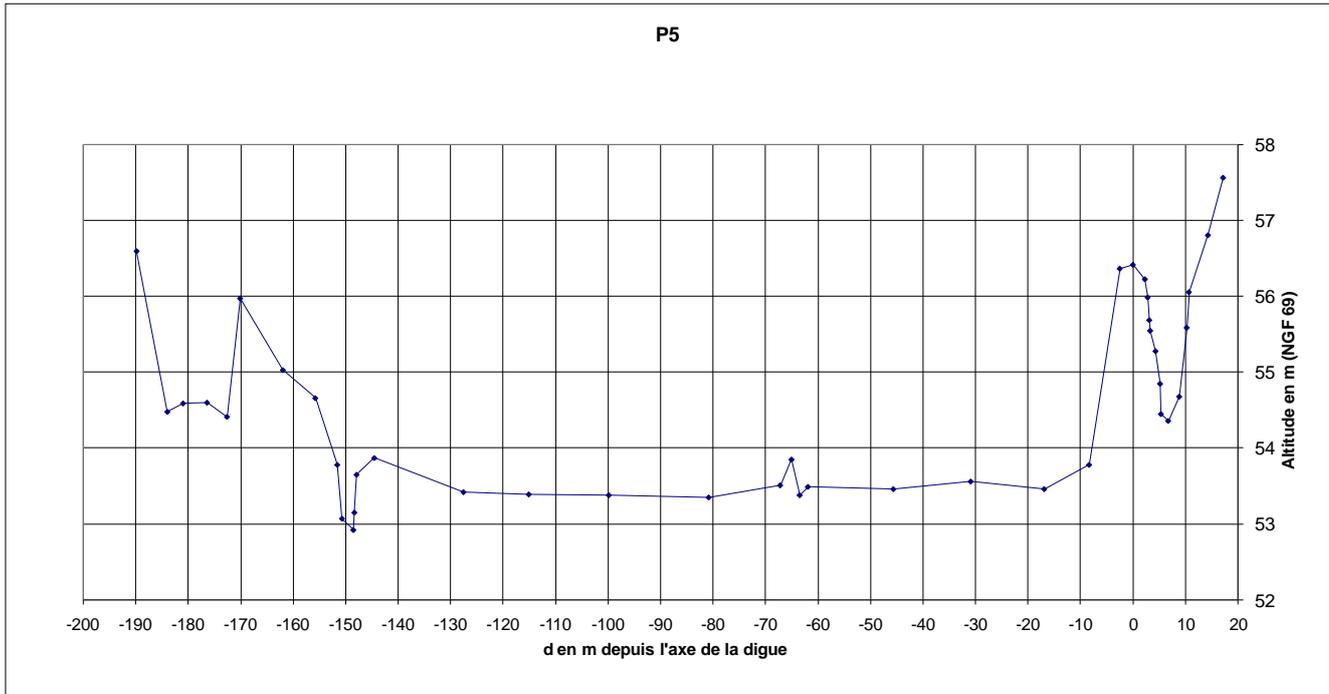
L'ensemble des données topographiques levées sont présentées dans cette annexe. Dans un souci de lisibilité, l'annexe suivante présente uniquement les données levées sur la digue de la Nonette.

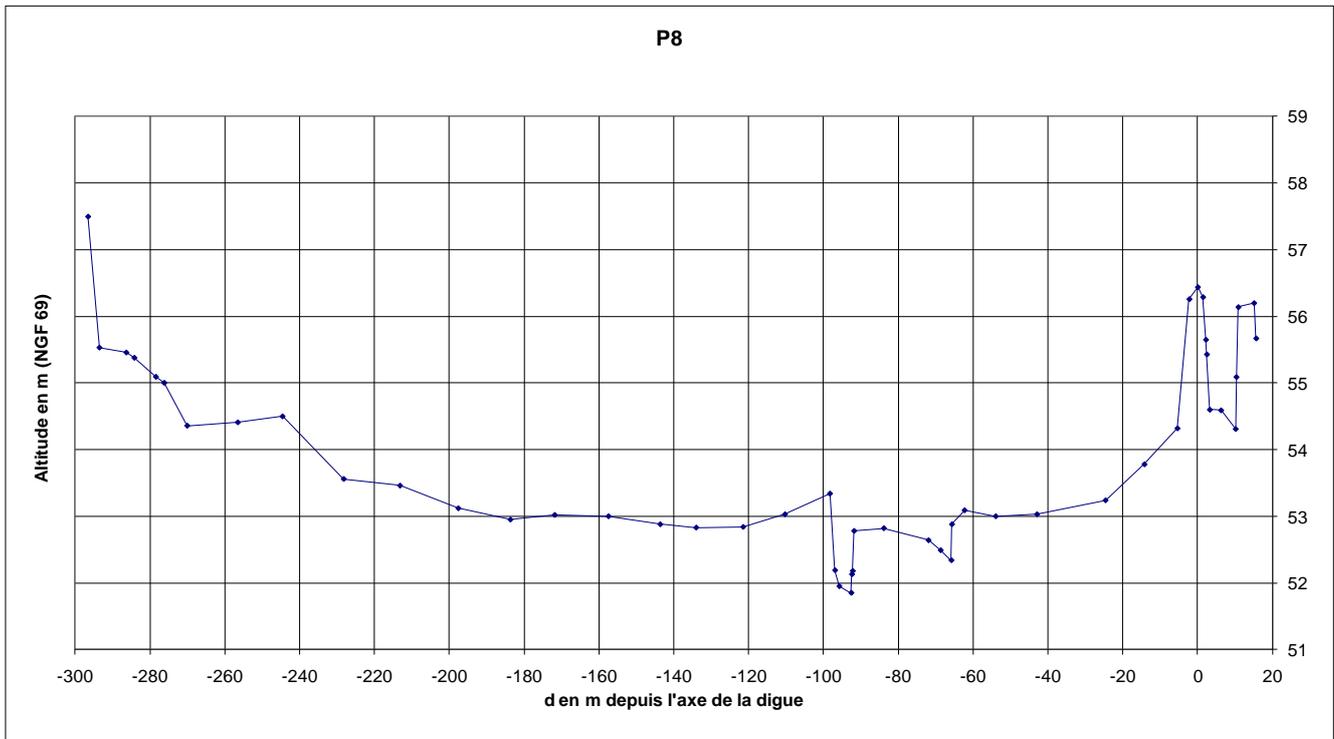
Pour rappel, la localisation des profils en travers levés dans la vallée de la Nonette sont indiqués en violet page suivante.

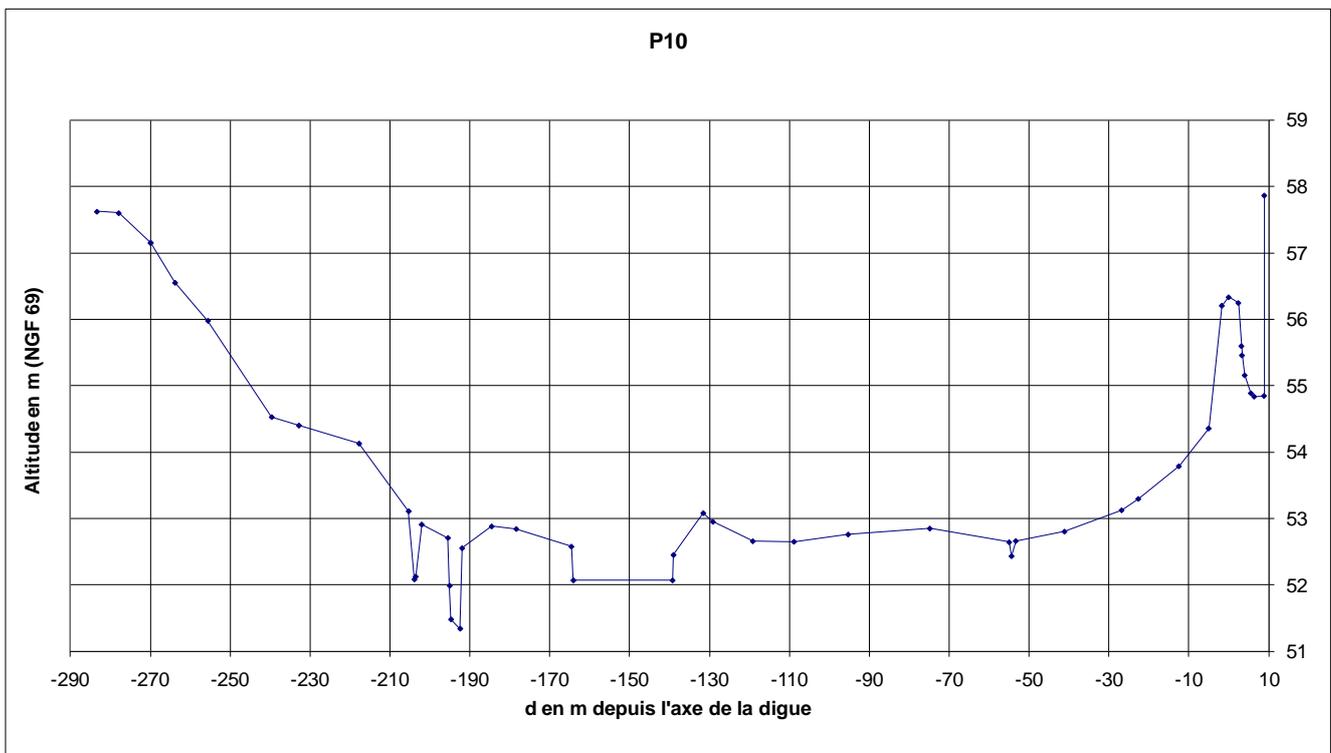
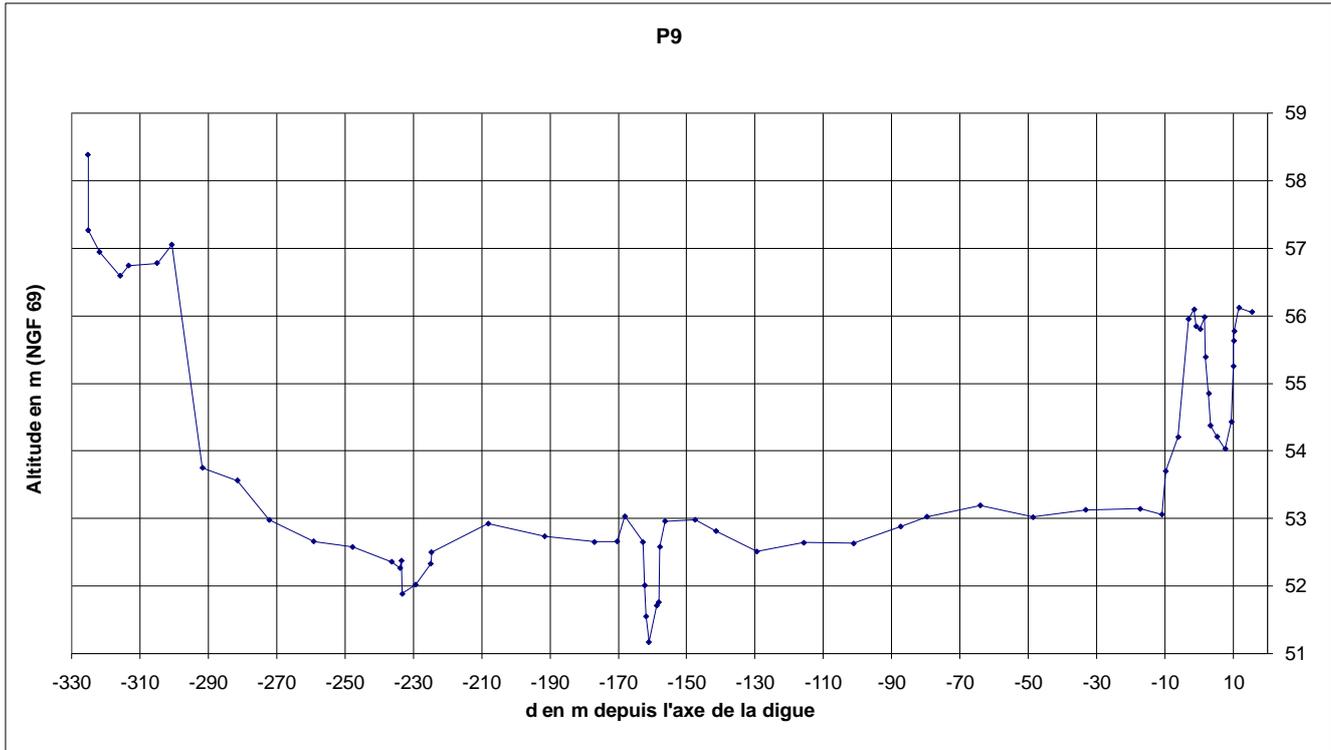


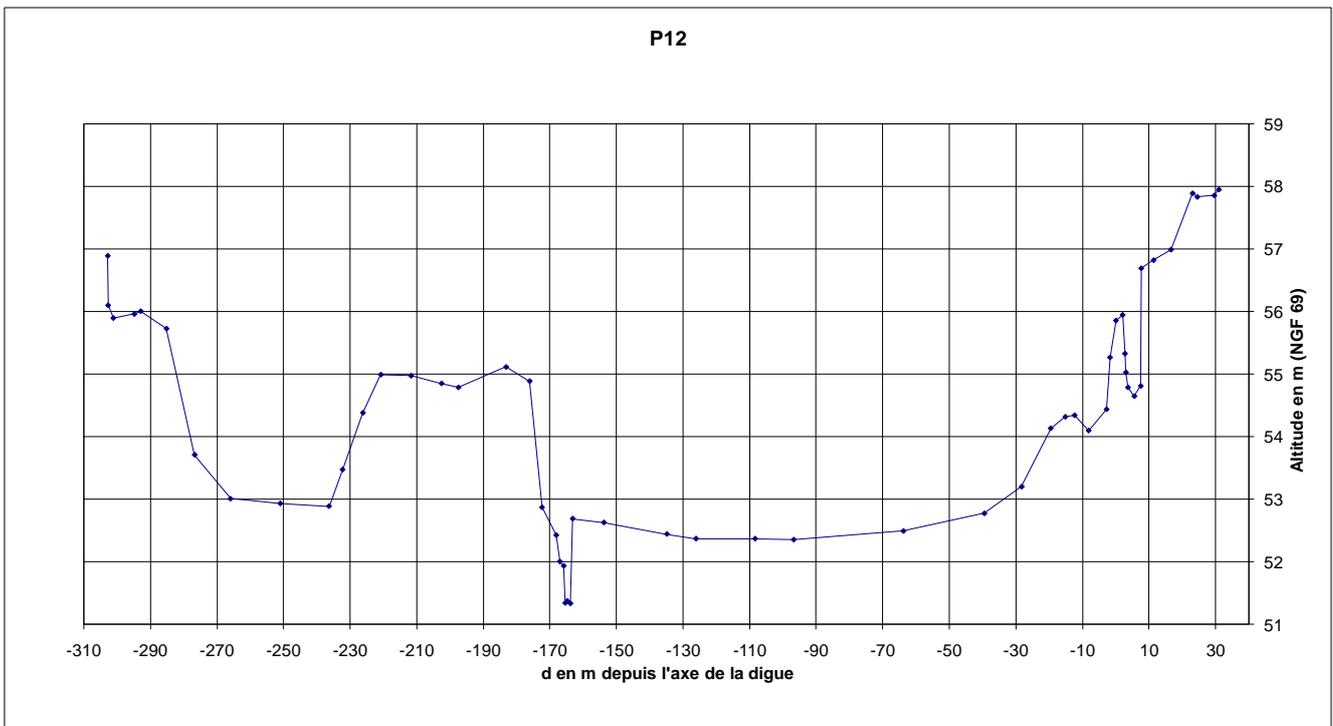
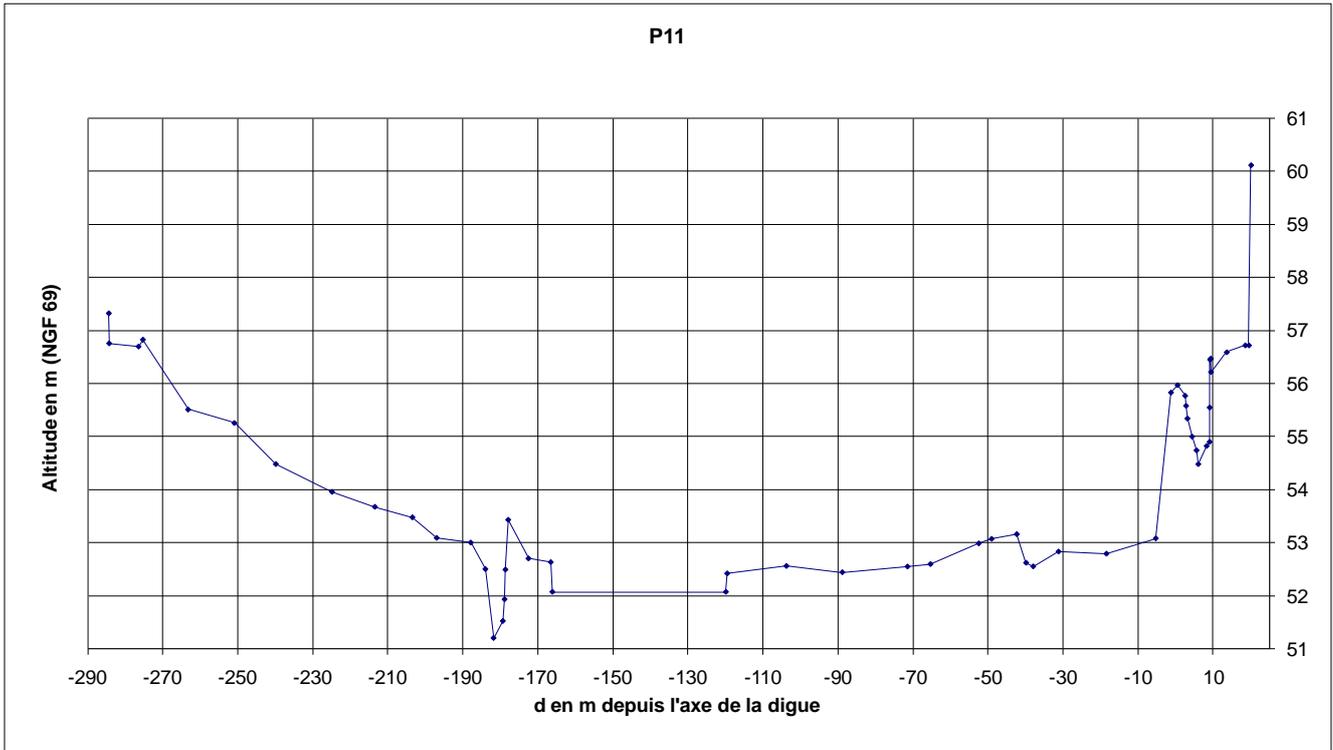


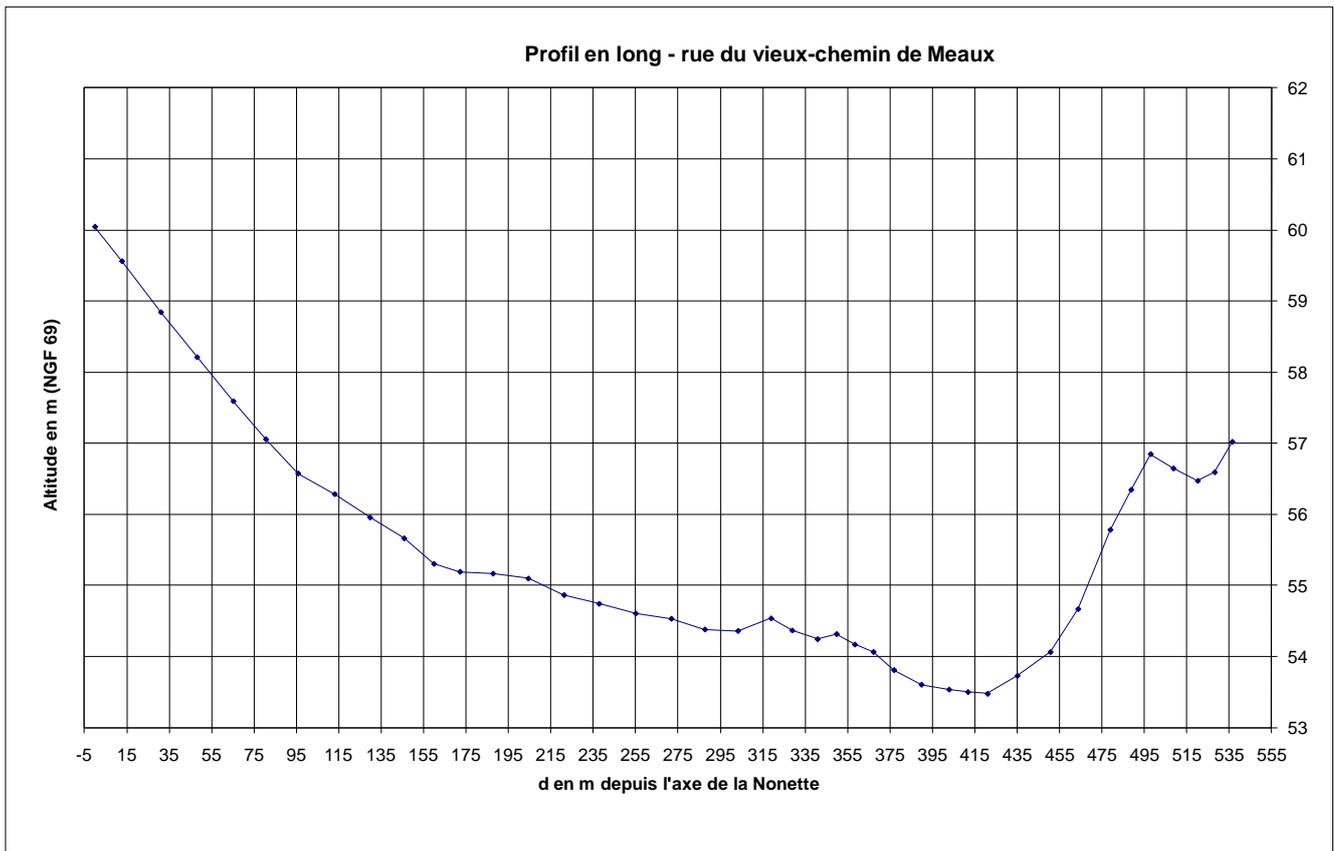
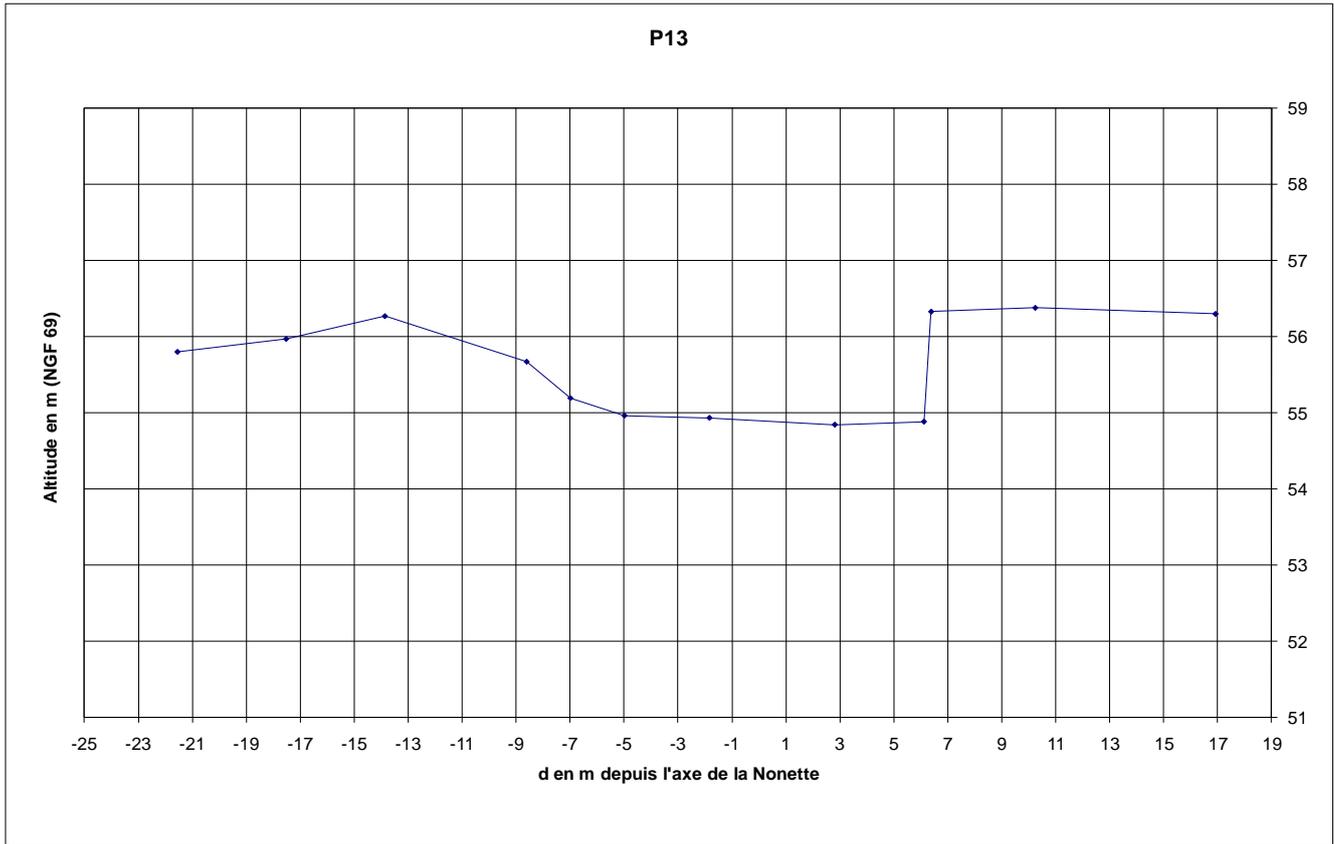












## ANNEXE 3

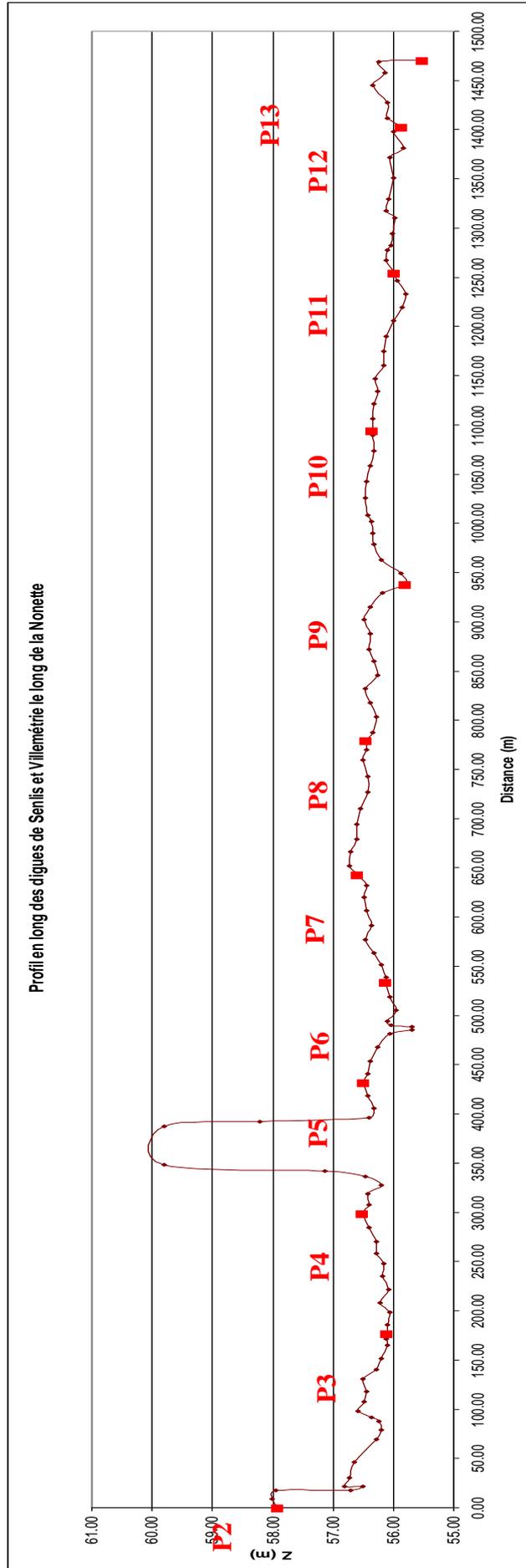
# **PROFILS EN TRAVERS DES DIGUES DE LA NONETTE**

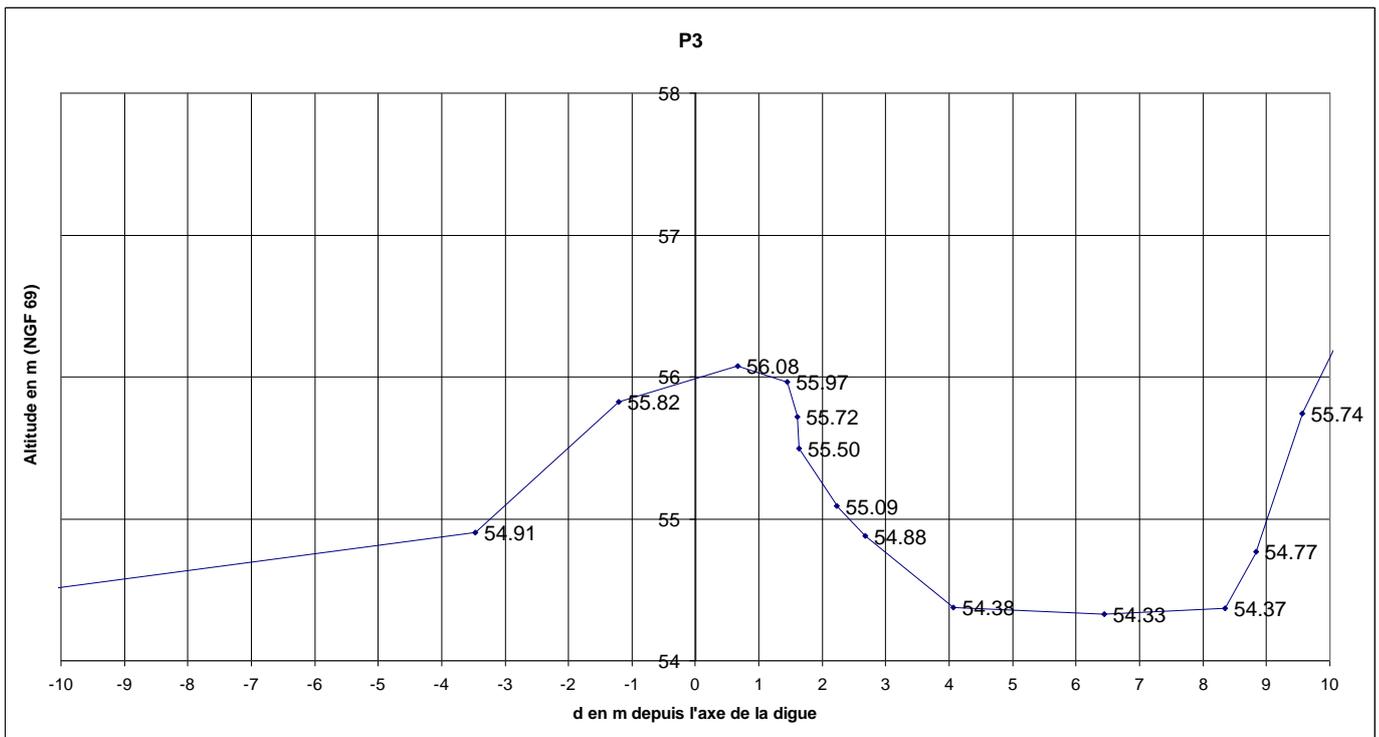
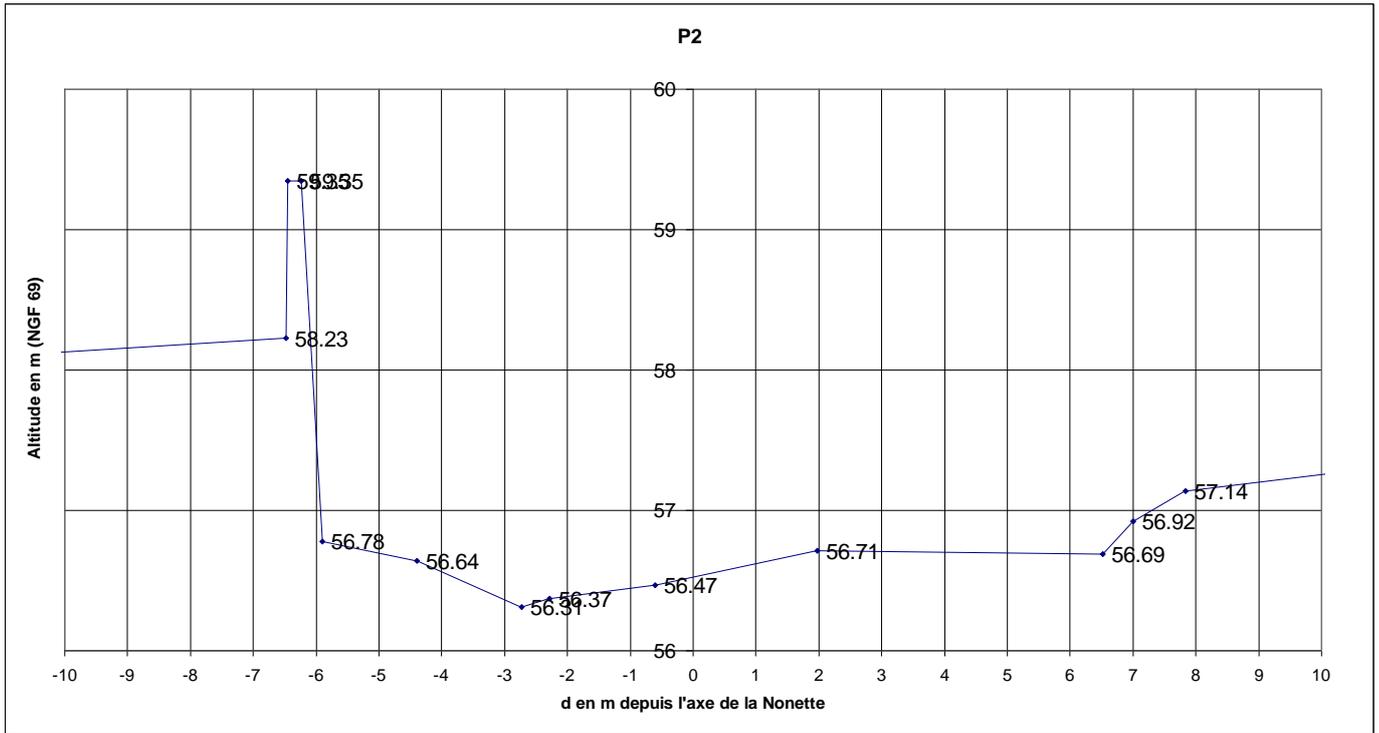
---

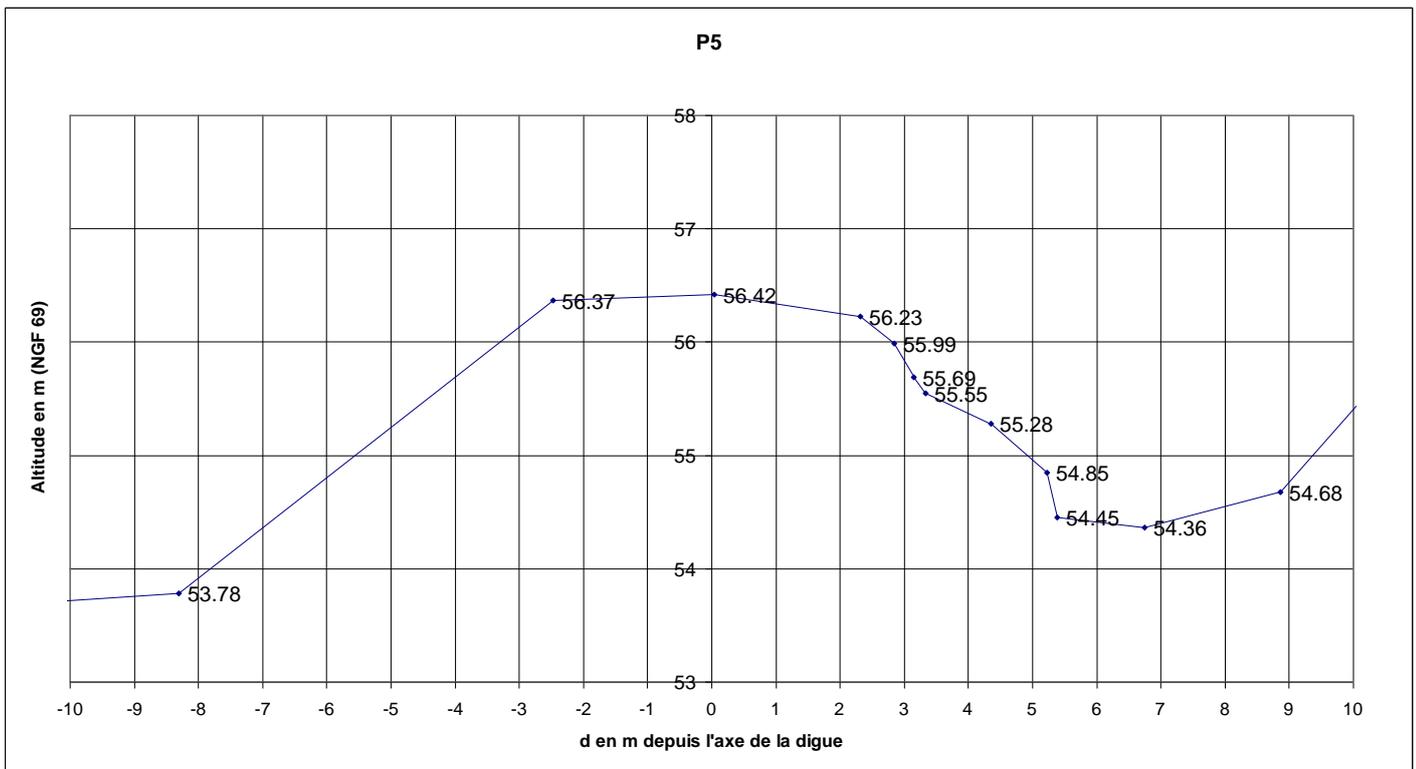
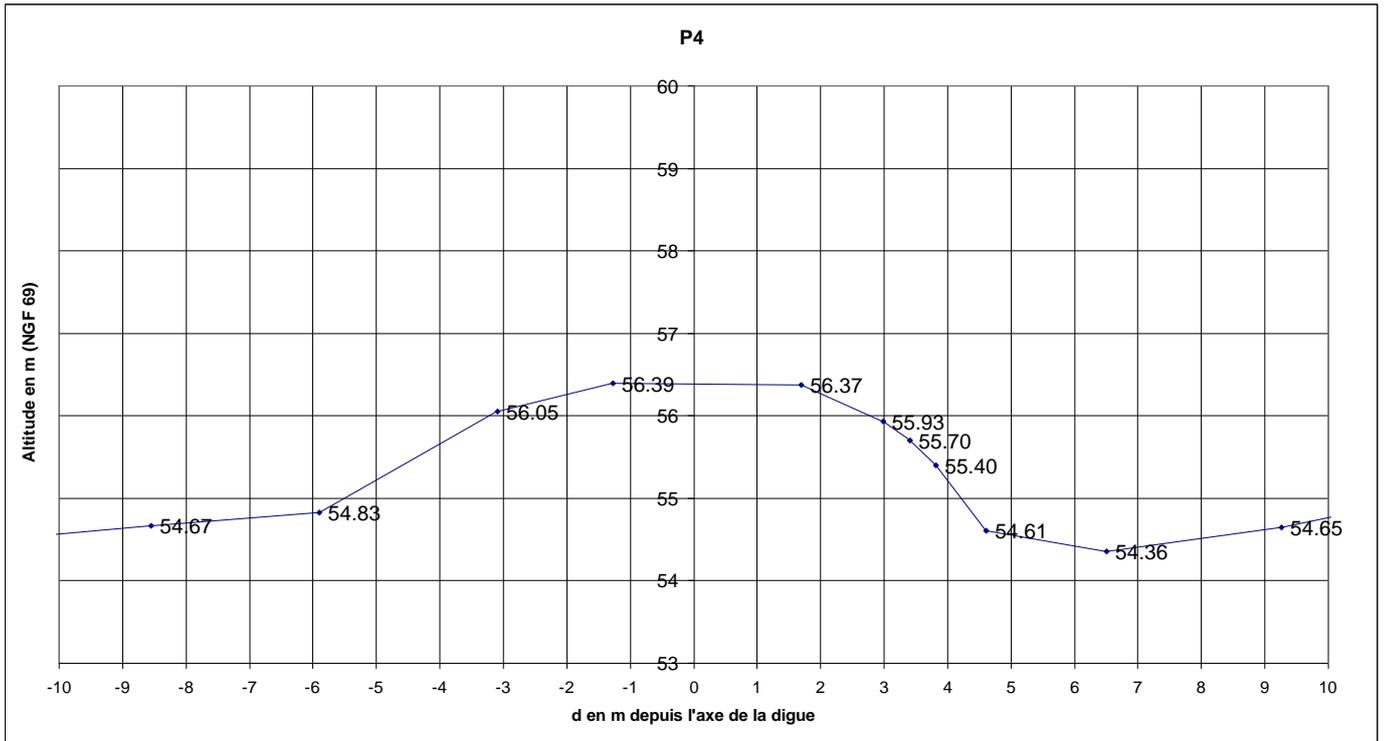
Levés topographiques effectués par HYDROTOPO le 14/02/2014 représentés de l'amont vers l'aval de la Nonette

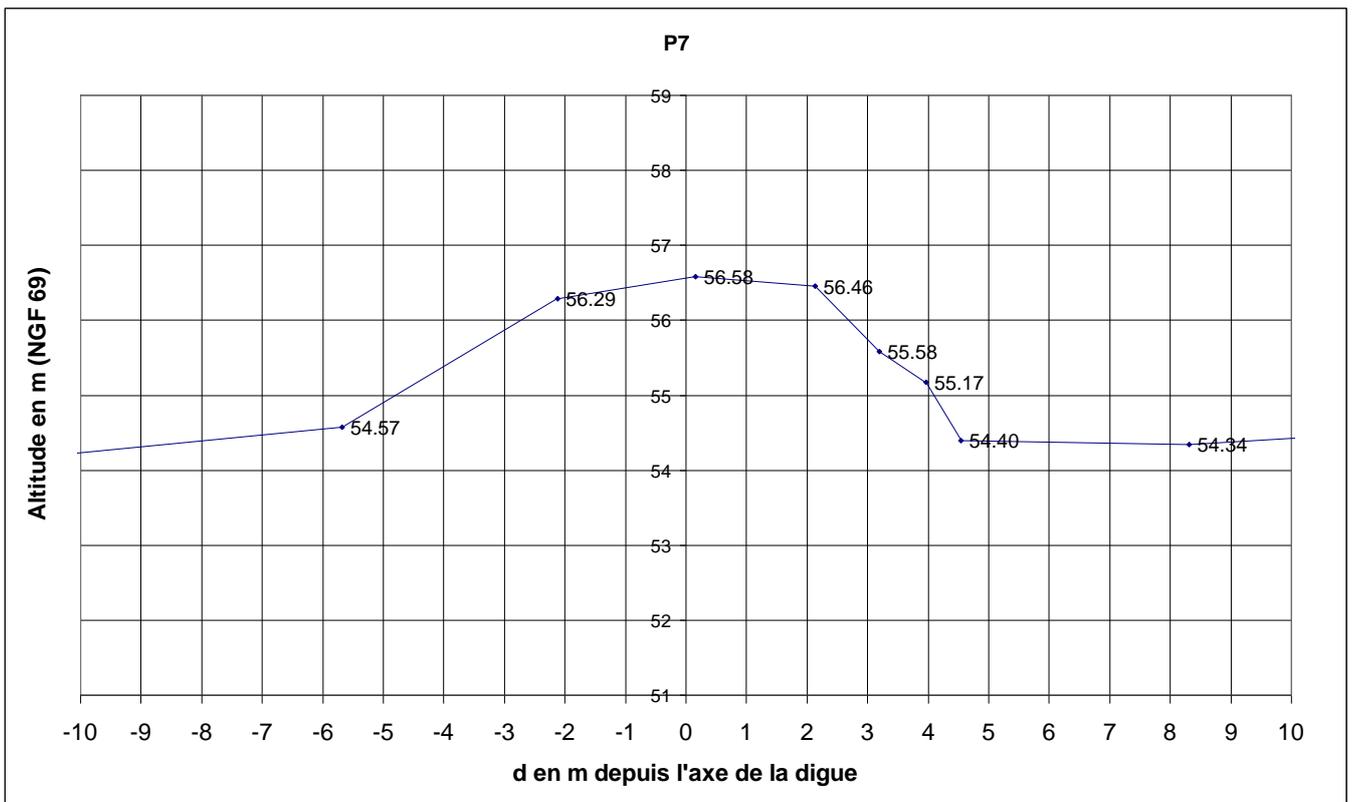
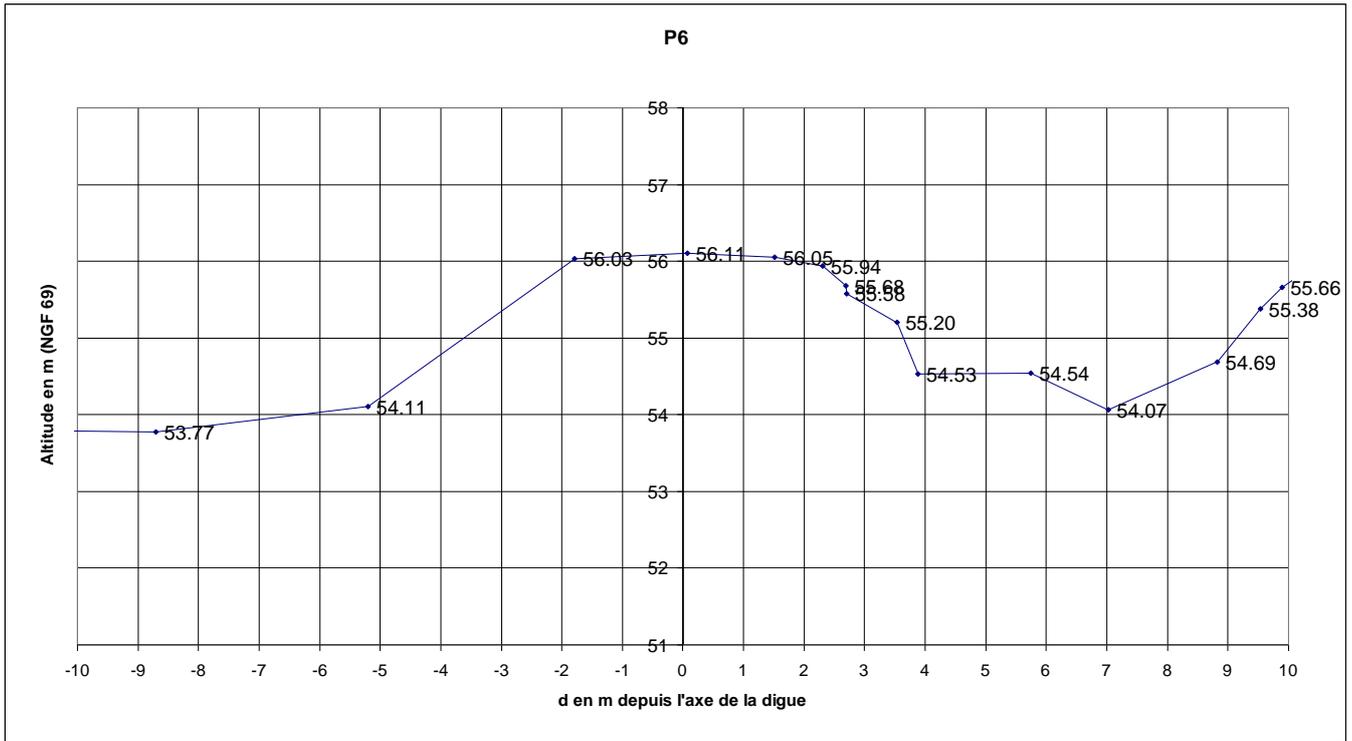
Pour une meilleure lisibilité, seuls les profils en travers de la digue ont été tracés dans cette annexe.

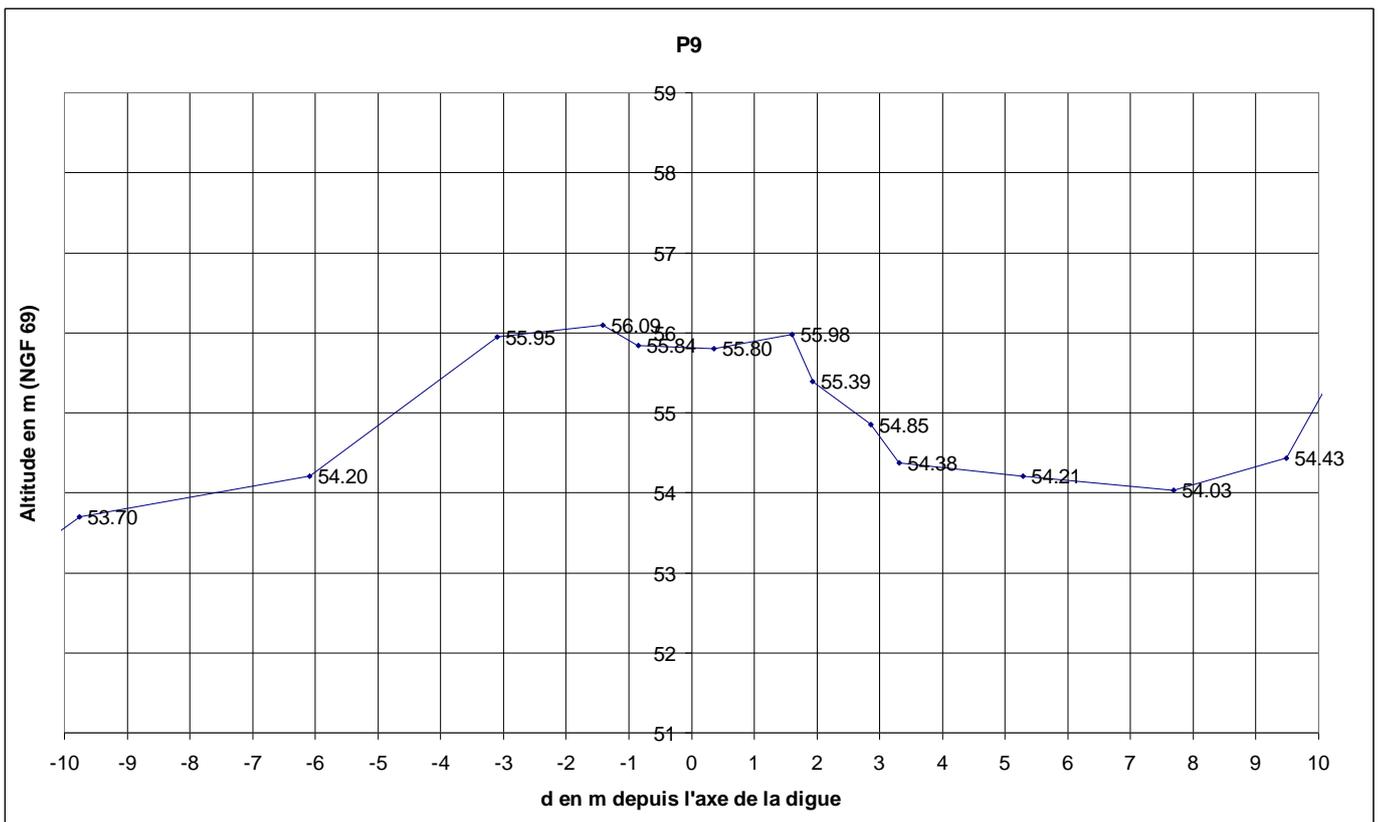
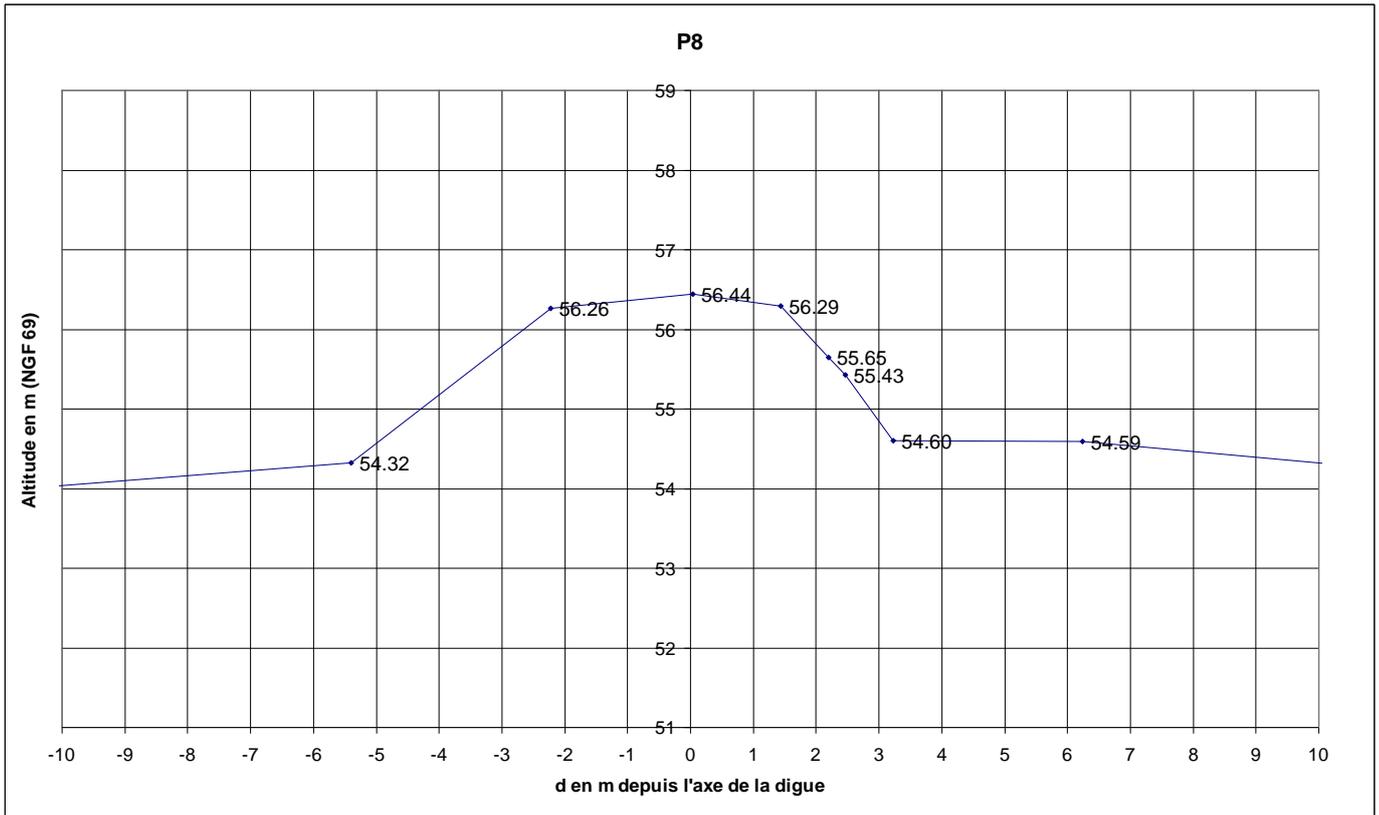
Pour rappel, le profil en long de la digue de la Nonette ainsi que la localisation des profils en travers levés sur la digue sont indiqués page suivante.

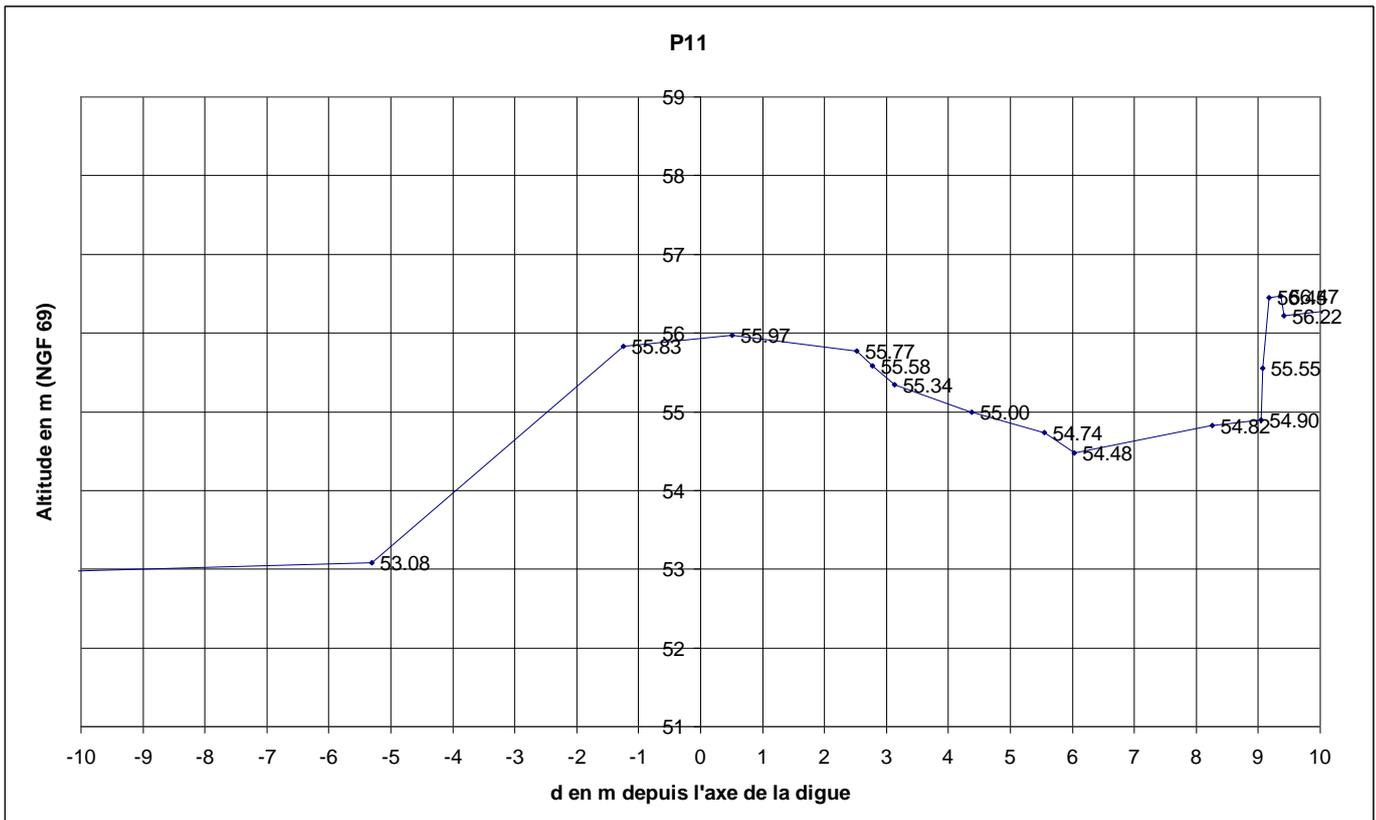
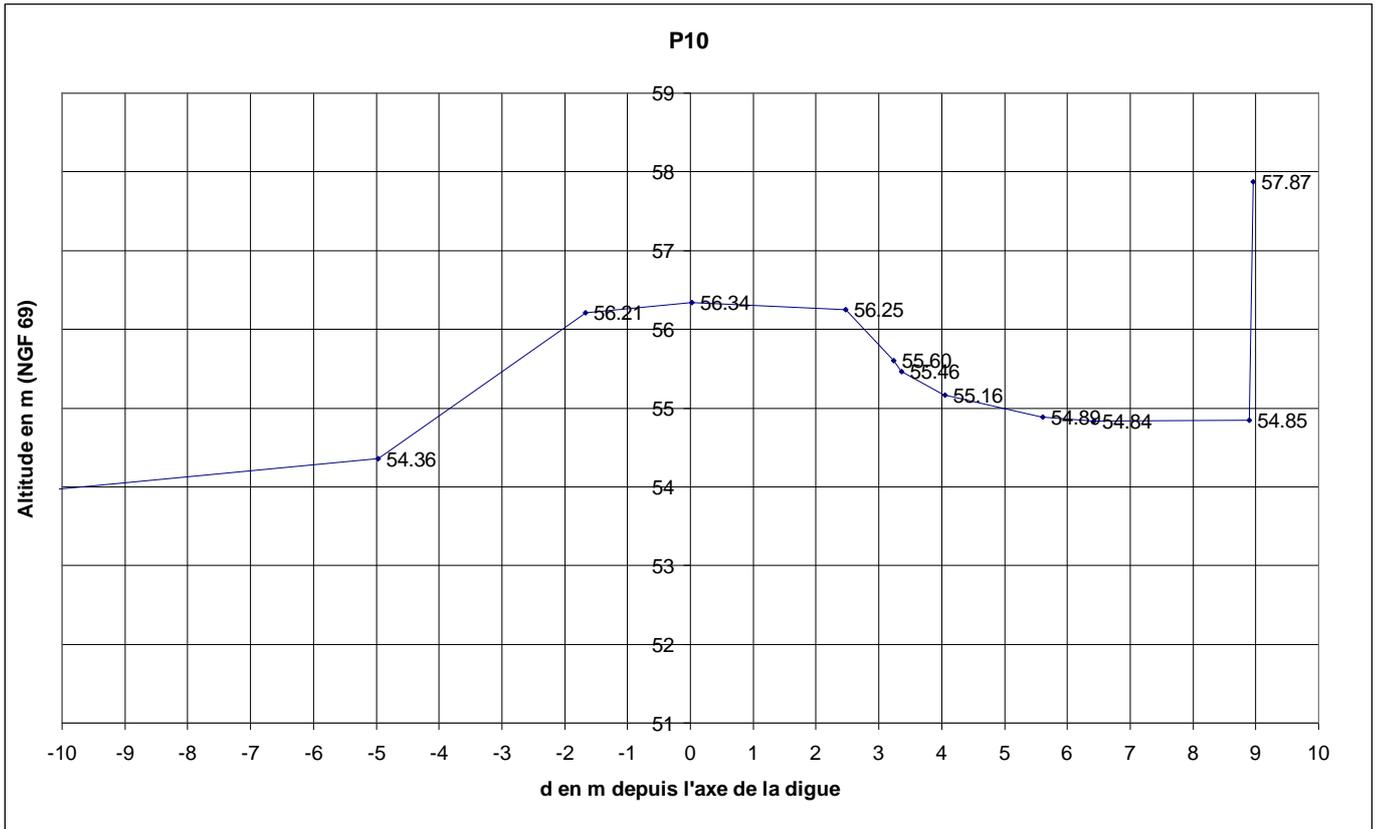


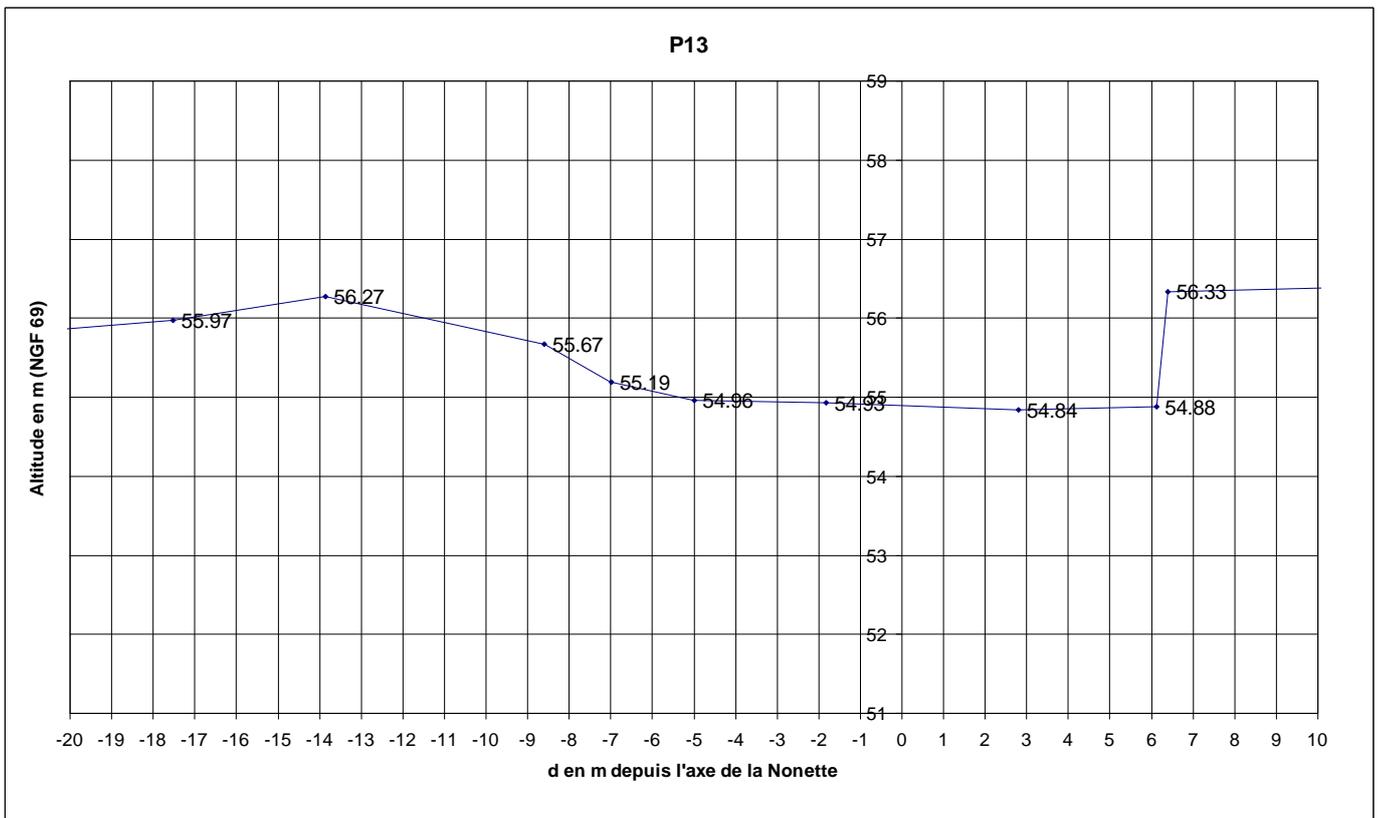
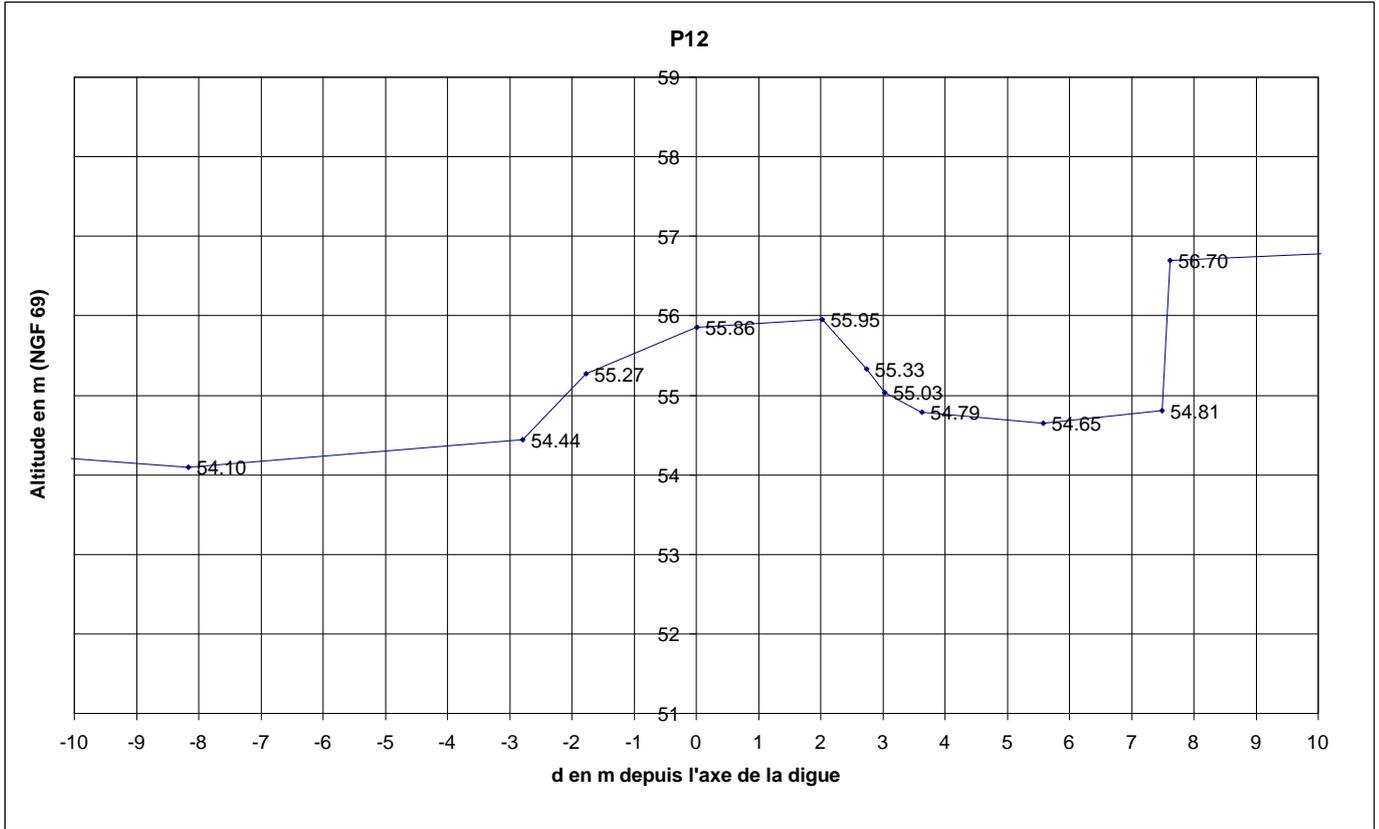












## ANNEXE 4

# **CONSTRUCTION DU MODELE ET HYPOTHESES HYDRAULIQUES**

---

Pour alléger le corps du rapport principal et faciliter la lecture, la construction du modèle hydraulique ainsi que les hypothèses utilisées sont décrits dans cette annexe.

---

# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>1 Modélisation des ruptures de digues.....</b>	<b>2</b>
1.1 Présentation .....	2
1.1.1 Objectifs de l'étude.....	2
1.1.2 Périmètre de modélisation 2D .....	2
1.2 Données disponibles.....	3
1.2.1 Données topographiques .....	3
1.2.2 Occupation des sols et rugosité .....	4
1.2.3 Ouvrages hydrauliques .....	5
1.3 Hypothèses de modélisation.....	7
1.3.1 Modèle hydraulique MIKE FLOOD .....	7
1.3.2 L'outil DAMBREAK .....	8
1.3.3 Construction du modèle MIKE FLOOD .....	11
1.3.3.1 Modèle 1D MIKE 11.....	11
1.3.3.2 Modèle 2D MIKE 21.....	16
1.3.3.3 Couplage des modèles par l'interface MIKE FLOOD .....	19
1.3.4 Simulations de rupture envisagés .....	20
1.3.4.1 Hypothèses hydrauliques des simulations de rupture .....	20
1.3.4.2 Localisation des zones de brèches .....	21
1.3.4.3 Caractéristiques des brèches.....	21

# Modélisation des ruptures de digues

## 1.1 Présentation

### 1.1.1 Objectifs de l'étude

Le modèle hydraulique doit permettre d'étudier la propagation de l'onde de submersion à partir de 4 sites de ruptures potentiels sur la Nonette.

Le modèle ayant servi à l'étude d'onde de submersion intègre :

- Un modèle 1D lit mineur de la Nonette du Moulin de Villemétrie jusqu'au Moulin de la Porte de Meaux destiné à propager les flux vers les sites de rupture et modéliser l'hydrogramme de rupture. Le modèle a été prolongé à l'aval pour appliquer une condition aval satisfaisante au modèle qui n'influence pas les résultats de la zone d'étude ;
- Un modèle 2D du fond de vallée de la Nonette (zone protégée). Ce modèle intègre la topographie du lit majeur à l'aval du site de rupture. Il permet d'accéder à une connaissance des variables hydrauliques en tout point du modèle (cote, profondeur, vitesse) et de caractériser la dynamique du phénomène d'onde de rupture.

La construction, le couplage et la mise en œuvre des modèles est décrite dans les sections suivantes.

### 1.1.2 Périmètre de modélisation 2D

Le périmètre de modélisation proposé est indiqué sur la figure suivante. Le contour noir représente la zone modélisée en 2D et le trait violet la zone d'étude 1D de la Nonette au droit du modèle 2D.

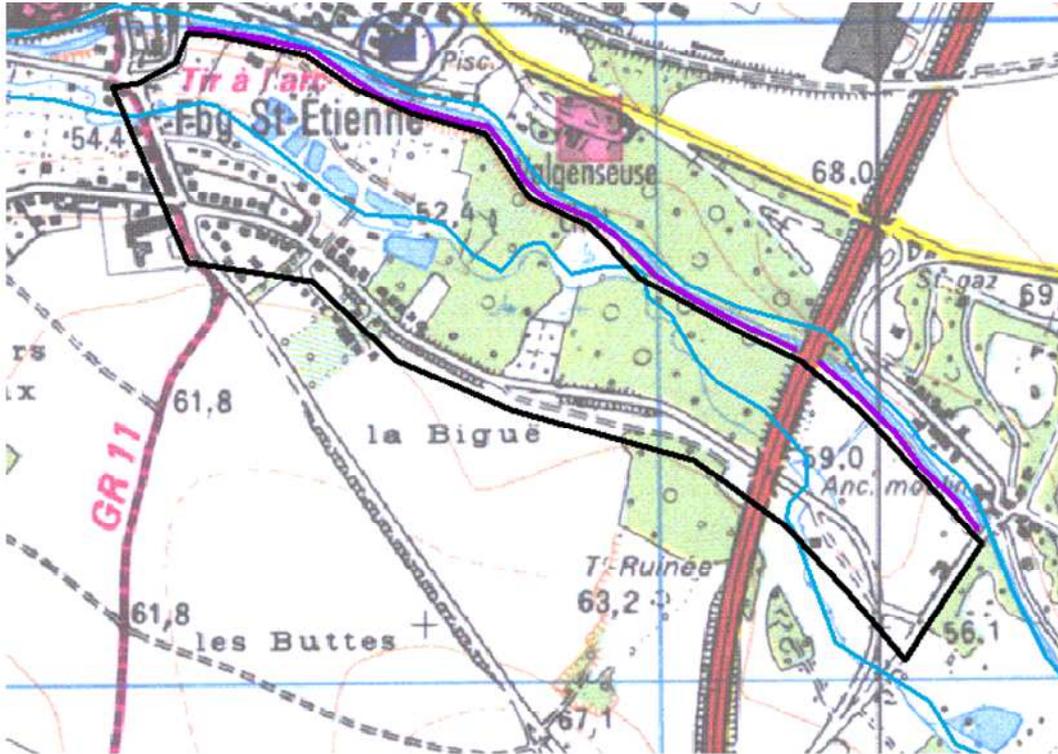


Figure 1. Zone d'étude modélisée

## 1.2 Données disponibles

### 1.2.1 Données topographiques

Les données topographiques disponibles proviennent de levés effectués par les géomètres HYDROTOPO le 12/02/2014 et le 13/06/2014.

Les levés du 12/02/2014 sont consultables sous la forme de profils en travers dans les annexes précédentes 2 et 3.

Les levés du 13/06/2014 concernent un secteur à l'aval du moulin de la Porte de Meaux.

L'ensemble des levés topographiques et bathymétriques sont localisés sur la cartographie de la figure suivante.

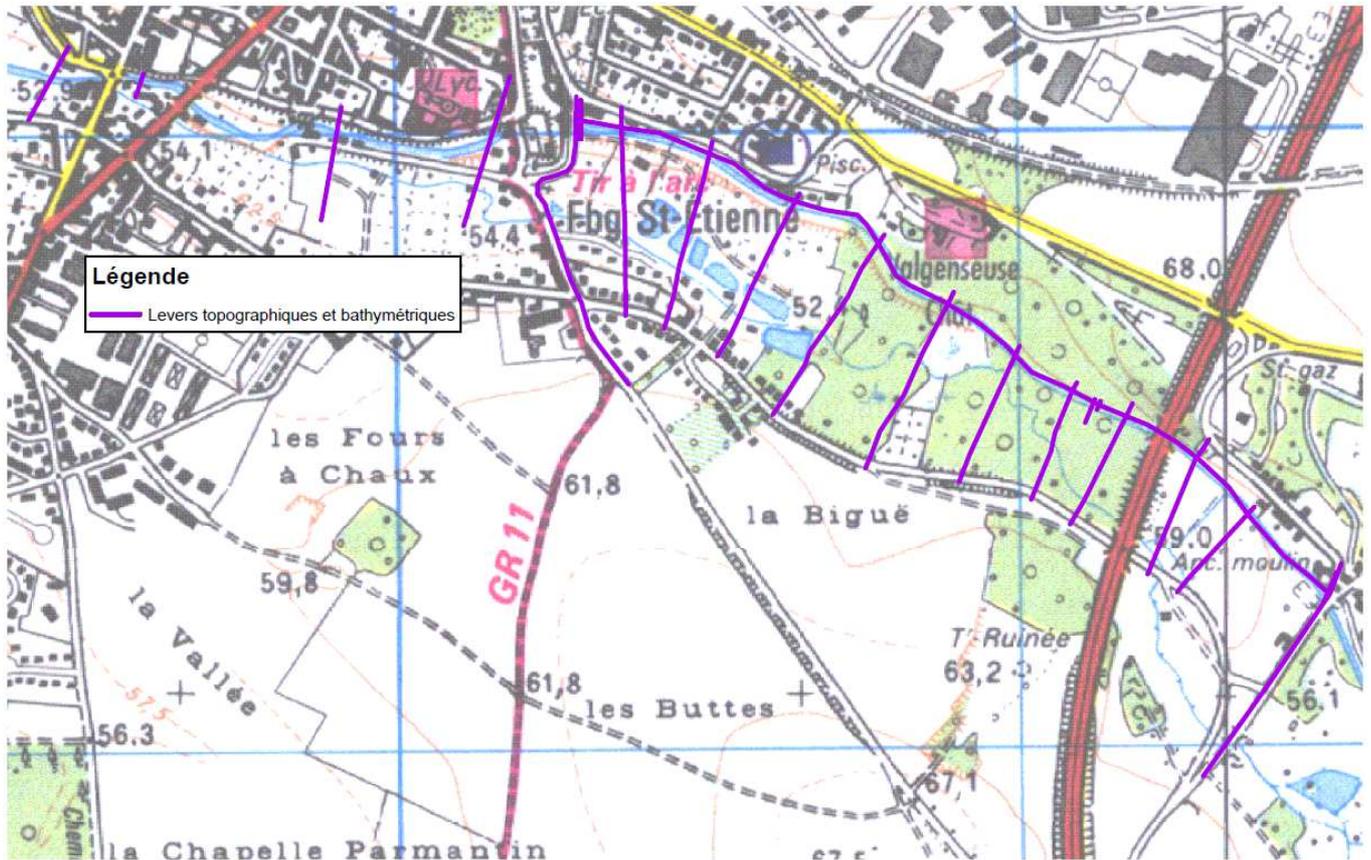


Figure 2. Ensemble des levés topographiques effectués par HYDROTOPO

### 1.2.2 Occupation des sols et rugosité

La définition des coefficients de Strickler, traduisant la rugosité des sols, a été réalisée à partir des couches Corine Land Cover.

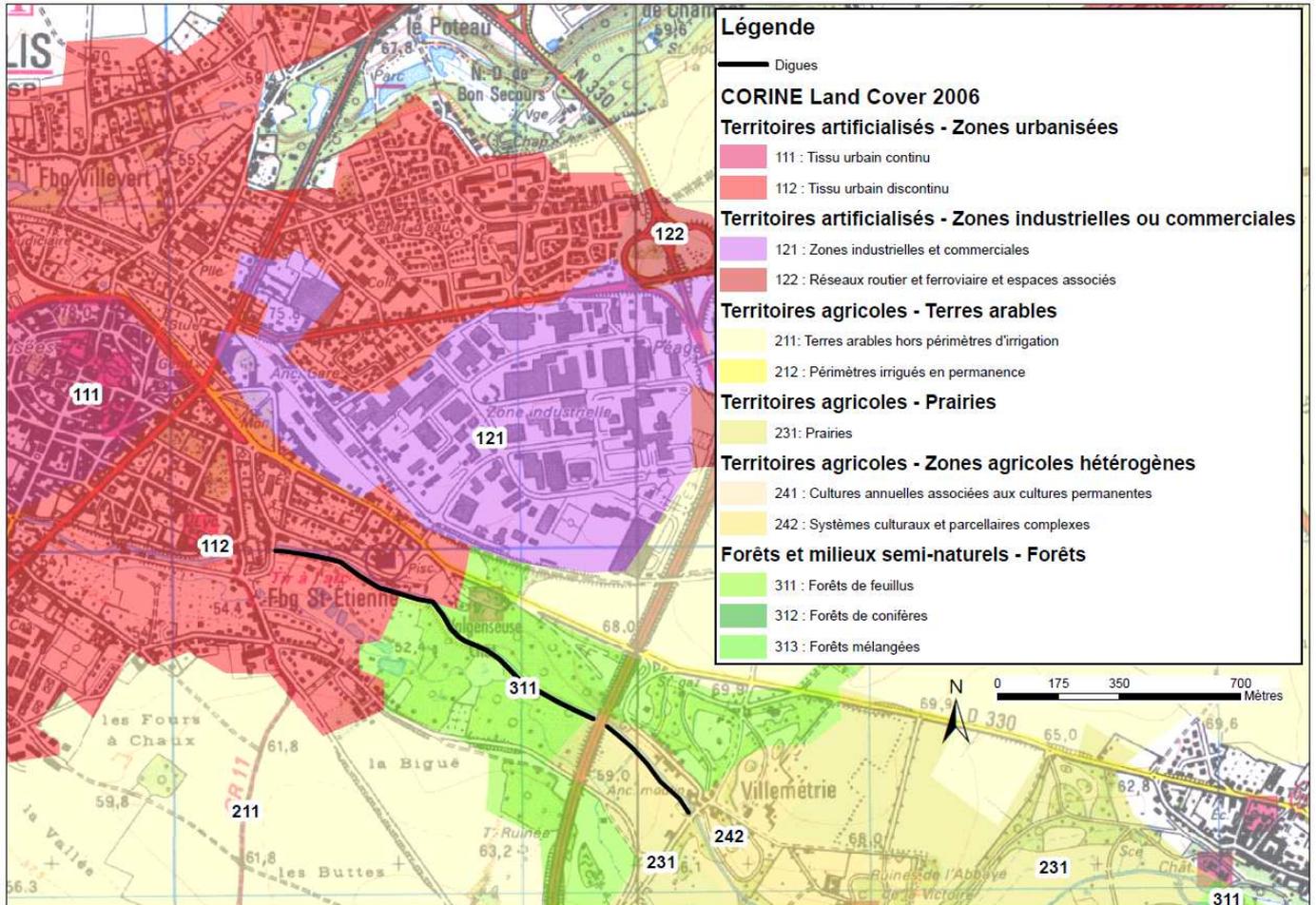


Figure 3. Occupation du sol sur la zone d'étude – Source : CORINE Land Cover 2006

### 1.2.3 Ouvrages hydrauliques

Les ouvrages hydrauliques (pont, seuil, buse) intégrés au modèle sont localisés sur la cartographie de la Figure 4.

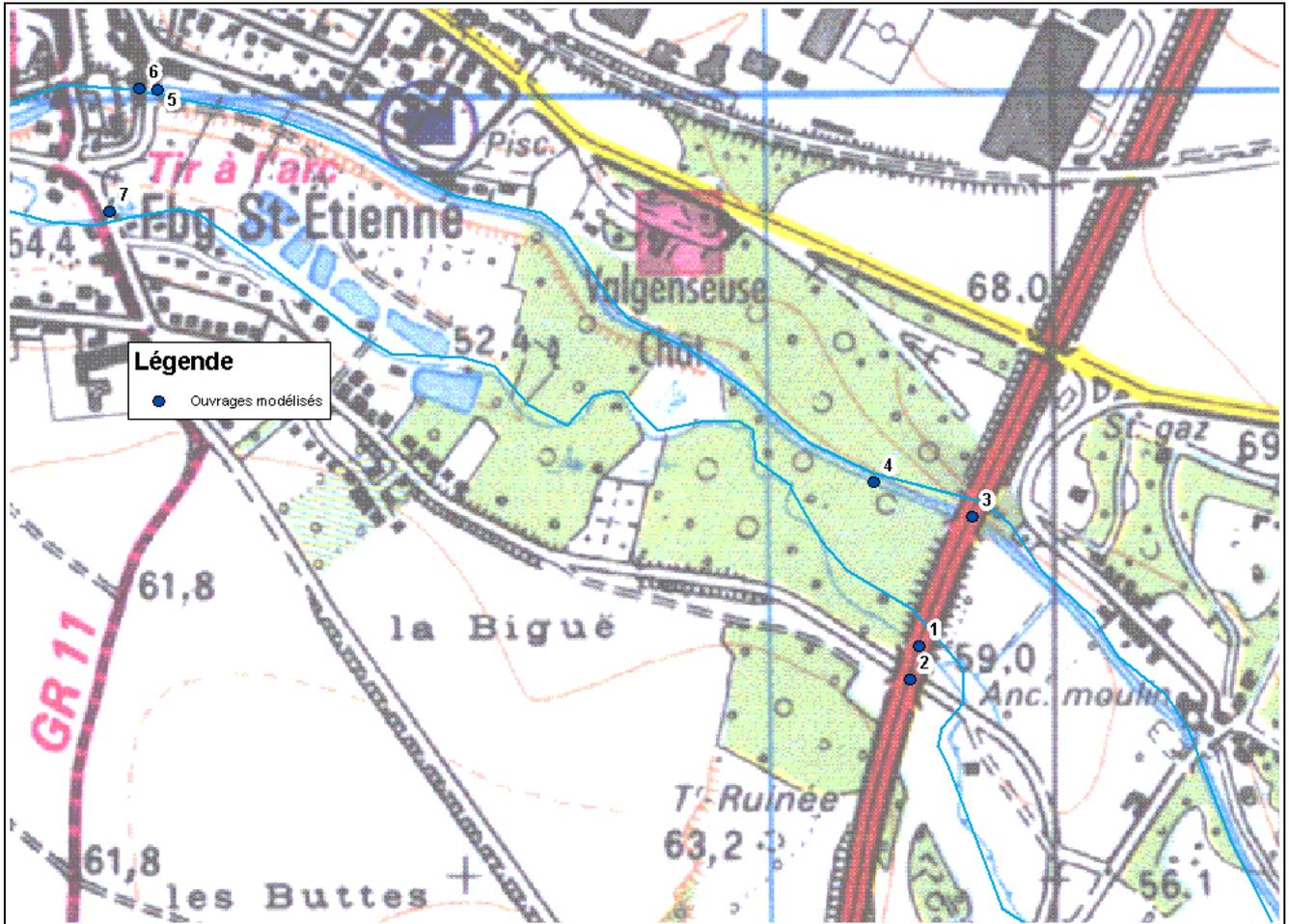


Figure 4. Localisation des ouvrages décrits dans le modèle hydraulique

Les caractéristiques de ces ouvrages sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau 1. Caractéristiques des ouvrages intégrés dans le modèle hydraulique

Id	Ouvrage	Type d'ouvrage dans MIKE11	Dimensions
1	Pont A1 -St Urbain	Culvert	Buse de diamètre 800 mm
2	Pont A1- route de la Biguë	Culvert Rectangular	9m de large et 4.5m de haut
3	Pont A1 - Nonette	Culvert Irregular	Buse de diamètre 3500 mm
4	Déversoir de la Nonette vers le St Urbain	Link	Seuil à la cote 55.70 m NGF - 2.3m de large
5	Pont du Moulin de la porte de Meaux	Culvert Irregular	14 m de large / 1.2m de haut / 1 pile de pont de 3m

Id	Ouvrage	Type d'ouvrage dans MIKE11	Dimensions
6	Seuil résiduel du Moulin de la Porte de Meaux	Weir	Seuil à la cote 54.96 m NGF - 10 m de large
7	Pont route - St Urbain	Culvert Rectangular	8m de large et 1.2m de haut

## 1.3 Hypothèses de modélisation

### 1.3.1 Modèle hydraulique MIKE FLOOD

Le fonctionnement des ondes de submersion a été modélisé à partir de l'interface MIKE FLOOD qui permet de coupler dynamiquement un modèle unidimensionnel (1D) et bidimensionnel (2D).

L'avantage de cette solution est de :

- ✓ Décrire de façon simplifiée et réaliste les écoulements en 1D sur les cours d'eau alimentant les ruptures de digues;
- ✓ Décrire de façon précise et différenciée les écoulements en 1D au droit des ouvrages par le module d'ouvrage MIKE 11 prévu à cet effet ;
- ✓ Décrire de façon détaillée les écoulements au sein du lit mineur dans la zone d'influence hydraulique immédiate des ouvrages. Les bénéfices apportés par la modélisation 2D sont :
  - Une meilleure description des variables hydrauliques, notamment des vitesses, et la possibilité de représenter des écoulements multidirectionnels en particulier en aval des digues (courants de retour par exemple). En effet, contrairement aux hypothèses de modélisations filaires (1D) la modélisation 2D s'affranchit de l'hypothèse d'écoulement unidirectionnelle.
  - Une cartographie automatique des isohauteurs, isoélevations et isovitesses ;
- ✓ De coupler dynamiquement les deux modèles par l'interface MIKE FLOOD. Les débits qui transitent dans les mailles 1D sont repris par le code bidimensionnel qui poursuit la propagation dans les mailles 2D et inversement.

Les modèles 1D et 2D proposés représentent deux niveaux de description mathématique des d'écoulements, et résolvent numériquement (Méthode des Différences Finies (1D) et Volumes Finis (2D) selon un schéma numérique implicite) les équations de Barré de Saint Venant, qui régissent les écoulements à surface libre.

Le modèle hydraulique MIKE FLOOD utilisé pour la propagation de l'onde est particulièrement adapté aux variations brutales de débit dans la rivière générées lors du passage de l'onde de rupture.

Le logiciel MIKE FLOOD résout, en effet, **en régime transitoire** les équations complètes de St-Venant sur des tronçons de rivière à l'intérieur desquels l'écoulement peut être torrentiel ou fluvial.

### 1.3.2 L'outil DAMBREAK

L'hydrogramme de rupture se calcule avec l'outil DAMBREAK du logiciel MIKE 11.

Le module DAMBREAK permet de simuler plusieurs types de ruptures de barrage :

- ◆ Rupture instantanée,
- ◆ Rupture dont l'évolution de la géométrie est définie au cours du temps,
- ◆ Rupture par érosion progressive à partir d'une brèche initiale et surverse ou d'un renard (érosion interne).

Ce logiciel permet de calculer l'hydrogramme généré par une brèche dont la section augmente au cours du temps. Le développement de la brèche peut être décrit soit par une série temporelle (surface et cote de la brèche au cours du temps) soit à l'aide d'un module d'érosion qui détermine la quantité de sédiments emportés par l'écoulement.

Les fenêtres suivantes montrent les paramètres spécifiques à l'ouvrage et au type de rupture qui ont été renseignés sous DAMBREAK

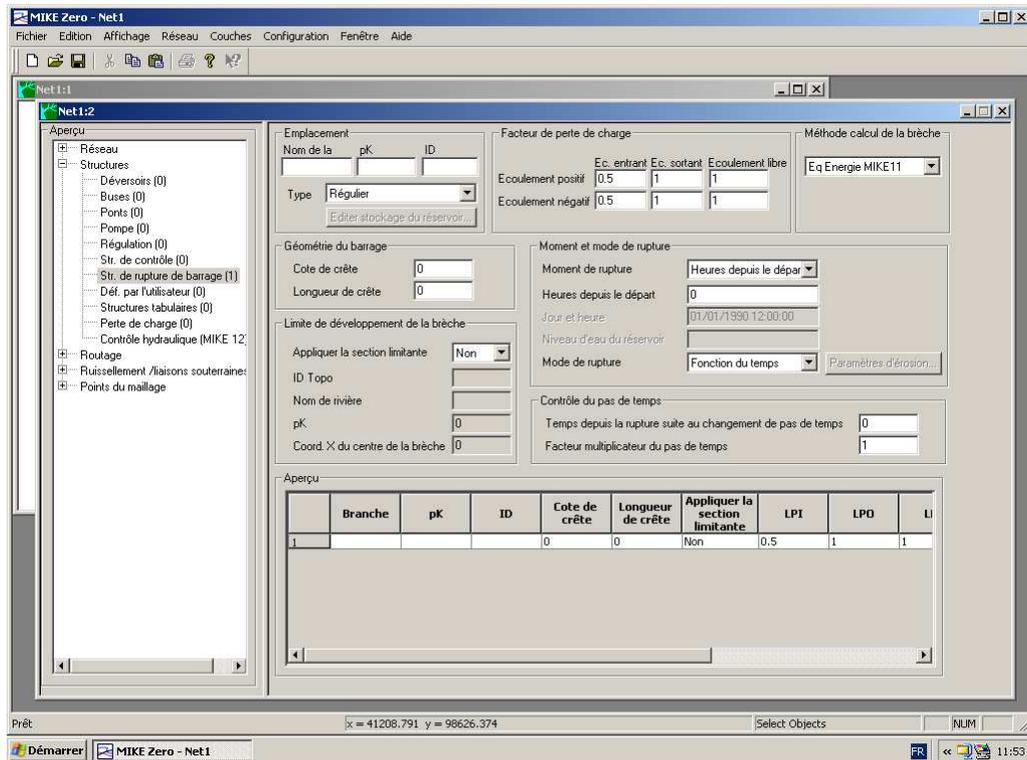


Figure 5. Fenêtre de Dambreak permettant de renseigner les paramètres du barrage

Le calcul de l'hydrogramme de rupture se fait ensuite automatiquement en fonction de la différence de charge amont-aval, lorsque le module érosif est activé. Le logiciel calcule l'érosion à l'intérieur de la brèche à l'aide de la formule d'Engelung-Hansen (formule d'érosion par charriage), adaptée aux particules rencontrées dans les digues en remblai, et présentée ci-dessous :

$$qs = 0.020 \cdot K^2 \cdot R^{1/3} \cdot \tau^{*5/2} \cdot d^{3/2}$$

Avec :

Qs : Débit solide en m<sup>3</sup>/s

K : Coefficient de Strickler, indicateur de la rugosité (Roughness)

R: Rayon hydraulique (Initial diameter, limit of breach geometry)

$\tau$ : Paramètre de Shields (critical shear stress), représentant la contrainte tractrice pour laquelle les particules sont mises en mouvement, si celle ci est supérieure à la contrainte tractrice limite.

d : Diamètre médian des particules (Grain diameter)

### **Illustration du phénomène d'érosion par renard**

Lorsque l'ouverture du renard en pied de digue atteint la moitié de la hauteur du barrage, il est considéré un effondrement du toit du conduit jusqu'à élargissement maximum de la brèche.

La figure ci-dessous illustre l'évolution du renard qui se forme en bas de la retenue jusqu'à l'obtention de la brèche finale.

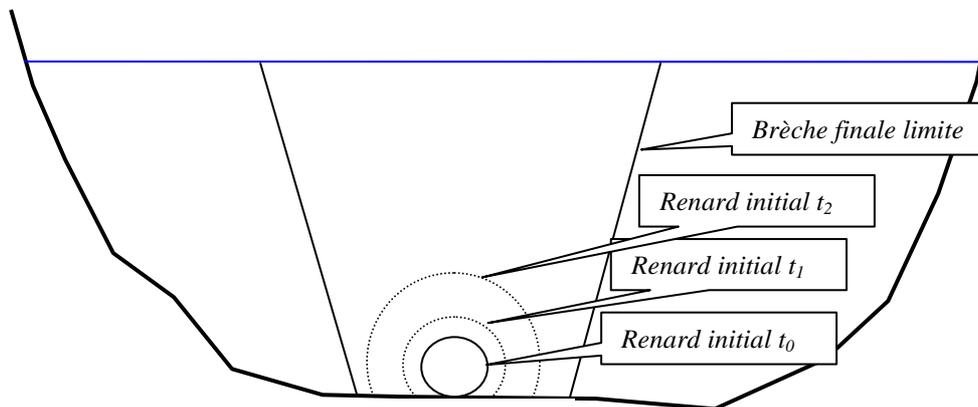


Figure 6. Représentation schématique de l'évolution du renard avec le module Piping failure dans Mike 11 Dambreak

### Illustration du phénomène d'érosion par création d'une brèche de surverse

La figure ci-dessous illustre l'évolution de la brèche initiée au niveau du déversoir de sécurité du barrage.

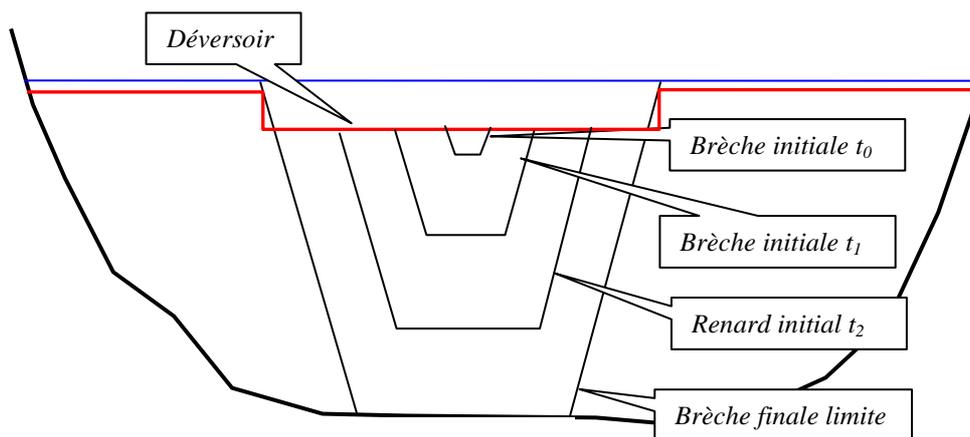


Figure 7. Représentation schématique de l'évolution du renard avec le module Breach failure dans Mike 11 Dambreak

Les valeurs des paramètres à renseigner apparaissent dans la fenêtre ci-dessous qui représente un **exemple** de valeurs possibles.

Figure 8. Valeurs des paramètres d'érosion renseignées dans le module DAMBREAK de MIKE 11

L'hydrogramme de rupture est estimé à un pas de temps qui doit être très fin, de l'ordre de quelques secondes, pour prendre en compte le caractère très transitoire du phénomène.

### 1.3.3 Construction du modèle MIKE FLOOD

#### 1.3.3.1 Modèle 1D MIKE 11

##### A- Description du modèle MIKE 11

MIKE 11 est un modèle hydraulique capable de modéliser la propagation d'onde de crue en régime transitoire et permanent, quel que soit le régime d'écoulement (fluvial ou torrentiel). La résolution des équations de Barré Saint Venant est réalisée à l'aide d'un schéma implicite en différence finie. MIKE 11 permet de décrire de façon illimitée tous les déversements, notamment ceux qui ont lieu par dessus des digues. Il permet aussi de décrire l'ensemble des ouvrages aménagés le long du linéaire d'un cours d'eau.

Les points forts de ce logiciel sont :

- ✓ la robustesse de son noyau de calcul qui permet d'étudier des écoulements torrentiels ou fluviaux en régime permanent ou transitoire ;
- ✓ la puissance et la souplesse des moyens de description du relief des zones à étudier (lits mineurs, ouvrages, digues...) ;
- ✓ les interfaces de présentation de la topologie du modèle hydraulique mis au point et d'édition des résultats (courbes d'évolution temporelle des hauteurs d'eau ou des débits, profils en travers en long).

## **B- Description du modèle 1D**

Le modèle 1D comprend :

- La Nonette du Moulin de Villemétrie jusqu'au pont de la rue de la République ;
- Le Saint Urbain du Vieux Chemin de Meaux jusqu'à sa confluence avec la Nonette ;
- Des biefs au droit de l'autoroute A1 permettant de représenter les ouvrages de franchissement de ce remblai ;
- un bief au niveau du site de rupture incluant la structure DAMBREAK.

Les sections en travers décrivant la géométrie du lit mineur des cours d'eau sont issues des levés topographiques réalisés par HYDROTOPO.

Il est à noter qu'aucune zone de lit majeur n'est représentée en 1D. La rive droite de la Nonette suit le terrain naturel et a été représentée dans le modèle jusqu'à une cote légèrement supérieure à la digue située en rive gauche.

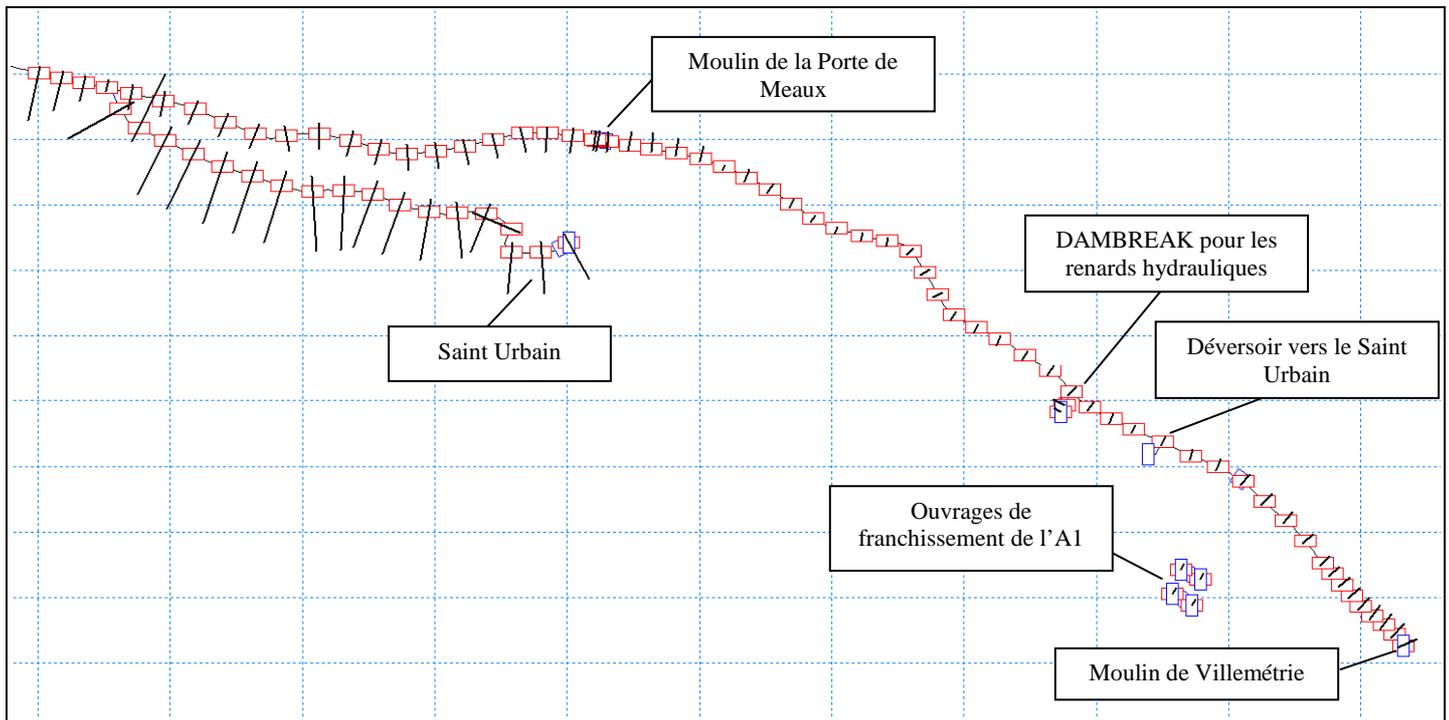


Figure 9. Modèle hydraulique 1D pour la rupture au droit des renards hydrauliques de la digue de Senlis

### C- Conditions limites

La condition limite aval se situe à l'aval de la confluence du Saint Urbain avec la Nonette. Il a été choisi d'appliquer une cote basse en aval du modèle.

Les seuils et brusques changement de pente de la Nonette induisent un passage en torrentiel entre différents secteurs ce qui permet de ne pas avoir d'influence aval sur la partie concernée par la présente étude (au niveau des digues de Senlis et de Villemétrie).

Le débit est injecté en amont du modèle au niveau du moulin de Villemétrie. L'hydrogramme type d'entrée choisi a été celui de la crue synthétique construit par la méthode de SOCOSE pour un débit de pointe décennal de  $3,1 \text{ m}^3/\text{s}$  (Cf. 6.1 « Hydrologie : crues de la Nonette »).

L'hydrogramme injecté en entrée du modèle est donc celui présenté sur la figure suivante.

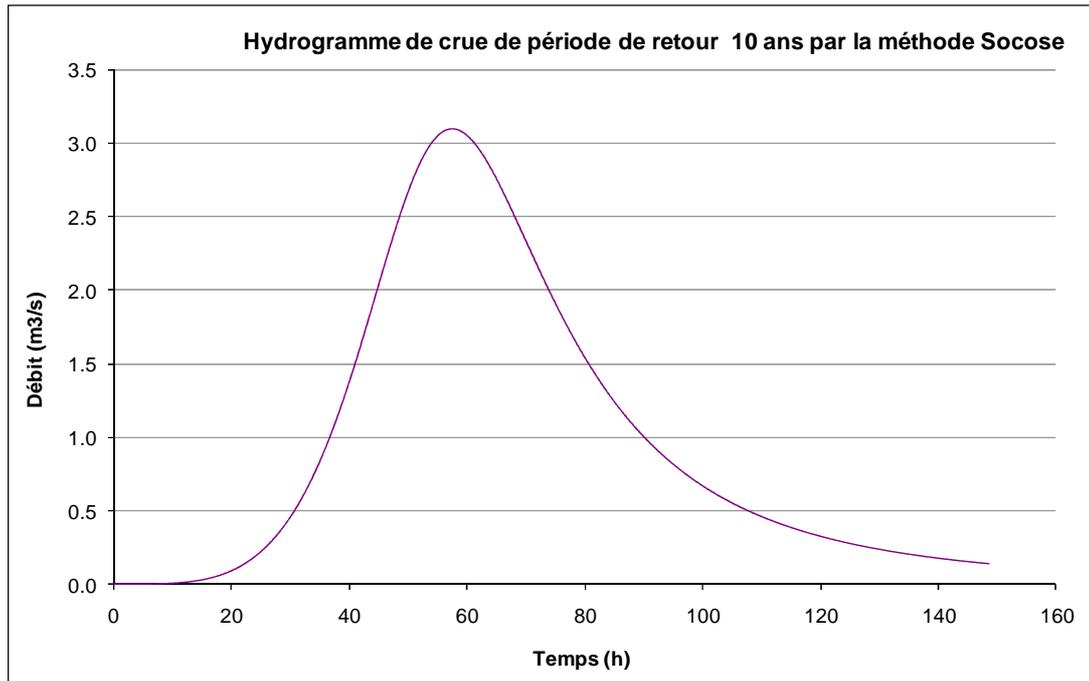


Figure 10. Hydrogramme pour un débit décennal ( $Q_{max}=3,1$  m<sup>3</sup>/s) par la méthode de SOCOSE

#### D- Calage du modèle

Pour caler le modèle, aucune laisse de crue ni suivi limnimétrique existant sur ce secteur de la Nonette, les données relevés lors de la campagne topographiques ont été utilisées.

La station de Courteuil enregistre un débit instantané de 1.1m<sup>3</sup>/s en date du 12/02/2014. Si on utilise la formule de Myer pour transposer ce débit au droit du moulin de Villemétrie, on obtient un débit de 0.75m<sup>3</sup>/s (Cf. Tableau suivant).

	Courteuil	Moulin de Villemétrie
Bassin versant (km <sup>2</sup> )	344	212
Débit instantané (m <sup>3</sup> /s) au 12/02/2014	1.1	0.75

Ce débit a donc été utilisé pour caler le modèle en définissant par itération le coefficient de Strickler pour le lit mineur de la Nonette. Après différents tests, le coefficient de Strickler final a été déterminé à  $K=10.5$  (Cf. Figure 11).

La Nonette étant un cours d'eau perché présentant des berges étroites et assez végétalisées, ce coefficient relativement bas est néanmoins acceptable.

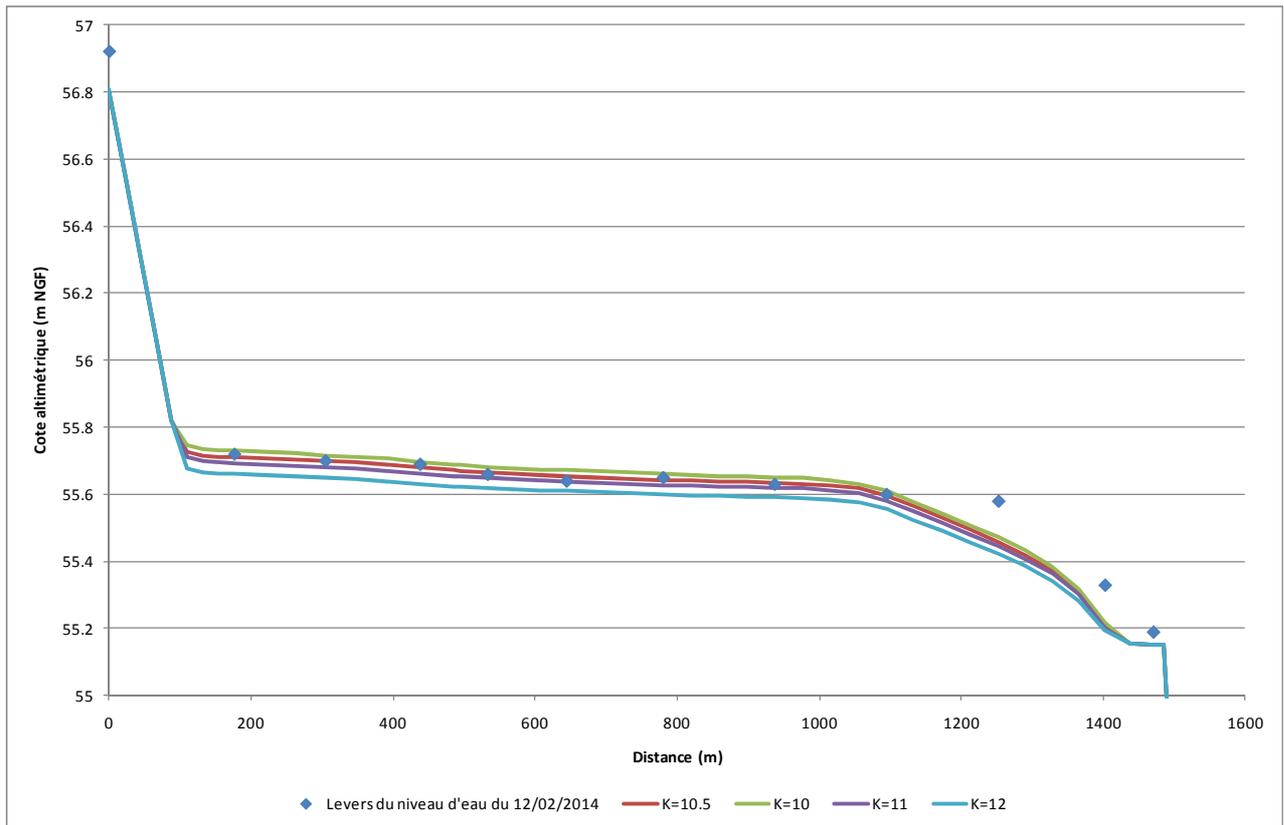


Figure 11. Profil en long - Q=0.75 m<sup>3</sup>/s - Calage du modèle par le coefficient de Strickler

Les différences entre les cotes relevées et celles simulées par le modèle sont récapitulées dans le tableau suivant. Celles-ci sont considérées comme acceptables.

Tableau 2. Résultats du calage en termes de niveaux d'eau

Profil en travers	X	Cote altimétrique			différence entre les cotes mesurées et simulées
		Rive gauche de la Nonette	Levers du 12/02/2014	Q=0.75 m <sup>3</sup> /s avec K=10.5	
P2	0	59.35	56.92	56.81	-0.11
P3	176.34	56.08	55.72	55.71	-0.01
P4	304.58	56.39	55.7	55.699	-0.001
P5	437.75	56.42	55.69	55.679	-0.011
P6	532.93	56.11	55.66	55.664	0.004
P7	644	56.58	55.64	55.654	0.014
P8	780.17	56.44	55.65	55.643	-0.007
P9	937.18	56.09	55.63	55.634	0.004
P10	1094.76	56.27	55.6	55.596	-0.004
P11	1252.46	55.97	55.58	55.458	-0.122
P12	1402.76	55.95	55.33	55.209	-0.121

Profil en travers	X	Cote altimétrique			différence entre les cotes mesurées et simulées
		Rive gauche de la Nonette	Levers du 12/02/2014	Q=0.75 m <sup>3</sup> /s avec K=10.5	
P13	1470.67	56.27	55.19	55.15	-0.04

### 1.3.3.2 Modèle 2D MIKE 21

Un modèle 2D au droit des digues a été construit de manière à obtenir l'enveloppe maximale d'inondation.

Les données topographiques disponibles (voir chapitre 3.2.2) ont été utilisées.

Le maillage utilisé est **triangulaire**. Ce type de maillage convient bien pour la modélisation d'écoulements multidirectionnels et au voisinage des singularités hydrauliques.

Une attention particulière a été portée au Saint Urbain qui a été décrit le plus précisément possible dans ce modèle 2D. Ainsi, des lignes de contraintes ont été appliquées au maillage pour suivre son profil (représentées en rouge sur la Figure 12).

La Figure 12 présente le maillage construit à l'aide MIKE FLOOD ainsi que les lignes de contrainte appliquées aux mailles pour le Saint Urbain, les digues, le remblai de l'autoroute A1 et la route de la Bigue.

La Figure 13 présente le modèle final une fois la topographie de la zone appliquée au maillage.

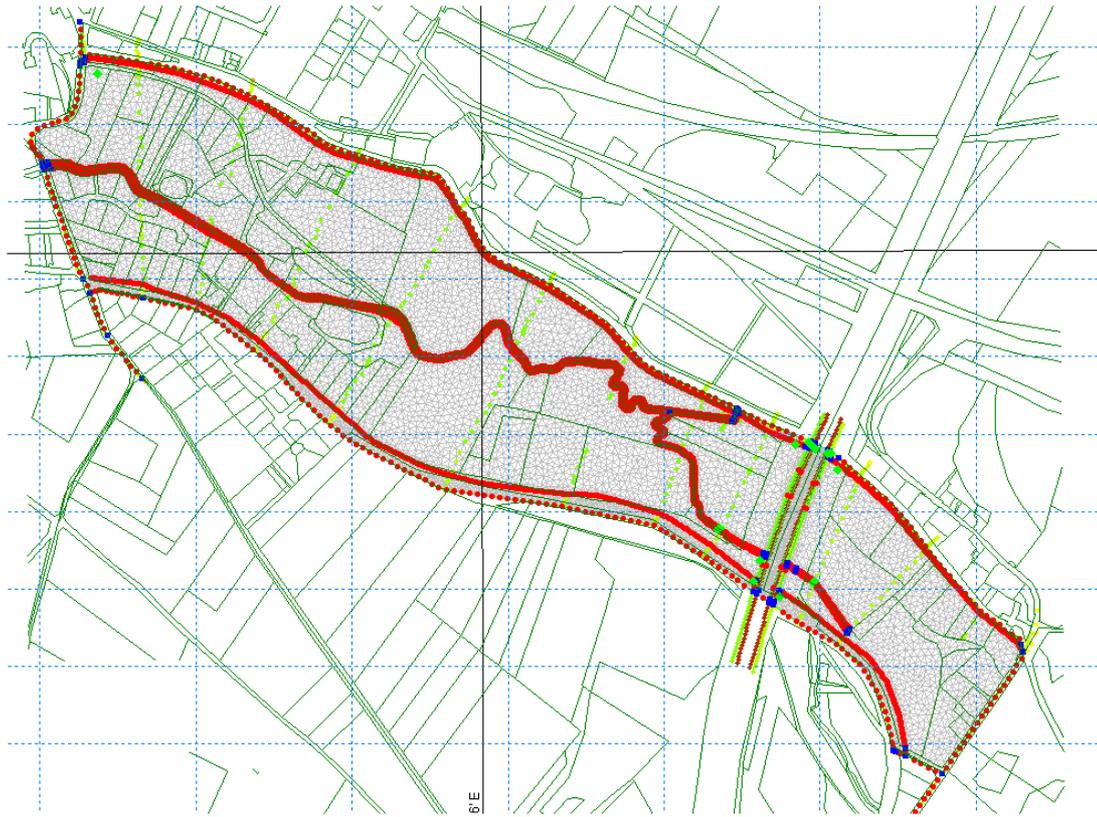


Figure 12. Maillage construit à l'aide de MIKE FLOOD

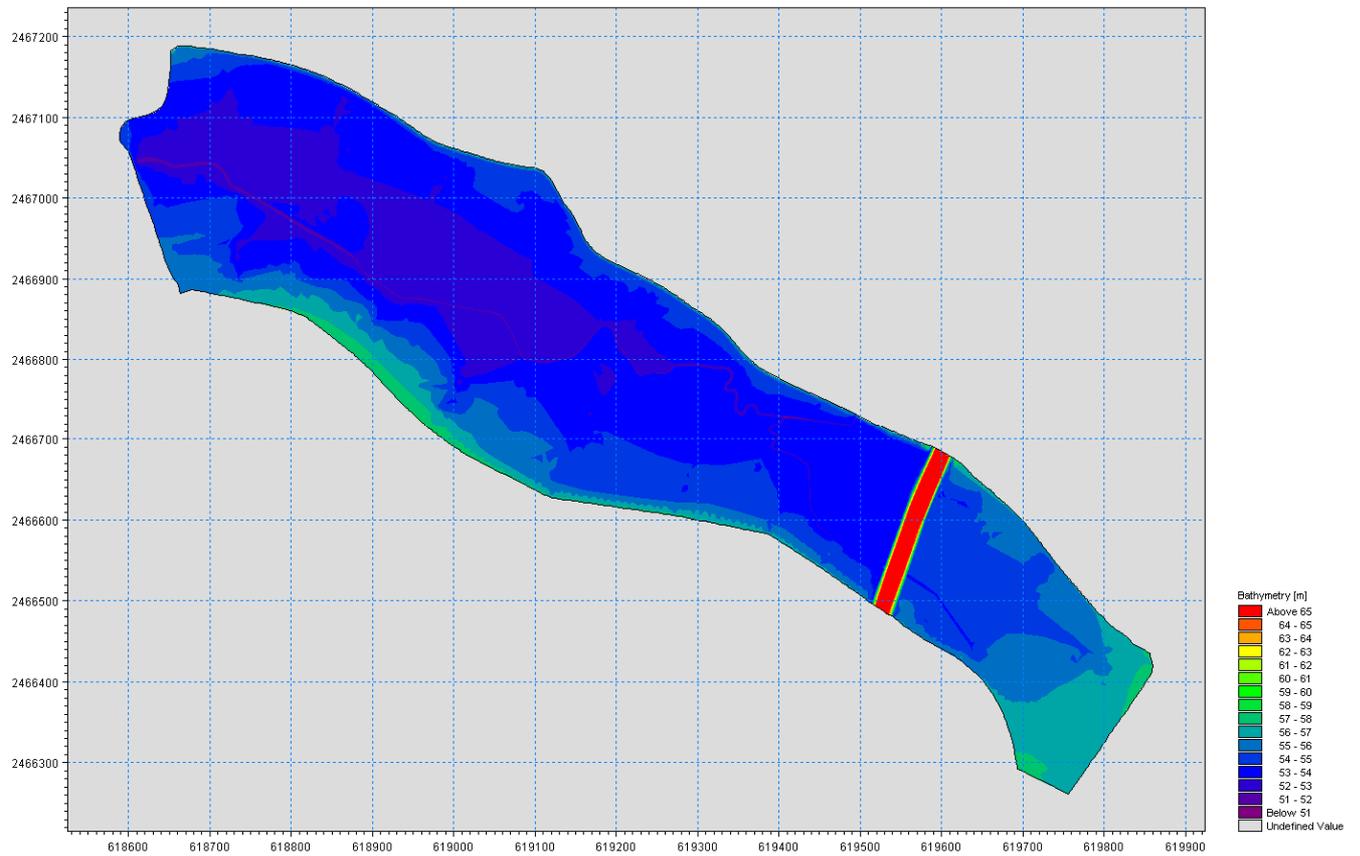


Figure 13. Modèle 2D construit à l'aide de MIKE FLOOD

La définition des coefficients de Strickler, traduisant la rugosité des sols, a été réalisée à partir des couches Corine Land Cover décrivant l'occupation des sols.

La méthodologie de détermination des coefficients de Strickler est la suivante :

- ✓ Inventaire des types d'occupation des sols présents dans la zone d'étude, à partir de la base de données Corine Land Cover ;
- ✓ Pour chacun des types d'occupation des sols en présence, définition d'une valeur « usuelle » de rugosité, à partir de la bibliographie, du retour d'expérience de SAFEGE sur des modélisations similaires et des appréciations de terrain. ;
- ✓ Projection des coefficients de Strickler sur chaque maille, par croisement sous SIG des polygones Corine Land Cover et du maillage préalablement défini.

Les bâtiments sont intégrés dans le modèle via des coefficients de rugosité très faibles impliquant un frottement important sur ces zones.

Les coefficients de Strickler des modèles 2D sont légèrement supérieurs à ceux usuellement retenus dans les modélisations 1D. D'après notre expérience, nous proposons ainsi de retenir la relation suivante :  $K_{str2D} \cong 1.6 * K_{str1D}$ .

Le récapitule, pour chaque type d'occupation des sols identifié, le coefficient de Strickler 1D proposé et sa transposition 2D.

Tableau 3. Coefficients de Strickler affectés à chaque type d'occupation des sols

	Classe Corine Land Cover	K (1D)	K (2D)
	112. Tissu urbain discontinu	20	32
	231. Prairies	12	19
	242. Systèmes culturaux et parcellaires complexes	12	19
	311. Forêts de feuillus	6	9
	Bâtiments	1	2

La figure suivante présente la répartition des coefficients de rugosité sur la zone d'étude.

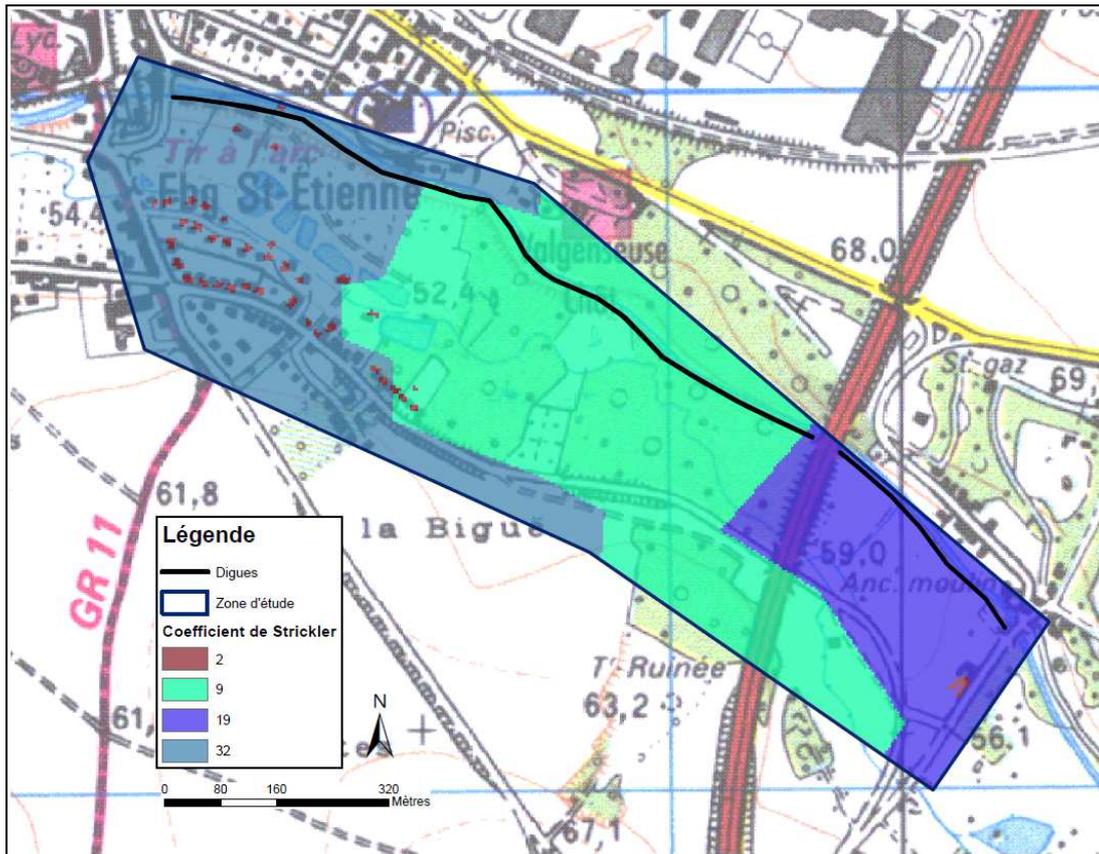


Figure 14. Spatialisation des coefficients de rugosité

### 1.3.3.3 Couplage des modèles par l'interface MIKE FLOOD

Le couplage des modèles 1D et 2D est réalisé à partir de l'interface MIKE FLOOD. Le couplage des deux représentations mathématiques de l'écoulement est réalisé grâce à des liens standards qui permettent le transfert des flux en provenance du modèle 1D vers le modèle 2D et inversement.

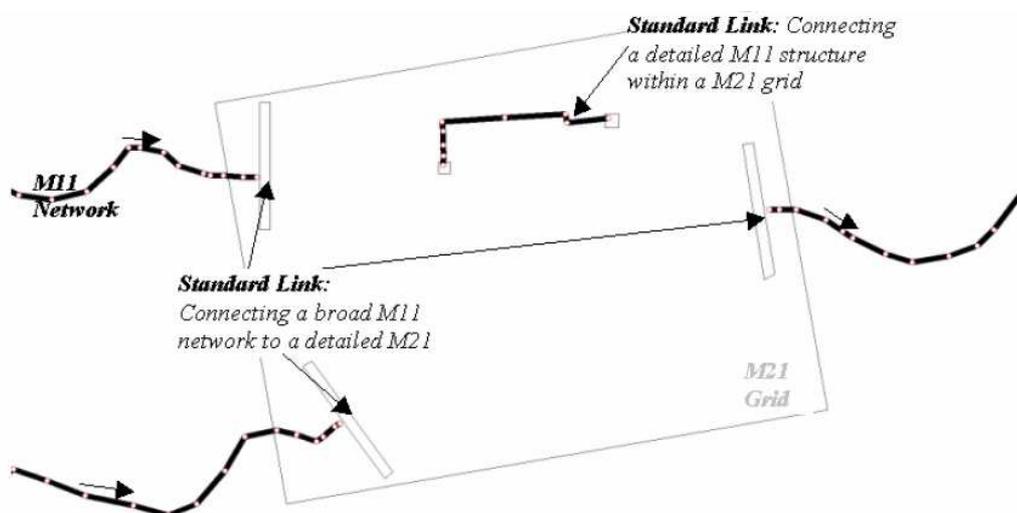


Figure 15. Illustration du principe de couplage 1D/2D

Au niveau du site de rupture de la digue, un standard link est associé afin de transférer l'hydrogramme de rupture issu du modèle 1D vers le modèle.

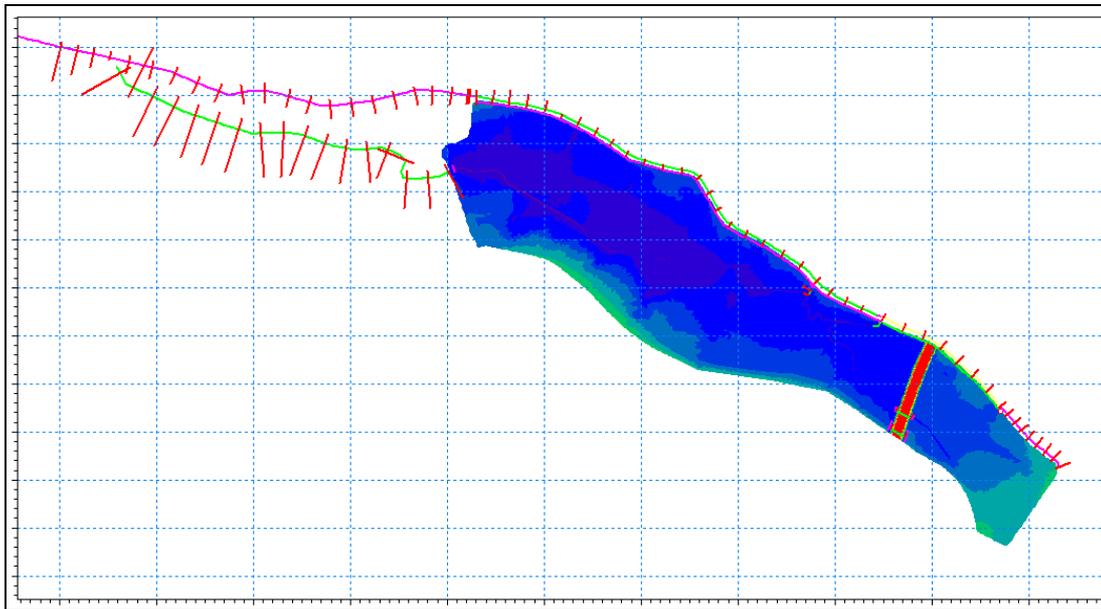


Figure 16. Modèle MIKE FLOOD construit pour cette étude

### 1.3.4 Simulations de rupture envisagés

L'évaluation et la caractérisation de l'intensité et de la cinétique des effets d'une rupture de digue dépendent de la localisation de la défaillance sur l'ouvrage. Conformément au guide de lecture des études de dangers, les simulations doivent être définies de façon à simuler les défaillances suivantes :

1. Une défaillance localisée en un secteur qui conduit à l'inondation de toute la zone protégée ;
2. Une défaillance localisée en un secteur pour lequel la rupture est identifiée comme particulièrement probable ;
3. Une défaillance localisée en un secteur identifié comme particulièrement vulnérable pour la sécurité publique (typiquement, au droit d'une zone très habitée).

#### 1.3.4.1 Hypothèses hydrauliques des simulations de rupture

Un total de 4 scénarii de rupture est envisagé dans cette étude. Les hypothèses communes de rupture sont :

- Vallée hors d'eau à l'aval de la digue ;
- Le Saint Urbain en eau du fait du déversement de la Nonette via le déversoir de la digue de Senlis ;

- La rupture se produit quand le niveau d'eau en rivière atteint la cote maximale (générée par l'hydrogramme considéré) à laquelle 5 cm ont été soustraits.

### 1.3.4.2 Localisation des zones de brèches

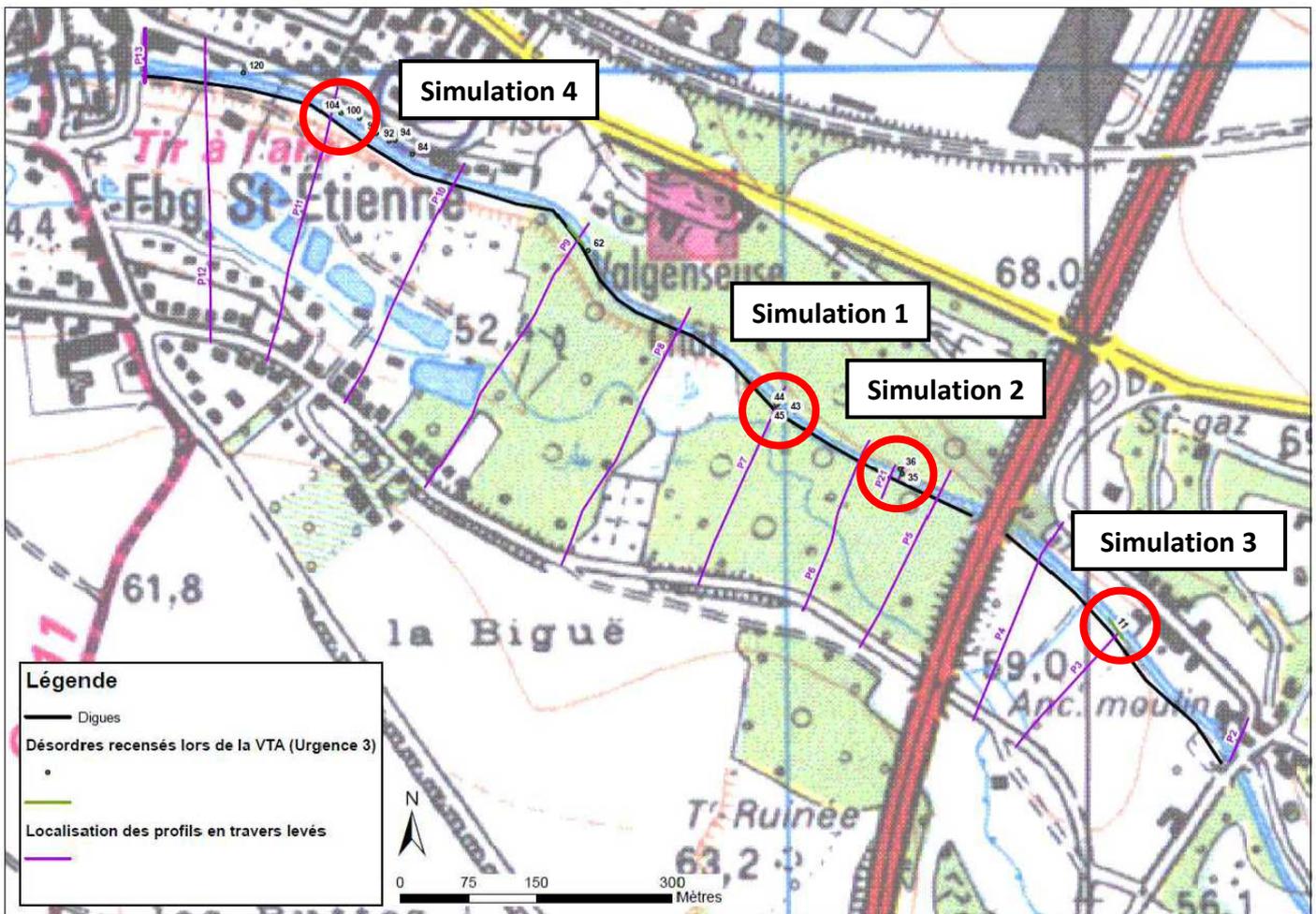


Figure 17. Localisation des simulations de rupture de digue

### 1.3.4.3 Caractéristiques des brèches

#### Simulation 1

Mécanisme de brèche simulé à partir des paramètres du module DAMBREAK de MIKE11 (DHI) suivants :

Géométrie de la digue
Pente amont
Pente aval
Largeur de crête

**Dambreak Structure: Sc1 5**

Dam Break Structure - Erosion Failure

**Dam Geometry**

Upstream Slope: 0.8

Downstream Slope: 0.7

Top Width: 4

**Initial Failure**

Piping Failure Initially

**Breach Failure**

Initial Level: 54.5

Initial Width: 5

**Material Properties**

Grain diameter: 0.003

Specific gravity: 2.65

Porosity: 0.5

Crit. Shear Stress: 0.05

Side Erosion Index: 0

**Piping Failure**

Starting Level: 54.5

Initial Diameter: 0.2

Roughness: 0.01

Collapse Ratio (D/y): 0.5

Volume Loss Ratio: 1

Calibration Coef.: 1

**Limit of Breach Geometry**

Final Bottom Level: 54.5

Final Bottom Width: 2

Breach Slope: 0.5

OK
Rupture initiale
Renard hydraulique
Rupture nar brèche
Niveau initial
Largeur initiale

Pronriétés des
Diamètre des grains
Gravité spécifique
Porosité

Contrainte tractrice critique
Indice d'érosion

Géométrie finale de brèche
Niveau final de brèche
Largeur finale de brèche
Pente de la brèche

OK
Rupture nar renard
Niveau initial
Diamètre intial
Ruosité
Rannort d'écroulement
Rannort de perte de volume
Coefficient de calibration

## Simulation 2

Mécanisme de brèche simulé à partir des paramètres du module DAMBREAK de MIKE11 (DHI) suivants :

Géométrie de la digue
Pente amont
Pente aval
Largeur de crête

**Dambreak Structure: Sc2 5**

Dam Break Structure - Erosion Failure

**Dam Geometry**

Upstream Slope: 0.8

Downstream Slope: 0.6

Top Width: 4.5

**Initial Failure**

Breach Failure Initially

**Breach Failure**

Initial Level: 54.5

Initial Width: 2

**Material Properties**

Grain diameter: 0.003

Specific gravity: 2.65

Porosity: 0.5

Crit. Shear Stress: 0.05

Side Erosion Index: 0

**Piping Failure**

Starting Level: 54.5

Initial Diameter: 0.2

Roughness: 0.01

Collapse Ratio (D/y): 0.5

Volume Loss Ratio: 1

Calibration Coef.: 1

**Limit of Breach Geometry**

Final Bottom Level: 54.5

Final Bottom Width: 2

Breach Slope: 0.5

OK
Rupture initiale
Brèche
Rupture nar brèche
Niveau initial
Largeur initiale

Pronriétés des
Diamètre des grains
Gravité spécifique
Porosité

Contrainte tractrice critique
Indice d'érosion

Géométrie finale de brèche
Niveau final de brèche
Largeur finale de brèche
Pente de la brèche

OK
Rupture nar renard
Niveau initial
Diamètre intial
Ruosité
Rannort d'écroulement
Rannort de perte de volume
Coefficient de calibration

### Simulation 3

Mécanisme de brèche simulé à partir des paramètres du module DAMBREAK de MIKE11 (DHI) suivants :

**Dambreak Structure: Sc3 5**

Dam Break Structure - Erosion Failure

**Dam Geometry**

- Upstream Slope: 0.5
- Downstream Slope: 0.4
- Top Width: 3

**Material Properties**

- Grain diameter: 0.003
- Specific gravity: 2.65
- Porosity: 0.5
- Crit. Shear Stress: 0.05
- Side Erosion Index: 0

**Limit of Breach Geometry**

- Final Bottom Level: 54.9
- Final Bottom Width: 1
- Breach Slope: 0.5

**Initial Failure**

- Breach Failure Initially: Breach Failure Initially

**Breach Failure**

- Initial Level: 54.9
- Initial Width: 1

**Piping Failure**

- Starting Level: 54.5
- Initial Diameter: 0.2
- Roughness: 0.01
- Collapse Ratio (D/y): 0.5
- Volume Loss Ratio: 1
- Calibration Coef.: 1

**Parameters to be simulated:**

- Géométrie de la digue
  - Pente amont
  - Pente aval
  - Largeur de crête
- Propriétés des
  - Diamètre des grains
  - Gravité spécifique
  - Porosité
- Contrainte tractrice critique
- Indice d'érosion
- Géométrie finale de brèche
  - Niveau final de brèche
  - Largeur finale de brèche
  - Pente de la brèche
- Rupture initiale
  - Brèche
  - Rupture par brèche
  - Niveau initial
  - Largeur initiale
- Rupture par renard
  - Niveau initial
  - Diamètre initial
  - Rugosité
  - Rapport d'écroulement
  - Rapport de perte de volume
  - Coefficient de calibration

### Simulation 4

Mécanisme de brèche simulé à partir des paramètres du module DAMBREAK de MIKE11 (DHI) suivants :

**Dambreak Structure: Sc4 5**

Dam Break Structure - Erosion Failure

**Dam Geometry**

- Upstream Slope: 0.7
- Downstream Slope: 0.9
- Top Width: 3.5

**Material Properties**

- Grain diameter: 0.003
- Specific gravity: 2.65
- Porosity: 0.5
- Crit. Shear Stress: 0.05
- Side Erosion Index: 0

**Limit of Breach Geometry**

- Final Bottom Level: 54.5
- Final Bottom Width: 2.5
- Breach Slope: 0.5

**Initial Failure**

- Breach Failure Initially: Breach Failure Initially

**Breach Failure**

- Initial Level: 54.5
- Initial Width: 2.5

**Piping Failure**

- Starting Level: 54.5
- Initial Diameter: 0.2
- Roughness: 0.01
- Collapse Ratio (D/y): 0.5
- Volume Loss Ratio: 1
- Calibration Coef.: 1

**Parameters to be simulated:**

- Géométrie de la digue
  - Pente amont
  - Pente aval
  - Largeur de crête
- Propriétés des
  - Diamètre des grains
  - Gravité spécifique
  - Porosité
- Contrainte tractrice critique
- Indice d'érosion
- Géométrie finale de brèche
  - Niveau final de brèche
  - Largeur finale de brèche
  - Pente de la brèche
- Rupture initiale
  - Brèche
  - Rupture par brèche
  - Niveau initial
  - Largeur initiale
- Rupture par renard
  - Niveau initial
  - Diamètre initial
  - Rugosité
  - Rapport d'écroulement
  - Rapport de perte de volume
  - Coefficient de calibration