PRÉFET
DE LA NIÈVRE
Liberté
Égalité
Fraternité

DDT58

Etude des modalités de neutralisation de l'ouvrage domanial « Digue de Luthenay-Uxeloup » (58)

Rapport d'étude

Rapport n°123146 /version B – Mai 2024

Projet suivi par Bénédicte MANGEZ – 06 21 52 54 11 – benedicte.mangez@anteagroup.fr

www.anteagroup.fr/fr

Fiche signalétique

Etude des modalités de neutralisation de l'ouvrage domanial « Digue de Luthenay-Uxeloup » (58)

Rapport d'étude

CLIENT	SITE
DDT58	« Digue de Luthenay-Uxeloup »
02, rue des Pâtis BP 30 069 58 020 NEVERS Cedex	
Fabrice DEREMBAU fabrice.derembau@nievre.gouv.fr	

RAPPORT D'ANTEA GROUP	
Responsable du projet	Bénédicte MANGEZ
Interlocuteur commercial	Bénédicte MANGEZ
Implantation chargée du suivi du projet	Implantation d'Antony
Rapport n°	A123146
Version n°	version B
Votre commande et date	Marché n°22 SGL 009 notifié le 27/09/2022
Projet n°	BOUP220146

	Nom	Fonction	Date	Signature
Rédaction	DONDENA A.	Ingénieure d'études Aménagements Hydrauliques	Mai 2024	
Rédaction	BOUCHART M.	Ingénieur de projet Aménagements Hydrauliques	Mai 2024	
Rédaction vB	DEVIE A.	Ingénieure d'études Aménagements Hydrauliques	Mai 2024	
Rédaction & relecture vB	RIANO K.	Ingénieur de projet Aménagements Hydrauliques	Mai 2024	
Approbation	MANGEZ B.	Cheffe de projet Aménagements hydrauliques	Mai 2024	

Suivi des modifications

Indice Version	Date de révision	Nombre de pages	Nombre d'annexes	Objet des modifications
A	27/04/2023	83	1	Création du rapport
B	31/05/2024	90	1	Intégration des remarques du client et du scénario de mise en transparence par création naturelle de brèches

Sommaire

1. Caractéristiques et classement de la digue 10
1.1. Caractéristiques générales de la digue 10
1.2. Zone protégée 11
1.3. Classe de l'ouvrage 11
1.4. Gestionnaire 12
2. Analyse fonctionnelle de l'ouvrage 13
2.1. Rôle de l'ouvrage 13
2.2. Identification des enjeux 13
2.3. Incidence de l'ouvrage sur le fonctionnement hydraulique 14
2.3.1. Débits de crues caractéristiques 14
2.3.2. Niveau de protection apparent 15
2.3.3. Inondation du val par remous 17
3. Diagnostic de l'ouvrage 18
3.1. Etat actuel de l'ouvrage et ouvrages annexes 18
3.2. Retours d'expérience 20
3.3. Sollicitations morphodynamiques 21
3.4. Niveau de fiabilité de l'ouvrage 22
3.4.1. Evaluation des probabilités de rupture 22
3.4.2. Secteurs prioritaires identifiés 25
3.5. Scénarios de défaillance structurelle étudiés dans l'EDD 26
3.5.1. Description des scénarios 26
3.5.2. Résultats des scénarios de rupture 26
3.5.3. Zone de dissipation d'énergie 28
3.5.4. Niveaux de gravité 28
4. Elaboration des scénarios d'aménagement 29
4.1. Contraintes en cas de préservation de l'ouvrage 29
4.2. Synthèse des éléments de diagnostic 29
4.3. Principes de mise en transparence 30
4.3.1. Neutralisation de l'ouvrage devenu caduque 30
4.3.2. Critères de mise en transparence 30
4.3.3. Evènements considérés 32
4.4. Scénarios d'étude 32
4.5. Scénario d'arasement étudié dans l'EDD 33
4.6. Identification des secteurs propices pour la mise en transparence 34

5. Modélisation hydraulique 35
5.1. Présentation du modèle hydraulique et adaptations 35
5.1.1. Caractéristiques du modèle existant 35
5.1.2. Vérification et adaptation du modèle aux besoins de l'étude 38
5.2. Définition et modélisation des scénarios d'étude au stade esquisse 40
5.2.1. Scénario 1 : régularisation de la digue existante 40
5.2.2. Scénario 2 : effacement total de l'ouvrage 41
5.2.3. Scénarios 3 et 4 : mise en transparence partielle 42
5.2.4. Scénario 5 : création naturelle de brèches lors d'une future crue 45
5.3. Résultats des simulations hydrauliques 46
5.3.1. Régularisation de l'ouvrage 46
5.3.1. Mise en transparence par effacement total de l'ouvrage 53
5.3.2. Mise en transparence par arasement partiel 59
5.3.3. Mise en transparence par création naturelle de brèches lors d'une future crue 66
6. Analyse et comparaison des scénarios 72
6.1. Surfaces et enjeux impactés 72
6.2. Contraintes réglementaires 74
6.2.1. Régularisation de l'ouvrage 74
6.2.2. Neutralisation de l'ouvrage 75
6.2.3. Indemnités potentielles 75
6.3. Coûts d'investissement et entretien 76
6.3.1. Régularisation de l'ouvrage 76
6.3.2. Neutralisation de l'ouvrage 77
6.4. Gains environnementaux 78
6.4.1. Dynamique fluviale 78
6.4.2. Habitats naturels 84
6.5. Synthèse des avantages et inconvénients 88

Table des figures

Figure 1. Carte de localisation de l'ouvrage de la levée de Luthenay-Uxeloup (Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 10
Figure 2. Zone protégée par le système d'endiguement de Luthenay-Uxeloup et zone inondée par remous dans la zone protégée (source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 11
Figure 3. Schéma de principe des surélévations successives des digues de la Loire 13
Figure 4. Cartographie des enjeux au droit de la zone d'étude (Carte des enjeux, PPRI de la Loire – secteur compris entre Nevers et Saint-Léger-des-Vignes, 2017) 14
Figure 5. Débits de pointe caractéristiques des crues moyennes à rares de la Loire au niveau du val de Luthenay-Uxeloup (Source : EDD, BRL – 2017) 14

Figure 6. Débits de pointe caractéristiques des crues fréquentes de la Loire au niveau du val de Luthenay-Uxeloup (Source : EDD, BRL – 2017) 15
Figure 7. Lignes d'eau, profils en long de la crête de digue et du pied de digue (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 16
Figure 8. Hauteurs d'eau du remous pour la crue bicentennale associée au niveau de protection apparent du système d'endiguement (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 17
Figure 9 : Localisation des tronçons (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 18
Figure 10. Positionnement des canalisations franchissant dans la digue de Luthenay-Uxeloup (Etude de dangers), BRL Ingénierie, 2017) 19
Figure 11. Réseau hydrographique parcourant le val de Luthenay-Uxeloup (Source : Antea Group) .. 20
Figure 12. Localisations des brèches historiques recensées sur la digue de Luthenay-Uxeloup (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 21
Figure 13. Carte des probabilités annuelles de rupture tous modes confondus, en l'absence de surveillance (source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 23
Figure 14. Localisation des préconisations de travaux de reconstitution de l'ouvrage sur le tronçon longeant la Loire (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 25
Figure 15. Localisation des préconisations de travaux de reconstitution de l'ouvrage sur le tronçon en amont (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 25
Figure 16. Localisation des scénarios retenus dans l'étude de dangers (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 26
Figure 17. Carte des hauteurs d'eau maximales dans le val – scénario de brèche n°1 (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 27
Figure 18. Carte des hauteurs d'eau maximales dans le val – scénario de brèche n°2 (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 27
Figure 19. Zone de destruction du bâti derrière la levée lors de brèche (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 28
Figure 20. Représentation des éléments considérés dans l'étude de dangers pour la mise en transparence de la digue (Source : Antea Group) 29
Figure 21. Matrice de définition de l'aléa hydraulique (source : EDD des digues de classe A - DREAL Centre) 31
Figure 22. Profil caractéristique des digues et points singuliers (source : Note de présentation du PPRI de la Loire) 31
Figure 23. Illustration de la Zone de Dissipation de l'Energie (source : Services de l'Etat) 32
Figure 24. Limnigrammes des différentes situations en différents endroits de la digue pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 33
Figure 25. Lignes d'eau et profils en long de la crête et du pied de digue (Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 34
Figure 26. Emprise et maillage du modèle hydraulique du PPRI et localisation des ouvrages de digue (Source : PPRI de la Loire, Antea Group) 36
Figure 27. Hydrogrammes d'injection du débit de la Loire issus de la modélisation du PPRI (Source : Antea Group) 38
Figure 28. : Topographie de la digue actuelle intégrée au modèle (scénario 1) 40
Figure 29. Arasement total de la digue intégré à la topographie du modèle (scénario 2) 41
Figure 30. Coupe de principe des ouvertures à réaliser - vue de face (Source : Antea Group) 42
Figure 31. Cartographie des venues d'eau dans le val pour le scénario d'inondation naturelle et localisation des ouvertures retenues pour le scénario 3 (arasement partiel option 1) (Source : Antea Group) 43
Figure 32. Cartographie des venues d'eau pour le scénario d'arasement partiel optimisé et localisation des ouvertures retenues (Source : Antea Group) 44

Figure 33. Cartographie des hauteurs d'eau maximales en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group) 47
Figure 34. Vitesses d'écoulement maximales en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group) 47
Figure 35. Cartographie des venues d'eau en situation actuelle (digue existante) - crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group) 48
Figure 36. Cartographie des hauteurs maximales en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group) 48
Figure 37. Vitesses d'écoulement maximales en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group) 49
Figure 38. Cartographie des venues d'eau en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group) 49
Figure 39. Cartographie des hauteurs maximales en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group) 50
Figure 40. Vitesses d'écoulement maximales en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group) 50
Figure 41. Cartographie des venues d'eau en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group) 51
Figure 42. Zone de dissipation d'énergie (ZDE) en arrière de la digue en cas de rupture d'ouvrage (zone d'effet destructeur du bâti) (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 51
Figure 43. Cartographie des hauteurs maximales en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group) 52
Figure 44. Vitesses d'écoulement maximales en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group) 52
Figure 45. Cartographie des venues d'eau en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group) 53
Figure 46. Cartographie des hauteurs maximales en situation d'arase totale pour une crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group) 53
Figure 47. Vitesses d'écoulement maximales en situation d'arase totale pour une crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group) 54
Figure 48. Cartographie des venues d'eau en situation d'arase totale - crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group) 54
Figure 49. Cartographie des hauteurs maximales en situation d'arase totale pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group) 55
Figure 50. Vitesses d'écoulement maximales en situation d'arase totale pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group) 55
Figure 51. Cartographie des venues d'eau en situation d'arase totale - crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group) 56
Figure 52. Cartographie des hauteurs maximales en situation d'arase totale pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group) 56
Figure 53. Vitesses d'écoulement maximales en situation d'arase totale pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group) 57
Figure 54. Cartographie des venues d'eau en situation d'arase totale - crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group) 57
Figure 55. Cartographie des hauteurs maximales en situation d'arase totale pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group) 58
Figure 56. Vitesses d'écoulement maximales en situation d'arase totale pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group) 58
Figure 57. Cartographie des venues d'eau en situation d'arase totale - crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group) 59

Figure 58. Cartographie des hauteurs maximales en situation d'arase partielle pour une crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group) 60
Figure 59. Vitesses d'écoulement maximales en situation d'arase partielle pour une crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group) 60
Figure 60. Cartographie des venues d'eau dangereuses pour le scénario d'arase partielle pour une crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group) 61
Figure 61. Cartographie des hauteurs maximales en situation d'arase partielle pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group) 61
Figure 62. Vitesses d'écoulement maximales en situation d'arase partielle pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group) 62
Figure 63. Cartographie des venues d'eau dangereuses pour le scénario d'arase partielle - crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group) 62
Figure 64. Cartographie des hauteurs maximales en situation d'arase partielle pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group) 63
Figure 65. Vitesses d'écoulement maximales en situation d'arase partielle pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group) 63
Figure 66. Cartographie des venues d'eau dangereuses pour le scénario d'arase partielle - crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group) 64
Figure 67. Cartographie des hauteurs maximales en situation d'arase partielle pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group) 64
Figure 68. Vitesses d'écoulement maximales en situation d'arase partielle pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group) 65
Figure 69. Cartographie des venues d'eau dangereuses pour le scénario d'arase partielle - crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group) 65
Figure 70 : Cartographie des hauteurs maximales en situation de brèches naturelles pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group) 67
Figure 71 : Vitesses d'écoulement maximales en situation de brèches naturelles pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group) 67
Figure 72 : Cartographie des venues d'eau dangereuses pour le scénario de brèches naturelles - crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group) 68
Figure 73 : Cartographie des hauteurs maximales en situation de brèches naturelles pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group) 68
Figure 74 : Vitesses d'écoulement maximales en situation de brèches naturelles pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group) 69
Figure 75 : Cartographie des venues d'eau dangereuses pour le scénario de brèches naturelles - crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group) 69
Figure 76 : Cartographie des hauteurs maximales en situation de brèches naturelles pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group) 70
Figure 77 : Vitesses d'écoulement maximales en situation de brèches naturelles pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group) 70
Figure 78 : Cartographie des venues d'eau dangereuses pour le scénario de brèches naturelles - crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group) 71
Figure 79. Occupation des sols et localisation des enjeux dans la zone protégée du val de Luthenay (Source : BRL Ingénierie, 2017) 72
Figure 80. Evolution de la ligne d'eau du profil en long d'étiage au droit du val de Luthenay-Uxeloup depuis 1988 (BRL Ingénierie, 2017) 79
Figure 81. Evolution du tracé du lit mineur entre 1971, 2005 et 2010 (Source : BRL) 81
Figure 82. Obstacles à l'origine de courants sécants aux endiguements (Source : Antea Group) 82
Figure 83. Synthèse des aspects morphodynamiques (Source : BRL Ingénierie) 82

Figure 84. Localisation des zones de protection et d'inventaire écologique à proximité de la zone d'étude (source : INPN) 85

Table des tableaux

Tableau 1. Niveau de protection apparent du système d'endiguement (Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 16
Tableau 2. Constats de l'étude de dangers 18
Tableau 3. Présentation des risques liés à la sollicitation morphodynamique de la digue (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 21
Tableau 4. Niveau de sûreté du système d'endiguement à partir de CARDigue (Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 22
Tableau 5. Probabilités de rupture annuelle tous modes confondus des différents profils élémentaires (Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 24
Tableau 6. Tableau de synthèse des scénarios de brèches retenus 26
Tableau 7. Synthèse des niveaux de gravité des scénarios de rupture de l'étude de dangers (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017) 28
Tableau 8. Débits de pointe d'injection en amont du modèle hydraulique du PPRI pour les crues de 2 ans à 1 000 ans (Source : Antea Group) 37
Tableau 9. Caractéristiques de brèches s'ouvrant pour les 4 scénarios de crue étudiés (Source : Antea Group) 45
Tableau 10. Synthèse des hauteurs de charge maximales modélisées au droit des profils de contrôle (Source : Antea Group) 59
Tableau 11. Synthèse des surfaces (en ha) et des enjeux humains inondés pour les différents scénarios étudiés 73
Tableau 12. Synthèse des coûts d'investissement, d'entretien et de suivi relatifs à la régularisation de l'ouvrage 77
Tableau 13. Coût estimatif des travaux de neutralisation de la digue (scénario d'arase partielle et scénario d'arase totale) (Source : Antea Group) 78
Tableau 14. Zones de protection et d'inventaire écologique à proximité de la digue de Luthenay-Uxeloup (Source : Antea Group) 84

Table des annexes

Annexe I : Atlas cartographique des différents scénarios

1. Caractéristiques et classement de la digue

1.1. Caractéristiques générales de la digue

Le système d'endiguement de Luthenay-Uxeloup s'étend sur environ 6 km en rive gauche de la Loire, sur les communes de Fleury-sur-Loire et de Luthenay-Uxeloup.

D'après l'étude de dangers de juin 2017 produite par BRL Ingénierie, il est constitué d'une levée en terre s'étirant depuis le remblai du canal latéral à la Loire à l'amont et se raccordant en aval avec le terrain naturel. La hauteur moyenne de la digue est de 2,7 m, avec une hauteur maximale de 4,7 m.

La totalité des ouvrages constitutifs de la levée de Luthenay-Uxeloup et leurs terrains d'assiette sont propriété de l'Etat et font partie du domaine public fluvial.

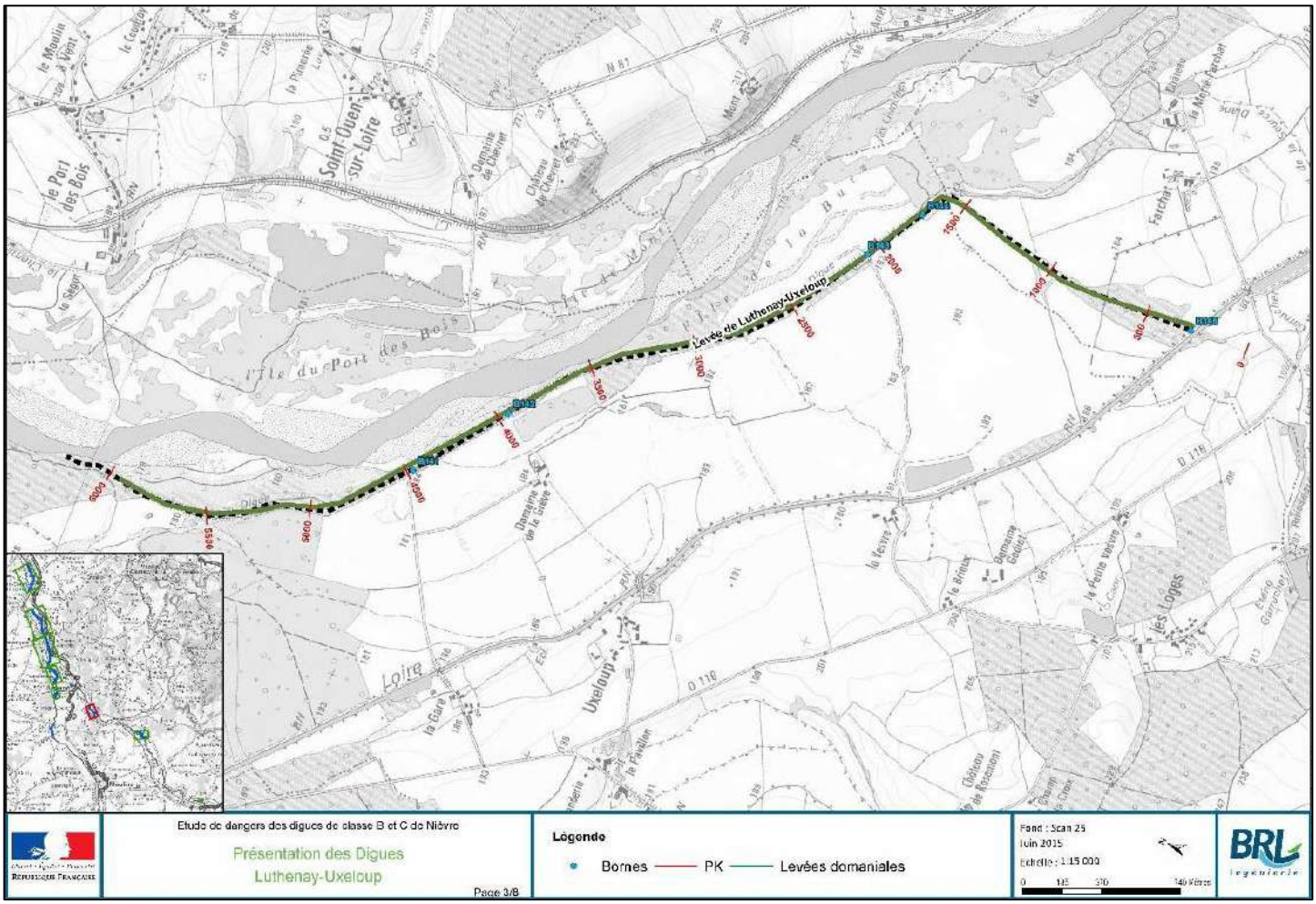

Figure 1. Carte de localisation de l'ouvrage de la levée de Luthenay-Uxeloup (Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

1.2. Zone protégée

Selon l'étude de dangers, la zone protégée par ce système d'endiguement abrite environ 14 personnes. Elle est représentée dans la figure suivante.

A noter que l'ouvrage est ouvert à l'aval et est susceptible d'être inondé par remous de la Loire à l'aval avant la survenue de surverses sur la digue.

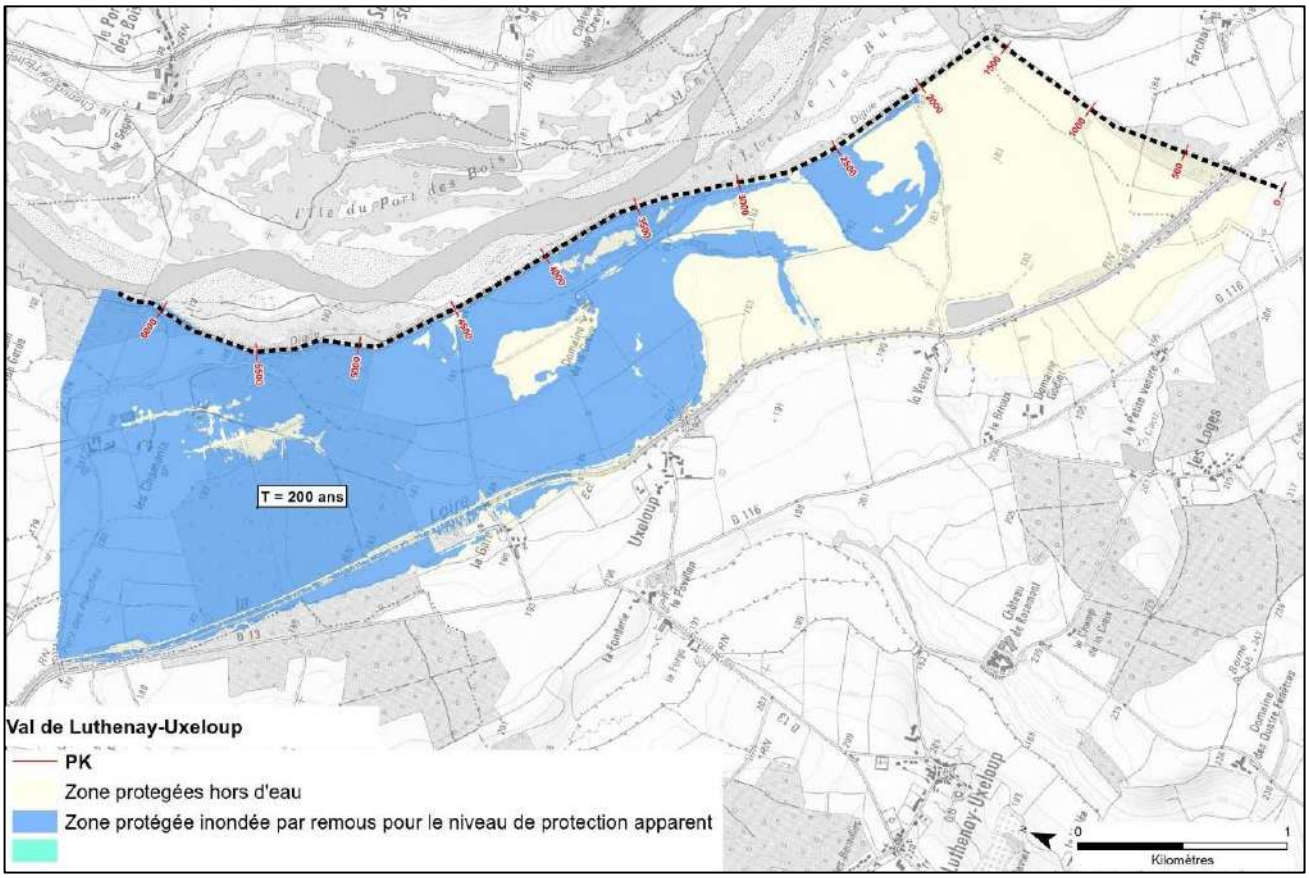

Figure 2. Zone protégée par le système d'endiguement de Luthenay-Uxeloup et zone inondée par remous dans la zone protégée (source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

1.3. Classe de l'ouvrage

La levée de Luthenay-Uxeloup n'a pas fait l'objet d'un classement par arrêté préfectoral en tant que système d'endiguement au sens de l'article R.562-13 du code de l'environnement (rubrique 3.2.6.0 de la nomenclature Loi sur l'Eau).

D'après l'étude de dangers, 14 personnes sont présentes dans la zone protégée. Conformément à l'article R.214-113, le système d'endiguement établi antérieurement au décret n°2015-526 du 12 mai 2015 et protégeant une population inférieure à 3 000 personnes serait classé en Classe C.

1.4. Gestionnaire

La commune de Fleury-sur-Loire fait partie de la Communauté de Communes Sud Nivernais et la commune de Luthenay-Uxeloup fait partie de la Communauté de Communes du Nivernais Bourbonnais. Ces deux EPCI sont compétents en matière de protection contre les inondations.

En l'état actuel, la gestion de l'ouvrage n'a pas été transmise aux EPCI et une convention existante permet à la DDT58 de continuer d'entretenir et gérer la digue.

2. Analyse fonctionnelle de l'ouvrage

2.1. Rôle de l'ouvrage

La digue de Luthenay-Uxeloup a pour rôle la protection contre les inondations de la Loire des terrains situés dans le lit majeur naturel en rive gauche de la Loire.

Les levées constitutives du système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup sont des ouvrages très anciens datant de plusieurs siècles. L'objectif de protection historique de la digue a sans cesse évolué, les levées de la Loire ayant été rehaussées à chaque crue ayant provoqué leur surverse dans le but de les rendre insubmersibles.

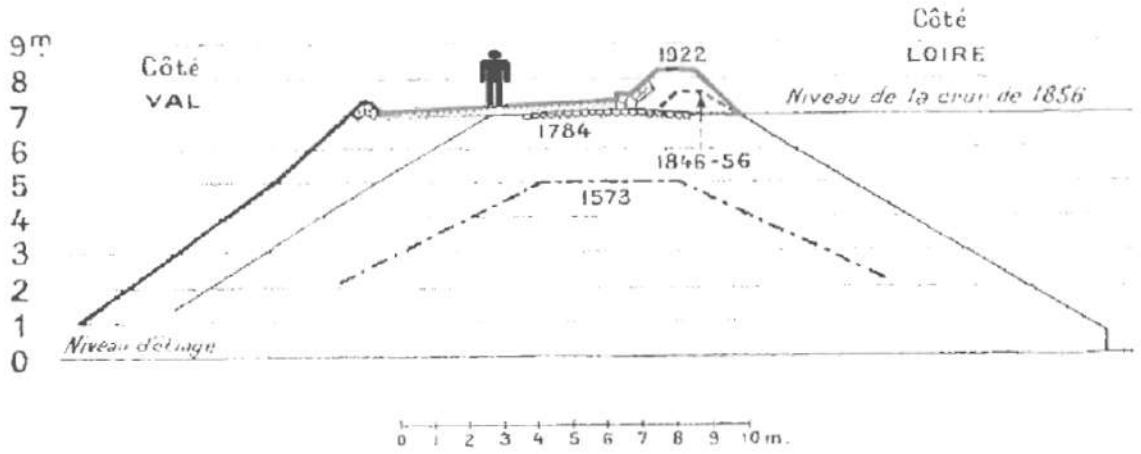

Figure 3. Schéma de principe des surélévations successives des digues de la Loire

Nota : aucune banquette n'est présente sur le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup. La cote de la crête de digue se confond donc systématiquement avec la cote de son point haut.

2.2. Identification des enjeux

Les enjeux localisés dans le val de Luthenay-Uxeloup sont repérés sur la carte des enjeux du PPRi de la Loire, secteur compris entre Nevers et Saint-Léger-des-Vignes.

Les enjeux identifiés concernent les deux zones d'habitat diffus du Domaine de la Grève et des Chamons, ainsi que la station de pompage AEP située en bord de Loire sur la partie aval de la digue.

La population totale estimée dans la zone protégée est évaluée à 14 personnes. Il est important de signaler que 9 personnes, soit près des deux tiers des résidents de la zone protégée, sont situées dans la zone de remous ; c'est-à-dire qu'elles seront vraisemblablement inondées avant atteinte du niveau de protection apparent, et ce même en l'absence de défaillance du système d'endiguement.

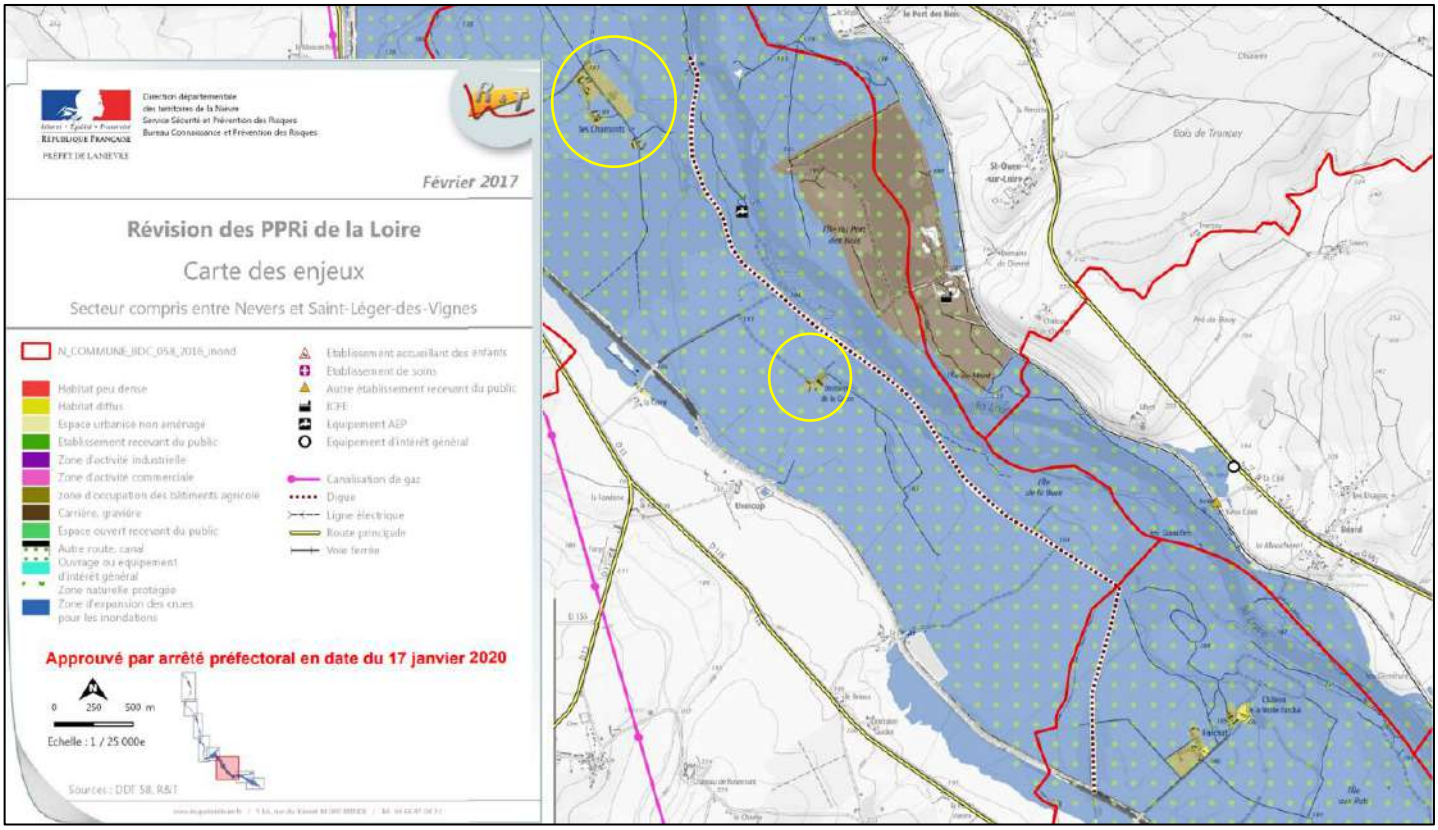

Figure 4. Cartographie des enjeux au droit de la zone d'étude
(Carte des enjeux, PPRI de la Loire – secteur compris entre Nevers et Saint-Léger-des-Vignes, 2017)

2.3. Incidence de l'ouvrage sur le fonctionnement hydraulique

2.3.1. Débits de crues caractéristiques

Les débits de pointe des crues de la Loire au droit de la zone d'étude indiqués dans l'étude de dangers sont synthétisés ci-dessous :

- **Crue moyennes à extrêmes :**

Période de retour	50 ans	70 ans	100 ans	170 ans	200 ans	500 ans	1000 ans
Débit de pointe [m³/s]	2450	2620	3280	3500	3870	4500	5000

Figure 5. Débits de pointe caractéristiques des crues moyennes à rares de la Loire au niveau du val de Luthenay-Uxeloup
(Source : EDD, BRL – 2017)

Crue fréquentes :

Période de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans
Débit de pointe [m3/s]	970	1700	1950	2150

Figure 6. Débits de pointe caractéristiques des crues fréquentes de la Loire au niveau du val de Luthenay-Uxeloup (Source : EDD, BRL – 2017)

En complément, les ordres de grandeur suivants permettent de mieux apprécier la cinétique et la dynamique des sollicitations hydrauliques générées par les crues de la Loire sur les ouvrages :

- Durée de crue (débit >Q2) : de 4 à 5 jours selon l'occurrence de crue considérée ;
- Vitesse de propagation de l'onde de crue : environ 2,5 km/h ;
- Vitesse de montée des eaux dans le lit endigué de la Loire : 5 à 15 cm/h.

2.3.2. Niveau de protection apparent

Pour rappel, le niveau de protection apparent ou niveau de première surverse correspond au niveau d'eau de la Loire au-delà duquel la zone protégée commence à être inondée sans rupture préalable de la digue, suite au débordement au-dessus de la crête de digue.

Le niveau de sûreté est défini comme le niveau d'eau de la Loire au-delà duquel la probabilité de rupture de la digue ne peut plus être considérée comme négligeable. *Anciennement, la probabilité de rupture n'était plus considérée comme négligeable dès qu'elle atteignait 1%. Depuis l'arrêté du 7 avril 2017, cette probabilité de rupture peut ne plus être considérée comme négligeable à partir de 5% maximum.*

Les niveaux d'eau atteints par la Loire ont été estimés à partir de modélisations hydrauliques pour des occurrences de crues de 2 à 1 000 ans, soit pour un débit de la Loire s'échelonnant de 970 m^3/s à 5 000 m^3/s.

La figure suivante présente les niveaux d'eau obtenus ainsi que la cote de crête et la cote de pied de l'ouvrage.

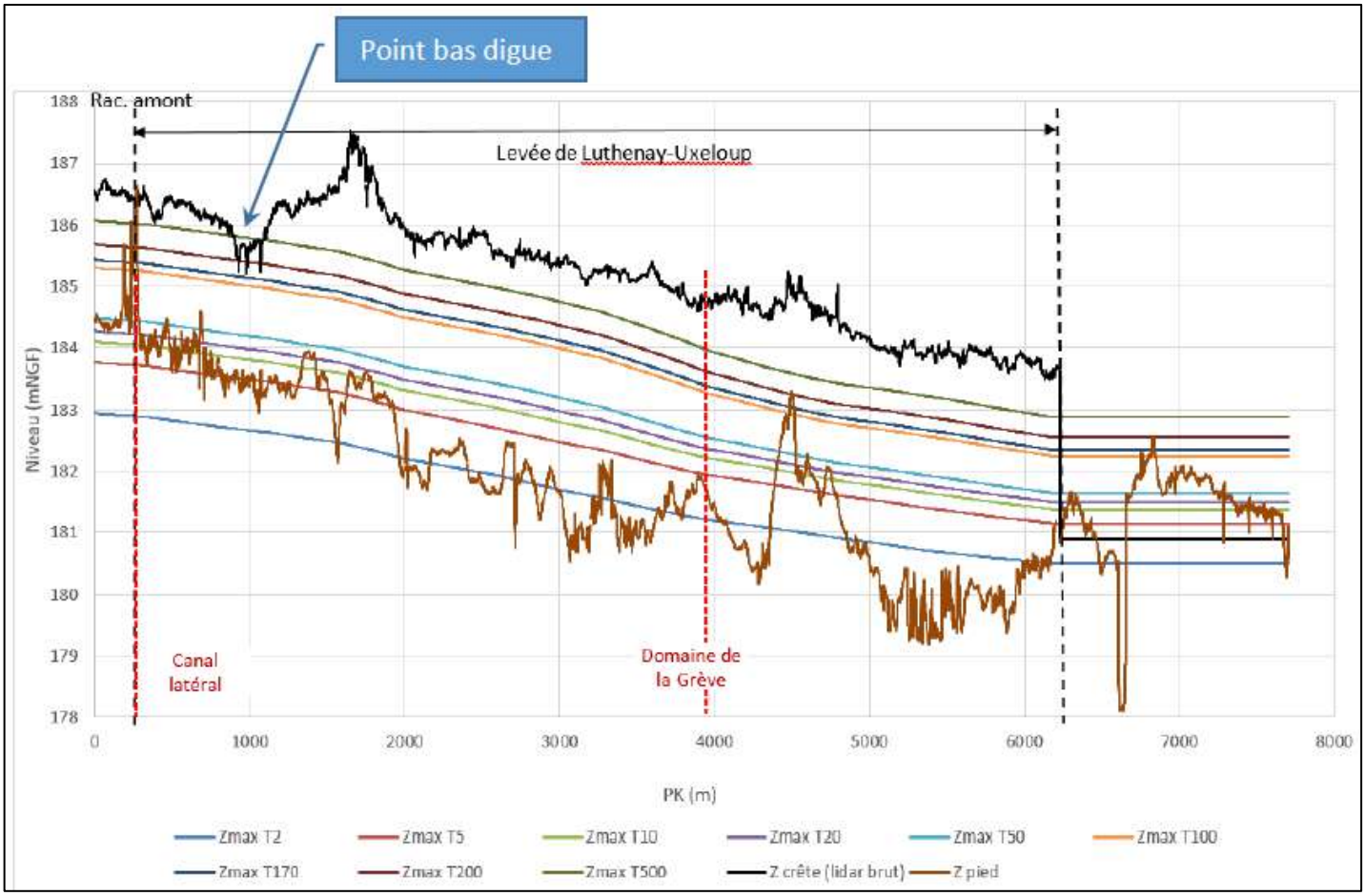

Figure 7. Lignes d'eau, profils en long de la crête de digue et du pied de digue (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

Le comparatif des lignes d'eau et du profil en long de la crête de digue mettent en évidence que :

- Le pied de digue est atteint pour les crues fréquentes (occurrence inférieure à 2 ans) ;
- les premières surverses se produiraient au niveau de la digue de raccordement amont avec le canal (vers le PK 1000) pour une crue d'occurrence 200 ans environ, correspondant à un débit de 3 870 m^3/s à Luthenay-Uxeloup.

Le niveau protection apparent du système d'endiguement de Luthenay-Uxeloup correspond donc au niveau obtenu par une crue de période de retour de 200 ans.

Tableau 1. Niveau de protection apparent du système d'endiguement (Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

	Occurrence de la crue associée	Hauteur échelle de Decize (m)	Débit Loire au droit de la digue (m^3/s)
Niveau de protection apparent	200 ans	6,81	3 870

2.3.3. Inondation du val par remous

L'analyse du profil en long montre que l'aval du système d'endiguement permet l'inondation du val par remous dès la crue quinquennale.

La figure suivante présente les zones du val inondées sans défaillance du système d'endiguement pour la crue associée au niveau de protection apparent (T=200ans).

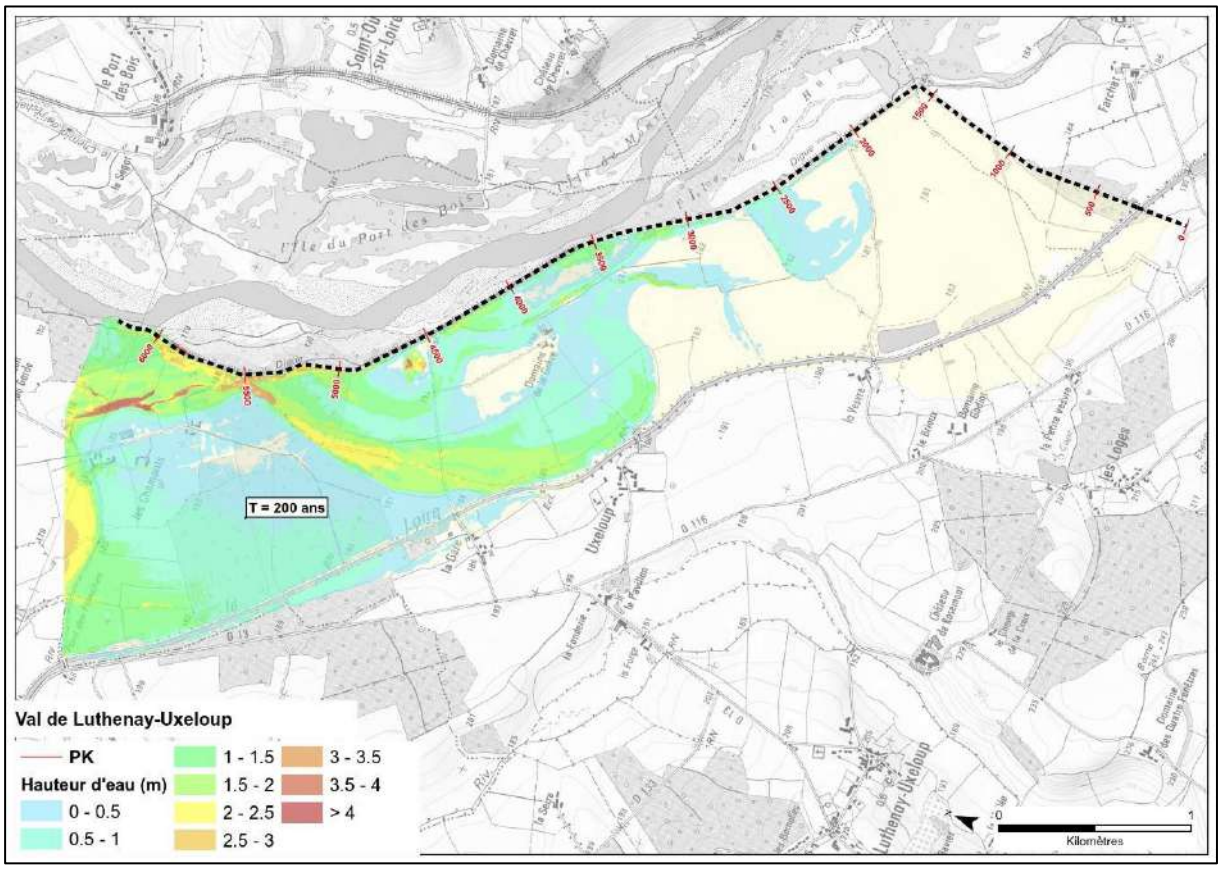

Figure 8. Hauteurs d'eau du remous pour la crue bicentennale associée au niveau de protection apparent du système d'endiguement (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

3. Diagnostic de l'ouvrage

3.1. Etat actuel de l'ouvrage et ouvrages annexes

Les principaux constats de l'étude de dangers concernant l'état actuel de l'ouvrage sont synthétisés dans le tableau suivant :

Tableau 2. Constats de l'étude de dangers

Tronçon	Longueur section	Hauteur moyenne	Largeur crête	Largeur en pied	Constats
Tronçon 1 Pk280-Pk1345	1 065 m	1,7 m	2,6 m	11,9 m	Végétation très dense sur le corps de digue et la crête Présence de terriers Zones à caractère humide et stagnations d'eau en pied de talus côté val
Tronçon 2 Pk1345-Pk6220	4 875 m	2,9 m	5,9 m	22,6 m	Section circulable en crête (piste) Végétation ligneuse sur les talus Terriers de gros diamètres Fossé en eau en pied côté val

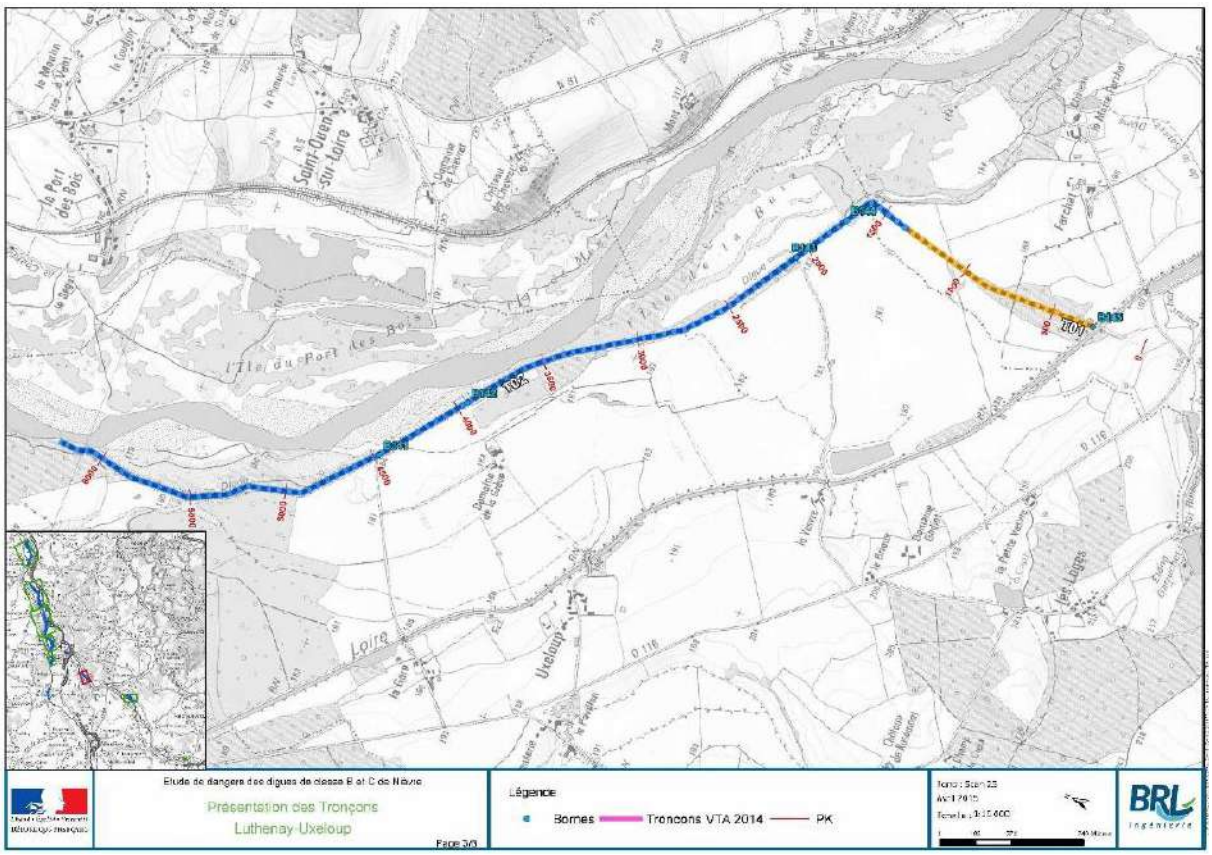

Figure 9 : Localisation des tronçons (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

- Rehausses :

Le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup n'est pas équipé de rehausses.

- Chemin de service :

La circulation est possible en crête sur environ 3 km de long au niveau du tronçon n°2. Ce chemin est en terre dans sa partie amont, puis enherbé dans la partie aval de cette section.

- Ouvrages traversants :

L'étude de dangers indique l'absence d'ouvrage hydraulique sur le système d'endiguement du Val de Luthenay-Uxeloup.

Toutefois, il est signalé la présence de deux canalisations franchissant la digue :

- une canalisation passant sur le dessus de la crête de digue, constituée d'une conduite en PVC 250 mm puis d'une conduite en fonte 250 mm, destinée à une prise d'eau en Loire pour l'irrigation (point vert sur la carte suivante). Elle serait reliée au plan d'eau côté val ;
- une canalisation en fonçage sous la digue au droit du chemin d'accès à la station AEP (point rouge sur la carte suivante).

La présence de canalisations ou d'ouvrages dans le corps de digue peut augmenter le risque d'érosion interne. Toutefois, ces 2 canalisations n'étant pas situées dans le corps de digue, le risque est limité.

On note également la traversée de la crête de digue par 2 chemins (pk 650 et pk 4500) :

- Pk650 : chemin reliant au lieu-dit « Farchat » ;
- Pk4500 : piste d'accès à la station de pompage AEP.

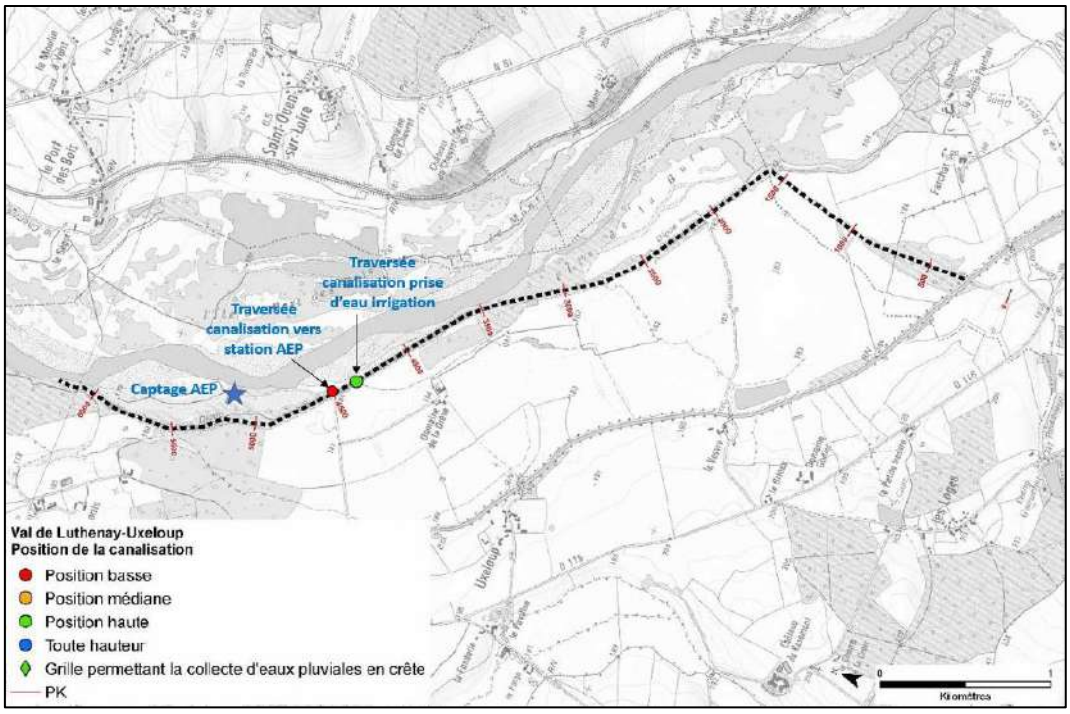

Figure 10. Positionnement des canalisations franchissant dans la digue de Luthenay-Uxeloup (Etude de dangers), BRL Ingénierie, 2017)

- Affluents et fossés de drainage :

On note la présence d'un réseau de fossés drainant le val de Luthenay-Uxeloup. Plusieurs plans d'eau sont situés sur le tracé des fossés du val. Des portions de fossé longent notamment la digue côté val.

Le réseau hydrographique dans le val correspond probablement à d'anciens ruisseaux dont l'exutoire à la Loire a été intercepté et modifié avec l'implantation de la digue. Les ruissellements sont drainés vers l'aval via un fossé longeant la digue côté val.

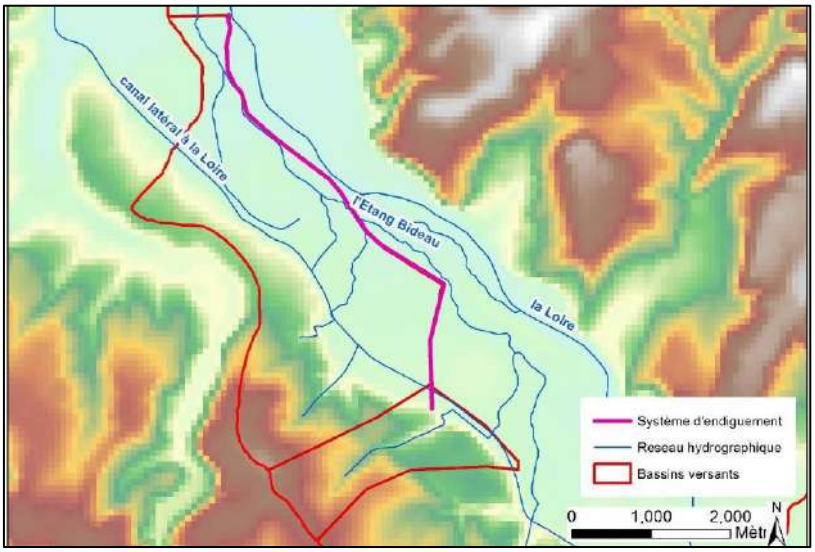

Figure 11. Réseau hydrographique parcourant le val de Luthenay-Uxeloup (Source : Antea Group)

3.2. Retours d'expérience

Les retours d'expérience sur les incidents et les brèches historiques concernant la digue de Luthenay-Uxeloup sont synthétisés ci-dessous :

- Crue de 1866 : 2 brèches identifiées :
  - Pk3600 : longueur 320 m ;
  - Pk4600 : longueur 150 m ;
- Crue de 1907 : dernière crue ayant sollicité de manière importante la digue ;
- Crue de décembre 2003 (T=20ans) : aucun désordre sur la digue de Luthenay-Uxeloup lors de cette crue. Début d'inondation par remous à l'aval du val.

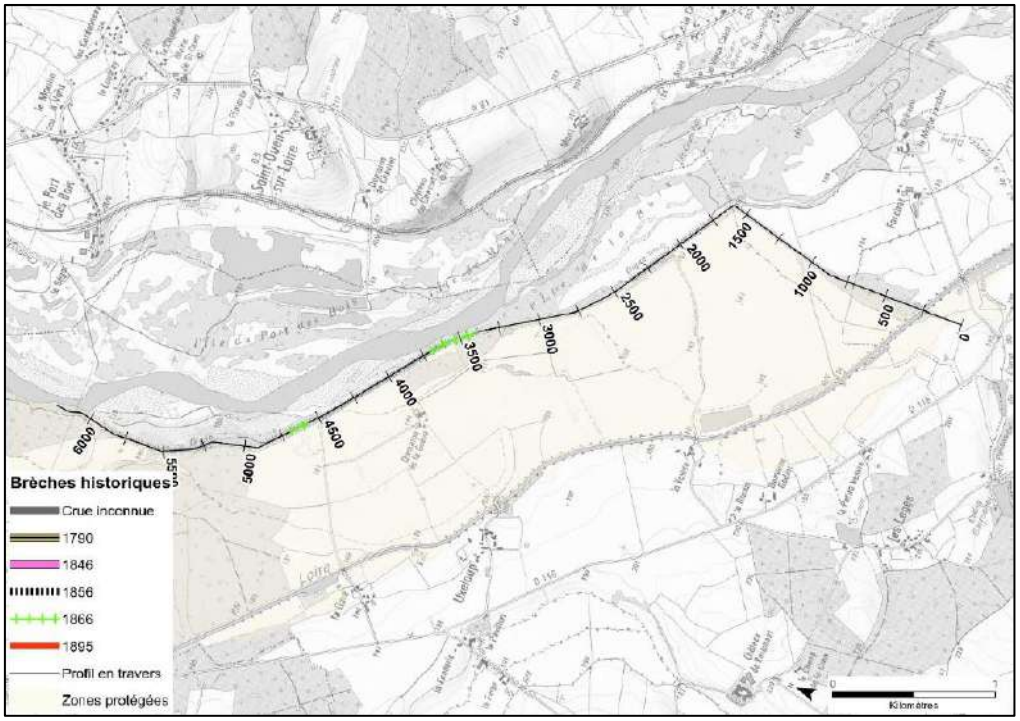

Figure 12. Localisations des brèches historiques recensées sur la digue de Luthenay-Uxeloup (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

3.3. Sollicitations morphodynamiques

Les niveaux de sollicitation morphodynamique sur la digue et le potentiel d'aggravation de l'aléa de rupture au niveau des secteurs exposés sont évalués dans le tableau suivant :

Tableau 3. Présentation des risques liés à la sollicitation morphodynamique de la digue (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

Paramètres	Rehausse potentielle de la ligne d'eau par la végétation	Risque de végétalisation	Sollicitation du pied de digue	Obstacles à l'origine d'écoulements sécants	Evolutions du profil en long	Evolutions du tracé
Evaluation	Végétalisation du lit mineur / largeur du lit endigué = 0 - 4 % Pas de rehausse de la ligne d'eau en crue engendrée par la végétalisation du lit mineur.	Bande active comprise entre la moyenne de 175 m et la limite critique de 275 m. Faibles surfaces disponibles pour la végétalisation.	Deux secteurs présentent des sollicitations au niveau des berges soutenant le système d'endiguement au droit des Pk 434,2 et 437.	Deux obstacles situés au droit des Pk 434,2 et 437 engendrent des écoulements sécants au système d'endiguement.	Stabilité du profil en long durant les périodes récentes	Nombreuses évolutions du tracé de la Loire entre 1971 et 2010.
Facteur de pondération				Ces obstacles favorisent les sollicitations en pied d'ouvrages identifiées sur ces mêmes secteurs.		Entre les Pk 434 et 435, la Loire a progressé en pied d'ouvrage en érodant la berge situé en 1971 à l'interface. L'évolution de ce secteur est à suivre.
Qualification de l'aggravation de l'aléa de rupture	Négligeable	Négligeable	Important	Important	Négligeable	Modéré

3.4. Niveau de fiabilité de l'ouvrage

3.4.1. Evaluation des probabilités de rupture

L'analyse de la défaillance du système d'endiguement considère les 5 modes de rupture potentielle de l'ouvrage suivants :

- Rupture liée à la surverse,
- Rupture suite à érosion interne,
- Rupture suite à glissement de talus,
- Rupture suite à érosion externe,
- Rupture suite à un soulèvement hydraulique en pied de digue.

Le niveau de fiabilité de l'ouvrage a été estimé à partir du calcul des probabilités de rupture du système d'endiguement via le modèle de calcul CARDigue développé par le CEREMA. Le système d'endiguement est discrétisé en tronçons de 50 m reprenant les caractéristiques du profil en travers en leur milieu.

Pour rappel, comme évoqué précédemment dans le paragraphe 2.3.2, le niveau de sûreté est défini comme le niveau d'eau de la Loire au-delà duquel la probabilité de rupture de la digue ne peut plus être considérée comme négligeable*. Anciennement, la probabilité de rupture n'était plus considérée comme négligeable dès qu'elle atteignait 1%. Depuis l'arrêté du 7 avril 2017, cette probabilité de rupture peut ne plus être considérée comme négligeable à partir de 5% maximum.*

Les probabilités de rupture annuelles tous modes confondus sont représentées dans la figure suivante et sont données dans le tableau ci-après.

Deux principales zones de défaillance potentielle sont mises en évidence par cette analyse :

- Au PK 1000 où le risque de rupture par surverse est non négligeable à partir de la crue de période de retour de 200 ans ;
- Au PK 3050 où le risque de rupture par érosion interne est non négligeable (1.2 %) à partir de la crue de période de retour de 20 ans.

Le niveau de sûreté du système d'endiguement correspond alors à un niveau de la Loire associé à une crue de période de retour entre 10 et 20 ans, soit une hauteur à l'échelle de Decize comprise entre 5,07 et 5,23 m et un débit compris entre 1 950 et 2 200 m³/s.

Tableau 4. Niveau de sûreté du système d'endiguement à partir de CARDigue (Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

	Occurrence de la crue associée	Hauteur échelle de Decize (m)	Débit Loire au droit de la digue (m³/s)
Niveau de sûreté compris entre	10 ans	5,07	1 950
	20 ans	5,23	2 200

L'étude de dangers précise que compte tenu des incertitudes du modèle d'aléa de rupture, le seuil de probabilité de rupture retenu pour la définition du niveau de sûreté est de 1 %. Au-dessus de ce seuil, la probabilité de rupture ne peut plus être considérée comme négligeable.

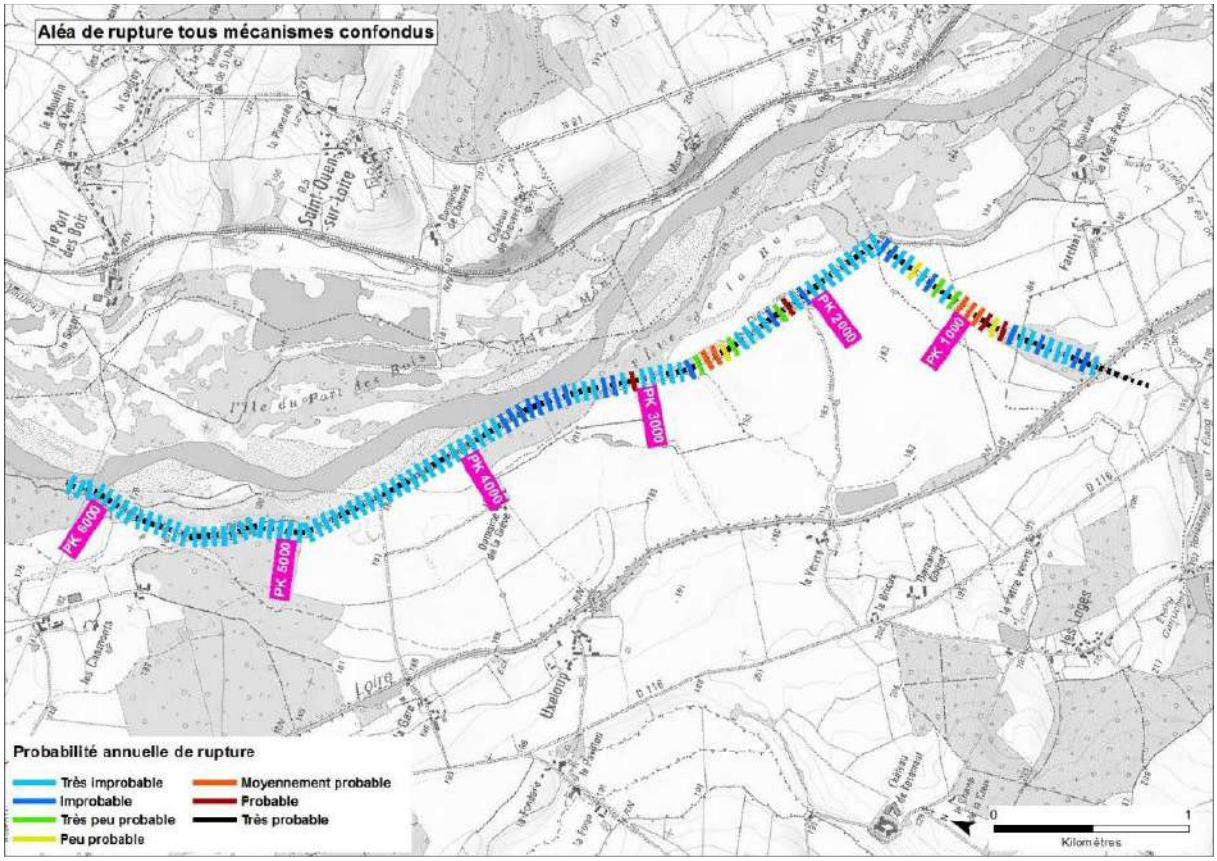

Figure 13. Carte des probabilités annuelles de rupture tous modes confondus, en l'absence de surveillance (source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

Tableau 5. Probabilités de rupture annuelle tous modes confondus des différents profils élémentaires (Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

Identification du Profil			Surverse	Erosion interne	Glissement	Erosion externe	Soulèvement hydraulique	Aléa global : Probabilité de Rupture tous modes confondus								Probabilité annuelle
N° du Profil utilisé	PK Digue (m/ 0rigineVal)	Tronçon	Aléa Annuel	Aléa Annuel	Aléa Annuel	Aléa Annuel	Aléa Annuel									Σ
			Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q170	Q200	
17	5_Luthenay_1_PK800	T1	0.00%	0.97%	0.13%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	54.4%	82.0%	95.5%	1.00%
18	5_Luthenay_1_PK850	T1	0.02%	0.12%	0.15%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.2%	4.2%	42.9%	0.25%
19	5_Luthenay_1_PK900	T1	0.04%	0.99%	0.13%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	55.0%	82.7%	99.2%	1.03%
20	5_Luthenay_1_PK950	T1	0.05%	0.65%	0.10%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	24.4%	56.2%	83.4%	0.71%
21	5_Luthenay_1_PK1000	T1	0.03%	0.59%	0.07%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	20.4%	28.8%	82.7%	0.63%
22	5_Luthenay_1_PK1050	T1	0.02%	0.65%	0.12%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	27.0%	54.4%	82.7%	0.72%
23	5_Luthenay_1_PK1100	T1	0.00%	0.11%	0.03%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	2.1%	24.4%	0.14%
25	5_Luthenay_1_PK1200	T1	0.00%	0.12%	0.03%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.1%	2.2%	24.4%	0.14%
28	5_Luthenay_1_PK1350	T2	0.00%	0.27%	0.05%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	54.4%	0.29%
44	5_Luthenay_1_PK2150	T2	0.00%	1.29%	0.13%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	95.5%	95.5%	99.1%	1.29%
45	5_Luthenay_1_PK2200	T2	0.00%	0.06%	0.10%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.2%	4.3%	24.9%	0.15%
51	5_Luthenay_1_PK2500	T2	0.00%	0.06%	0.14%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	7.5%	8.5%	24.9%	0.20%
52	5_Luthenay_1_PK2550	T2	0.00%	0.21%	0.28%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	24.9%	33.2%	41.1%	0.44%
53	5_Luthenay_1_PK2600	T2	0.00%	0.43%	0.38%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%	41.1%	41.1%	65.0%	0.68%
54	5_Luthenay_1_PK2650	T2	0.00%	0.49%	0.39%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.8%	41.1%	63.2%	65.0%	0.74%
55	5_Luthenay_1_PK2700	T2	0.00%	0.07%	0.12%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.3%	8.5%	24.9%	0.18%
62	5_Luthenay_1_PK3050	T2	0.00%	1.35%	0.43%	0.00%	0.00%	0.0%	0.0%	0.2%	1.2%	12.0%	85.3%	86.0%	96.5%	1.45%

3.4.2. Secteurs prioritaires identifiés

L'étude de dangers a identifié des secteurs prioritaires exposés aux risques de rupture en raison de la présence de terriers de gros diamètres potentiellement traversant la digue. En particulier, les PK 2150 et 3050 concernent des profils identifiés comme très sensibles au risque de rupture par érosion interne (respectivement 95 et 80% de risque de rupture pour une crue centennale). Ainsi que les profils aux PK 300 et 1350 sur le tronçon en amont de la digue.

Des travaux avaient été préconisés dans l'étude de dangers pour reconstituer la levée et élever le niveau de sûreté de Q20 à Q100.

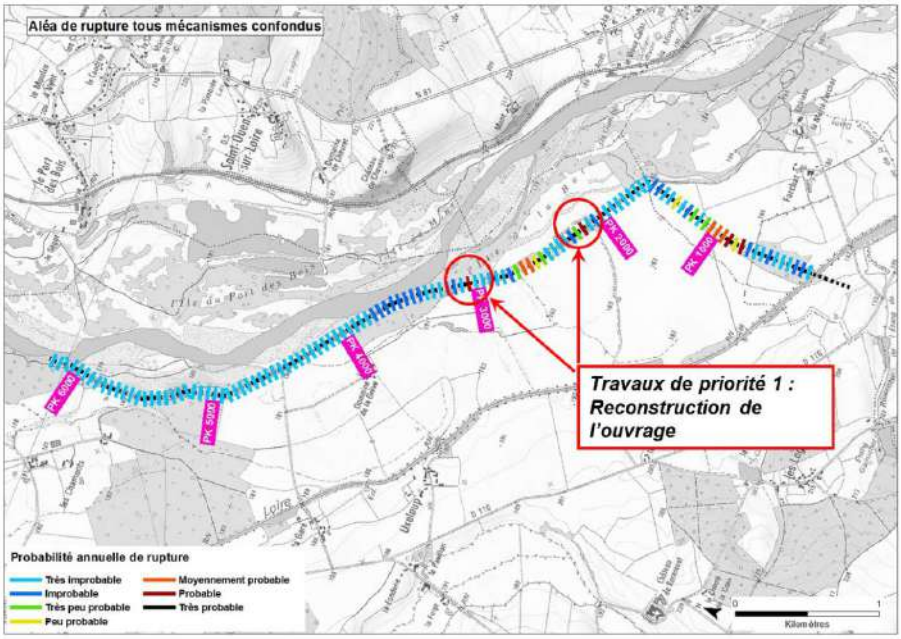

Figure 14. Localisation des préconisations de travaux de reconstitution de l'ouvrage sur le tronçon longeant la Loire (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

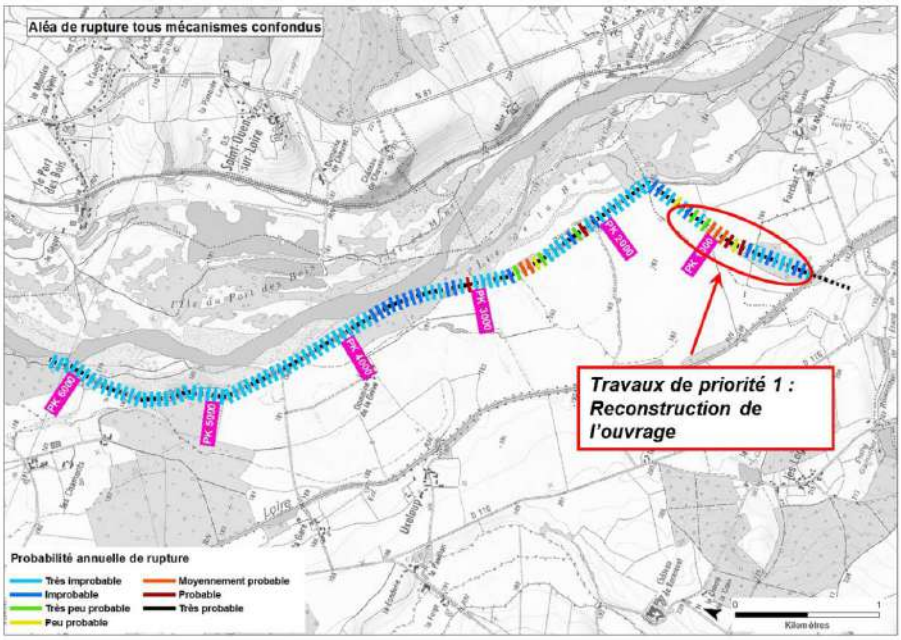

Figure 15. Localisation des préconisations de travaux de reconstitution de l'ouvrage sur le tronçon en amont (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

3.5. Scénarios de défaillance structurelle étudiés dans l'EDD

3.5.1. Description des scénarios

L'étude de dangers a étudié les scénarios de brèches suivants :

Tableau 6. Tableau de synthèse des scénarios de brèches retenus

n°	intitulé du scénario	Scénario hydrologique	Mode de rupture	Probabilité du scénario	localisation (PK début)	longueur de la brèche (m)
LUT_1	brèche en amont du val	Q200	érosion interne	0.28%	1000	200
LUT_2	brèche en amont Domaine de la Grève	Q100	érosion interne	0.85%	3050	150

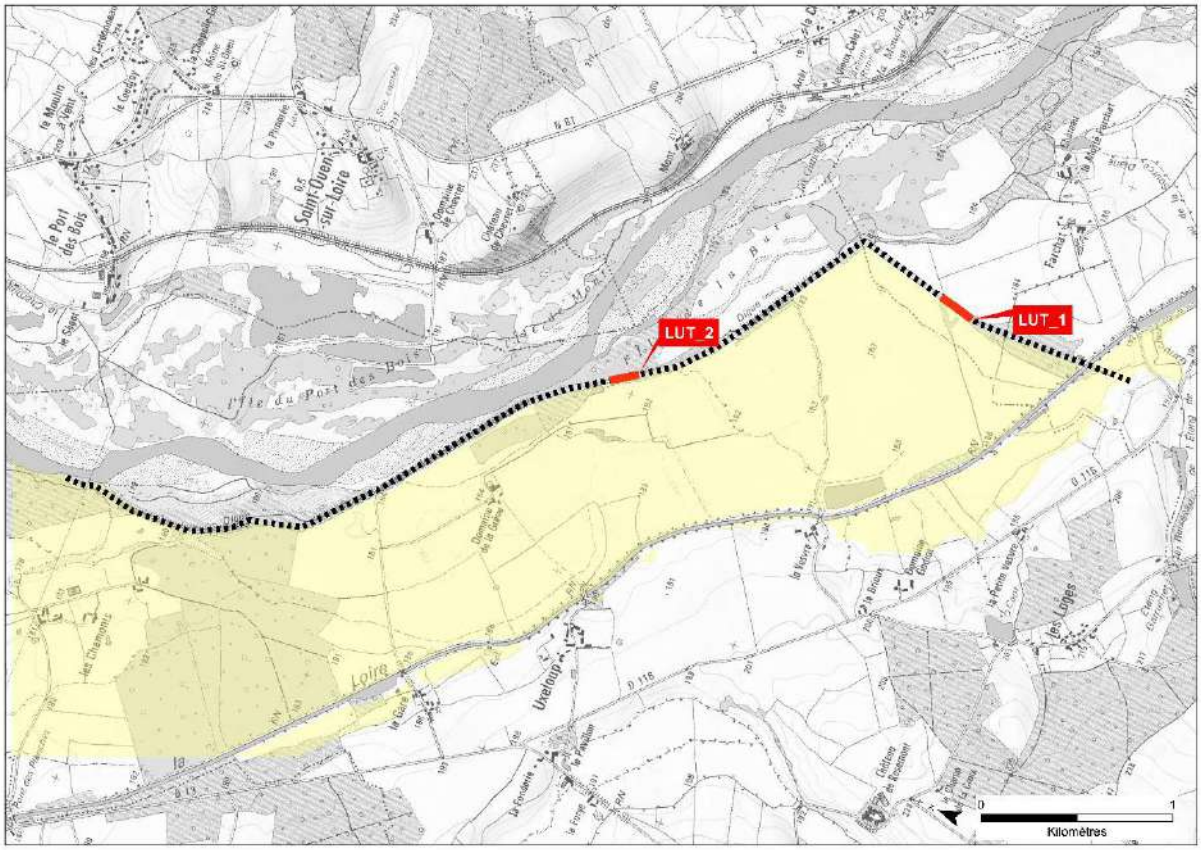

Figure 16. Localisation des scénarios retenus dans l'étude de dangers (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

3.5.2. Résultats des scénarios de rupture

Les cartes des hauteurs d'eau maximales atteintes dans le val pour les scénarios de rupture considérés sont représentées ci-après.

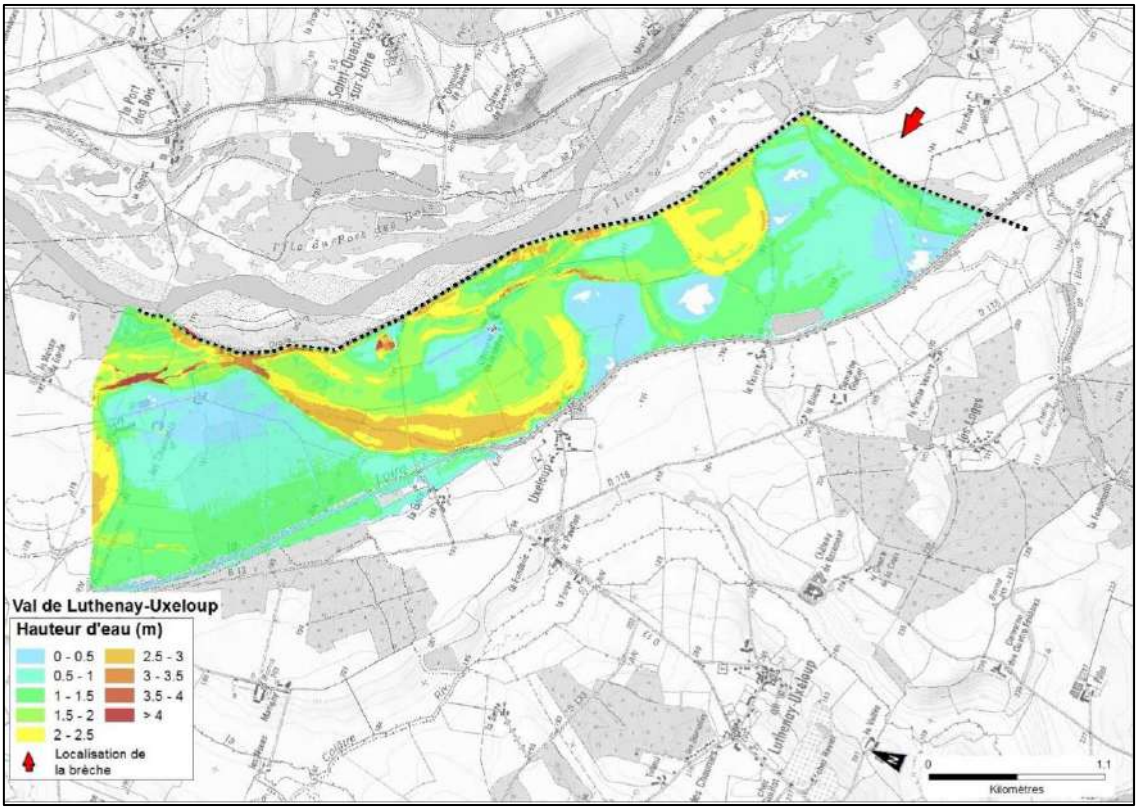

Figure 17. Carte des hauteurs d'eau maximales dans le val – scénario de brèche n°1 (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

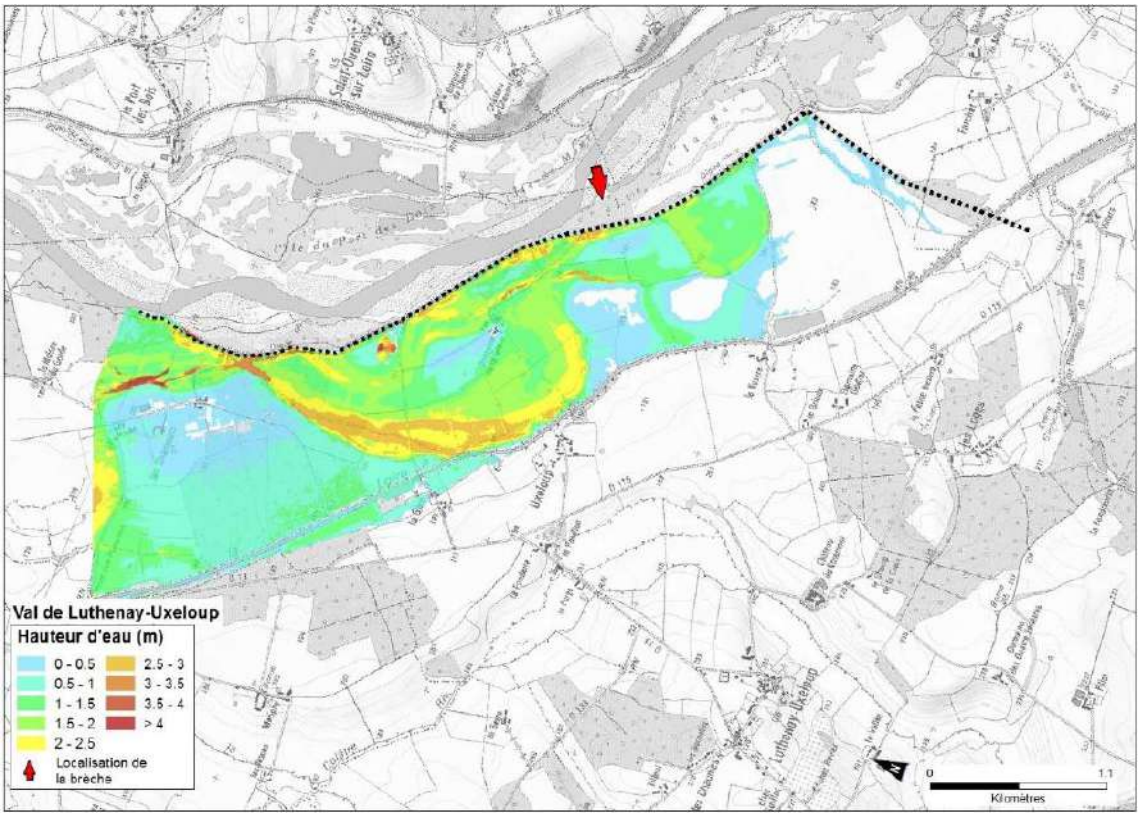

Figure 18. Carte des hauteurs d'eau maximales dans le val – scénario de brèche n°2 (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

3.5.3. Zone de dissipation d'énergie

Il a été considéré une zone d'érosion et de dissipation d'énergie en arrière de la digue en cas de brèche pouvant entrainer des destructions. Cette zone est cartographiée ci-après au regard des scénarios de brèche considérés.

La largeur de la zone de dissipation d'énergie derrière une brèche potentielle est définie en considérant : L = 100 x Δh (Δh : différence d'altitude entre la ligne d'eau pour Q200 (crue de première surverse) et le pied de digue coté val = charge hydraulique).

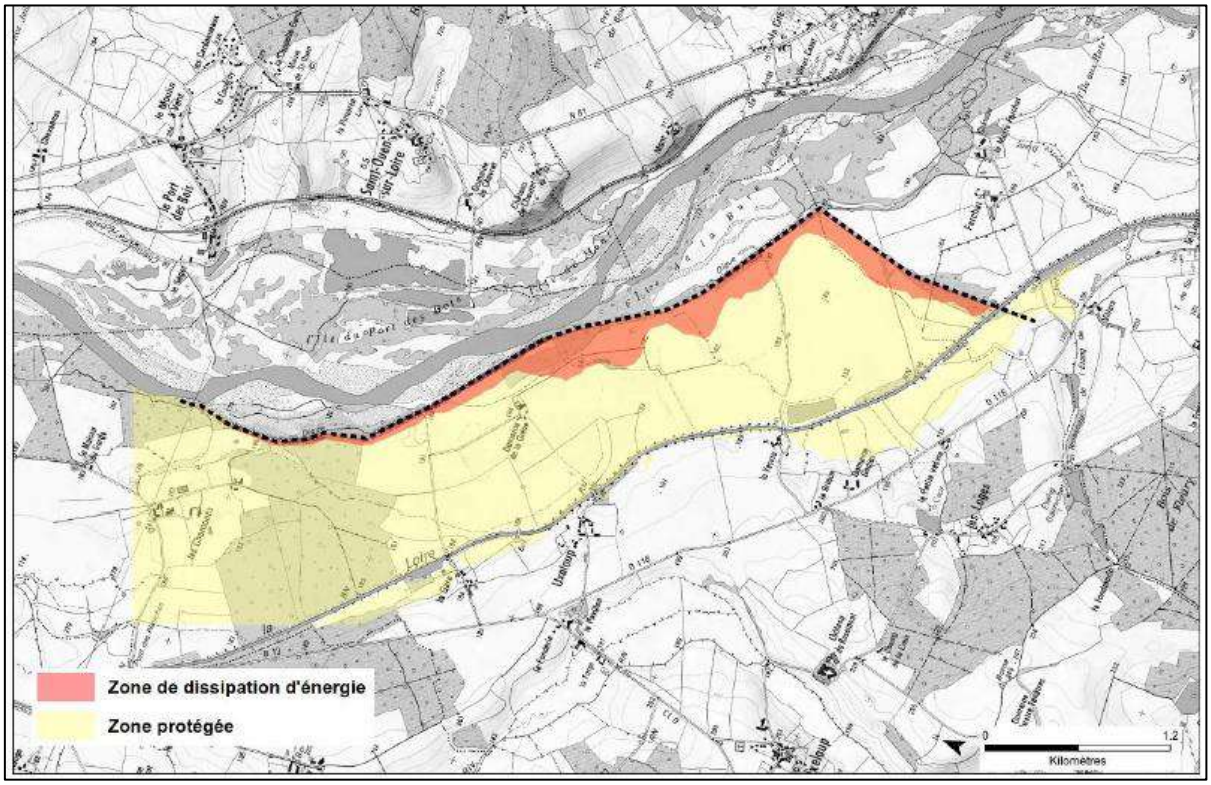

Figure 19. Zone de destruction du bâti derrière la levée lors de brèche (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

3.5.4. Niveaux de gravité

Tableau 7. Synthèse des niveaux de gravité des scénarios de rupture de l'étude de dangers (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

n°	intitulé du scénario	population exposée	population en danger	enjeux sensibles exposés	enjeux sensibles en danger	niveau de gravité
1	Brèche en amont du val	14	1	0	0	1. Modéré
2	Brèche en amont du domaine de la Grève	11	0	0	0	0. Résiduel

L'étude de dangers conclut que, compte tenu de la fréquence peu probable de défaillance du système d'endiguement, et des conséquences humaines que cela engendrerait, le risque de rupture peut être qualifié de « risque acceptable ».

4. Elaboration des scénarios d'aménagement

4.1. Contraintes en cas de préservation de l'ouvrage

La préservation de la digue de Luthenay-Uxeloup comme système de protection contre les inondations du val implique plusieurs contraintes :

- Classement réglementaire de l'ouvrage en tant que système d'endiguement ;
- Changement de gestionnaire à acter car les EPCI sont compétentes en matière de prévention des inondations ;
- Mise en œuvre des travaux de confortement et d'entretien nécessaires pour assurer la pérennité de l'ouvrage. Un programme de travaux de fiabilisation du système est préconisé afin d'augmenter le niveau de sûreté pour qu'il majore le niveau de protection apparent :
  - Suppression des terriers ;
  - Entretien de la végétation et suppression de la végétation ligneuse sur les talus côté Loire et la crête de digue ;
  - Réalisation de visites d'inspection périodiques et suivi en période de crue ;
  - Confortement de l'ouvrage au niveau des points faibles identifiés ;
  - Autres actions à mettre en œuvre définies lors des VTA.

4.2. Synthèse des éléments de diagnostic

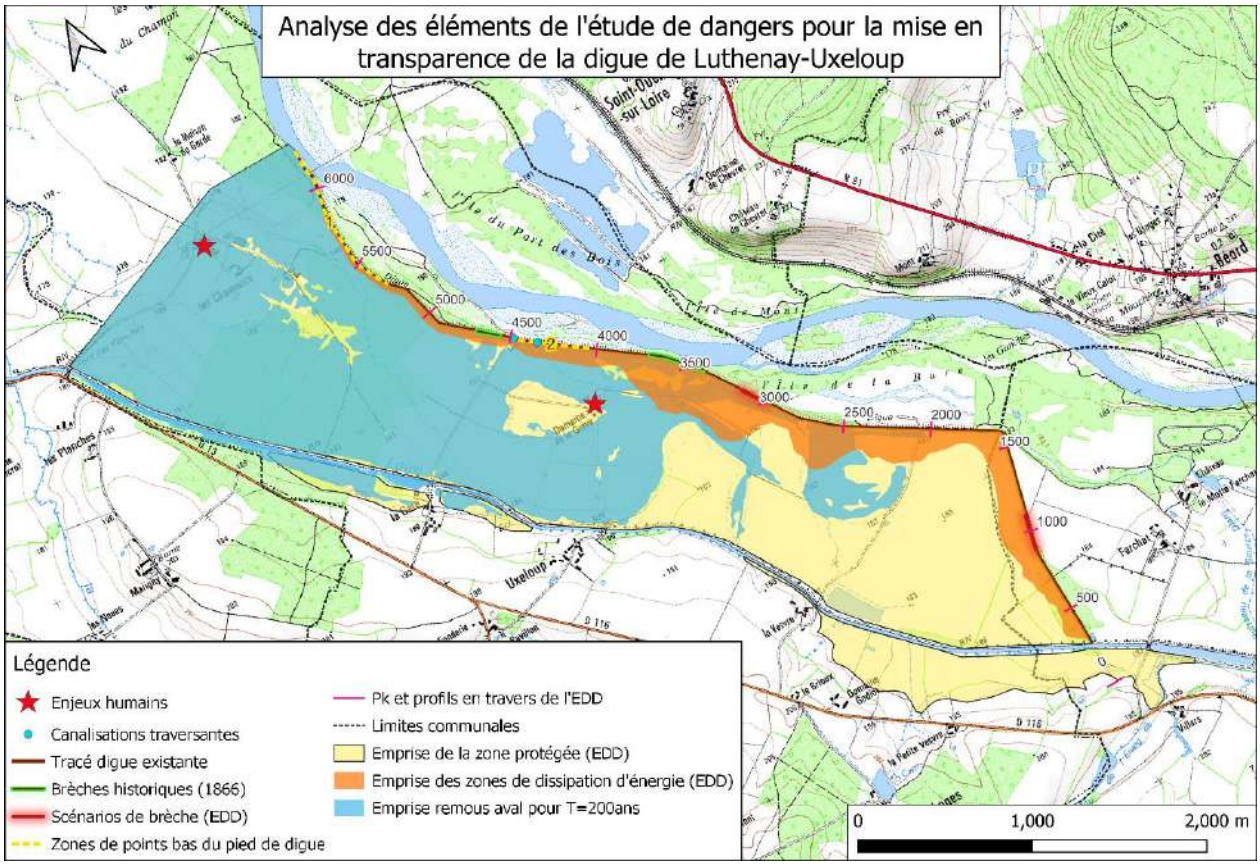

Figure 20. Représentation des éléments considérés dans l'étude de dangers pour la mise en transparence de la digue (Source : Antea Group)

4.3. Principes de mise en transparence

4.3.1. Neutralisation de l'ouvrage devenu caduque

Dans le cas où l'ouvrage n'est pas régularisé en tant que système d'endiguement et rendu conforme aux obligations de conception, d'entretien et d'exploitation, l'article L.562-8-1 du code de l'environnement précise qu'il doit être « neutralisé ».

L'objectif à atteindre pour la neutralisation de l'ouvrage est de supprimer le sur-aléa lié à la non-transparence de l'ouvrage.

Il convient de noter que l'aléa et le sur-aléa ne tiennent pas compte de l'existence d'enjeux. En effet, l'absence d'enjeux à date ne présume pas de l'absence d'enjeux dans le futur.

Il s'agit donc d'évaluer la différence entre les aléas générés avec l'ouvrage après d'éventuels travaux de neutralisation et, ceux, dans les mêmes circonstances, sans l'ouvrage (inondation naturelle).

On distingue ainsi deux situations de neutralisation :

- Soit une suppression totale de l'ouvrage par arasement jusqu'au TN : ce cas correspond à restituer la configuration d'état naturel. Dans ce cas il n'est pas nécessaire de justifier l'absence de sur-aléa par des modélisations de venues d'eau ;
- Soit un maintien total ou partiel de l'ouvrage en justifiant l'absence de sur-aléa par des modélisations de venue d'eau avec ou sans l'ouvrage.

4.3.2. Critères de mise en transparence

La mise en transparence hydraulique de l'ouvrage vise à réduire la charge hydraulique sur l'ouvrage en équilibrant les niveaux d'eau de part et d'autre de la digue. La réduction de la charge permet de réduire les risques de défaillance et les conséquences destructrices en cas de rupture d'ouvrage.

Afin de valider la mise en transparence de l'ouvrage pour un scénario, on fixe les critères d'évaluation suivants :

- Vérification de l'absence de venues d'eau dangereuses au droit des enjeux humains en comparaison au scénario d'inondation naturelle (sans ouvrage) ;
- Vérification de l'absence de sur-aléa en cas de rupture d'une portion de digue laissée en place, en comparaison au scénario d'inondation naturelle.

a) <u>Venues d'eau dangereuses</u>

Comme défini dans l'arrêté du 7 avril 2017, sont réputées dangereuses les venues d'eau telles que la hauteur d'eau atteint au moins 1 m ou le courant au moins 0,5 m/s. Il s'agit des zones d'aléa fort et très fort selon la matrice de définition de l'aléa hydraulique.

L'analyse des scénarios de neutralisation s'appuie sur la réalisation de modélisations hydrauliques et la cartographie des surfaces concernées par des venues dangereuses ou non dangereuses. Ces emprises sont comparées par rapport au scénario d'inondation naturelle.

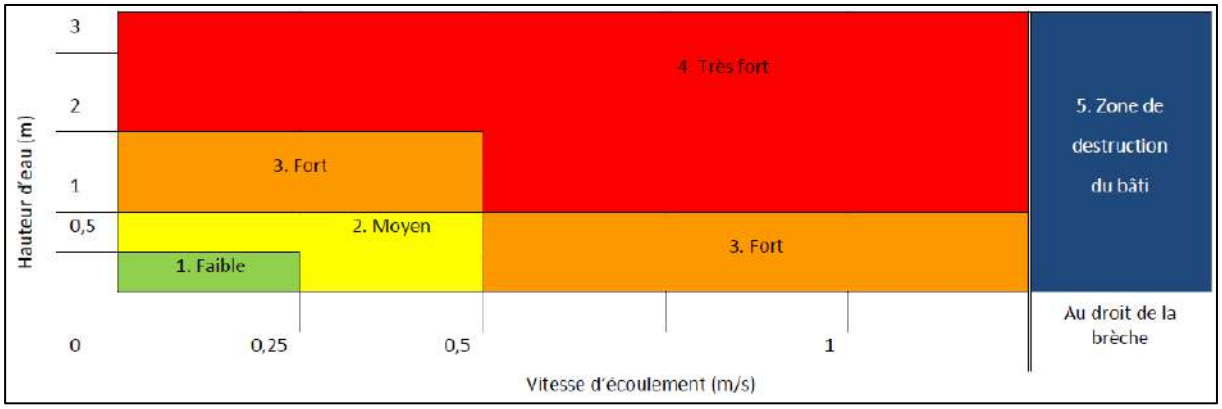

Figure 21. Matrice de définition de l'aléa hydraulique (source : EDD des digues de classe A - DREAL Centre)

b) Zone de Dissipation d'Energie (ZDE) et hauteur de charge

La largeur de la ZDE est considérée comme correspondant à l'emprise particulièrement exposée en cas de rupture de la digue.

Les risques de rupture de digue et les aléas qu'elle entraine résultent d'une différence de charge hydraulique de part et d'autre de l'ouvrage.

Les caractéristiques d'une ZDE sont les suivantes :

- largeur de la ZDE est estimée à 100 fois la hauteur de charge (Hx100) ;
- la charge utilisée correspond au niveau de protection de l'ouvrage avec prise en compte des remous, côté val. Les remous réduisent la charge hydraulique à laquelle serait soumis l'ouvrage ;
- absence de ZDE si la charge est inférieure à 1 m ou si le coefficient de Bligh (rapport de largeur du pied de digue par la hauteur de charge) est supérieur à 50.

La formule pour calculer la zone de dissipation d'énergie est la suivante :

L = 100 x [hauteur d'eau en Loire pour le niveau de protection (point 7)] – [le maximum entre la cote de pied de digue du côté val (point 6) ou hauteur d'eau du remous dans le val (point 8)]

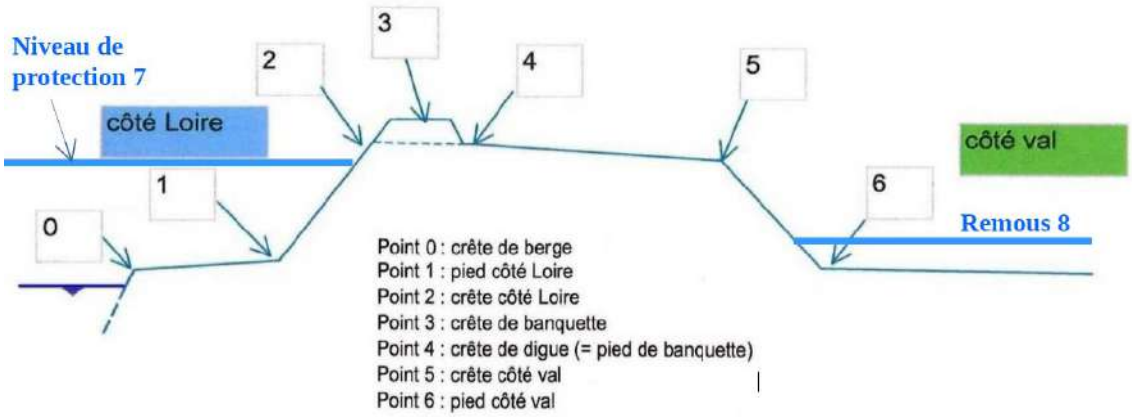

Figure 22. Profil caractéristique des digues et points singuliers (source : Note de présentation du PPRI de la Loire)

Figure 23. Illustration de la Zone de Dissipation de l'Energie (source : Services de l'Etat)

Les critères de définition de la Zone de Dissipation de l'Energie retenus à l'échelle du bassin Loire-Bretagne et utilisés dans le cadre du PPRI de la Loire indiquent notamment l'absence de ZDE correspondant au risque de rupture dans le cas où la hauteur de charge sur l'ouvrage est inférieure à 1 m.

Pour l'élaboration des scénarios d'effacement partiel de la digue dans le cadre de la présente étude, on définit pour objectif d'assurer une charge hydraulique inférieure à 0,50 m à tout moment et sur l'ensemble du linéaire de l'ouvrage. On considèrera que l'ouvrage est stable et ne présente pas de risque de rupture si ce critère est respecté.

Des hauteurs de charge comprises entre 0,50 et 1,00 m sont acceptables ponctuellement dans la mesure où ce critère ne génère pas de zone de sur-aléa destructeur lié au risque de rupture.

4.3.3. Evènements considérés

Conformément aux discussions menées avec le maître d'ouvrage et les services de l'Etat, il est retenu d'évaluer les « sur-aléas » des scénarios pour 3 évènements :

- Crue sollicitant l'ouvrage : on retient la crue correspondant au niveau de protection T=20 ans ;
- Crue atteignant la crête de l'ouvrage : on retient la crue de première surverse T=200 ans correspondant au niveau de protection apparent ;
- Crue dépassant le niveau de la crête de l'ouvrage : on retient la crue T=500 ans.

La crue de période de retour 2 ans a également été étudiée afin de caractériser les premières venues d'eau pour les crues fréquentes.

4.4. Scénarios d'étude

Il est prévu d'étudier 5 scénarios :

1. **Scénario de régularisation :** maintien, confortement et entretien de la digue ;
2. **Scénario d'effacement total de l'ouvrage :** arasement de la digue sur l'ensemble de son linéaire jusqu'au niveau du TN ;
3. **Scénario de mise en transparence partielle (option 1)** : ouvertures ou passages busés à définir au stade esquisse ;
4. **Scénario de mise en transparence partielle (option 2) :** ouvertures ou passages busés à définir au stade esquisse ;
5. **Scénario de mise en transparence partielle (option 3) :** ouvertures naturelles à l'occasion de création de brèches lors d'un futur épisode de crue.

4.5. Scénario d'arasement étudié dans l'EDD

L'étude de dangers présente la simulation effectuée concernant l'arasement du tronçon transversal amont de la levée (PK 0 au PK 1600), pour une crue d'occurrence 200 ans.

Cette simulation est comparée avec les simulations de la situation actuelle et du scénario 1 de défaillance (rupture sur 200 mètres).

Il résulte de cette comparaison, que les niveaux d'eau atteints le long de la digue sont les mêmes en situation de défaillance qu'avec le tronçon arasé, mais qu'ils sont obtenus plus tôt dans la situation arasée. Seule la cinétique d'inondation diffère. L'étude de dangers précise qu'avec la transparence de la levée, le val commence à s'inonder à partir d'une crue décennale.

Au droit de l'enjeu représentatif des Grèves, pour une crue d'occurrence 200 ans, les eaux impactent l'enjeux environ 6 heures après le début d'inondation du val. Dans le cas du scénario 1, cet enjeu est touché en moins d'une heure après le déclenchement de la brèche. Il est à remarquer que, en cas de transparence, le domaine des Grèves est submergé à partir d'une crue de la Loire d'occurrence 50 ans.

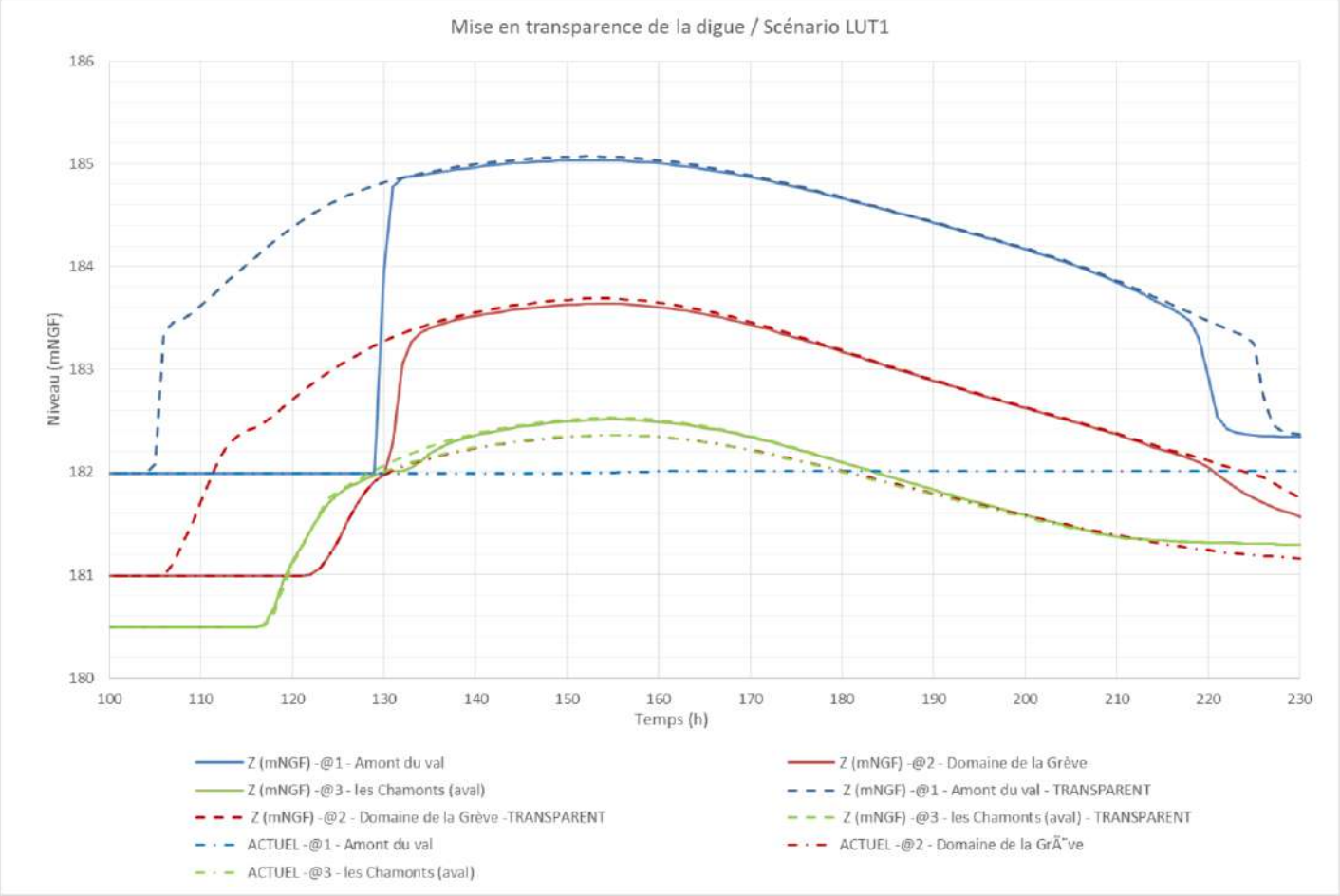

Figure 24. Limnigrammes des différentes situations en différents endroits de la digue pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

4.6. Identification des secteurs propices pour la mise en transparence

La figure suivante présente les niveaux d'eau obtenus pour différentes occurrences de crues ainsi que la cote de crête et la cote de pied de l'ouvrage.

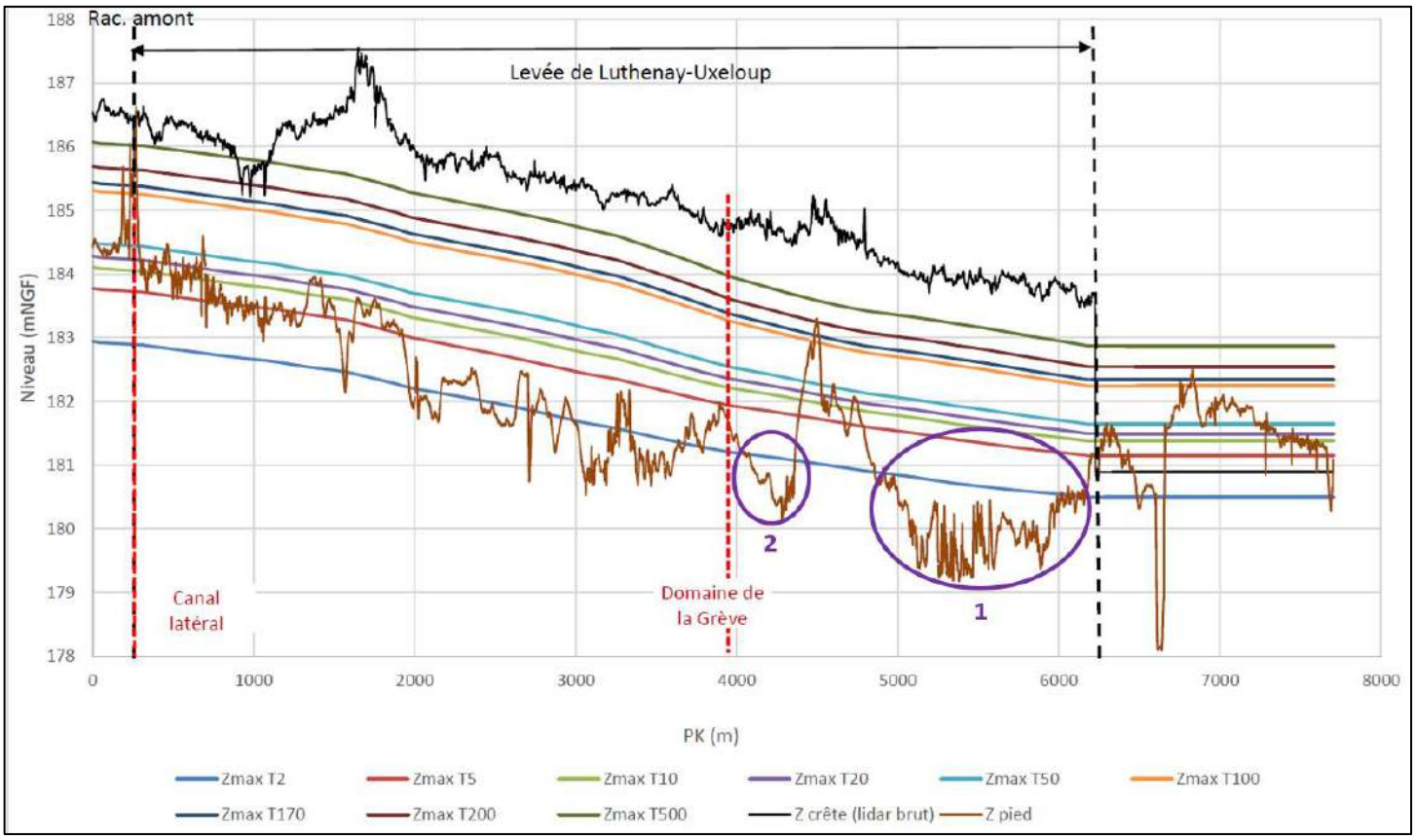

Figure 25. Lignes d'eau et profils en long de la crête et du pied de digue (Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

Les zones 1 et 2 entourées ci-dessus constituent des zones potentiellement intéressantes pour la mise en transparence de la digue car il s'agit de zones basses du pied de digue côté val. La réalisation d'arasements de la digue sur ces secteurs peut permettre de favoriser l'entrée d'eau dans le val par remous aval pour des crues fréquentes. Ce mode d'inondation du val par l'aval limite les vitesses d'écoulement et les contraintes érosives dans le val, notamment au droit des enjeux (domaine de la Grève)

Au regard de l'analyse des lignes d'eau, il ressort que la seule ouverture de la digue sur sa partie aval ne permettra pas d'atteindre la transparence hydraulique sur l'ensemble du val. Il apparait nécessaire de permettre également des entrées d'eau sur les tronçons amont de la digue.

Sur la base du diagnostic des zones sensibles de l'EDD et de l'analyse du profil en long, les secteurs suivants semblent propices pour localiser les aménagements de mise en transparence :

- Pk1000 : secteur sensible et pied de digue bas permettant des entrées d'eau à partir de Q5 ;
- Pk2150, Pk2500, PK3050 : secteurs sensibles et pied de digue bas permettant des entrées d'eau à partir de Q2.

5. Modélisation hydraulique

5.1. Présentation du modèle hydraulique et adaptations

5.1.1. Caractéristiques du modèle existant

Dans le cadre de l'élaboration du PPRI de la Loire secteur compris entre Nevers et Saint-Léger-des-Vignes, un modèle hydraulique bidimensionnel a été réalisé par Antea Group entre 2014 et 2016 à l'aide du logiciel de modélisation TELEMAC-2D.

a) Emprise du modèle

Le périmètre du modèle hydraulique comprend :

- le lit majeur de la Loire à partir du pont de la RD196 sur la commune de Cronat jusqu'à l'amont de Nevers (limite aval située sur la commune de Saint-Eloi) ;
- Le lit majeur de la rivière l'Aron entre le pont de la RD169 et la confluence avec la Loire au niveau du bourg de Saint-Léger-des-Vignes.

L'emprise du modèle est de 291,2 km² et le maillage triangulaire présente les caractéristiques générales suivantes :

- Lit mineur : mailles de 20 m de côté ;
- Zones urbaines (bourgs de Decize, Saint-Léger-des-Vignes et Imphy) : mailles de 10 m de côté ;
- Ouvrages digues : mailles de 5 m de côté ;
- Piles de pont : mailles de 1 m de côté en périphérie des piles de pont (vide) ;
- Transition vers des mailles de 200 m de côté en limite d'emprise du modèle.

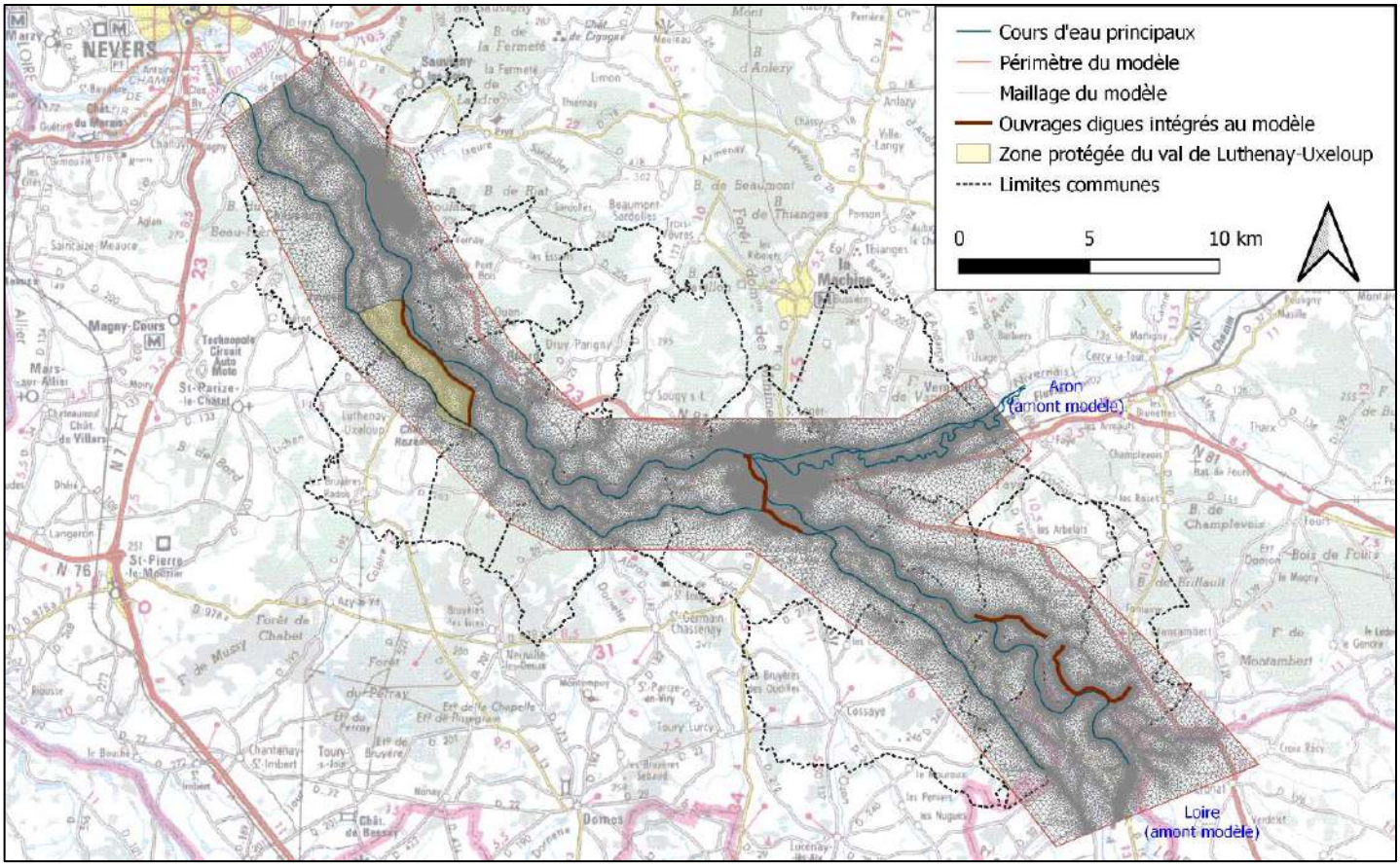

Figure 26. Emprise et maillage du modèle hydraulique du PPRI et localisation des ouvrages de digue (Source : PPRI de la Loire, Antea Group)

b) Ouvrages

Les ouvrages suivants ont été intégrés au modèle hydraulique :

- Digues :
  - Digue de Saint-Hilaire-Fontaine (rive droite) ;
  - Digue de Charrin (rive droite) ;
  - Digue de Decize (rive gauche) ;
  - **Digue de Luthenay-Uxeloup (rive gauche) ;**
- Ponts (prise en compte des piles en intégrant des vides au maillage) :
  - Pont RD978a sur la Vieille Loire à Decize ;
  - Pont RD205 sur l'Aron à Champvert ;
  - Pont RN81 sur l'Aron à Decize ;
  - Pont Rd172 sur la Loire à Imphy ;
- Seuils :
  - Barrage sur la Loire à Decize.

c) Données topographiques

La topographie du modèle a été définie à partir des données suivantes :

- Lit mineur : définition de la bathymétrie par interpolation de profils en travers des cours d'eau ;
- Topographie du lit majeur :
  - Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la vallée de la Loire depuis Vitry-sur-Loire en amont, jusqu'à Nevers en aval ;
  - MNT de la vallée de l'Aron jusqu'à l'amont du Pont de Champvert ;
  - Plan topographique d'Imphy réalisé dans le cadre de la déviation de la RN81 ;
  - Complément avec la BD Alti au pas 25 m pour les secteurs non couverts par le MNT ;
- Ouvrages sur la Loire et l'Aron : utilisation des profils d'ouvrages fournis ;
- Digues : utilisation des données de cotes de crêtes fournies et du MNT.

d) Hydrogrammes de crues

Les débits de pointe et les hydrogrammes de crues considérés dans le cadre des modélisations du PPRI sont présentés ci-après. A noter que la crue 20 ans n'a pas été étudiée dans le cadre du PPRI. L'hydrogramme correspondant a été défini par pondération sur la base de l'hydrogramme de la crue cinquantennale.

Tableau 8. Débits de pointe d'injection en amont du modèle hydraulique du PPRI pour les crues de 2 ans à 1 000 ans (Source : Antea Group)

Période de retour	Débit de pointe Loire amont modèle	Débit de pointe Aron amont modèle	Débit de pointe total à DECIZE
2 ans	1 000 m³/s	100 m³/s	1 100 m³/s
5 ans	1 330 m³/s	170 m³/s	1 500 m³/s
10 ans	1 530 m³/s	170 m³/s	1 700 m³/s
15 ans	1 680 m³/s	170 m³/s	1 850 m³/s
20 ans	1 780 m³/s	220 m³/s	2 000 m³/s
30 ans	1 880 m³/s	220 m³/s	2 100 m³/s
50 ans	2 090 m³/s	220 m³/s	2 310 m³/s
70 ans	2 390 m³/s	250 m³/s	2 640 m³/s
100 ans	2 940 m³/s	360 m³/s	3 300 m³/s
170 ans	3 150 m³/s	400 m³/s	3 550 m³/s
200 ans	3 480 m³/s	440 m³/s	3 920 m³/s
500 ans	4 020 m³/s	530 m³/s	4 550 m³/s
1000 ans	4 390 m³/s	660 m³/s	5 050 m³/s

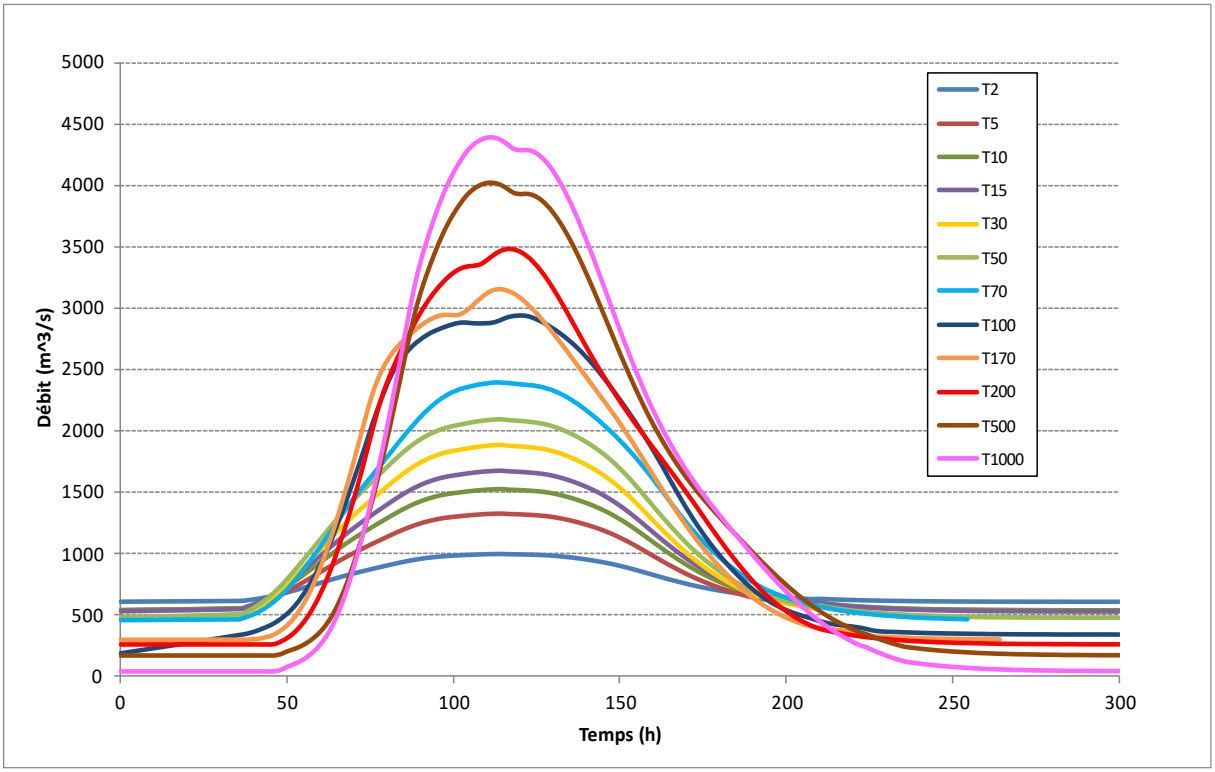

Figure 27. Hydrogrammes d'injection du débit de la Loire issus de la modélisation du PPRI (Source : Antea Group)

5.1.2. Vérification et adaptation du modèle aux besoins de l'étude

Une vérification des données du modèle a été réalisée au regard des objectifs de l'étude qui nécessite notamment un traitement au droit de la digue de Luthenay-Uxeloup.

Les données topographiques ont notamment été comparées aux données du RGE Alti de l'IGN au pas 1 m obtenu par LIDAR et disponible sur l'ensemble de l'emprise du modèle (précision < 0,3m).

5.1.2.1. Vérification du maillage

La résolution du maillage du modèle est jugée satisfaisante pour les besoins de l'étude. Le tracé de la digue de Luthenay-Uxeloup est intégré au maillage sous la forme d'une ligne de contrainte avec des mailles de 5 m de côté de part et d'autre de l'axe de la digue sur une largeur d'environ 80 m.

La structure du maillage du modèle du PPRI est donc conservée telle quelle.

5.1.2.2. Vérification de la topographie

- **Lit mineur**

Au droit du lit mineur de la Loire, les altitudes données par le RGE Alti sont supérieures à celles intégrées au MNT du modèle PPRI. Cela s'explique car les données LIDAR du RGE Alti indiquent l'altitude de la ligne d'eau lors de l'acquisition des données et non la bathymétrie du fond du cours d'eau.

La bathymétrie intégrée au modèle du PPRI s'appuie sur une interpolation à partir de profils en travers du cours d'eau. Pour décrire le lit mineur, la bathymétrie issue du modèle du PPRI est conservée.

- **Bancs de sable**

Des variations d'altitude de l'ordre de 20 à 50 cm entre le RGE Alti et les données utilisées dans le modèle du PPRI sont relevées sur les bancs de sables situés au droit du val de Luthenay. Cela peut s'expliquer soit par la mobilité et l'évolution de ces bancs de sables ou une évolution de la végétation, soit en raison d'un niveau d'eau élevé entrainant la submersion de ces zones lors de l'acquisition des données LIDAR.

Etant donnée l'amplitude limitée des variations observées, les données altimétriques du modèle du PPRI sont conservées pour ces secteurs.

- **Plans d'eau et canal**

Un plan d'eau (zone d'extraction de granulats) est présent en rive droite au droit du val de Luthenay. Les valeurs du LIDAR du RGE Alti au droit du plan d'eau sont inférieures aux valeurs utilisées dans le modèle PPRI. Les valeurs retenues dans le modèle ont été prises au niveau de plein bord du plan d'eau pour éviter de considérer cet espace comme un espace potentiel de stockage. Ces valeurs sont conservées.

De la même manière, au droit du canal latéral à la Loire à l'extrémité sud-est de la digue de Luthenay, les altitudes issues du RGE Alti sont inférieures à celles retenues dans le modèle PPRI. Il semble que ces dernières ont également été définies pour le niveau de plein bord du canal. Les valeurs du modèle PPRI sont conservées au droit du canal.

- **Crête de digue**

Une comparaison des altitudes modélisées en 2016 sur chaque point de part et d'autre de la crête de digue avec l'altitude en crête de digue obtenue extraite du RGE Alti donne des résultats cohérents. Il est à noter que les altitudes en crête de digue du modèle PPRI ont été ajustées à partir de profils de la crête fournis dans le cadre de l'Etude de Dangers. Ces valeurs sont conservées.

- **Pied de digue**

Il a été relevé des écarts d'altitude sur un secteur du pied de digue côté Loire (au niveau du PK5000). Sur cette zone boisée, les altitudes du RGE Alti sont globalement inférieures à celles utilisées dans le modèle du PPRI. Cette différence peut s'expliquer par l'influence de la végétation sur la qualité des mesures. Les données LIDAR récentes donnent plus précisément l'altitude du sol sous la végétation. La topographie sur ce secteur a été actualisée avec les données du RGE Alti.

- **Zones urbanisées**

Pour les zones urbaines denses (Imphy et Decize), le modèle du PPRI intègre l'altitude des bâtiments dans le maillage afin de se placer en situation sécuritaire en considérant que les bâtiments sont fermés en crue. Le volume qui serait donc compris à l'intérieur des bâtiments est ainsi réparti à l'extérieur.

Par souci de cohérence, cette hypothèse est conservée dans le cadre de la présente étude. Les données altimétriques du modèle PPRI sont conservées au droit des zones urbaines.

Zones périphériques

Certains secteurs du lit majeur de l'Aron ne sont pas couverts par les MNT utilisés pour le modèle du PPRI ; la topographie sur ces secteurs avait été complétée à partir de la BD Alti au pas 25m. La topographie sur ces secteurs a été actualisée avec les données du RGE Alti.

5.1.2.3. Calage du modèle

Les paramètres de calage du PPRI ont été conservés tels quels afin d'assurer la cohérence des résultats avec ceux issus des modélisations du PPRI.

5.2. Définition et modélisation des scénarios d'étude au stade esquisse

5.2.1. Scénario 1 : régularisation de la digue existante

a) Principe

Dans ce scénario, la digue de Luthenay-Uxeloup est conservée sur l'ensemble de son linéaire. Ses caractéristiques dimensionnelles sont inchangées.

b) Méthode

Ce scénario correspond à la situation actuelle intégrée au modèle du PPRI. Les résultats des modélisations hydrauliques issues du PPRI sont valides pour évaluer ce scénario et sont exploités tels quels.

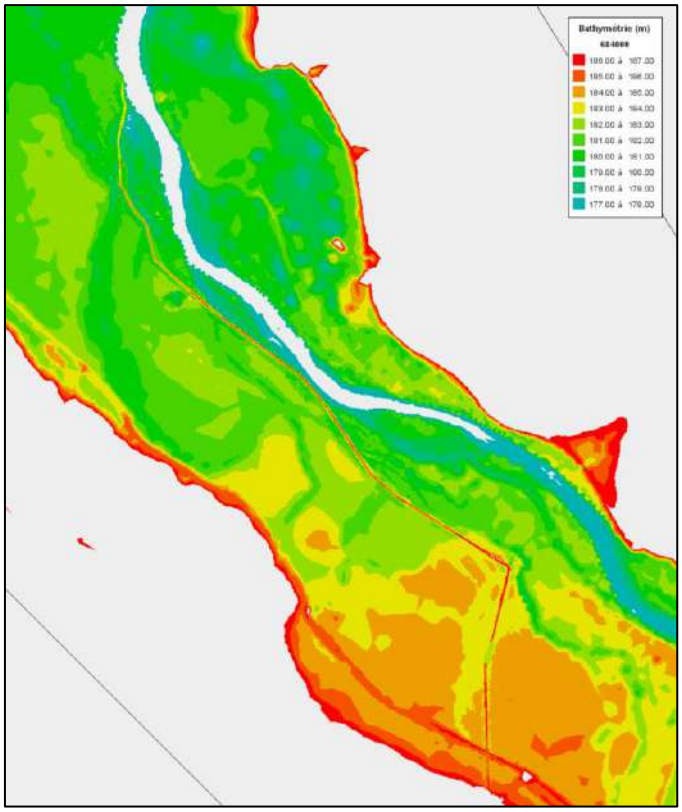

Figure 28. : Topographie de la digue actuelle intégrée au modèle (scénario 1)

5.2.2. Scénario 2 : effacement total de l'ouvrage

a) Principe

La solution étudiée dans ce paragraphe consiste à araser la digue de Luthenay-Uxeloup sur l'ensemble de son linéaire. Bien que cette solution de mise en transparence ne soit pas réaliste d'un point de vue pratique, son étude permet de préciser le rôle exact joué par la digue et permet d'apprécier les caractéristiques du scénario d'inondation naturelle. Ce scénario sert de référence pour apprécier les performances de mise en transparence dans le cas de la solution d'arasement partiel.

b) Méthode

Le modèle hydraulique bidimensionnel a été repris au droit de la digue de Luthenay-Uxeloup. La topographie a été abaissée au niveau du terrain naturel sur l'ensemble du linéaire de la digue. Le MNT du terrain naturel au droit de la digue a été reconstitué par interpolation des altitudes du TN entre les pieds de digue coté Loire et côté val.

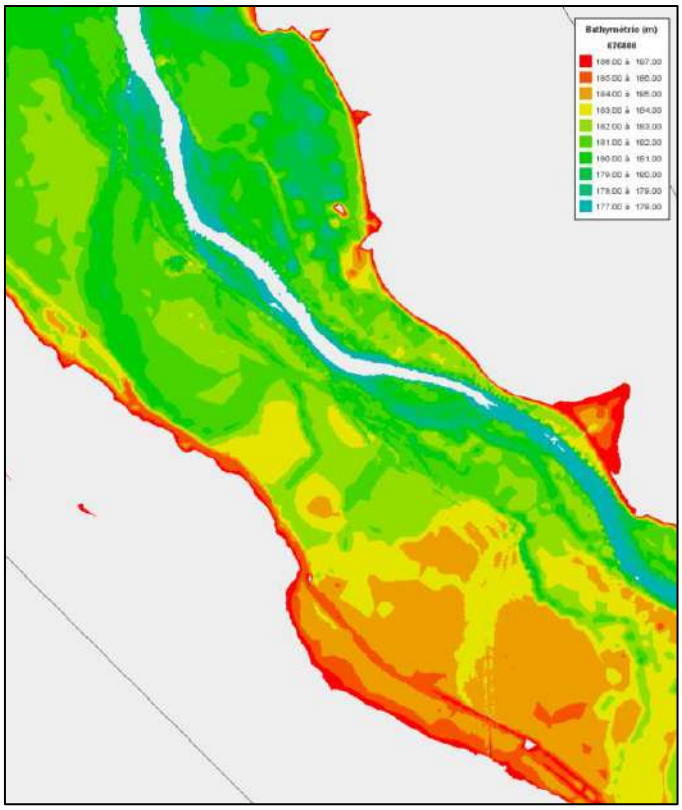

Figure 29. Arasement total de la digue intégré à la topographie du modèle (scénario 2)

5.2.3. Scénarios 3 et 4 : mise en transparence partielle

a) Principe

La solution étudiée dans ce paragraphe consiste à créer des ouvertures dans la digue existante pour permettre les venues d'eau.

Dans la mesure où la digue existante n'a pas d'usage particulier en dehors de la protection contre les inondations et qu'il n'y a pas de circulations en crête de digue, il n'est pas envisagé la réalisation de dalot ou d'ouvrage particulier visant à maintenir ou permettre la circulation en crête. La solution étudiée porte sur l'arasement ponctuel de la digue jusqu'au niveau du terrain naturel.

Les ouvertures à réaliser étudiées présentent les caractéristiques suivantes :

- Largeur unitaire par ouverture : 100 ml ou 200 ml ;
- Hauteur d'arasement : arasement jusqu'au niveau du terrain naturel et restitution d'un profil équilibré entre les pieds de digue coté Loire et coté val ;
- Traitement des extrémités des ouvertures :
  - Pente de talus de 2H/1V ;
  - En option afin de fixer les largeurs d'ouverture : protection des talus par des enrochements ;
- Dévégétalisation sur l'emprise arasée.

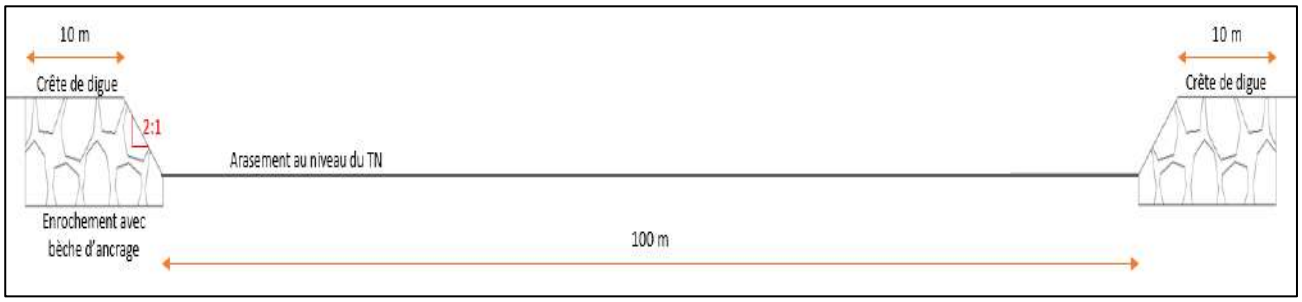

Figure 30. Coupe de principe des ouvertures à réaliser - vue de face (Source : Antea Group)

Le nombre d'ouvertures à réaliser et leur localisation sont définis par analyse des modalités d'écoulement pour le scénario naturel (arase totale) afin d'identifier : les points bas, les chenaux préférentiels d'écoulements par lesquels s'écoulement les premières eaux, ainsi que les portions d'ouvrage soumises à des contraintes érosives fortes susceptibles de subir des dégradations en priorité.

Une première analyse du scénario naturel a permis de définir une première variante d'arasement partiel (scénario 3) pour laquelle les modélisations hydrauliques des crues étudiées ont été réalisées. Ce premier scénario d'arasement partiel (option 1) comporte 3 ouvertures de la digue de 100 ml chacune.

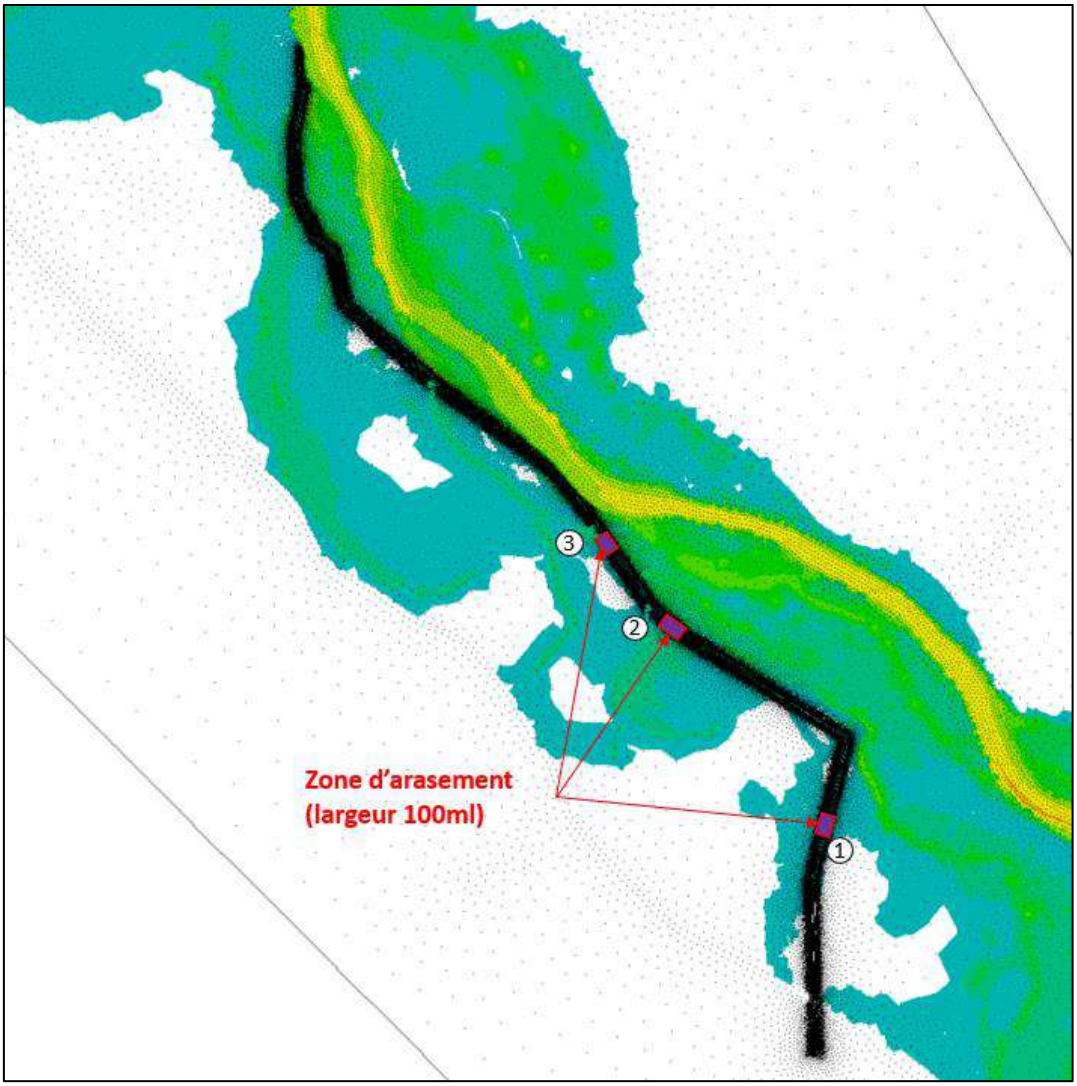

Figure 31. Cartographie des venues d'eau dans le val pour le scénario d'inondation naturelle et localisation des ouvertures retenues pour le scénario 3 (arasement partiel option 1) (Source : Antea Group)

Le scénario d'arasement partiel (option 1) défini ne permet pas d'atteindre les objectifs fixés en matière d'équilibre des hauteurs de charge de part et d'autre de l'ouvrage sur l'ensemble du linéaire. En particulier, il apparait nécessaire d'ajouter une ouverture sur la portion aval de l'ouvrage ainsi que d'agrandir l'ouverture n°1 à l'amont ou d'ajouter une ouverture supplémentaire sur la portion amont.

De manière itérative sur la base des résultats de modélisation, des modifications successives ont été ajoutées au scénario afin d'atteindre les objectifs définis en termes.

- de différence de charge (objectif : Δh <= 0,50 m et limite stricte : Δh <= 1,00 m)
- de minimisation des venues d'eau dangereuses par rapport au scénario d'inondation naturelle.

Plusieurs scénarios intermédiaires ont ainsi été étudiés pour aboutir à la définition du **scénario 4 d'arasement partiel optimisé**. Ce scénario d'arasement partiel optimisé (option 2) comporte quatre ouvertures de la digue de 100 ml chacune et une ouverture de 200 ml (cf. Figure 33) :

- (1) Ouverture de 200 ml sur la portion de digue amont perpendiculaire à la Loire (pk1000). Ce secteur correspond à un axe d'écoulement préférentiel et était identifié dans l'étude de dangers comme un secteur nécessitant des travaux de reconstruction d'ouvrage, de priorité 1 ;

- (2) Ouverture de 100 ml localisée environ au pk2500. Il s'agit d'une zone de venues d'eau préférentielles ;
- (3) Ouverture de 100 ml implantée dans l'extrados d'un méandre de la Loire au pk3300 (secteur soumis à des contraintes liées à des courants sécants) ;
- (4) Ouverture de 100 ml implantée au pk4250 environ. Cette zone correspond à un ancien chenal naturel. L'ouverture permet de rétablir une connexion potentielle avec le réseau hydrographique du val et constitue un vecteur de ressuyage préférentiel ;
- (5) Ouverture de 100 ml implantée environ au pk5150. Cette ouverture favorise l'équilibrage des charges sur la partie aval en favorisant la remontée du remous aval. Elle peut également constituer un vecteur de ressuyage.

Le scénario 4 constitue la variante d'arasement partiel optimisée résultant de l'étude plusieurs scénarios intermédiaires permettant d'atteindre les objectifs de mise en transparence fixés. Dans la suite de l'analyse, seuls les résultats des modélisations hydrauliques et des impacts relatifs à ce scénario sont présentés concernant la solution d'arasement partiel.

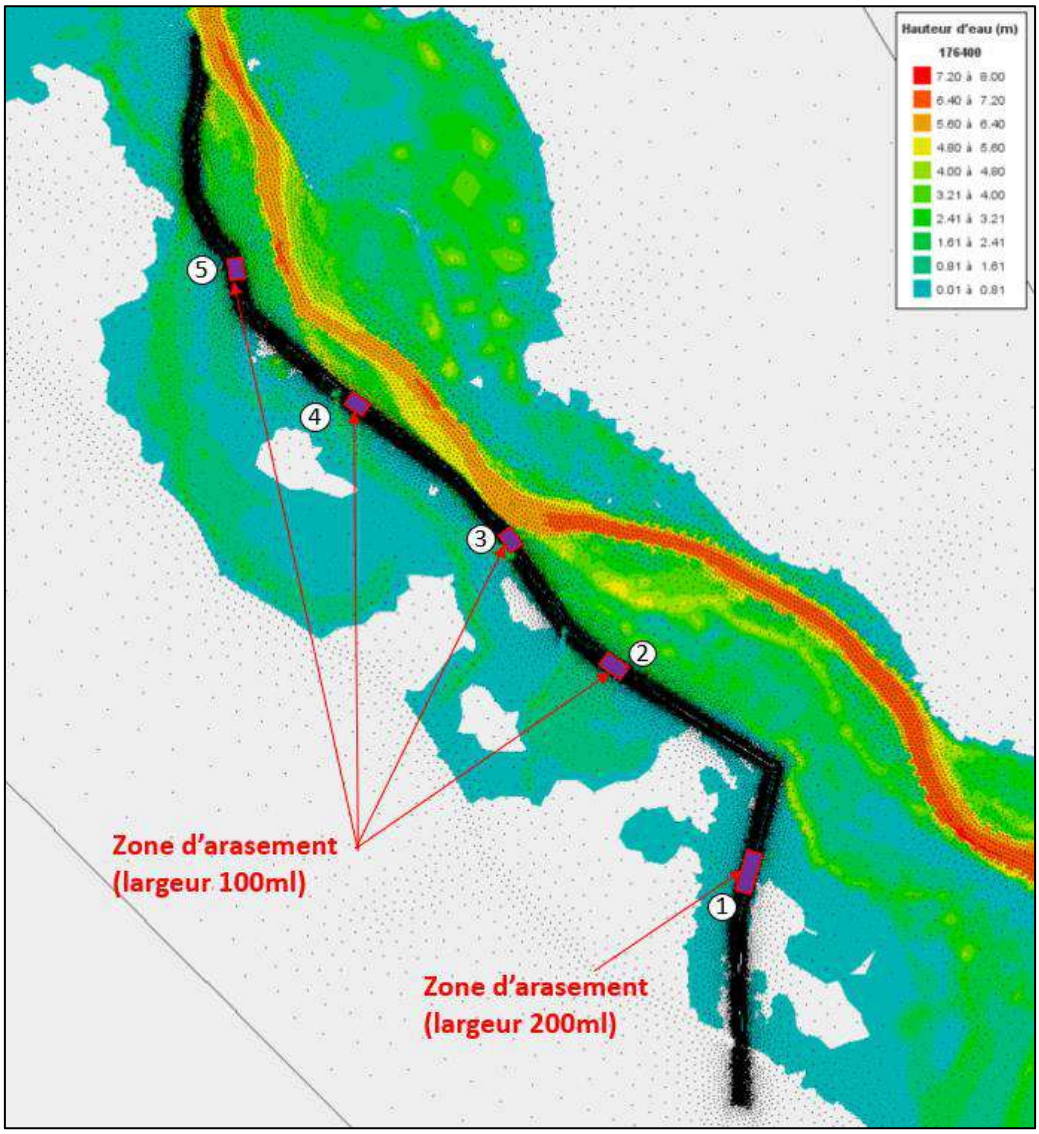

Figure 32. Cartographie des venues d'eau pour le scénario d'arasement partiel optimisé et localisation des ouvertures retenues (Source : Antea Group)

b) Méthode

La topographie associée au modèle a été reprise au droit de la digue pour intégrer les zones d'arasement étudiées. Sur l'emprise de chacune des zones d'arasement (longueur de 100 m ou 200 m et largeur comprise entre les deux pieds de digue), les valeurs altimétriques ont été remplacées par celles définies dans le scénario d'arase totale afin de reconstituer le niveau du terrain naturel.

Les autres portions de digue laissées en place ne sont pas modifiées.

5.2.4. Scénario 5 : création naturelle de brèches lors d'une future crue

a) Principe

Dans ce scénario, la digue de Luthenay-Uxeloup est physiquement conservée, mais n'est plus entretenue car elle n'est plus considérée comme un système d'endiguement, mais comme un remblai en lit majeur désormais. Son état aura donc tendance à se dégrader, se végétaliser, à être colonisée par des animaux fouisseurs, etc. Sa tenue face aux crues aura ainsi tendance à diminuer au cours du temps.

Lors d'une future crue, le remblai pourrait ainsi être ouvert par des brèches. Au fil du temps et des crues survenant, ces brèches pourraient s'élargir au fur et à mesure, voir créer de nouveaux lieux de brèches.

Le scénario ici retenu est l'ouverture concomitante des 2 brèches étudiées dans le cadre de l'étude de dangers.

b) Méthode

Les deux brèches issues de l'étude de dangers ont été implémentée grâce à un fichier dédié. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 9. Caractéristiques de brèches s'ouvrant pour les 4 scénarios de crue étudiés (Source : Antea Group)

Crue simulée	Localisation de la brèche	Déclenchement de l'ouverture de la brèche	Durée d'ouverture	Largeur d'ouverture
T2	PK 1000 (PT21)	Pas d'ouverture	3 h	200 m
	PK 3050 (PT62)	Pas d'ouverture	3 h	150 m
T20	PK 1000 (PT21)	T10 (soit 183,84 m NGF)	3 h	200 m
	PK 3050 (PT62)	T10 (soit 182,82 m NGF)	3 h	150 m
T200	PK 1000 (PT21)	T100 (soit 185,48 m NGF)	3 h	200 m
	PK 3050 (PT62)	T100 (soit 184,34 m NGF)	3 h	150 m
T500	PK 1000 (PT21)	T100 (soit 185,48 m NGF)	3 h	200 m
	PK 3050 (PT62)	T100 (soit 184,34 m NGF)	3 h	150 m

5.3. Résultats des simulations hydrauliques

Les paragraphes suivants présentent les résultats des simulations hydrauliques réalisées pour les crues 2 ans, 20 ans, 200 ans et 500 ans pour les 4 solutions étudiées (régularisation de l'ouvrage, arasement total, arasement partiel et création naturelle de brèches).

Un atlas cartographique est joint en annexe au présent rapport.

5.3.1. Régularisation de l'ouvrage

Pour la solution de régularisation de l'ouvrage, correspondant à la conservation de la situation actuelle, les aléas sont similaires à ceux caractérisés dans le PPRI.

5.3.1.1. Crue biennale

Pour la crue d'occurrence 2 ans, la digue existante protège le val en empêchant les venues d'eau dans la zone protégée. Pour cette situation de crue, le remous aval de la Loire ne remonte pas à l'intérieur du val. Aucun enjeu humain dans le val n'est inondé.

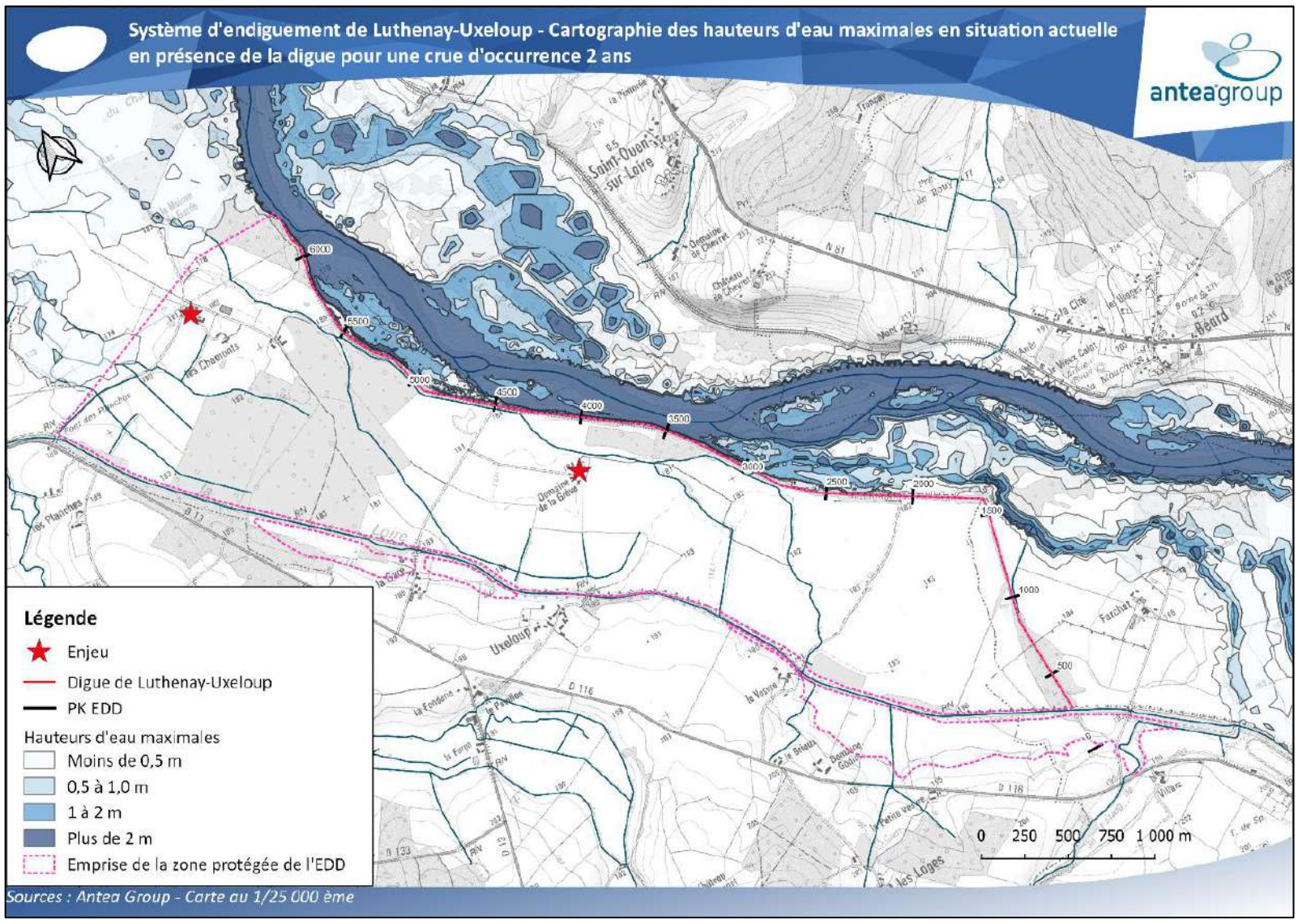

Figure 33. Cartographie des hauteurs d'eau maximales en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group)

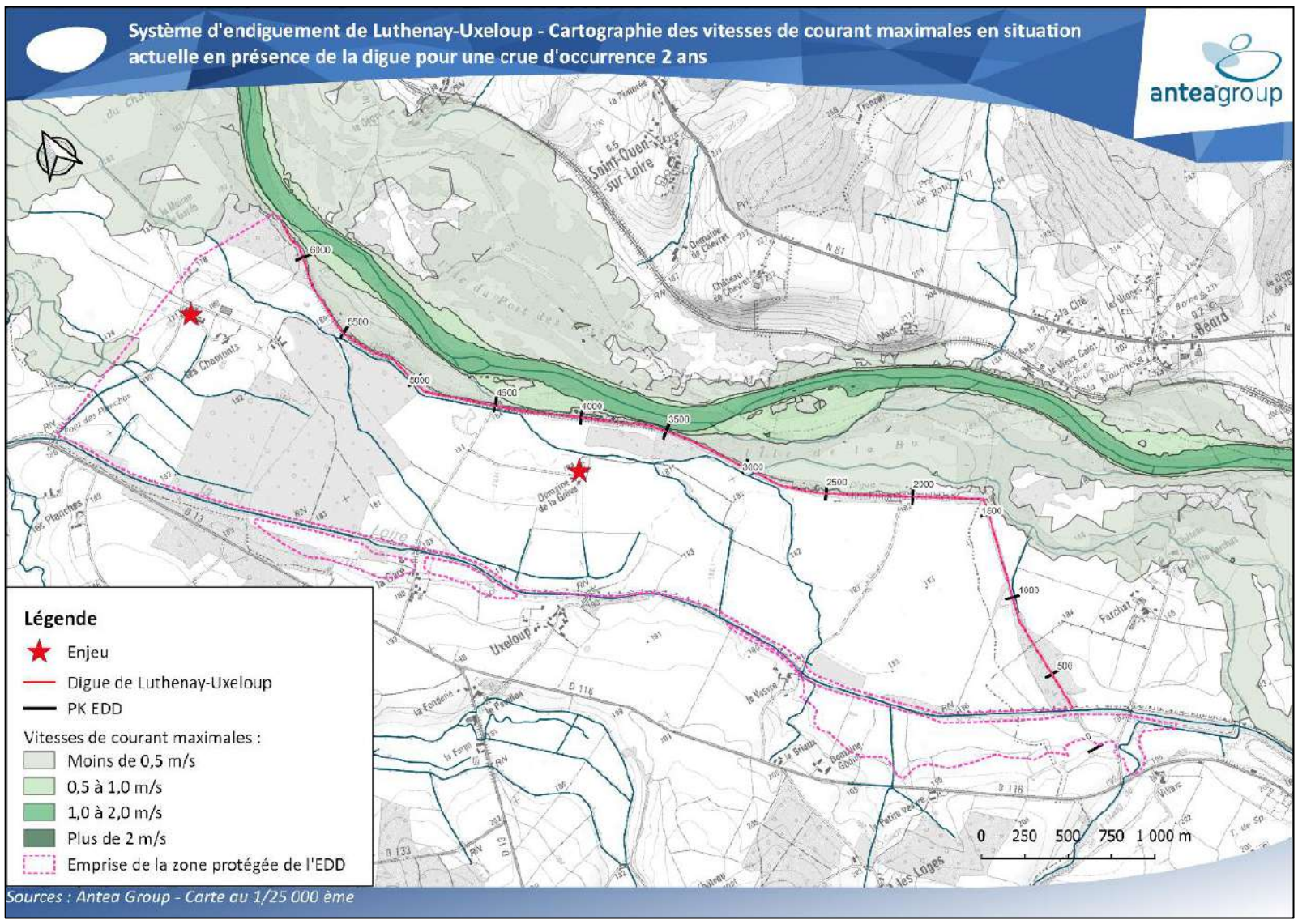

Figure 34. Vitesses d'écoulement maximales en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group)

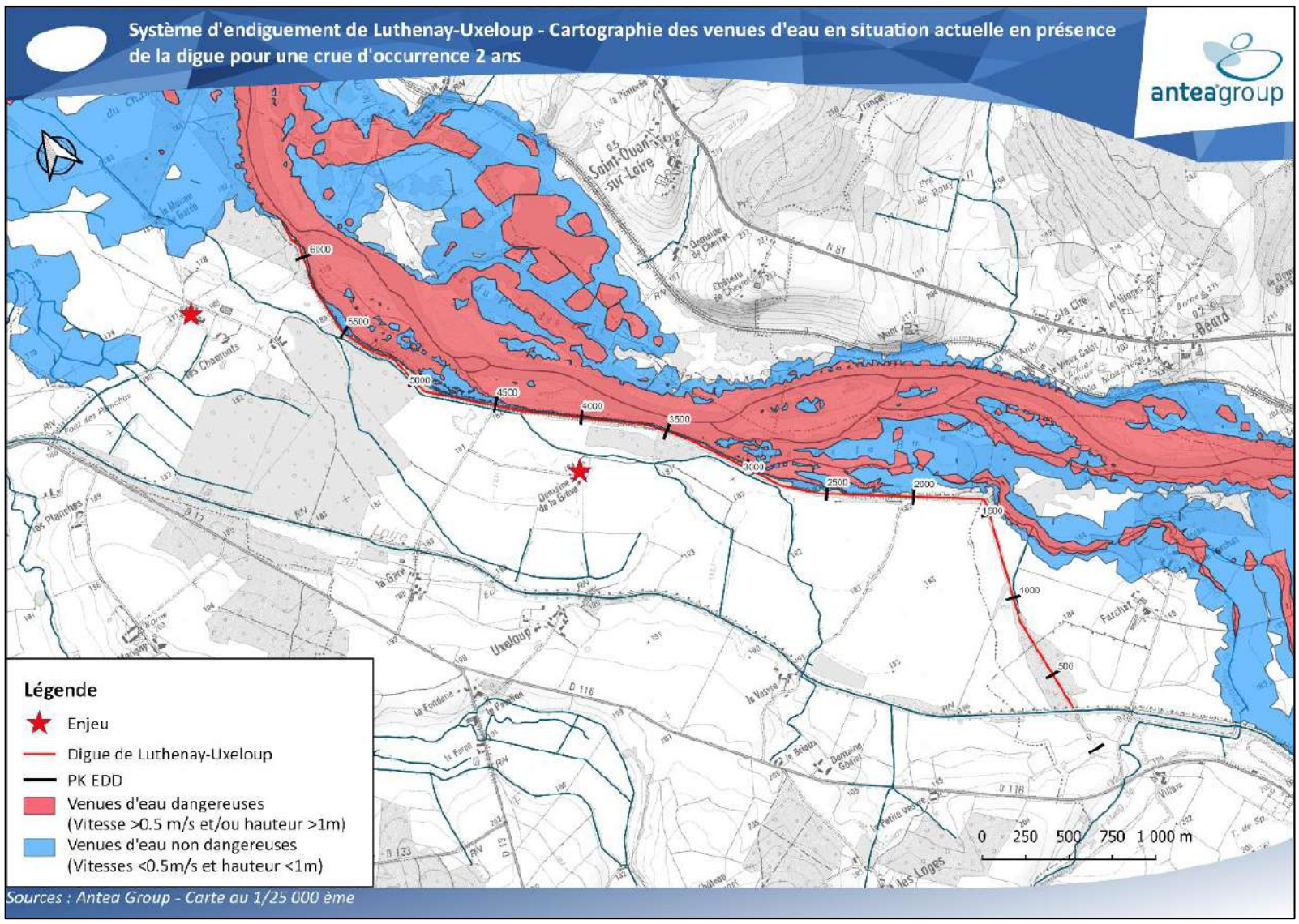

Figure 35. Cartographie des venues d'eau en situation actuelle (digue existante) - crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group)

5.3.1.1. Crue vicennale (niveau de protection)

Pour la crue de période de retour 20 ans, la digue protège la partie amont du val des inondations. En revanche, le remous aval progresse depuis l'aval de la zone protégée et atteint les premiers enjeux humains au niveau du hameau des Chamons. Environ 3 personnes sont susceptibles d'être impactées par des venues d'eau non dangereuses.

Pour rappel, la crue vicennale correspond au seuil à partir duquel il a été déterminé dans l'étude de dangers que certaines portions d'ouvrage ont une probabilité non négligeable de rupture en l'état actuel (< 5%).

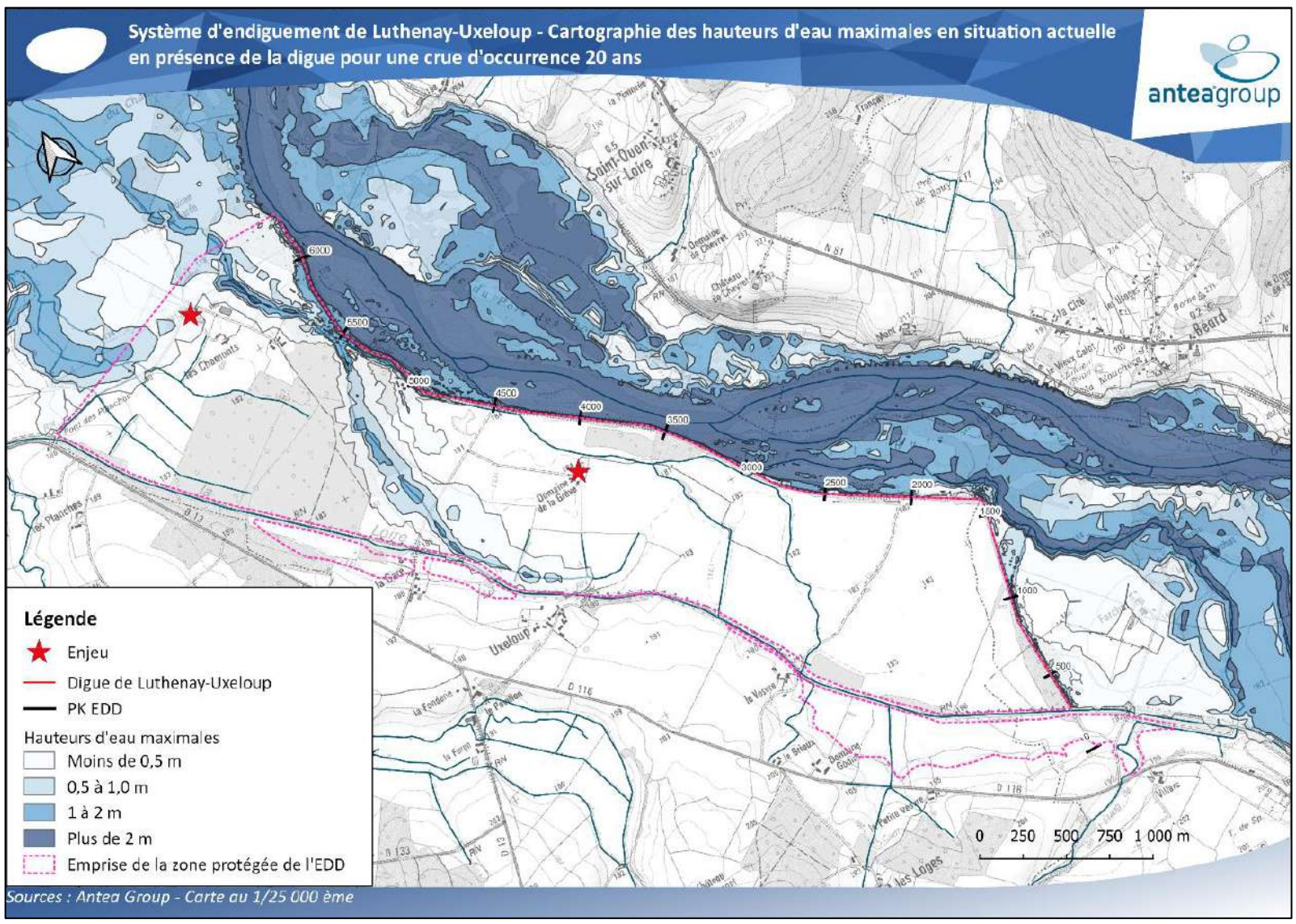

Figure 36. Cartographie des hauteurs maximales en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group)

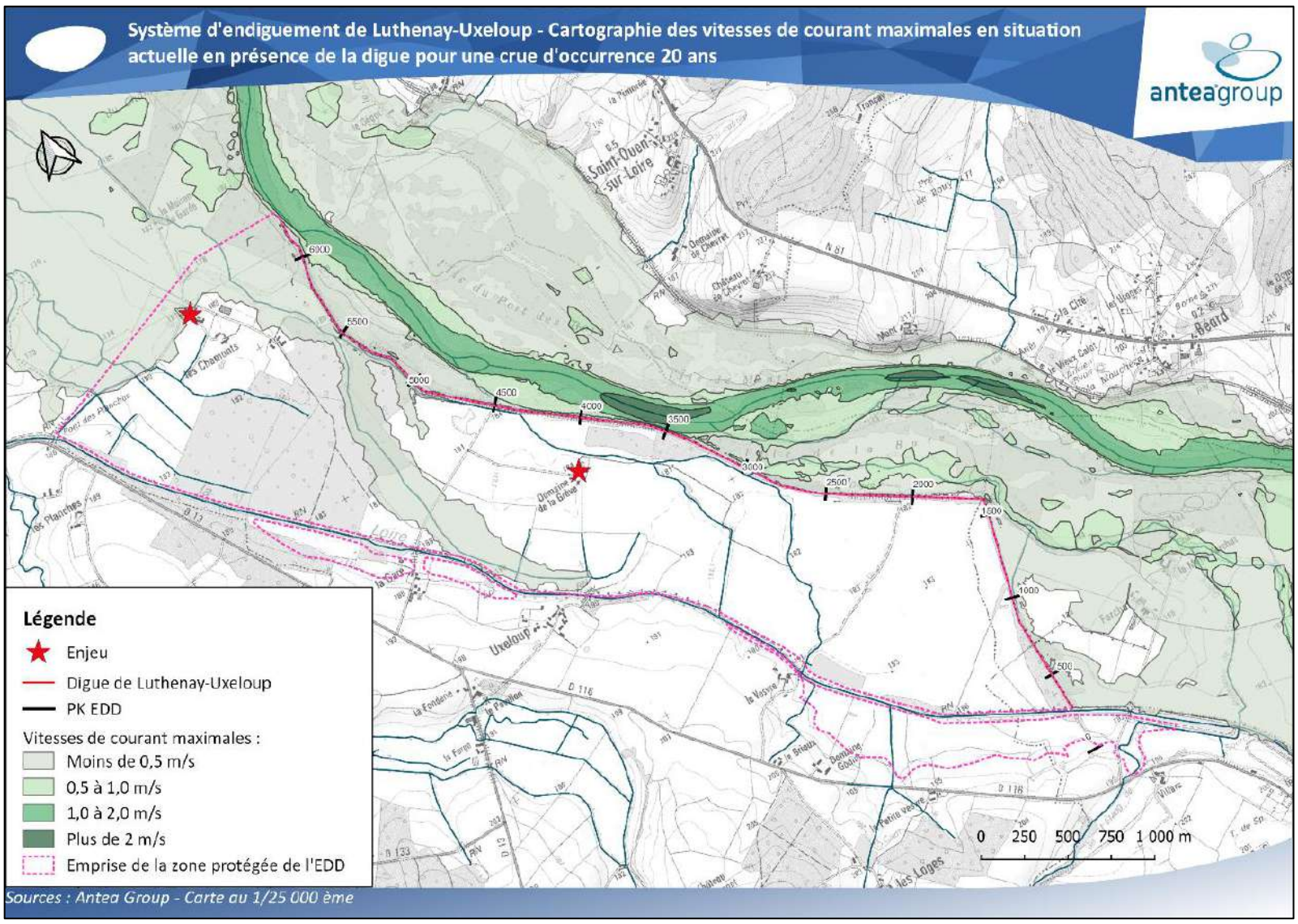

Figure 37. Vitesses d'écoulement maximales en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group)

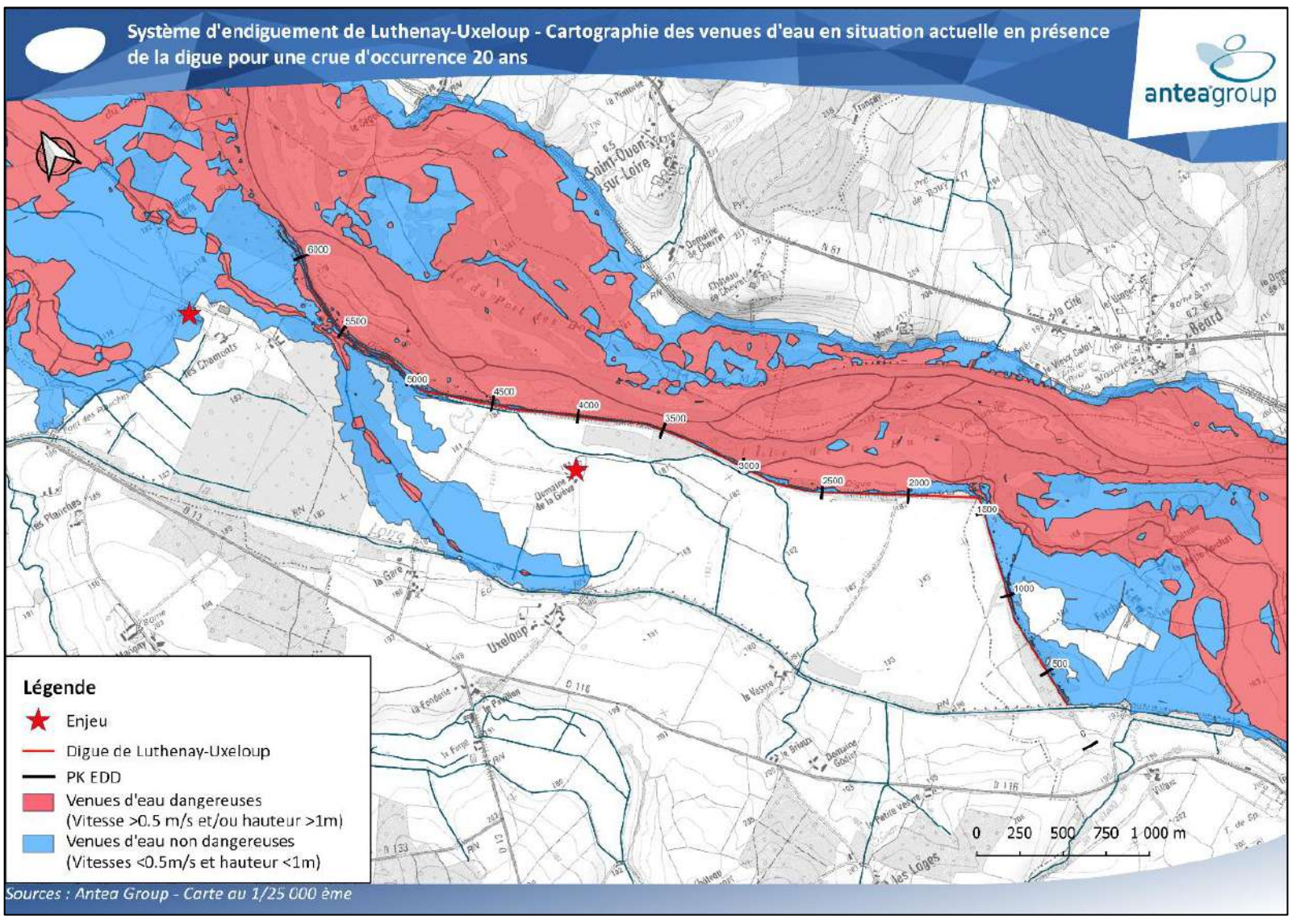

Figure 38. Cartographie des venues d'eau en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group)

5.3.1.1. Crue bicentennale (niveau de protection apparent)

Pour la crue bicentennale, le niveau de la crête de digue est atteint par endroits et entraine des surverses à l'intérieur du val. Le remous aval est important et la quasi-totalité de la zone protégée est inondée.

Toutes les habitations situées au sein du val, aux lieux-dits Les Chamons et Domaine de la Grève, sont impactées par des venues d'eau non dangereuses (11 personnes).

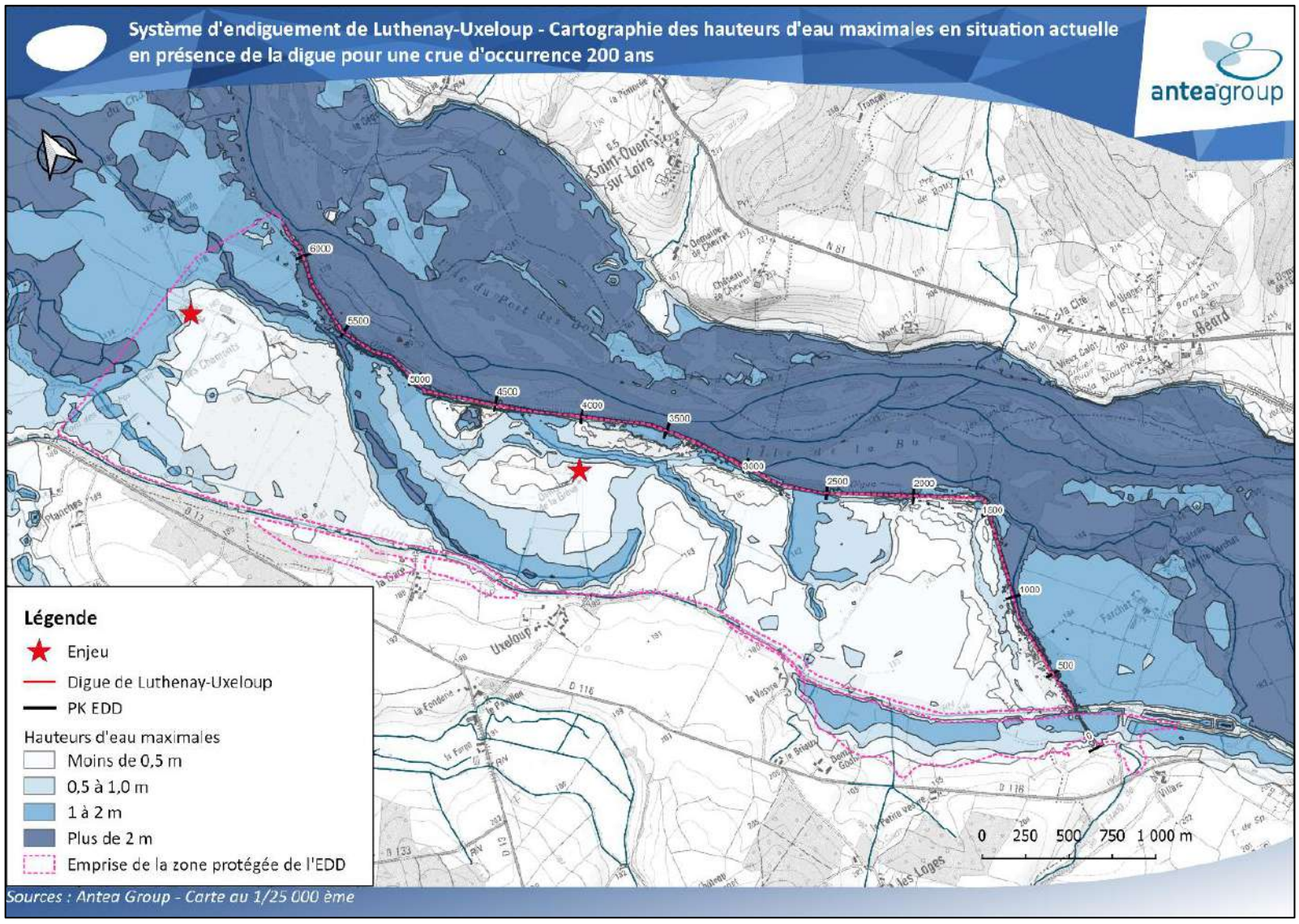

Figure 39. Cartographie des hauteurs maximales en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group)

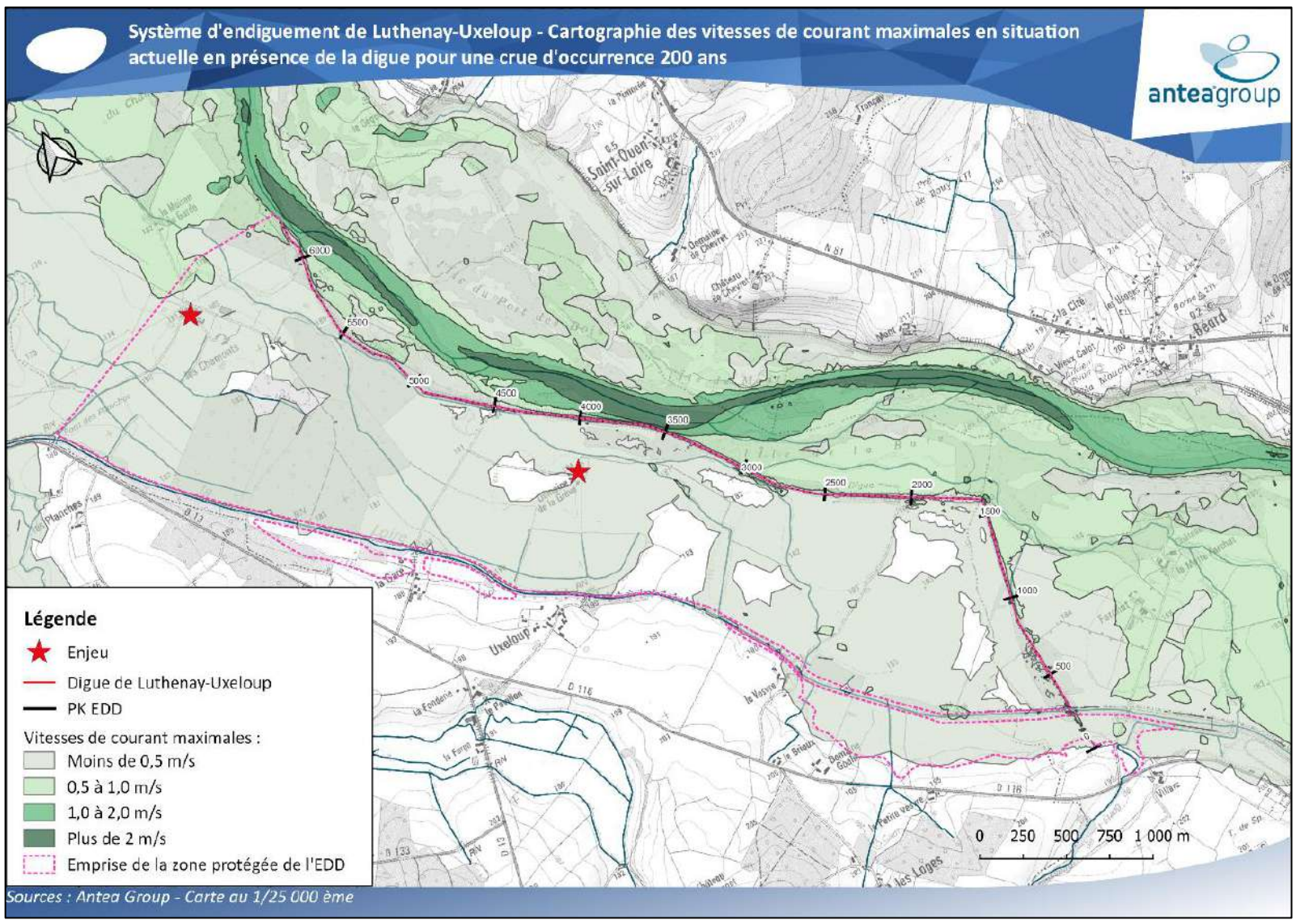

Figure 40. Vitesses d'écoulement maximales en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group)

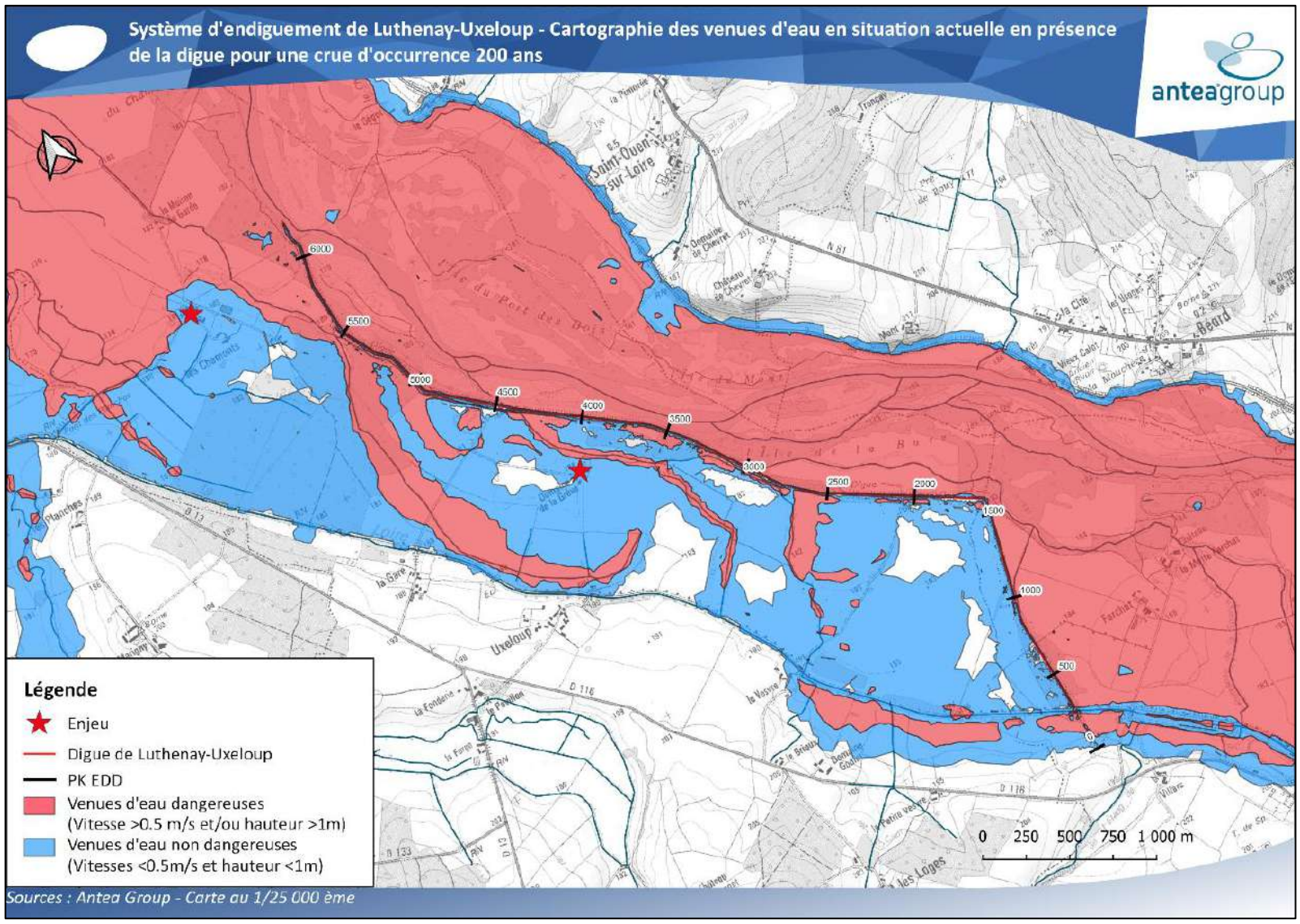

Figure 41. Cartographie des venues d'eau en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group)

Pour la crue 200 ans, correspondant à l'atteinte de la crête d'ouvrage, les hauteurs de charge sont importantes et l'ouvrage peut être exposé à un risque de rupture.

Il a été considéré une zone de dissipation d'énergie en arrière de la digue en cas de brèche pouvant entrainer des destructions. La cartographie de cette zone est reprise de l'étude de dangers et présentée ci-après.

La largeur de la zone de dissipation d'énergie derrière une brèche potentielle est définie en considérant : L = 100 x Δh (Δh : différence d'altitude entre la ligne d'eau pour Q200 et le pied de digue coté val).

L'emprise ainsi impactée par la zone d'effet destructeur du bâti en arrière de la digue est de 69 ha. Aucun bâtiment agricole ou d'habitation n'est atteint par la zone de dissipation d'énergie.

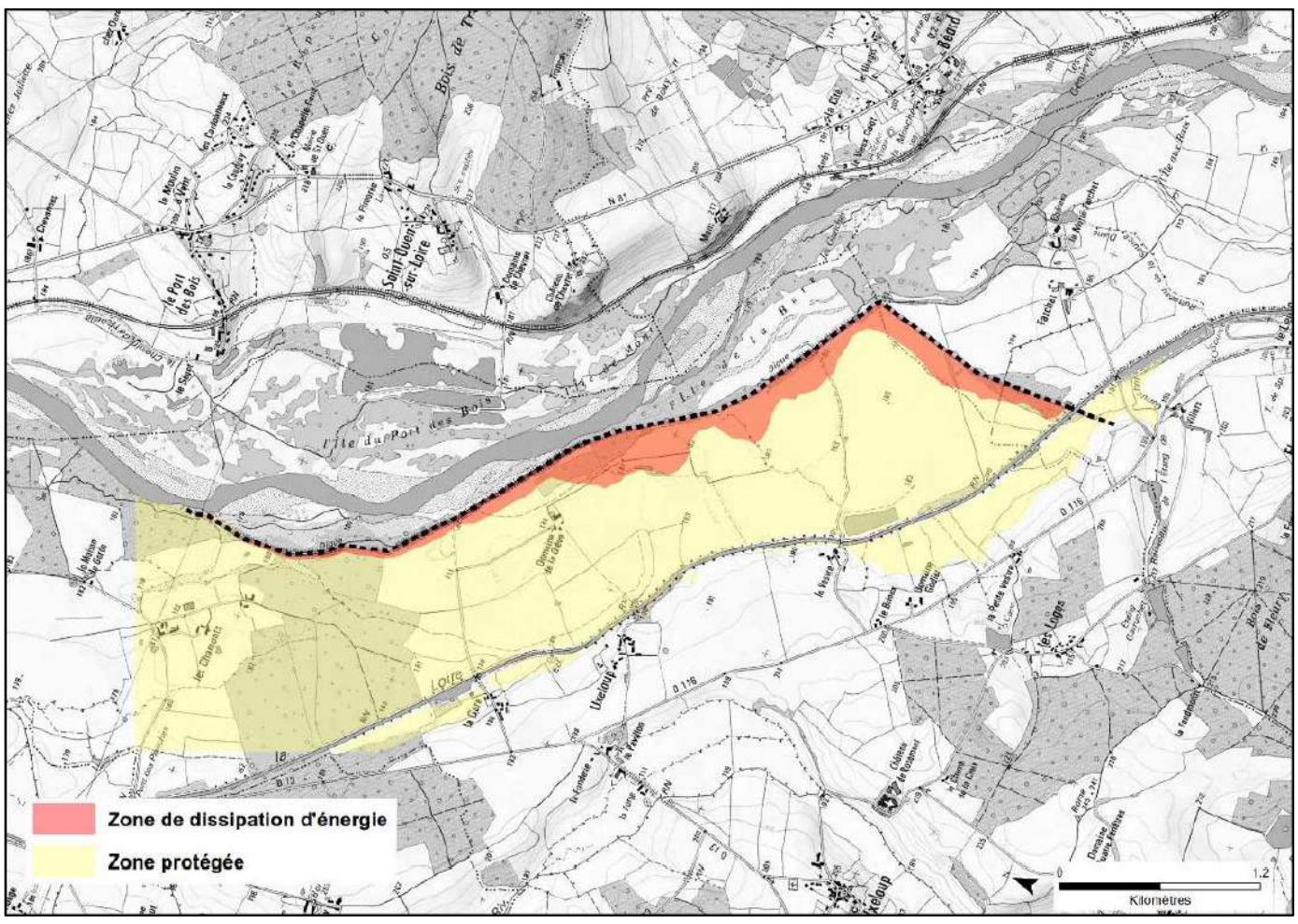

Figure 42. Zone de dissipation d'énergie (ZDE) en arrière de la digue en cas de rupture d'ouvrage (zone d'effet destructeur du bâti) (Source : Etude de dangers, BRL Ingénierie, 2017)

5.3.1.1. Crue 500 ans

Pour la crue d'occurrence 500 ans, des surverses sur la crête de digue se produisent sur de larges portions de l'ouvrage. Le remous aval est important et la totalité de la zone protégée est inondée.

Les vitesses modélisées à l'intérieur du val restent faibles (globalement inférieures à 0,5 m/s), toutefois ce scénario de modélisation ne tient pas compte des éventuelles survitesses pouvant résulter de la formation d'une brèche dans la digue pouvant être provoquée par une surverse.

Toutes les habitations situées au sein du val, aux lieux-dits Les Chamons et Domaine de la Grève, sont impactées par des venues d'eau non dangereuses (11 personnes).

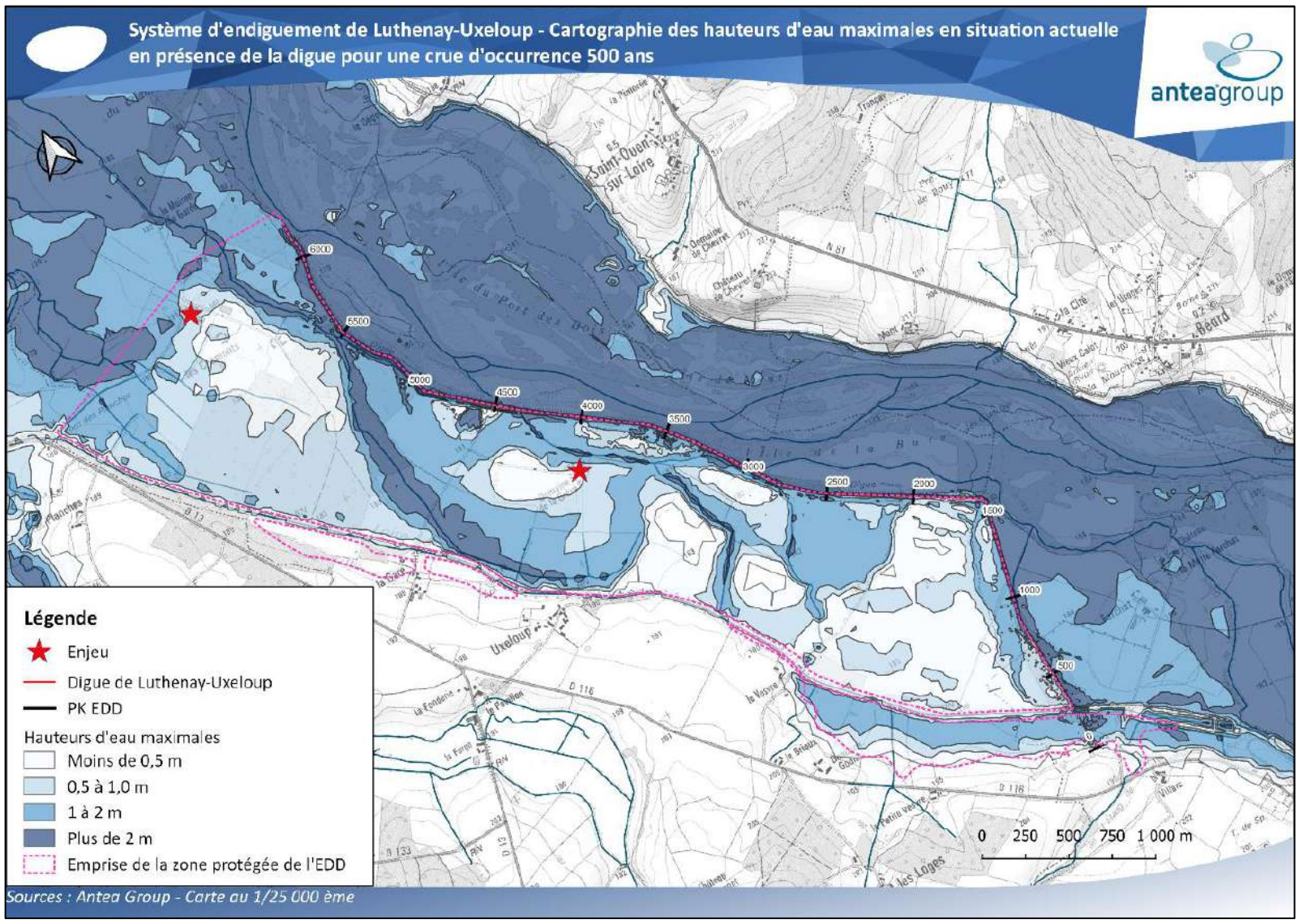

Figure 43. Cartographie des hauteurs maximales en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group)

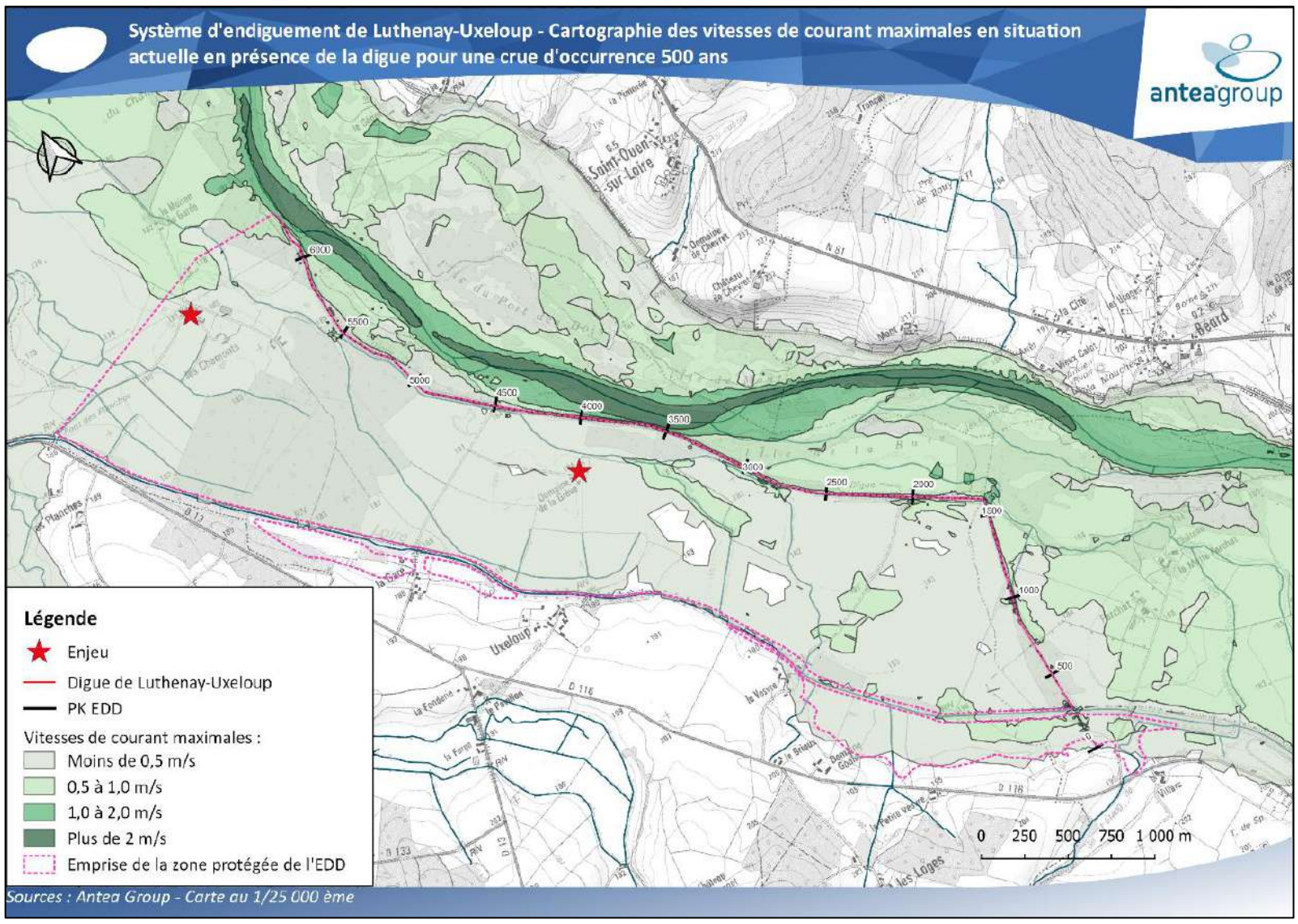

Figure 44. Vitesses d'écoulement maximales en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group)

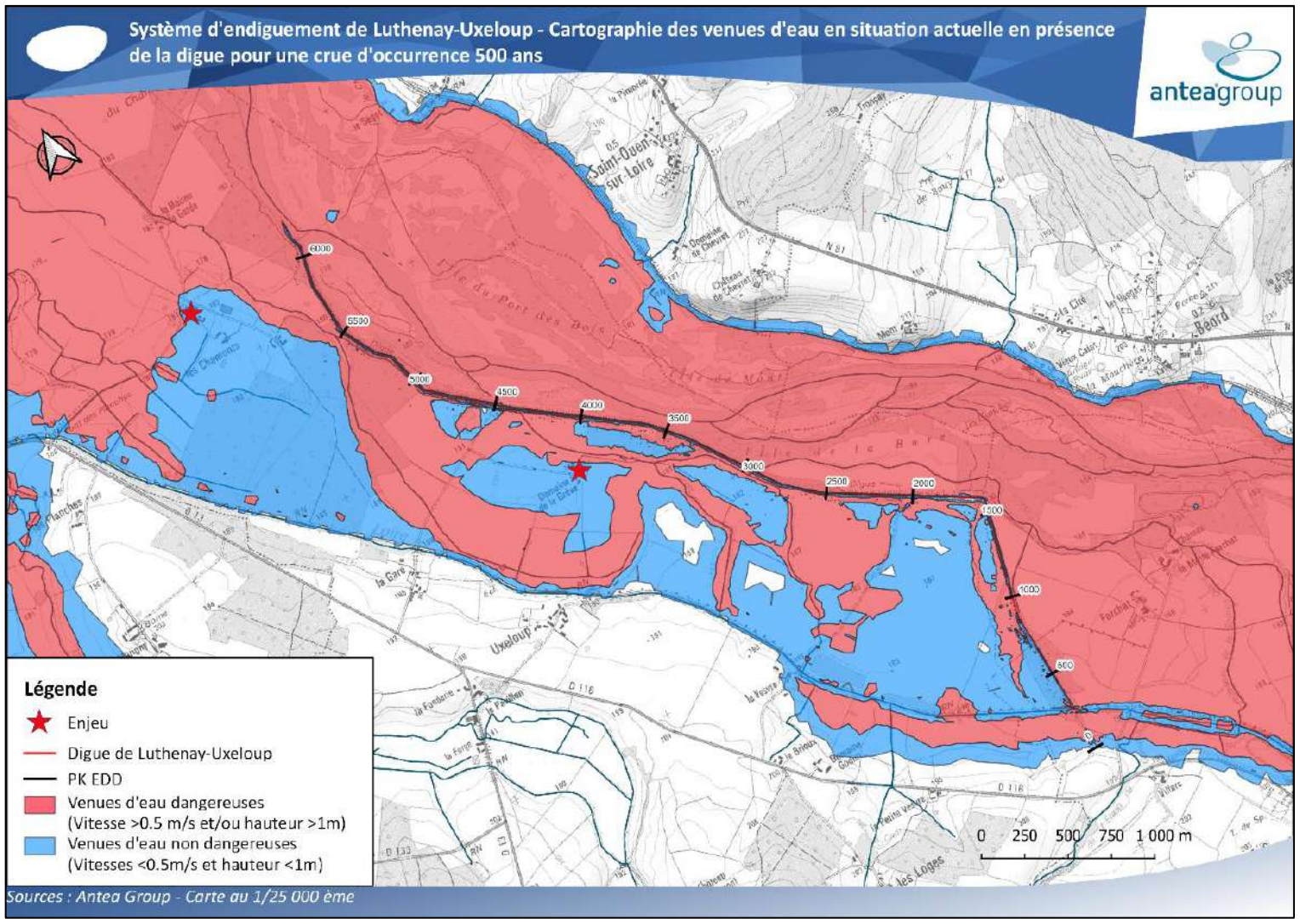

Figure 45. Cartographie des venues d'eau en situation actuelle (digue existante) pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group)

5.3.1. Mise en transparence par effacement total de l'ouvrage

La solution étudiée dans ce paragraphe consiste à araser la digue de Luthenay-Uxeloup sur l'ensemble de son linéaire. Ce scénario sert de référence pour apprécier les performances de mise en transparence dans le cas de la solution d'arasement partiel.

5.3.1.1. Crue biennale

Sans la présence de la digue de Luthenay, les premières venues d'eau sont observées pour la crue 2 ans au niveau des chenaux préférentiels correspondant au réseau hydrographique traversant le val. Les principales venues d'eau constatées sont localisées au niveau de pk2500, pk3000 à pk3300, pk4300 et pk5100 à pk5400.

Au niveau du domaine de la Grève, les deux bâtiments agricoles au nord-est sont les seuls enjeux bâtis impactés. Ils sont localisés en limite de la zone inondable avec des hauteurs d'eau comprises entre 0 et 0,5 m. Les vitesses à l'intérieur du val restent faibles (inférieures à 0,50 m/s).

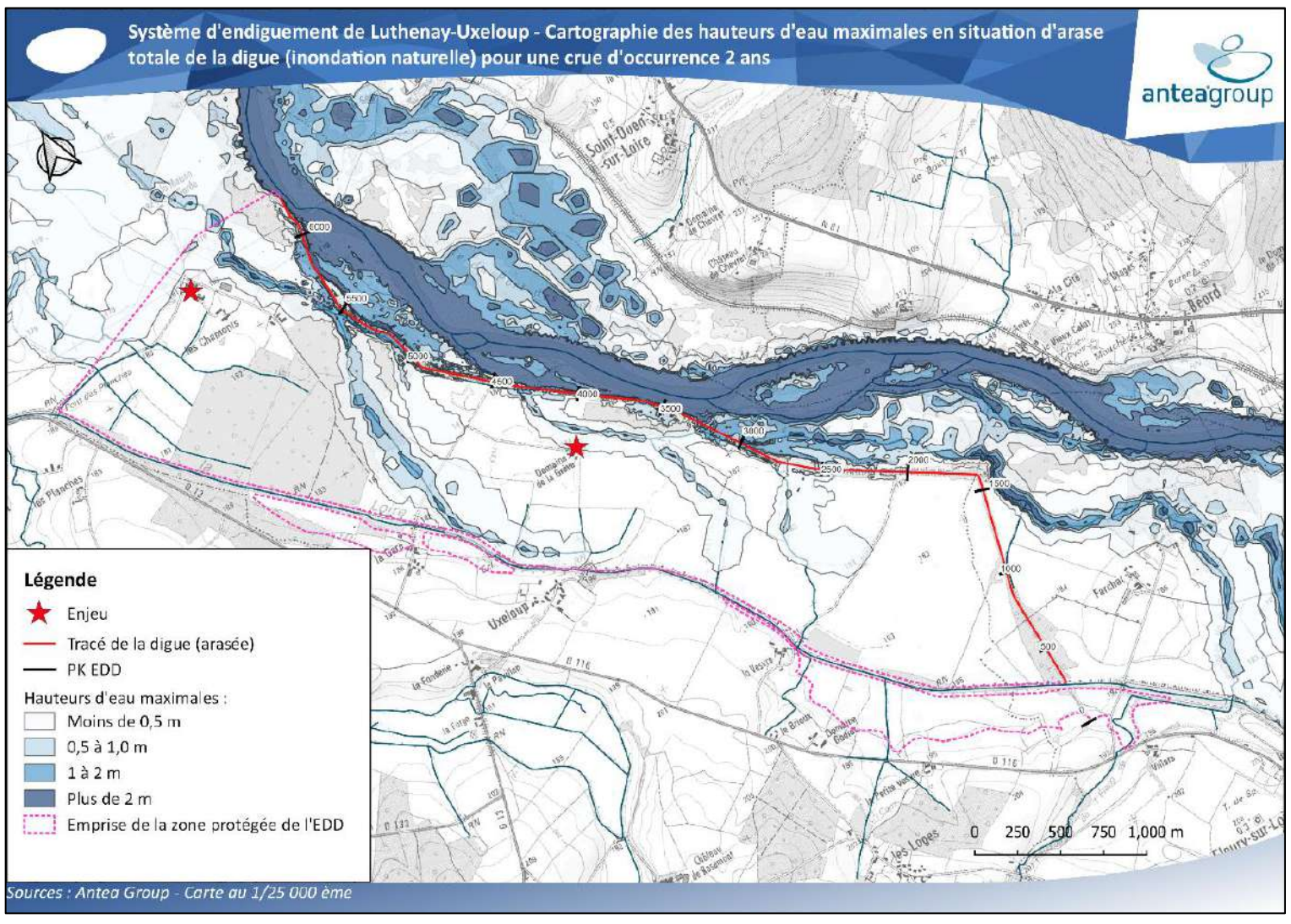

Figure 46. Cartographie des hauteurs maximales en situation d'arase totale pour une crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group)

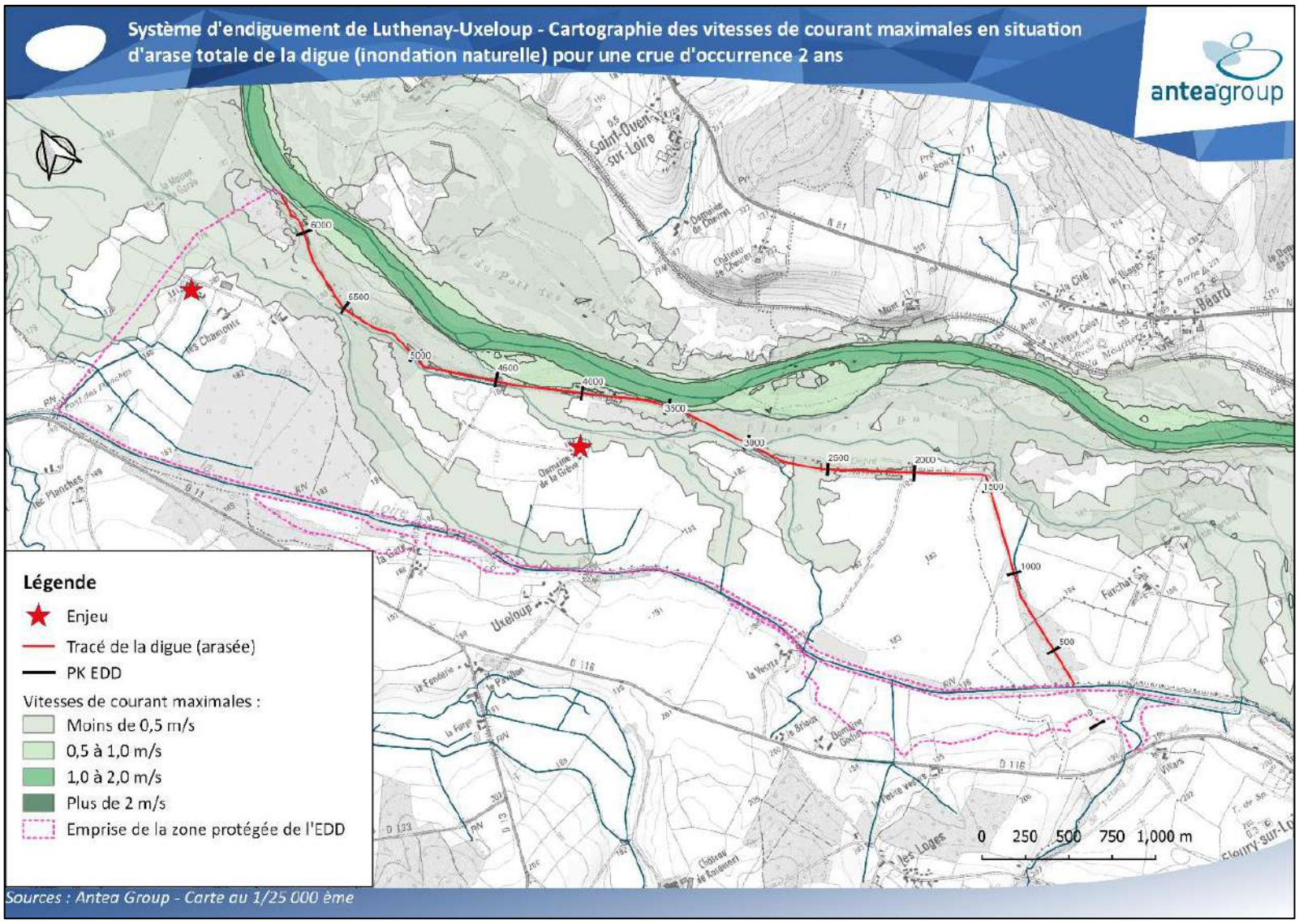

Figure 47. Vitesses d'écoulement maximales en situation d'arase totale pour une crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group)

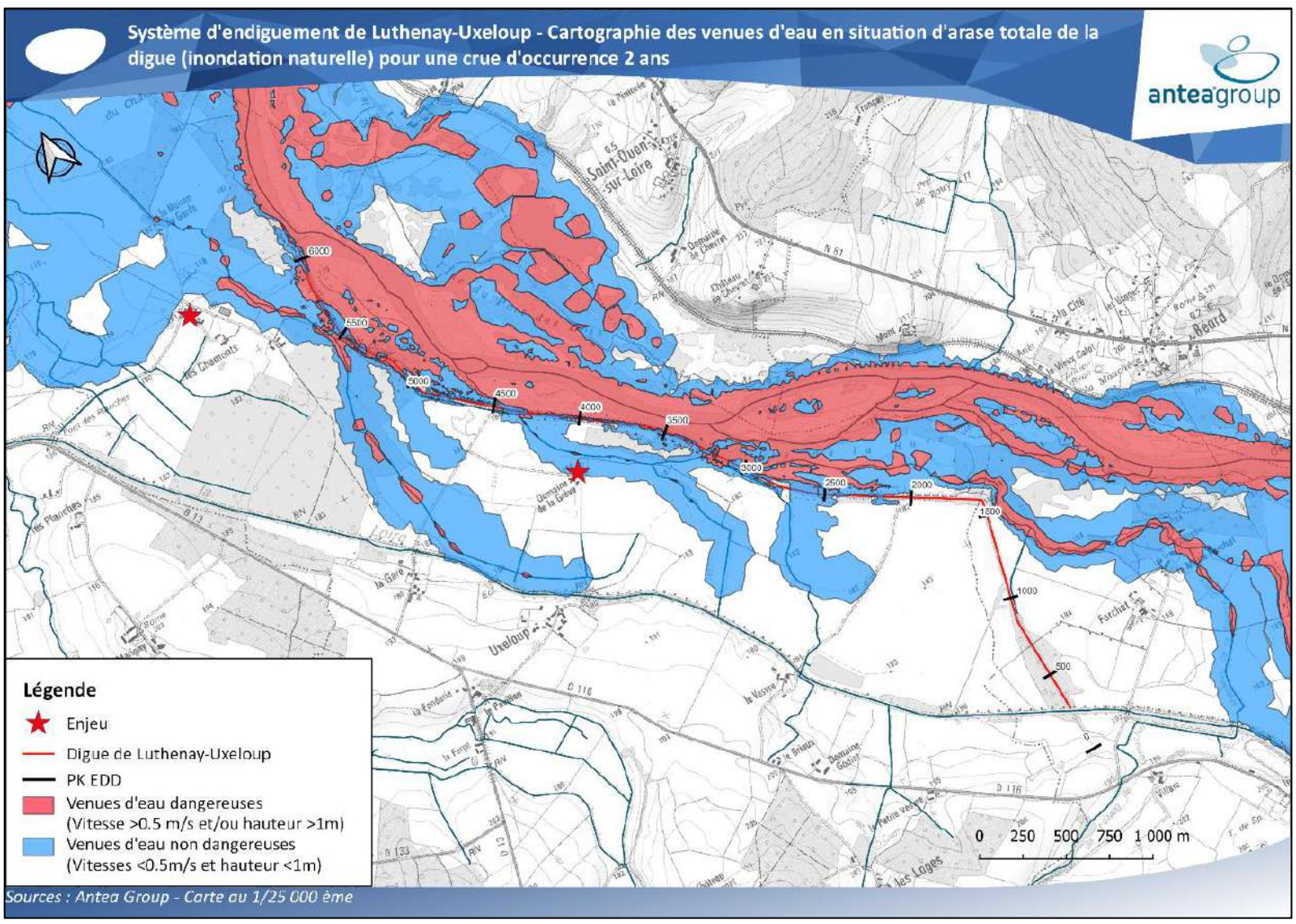

Figure 48. Cartographie des venues d'eau en situation d'arase totale - crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group)

5.3.1.2. Crue vicennale (niveau de protection)

Pour la crue d'occurrence 20 ans, sans la présence de la digue, les débordements dans le val couvrent des surfaces importantes. Des venues d'eau se produisent également sur la partie amont du val, en particulier au niveau du pk1000.

L'inondation atteint les bâtiments du domaine de la Grève, à l'exception d'un bâtiment résidentiel et d'une annexe qui restent hors d'eau. Les hauteurs d'eau au droit des bâtiments inondés sont comprises entre 0 et 0,5 m, à l'exception d'un bâtiment agricole pour lequel les hauteurs d'eau sont comprises entre 0,5 et 1 m.

Au niveau du hameau des Chamons, 9 bâtiments, dont 4 habitations, sont atteints par des hauteurs d'eau inférieures à 0,5m. Les vitesses restent modérées dans le val, essentiellement inférieures à 0,5 m/s.

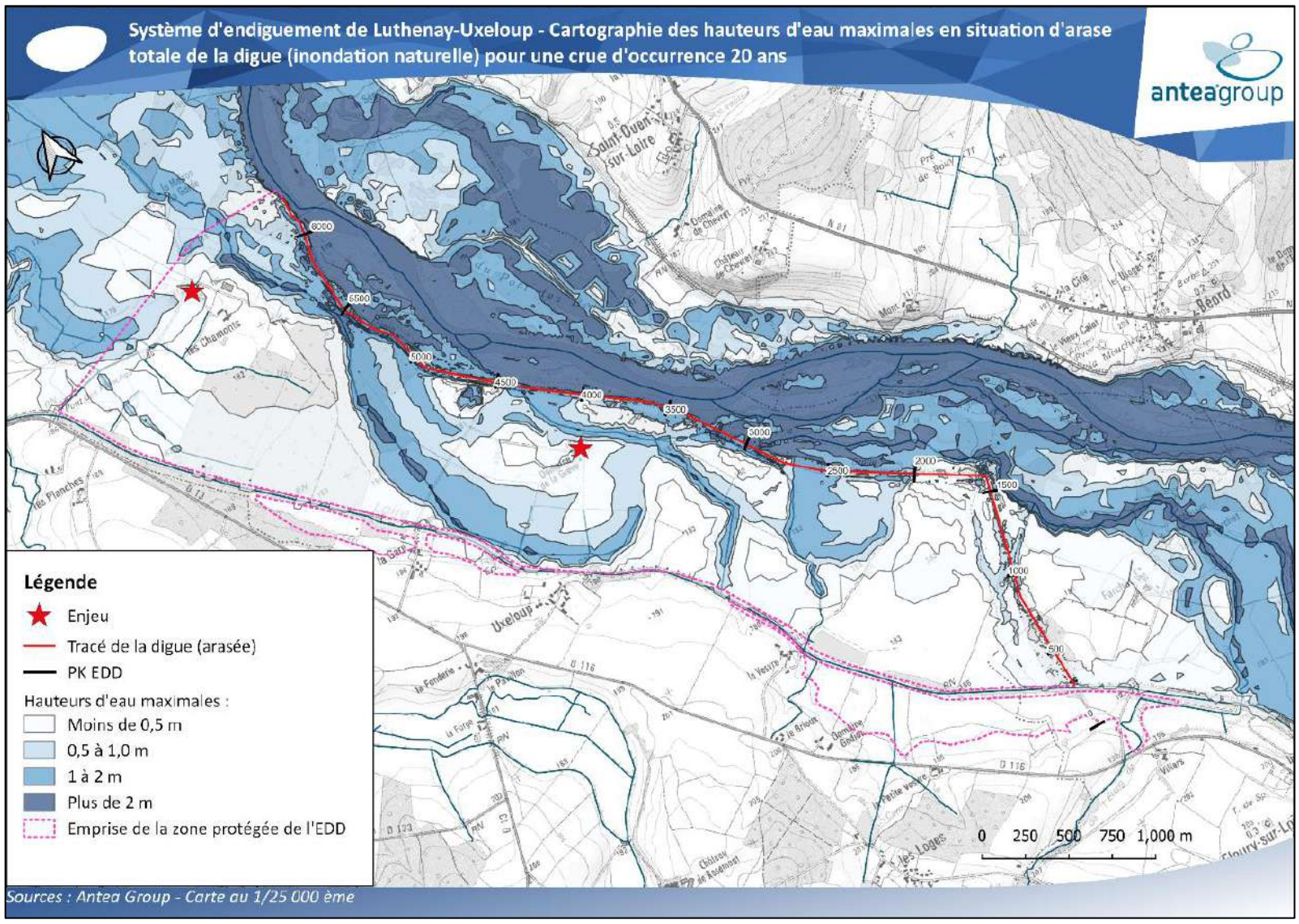

Figure 49. Cartographie des hauteurs maximales en situation d'arase totale pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group)

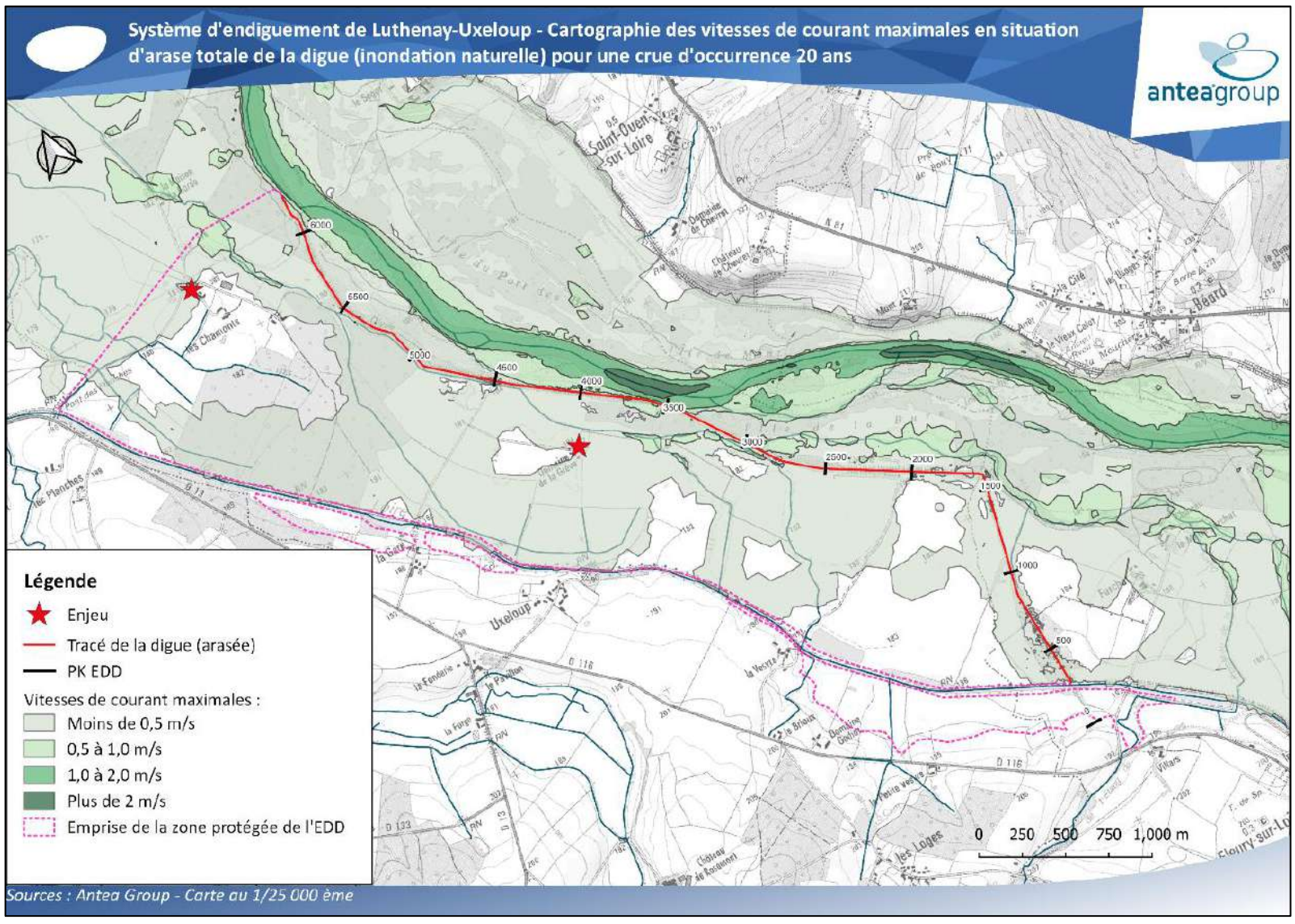

Figure 50. Vitesses d'écoulement maximales en situation d'arase totale pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group)

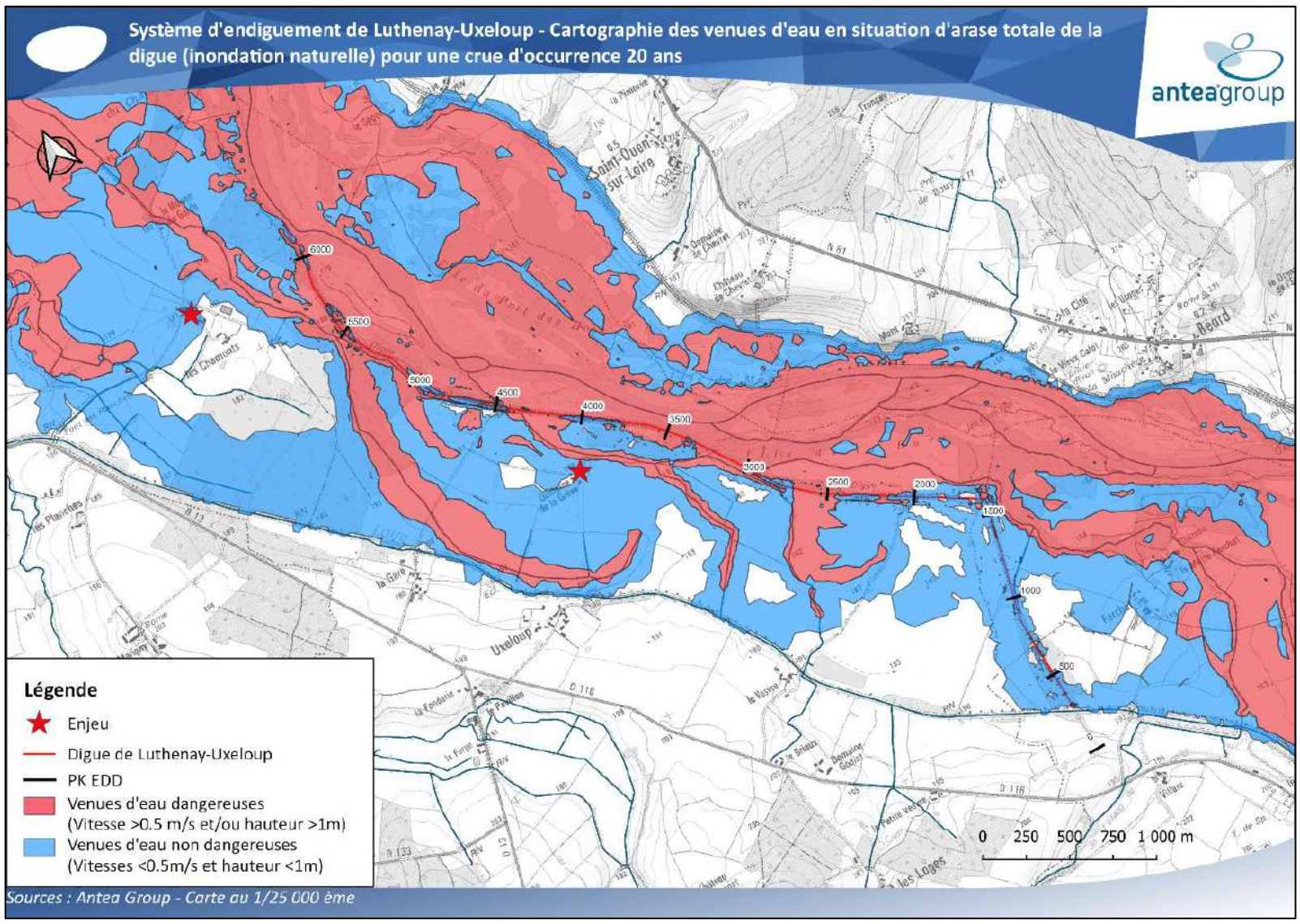

Figure 51. Cartographie des venues d'eau en situation d'arase totale - crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group)

5.3.1.3. Crue bicentennale (niveau de protection apparent)

Pour la crue 200 ans, en l'absence de la digue, l'ensemble du val est inondé. Les hauteurs d'eau peuvent atteindre 2 m au droit de certains secteurs correspondant aux chenaux d'écoulement préférentiel.

Au niveau du domaine de la Grève, les bâtiments d'habitations sont concernés par des hauteurs d'eau comprises entre 0,5 et 1,0 m et les bâtiments agricoles sont exposés à des hauteurs d'eau comprises entre 1 et 2 m.

Au niveau des bâtiments du hameau des Chamons, les hauteurs d'eau sont comprises entre 0 et 1 m. Les vitesses de courant au droit des enjeux bâtis restent globalement inférieures à 0,5 m/s. Des vitesses comprises entre 0,5 et 1 m/s peuvent se produire ponctuellement à proximité de certains bâtiments du secteur des Chamons.

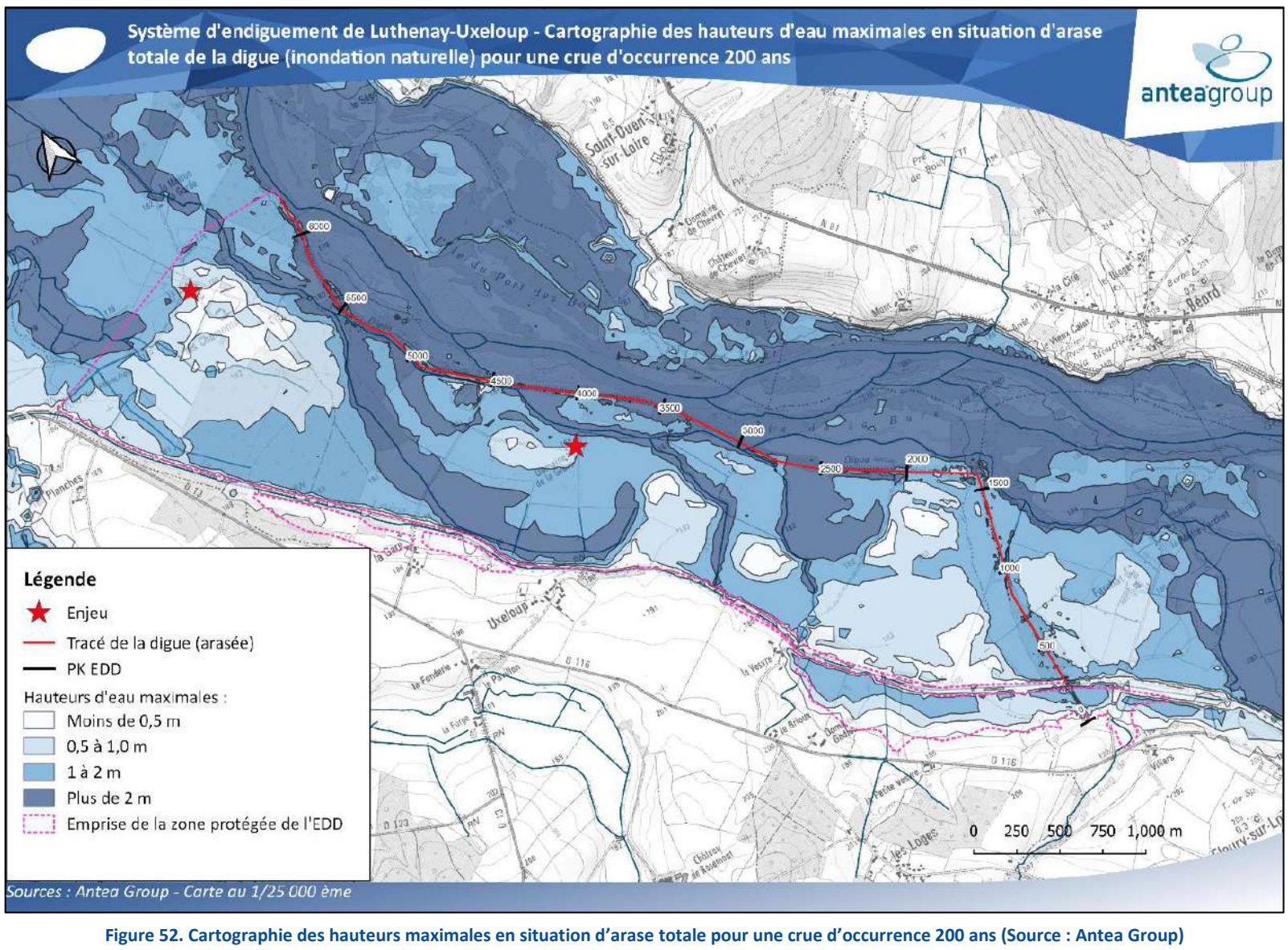

Figure 52. Cartographie des hauteurs maximales en situation d'arase totale pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group)

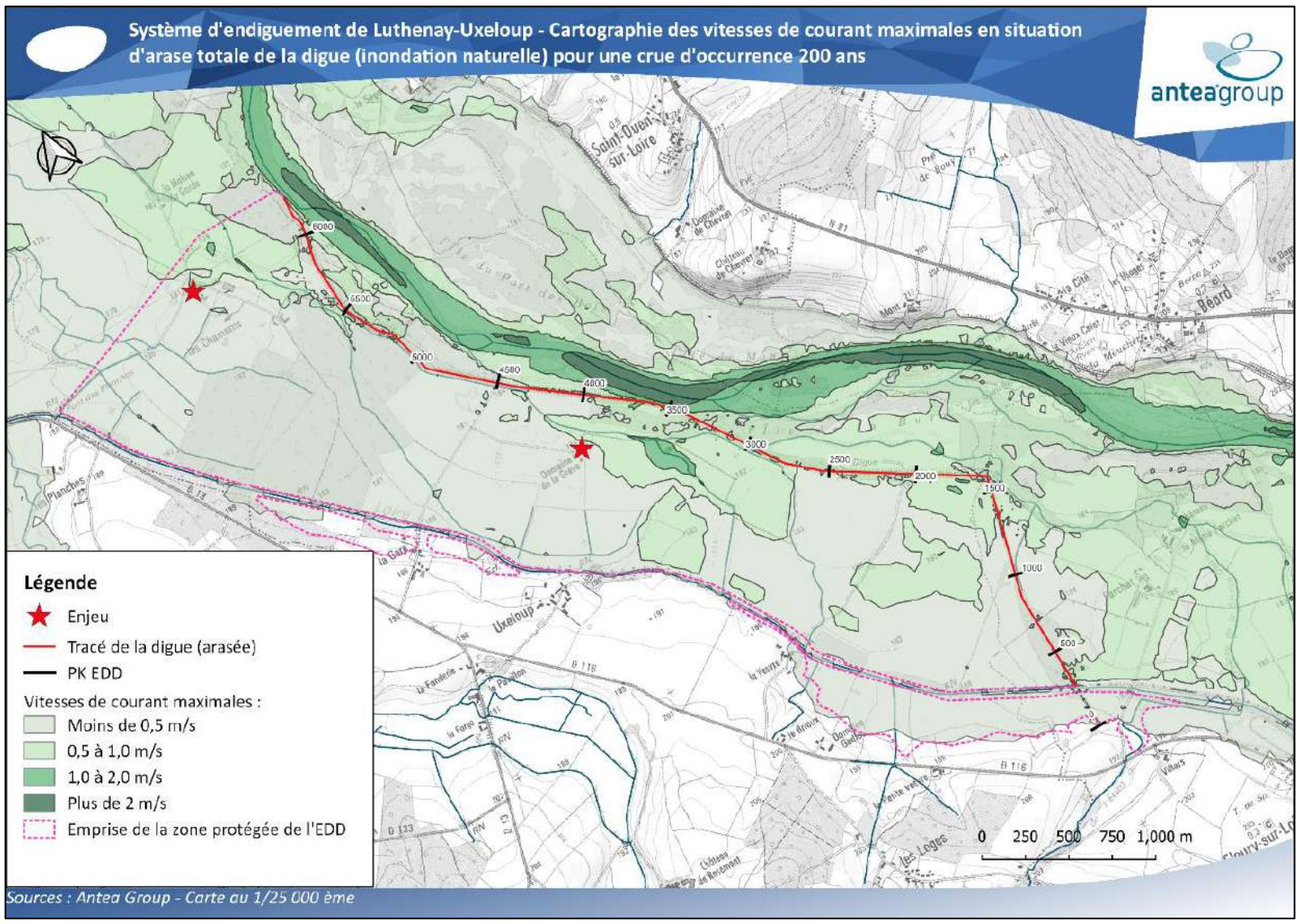

Figure 53. Vitesses d'écoulement maximales en situation d'arase totale pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group)

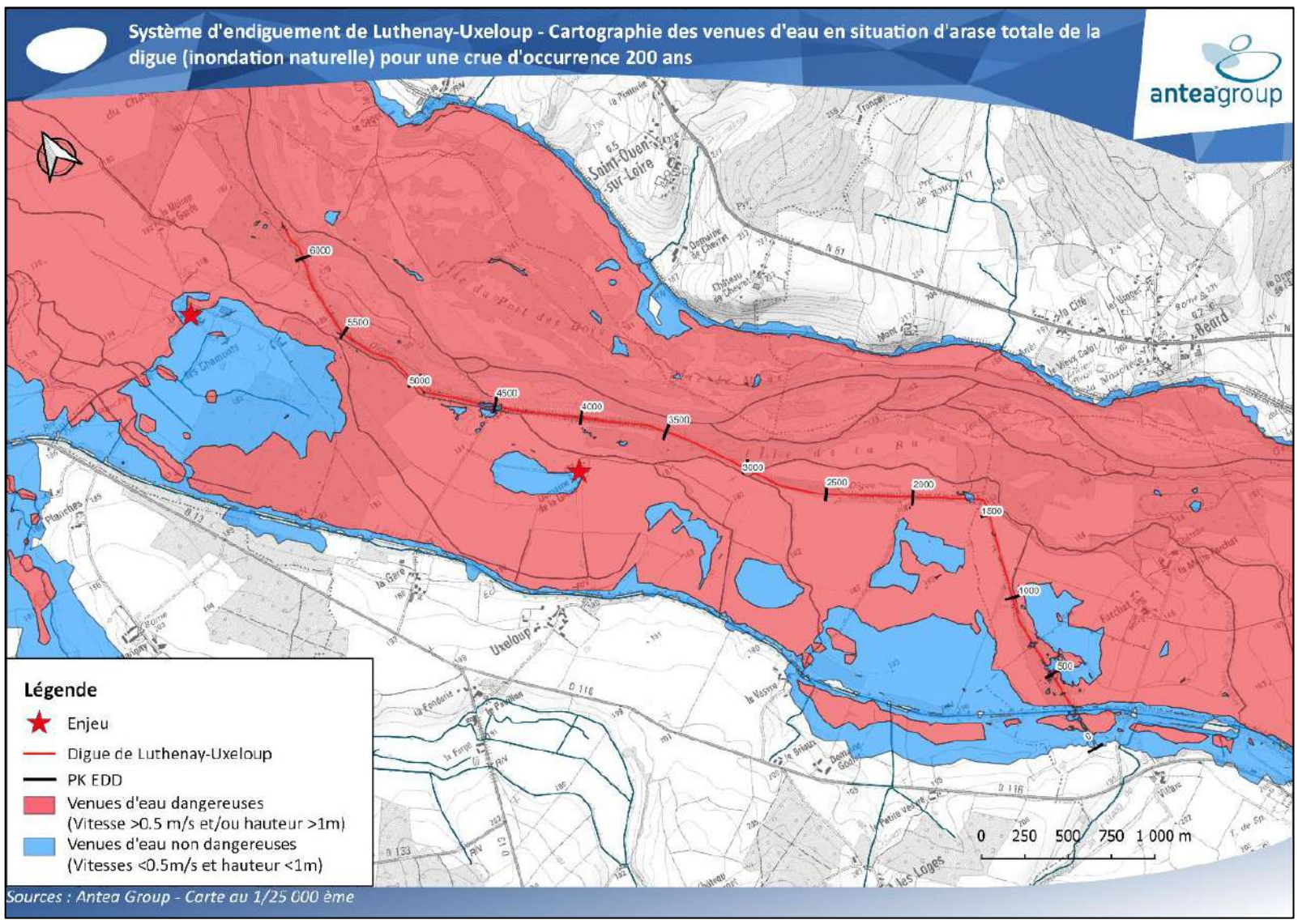

Figure 54. Cartographie des venues d'eau en situation d'arase totale - crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group)

5.3.1.4. Crue 500 ans

Pour la crue d'occurrence 500 ans (ligne d'eau supérieure à la crête de digue), l'ensemble du val est inondé avec des hauteurs d'eau significatives.

Au droit du domaine de la Grève, les bâtiments sont concernés par des hauteurs d'eau comprises entre 1 et 2 m. Les bâtiments agricoles peuvent être concernés par des vitesses de courant comprises entre 0,5 et 1 m/s, alors qu'au droit des bâtiments d'habitation les vitesses restent inférieures à 0,5m/s.

Sur le secteur des Chamons, les hauteurs d'eau maximales sont comprises entre 0,5 et 1 m et peuvent dépasser les 1 m au niveau des bâtiments les plus au nord. Certains bâtiments peuvent être concernés par des vitesses de courant comprises entre 0,5 et 1m/s.

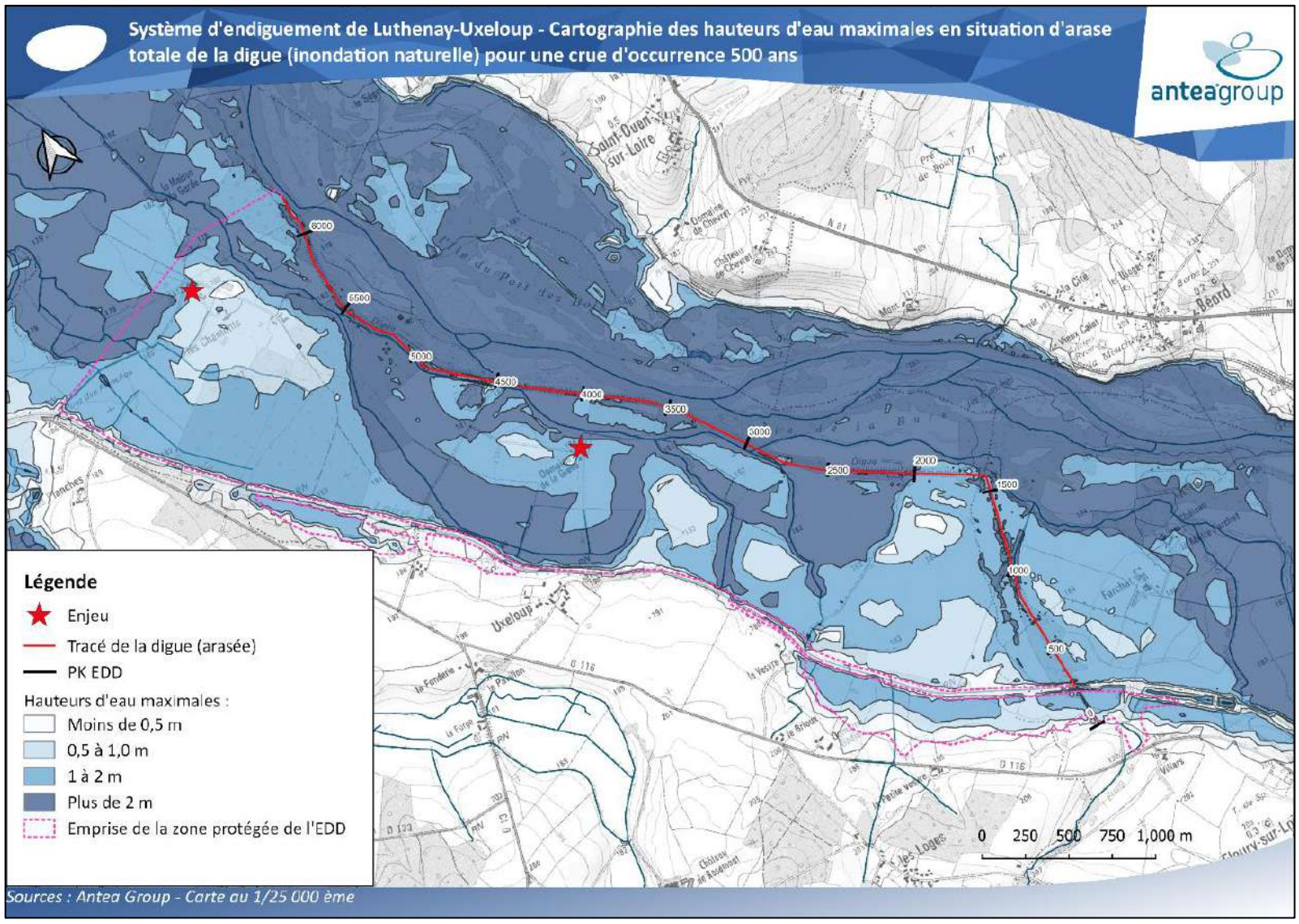

Figure 55. Cartographie des hauteurs maximales en situation d'arase totale pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group)

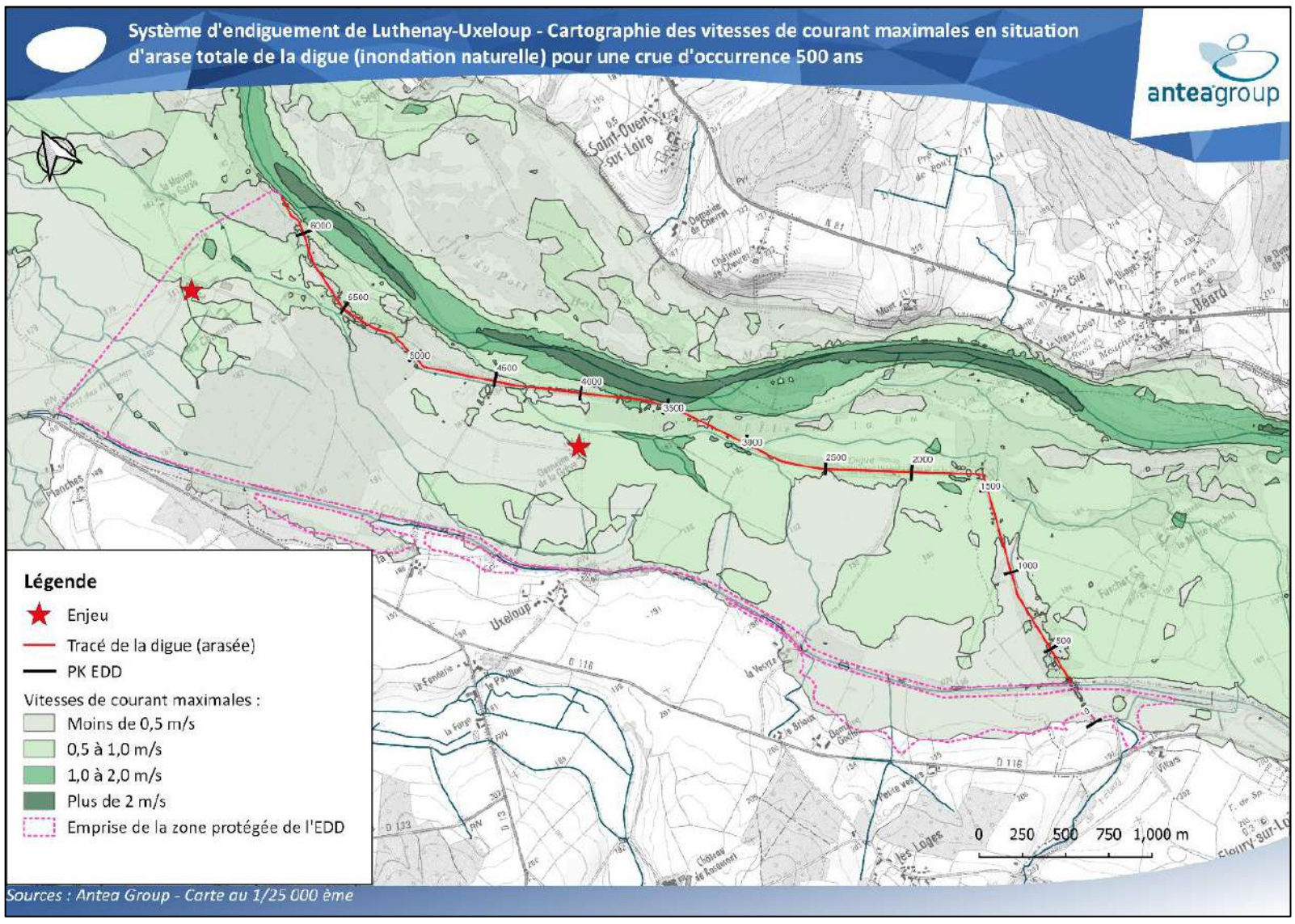

Figure 56. Vitesses d'écoulement maximales en situation d'arase totale pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group)

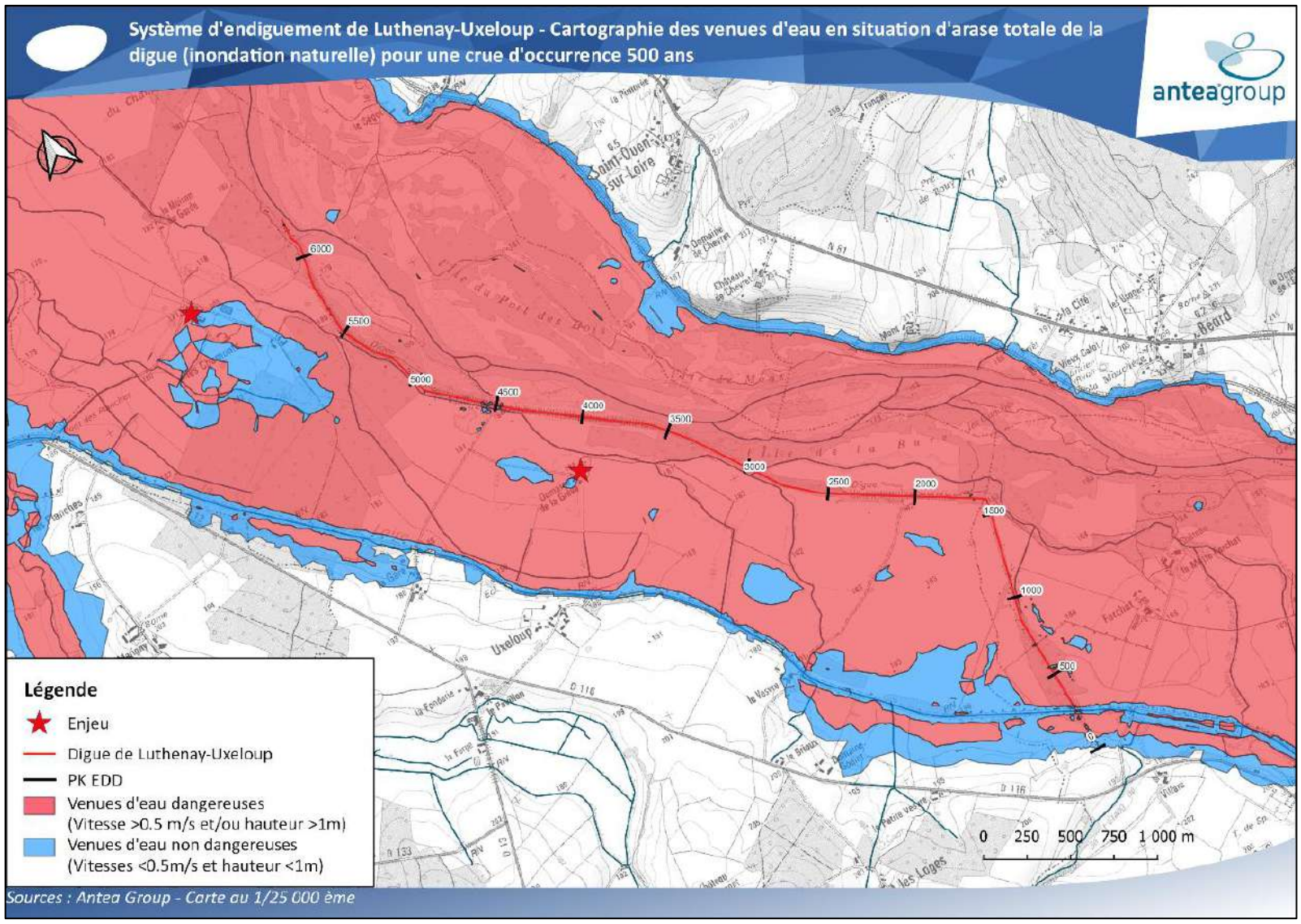

Figure 57. Cartographie des venues d'eau en situation d'arase totale - crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group)

5.3.2. Mise en transparence par arasement partiel

5.3.2.1. Vérification des hauteurs de charge

Les hauteurs de charge maximales atteintes de part et d'autre des portions d'ouvrage laissées en place ont été évaluées pour les crues 20 ans et 200 ans au droit de profils de contrôle répartis sur le linéaire de digue.

En fonction des secteurs, lors de la phase de montée des eaux il peut être observé un décalage temporel entre l'arrivée des eaux côté Loire et côté val. Ce décalage induit un premier pic de hauteur de charge sur l'ouvrage dont la durée est réduite (2 à 4 heures).

Le tableau suivant indique pour les profils de contrôle considérés les hauteurs de charge maximales relevées lors du pic initial puis au pic de crue :

Tableau 10. Synthèse des hauteurs de charge maximales modélisées au droit des profils de contrôle (Source : Antea Group)

Profil de contrôle	Hauteurs de charge maximales crue T=20 ans		Hauteurs de charge maximales crue T=200 ans	
	Pic initial (décalage temporel)	Pic de crue	Pic initial (décalage temporel)	Pic de crue
1	0	0,49	0,65	0,61
2	0	0,36	0,43	0,49
3	0	0	0,01	0,19
4	0,04	0,01	0,09	0,34
5	0,01	0	0,19	0,39
6	0	0,07	0,43	0,32
7	0,65	0,48	0,83	0,10
8	0,28	0,11	0,39	0,17
9	0,17	0,03	0,20	0,08
10	0,99	0,18	0,99	0,20
11	0	0	0,01	0,03
12	0,61	0,2	0,67	0,23
13	0,55	0,09	0,69	0,09
14	0,6	0,12	0,58	0,20
15	0	0,03	0,00	0,06
16	0,33	0,19	0,39	0,27
17	0,58	0,31	0,51	0,43
18	0	0,2	0,00	0,26

En vert : valeur inférieure ou égale à 0,50 m
En jaune : valeur inférieure à 1,00 m
En rouge : valeur supérieure ou égale à 1,00m

Pour l'ensemble des profils de contrôle, la hauteur de charge modélisée est inférieure à 1,00 m. Certains pics initiaux lors de la phase de montée sont susceptibles d'atteindre des valeurs comprises entre 0,5 et 1,0 m. Autour du pic de crue, les hauteurs de charge relevées sont toutes inférieures à 0,50 m à l'exception du profil 1 à l'extrémité Est près du canal pour lequel la hauteur de charge relevée atteint 0,61 m pour la crue 200 ans.

Les objectifs définis au paragraphe 4.3.2 concernant les hauteurs de charge sont respectés. Ainsi, le scénario d'arase partiel permet d'assurer la stabilité des portions d'ouvrage laissées en place en permettant l'équilibrage des niveaux de part et d'autre et **il n'est pas considéré de zone de sur-aléa destructeur lié à la rupture d'ouvrage (hauteur de charge inférieure à 1 m).**

5.3.2.2. Crue biennale

Les ouvertures intégrées à l'ouvrage permettent des premières venues d'eau dans le val similaires à celles modélisées pour la situation d'inondation naturelle, au niveau des chenaux préférentiels.

Les deux bâtiments agricoles au nord-est du Domaine de la Grève sont également les seuls enjeux bâtis impactés.

Ce scénario n'implique pas de nouvelles zones de venues d'eau dangereuses par rapport à la situation d'inondation naturelle (arase totale).

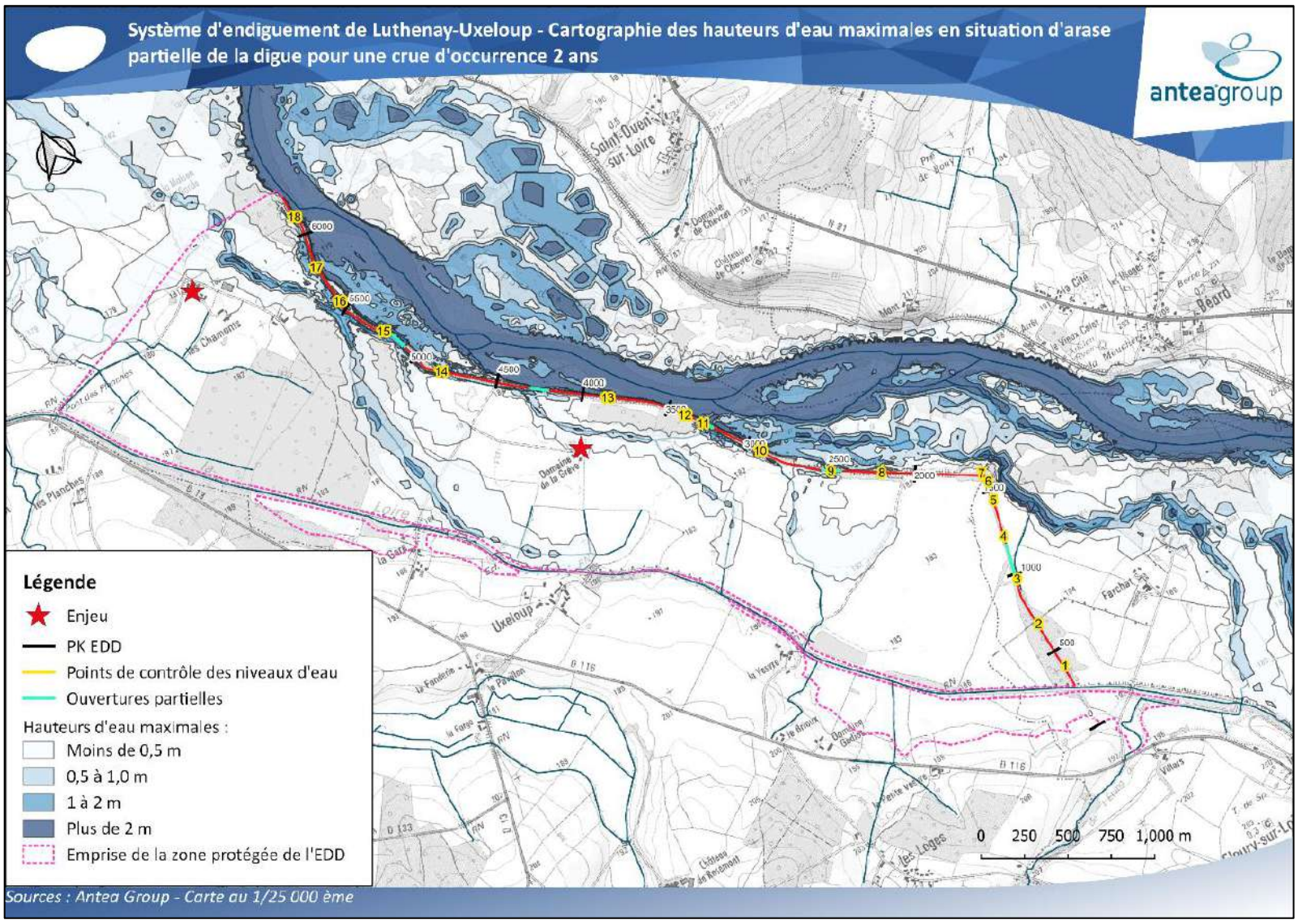

Figure 58. Cartographie des hauteurs maximales en situation d'arase partielle pour une crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group)

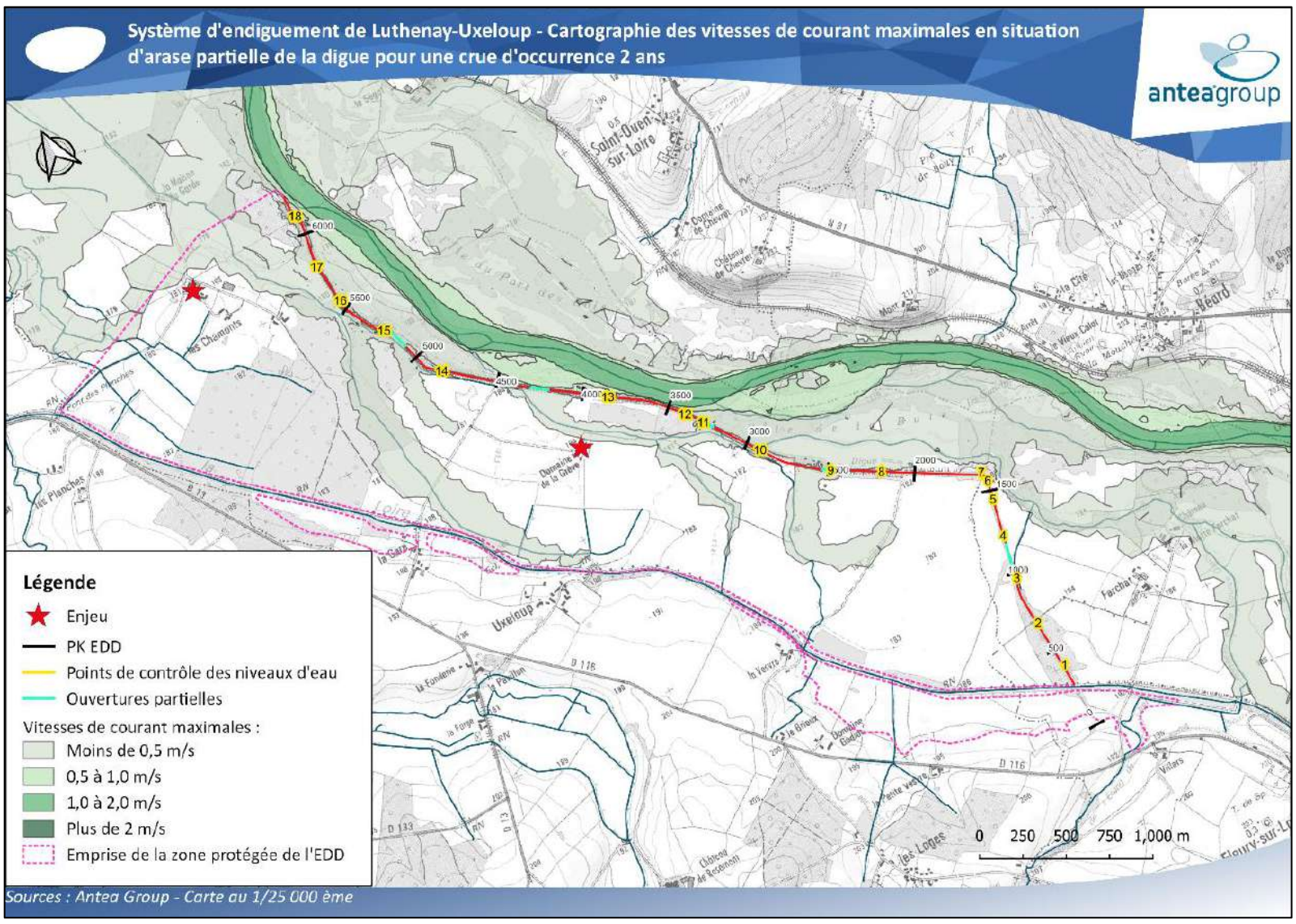

Figure 59. Vitesses d'écoulement maximales en situation d'arase partielle pour une crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group)

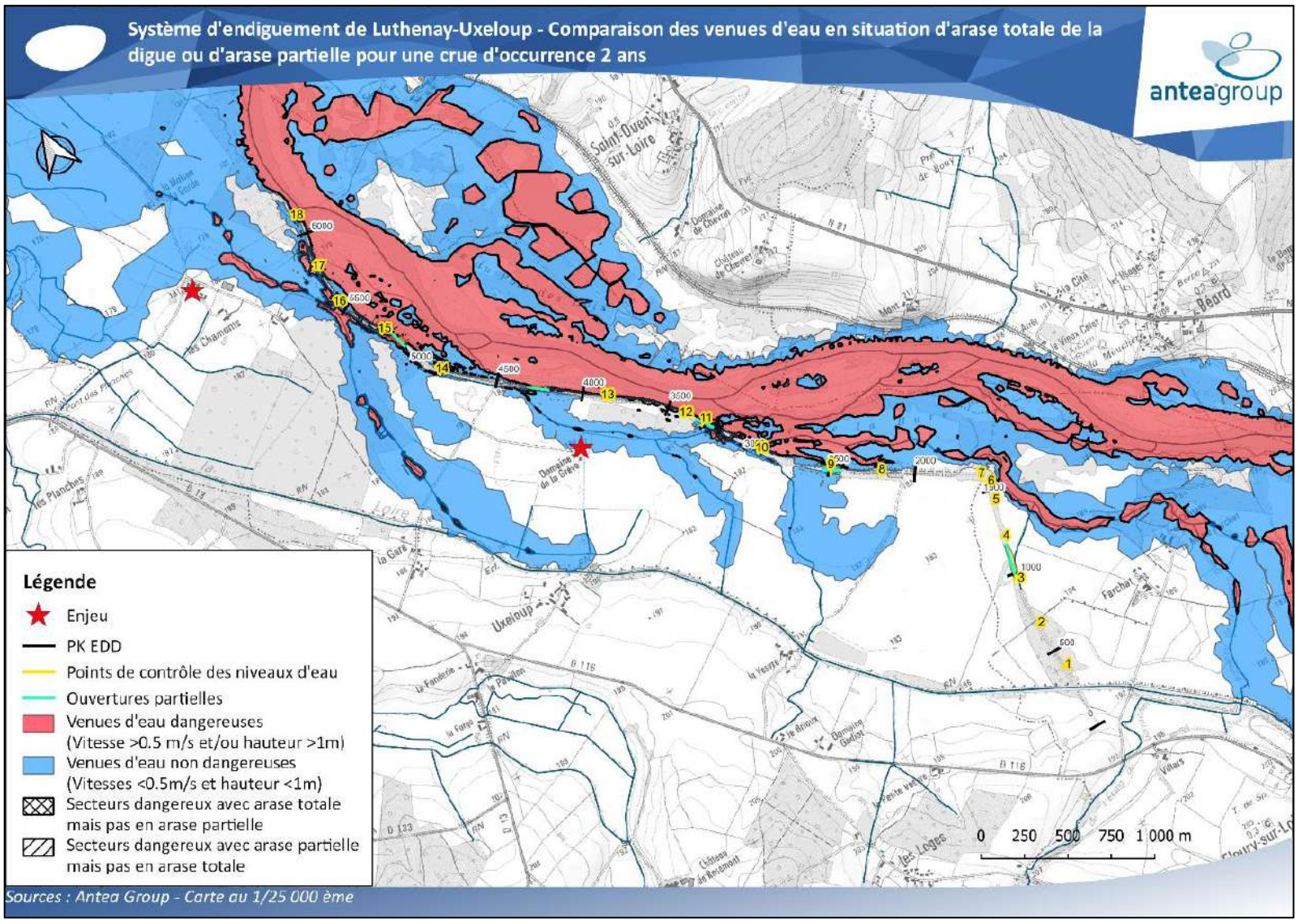

Figure 60. Cartographie des venues d'eau dangereuses pour le scénario d'arase partielle pour une crue d'occurrence 2 ans (Source : Antea Group)

5.3.2.3. Crue vicennale (niveau de protection)

Pour la crue 20 ans, les ouvertures intégrées à la digue permettent d'assurer des conditions d'inondation du val similaires à la situation d'inondation naturelle. Pour ce scénario, des venues d'eau se produisent également sur la partie amont du val via l'ouverture intégrée au pk1000.

Ce scénario n'implique pas de nouvelles zones de venues d'eau dangereuses par rapport à la situation d'inondation naturelle (arase totale). Aucun bâtiment d'habitation n'est concerné par des venues d'eau dangereuses. La population impactée par des venues d'eau non dangereuses est évaluée à 7 personnes (idem situation d'inondation naturelle).

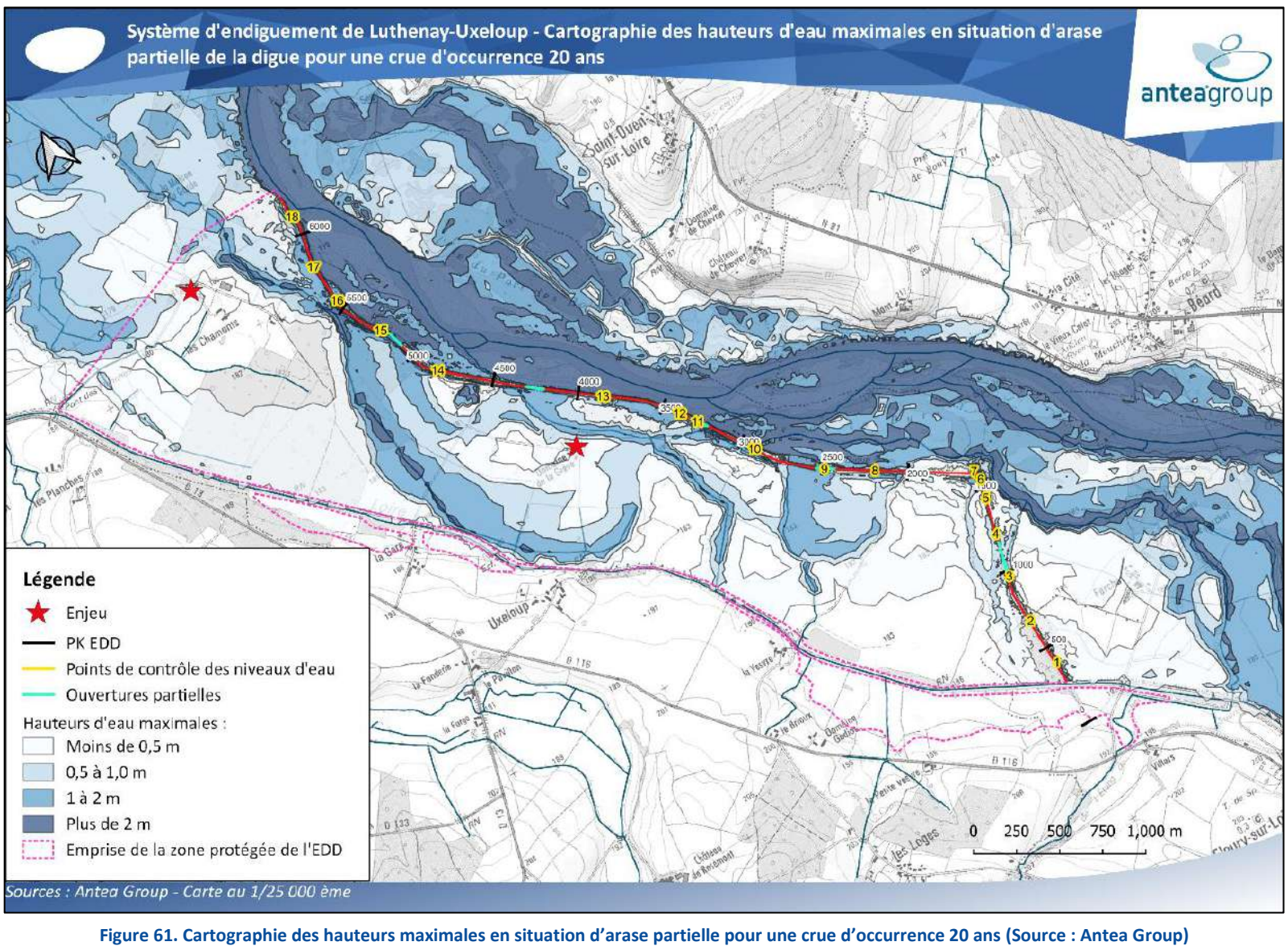

Figure 61. Cartographie des hauteurs maximales en situation d'arase partielle pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group)

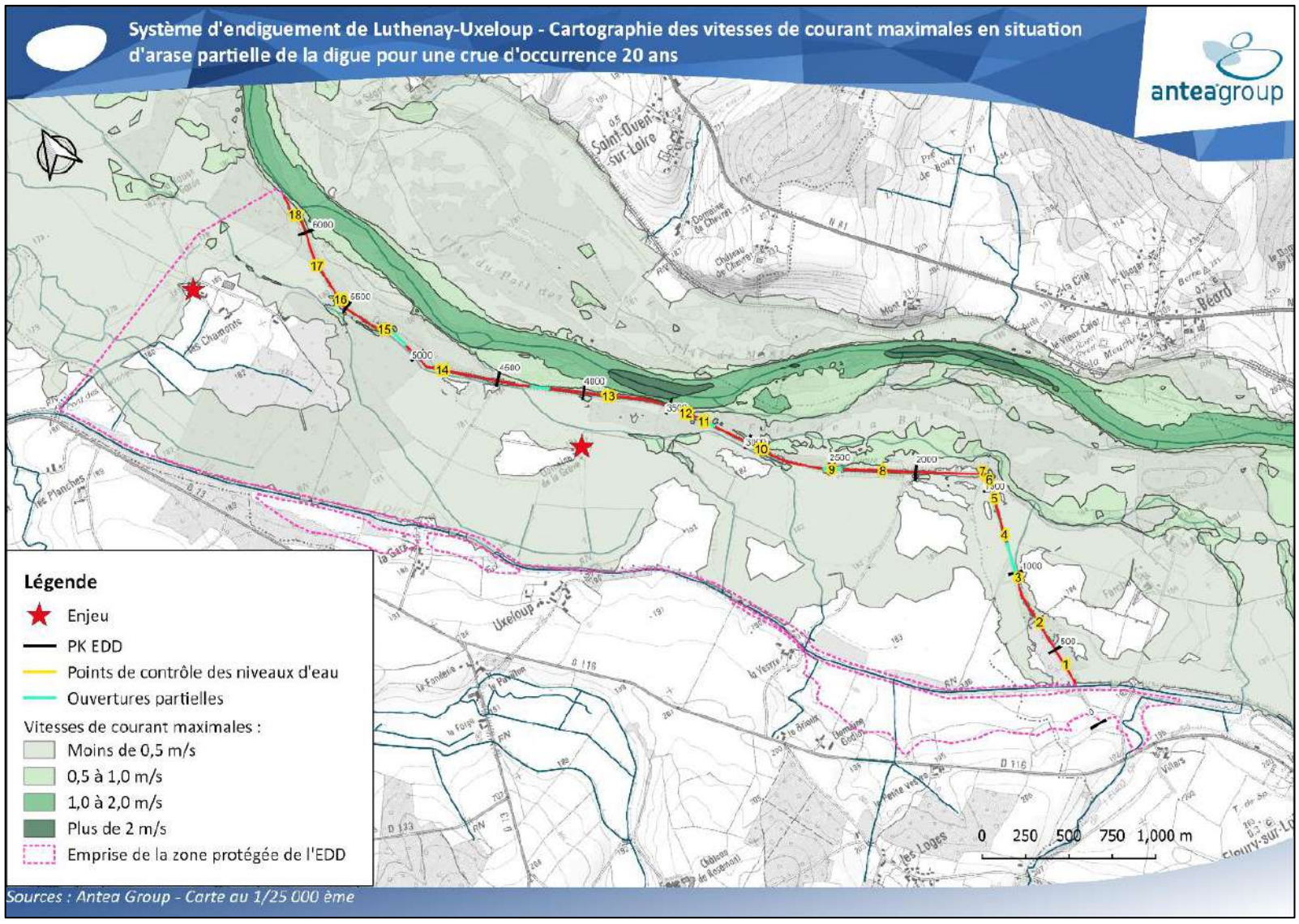

Figure 62. Vitesses d'écoulement maximales en situation d'arase partielle pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group)

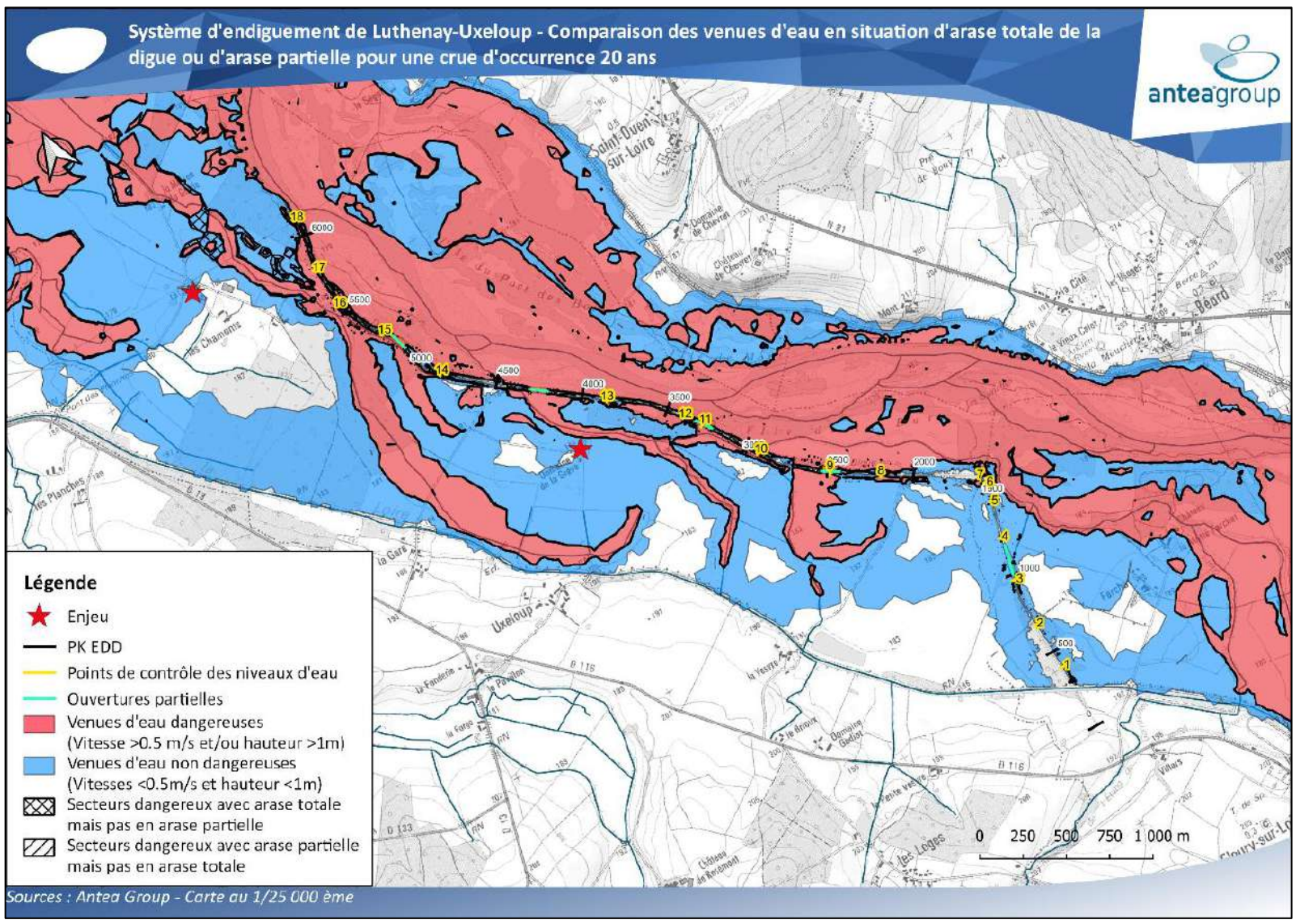

Figure 63. Cartographie des venues d'eau dangereuses pour le scénario d'arase partielle - crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group)

5.3.2.4. Crue bicentennale (niveau de protection apparent)

De la même manière, le scénario d'arasement partiel étudié permet d'assurer des conditions d'inondation du val similaires à la situation d'inondation naturelle.

Les emprises affectées par des venues dangereuses et non dangereuses sont globalement similaires par rapport à la situation d'arase totale. On observe quelques différences d'emprises à la marge des zones concernées par des venues dangereuses. Au total, les surfaces impactées par des venues d'eau dangereuses sont inférieures d'environ 6 ha à celles identifiées pour le scénario d'arase totale (99,6 ha contre 105,8 ha).

Un seul bâtiment d'habitation, situé au Domaine de la Grève, est impacté par des venues d'eau dangereuses (population estimée : 1 personne), alors que pour la situation d'arase totale les venues d'eau dangereuses impactent également des bâtiments au hameau des Chamons (population estimée : 3 personnes pour l'inondation naturelle).

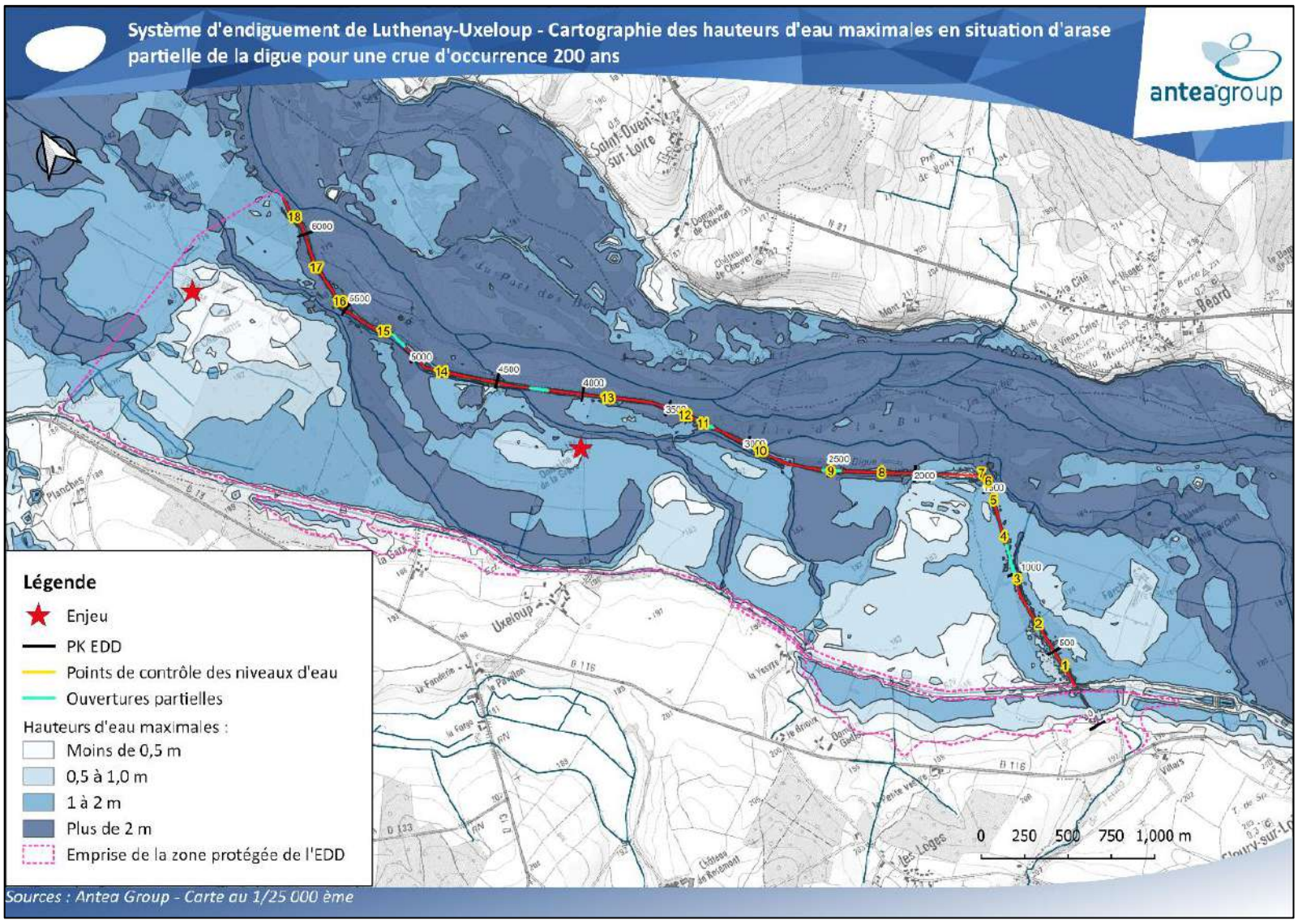

Figure 64. Cartographie des hauteurs maximales en situation d'arase partielle pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group)

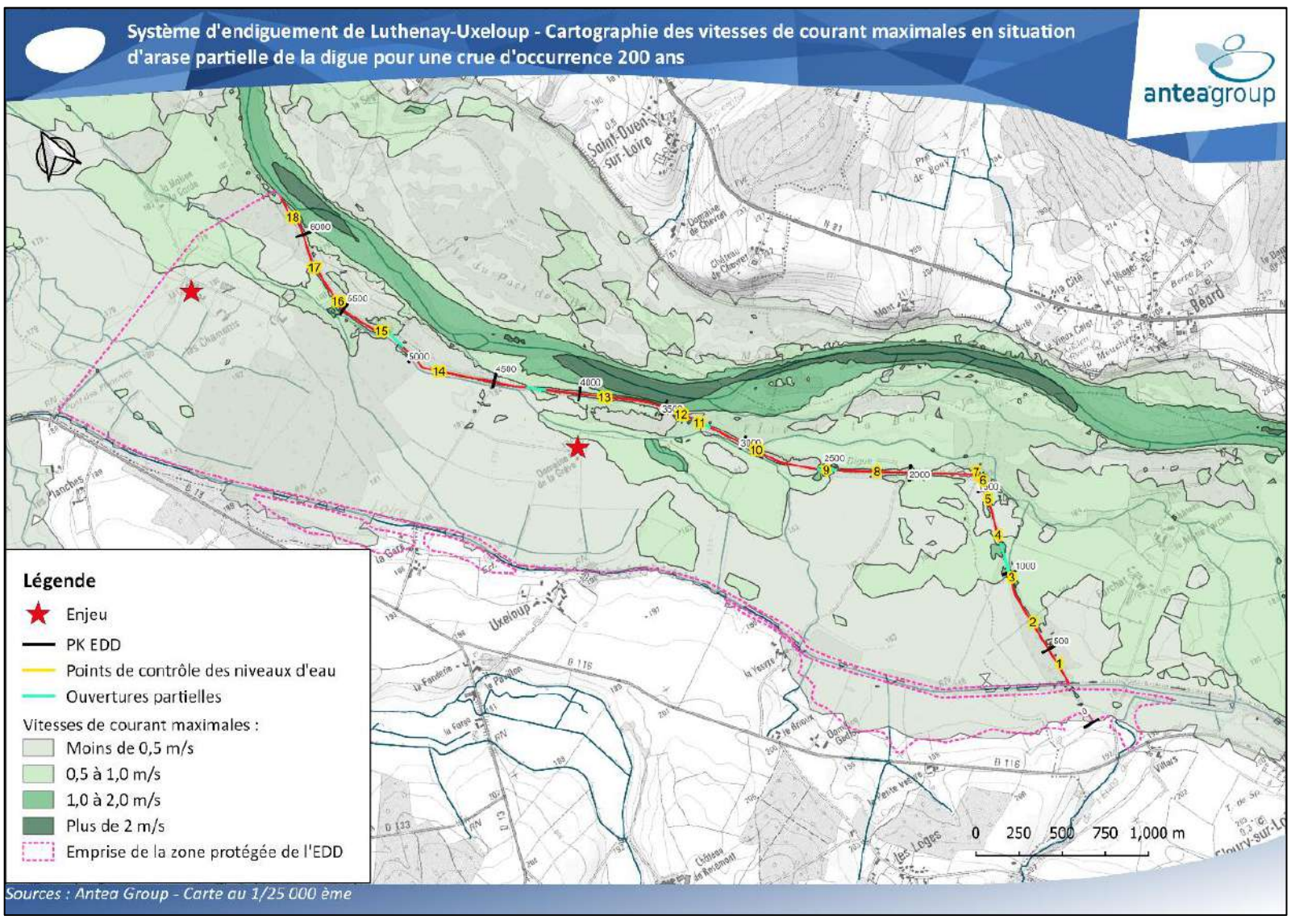

Figure 65. Vitesses d'écoulement maximales en situation d'arase partielle pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group)

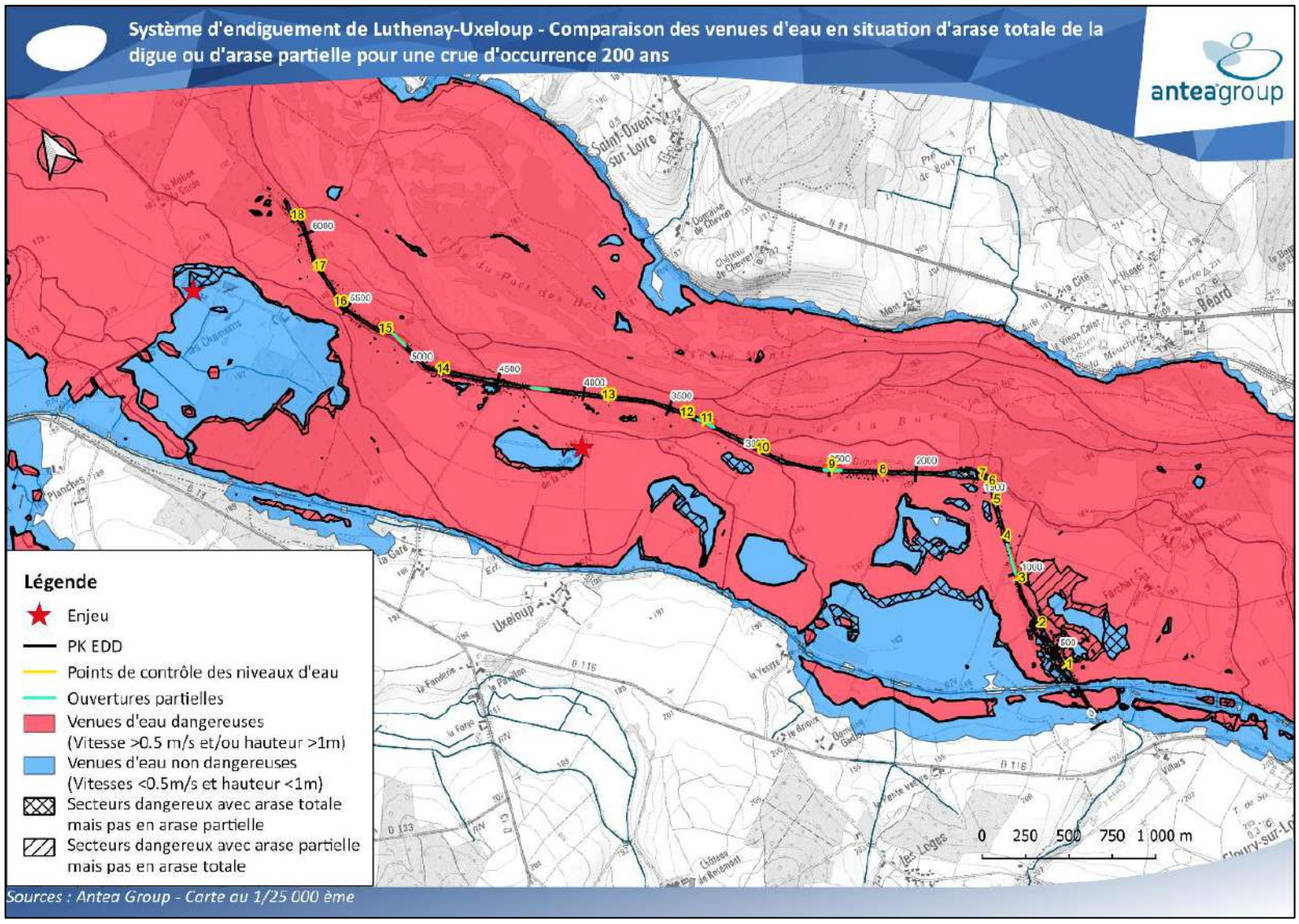

Figure 66. Cartographie des venues d'eau dangereuses pour le scénario d'arase partielle - crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group)

5.3.2.5. Crue 500 ans

De la même manière, le scénario d'arasement partiel étudié permet d'assurer des conditions d'inondation du val similaires à la situation d'inondation naturelle.

Les emprises impactées par des venues d'eau dangereuses sont légèrement inférieures à celles évaluées pour la situation d'inondation naturelle (506,6 ha contre 535,3 ha). La population concernée par les venues d'eau dangereuse est identique (6 personnes).

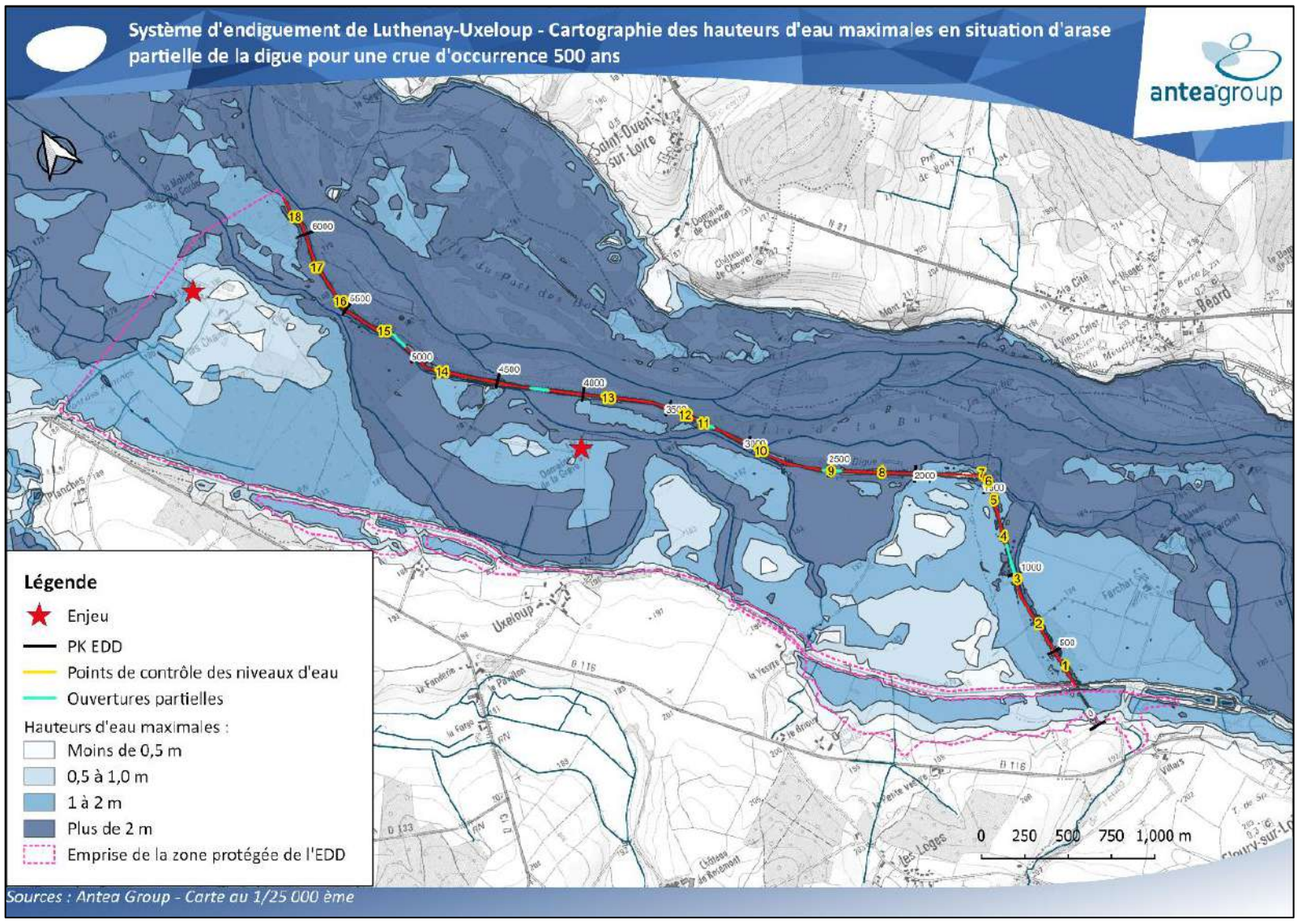

Figure 67. Cartographie des hauteurs maximales en situation d'arase partielle pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group)

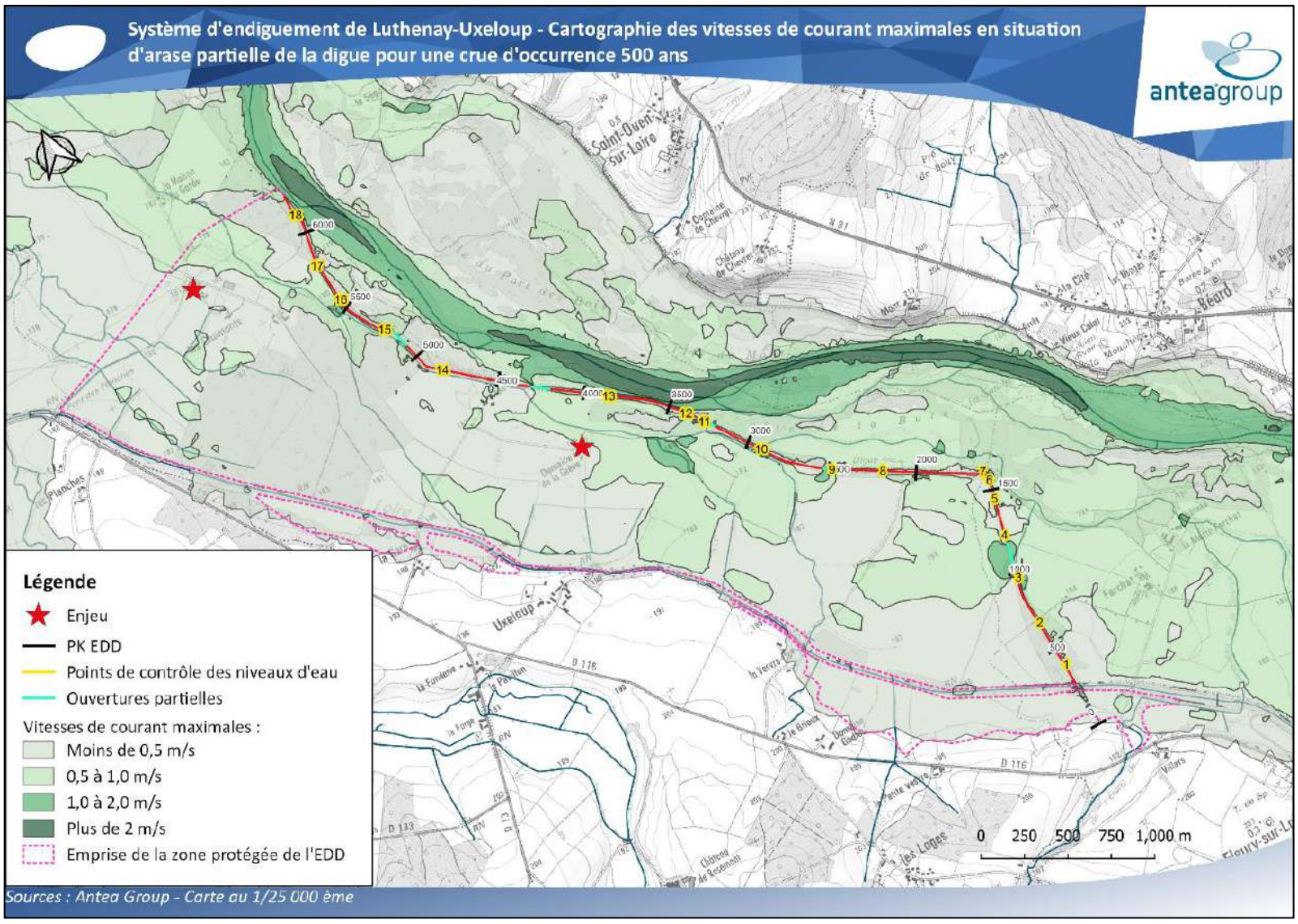

Figure 68. Vitesses d'écoulement maximales en situation d'arase partielle pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group)

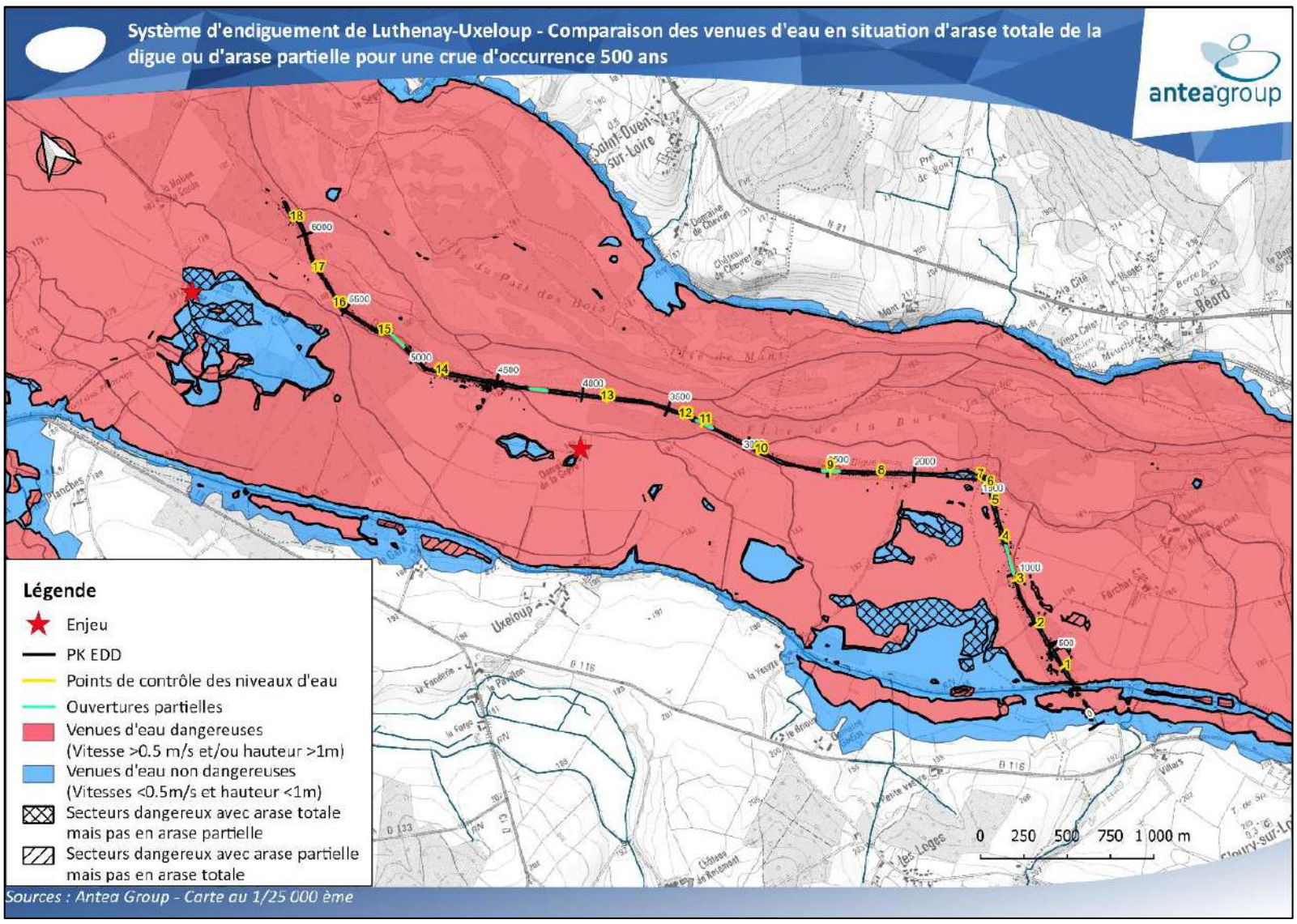

Figure 69. Cartographie des venues d'eau dangereuses pour le scénario d'arase partielle - crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group)

5.3.3. Mise en transparence par création naturelle de brèches lors d'une future crue

5.3.3.1. Vérification des hauteurs de charge

Les hauteurs de charge maximales atteintes de part et d'autre des portions d'ouvrage laissées en place ont été évaluées pour les crues 20 ans, 200 ans et 500 ans au droit de profils de contrôle répartis sur le linéaire de digue.

En fonction des secteurs, lors de la phase de montée des eaux il peut être observé un décalage temporel entre l'arrivée des eaux côté Loire et côté val. Ce décalage induit un premier pic de hauteur de charge sur l'ouvrage dont la durée est réduite (2 à 4 heures).

Le tableau suivant indique pour les profils de contrôle considérés les hauteurs de charge maximales relevées lors du pic initial puis au pic de crue :

Profil de contrôle	Hauteurs de charge maximales crue T=20 ans		Hauteurs de charge maximales crue T=200 ans		Hauteurs de charge maximales crue T=500 ans	
	Pic initial (décalage temporel)	Pic de crue	Pic initial (décalage temporel)	Pic de crue	Pic initial (décalage temporel)	Pic de crue
1	0,64	0,64	1,69	0,82	1,95	1,8
2	0,46	0,46	1,69	0,53	2,19	1,7
3	-	-	-	-	-	-
4	0,51	0,4	2,22	2,22	2,51	1,96
5	0,6	0,51	2,2	0,94	2,63	2,08
6	0,18	0,12	1,71	0,29	2,11	1,4
7	0,98	0,06	1,95	0,13	2,3	0,95
8	1,74	0,99	3,28	3,28	3,71	2,32
9	1,91	0,97	3,42	3,42	3,85	1,97
10	2,66	0,78	4,17	4,17	4,64	2,63
11	3,37	2	4,81	4,81	5,24	3,61
12	3,71	3	5,11	5,11	5,56	4,4
13	4,22	3,16	5,61	3,37	5,89	4,81
14	1,61	0,69	1,94	0,29	1,98	0,94
15	3,12	2,04	1,79	0,02	3,41	2,73
16	0,87	0,34	0,72	0,71	1,05	0,22
17	3,65	2,56	3,75	2,48	3,8	2,99
18	0,32	0,3	1,64	1,14	0,17	0,04
En vert : valeur inférieure ou égale à 0,50 m						
En jaune : valeur inférieure à 1,00 m						
En rouge : valeur supérieure ou égale à 1,00m						

Pour quasiment l'ensemble des profils de contrôle et les 3 crues étudiées, la hauteur de charge modélisée est supérieure à 1,00 m. Certaines charges hydrauliques lors des pics initiaux de la phase de montée de la crue sont susceptibles d'atteindre des valeurs allant jusqu'à plus de 5 m de charge. Autour du pic de crue, les hauteurs de charge relevées sont dans l'ensemble supérieures à 1 m.

Les objectifs définis au paragraphe 4.3.2 concernant les hauteurs de charge ne sont pas respectés. Ainsi, le scénario de mise en transparence par la création naturelle de brèches lors d'une future crue ne permet pas d'assurer la stabilité des portions d'ouvrage laissées en place, en permettant l'équilibrage des niveaux de part et d'autre. La charge hydraulique étant largement supérieure à 1 m sur de nombreux profils, **une zone de sur-aléa destructeur lié à la rupture d'ouvrage doit être considérée.**

5.3.3.2. Crue biennale

Pour la crue d'occurrence 2 ans, aucune ouverture de brèche ne se produit. L'inondation constatée est identique à celle observée pour le scénario de régularisation de l'ouvrage au paragraphe 5.3.1.1 en page 46.

5.3.3.3. Crue vicennale (niveau de protection)

Pour la crue 20 ans, les brèches s'ouvrant naturellement ne permettent pas d'assurer des conditions d'inondation du val similaires à la situation d'inondation naturelle (arase totale). Pour ce scénario, la plaine le long de la RD13 entre les lieux-dits la Gare et le Pont des Planches n'est pas inondée alors qu'en état d'inondation naturelle, ce secteur est inondé largement.

Ce scénario n'implique pas de nouvelles zones de venues d'eau dangereuses par rapport à la situation d'inondation naturelle (arase totale). Aucun bâtiment d'habitation n'est concerné par des venues d'eau dangereuses. La population impactée par des venues d'eau non dangereuses est évaluée à 3 personnes (7 personnes en situation d'inondation naturelle).

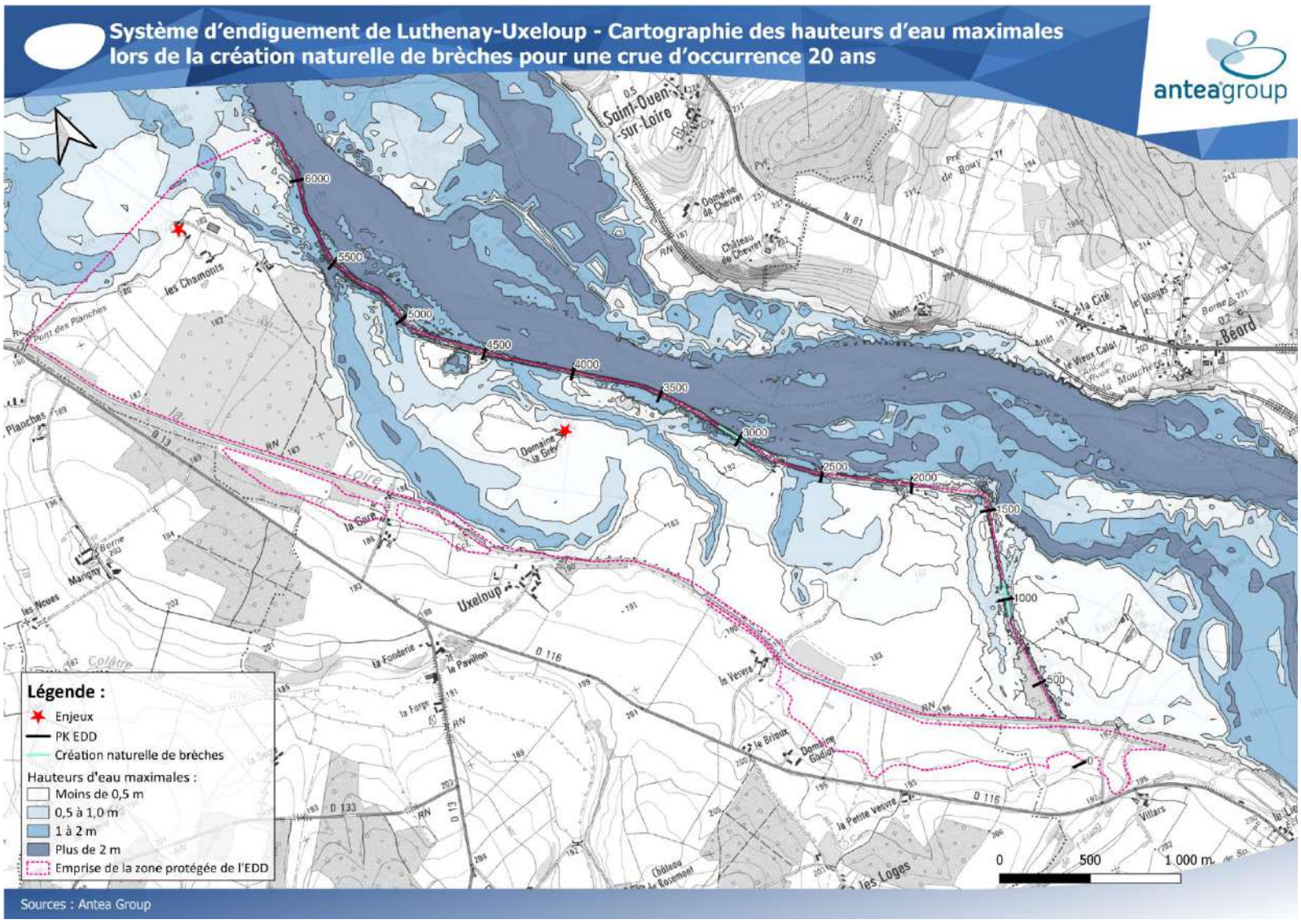

Figure 70 : Cartographie des hauteurs maximales en situation de brèches naturelles pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group)

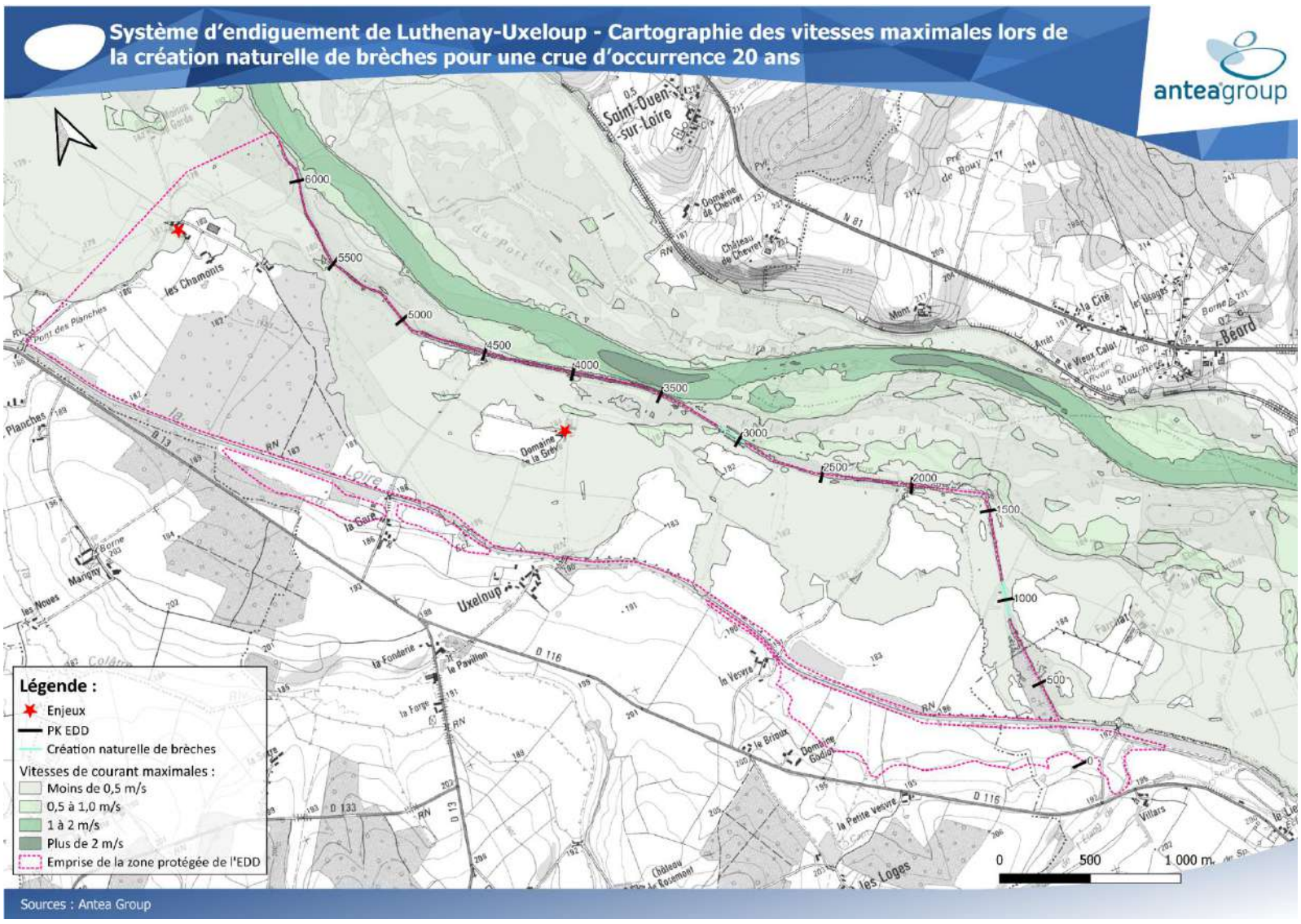

Figure 71 : Vitesses d'écoulement maximales en situation de brèches naturelles pour une crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group)

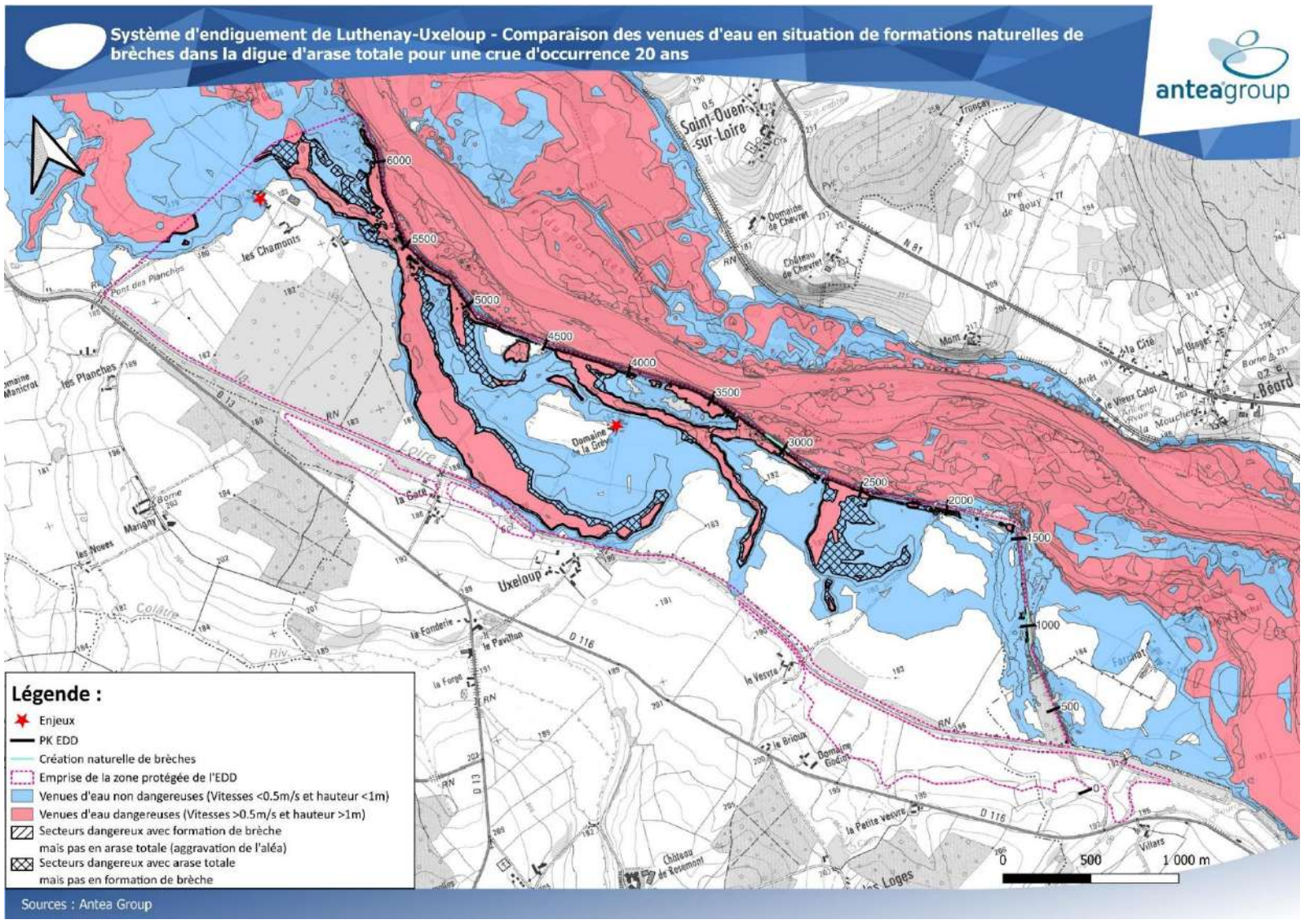

Figure 72 : Cartographie des venues d'eau dangereuses pour le scénario de brèches naturelles - crue d'occurrence 20 ans (Source : Antea Group)

5.3.3.4. Crue bicentennale (niveau de protection apparent)

Pour la crue de 200 ans, les brèches s'ouvrant naturellement ne permettent pas d'assurer des conditions d'inondation du val similaires à la situation d'inondation naturelle (arase totale). Pour ce scénario, les surfaces en eau en général sont plus faibles.

Ce scénario n'implique pas de nouvelles zones de venues d'eau dangereuses par rapport à la situation d'inondation naturelle (arase totale). Aucun bâtiment d'habitation n'est concerné par des venues d'eau dangereuses. La population impactée par des venues d'eau non dangereuses est évaluée à 6 personnes (8 personnes en situation d'inondation naturelle).

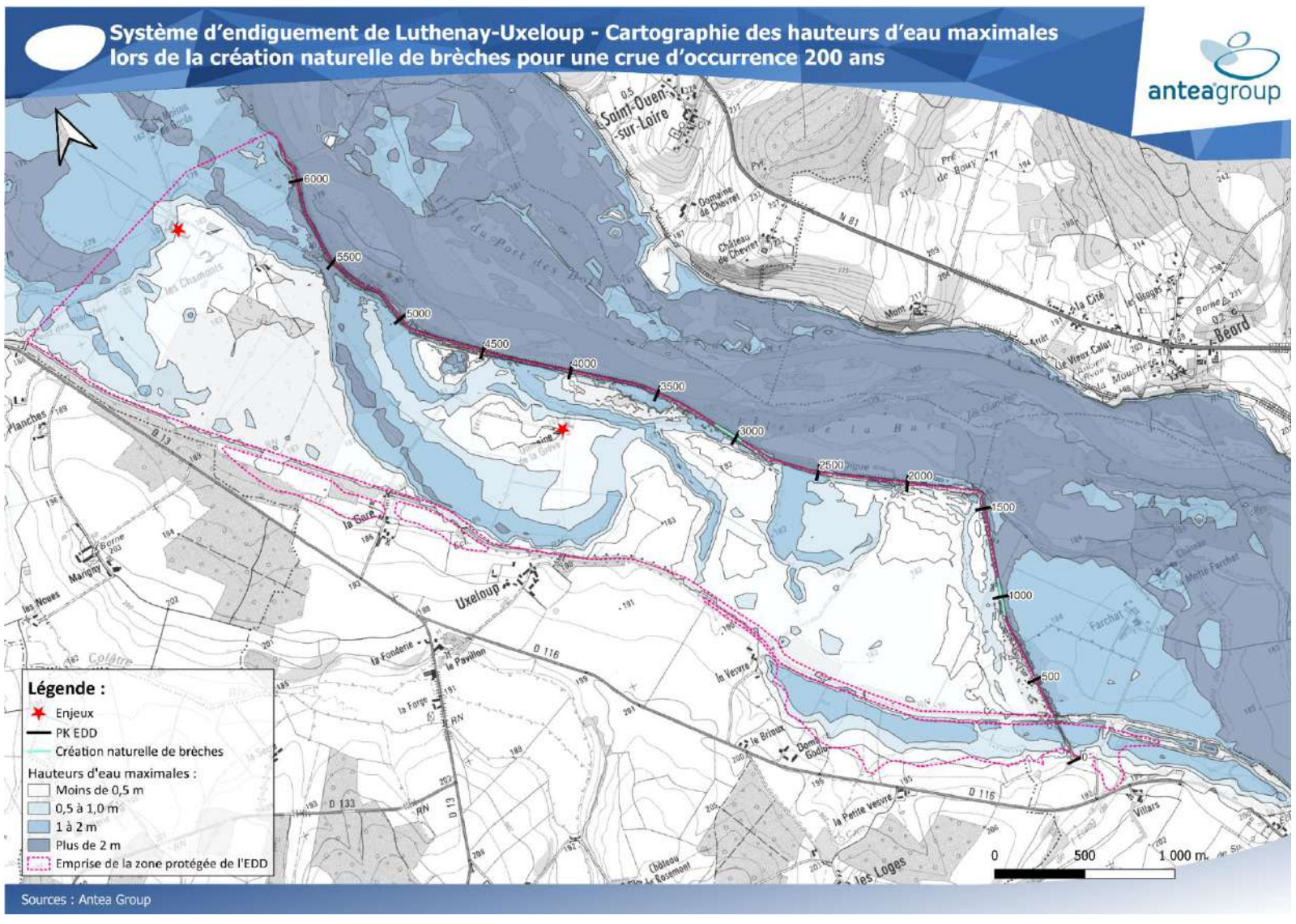

Figure 73 : Cartographie des hauteurs maximales en situation de brèches naturelles pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group)

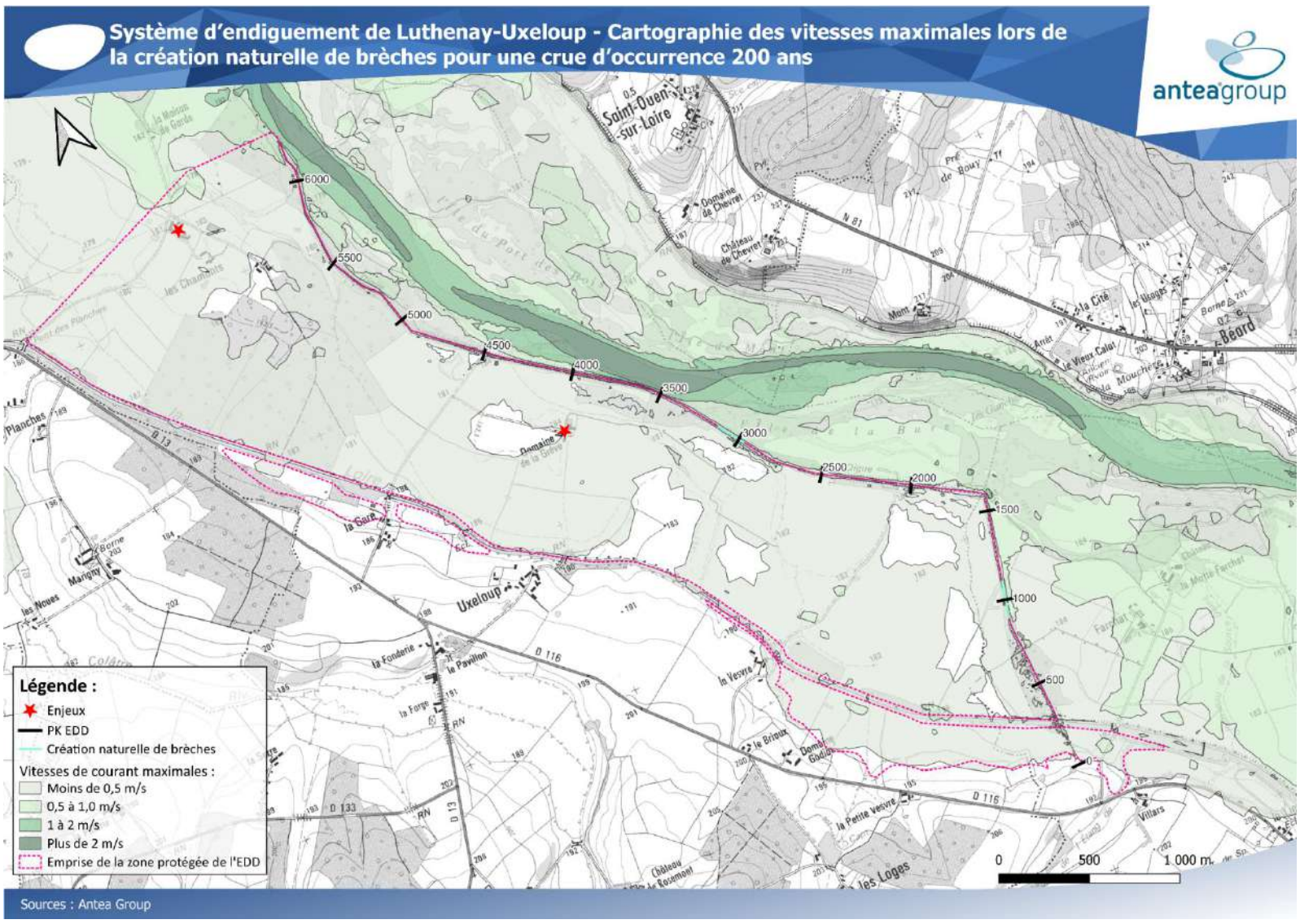

Figure 74 : Vitesses d'écoulement maximales en situation de brèches naturelles pour une crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group)

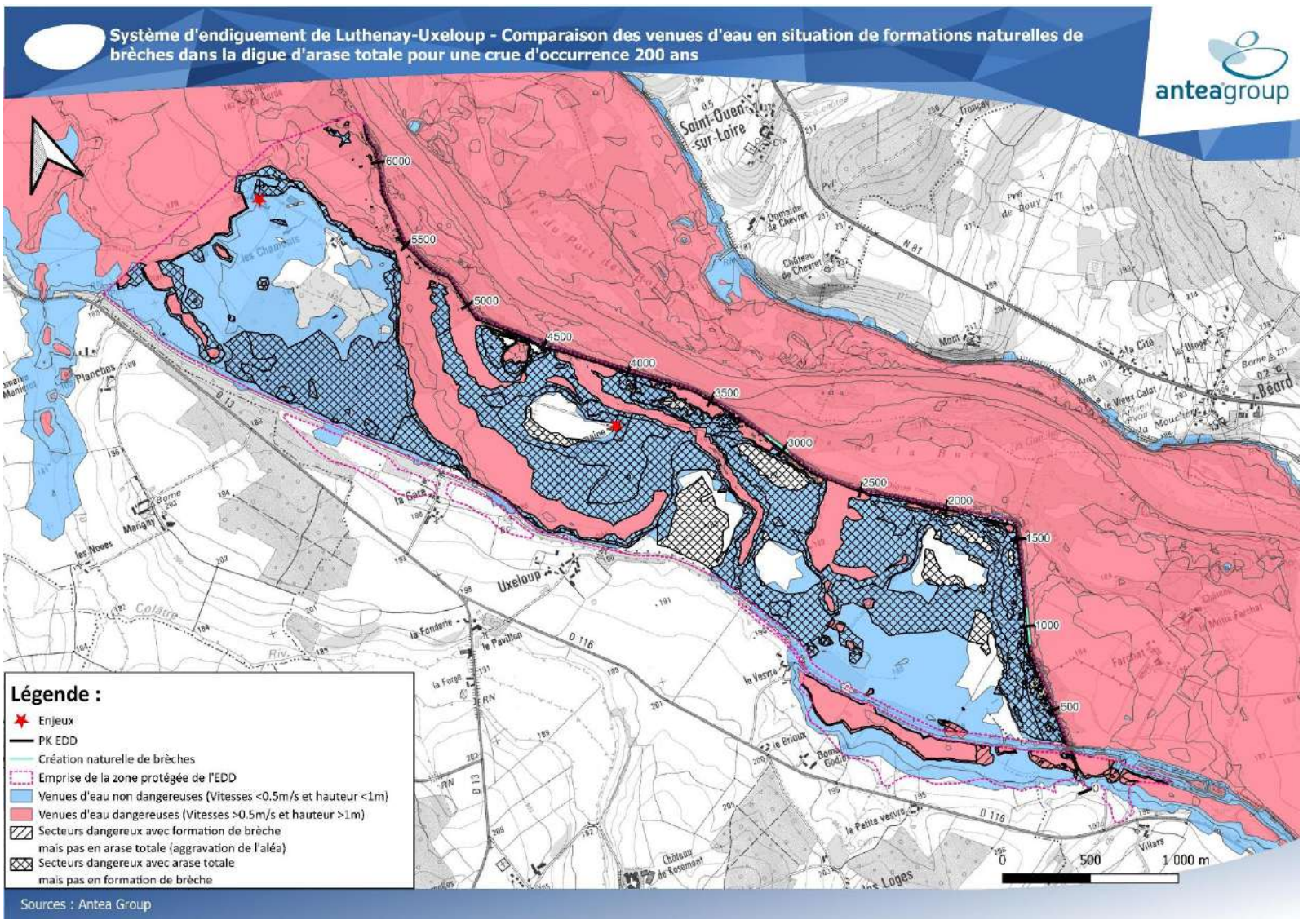

Figure 75 : Cartographie des venues d'eau dangereuses pour le scénario de brèches naturelles - crue d'occurrence 200 ans (Source : Antea Group)

5.3.3.5. Crue 500 ans

Pour la crue de 500 ans, les brèches s'ouvrant naturellement ne permettent pas d'assurer des conditions d'inondation du val similaires à la situation d'inondation naturelle (arase totale). L'ensemble de la zone protégée présente des venues d'eau dangereuses alors que pour ce scénario, la zone en aval présente des venues d'eau non dangereuse.

Ce scénario n'implique pas de nouvelles zones de venues d'eau dangereuses par rapport à la situation d'inondation naturelle (arase totale). Plusieurs bâtiments sont concernés par des venues d'eau dangereuses. La population impactée par des venues d'eau dangereuses est évaluée à 5 personnes (6 personnes en

situation d'inondation naturelle) et la population impactée par des venues d'eau non dangereuses est évaluée à 6 personnes (5 personnes en situation d'inondation naturelle).

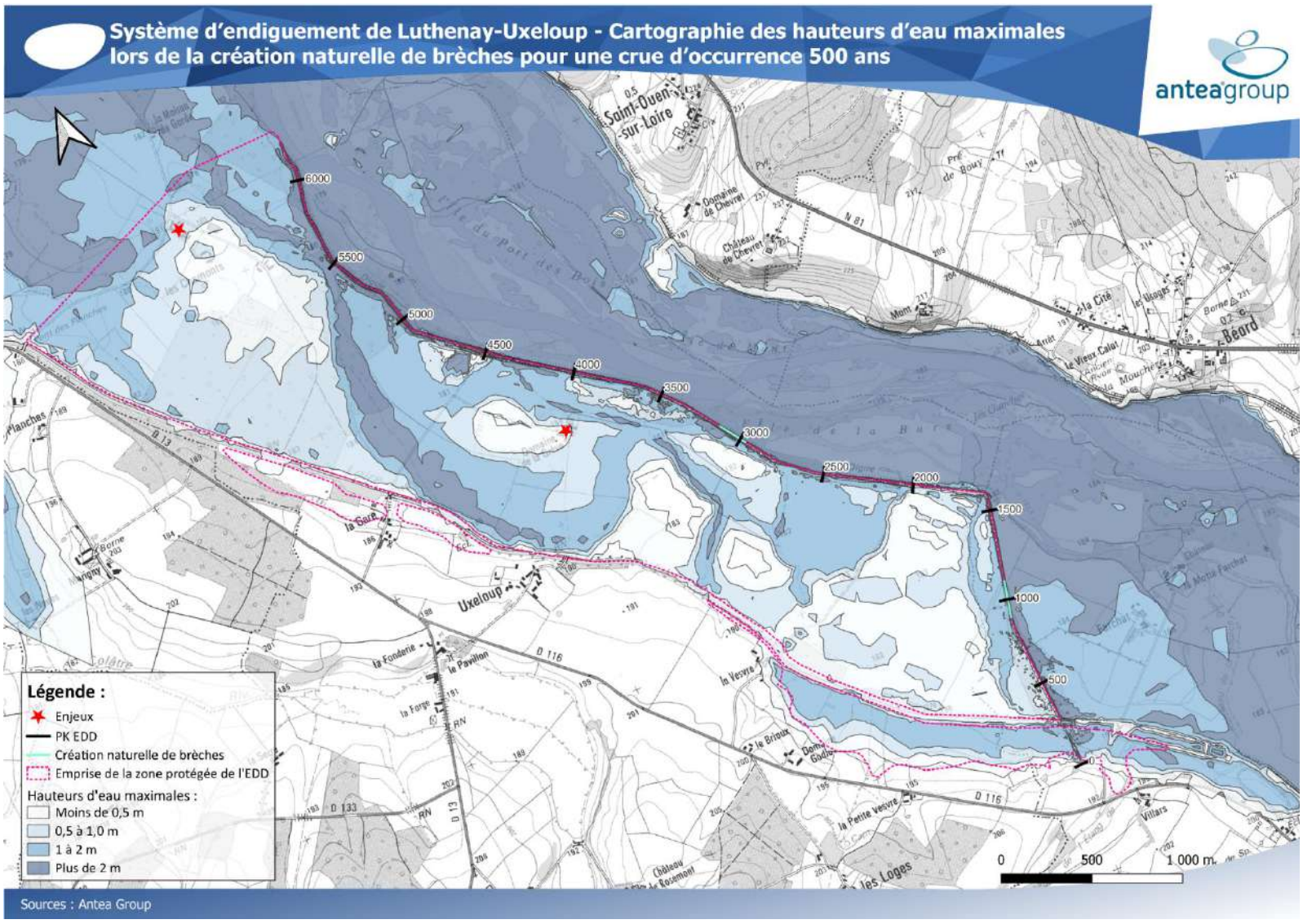

Figure 76 : Cartographie des hauteurs maximales en situation de brèches naturelles pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group)

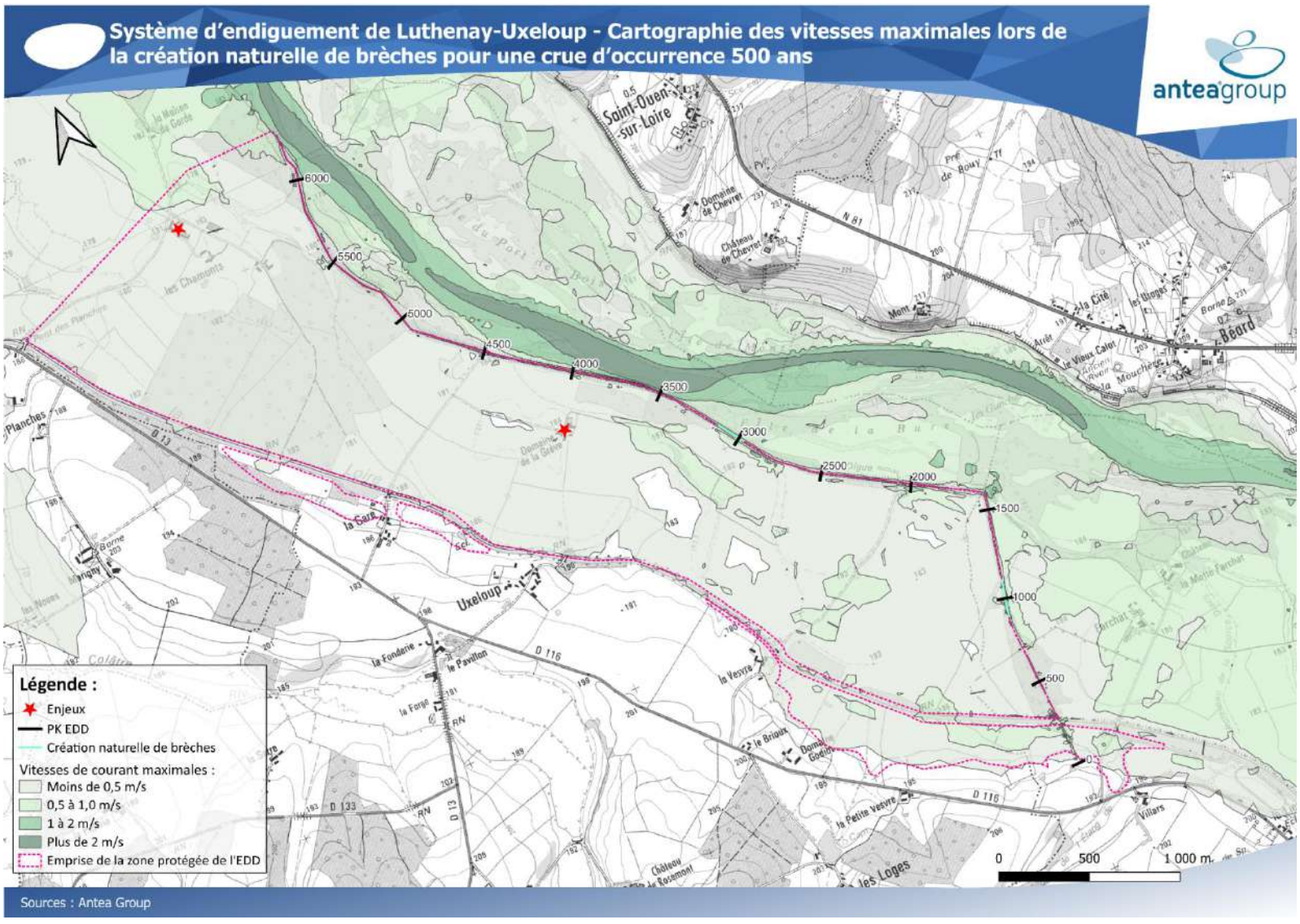

Figure 77 : Vitesses d'écoulement maximales en situation de brèches naturelles pour une crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group)

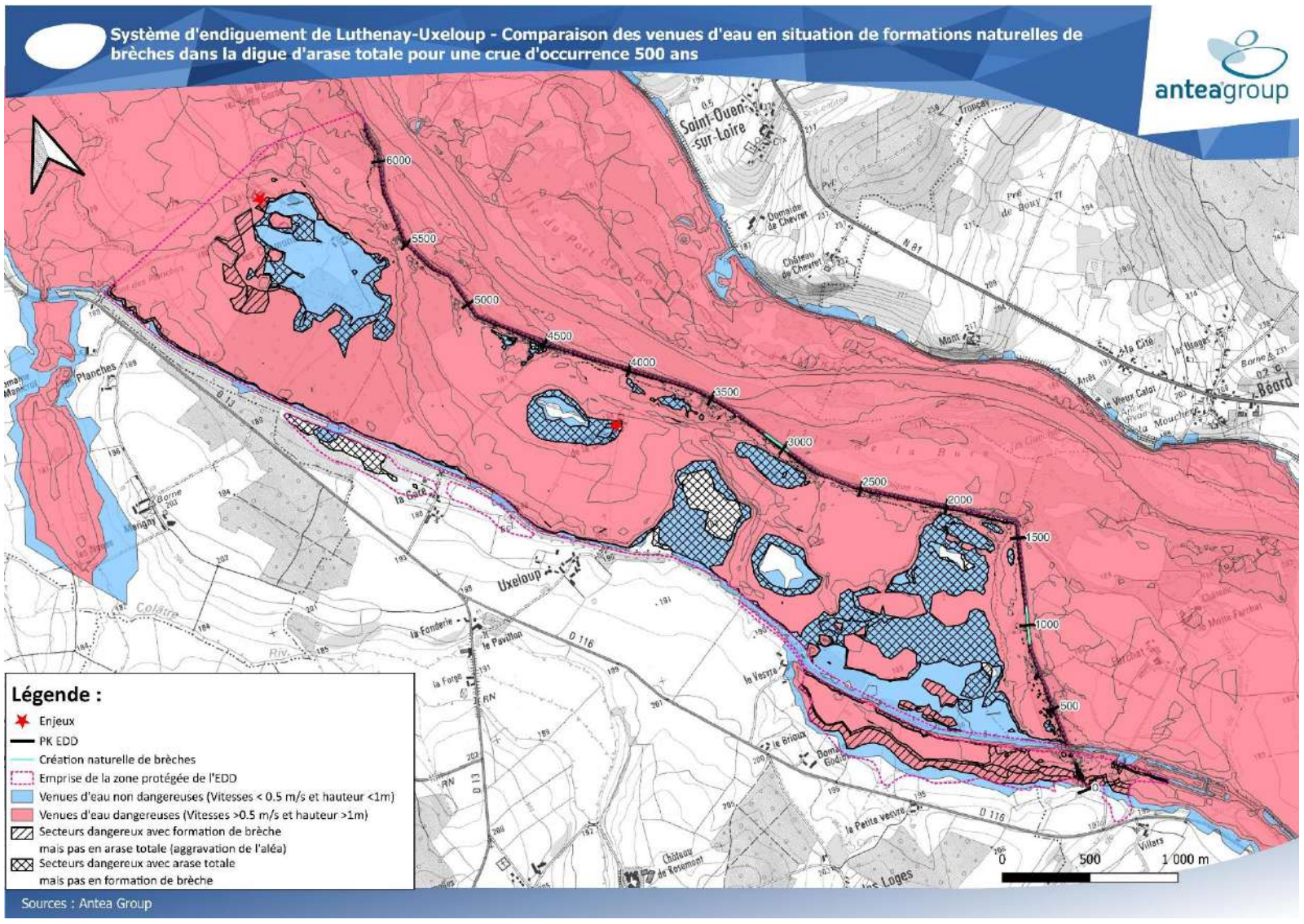

Figure 78 : Cartographie des venues d'eau dangereuses pour le scénario de brèches naturelles - crue d'occurrence 500 ans (Source : Antea Group)

6. Analyse et comparaison des scénarios

6.1. Surfaces et enjeux impactés

L'évaluation des enjeux présents dans la zone protégée a été réalisée dans le cadre de l'étude de dangers de 2017 sur la base des données d'occupation des sols, des données « bâti » de la BD Topo de l'IGN et de la grille de population INSEE. Les chiffres présentés correspondent à des estimations réalistes de population et non à des comptages précis. La même méthodologie a été appliquée dans le cadre de la présente étude pour évaluer les populations impactées. Les populations sont affectées aux bâtis de la BD Topo identifiés comme « résidentiel ».

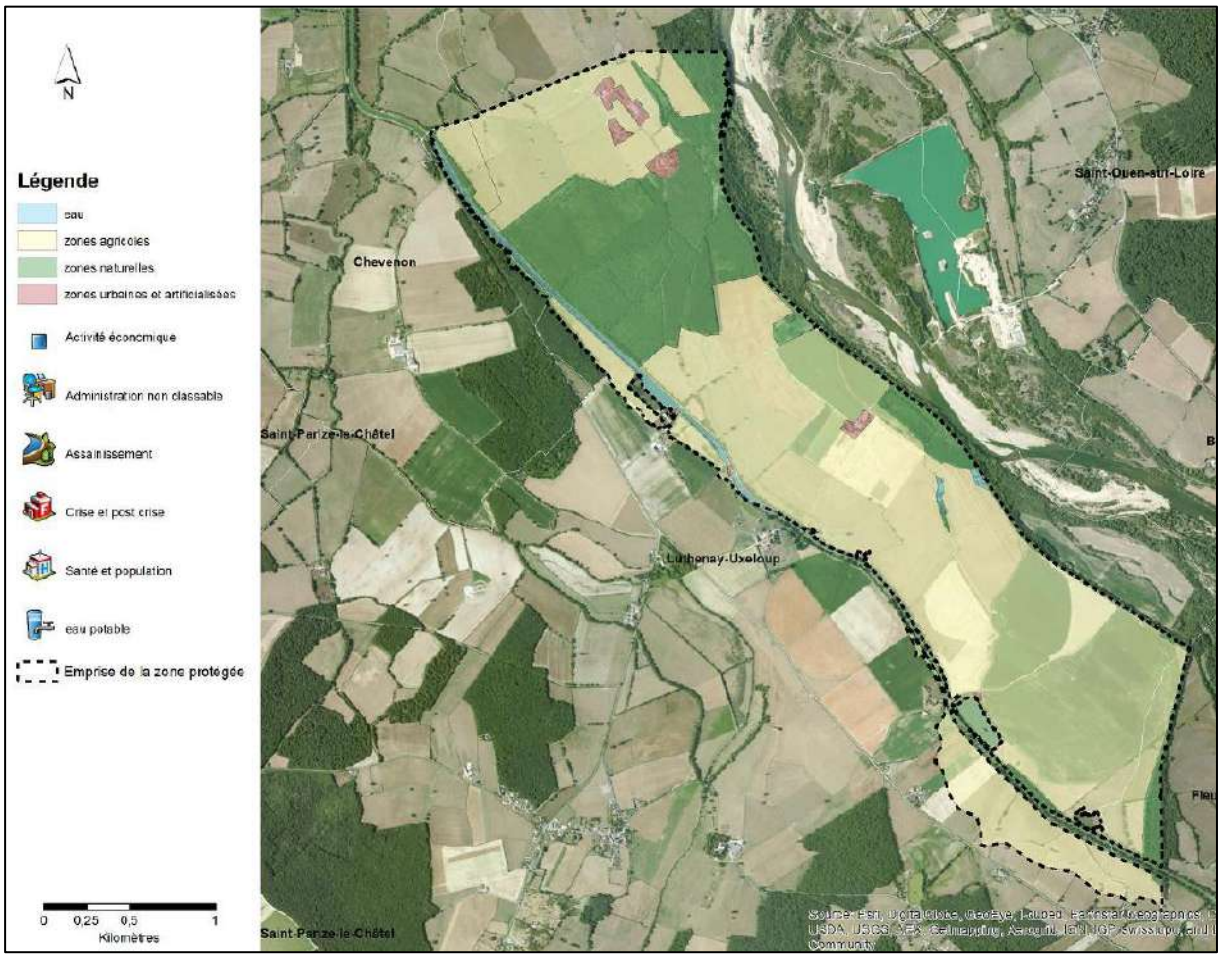

Figure 79. Occupation des sols et localisation des enjeux dans la zone protégée du val de Luthenay (Source : BRL Ingénierie, 2017)

Le tableau suivant synthétise les surfaces et les enjeux humains inondés dans l'emprise de la zone protégée délimitée dans l'étude de dangers pour les différents scénarios étudiés.

Tableau 11. Synthèse des surfaces (en ha) et des enjeux humains inondés pour les différents scénarios étudiés

Occurrence de crue	Venues dangereuses / non dangereuses	Surfaces en eau (plans d'eau, fossés)	Espace naturel boisé	Espace agricole	Espace urbanisé	Total général	Population
		Surfaces totales de la zone protégée					
		5.1	151.8	489.0	9.0	654.8	14
		Scénario régularisation : Maintien de l'ouvrage					
2 ans	Dangereuses	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
	Non dangereuses	0.0	0.1	1.8	0.0	1.9	0
	TOTAL	0.0	0.1	1.8	0.0	1.9	0
20 ans	Dangereuses	0.0	9.0	3.2	0.0	12.1	0
	Non dangereuses	0.0	35.2	67.7	2.0	104.9	3
	TOTAL	0.0	44.2	70.9	2.0	117.0	3
200 ans	Dangereuses	1.4	42.4	103.3	0.1	147.1	0
	Non dangereuses	3.6	100.9	314.4	7.8	426.8	11
	TOTAL	4.9	143.3	417.7	8.0	573.9	11
500 ans	Dangereuses	1.5	53.7	222.3	0.5	278.0	0
	Non dangereuses	3.5	96.6	235.4	8.5	344.0	11
	TOTAL	5.0	150.4	457.7	9.0	622.0	11
		Scénario neutralisation : Arasement total de l'ouvrage					
2 ans	Dangereuses	0.6	8.8	2.2	0.0	11.7	0
	Non dangereuses	1.0	38.1	120.4	1.1	160.7	0
	TOTAL	1.7	46.9	122.7	1.1	172.3	0
20 ans	Dangereuses	1.6	34.5	69.5	0.1	105.8	0
	Non dangereuses	0.1	86.8	236.4	4.1	327.4	7
	TOTAL	1.7	121.4	306.0	4.2	433.2	7
200 ans	Dangereuses	1.7	109.0	313.3	2.5	426.5	3
	Non dangereuses	3.2	42.6	157.5	6.4	209.8	8
	TOTAL	4.9	151.7	470.8	9.0	636.3	11
500 ans	Dangereuses	1.8	130.8	397.7	5.0	535.3	6
	Non dangereuses	3.3	21.0	82.9	3.9	111.2	5
	TOTAL	5.1	151.7	480.7	9.0	646.5	11
		Scénario neutralisation : Arasement partiel de l'ouvrage					
2 ans	Dangereuses	0.4	6.7	1.4	0.0	8.6	0
	Non dangereuses	1.1	33.5	111.2	0.9	146.6	0
	TOTAL	1.5	40.2	112.6	0.9	155.2	0
20 ans	Dangereuses	1.4	31.0	67.1	0.1	99.6	0
	Non dangereuses	0.2	86.1	237.8	3.7	327.7	7
	TOTAL	1.6	117.1	304.9	3.8	427.3	7
200 ans	Dangereuses	1.5	108.2	299.3	1.4	410.5	1
	Non dangereuses	3.5	42.3	175.3	7.5	228.6	10
	TOTAL	5.0	150.5	474.7	9.0	639.1	11
500 ans	Dangereuses	1.6	129.1	373.3	2.7	506.6	6

Occurrence de crue	Venues dangereuses / non dangereuses	Surfaces en eau (plans d'eau, fossés)	Espace naturel boisé	Espace agricole	Espace urbanisé	Total général	Population
	Non dangereuses	3.5	22.1	110.5	6.3	142.4	8
	TOTAL	5.1	151.1	483.8	9.0	649.0	14
		Scénario de brèches naturelles : Brèches de l'EDD					
2 ans	Dangereuses	0	0	0	0	0	0
	Non dangereuses	0	0	0	0	0	0
	TOTAL	0	0	0	0	0	0
20 ans	Dangereuses	1.4	26.2	41.5	0.1	69.1	0
	Non dangereuses	0.2	33.4	199.1	2.9	235.6	3
	TOTAL	1.6	59.6	240.6	2.9	304.7	3
200 ans	Dangereuses	1.4	42.7	106.1	0.2	150.3	0
	Non dangereuses	3.5	89.1	297.5	6.9	397.1	6
	TOTAL	4.9	131.8	403.6	7.1	547.4	6
500 ans	Dangereuses	1.6	121.2	331.3	4.3	458.4	5
	Non dangereuses	3.3	28.3	121.4	4.6	157.7	6
	TOTAL	4.9	149.5	452.7	8.9	616.1	11

Le scénario d'arase partielle étudié permet d'assurer la transparence de l'ouvrage en permettant de rétablir les conditions naturelles d'inondation du val. De plus, ce scénario n'augmente pas les zones impactées par des aléas forts et les populations exposées. Enfin, la charge hydraulique résiduelle sur le remblai est acceptable.

6.2. Contraintes réglementaires

6.2.1. Régularisation de l'ouvrage

La solution de régularisation de la digue de Luthenay implique les obligations réglementaires suivantes :

- Obligation de classement de l'ouvrage en système d'endiguement au titre de la rubrique 3.2.6.0 (procédure simplifiée possible si le dépôt est effectué avant le 30 juin 2023, autrement il est nécessaire de réaliser une procédure d'autorisation complète) ;
- Transfert obligatoire de la gestion et de l'entretien aux EPCI avec éventuellement la possibilité de déléguer à l'EP Loire au travers d'un transfert de prestation de service ;
- Obligations de maintien en bon état de l'ouvrage et de suivi régulier (travaux de mise en conformité à réaliser ainsi que l'entretien périodique). A noter que les travaux nécessaires sur la végétation peuvent nécessiter des autorisations en matière de dérogation « espèces protégées » ;
- Réalisation de visites techniques approfondies (VTA) tous les 6 ans et actualisation de l'étude de dangers tous les 20 ans.

6.2.2. Neutralisation de l'ouvrage

La solution de neutralisation de l'ouvrage, qu'il s'agisse du scénario d'arasement total ou d'arasement partiel, implique les obligations réglementaires suivantes :

- Procédure de Porter-à-Connaissance (PAC) pour déclarer la neutralisation de la digue (à déposer au plus tard 1 mois après la caducité de l'autorisation) précisant :
    - la date de fin de la gestion de l'ouvrage au titre de la rubrique 3.2.6.0 (au plus tard la date de caducité de l'autorisation digue, soit le 01/07/2024) ;
    - les modalités de neutralisation envisagées (description du scénario retenu) :
        - soit une suppression totale de l'ouvrage ;
        - soit un maintien total ou partiel de l'ouvrage en justifiant l'absence de sur-aléa par des modélisation de venue d'eau avec ou sans l'ouvrage ;
    - une description des travaux (au stade AVP) permettant de neutraliser l'ouvrage le cas échéant et un échéancier de réalisation des travaux ;
    - Une preuve de l'information des maires des communes concernées aux fins de la mise à jour de leur plan communal de sauvegarde ;
    - Une clarification des usages que le gestionnaire souhaite conserver le cas échéant.
- Les travaux sur la végétation en place peuvent nécessiter des autorisations en matière de dérogation « espèces protégées » et par ailleurs, le secteur d'étude est situé en zone Natura 2000 ;
- Conformément à la convention existante, l'opération de neutralisation est prise en charge par le propriétaire de l'ouvrage, c'est-à-dire l'Etat.

Remarque : Pour la réalisation du dossier de Porter-à-Connaissance, il est préconisé d'engager une étude Avant-Projet (AVP) de définition des travaux.

Il convient de noter que la solution de création naturelle de brèches ne permet pas de neutraliser la digue, du fait de la charge hydraulique résiduelle appliquée sur le remblai restant trop importante. Les travaux de neutralisation de l'ouvrage sont ainsi inévitables.

6.2.3. Indemnités potentielles

En dehors de la définition d'éventuelles Servitudes d'Utilité Publique, au regard des informations collectées il ne semble pas obligatoire de mettre en place des indemnités pour les agriculteurs (propriétaire et/ou exploitant) impactés en cas d'inondation sur des zones rendues inondables du fait de la mise en transparence de l'ouvrage.

Toutefois il est possible de mettre en œuvre une démarche volontaire entre le porteur de projet et les structures représentatives de la profession agricole pour définir un protocole local d'indemnisation (conventionnement, accord amiable, etc.).

6.3. Coûts d'investissement et entretien

6.3.1. Régularisation de l'ouvrage

La régularisation de la digue implique d'assumer les coûts relatifs à la mise en conformité, à l'entretien et au suivi de la digue conformément à la réglementation applicable aux systèmes d'endiguement :

- Mise en œuvre des préconisations issues de la VTA et de l'étude de dangers pour assurer le traitement et le suivi des désordres ;
- Coûts des études relatives aux travaux à engager (études techniques et environnementales, MOE) ;
- Coût des études pour l'établissement du dossier réglementaire ;
- Mesures de suivi (visites périodiques, VTA, mises à jour de l'étude de dangers) ;
- Entretien périodique.

Il convient de noter que l'étude de dangers ayant été établi antérieurement à l'arrêté du 7 avril 2017, le chapitre 9 de l'étude de dangers préconisait des travaux par ordre de priorité visant à relever le niveau de sûreté. Dans le cas présent où la régularisation serait réalisée sans augmentation du niveau de sûreté actuel, ces travaux ne seraient pas à réaliser impérativement. Ils sont néanmoins présentés ci-dessous par ordre de priorité à titre informatif :

- Des travaux de confortement ont été réalisés en 2022 sur les secteurs identifiés dans l'étude de dangers au niveau des PK2150 et PK3050 ;
- Travaux de reconstruction d'ouvrage sur le tronçon numéro 1 (pk300 au pk1350) classés en priorité 1 :
    - Retrait de la végétation présente sur les talus et en crête ;
    - Déblai de la digue existante ;
    - Reconstruction de la levée avec apport de matériaux et terrassements ;
    - Montant estimé : 1 M€ HT (hors études, acquisitions foncières et aléas) ;
- Travaux de création d'un chemin de service en pied de digue coté val entre les PK2500 et PK2700 classés en priorité 2 : Montant estimé : 80 000 € HT
- Travaux de priorité 3 consistant à reprendre la piste de crête pour homogénéiser le profil en long de l'ouvrage et ainsi assurer une revanche constante (travaux non chiffrés et études nécessaires).

Les couts d'entretien et de suivi sont donnés sur la base de l'ouvrage *Coût des protections contre les inondation fluviales* (CEREMA, juillet 2014). Les coûts pris en compte dans ce document sont issus d'opérations réalisées sur la période 2007-2013. Afin de les actualiser, une majoration de 20% a été appliquée aux coûts présentés pour les digues de la Loire.

Le tableau suivant synthétise les coûts estimatifs des travaux prioritaires identifiés à ce stade, mais non obligatoires dans le cas présent d'une régularisation sans augmentation du niveau de sûreté, et des coûts annuels de gestion et d'entretien qui seront, eux, obligatoirement à mettre en œuvre pour maintenir le niveau de sûreté :

Tableau 12. Synthèse des coûts d'investissement, d'entretien et de suivi relatifs à la régularisation de l'ouvrage

Poste	Détail	Montant estimé (€ HT)
Investissement en études et travaux (non obligatoires au regard du maintien du niveau de sureté lors de la régularisation)	Travaux priorité 1 + 2 EDD :	1,08 M€ (hors études)
	Travaux priorité 3 EDD Etudes techniques et environnementales Maîtrise d'œuvre	non chiffré
Total investissement études et travaux		**1 à 2 M€ à court terme**
Entretien (obligatoire)	10200 €/km/an	61 200 €/an
Gestion (obligatoire)	2400 €/km/an	14 400 €/an
Total entretien et gestion annuel		**75 600 €/an**

6.3.2. Neutralisation de l'ouvrage

La neutralisation de l'ouvrage par arasement partiel ou total du remblai implique les coûts suivants :

- Etudes et autorisation :
  - Etude AVP des travaux de neutralisation ;
  - Etudes environnementales relatives aux travaux (diagnostic écologique, incidences Natura 2000, éventuel dossier de dérogation espèces protégées) ;
  - Dossier de Porter-à-Connaissance ;
- Travaux de neutralisation :
  - Installations de chantier, suivi et MOE ;
  - Traitement de la végétation ;
  - Déblais ;
  - Protections par enrochement (optionnelles) et végétalisation.

Le montant estimatif des travaux de neutralisation pour la solution d'arase partielle comprenant la création de 5 ouvertures est de l'ordre de 665 000 € HT sans mise en place d'enrochement et 880 000 € HT avec la mise en place d'enrochement.

Le coût de la solution d'arase totale des 6 km de digue existante est de l'ordre de 5,2 M € HT.

Le tableau suivant donne synthétise les coûts estimatifs des travaux de neutralisation à mettre en œuvre (scénario d'arase partielle et scénario d'arase totale) :

Tableau 13. Coût estimatif des travaux de neutralisation de la digue (scénario d'arase partielle et scénario d'arase totale) (Source : Antea Group)

	Poste	Prix unitaire (€ HT)		Scénario d'arase partielle (5 ouvertures)		Scénario d'arase totale (6 km)	
				Quantité	Montant (€ HT)	Quantité	Montant (€ HT)
Préparation	Installation de chantier	15 000	(Forfait)	1	15 000	1	15 000
	Suivi et MOE	100 000	(Forfait)	1	100 000	1	100 000
Traitement végétation	débroussaillage	3,5	€/m²	20 100	70 350	198 000	693 000
	déboisement	100	€/U	120	12 000	1 000	100 000
Déblai	Déblai et mise en dépôt	5	€/m³	24 200	121 000	216 000	1 080 000
	Evacuation des déblais	13	€/m³	24 200	314 600	216 000	2 808 000
Protection	Végétalisation	2	€/m²	15 000	30 000	198 000	396 000
TOTAL (€ HT)					**662 950**		**5 192 000**
En option : terrassement et enrochement (ou brut de minage)		80	€/m³	2 700	216 000	0	0
TOTAL avec enrochement optionnel (€ HT)					**878 950**		**5 192 000**

Nota bene : les matériaux de la digue pourraient éventuellement être utilisées pour recharger le lit mineur de la Loire en sédiments, sous condition que le type de matériaux soit adapté à cet usage et sous réserve qu'un besoin en rechargement soit démontré par une étude complémentaire, pour faire le bilan sédimentaire de la Loire.

6.4. Gains environnementaux

6.4.1. Dynamique fluviale

6.4.1.1. Etat des lieux

Une étude d'analyse géologique et morphologique de la Loire dans le Val de Luthenay-Uxeloup a été réalisée dans le cadre de l'étude de dangers des digues de la Loire de juin 2017 par le bureau d'étude BRL Ingénierie. Elle caractérise la morphodynamique locale dans la situation actuelle. Les éléments d'état des lieux présentés ci-après sont issus de cette étude.

L'analyse des paramètres morphologiques susceptibles d'affecter les endiguements porte sur les paramètres suivants :

- L'évolution altitudinale du lit de la Loire ;
- Le potentiel de divagation du lit ;
- Le potentiel de végétalisation du lit susceptible d'engendrer une rehausse de la ligne d'eau en crue ;
- Les obstacles ou atterrissements en lit mineur à l'origine d'écoulements sécants aux systèmes d'endiguement ;
- L'influence potentielle des écoulements en concavité de méandres.

a) Evolution du profil en long

Le val de Luthenay-Uxeloup présente une incision pouvant atteindre 1 m au maximum entre les années 1996 et 2000. Durant les périodes récentes, soit entre 2000 et 2005, le profil en long est stable et ne présente pas de phénomènes remarquables d'incision ou d'exhaussement du cours d'eau. Les incisions anciennes sont toutefois à prendre en considération.

Au niveau fonctionnel, l'abaissement de la ligne d'eau peut avoir plusieurs effets sur les digues :

- Une augmentation du débit capable de la section (débit de plein bord) avec une sollicitation potentiellement plus importante sur les digues ;
- Une incision des talus qui peut conduire à une déstabilisation accrue pour les digues localisées à proximité du lit d'étiage ;
- Plus généralement mais aussi plus fréquemment, une végétalisation accrue de barres sédimentaires et par un processus de rétroaction positive, un engraissement plus important à l'origine d'un agrandissement des îles. Cette évolution n'est pas uniquement le fait de l'incision elle est aussi à combiner à la diminution des crues morphogènes qui ne permettent plus de remodeler « en profondeur » les formes fluviales.

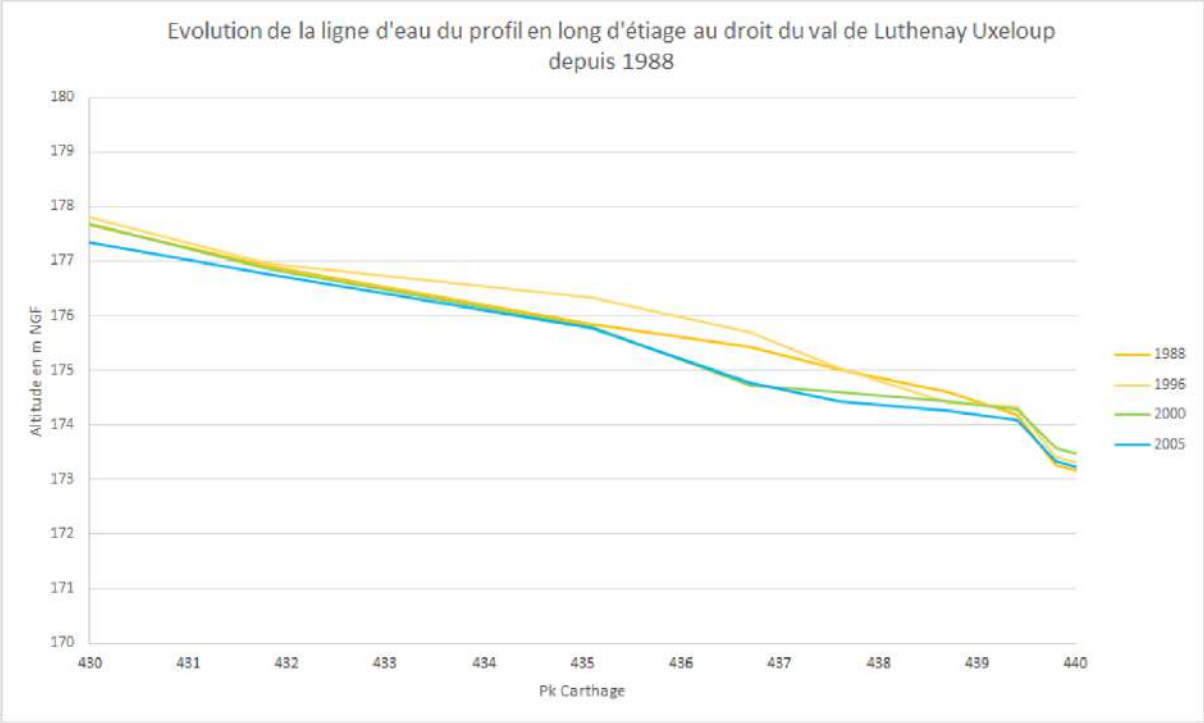

Figure 80. Evolution de la ligne d'eau du profil en long d'étiage au droit du val de Luthenay-Uxeloup depuis 1988 (BRL Ingénierie, 2017)

b) Evolutions du tracé

A l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude, les observations font état de processus morphodynamiques actifs sur la partie amont de la Loire. Le val de Luthenay-Uxeloup est particulièrement concerné par ces phénomènes, avec une modification quasi complète du tracé du lit de la Loire entre 1971 et 2005 au droit du val.

Ces évolutions sont dues à une disponibilité sédimentaire plus importante sur la Loire amont que sur la Loire moyenne, favorisée par des pentes plus importantes et une végétalisation moindre des berges et des atterrissements.

Au droit du val de Luthenay-Uxeloup, le cours de la Loire a subi des modifications importantes de son tracé, notamment visible entre les Pk 433 et 437 entre 1971 et 2005, où l'ancien lit de la Loire forme aujourd'hui les formes alluvionnaires situées en intrados.

Ainsi, le lit de la Loire a subi deux formes d'évolutions distinctes sur ce secteur, soit un éloignement du système d'endiguement par érosion des terrains situés à l'Est, soit un rapprochement vers le système d'endiguement par érosion des berges situées à l'Ouest.

L'amplitude des méandres est moins importante durant les périodes récentes. Quelques atterrissements ont subi une phase de végétalisation récente, notamment au droit du Pk 433 et 435,4.

Entre 2005 et 2010, pour des conditions hydrologiques quasi-similaires, une progression du lit de la Loire en pied de digue est observable entre les Pk 434 et 435.

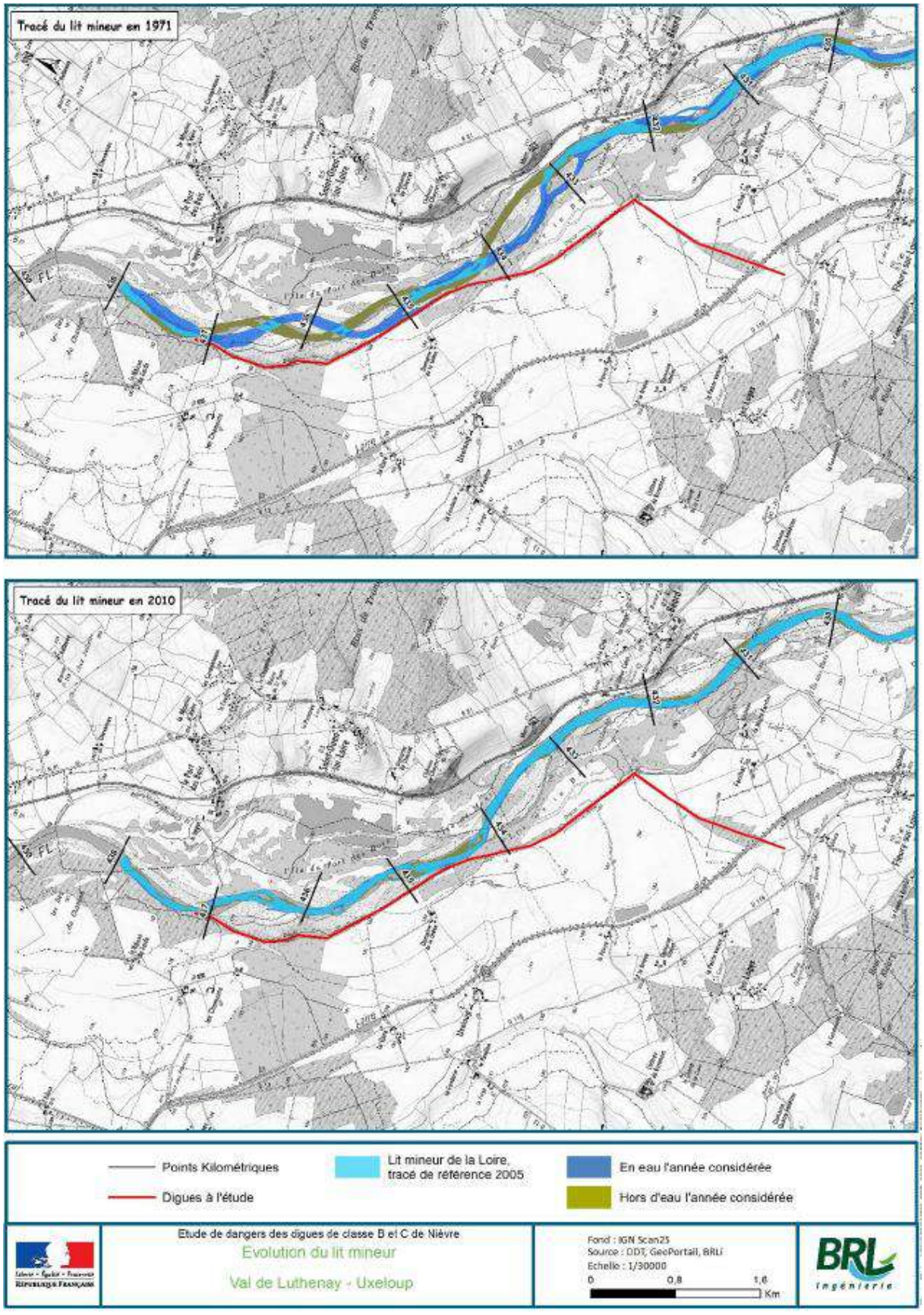

Figure 81. Evolution du tracé du lit mineur entre 1971, 2005 et 2010 (Source : BRL)

c) Sollicitations importantes du pied de digue

Cela concerne les zones caractérisées par une forte sinuosité susceptible d'engendrer des contraintes fortes en pied d'ouvrages. Ces secteurs sont caractérisés par des mouilles profondes présentes au niveau d'un goulot d'étranglement du lit mineur.

Deux secteurs sont caractérisés par des sollicitations de berges soutenant le système d'endiguement. Ces mêmes secteurs sont caractérisés par la présence d'obstacles ayant pour effet d'orienter les écoulements en direction du système d'endiguement. Ces secteurs se situent au droit des Pk 434,2 et 437.

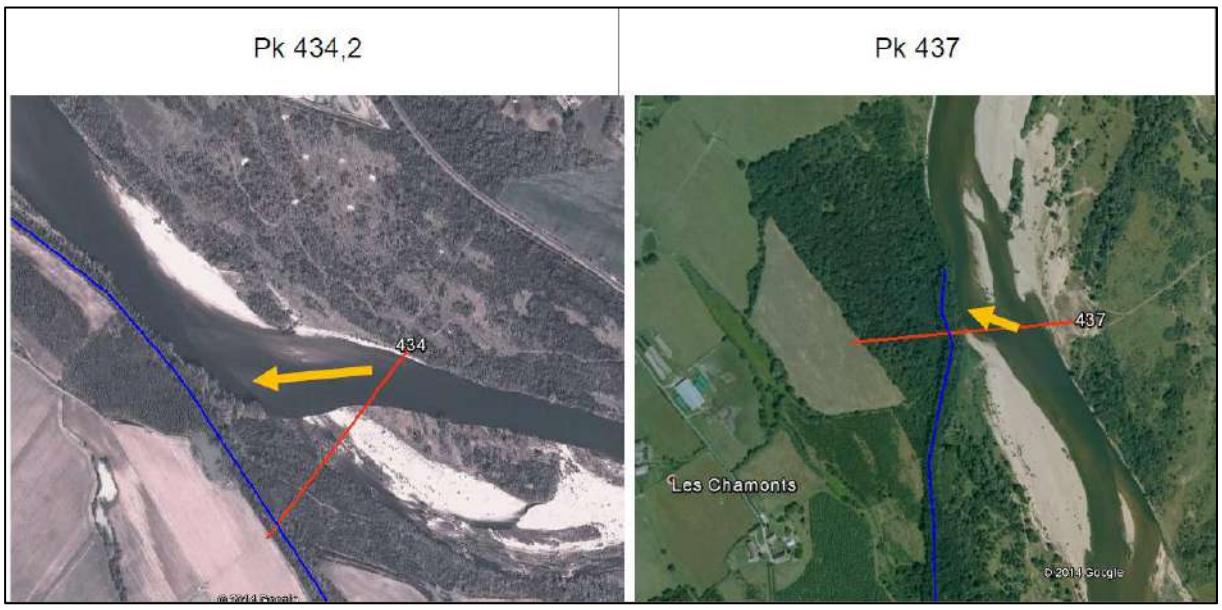

Figure 82. Obstacles à l'origine de courants sécants aux endiguements (Source : Antea Group)

d) Synthèse relative aux aspects morphodynamiques

Paramètres	Rehausse potentielle de la ligne d'eau par la végétation	Risque de végétalisation	Sollicitation du pied de digue	Obstacles à l'origine d'écoulements sécants	Evolutions du profil en long	Evolutions du tracé
Evaluation	Végétalisation du lit mineur / largeur du lit endigué = 0 - 4 % Pas de rehausse de la ligne d'eau en crue engendrée par la végétalisation du lit mineur.	Bande active comprise entre la moyenne de 175 m et la limite critique de 275 m. Faibles surfaces disponibles pour la végétalisation.	Deux secteurs présentent des sollicitations au niveau des berges soutenant le système d'endiguement au droit des Pk 434,2 et 437.	Deux obstacles situés au droit des Pk 434,2 et 437 engendrent des écoulements sécants au système d'endiguement.	Stabilité du profil en long durant les périodes récentes	Nombreuses évolutions du tracé de la Loire entre 1971 et 2010.
Facteur de pondération				Ces obstacles favorisent les sollicitation en pied d'ouvrages identifiées sur ces mêmes secteurs		Entre les Pk 434 et 435, la Loire a progressé en pied d'ouvrage en érodant la berge situé en 1971 à l'interface. L'évolution de ce secteur est à suivre.
Qualification de l'aggravation de l'aléa de rupture	Négligeable	Négligeable	Important	Important	Négligeable	Modéré

Figure 83. Synthèse des aspects morphodynamiques (Source : BRL Ingénierie)

6.4.1.2. Evolutions potentielles de la dynamique fluviale

- **Régularisation de l'ouvrage :**
  - Maintien des contraintes sur les écoulements dues à la présence de la digue ;
  - Mobilité du cours d'eau sur la zone d'étude et présence d'obstacles susceptibles d'augmenter les sollicitations en pied d'ouvrage.

- **Effacement total :**
  - Restitution d'un profil de berge naturel en rive gauche permettant de rétablir les possibilités de divagation du fleuve ;
  - Elargissement de la zone d'expansion des crues permettant de mobiliser une plus grande partie du lit majeur et de réduire les vitesses d'écoulement ;
  - Potentialités de dépôts sédimentaires plus importantes en crue liés à l'élargissement de la zone d'expansion et à la réduction des vitesses d'écoulement.

- **Effacement partiel :**
  - Maintien de contraintes en berge limitant les possibilités de divagation du cours d'eau ;
  - Elargissement de la zone d'expansion des crues permettant de mobiliser une plus grande partie du lit majeur et de réduire les vitesses d'écoulement en crue ;
  - Potentialités de dépôts sédimentaires plus importantes en crue liés à l'élargissement de la zone d'expansion et à la réduction des vitesses d'écoulement.

- **Création naturelle de brèches lors d'une future crue :**
  - Dans un 1er temps, avant la formation des brèches :
    - Maintien des contraintes sur les écoulements dues à la présence de la digue ;
    - Mobilité du cours d'eau sur la zone d'étude et présence d'obstacles susceptibles d'augmenter les sollicitations en pied d'ouvrage.
  - Dans un 2nd temps, à la suite de la formation des brèches :
    - Maintien de contraintes en berge limitant les possibilités de divagation du cours d'eau ;
    - Elargissement de la zone d'expansion des crues permettant de mobiliser une plus grande partie du lit majeur et de réduire les vitesses d'écoulement en crue ;
    - Potentialités de dépôts sédimentaires plus importantes en crue liés à l'élargissement de la zone d'expansion et à la réduction des vitesses d'écoulement.

6.4.2. Habitats naturels

6.4.2.1. Etat des lieux

a) Espaces naturels protégés et d'inventaires

Le site d'étude est concerné par les zones de protection et d'inventaires indiquées dans le tableau et la carte ci-après :

Tableau 14. Zones de protection et d'inventaire écologique à proximité de la digue de Luthenay-Uxeloup (Source : Antea Group)

Type de protection	Intitulé	Localisation par rapport à la digue et au val
Natura 2000 – Directive Habitats	Val de Loire nivernais (FR2600966)	Inclus le cours d'eau La Loire et sa zone de divagation. Le tracé de la digue dans sa portion longeant la Loire est inclus dans le site N2000 et en constitue la limite
Natura 2000 – Directive Habitats	Bocages, forêts et milieux humides des Amognes et du bassin de la Machine (FR2601014)	Versants en rive droite de la Loire (en dehors de l'emprise de la digue et du val), à environ 700 m au plus proche de la digue.
Natura 2000 – Directive Oiseaux	Vallée de la Loire entre Imphy et Decize (FR2612010)	Inclus le val de Luthenay-Uxeloup. Le canal latéral à la Loire en constitue la limite sud
Natura 2000 – Directive Oiseaux	Bocage, forêts et milieux humides des Amognes et du bassin de la Machine (FR2612009)	Versants en rive droite de la Loire (en dehors de l'emprise de la digue et du val), à environ 700 m au plus proche de la digue.
Conservatoire d'Espaces Naturels	Les îles du Chamon (site du CEN Bourgogne)	Limite sud du site longeant la digue à l'aval sur environ 400 m
ZNIEFF type I	Loire de Nevers à Béard, le port des Bois (260002912)	Le tracé de la digue est intégré au périmètre de la ZNIEFF dans sa quasi-totalité (digue constituant la limite du périmètre)
ZNIEFF type II	Vallée de la Loire de Decize à Nevers (260009920)	Inclus le val de Luthenay-Uxeloup. Le canal latéral à la Loire en constitue la limite sud.
ZNIEFF type II	Forêts du plateau nivernais et du bassin houiller (260020011)	Versants en rive droite de la Loire (en dehors de l'emprise de la digue et du val), à environ 700 m au plus proche de la digue.

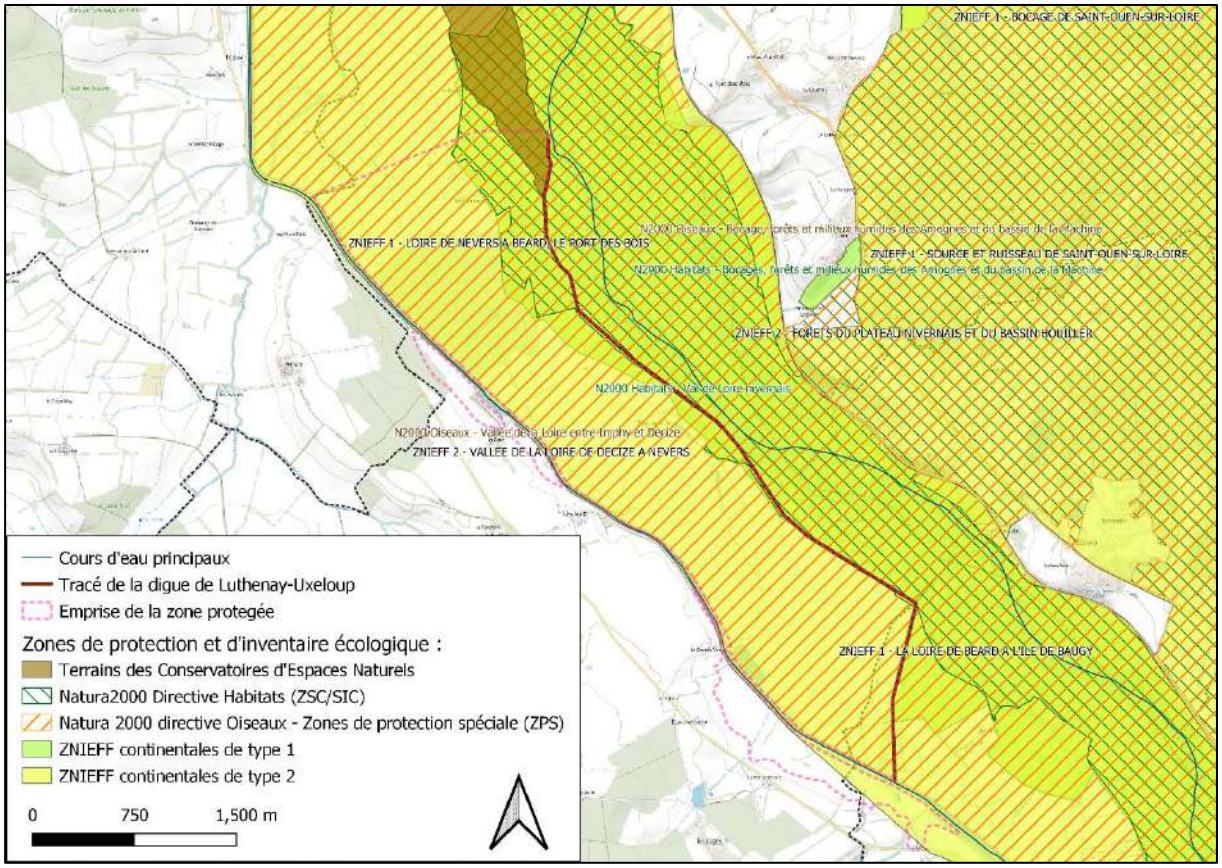

Figure 84. Localisation des zones de protection et d'inventaire écologique à proximité de la zone d'étude (source : INPN)

Au droit de la zone d'étude, la Loire et son lit majeur sont inclus dans plusieurs périmètres de protection écologique.

La vallée de la Loire nivernaise est représentative de la richesse des milieux ligériens. La dynamique naturelle de la Loire est à l'origine de la diversité écologique du site. Les différents milieux constituent une mosaïque d'habitats naturels, colonisée par de nombreuses espèces animales et végétales. Les conditions naturelles spécifiques aux milieux ligériens entrainent une grande originalité des habitats naturels et des espèces présentes. La vallée de la Loire constitue aussi un axe de migration de premier ordre pour la faune (oiseaux, poissons) et la flore.

Les différents habitats naturels constituent quatre grands ensembles : les végétations aquatiques et amphibies du bord des eaux, les végétations pionnières des vases et sables exondés, les prairies naturelles et pelouses, la forêt alluviale. Ils sont répartis régulièrement selon un axe transversal à la Loire, en fonction des conditions d'hydromorphie, de la nature du substrat et de la microtopographie.

6.4.2.2. Incidences potentielles sur les habitats naturels

Régularisation de l'ouvrage :

- Maintien de l'ouvrage existant : pas d'incidence en lien avec le milieu aquatique et les habitats rivulaires ;
- Travaux de confortement et gestion de la végétation (impacts sur la végétation) :
  - les prescriptions issues de la VTA de 2020 recommandent notamment la mise en place d'une gestion raisonnée de la végétation et la création de layons de visite sur les secteurs fortement arborés ;
  - Le traitement des désordres sur la digue peut nécessiter également des opérations d'abatage d'arbres et de dessouchage ;

Effacement total :

- Impacts importants sur la végétation existante sur la totalité de l'emprise de la digue et ses abords en phase travaux à court terme, mais création d'une végétation alluviale à long terme, plus basse et mieux connectée à sa nappe alluviale ;
- Perturbation de la faune en phase de travaux (nécessité d'adapter les périodes et de prévoir des mesures de maîtrise des pollutions et des nuisances) ;
- Possibilité d'évolution du tracé du cours d'eau en rive gauche ;
- Redynamisation potentielle d'anciens méandres ;
- Développement potentiel de boisements alluviaux ;
- Ouverture de nouvelles zones fréquemment inondables en rive gauche pouvant développer des caractéristiques de zones humides et des potentialités de frayères pour la faune piscicole (rétablissement de connexions entre le fleuve et ses annexes hydrauliques avec notamment une mise en eau plus fréquente des boires).

Effacement partiel :

- Impacts sur la végétation existante au droit des arasements à créer (phase travaux) ;
- Perturbation de la faune en phase de travaux (nécessité d'adapter les périodes et de prévoir des mesures de maîtrise des pollutions et des nuisances) ;
- Préservation de la végétation existante sur les tronçons d'ouvrage laissés en place ;
- Rétablissement de chenaux d'écoulement naturels au sein du val ;
- Inondabilité fréquente (<2ans) de certains secteurs à l'intérieur du val avec restauration de milieux humides ;
- Ces conditions peuvent potentiellement favoriser le développement de boisements alluviaux le long de l'ouvrage et des chenaux d'écoulement préférentiels à l'intérieur du val (rétablissement de connexions entre le fleuve et ses annexes hydrauliques avec notamment une mise en eau plus fréquente des boires).

- **Création naturelle de brèches lors d'une future crue :**
  - A court ou moyen terme, tant qu'aucune brèche n'est survenue :
    - Maintien de l'ouvrage existant sur le court terme : pas d'incidence en lien avec le milieu aquatique et les habitats rivulaires sur le court terme ;
    - Absence de travaux de confortement ou de mise en transparence sur le court terme : pas d'incidence en lien avec le milieu aquatique et les habitats rivulaire ;
    - Préservation de la végétation existante sur l'ensemble de l'ouvrage non impacté ;
  - A moyen ou long terme, une fois qu'une ou plusieurs brèches sont survenues :
    - Impacts sur la végétation existante au droit des brèches survenues (ouverture naturelle) ;
    - Préservation de la végétation existante sur les tronçons d'ouvrage laissés en place ;
    - Rétablissement de chenaux d'écoulement naturels au sein du val ;
    - Inondabilité fréquente (<2ans) de certains secteurs à l'intérieur du val avec restauration de milieux humides ;
    - Ces conditions peuvent potentiellement favoriser le développement de boisements alluviaux le long de l'ouvrage et des chenaux d'écoulement préférentiels à l'intérieur du val (rétablissement de connexions entre le fleuve et ses annexes hydrauliques avec notamment une mise en eau plus fréquente des boires).

6.5. Synthèse des avantages et inconvénients

Régularisation de l'ouvrage :

- *Avantages :*
  - Maintien de la protection du val contre les crues fréquentes. Toutefois, l'inondation par le remous aval observée à partir de la crue 5 ans restreint les emprises complètement protégées ;
- *Inconvénients :*
  - Contraintes liées à l'entretien et la mise en conformité de l'ouvrage pour en assurer la pérennité et les performances en matière de protection contre les inondations ;
  - Coûts importants des travaux et études à réaliser ;
  - Impacts environnementaux des travaux de confortement et d'entretien (impacts sur la végétation, perturbation des espèces, pollution potentielle) ;
  - Responsabilité de l'EPCI en matière de suivi, d'entretien et de niveau de protection de l'ouvrage ;

Arasement partiel :

- *Avantages :*
  - EPCI abandonne la responsabilité de la digue en tant qu'ouvrage de protection contre les inondations (pas d'obligation de suivi et d'entretien) ;
  - Coûts et impacts limités des travaux de mise en transparence par rapport à la solution d'arasement total ;
  - Rétablissement de potentialités écologiques en favorisant l'inondation fréquente, notamment au droit d'anciennes annexes hydrauliques ;
  - Ouverture par arasement au droit de portions de digue soumises à des contraintes érosives : permet d'éviter les conséquences d'une éventuelle dégradation future non maîtrisée ;
  - Ecarte les risques de rupture de la digue en crue pouvant générer des sur-aléas au niveau des enjeux par rapport au scénario de mise en transparence (à partir des crues vicennales) ;
- *Inconvénients :*
  - Coût des travaux élevés ;
  - Inondation du val plus fréquente.

Effacement total :

- *Avantages :*
  - EPCI abandonne la responsabilité de la digue en tant qu'ouvrage de protection contre les inondations (pas d'obligation de suivi et d'entretien) ;

- Rétablissement de potentialités écologiques en favorisant l'inondation fréquente, notamment au droit d'anciennes annexes hydrauliques ;
- Ouverture par arasement au droit de portions de digue soumises à des contraintes érosives : permet d'éviter les conséquences d'une éventuelle dégradation future non maîtrisée ;
- Supprime les risques de rupture de la digue en crue pouvant générer des sur-aléas au niveau des enjeux par rapport au scénario de mise en transparence (à partir des crues vicennales) ;

- *Inconvénients :*
  - Coûts et impacts environnementaux importants des travaux par rapport à la solution d'arasement partiel (déboisement et terrassement sur tout le linéaire de 6 km) ;
  - Inondation du val plus fréquente.

Création naturelle de brèches lors d'une future crue :

- *Avantages :*
  - L'EPCI abandonne la responsabilité de la digue en tant qu'ouvrage de protection contre les inondations (pas d'obligation de suivi et d'entretien) ;
  - Absence de travaux donc coûts et impacts nuls des travaux par rapport aux solutions d'arasement total ou d'arasement partiel ;
  - Rétablissement à long terme de potentialités écologiques en favorisant l'inondation fréquente, notamment au droit d'anciennes annexes hydrauliques ;
- *Inconvénients :*
  - Dégradation de l'état du remblai qui ne sera plus entretenu, engendrant une perte de la connaissance des risques de rupture ;
  - Risques de rupture de la digue en crue maintenu à court ou moyen terme, pouvant générer des sur-aléas au droit des ouvertures qui se produiront aléatoirement (charge hydraulique résiduelle importante) ;
  - Inondation du val plus fréquente à long terme.

Observations sur l'utilisation du rapport

Ce rapport, ainsi que les cartes ou documents, et toutes autres pièces annexées constituent un ensemble indissociable. Les incertitudes ou les réserves qui seraient mentionnées dans la prise en compte des résultats et dans les conclusions font partie intégrante du rapport.

En conséquence, l'utilisation qui pourrait être faite d'une communication ou d'une reproduction partielle de ce rapport et de ses annexes ainsi que toute interprétation au-delà des énonciations d'Antea Group ne sauraient engager la responsabilité de celui-ci. Il en est de même pour une éventuelle utilisation à d'autres fins que celles définies pour la présente prestation.

Les résultats des prestations et des investigations s'appuient sur un échantillonnage ; ce dispositif ne permet pas de lever la totalité des aléas liés à l'hétérogénéité des milieux naturels ou artificiels étudiés. Par ailleurs, la prestation a été réalisée à partir d'informations extérieures non garanties par Antea Group ; sa responsabilité ne saurait être engagée en la matière.

Antea Group s'est engagé à apporter tout le soin et la diligence nécessaire à l'exécution des prestations et s'est conformé aux usages de la profession. Antea Group conseille son Client avec pour objectif de l'éclairer au mieux. Cependant, le choix de la décision relève de la seule compétence de son Client.

Le Client autorise Antea Group à le nommer pour une référence scientifique ou commerciale. A défaut, Antea Group s'entendra avec le Client pour définir les modalités de l'usage commercial ou scientifique de la référence.

Ce rapport devient la propriété du Client après paiement intégral de la mission, son utilisation étant interdite jusqu'à ce paiement. A partir de ce moment, le Client devient libre d'utiliser le rapport et de le diffuser, sous réserve de respecter les limites d'utilisation décrites ci-dessus.

Pour rappel, les conditions générales de vente ainsi que les informations de présentation d'Antea Group sont consultables sur : https://www.anteagroup.fr/fr/annexes

ANNEXES

Annexe I : Atlas cartographique des différents scénarios

Annexe I : **Atlas cartographique des différents scénarios**

Références :

Portées communiquées sur demande