CANAL SEINE NORD EUROPE (CSNE) – EVALUATION DES CONSEQUENCES EN CAS DE DEFAILLANCE

Seine-Nord Europe Canal (CSNE) – Assessment of failure consequences

Cédrine ALLEON
ISL Ingénierie, 51 rue de l'Alcazar – 59800 LILLE
alleon@isl.fr

Véronique BERCHE
Société du Canal Seine-Nord Europe, 23 place d'Armes – 60200 Compiègne
veronique.berche@scsne.fr

François LAUVERGNIER
Rives & Eaux du Sud-Ouest, Chemin de Lalette – 65004 Tarbes
f.lauvergnier@riveseteaux.fr

PROVISOIRE

MOTS CLEFS

Brèche, cinétique d'érosion, Canal Seine Nord-Europe (CSNE), canal, onde de rupture, étude de dangers (EDD), simulation hydraulique, CastorDigue, InfoWorks ICM, rupture en cascade.

KEY WORDS

Breach, erosion kinetics, Seine Nord-Europe Canal (CSNE), canal, break wave, hazard assessment study, hydraulic simulation, CastorDigue, InfoWorks ICM, cascade failure.

RÉSUMÉ

Le Canal Seine Nord-Europe (CSNE), long d'environ 100 km, comprend cinq biefs alternant entre déblai et remblai. L'évaluation des conséquences d'une rupture présente trois problématiques majeures : la forme allongée des retenues, une hauteur d'eau modeste (5 m) parfois portée à 20 m, et la longueur cumulative des ouvrages, rendant l'impact très sensible à la localisation de la brèche. De plus, les brèches ne se situent pas toujours en amont de vallées, ce qui complique l'étude de la propagation de l'onde de submersion.

La première difficulté concerne l'évaluation de l'hydrogramme de brèche pour ce type d'ouvrage, où les modèles empiriques se montrent inadaptés. Ensuite, la localisation des brèches à modéliser doit être choisie avec précision. Enfin, il est très important de déterminer les outils et la précision nécessaire pour modéliser la propagation de l'onde, souvent hors des tracés de cours d'eau définis.

Cet article présente les hypothèses concernant les brèches, les méthodes d'évaluation des hydrogrammes et les calculs de propagation, tout en soulignant les effets en cascade potentiels. Il explore également d'autres scénarios, tels que les inondations causées par la mise en charge des ouvrages ou l'activation des sections de sécurité.

Des incertitudes subsistent en raison de verrous techniques et scientifiques : la formation des brèches et la propagation de l'onde sur un terrain plat restent difficiles à modéliser avec précision. L'article discute de l'impact de ces incertitudes sur le CSNE.

En conclusion, le degré de confiance que l'on peut accorder à ces modèles et les précautions nécessaires lors de l'utilisation des cartes des zones inondées sont évalués.

ABSTRACT

The Canal Seine Nord-Europe (CSNE) is a hydraulic structure approximately 100 km long, consisting of five reaches alternating between cut and fill sections. Evaluating the consequences of a breach raises three key challenges: the elongated shape of the reservoirs, the modest water height (5 m), which sometimes rises to over 20 m above natural ground, and the cumulative length of the structures, making the impact highly dependent on the breach location. Furthermore, breaches do not necessarily occur upstream of a valley, complicating the propagation of the floodwave.

The first challenge concerns the evaluation of the breach hydrograph for this type of structure, where empirical formulas and simple models are poorly suited. Secondly, selecting the breach locations to model is very important. Finally, the tools and level of precision required to model wave propagation, often outside well-defined river courses, must be determined.

The article outlines the assumptions regarding breach locations, the methods for evaluating hydrographs, and the propagation calculations, highlighting potential domino effects. It also examines other dangerous scenarios, such as flooding due to hydraulic restoration structures or the activation of ultimate safety sections.

Significant uncertainties remain due to technical and scientific challenges: the breach development and wave propagation in relatively flat terrain are difficult to model accurately. The article explores how these uncertainties impact the case of the CSNE.

In conclusion, the goal is to assess the level of confidence in these models and discuss the precautions needed when using flood zone maps.

1. INTRODUCTION

Le projet du Canal Seine Nord-Europe (CSNE) consiste à réaliser une liaison fluviale à grand gabarit sur 107 km entre la région parisienne, le port du Havre et le réseau nord-européen. Ce canal reliera les ports maritimes aux ports intérieurs du nord de la France et de l'Europe. Le CSNE comporte un barrage-réservoir, dit bassin de Louette, avec une capacité de stockage de 14 Mm³, ainsi qu'un canal composé de sept biefs, séparés par des écluses — voire deux écluses pour le bief de partage situé dans la partie supérieure du canal (bief 5), comme illustré dans la figure 1.

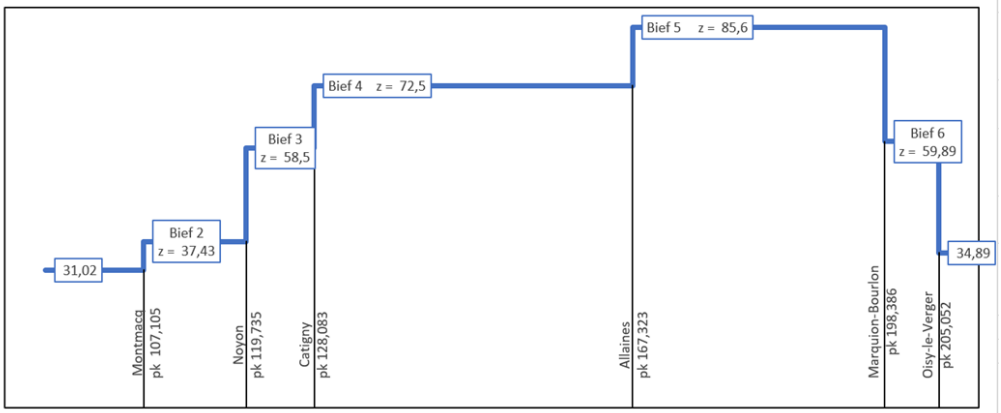

Figure 1 : Escalier d'eau du CSNE

Le Louette est un barrage au sens strict de la réglementation et alimente l'ensemble du système. Les biefs n°2 à 6, dotés de remblais latéraux, sont assimilés à des ouvrages de type barrage. Conformément à la note d'interprétation de l'Arrêté du 17 mars 2017, qui précise les modalités de détermination de la hauteur et du volume des barrages et ouvrages assimilés, plusieurs groupes d'ouvrages latéraux, formant chacun un barrage, ont été différenciés dans les biefs 2 à 6.

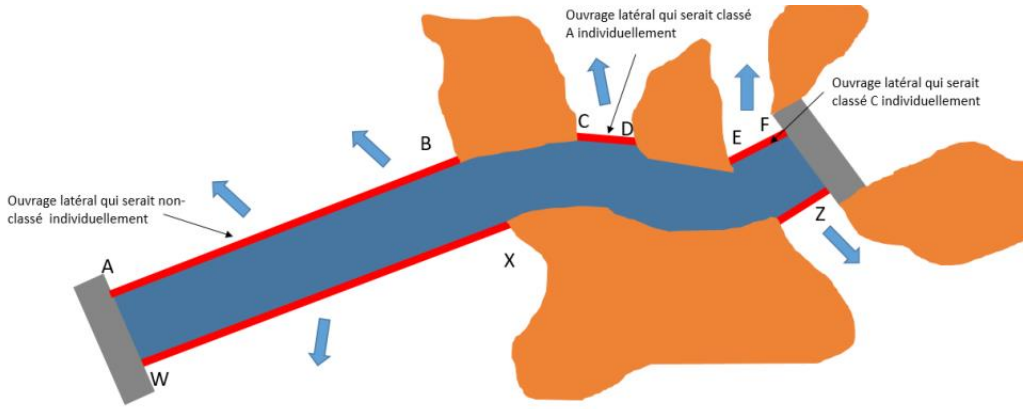

Figure 2 : Principe en plan de définition des « ouvrages latéraux » assimilés barrages (en orange le TN au-dessus de la cote d'arase des ouvrages, les flèches bleues représentent les directions des ondes de submersion en cas de rupture de ces ouvrages) – Source : Note d'interprétation de l'arrêté Hauteur & Volume des Barrages – 31/12/2020 – DGPR [4]

Sur la base de cette différentiation, les biefs 3 à 6 du CSNE comprennent 11 barrages, en plus du barrage de Louette (classe A) et du barrage de Montmacq (classe C) sur le bief 2.

Les barrages de classe A et les volumes retenus sont détaillés dans la section suivante. Ces ouvrages ont fait l'objet d'études de dangers, avec des hypothèses communes, tout en intégrant les spécificités de chaque barrage. L'application des méthodologies d'analyse des risques, en cas de défaillance de ces ouvrages, n'est pas immédiate. Le présent article détaille en particulier la démarche adoptée pour modéliser les ondes de rupture réglementaires.

Bien que les biefs et les écluses soient assimilés à des barrages, ils ne présentent pas les caractéristiques classiques de ces derniers. La forme allongée de ces ouvrages engendre plusieurs complexités : hétérogénéité des fondations, variabilité des matériaux utilisés sur l'ensemble du linéaire, qualité de la mise en œuvre et du contrôle sur chantier, implantation dans ou hors axe de thalweg, ainsi qu'une hauteur variable par rapport au terrain naturel (TN), pouvant dépasser 30 mètres, comme détaillé dans la section suivante.

2. DESCRIPTION DU CSNE

Les caractéristiques géométriques des éléments de biefs assimilés à des barrages de classe A sur le CSNE sont présentées dans le tableau ci-dessous. Ils respectent le critère géométrique du décret du 12 mai 2015, soit $Hauteur[m]^2 \times \sqrt{Volume\ [hm^3]} > 1500$, sauf le barrage du Pont-Canal sur la Somme, surclassé pour la hauteur de ses piles. Ce tableau exclut le bassin-réservoir de Louette.

Tableau 1 : Description des barrages latéraux de classe A du CSNE

Bief	*Identification du barrage*	*Longueur (m)*	*Hauteur max. sur TN H (m)*	*Volume stocké V (hm^3)*	*$H^2V^{0,5}$*	*Classe*
4	Barrage du bief 4 sud	30 020	25	**10**	1 976	A
	Barrage du pont-canal de la Somme	3 130	16 (remblai) 27 (pile du pont)	**10**	810 à 2 300 (pile) > surclassé A	A
5	Barrage d'Allaines	10 789	23,1	7,3	1 442 arrondi à 1 500	A
	Barrage de Marquion-Bourlon	5 574	**33,1**	7,3	**2 960**	A

PROVISOIRE

Un profil en travers type est présenté en Figure 3. Le profil du CSNE est très variable sur son tracé en raison de l'altimétrie des différents biefs en cascade et de la variabilité topographique du TN.

Les profils rencontrés varient selon les sections : certains sont entièrement en déblai par rapport au TN, d'autres partiellement (profils « mixtes »), et certains en remblai, avec des hauteurs atteignant parfois plus de 30 m.

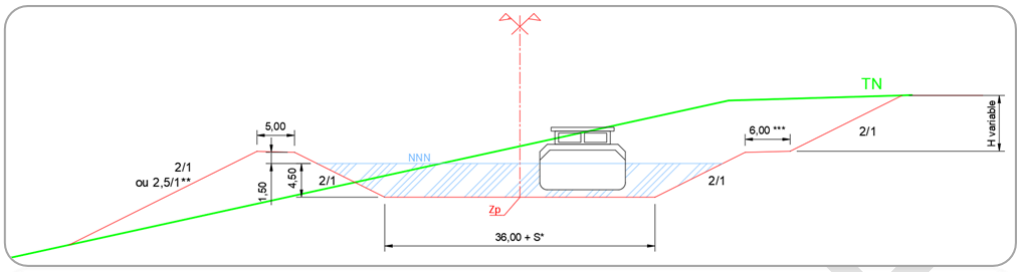

Figure 3 : Profil en travers type

Un extrait de la maquette géologique entre le barrage du bief 4 sud et celui du pont-canal de la Somme est présenté ci-dessous. La séparation entre les deux barrages est indiquée par un trait noir. Le plafond du CSNE (fond du canal) est figuré par un trait rouge, et le niveau d'eau par un trait bleu.

Cette maquette illustre également la variabilité des fondations sur le tracé du CSNE. Dans ce secteur, le canal repose sur des couches de craie (C1/C2/C3) et des limons de plateau (LP).

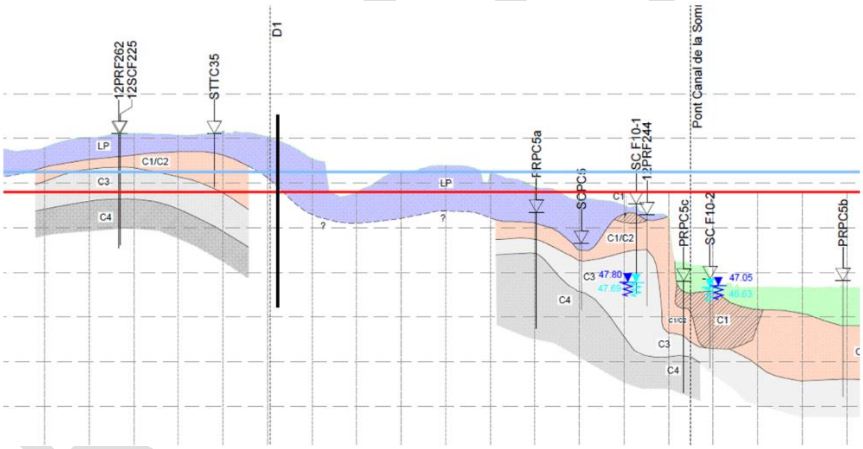

Figure 4 : Profil en long stratigraphique du CSNE sur une partie du bief n°4

Le CSNE intercepte plusieurs bassins versants. Cela implique, pour chaque bassin versant :

- soit un franchissement hydraulique du canal via un ouvrage traversant, lorsque le canal est en remblai,
- soit un déversement des eaux de crue du bassin versant dans le CSNE via un déversoir aménagé, lorsque le canal est en déblai.

Les déversoirs de sécurité permettent le déversement des eaux de crues dans le canal pour tous les débits de crue, avec un dimensionnement des ouvrages jusqu'à la crue exceptionnelle. Cela permet d'éviter ainsi toute surverse incontrôlée sur la crête de remblai du canal. Le dimensionnement de ces aménagements prend en compte des événements hydrologiques extrêmes. Bien que cela ne soit pas détaillé ici, les crues constituent les principales venues d'eau indirectement contrôlées dans le canal. « Indirectement » signifie que les apports peuvent être anticipés et gérés par les équipements du canal (déversoirs de sécurité, stations de pompage, ou bypass aux écluses). Cependant, des adaptations en

temps réel peuvent s'avérer nécessaires, par exemple : ajustement des débits dans les bypass ou du pompage, mise en service des déversoirs de sécurité, etc.

L'ensemble du canal, y compris les niveaux dans les biefs (pompage, bypass, etc.) et la gestion des crues, est piloté par un système de téléconduite, centralisé et sécurisé, avec des redondances. Toutefois, un défaut grave dans le système de contrôle ou une erreur humaine (par exemple, un bypass maintenu ouvert par erreur ou un double choc de bateau au niveau d'une écluse) peut entraîner d'importantes venues d'eau dans un bief, même en l'absence de crue.

3. PROBLEMATIQUES LIEES A LA RUPTURE

3.1.Formation de la brèche

Les caractéristiques géométriques et la cinétique d'ouverture de la brèche sont des paramètres clés dans la modélisation de l'onde de rupture, car elles influencent de manière significative la forme de l'hydrogramme et son débit de pointe. Les résultats des simulations qui peuvent être obtenus, notamment en termes de temps d'arrivée de l'onde, dépendent fortement des caractéristiques de formation de la brèche.

La formation de brèche dans les canaux de navigation est un phénomène relativement méconnu et ce, en particulier pour des remblais comme ceux du CSNE, un ouvrage neuf. De nombreuses études de cas existent sur la formation de brèches, mais elles concernent presque exclusivement les digues de cours d'eau soumises aux aléas des crues ou les barrages.

Figure 5 : Accidentologie sur les canaux, photos de brèches (source : ERINOH [5] et VNF)

Des formules empiriques ont été établies à partir de l'analyse de cas de rupture réels sur des barrages. Il est à noter qu'à la différence de la retenue de Louette, les ruptures de remblai du CSNE présentent

des particularités différentes de celles des ruptures historiques de barrages à partir desquelles les formules sont usuellement appliquées.

Le canal présente les spécificités suivantes :

- Une faible hauteur d'eau (4,5 m) sur des remblais pouvant atteindre 30 m de hauteur. Une brèche pourrait emporter non seulement le remblai mais également une partie du plafond du canal ;
- Le volume d'eau est stocké sur un linéaire relativement long par rapport aux barrages classiques. Cela conduit au développement de lignes d'eau graduellement accélérées depuis les extrémités du bief vers la brèche, ce qui limite les volumes libérés après formation de la brèche ;
- Dans le cas où le plafond est calé sous le terrain naturel en pied de remblai (faible hauteur de remblai), seule une partie de l'eau stockée dans le bief peut être propagée en cas de brèche.

La Figure 6 présente les différents cas qui peuvent être rencontrés.

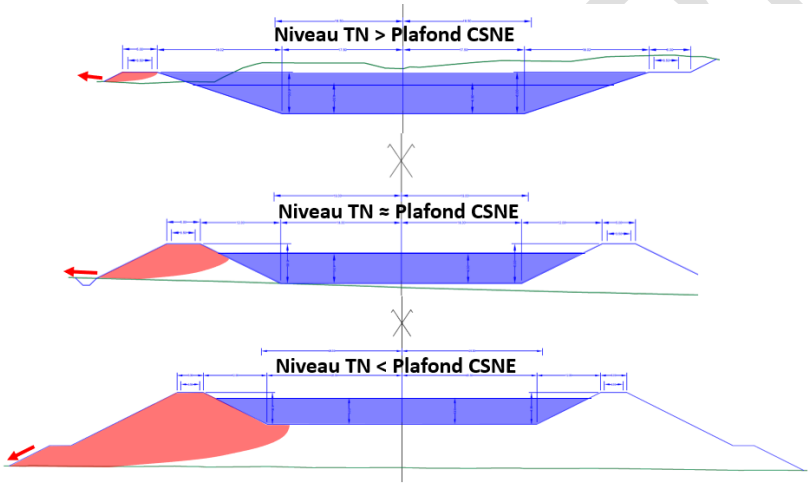

Figure 6 : Différentes modalités de formation de la brèche sur le CSNE selon la typologie du profil et l'altimétrie du terrain naturel

La détermination des paramètres de brèche d'un canal à alimentation autonome est donc un sujet complexe et les estimations des caractéristiques de brèche pour le CSNE présentent certaines incertitudes. Plusieurs formules empiriques et modules de brèches intégrés dans des logiciels ont été testés dans le cadre des études de dangers. Quelques résultats sont présentés en chapitre 4.

3.2.Localisation des brèches sur le CSNE et risque de ruptures en cascade

Une brèche peut se développer à une quasi-infinité d'emplacements sur un linéaire aussi long que le CSNE. Certaines zones de rupture sont plus probables que d'autres, en raison de contextes géologiques plus contraints ou localement différents (risque de tassements différentiels, remontées de fontis, etc.), ou de difficultés de mise en œuvre. Les interfaces entre les remblais et les éléments de génie civil font partie des points les plus sensibles à la mise en œuvre, avec les difficultés de compactage des couches de remblai le long d'ouvrages de génie civil. Il existe notamment des risques d'érosion interne à l'interface.

La position d'une brèche n'est pas nécessairement corrélée à la présence d'enjeux à l'arrière, et peut donc être sans conséquence pour les personnes et les biens, ou au contraire désastreuse. Le canal traverse ou surplombe plus de 70 communes dans les départements de l'Oise, de la Somme, du Pas-de-Calais et du Nord, sans suivre de thalweg. Des enjeux humains sont concernés, comme présenté localement en Figure 7, mais également économiques, éventuellement industriels, patrimoniaux, etc.

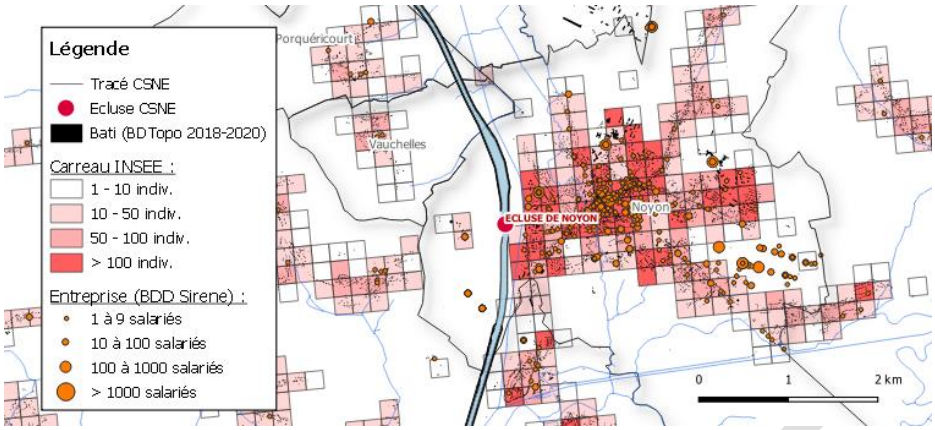

Figure 7 : Enjeux humains autour du CSNE autour du bief 4 sud

En cas de brèche, l'onde de submersion peut s'étendre largement en plaine avant de rejoindre un thalweg exutoire. Les emprises vont donc éventuellement au-delà des emprises de crues exceptionnelles de cours d'eau. La présence des biefs adjacents et des infrastructures des canaux voisins du CSNE peut donner lieu à des ruptures en cascade. Cela maximise le volume d'inondation potentiel.

Une analyse a été conduite pour évaluer les effets dominos par ruptures successives, en prenant en compte :

- la dynamique de propagation de l'onde de rupture initiale pour chaque scénario de brèche, en termes de cinétique d'évolution du front d'onde, emprises inondées et vitesses ;
- les ouvrages rencontrés par l'onde : autres biefs, écluses, Canal du Nord, etc. et leurs caractéristiques géométriques (hauteur du remblai, niveau du plafond) ;
- la topographie et les enjeux environnants : propension à se propager, définition du côté du bief concerné pour lequel la rupture serait la plus défavorable pour les enjeux, etc.
- les hauteurs surversées ou hauteurs de charge hydraulique pour les remblais des ouvrages rencontrés par l'onde de rupture initiale.

Un exemple de simulation ayant permis d'identifier un double risque de rupture en cascade est présenté ci-après sur le bief 4, puis 3 du CSNE, puis enfin le canal du Nord. De même, la rupture du barrage-réservoir de Louette entraine la rupture du bief 4 (par surverse en plusieurs points) puis de biefs du canal du Nord (pour des volumes libérés bien moins importants).

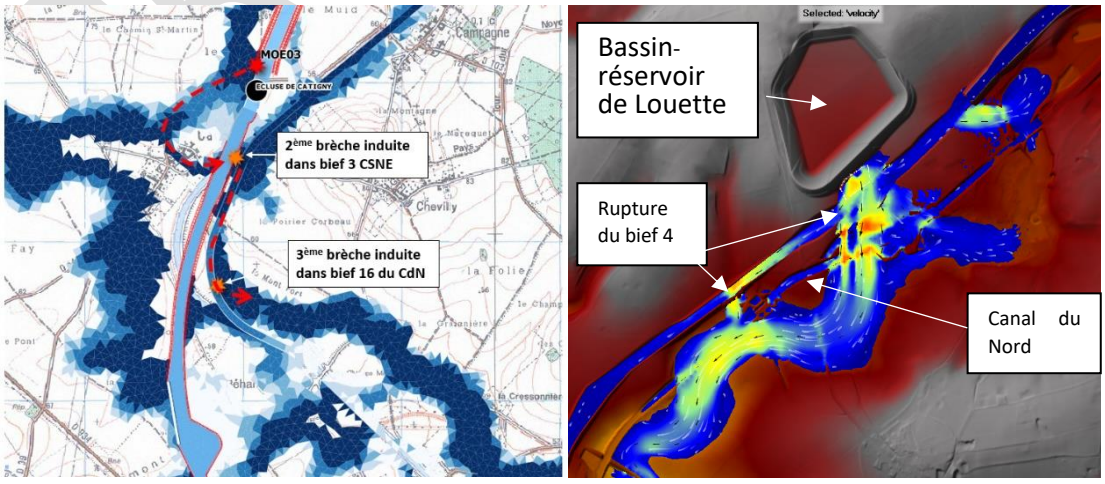

Figure 8 : Cas de ruptures en cascade potentielles sur deux biefs du CSNE et un bief du canal du Nord (à g.) et cas de ruptures en cascade potentielles du barrage-réservoir de Louette, du bief 4 et du canal du Nord (à dr.)

PROVISOIRE

4. METHODOLOGIE D'EVALUATION DES HYDROGRAMMES DE BRECHE

Pour simuler la cinétique d'ouverture de la brèche et l'hydrogramme associé, un modèle sous CastorDigue [1] a été paramétré en intégrant la relation hauteur-surface-volume des biefs du CSNE, et le positionnement du profil par rapport au terrain naturel.

Pour cela, il a été nécessaire de modéliser le possible approfondissement de la brèche en dessous de la cote du plafond pour les scénarios de canal perché. La géométrie de la brèche qui en résulte est complexe, avec :

- La brèche dans la digue, de longueur L(t) et de cote z(t) ;
- L'entonnement depuis le plafond, de longueur LE(t) et à la cote du plafond.

Figure 9 : Développement typique d'une brèche dans un remblai de canal et approfondissement sous le plafond

CastorDigue ne permet pas la modélisation d'une telle géométrie. Le parti retenu consiste à modéliser la brèche dans la digue et son possible approfondissement sous la cote du plafond, en considérant une digue standard, de hauteur égale à la hauteur sur le terrain naturel. Cette hypothèse simplificatrice a un inconvénient : elle surestime les débits de brèche. En effet, deux autres facteurs limitent la débitance de la brèche :

- Lorsque la cote $z_{brèche}$ est sensiblement en dessous de la cote du plafond, la débitance est limitée par l'entonnement depuis le plafond ;
- La débitance du canal limite les possibilités d'alimentation du débit de brèche.

Plusieurs scénarios ont été simulés pour intégrer les cas de plafond du canal au niveau du terrain naturel, plafond surélevé par rapport au terrain naturel (canal perché). Pour s'assurer de la bonne valeur du débit de pointe, une évaluation complémentaire a consisté à calculer, pour chaque pas de temps, l'éventuelle limitation du débit de pointe dans l'entonnement.

Les paramètres de la loi d'ouverture de la brèche ont été évalué à partir des paramètres du logiciel CastorDigue, en considérant : diamètre moyen des grains (limons) : 0,06 mm ; masse volumique des grains : 2650 kg/m3 ; porosité 0,35 ; coefficient de rugosité Manning : 0,02 $s.m^{-1/3}$. Des tests de sensibilité ont été faits sur le coefficient de Manning : selon les coefficients de rugosité retenus, le temps d'ouverture de la brèche est de 3h à plus de 5h.

Le calcul est présenté en Figure 10 pour les biefs 4 et 5. Les graphiques intègrent :

- L'hydrogramme de brèche, généré par CastorDigue sur chacun des biefs ;
- Le débit d'entonnement pour la longueur LE(t) et la cote du plafond du bief.

Pour les deux, il est fait l'hypothèse que la longueur LE(t) correspond à un développement semi-circulaire, tel que figuré sur la Figure 9. Sur ces figures, la longueur et la cote de brèche L(t) et z(t) proviennent de CastorDigue. Le développement de la brèche peut s'étendre jusqu'au TN dans le

PROVISOIRE

logiciel mais l'arrêt soudain de l'hydrogramme de brèche CastorDigue est lié à la mauvaise prise en compte de la vidange progressive du bief, par celui-ci, en-deçà du niveau du plafond du canal (artéfact numérique).

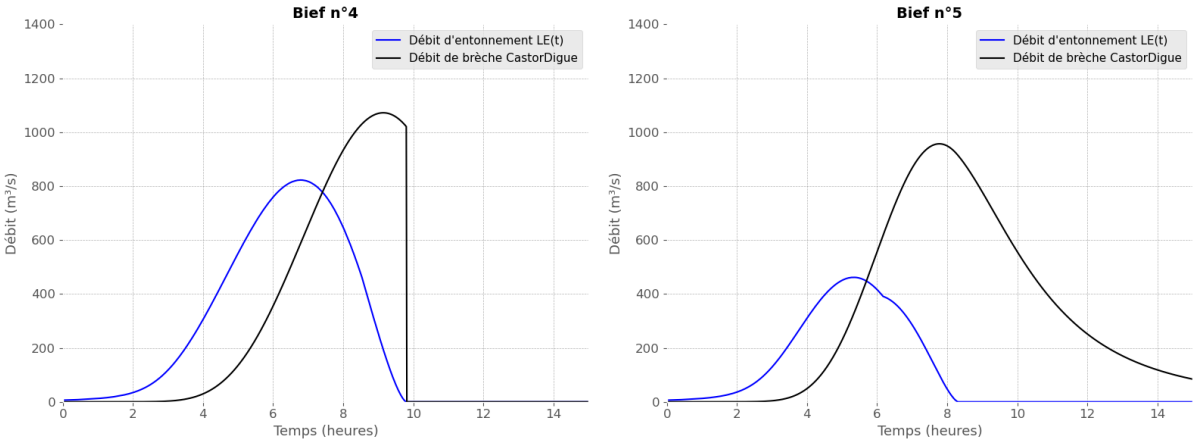

Figure 10 : hydrogrammes pour les deux contrôles de débit, brèche et entonnement

Le croisement des courbes s'opère pour le pas de temps 7h30 pour le bief 4 et 5h45 pour le bief 5. Avant ce pas de temps, le débit est contrôlé par la brèche. Après ce pas de temps, il est contrôlé par l'entonnement :

- **Jusqu'au croisement des courbes**, les résultats CastorDigue peuvent être considérés ;
- **Au-delà**, CastorDigue donne une évaluation par excès de l'élargissement de la brèche, car le volume disponible dans le bief est transité par la brèche avec un débit (donc une vitesse et un pouvoir érosif) plus fort que la réalité.

Ainsi, la largeur maximale de brèche donnée par CastorDigue (27 m, au pas de temps t=8h30 pour le bief 4 par exemple) est une largeur par excès. Le débit est en fait contrôlé avant par la capacité hydraulique à la transition plafond / brèche.

Un ultime calcul a été effectué, pour tenir compte d'un effet qui n'est pas pris en compte par CastorDigue : la limitation des débits par la vitesse d'écoulement dans le canal. Ce calcul est réalisé par un logiciel hydraulique (non décrit ici), en entrée du modèle de propagation de la brèche, qui ne détermine pas les temps d'ouverture de brèche : a été considéré un temps d'ouverture de la brèche rapide (1 heure). Par ce calcul, le débit de pointe maximal obtenu peut-être un peu inférieur au débit obtenu par CastorDigue, de 700 m^3/s pour le bief 4.

La combinaison des trois démarches a amené à apporter une correction sur le pic de l'hydrogramme combiné CastorDigue / entonnement pour le bief 4, non nécessaire pour le bief 5. Ainsi, les valeurs maximales réalistes retenues sont détaillées ci-après.

Tableau 2 : Bornes supérieures réalistes pour les caractéristiques des brèches et hydrogrammes associés

	Largeur maximale de brèche	**Débit de pointe hydrogramme**
Bief 4	24 m	700 m^3/s
Bief 5	26 m	450 m^3/s

A titre de comparaison, la formule empirique de Froehlich [2], souvent employée pour les brèches sur des digues, donne des largeurs de l'ordre de 30 m sur le CSNE. La largeur maximale est associée au bief 4, présentant le plus de volume. CastorDigue donne la largeur de brèche la plus importante pour le remblai de plus grande hauteur, et le débit de pointe maximal pour le bief le plus long. Il intègre la

PROVISOIRE

cinétique d'érosion et l'approfondissement en-dessous du plafond, simplifiés par Froehlich. Ces deux phénomènes jouent en sens opposé : la cinétique d'érosion est plus lente que ce qui est considéré par les formules empiriques, donc il devrait être obtenu un débit de pointe et, in fine, une largeur de brèche inférieurs avec CastorDigue. Néanmoins, l'approfondissement de la brèche, qui n'est pas considéré dans la formule de Froehlich, augmente les débits dans le modèle. Il est donc difficile d'analyser un écart positif ou négatif entre les deux méthodes. L'ordre de grandeur reste cohérent.

Néanmoins, en plus de négliger l'effet de l'entonnement évoqué ci-avant, l'approche par CastorDigue est également par excès du fait de l'hypothèse d'une alimentation « parfaite » par le canal :

- sans perte de charge le long du canal ;
- avec une brèche parfaitement centrée au milieu du bief, pleinement alimentée par un demi-bief côté Nord et un demi-bief côté Sud ;
- sans tenir compte de la cohésion du matériau de remblai.

L'analyse comparative entre les différentes approches a permis de fixer des valeurs plafond, et de vérifier que les hydrogrammes de brèches générés par les logiciels hydrauliques restent conservatifs.

5. MODELISATION DES ONDES DE RUPTURE

La démarche mise en œuvre pour identifier les simulations d'onde de rupture a été la suivante :

1. Maximisation de la gravité : recherche des remblais dont la rupture pourrait, le long d'un bief, maximiser les enjeux inondés, notamment à proximité du CSNE.
2. Localisation précise de la brèche le long du remblai en tenant compte des fragilités potentielles, notamment :
    - les secteurs présentant des spécificités ou points singuliers (hauteur élevée et/ou la présence d'un ouvrage de traversée hydraulique ou de franchissement routier, discontinuité géotechnique, de profils, etc.),
    - les zones de transition, de raccordement entre les ouvrages en remblai et les ouvrages de génie civil (écluse, pont-canal), etc.

Cette démarche permet d'avoir une simulation de rupture pour chaque barrage classé, pour chaque zone urbaine soumise à un risque de rupture du CSNE et d'avoir une indépendance de l'analyse par barrage. Un extrait des brèches simulées pour le bief 4 sont localisées ci-après.

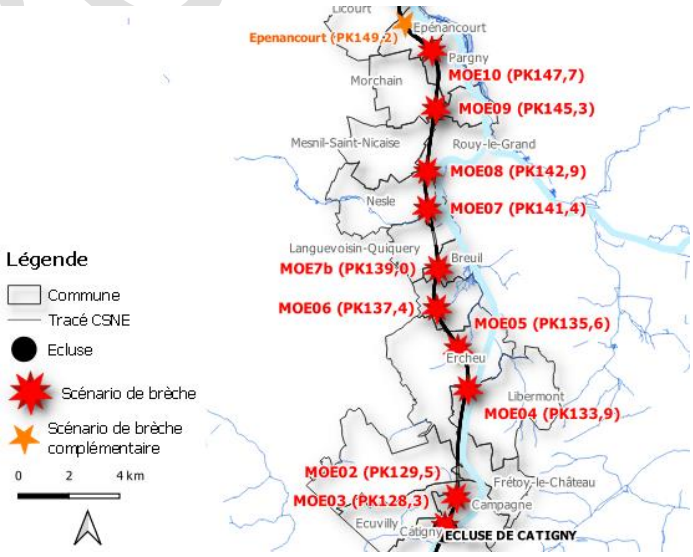

Figure 11 : Localisation des brèches simulées sur le bief 4

PROVISOIRE

Les modèles hydrauliques d'onde de rupture ont été construits en 2D sous InfoWorks ICM et HEC-RAS. La topographie du CSNE a été intégrée sur la base des tracés au stade AVP. Les ouvrages de rétablissement de la continuité hydraulique sous le CSNE ont été intégrés selon leur dimensionnement au stade AVP également, en termes d'ouverture, de fil d'eau et de longueur.

Les calculs ont été effectués par propagation sur fond sec, sans contribution des lits mineurs à la propagation, et sans ajouter de débit naturel au débit de l'onde de submersion. Cette hypothèse de modélisation est conforme au rapport du CFBR [3] et prudente pour l'évaluation des hauteurs atteintes. En ne tenant pas compte de la bathymétrie, l'onde est propagée « au-dessus » du niveau du cours d'eau : le lit mineur ne contribue pas à l'évacuation des débits.

La submersion des remblais rencontrés dans la plaine, par exemple routiers, hydrauliques ou ferroviaires, conduirait très probablement à leur rupture. Par simulations itératives, la hauteur des vagues de submersion estimées sur remblais secondaires était très supérieure à 20 cm d'épaisseur. Ces remblais ont ainsi été systématiquement effacés instantanément, de façon itérative par simulations successives, sur toute la largeur surversée.

Dans le cas du Canal du Nord ou d'une propagation de l'onde de rupture sur plusieurs biefs successifs en cascade, l'effacement du remblai conduit à une augmentation du volume de l'onde de submersion. L'hydrogramme de rupture du second bief rencontré (Canal du Nord ou CSNE) a été ajouté au volume de l'onde de submersion, pour intégrer l'effet cascade, comme indiqué en section 3.2.

Conformément aux recommandations du guide de lecture des études de dangers des barrages et aux recommandations du Pôle d'Appui Technique pour les Ouvrages Hydrauliques (PATOUH), la propagation est menée jusqu'à ce que le débit de pointe de l'hydrogramme soit inférieur au débit décennal du cours d'eau concerné sur lequel se propage l'onde et les modèles étendus de cette façon.

La clause ci-dessus n'est pas applicable pour certains modèles, par exemple :

- rupture du côté amont du cours d'eau intercepté par le CSNE, et ouvrage de rétablissement de la continuité hydraulique sous le CSNE perdu dans la rupture ;
- rupture d'un remblai amont impactant un remblai du même bief en aval : hypothèse d'obstruction de l'ouvrage hydraulique aval sans surverse sur le bief, maximisant les conséquences. La rupture du remblai aval étant modélisée par ailleurs ;
- rupture au droit de thalwegs, fossés ou petits cours d'eau, pour lesquels le débit décennal n'est pas connu.

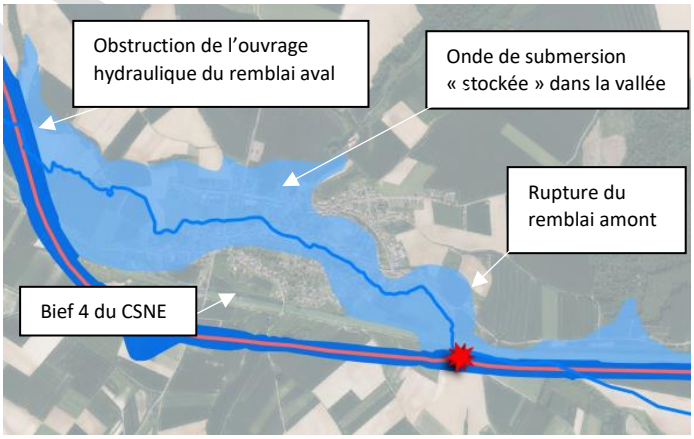

Figure 12 : Exemple de rupture d'un remblai amont avec obstruction de l'ouvrage du remblai aval

Pour ces cas, la modélisation est arrêtée lorsque les écoulements ne sont plus réputés dangereux, sur critère hauteur-vitesse type PPR Inondation.

PROVISOIRE

Le niveau d'eau initial dans le bief dépend du scénario considéré : Niveau Normal de Navigation (NNN, équivalent à une RN) ou plein bord. Il est explicité pour chaque simulation et justifié par les probabilités d'occurrence des événements redoutés centraux (ERC) estimées dans l'EDD.

Les simulations d'accident de type inondation à l'extérieur du canal, de mise en service des déversoirs de sécurité (sections résistantes à la surverse), en phase chantier ou les accidents d'exploitation (intumescence, mise en communication de deux biefs, etc.) ne sont pas ici détaillés.

Pour chaque scénario de rupture, les cartes de l'onde de submersion générées intègrent l'emprise inondée avec une distinction entre la zone « amont » et la zone « aval », le temps d'arrivée de l'onde à paliers réguliers et le débit maximal atteint à ces paliers.

Sur les recommandations de la DGPR, des corrections sécuritaires ont été appliquées aux résultats de simulation en termes de surélévation du plan d'eau de la zone d'inondation amont, majoration des débits, minoration des délais. Un extrait de résultat de simulation est présenté ci-après.

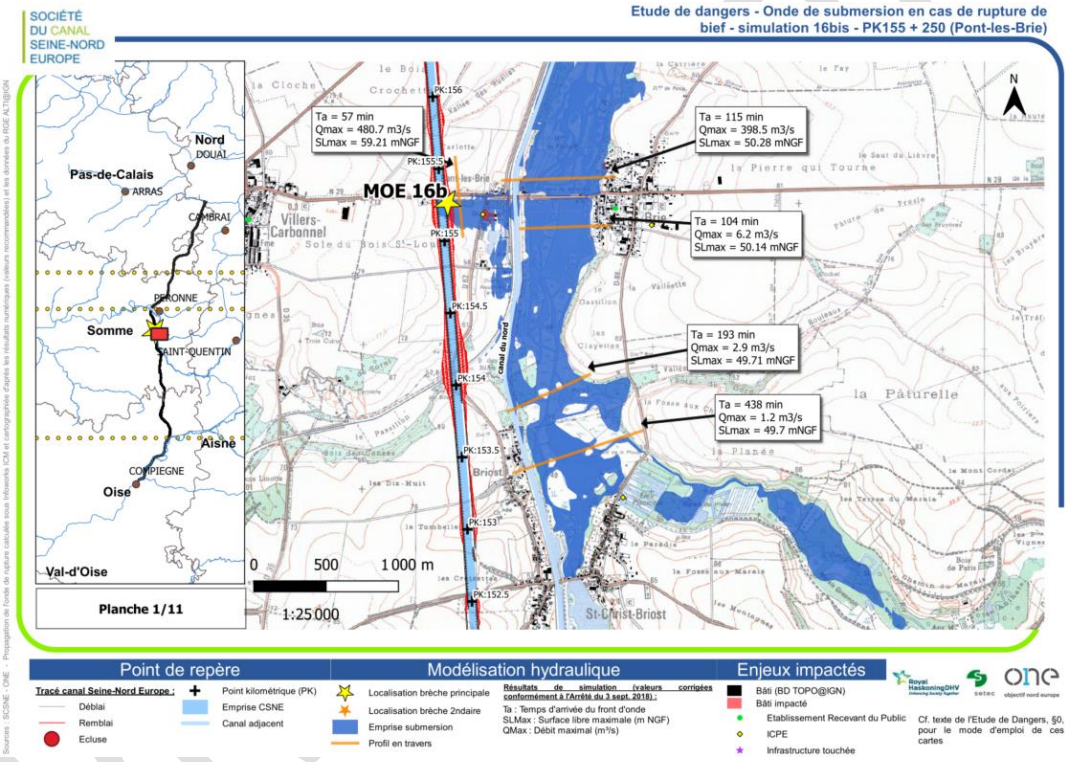

Figure 13 : Extrait de cartographie d'onde de rupture du CSNE sur le bief 4

6. CONCLUSION

Dans le cadre des EDD du CSNE, les modalités de rupture potentielle des remblais des biefs classés barrages ont été étudiées selon plusieurs méthodes. Il a été démontré qu'aucun outil actuel ne permet de décrire parfaitement la cinétique de brèche dans un remblai de canal sur un bief long, notamment lorsque celui-ci est surélevé par rapport au terrain naturel. Les incertitudes apportées sur les hydrogrammes de brèches se multiplient en cas de ruptures en cascade, et notamment s'il s'agit d'intégrer le volume du bief d'un canal adjacent, imparfaitement connu.

L'analyse conduite a permis de borner les largeurs maximales des brèches. Il a été conclu que les hydrogrammes générés par les modèles hydrauliques sont conservateurs, et tendent à surestimer la vitesse de propagation de l'onde de rupture et le volume de vidange du bief, car ces modèles supposent une vidange complète. Ils sont donc du côté de la sécurité pour les objectifs ciblés par l'EDD.

Les outils se sont révélés adaptés pour modéliser les spécificités géométriques du CSNE, les ouvrages annexes, et prendre en compte les itérations nécessaires pour les ondes de rupture, notamment pour simuler les brèches en cascade. Si les ruptures en cascade ont pu être correctement intégrées en termes de cinétique (temporalité prise en compte dans les apports au modèle 2D), l'effacement de remblais éventuellement non-hydrauliques est intégré initialement dans les modèles, et donc avant que l'eau n'atteigne le remblai dit « de second rang ». L'onde de rupture initiale peut donc se propager plus rapidement quand elle arrive à ce point, sans que les temps d'arrivée de l'onde, de surverse puis de développement de brèche des remblais secondaires puissent être intégrés. Au global, sur la simulation finale qui intègre toutes les ruptures en cascades, le front d'onde est un peu plus rapide qu'en réalité, bien que les apports successifs soient intégrés au bon pas de temps.

Enfin, les données topographiques employées pour les modèles sont globalement fiables mais localement moins précises. Ces imprécisions peuvent influer sur les emprises inondées, la correcte prise en compte des remblais dans le lit majeur et leur effacement éventuel, etc.

Ces incertitudes limitent l'utilisation des cartes d'onde de rupture pour des applications précises, comme les plans communaux de sauvegarde, même si elles offrent des perspectives importantes pour les acteurs locaux.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] André Paquier, J. Renzoni (2005). *Présentation du logiciel CastorDigue.* Journées PATOUH, Paris, 8 et 9 mars 2005, pp.5. ⟨hal-02586903⟩

[2] Froehlich, David. (2008). *Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. Journal of Hydraulic Engineering-asce* - J HYDRAUL ENG-ASCE. 134. 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708).

[3] CFBR. (2020). *Pratiques françaises de l'analyse de risques et de l'évaluation de la sûreté des barrages*. Rapport de synthèse.

[4] DGPR. (2020). *Note d'interprétation de l'arrêté du 17.03.2017 précisant les modalités de détermination de la hauteur et du volume des barrages et ouvrages assimilés - version 1 de décembre 2020*.

[5] Deroo L., Fry J.-J. (2013). *ERINOH Erosion Interne dans les Ouvrages Hydrauliques, Vol. 3, Guide pour l'Ingénierie.*

PROVISOIRE