

Modélisation des inondations en estuaire de la Seine : dynamique et emprise des inondations

Phase 1 – Elaboration du modèle

Décembre 2021

Ce projet est cofinancé par le fonds européen de développement régional et par :



Modélisation des inondations en estuaire de la Seine : dynamique et emprise des inondations

Phase 1 – Elaboration du modèle

GIP Seine-Aval

VERSION	DESCRIPTION	ÉTABLI(E) PAR	CONTROLÉ(E) PAR	APPROUVÉ(E) PAR	DATE
7	Prise en compte des remarques du Comité de Pilotage sur la partie calage et validation du modèle	P.CLOTEAU	F.GANDILHON	A.MASSON	09/09/2021
6	Prise en compte des remarques du GIPSA sur la partie calage et validation du modèle	P.CLOTEAU	F.GANDILHON	A.MASSON	02/07/2021
5	Calage et validation du modèle	P.CLOTEAU	F.GANDILHON	A.MASSON	16/06/2021
4	Intégration des éléments relatifs aux ouvrages de franchissement et à la modélisation des zones urbaines	P.CLOTEAU G.CARA	F.GANDILHON	A.MASSON	06/05/2021
3	Intégration du MNT corrigé en date du 28 octobre 2020 – Reprise des éléments structurants et du maillage suite aux remarques du COPIL en date du 16 octobre 2020 – Nouvelle génération du maillage en lit majeur	P.CLOTEAU G.CARA H. DEKERMENDJIAN	F.GANDILHON	A.MASSON	28/01/2021
2	Prise en compte des remarques du GIPSA sur la partie construction du maillage	P.CLOTEAU	F.GANDILHON	A.MASSON	11/09/2020
1	Construction du maillage Première émission	P.CLOTEAU G.CARA	F.GANDILHON	A.MASSON	03/07/2020
ARTELIA 6 rue de Lorraine – 38130 ECHIROLLES – FRANCE					

SOMMAIRE

CONTEXTE.....	9
OBJECTIFS DE L'ÉTUDE ET OBJET DU DOCUMENT	10
OBJECTIFS DU MODÈLE	11
A. DONNEES UTILISEES POUR LA CONSTRUCTION DU MODELE.....	12
1. RECUEIL ET TRAITEMENT DES DONNÉES ALTIMÉTRIQUES....	13
1.1. Données topographiques	13
1.2. Données bathymétriques	14
1.3. Compilation des données pour la construction du MNT	14
1.4. Données relatives aux ouvrages de protection contre les inondations	15
2. ANALYSE DES DONNÉES ALTIMÉTRIQUES	17
2.1. Données bathymétriques	17
2.2. Données topographiques	18
2.3. Données altimétriques sur les berges	20
B. CONSTRUCTION DU MODELE HYDRAULIQUE	27
1. SYSTÈME DE GÉORÉFÉRENCEMENT	28
2. EMPRISE DU MODELE.....	28
3. MODÉLISATION DES OUVRAGES DE PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS ET DES INFRASTRUCTURES EN REMBLAIS.....	30
3.1. Principe de modélisation retenu.....	30
3.2. Application de la méthode RIG au modèle de l'estuaire de la Seine	31
3.2.1. Méthode générale d'élaboration de la liaison RIG	31
3.2.2. Traitement particulier des secteurs avec ouvrages anti-inondations.....	34
4. ELABORATION DU MAILLAGE DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE ...	38
4.1. Maillage en lit mineur et en baie de Seine.....	38

4.2.	Maillage en lit majeur	40
4.2.1.	Prise en compte des éléments structurants en lit majeur.....	40
4.2.2.	Construction du maillage en lit majeur	44
4.3.	Maillage global assemblé	45
4.4.	Evaluation de la représentativité topographique du modèle ...	47
5.	MODÉLISATION DES ZONES URBAINES EN LIT MAJEUR.....	53
5.1.	Approches possibles pour modéliser les zones urbaines.....	53
5.2.	Principes de la méthode de Lindner.....	54
5.3.	Application de la méthode de Lindner au modèle de l'estuaire de la Seine.....	55
C.	CALAGE ET VALIDATION DU MODELE.....	57
1.	EVÈNEMENTS DE CALAGE ET DE VALIDATION	58
2.	DONNÉES MISES À DISPOSITION POUR LE CALAGE	60
3.	FORÇAGES DU MODÈLE	62
4.	PARAMÉTRAGE DES COEFFICIENTS DE FROTTEMENT.....	64
5.	TEST DE SENSIBILITÉ SUR LES OUVRAGES TRAVERSANTS	66
6.	OUTILS D'ANALYSE DU NIVEAU DE VALIDITÉ DU MODÈLE ...	73
6.1.	Variations du plan d'eau le long de l'estuaire	73
6.2.	Inondations en lit majeur	75
7.	RÉSULTATS DU CALAGE	77
7.1.	Tempête de janvier 2018 (Eleanor).....	77
7.2.	Episode fluvio-maritime de février 2018.....	80
7.3.	Tempête de mars 2008.....	83
7.4.	Crue de mars 2001.....	85
7.5.	Complément : épisode fluvio-maritime de février 2020.....	87
7.6.	Complément : épisode fluvio-maritime de mars 2020	90
8.	LIMITATIONS DU MODÈLE	92
9.	SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS SUR LE CALAGE DU MODÈLE ...	93
10.	DESCRIPTION DES RENDUS CARTOGRAPHIQUES	95
	REFERENCES.....	97

ANNEXES	98
Annexe 1 – Différentiel altimétrique en lit mineur [Modèle 2013 – Modèle 2021].....	99
Annexe 2 – Emprise, altimétrie et maillage des sous-modèles	100
Annexe 3 – Exemples illustratifs de sélection des lignes de contrainte du maillage.....	101
Annexe 4 – Prise en compte des infrastructures en remblais et des digues via la méthode RIG..	102
Annexe 5 – Différentiel altimétrique en lit majeur [MNT Modèle – MNT Données 2020]	103
Annexe 6 – Modélisation des zones urbaines via la méthode de Lindner.....	104
Annexe 7 – Description du modèle de marée développé par ARTELIA à l’échelle de la Manche .	105
Annexe 8 – Résultats de calage et validation du modèle	106

TABLEAUX

Tableau 1- Nombre de nœuds et surface des différents sous-modèles	45
Tableau 2- Erreurs RMS et biais des surcotes issues du modèle MARS2D lors de la tempête Xynthia (source IFREMER, référence [15]).....	63
Tableau 3- Valeurs des coefficients de frottement affectés par type d’occupation du sol en lit majeur.....	64
Tableau 4- Méthode d’évaluation statistique de l’erreur aux marégraphes.....	74
Tableau 5- Ecarts de niveaux d’eau maximaux le long de l’estuaire pour le cycle de marée du 4 janvier 2018.....	77
Tableau 6- Ecarts de niveaux d’eau maximaux le long de l’estuaire pour le cycle de marée du 1 ^{er} février 2018	80
Tableau 7- Ecarts de niveaux d’eau maximaux le long de l’estuaire pour le cycle de marée du 21 mars 2008.....	83
Tableau 8- Ecarts de niveaux d’eau maximaux le long de l’estuaire pour le cycle de marée du 28 mars 2001.....	85
Tableau 9- Ecarts de niveaux d’eau maximaux le long de l’estuaire pour le cycle de marée du 13 février 2020	87
Tableau 10- Ecarts de niveaux d’eau maximaux le long de l’estuaire pour le cycle de marée du 11 mars 2020	90

FIGURES

Figure 1- Sources de données topo-bathymétriques retenues pour la construction du MNT (source GIP Seine-Aval, 2020)	14
Figure 2- Exemple de comblement des données altimétriques manquantes en lit majeur (bâtiments ou zones en eau).....	15
Figure 3- Localisation des ouvrages anti-inondations identifiés (source GIP Seine-Aval, 2021) ..	16
Figure 4- Profil en long bathymétrique dans l’axe de la Seine – Comparaison de la bathymétrie du modèle existant (2013) et des nouvelles données fournies (2020)	17
Figure 5- Données topographiques considérées comme non fiables par rapport au terrain naturel existant (zones vertes).....	18
Figure 6- Exemple d’évolution du terrain naturel par rapport aux données topographiques disponibles	19

<i>Figure 7- Localisation des linéaires de berges relevés par les géomètres du CD76 (source GIP Seine-Aval, janvier 2020)</i>	<i>20</i>
<i>Figure 8- Carte de synthèse des différences altimétriques (source GIPS Seine-Aval, référence [3])</i>	<i>21</i>
<i>Figure 9- Analyse des zones de comparaison altimétrique entre les levés géomètres et la donnée LIDAR - Les zones sans couleur de remplissage correspondent aux zones où les 2 jeux de données sont cohérents</i>	<i>23</i>
<i>Figure 10- Analyse des données LIDAR – Localisation des données dites incertaines – Les zones sans couleur de remplissage correspondent aux données considérées comme fiable.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 11- Principales zones ajoutées au modèle existant de 2013</i>	<i>29</i>
<i>Figure 12- Emprise globale du modèle</i>	<i>29</i>
<i>Figure 13- Principe de modélisation d'un ouvrage déversant : modélisation explicite à droite, modélisation par méthode RIG à gauche</i>	<i>30</i>
<i>Figure 14- Maillage de l'estuaire de la Seine : Association de deux sous-modèles via les points de la ligne RIG</i>	<i>31</i>
<i>Figure 15- Simplification du profil altimétrique des berges pour la ligne RIG – Exemple sur le secteur du Havre</i>	<i>32</i>
<i>Figure 16- Profil altimétrique le long d'une digue surmontée d'un muret – Exemple sur la rive gauche en aval du pont de Normandie – Cotes maximales extraites du LIDAR 20 cm (à gauche) et du LIDAR 1 m (à droite).....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 17- Profil altimétrique en bord de Seine – Cours d'eau secondaire dans le secteur de Freneuse.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 18- Profil altimétrique à la jonction entre deux sous-modèles en lit majeur – Passages inférieurs sous la voie ferroviaire en remblais dans le secteur de Tourville-la-Rivière</i>	<i>34</i>
<i>Figure 19- Localisation des secteurs où l'altimétrie extraite du LIDAR est supérieure à l'altimétrie des ouvrages anti-inondations.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 20- Cas particulier dans l'élaboration des configurations RIG avec et sans murets – Exemple sur le secteur de Marais-Vernier</i>	<i>36</i>
<i>Figure 21- Cas particulier dans l'élaboration des configurations RIG avec et sans murets – Exemple sur le secteur de Rives-en-Seine</i>	<i>36</i>
<i>Figure 22- Cas particulier dans l'élaboration des configurations RIG avec et sans murets – Exemple sur le secteur de Tancarville</i>	<i>37</i>
<i>Figure 23- Cas particulier dans l'élaboration des configurations RIG avec et sans murets – Exemple sur le secteur de Caudebec</i>	<i>37</i>
<i>Figure 24- Exemple de traitement de profil en travers de la Seine (extrait de l'étude 2013)</i>	<i>38</i>
<i>Figure 25- Mise à jour du maillage existant à l'embouchure de la Seine</i>	<i>39</i>
<i>Figure 26- Exemple de prise en compte d'éléments structurants – Secteur de Cerlangue (aval de Tancarville).....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 27- Exemple de prise en compte d'éléments structurants – Principaux axes de circulation en zone urbaine (Rouen).....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 28- Illustration d'éléments topographiques exclus de la sélection des éléments structurants en lit majeur</i>	<i>43</i>
<i>Figure 29- Exemple de simplification d'une rupture de pente forte au sein du modèle.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure 30- Altimétrie du modèle numérique actualisé (vue globale).....</i>	<i>46</i>
<i>Figure 31- Altimétrie du modèle numérique actualisé (zoom sur l'estuaire de la Seine)</i>	<i>46</i>
<i>Figure 32- Histogramme des écarts altimétriques pour le maillage global du lit majeur</i>	<i>48</i>
<i>Figure 33- Exemple de différentiel altimétrique MNT/modèle</i>	<i>48</i>
<i>Figure 34- Exemple de différentiel altimétrique MNT/modèle – Maillage peu raffiné hors zones d'enjeux</i>	<i>49</i>
<i>Figure 35- Exemple de différentiel altimétrique MNT/modèle – Rupture de pente importante et simplifiée au sein du modèle</i>	<i>49</i>
<i>Figure 36- Histogrammes des écarts altimétriques pour chaque sous-modèle du lit majeur</i>	<i>52</i>

Figure 37- Schématisation de la résistance à l'écoulement provoquée par un obstacle non submergé (a) et submergé (b).....	54
Figure 38- Schématisation des paramètres DP (diamètre moyen) et SP (inter-distance).....	54
Figure 39- Schématisation des zones bâties pour l'application de la méthode de Lindner	55
Figure 40- Définition des zones d'application de la méthode de Lindner – Exemples sur les secteurs de Rouen (à gauche) et Saint-Pierre-de-Manneville (à droite)	56
Figure 41- Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour les évènements de calage	59
Figure 42- Localisation des marégraphes utilisés pour la validation du modèle	60
Figure 43- Exemple de photographie oblique réalisée sur le secteur de Sahurs lors des évènements de février 2018 (extrait du CCTP)	61
Figure 44- Localisation des repères de crues recensés en bord de Seine pour les évènements de 2018 et 2020.....	61
Figure 45- Emprise du modèle de la Manche développé par ARTELIA.....	62
Figure 46- Cartographie des coefficients de frottement retenus après calage (débit de la Seine supérieur à 2 000 m ³ /s).....	65
Figure 47- Hauteurs d'eau maximales et extension des zones inondées sur le secteur de Sahurs lors du cycle de marée du 1 ^{er} février 2018 - Test de sensibilité sur les ouvrages traversants	68
Figure 48- Vitesses d'écoulement maximales sur le secteur de Sahurs lors du cycle de marée du 1 ^{er} février 2018 - Test de sensibilité sur les ouvrages traversants	69
Figure 49- Durée de submersion pour un cycle de marée sur le secteur de Sahurs (marée du 1 ^{er} février 2018) - Test de sensibilité sur les ouvrages traversants	70
Figure 50- Durée de submersion pour deux cycles de marée sur le secteur de Sahurs (marées du 31 janvier et 1 ^{er} février 2018) - Test de sensibilité sur les ouvrages traversants.....	71
Figure 51- Durée de submersion pour trois cycles de marée sur le secteur de Sahurs (marées du 31 janvier au 2 février 2018) - Test de sensibilité sur les ouvrages traversants	72
Figure 52- Ligne d'eau des niveaux maximaux le long de l'estuaire – Tempête de janvier 2018 (marée du 4 janvier)	73
Figure 53- Evolution des niveaux d'eau sur une fenêtre temporelle de 5 jours - Episode fluvio-maritime de février 2018	73
Figure 54- Durée de dépassement du percentile 70% (P70) des données mesurées, sur un cycle de marée	74
Figure 55- Comparaison des inondations maximales modélisées et des lasses d'inondations - Episode du 1 ^{er} février 2018 en amont de Rouen	75
Figure 56- Comparaison des inondations maximales modélisées et reconstituées par photo-interprétation - Episode du 1 ^{er} février 2018 au droit de Sahurs.....	76
Figure 57- Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 4 janvier 2018	77
Figure 58- Evolution temporelle des niveaux d'eau mesurés et modélisés le long de l'estuaire - Tempête de janvier 2018 (Eleanor)	78
Figure 59- Comparaison du vent mesuré et issu du modèle ERA5 à Balise A le 3 janvier 2018 ...	79
Figure 60- Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 1 ^{er} février 2018	80
Figure 61- Evolution temporelle des niveaux d'eau mesurés et modélisés le long de l'estuaire - Episode fluvio-maritime de février 2018	81
Figure 62- Comparaison des inondations maximales modélisées et des lasses d'inondations - Episode du 1 ^{er} février 2018 entre Criquebeuf-sur-Seine et Oissel	82
Figure 63- Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 21 mars 2008	83
Figure 64- Evolution temporelle des niveaux d'eau mesurés et modélisés le long de l'estuaire – Tempête de mars 2008	84
Figure 65- Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 28 mars 2001	85

Figure 66- Evolution temporelle des niveaux d'eau mesurés et modélisés le long de l'estuaire – Crue de mars 2001.....	86
Figure 67- Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 13 février 2020	87
Figure 68- Evolution temporelle des niveaux d'eau mesurés et modélisés le long de l'estuaire - Episode fluvio-maritime de février 2020	88
Figure 69- Marégrammes modélisés et observés à Honfleur et Tancarville pour le cycle de marée du 13 février 2020.....	89
Figure 70- Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 11 mars 2020	90
Figure 71- Evolution temporelle des niveaux d'eau mesurés et modélisés le long de l'estuaire – Episode fluvio-maritime de mars 2020.....	91
Figure 72- Carte générale du dallage de l'atlas cartographique couvrant l'ensemble de l'estuaire de la Seine	96

CONTEXTE

Les débordements de la Seine font partie de l'histoire du fleuve. Les archives dénombrent ainsi une soixantaine de crues majeures depuis le VI^{ème} siècle. Le territoire d'étude du GIPSA, constitué de l'estuaire de la Seine du barrage de Poses à la mer, est fréquemment soumis à ces phénomènes de débordement qui sont mal appréhendés.

En effet, selon le type d'inondation et le secteur géographique considéré, les facteurs mis en œuvre sont différents : crues de la Seine et de ses affluents, marées astronomiques, événements météorologiques. Le risque inondation dans l'estuaire de la Seine doit donc être appréhendé à l'échelle globale de l'estuaire. Or la plupart des connaissances ne couvrent que certains secteurs de l'estuaire (PPRI locaux, TRI Rouen-Louviers-Austreberthe) et s'appuient sur des analyses historiques ou des données topo-bathymétriques anciennes n'intégrant pas l'évolution de l'estuaire tant dans sa dynamique que dans son évolution morphologique.

Une étude lancée par le GIPSA en 2013 a consisté à définir des scénarios et modélisations de niveaux d'eau dans le lit mineur pour la gestion du risque inondation. Cette étude, menée par ARTELIA, ne traitait précisément que des niveaux dans le lit mineur et non dans le lit majeur. Ainsi, les débordements n'étaient évalués que du point de vue de leur impact sur l'hydrodynamique et les niveaux d'eau dans le lit mineur. Le modèle de l'estuaire de la Seine développé pour cette étude couvrait un linéaire d'environ 175 km et une superficie de 1000 km² depuis l'île du Héron (Saint-Pierre du Vauvray) en amont jusqu'à 15 km au large du Havre dans la baie de Seine à l'aval et l'ensemble de la plaine potentiellement inondable pour les événements extrêmes en lit majeur. Ce modèle, en l'état, n'est pas conçu pour cartographier les zones inondables du lit majeur et ne peut pas répondre directement aux objectifs de la présente mission.

Depuis le 1^{er} janvier 2018, la GEMAPI (Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations) est une compétence obligatoire pour les 10 EPCI-FP Normands riverains du fleuve. Ceci implique le rattachement de la gestion des digues et des zones humides à cette nouvelle compétence et de nouveaux besoins et questionnements émergent : vulnérabilité du territoire au risque inondation par débordement, fonctionnement hydraulique et hydrodynamique de l'estuaire, inondabilité des zones humides, rôle et importance du système d'endiguement...

Ainsi les membres du GIP Seine Aval et la DREAL Haute-Normandie ont initié en 2018 un programme d'études complémentaires à celle de 2013 dont les objectifs sont les suivants :

- Progresser dans la caractérisation et la compréhension des inondations à l'échelle de l'estuaire ;
- Disposer de connaissances et d'éléments méthodologiques pour définir de manière cohérente les hypothèses pour les études à plus petite échelle type études de dangers et cartographies de l'aléa sur le TRI Rouen-Louviers-Austreberthe.

Une première étude menée par ARTELIA en 2019 a permis de mettre à jour l'analyse statistique des niveaux d'eau associés aux différents forçages hydro-météorologiques réalisée en 2013. Une des conclusions de cette étude, en lien avec les conclusions de celle menée en 2013, est que les niveaux d'eau de période de retour centennale semblent inatteignables via la modélisation avec des forçages fluviaux et marins centennaux.

C'est dans ce contexte et à ce stade de connaissances sur le fonctionnement de l'estuaire de la Seine aval, que le GIP Seine Aval a choisi ARTELIA pour la réalisation d'une étude de modélisation des inondations en estuaire de la Seine.

OBJECTIFS DE L'ETUDE ET OBJET DU DOCUMENT

Le premier objectif de la présente étude est **d'améliorer la caractérisation et la compréhension des phénomènes de débordement dans l'estuaire de la Seine**, notamment pour les périodes extrêmes via la mise en place d'un modèle numérique de l'estuaire.

Le second objectif est le **développement d'un modèle numérique re-mobilisable ultérieurement** pour d'autres études selon les besoins (Aide à la réalisation d'études plus locales type études règlementaires, Restauration écologique, Recherche des zones d'expansion de crue et impact sur le niveau de la Seine).

La présente mission s'articule autour de 3 tâches :

- Phase 1 : Elaboration du modèle
- Phase 2 – Tâche 2 : Formation et transfert du modèle
- Phase 2 – Tâche 3 : Simulation de 20 scénarios d'exploitation

La présente note constitue le rapport de la phase 1. Cette note détaille tout d'abord les données utilisées (chapitre A) puis les différentes étapes qui ont conduit à la construction du modèle hydraulique (chapitre B). Le chapitre C présente ensuite le calage et la validation du modèle sur la base de plusieurs événements observés.

OBJECTIFS DU MODELE

ARTELIA a développé en 2013 un modèle hydraulique de l'estuaire de la Seine depuis l'amont du barrage de Poses jusqu'à l'embouchure en Manche. Ce modèle représente le lit mineur de la Seine et le lit majeur sur l'ensemble de la plaine potentiellement inondable pour les événements extrêmes (c'est-à-dire jusqu'aux pieds des versants marqués et identifiés sur les cartes topographiques IGN au 1/25000^e) ce qui représente un linéaire d'environ 175 km et une superficie de 1000 km². L'objectif de ce modèle était de représenter les niveaux d'eau liés à des événements extrêmes dans le lit mineur à l'aval de Poses et les échanges débit/vitesse avec le lit majeur. Il n'était pas conçu pour étudier finement les inondations dans le lit majeur.

Ce modèle existant est aujourd'hui revu intégralement pour prendre en compte les nouvelles sources de données disponibles (données topo-bathymétriques et données de forçages) et les nouveaux objectifs de l'étude. Un Retour d'Expérience (REX) a également été réalisé suite à l'étude de 2013 et a conduit à apporter des modifications détaillées dans la présente note.

Le développement de ce nouveau modèle constitue la première étape d'un vaste programme d'étude. Ce modèle doit pouvoir représenter correctement le fonctionnement hydrodynamique de l'estuaire de la Seine pour tout un ensemble de scénarios hydro-météorologiques. En particulier, il est recherché une bonne caractérisation des niveaux d'eau dans le lit mineur de la Seine, des échanges en débit et en volume entre le lit mineur et le lit majeur, et enfin des écoulements réalistes dans les zones inondées du lit majeur à l'échelle globale de l'estuaire.

Ce modèle n'a pas pour vocation à être utilisé en l'état pour des études locales (études règlementaires, études de dangers, études de restauration écologique, ...). En effet, compte tenu de son emprise très étendue, l'objectif de représenter les écoulements à une échelle locale ne permettrait pas de préserver le caractère opérationnel de l'outil. Comme pour toute création de modèle numérique, il a donc été fait un certain nombre d'hypothèses explicitées dans les chapitres suivants, au regard des objectifs de l'étude et en lien avec les fonctionnalités du logiciel de modélisation. Ces choix permettent de représenter au mieux la réalité du terrain sur la base des données fournies.

En revanche, le modèle est développé dans une optique de transmission au GIPSA et à ses partenaires afin de leur permettre de réaliser des adaptations en fonction de leurs besoins futurs à échelle locale.



A. DONNEES UTILISEES POUR LA CONSTRUCTION DU MODELE

1. RECUEIL ET TRAITEMENT DES DONNEES ALTIMETRIQUES

Les données recueillies et retenues par le GIPSA pour la construction du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et du maillage sont rappelées ci-après. Le choix de la donnée a été fait au regard de la date des données disponibles (de la plus récente à la plus ancienne) mais aussi de la précision des données. A titre d'exemple, le MNT de 2018 fourni par la Métropole de Rouen et traité par photogrammétrie, bien que récent, n'a pas été retenu par manque de résolution et de précision (résolution planimétrique de 5 m et précision altimétrique de 20 cm) par rapport au LIDAR 2010-2011.

Il est rappelé que le secteur d'analyse couvre l'estuaire de la Seine jusqu'au barrage de Poses. Une zone supplémentaire est intégrée au modèle à l'amont de ce secteur, jusqu'à l'île du Héron située sur la commune de Saint-Pierre du Vauvray. L'ajout de cette zone de transition entre la condition limite amont du modèle et le barrage de Poses permet d'éviter un impact des hypothèses prises sur les conditions limites vis-à-vis des écoulements hydrauliques à l'intérieur du secteur d'analyse.

Afin d'intégrer les données disponibles les plus récentes et les plus précises, un MNT d'une résolution de 1 m a été fourni par le GIPSA. Ce MNT est issu d'une concaténation des données répertoriées ci-après. Afin de couvrir l'intégralité du modèle, ce MNT a été complété à l'amont de Poses et dans la baie de Seine par d'autres données collectées par ARTELIA comme expliqué ci-après.

1.1. DONNEES TOPOGRAPHIQUES

Les données topographiques utilisées par ordre de priorité décroissante sont les suivantes (Source : GIPSA - référence [1] - cf. Figure 1) :

- Extrait MNT Caux vallée de Seine et données complémentaires de l'ouvrage de la DREAL – résolution planimétrique de 50 cm (DREAL, 2017) ;
- MNT LIDAR 2017 du GPMH filtré sur la végétation (résolution planimétrique de 1 m) ;
- MNT LIDAR du GIPSA de 2011 (résolution planimétrique de 1 m), dont les procédés d'acquisition et de traitement sont décrits dans le document référencé [2] ;
- RGE Alti 2015 en amont de Poses (résolution planimétrique de 5 m).

Afin de couvrir l'intégralité de la zone modélisée en amont de Poses, le MNT « RGE ALTI® » de l'IGN a également été complété très localement par la base de données « BD ALTI® » de l'IGN dont la résolution est de 75 m.

1.2. DONNEES BATHYMETRIQUES

Les données bathymétriques utilisées par ordre de priorité décroissante sont les suivantes (Source : GIPSA - référence [1] - cf. Figure 1) :

- Bathymétrie entre Rouen et Tancarville (GPMR, 28/07/2020) avec une résolution de 5 m ;
- Référentiel hydrologique de 2020 d'une résolution de 10 m à l'embouchure (GPMR, 31/12/2019) ;
- Bathymétrie par point kilométrique (PK) à la résolution de 1 m entre Rouen et Saint Pierre du Vauvray (VNF, 2013-2019) ;
- MNT DREAL pour les bras secondaires à l'amont de Rouen de résolution 2 m (SETIS_Liaison_A28_A13 de 2011) ;
- MNT bathymétrique de la baie de Seine orientale (SHOM, 2005) de résolution planimétrique 100 m.

Le MNT bathymétrique de la baie de Seine (SHOM, 2005) a été complété par ARTELIA afin de couvrir l'intégralité de la zone modélisée dans la baie de Seine.

1.3. COMPILATION DES DONNEES POUR LA CONSTRUCTION DU MNT

La cartographie de la Figure 1 présente les différentes sources de données retenues pour la construction du Modèle Numérique de Terrain selon les zones de l'estuaire. Ce MNT a été créé en concaténant les différentes sources de données et en veillant à garder une cohérence au niveau des zones de raccordement.

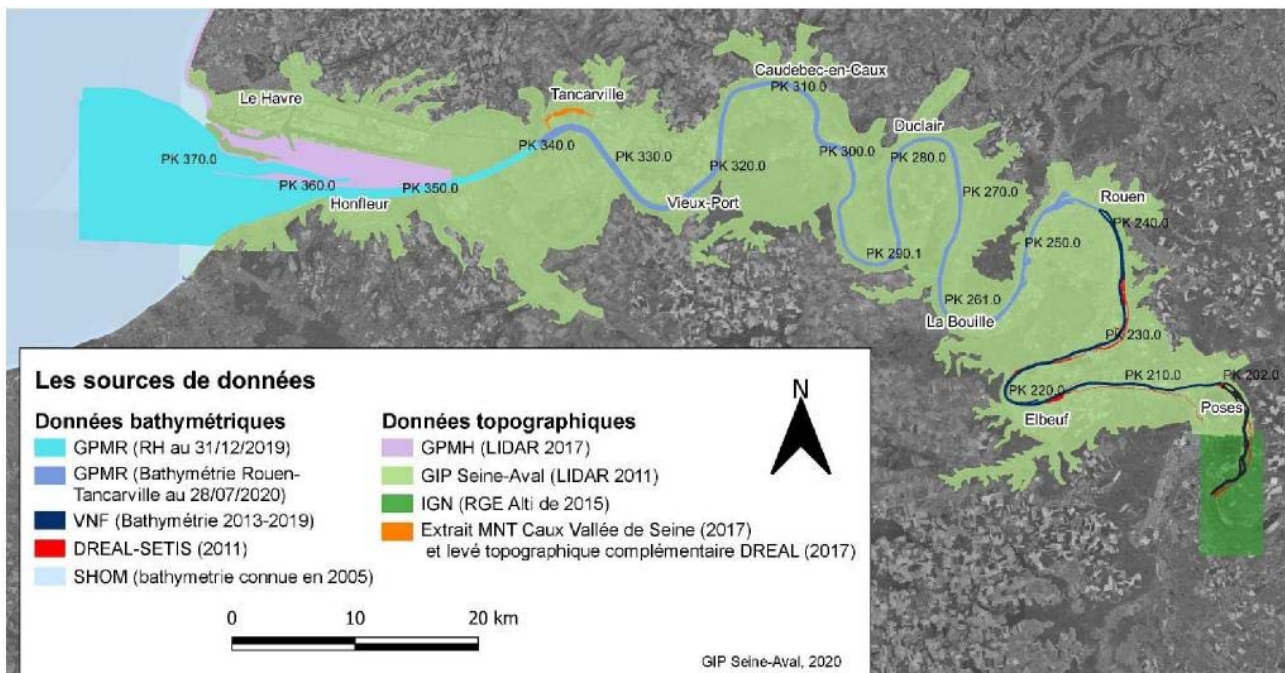


Figure 1- Sources de données topo-bathymétriques retenues pour la construction du MNT (source GIP Seine-Aval, 2020)

Concernant les zones en eau du lit majeur et les bâtiments ne contenant pas d'information altimétrique dans le MNT fourni, une interpolation a été nécessaire pour combler les manques à l'intérieur de l'emprise du futur modèle. Un exemple est proposé sur la Figure 2 pour le secteur de la Risle en rive gauche de la Seine.

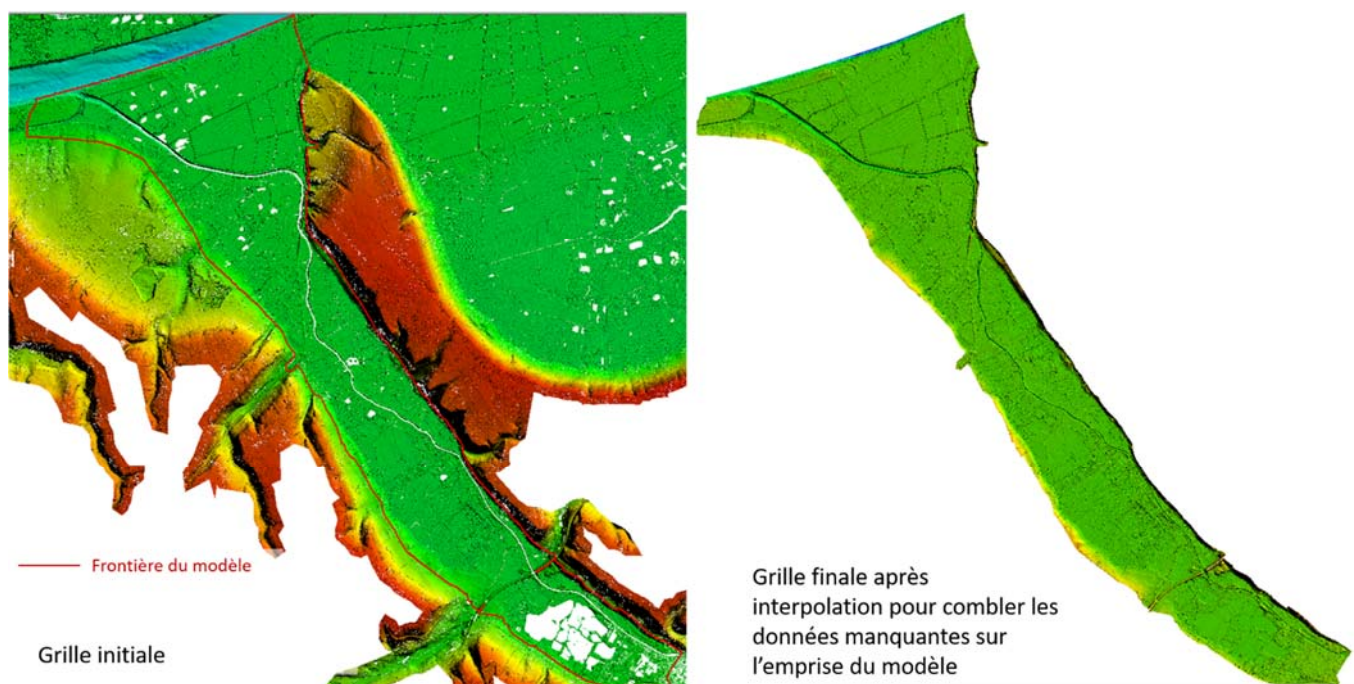


Figure 2- Exemple de comblement des données altimétriques manquantes en lit majeur (bâtiments ou zones en eau)

1.4. DONNEES RELATIVES AUX OUVRAGES DE PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS

En complément du levé LIDAR de résolution 1 m couvrant presque la totalité du secteur d'étude, établi dans le cadre du projet « Levé topographique haute résolution de l'estuaire de la Seine » (GIP Seine-Aval, 2011, référence [2]), un semis de points de résolution plus élevée (15 points / m²) a été acquis le long des berges de la Seine entre le barrage de Poses et Tancarville.

Ces données ont conduit à la génération d'un MNT au pas spatial de 20 cm sur les berges dans le but de rendre compte de la topographie des ouvrages de protection contre les inondations par débordement de la Seine.

Cette technologie LIDAR présente néanmoins le défaut de ne pas détecter l'imperméabilité des ouvrages : concrètement, cette technologie n'est pas en mesure de distinguer un muret anti-inondations d'un ouvrage dit « transparent » vis-à-vis des écoulements (glissière de sécurité, garde-corps, rambarde, clôture).

Un travail d'analyse complémentaire des différentes sources d'information disponibles a donc été conduit en septembre 2013 par le GIP Seine-Aval (document de travail référencé [6]) afin de fournir une description cohérente de la localisation et de l'altimétrie des murets anti-inondations pour l'ensemble du secteur d'étude.

Parmi les informations exploitées, des travaux de recensement de la nature des berges (GPMR & DDEA, 2009) ont notamment permis d'identifier les secteurs irréguliers ou transparents vis-à-vis des inondations. L'absence ou la présence de murets sur ces secteurs a ensuite pu être précisée par l'analyse de photos (ortho-photos haute résolution acquises en 2011 en complément du levé LIDAR, clichés disponibles via Street View) et par des levés terrestres réalisés par le CG76.

Pour les secteurs de présence confirmée de murets anti-inondations, des traitements spécifiques effectués par le GIP Seine Aval sur le MNT 20 cm ont permis d'attribuer à ces murets une cote altimétrique par segment. Ce travail de confrontation des données disponibles a finalement abouti à la création d'une couche SIG (intitulée « 20130218 murets_simplifies.shp ») contenant la localisation et l'altimétrie des murets par tronçon homogène.

Cette couche SIG a ensuite fait l'objet d'une actualisation fin mars 2021 par le GIP Seine Aval, de manière à intégrer des données topographiques issues d'une campagne de levés réalisés par HAROPA - Port de Rouen en février 2020. Ces nouvelles données précisent l'altimétrie des ouvrages anti-inondations entre l'aval du Trait (PK 304) et l'aval du pont de Tancarville (PK 341). Ces nouvelles données permettent :

- De mettre à jour les cotes altimétriques sur les ouvrages anti-inondations déjà identifiés en 2013 dans les zones où les deux jeux de données se superposent ;
- De compléter l'inventaire réalisé en 2013, dans les secteurs où les ouvrages anti-inondations n'avaient pas été identifiés.

Une note dédiée décrit la méthode suivie par le GIP Seine Aval pour cette mise à jour (référence [7]). Ce travail a donné lieu à la création d'une nouvelle couche SIG (intitulée « 20210331_topo_ouvrages_inondation.shp ») qui sert, pour la présente étude de modélisation, de référence pour représenter l'estuaire en configuration actuelle.

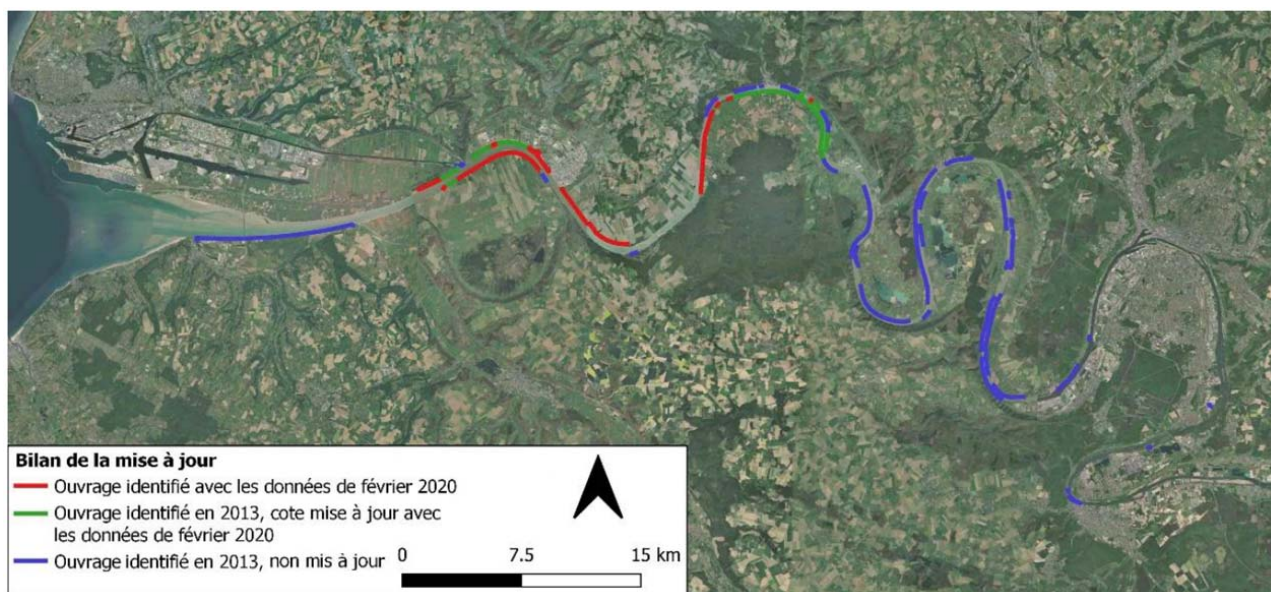


Figure 3- Localisation des ouvrages anti-inondations identifiés (source GIP Seine-Aval, 2021)

2. ANALYSE DES DONNEES ALTIMETRIQUES

2.1. DONNEES BATHYMETRIQUES

Les données bathymétriques entre l'aval du barrage de Poses et Tancarville ont fait l'objet d'une analyse comparative afin d'évaluer les écarts entre :

- Les données utilisées lors de la construction du modèle en 2013, traitées par un important travail de schématisation des sections en travers pour s'assurer de leur bonne représentation au sein du maillage (voir au chapitre B.4.1 pour plus d'explications) ;
- Les nouvelles données fournies par le GIPSA, issues des sources suivantes :
 - En aval de Rouen, les données GPMR correspondant à la bathymétrie des fonds fournie le 28/07/2020 (résolution de 5 m) ;
 - En amont de Rouen, les levés bathymétriques VNF par points kilométriques dont la date d'acquisition s'étale entre 2013 et 2019 (résolution de 1 m).

Cette analyse comparative est reportée sur la Figure 4 selon un profil en long défini dans l'axe des points kilométriques de la Seine, entre l'aval du barrage de Poses et Tancarville.

Cette comparaison ne met pas en évidence une évolution sensible des fonds dans la zone d'étude à l'exception de la zone entre le PK250 et le PK315 (entre Tancarville et Rouen) où les données bathymétriques les plus récentes mettent en évidence un approfondissement du lit de la Seine. Malgré la présence de ces secteurs d'approfondissement, les pentes générales du lit sont très similaires entre les jeux de données.

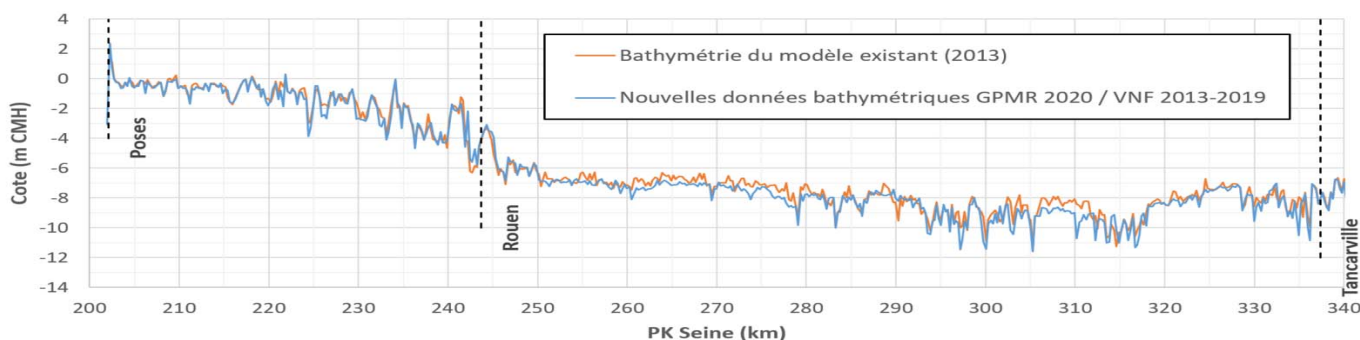


Figure 4- Profil en long bathymétrique dans l'axe de la Seine – Comparaison de la bathymétrie du modèle existant (2013) et des nouvelles données fournies (2020)

Ces données ont donc été intégrées au modèle par projection d'une bathymétrie moyenne autour de chaque nœud du maillage, sans modification du maillage existant. Cette bathymétrie moyenne est déterminée selon la méthode dite des polygones de Voronoï : un polygone est créé autour de chaque nœud du maillage en lit mineur, de sorte que chaque emplacement dans ce polygone soit plus proche du point de maillage associé que de tout autre point du maillage. Cette méthode permet de calculer une altimétrie moyenne pour chaque polygone et ensuite de l'affecter au nœud du maillage correspondant.

L'Annexe 1 présente une analyse détaillée du différentiel altimétrique [Bathymétrie Modèle 2013 – Bathymétrie Modèle 2021] en termes de cote affectée aux nœuds du maillage du lit mineur entre l'aval du barrage de Poses et Tancarville.

Il est précisé que la prise en compte de cette bathymétrie récente impliquera une possible dégradation de la qualité du calage pour les événements les plus anciens de 2001 et 2008, pour lesquels le modèle de 2013 était bien calé.

2.2. DONNEES TOPOGRAPHIQUES

Une analyse critique des données topographiques disponibles a également été réalisée afin d'évaluer la fiabilité des données utilisées pour la construction du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et du maillage. Les différents jeux de données topographiques ont été confrontés à la réalité du terrain via la comparaison avec :

- L'orthophotographie Haute Résolution de 2015 (Géonormandie) ;
- Le MNT de la Métropole de Rouen daté de 2018 ;
- Le service d'ArcGis « World Ortho » qui propose des tuiles d'images aériennes datées entre 2015 et septembre 2018 en fonction des zones, soit des informations plus récentes localement que l'orthophotographie de 2015.

La Figure 5 présente les zones où les données topographiques retenues sont considérées comme « non fiables » par rapport au terrain naturel. Il est entendu par « non fiable » les zones où certains aménagements (bâtiments, routes, éléments structurants, gravières...) ont évolué (construction ou destruction) et n'apparaissent pas dans les données topographiques. Cet indicateur permet de repérer les zones où le modèle n'est pas représentatif de la réalité et pourrait faire l'objet d'une actualisation dans le futur. Il permettra également de moduler les résultats des simulations sur ces zones.

A titre d'exemple dans la boucle de Anneville-Ambourville et Yville-sur-Seine, les photographies aériennes de 2015 (à gauche sur la Figure 6 ci-dessous) montrent que l'étendue de certains étangs de gravières ne correspond pas tout à fait à la topographie figurant dans le LIDAR de 2010-2011 (à droite sur la Figure 6 ci-dessous). Ces évolutions peuvent correspondre à un déplacement, une extension ou une réduction de leur emprise.

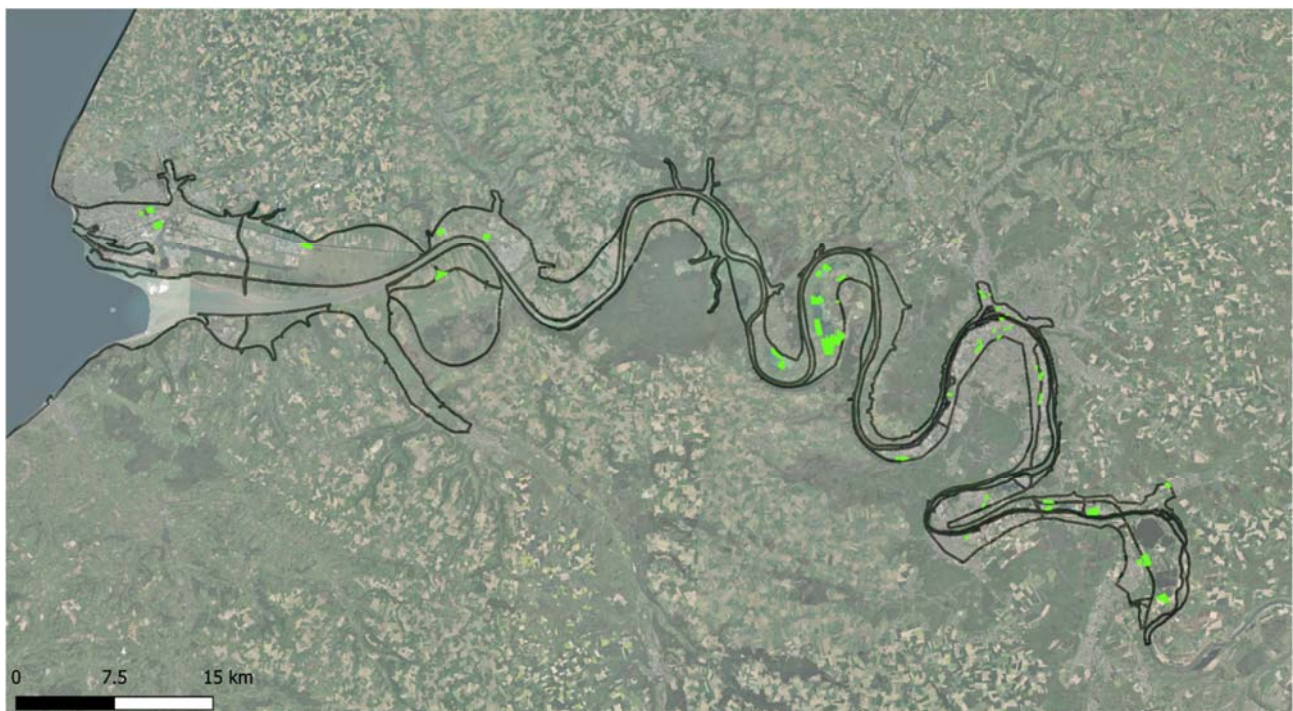


Figure 5- Données topographiques considérées comme non fiables par rapport au terrain naturel existant (zones vertes)

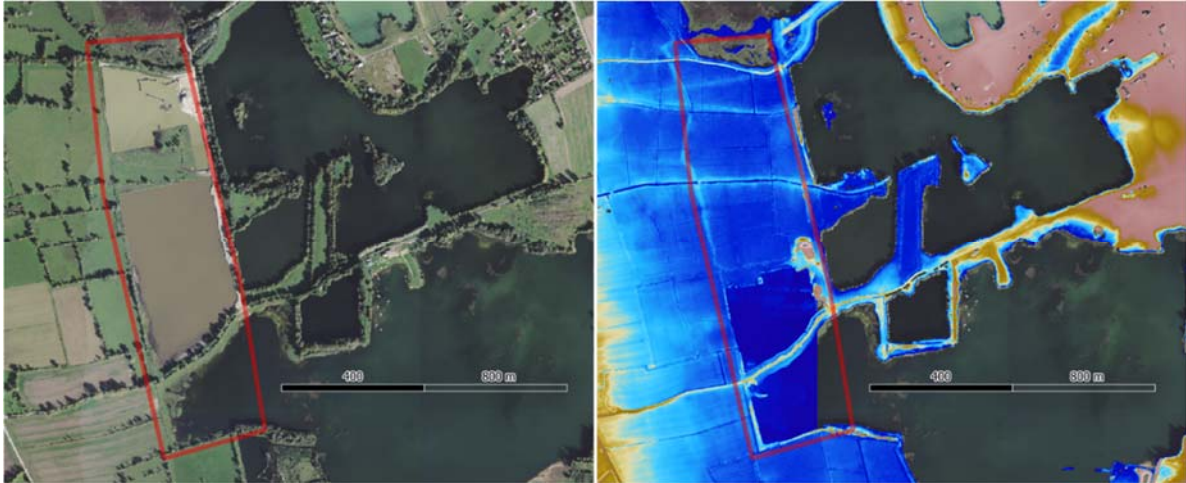


Figure 6- Exemple d'évolution du terrain naturel par rapport aux données topographiques disponibles

En complément du rapport et pour plus de clarté, la couche SIG « *Zones_Analyse_Modele.shp* » est fournie au format QGIS. Elle contient les informations suivantes :

- Nom de la source de données topographiques ;
- Date d'acquisition de la donnée ;
- Indicateur de « fiabilité » de la donnée, par un code :
 - 1 = donnée fiable
 - 0 = donnée « LIDAR 2011 / Pays de Caux 2017 / RGE/ BD-Alti » non fiable
- Commentaire quant aux différences observées par rapport au terrain naturel.

Il est à noter que dans les zones à forte densité de végétation ou de bâtiments, le MNT établi par la technologie du levé LIDAR aéroporté peut comporter des imprécisions locales (non quantifiables précisément) liées à la présence de points de mesure classés en « sursol » malgré le post-traitement réalisé après l'acquisition du LIDAR (référence [2]).

2.3. DONNEES ALTIMETRIQUES SUR LES BERGES

Les deux jeux de données disponibles au niveau des berges de la Seine sont :

- Le MNT LIDAR du GIPSA datant de 2011 (résolution planimétrique de 1 m) sur l'ensemble du linéaire des berges ;
- Des levés topographiques réalisés entre 2006 et 2019 par des géomètres pour le compte du Conseil Départemental de Seine Maritime sur certains linéaires de berges (localisation sur la Figure 7).

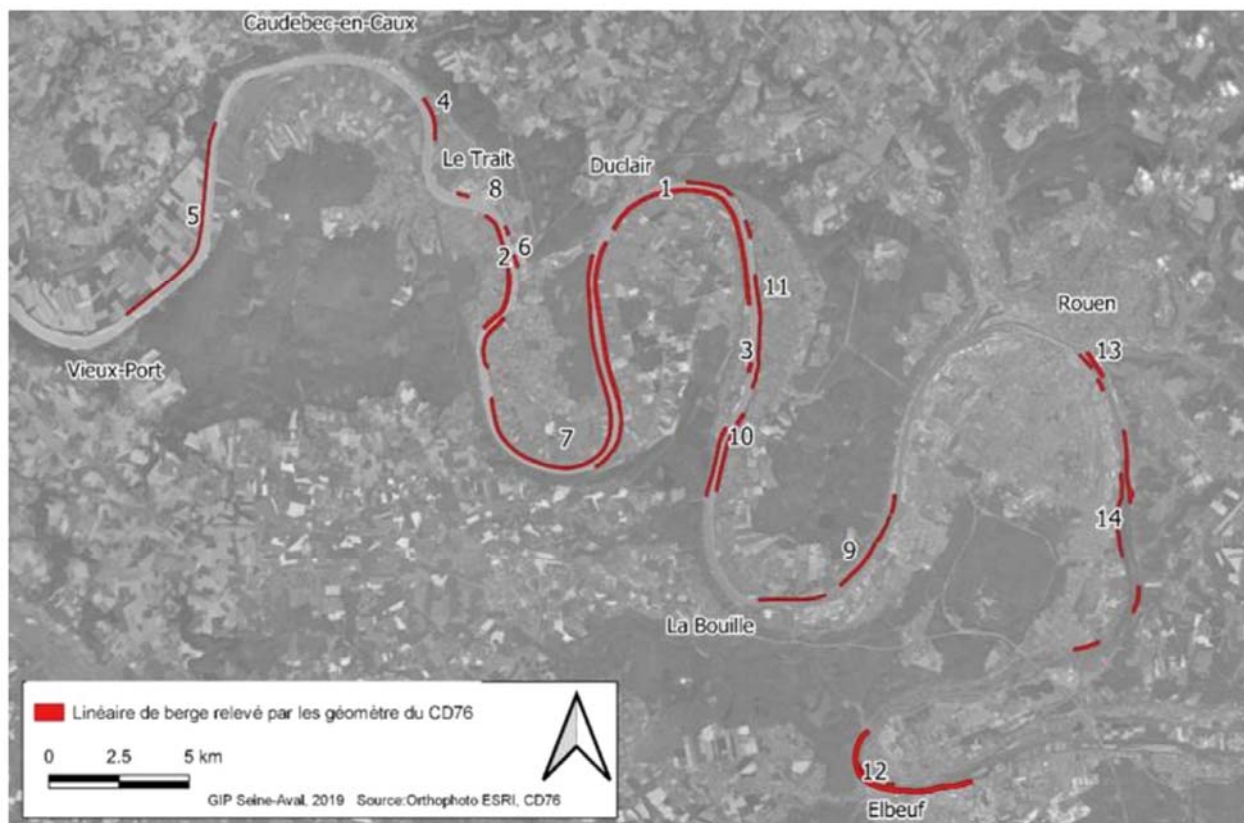


Figure 7- Localisation des linéaires de berges relevés par les géomètres du CD76 (source GIP Seine-Aval, janvier 2020)

Une analyse préalable réalisée par le GIPSA est décrite dans une note dédiée (référence **[3]**). Afin d'évaluer la qualité des données topographiques disponibles pour représenter la topographie des berges en estuaire de Seine, la démarche du GIPSA a consisté à comparer les deux jeux de données en termes d'altimétrie du haut de berges. Deux différentiels altimétriques ont été produits : un différentiel dit « exact » à des points de coordonnées identiques, et un différentiel avec une recherche de maximum altimétrique dans un rayon de 1 m autour du point haut relevé par les géomètres.

Le travail réalisé par le GIPSA a permis de formuler les conclusions suivantes :

- La topographie relevée par les géomètres est globalement plus haute que celle mesurée par le LIDAR (cf. Figure 8). La moyenne des écarts est de 0,25 m pour le différentiel « exact » et de 0,09 m pour le différentiel avec un rayon de recherche de 1 m ;
- Dans plusieurs cas, des incohérences sont rencontrées à la fois dans les données géomètres et dans la donnée LIDAR. Il a été montré que les points hauts mesurés par les géomètres peuvent ainsi correspondre à des éléments complètement transparents vis-à-vis des inondations (ex. clôture).
- Les données LIDAR, de par leur technique d'acquisition homogène à l'échelle du territoire, semblent montrer une plus grande cohérence. Néanmoins, dans certains secteurs (végétalisés ou présentant des rambardes), les données LIDAR peuvent également présenter un biais pouvant être corrigé par les données géomètres ou par la connaissance du terrain.

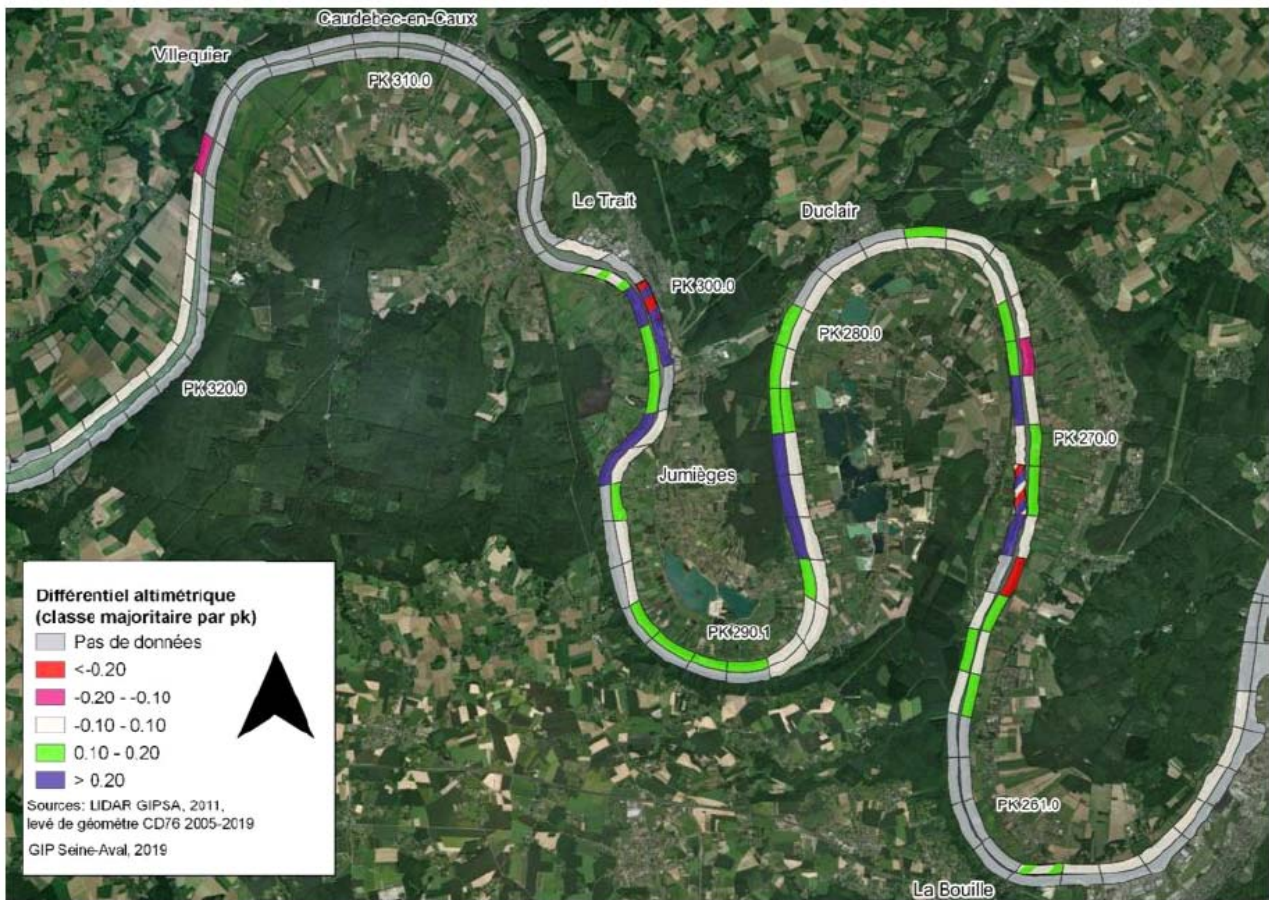


Figure 8- Carte de synthèse des différences altimétriques (source GIPS Seine-Aval, référence [3])

Sur la base du travail de confrontation réalisé par le GIPSA (différentiels altimétriques), une analyse complémentaire a été effectuée pour la présente étude de modélisation afin d'identifier les zones où la topographie mise en œuvre est incertaine. Ce travail a été réalisé à la résolution spatiale des données géomètres et à la résolution de 1 m pour les zones où seule la donnée LIDAR est disponible. Une couche SIG décrite à la fin du présent chapitre est fournie en complément du rapport.



Un premier travail a été mené uniquement sur les secteurs où les deux jeux de données sont disponibles. Les différentes cartographies reportées sur la Figure 9 ci-après montrent :

- Les secteurs où les deux jeux de données sont cohérents entre eux, avec un différentiel altimétrique compris entre -0,10 m et 0,10 m (contour noir sans couleur de remplissage sur la Figure 9) ;
- Les secteurs où des différences altimétriques supérieures à +/- 10 cm apparaissent entre les deux jeux de données. Dans ce cas, il a été identifié si ces secteurs correspondent à :
 - Une zone boisée (en vert sur la cartographie), pouvant rendre la donnée LIDAR incertaine et expliquer la différence entre les deux jeux de données,
 - Une zone ayant fait l'objet de travaux (en orange foncé sur la cartographie),
 - Sur la plupart du linéaire (en orange clair sur la cartographie), il est difficile d'expliquer l'origine du différentiel entre les deux jeux de données. Il a été repéré localement des zones où le point haut du levé géomètre correspond à une clôture privée en arrière de la berge et des zones où le point haut correspondrait par exemple à une rambarde. Cette information est indiquée en commentaire dans la table SIG.



1 / 3




-  Géomètre / Lidar
- Analyse Topographie des Berges**
-  Différence Lidar / Géomètre - Zones boisées
-  Différence Lidar / Géomètre - Zones travaux
-  Différence Lidar / Géomètre - Autres



2 / 3



-  Géomètre / Lidar
- Analyse Topographie des Berges**
-  Différence Lidar / Géomètre - Zones boisées
-  Différence Lidar / Géomètre - Zones travaux
-  Différence Lidar / Géomètre - Autres

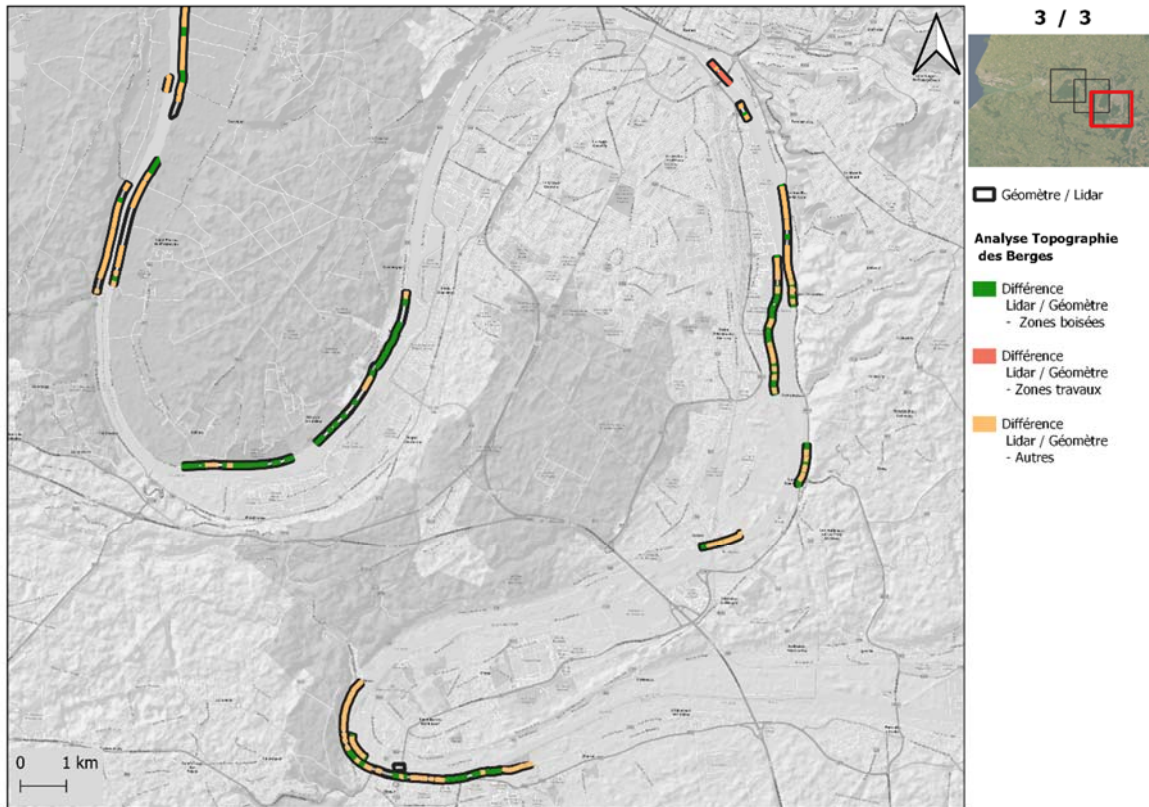
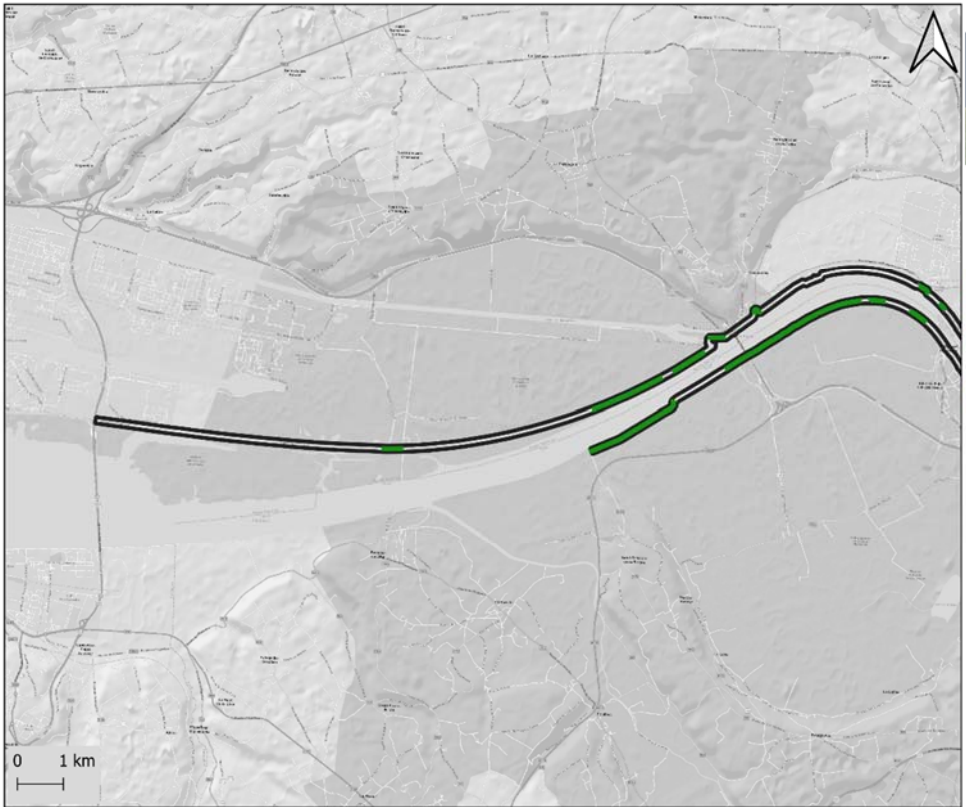


Figure 9- Analyse des zones de comparaison altimétrique entre les levés géométriques et la donnée LIDAR - Les zones sans couleur de remplissage correspondent aux zones où les 2 jeux de données sont cohérents

Un travail similaire d'analyse de fiabilité a été mené sur les secteurs où seule la donnée LIDAR existe (cf. cartographies de l'ensemble du linéaire sur la Figure 9 ci-après). Il a ainsi été identifié les secteurs où :

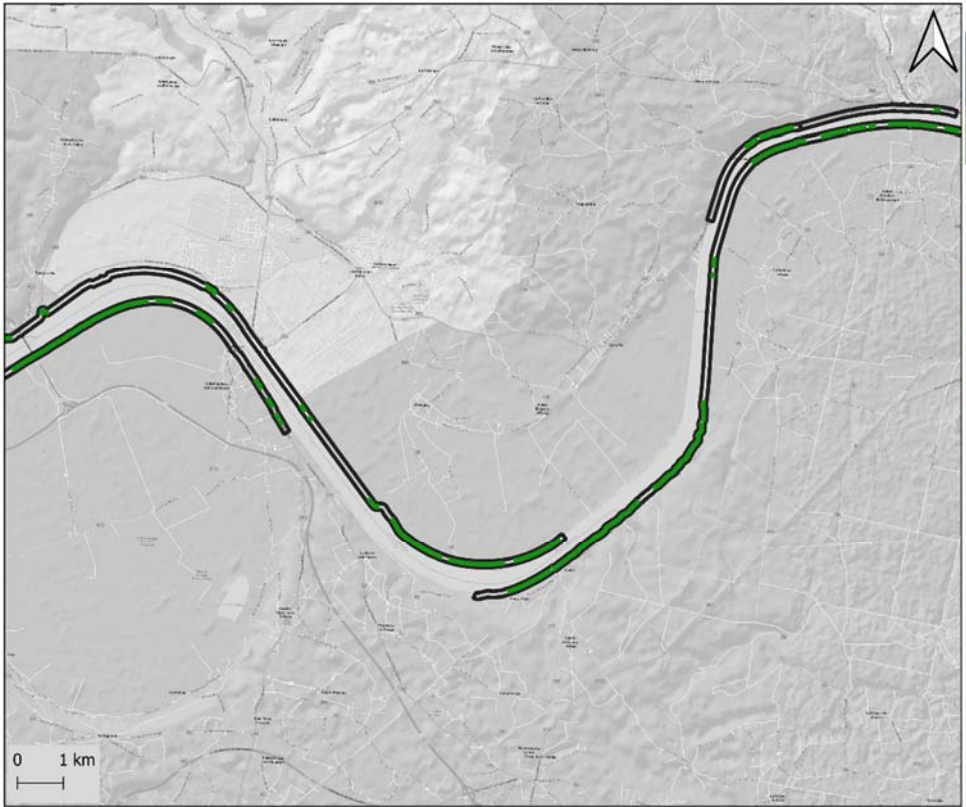
- La donnée LIDAR est considérée comme fiable (contour noir sans couleur de remplissage sur la Figure 9) ;
- La donnée LIDAR est dite incertaine du fait de secteurs boisés ou de zones ayant subi des travaux (représentés respectivement en vert et en orange foncé sur la Figure 9).



1 / 5



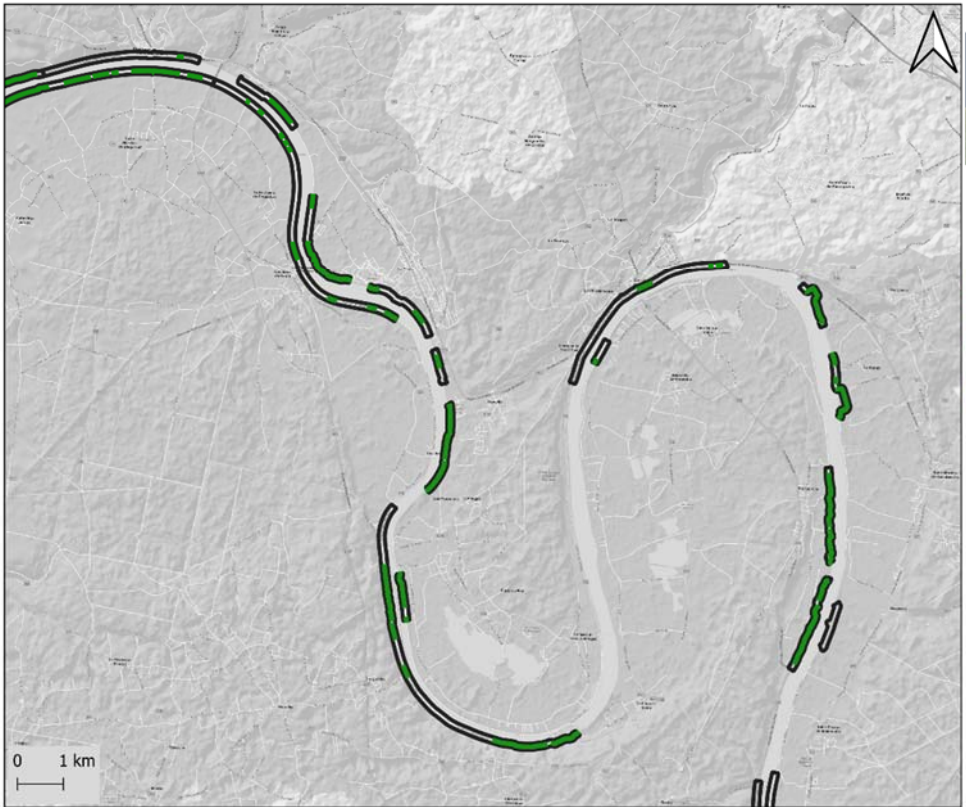
-  Lidar
- Analyse Topographie des Berges**
-  Données incertaines - Zones boisées
-  Données incertaines - Zones travaux



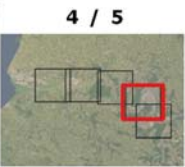
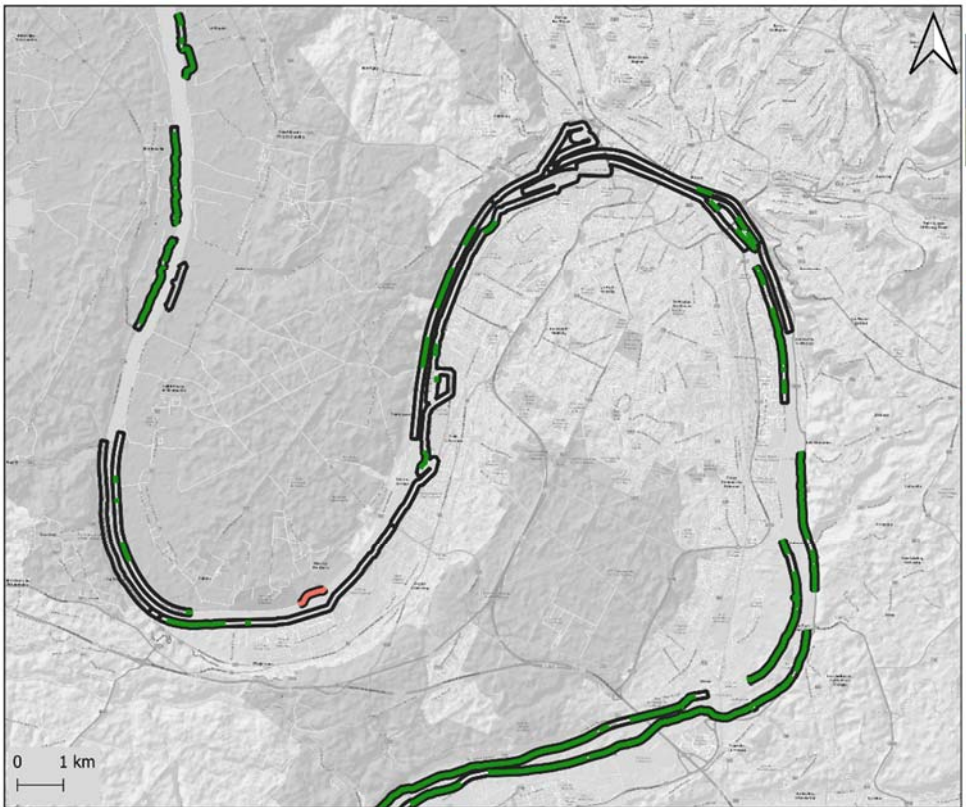
2 / 5



-  Lidar
- Analyse Topographie des Berges**
-  Données incertaines - Zones boisées
-  Données incertaines - Zones travaux



- Lidar
- Analyse Topographie des Berges**
- Données incertaines
- Zones boisées
- Données incertaines
- Zones travaux



- Lidar
- Analyse Topographie des Berges**
- Données incertaines
- Zones boisées
- Données incertaines
- Zones travaux

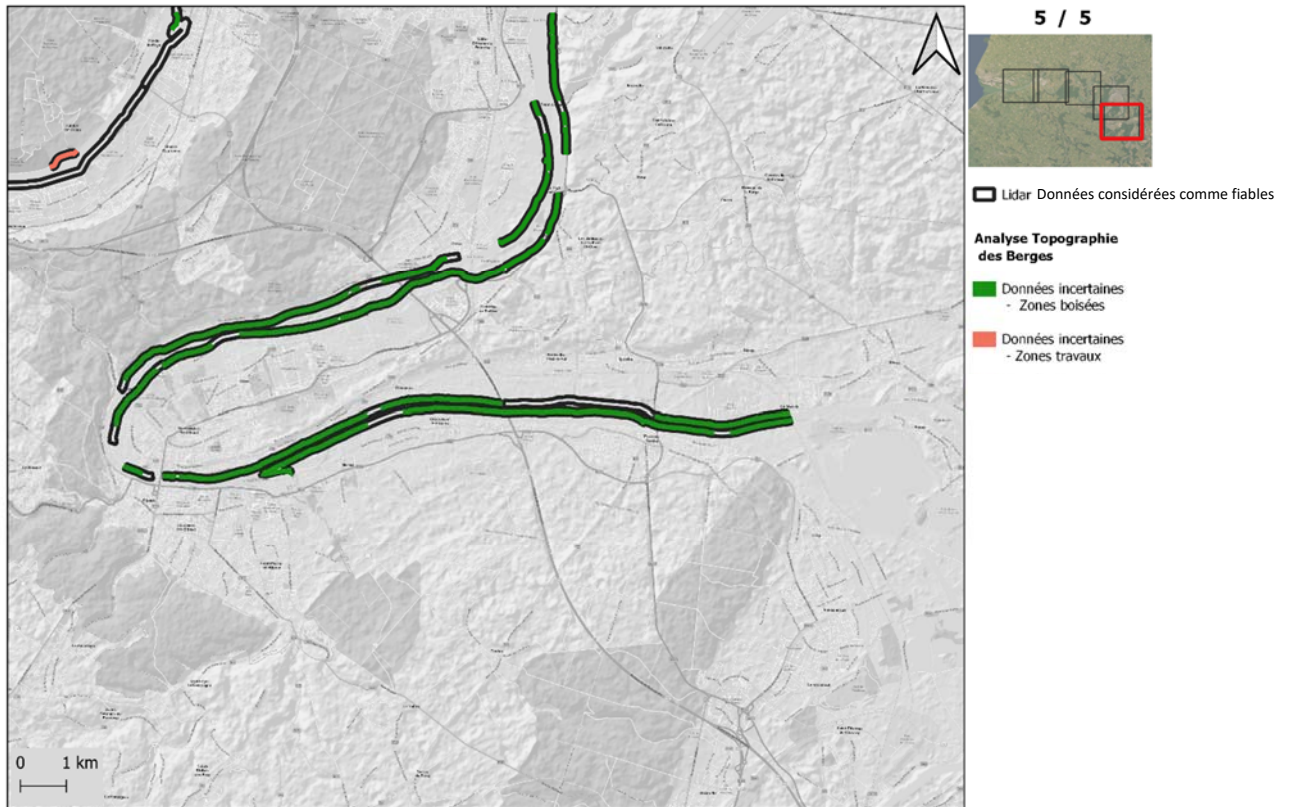


Figure 10- Analyse des données LIDAR – Localisation des données dites incertaines – Les zones sans couleur de remplissage correspondent aux données considérées comme fiable

L'ensemble de nos analyses est consigné dans la couche SIG « *Analyse_Topo_Berges_plg* » (fournie en complément du présent rapport) qui contient la nomenclature suivante :

- Pour les zones où les données géométriques sont disponibles et où le différentiel altimétrique est établi entre les deux jeux de données, il est indiqué « Géomètre / LIDAR » dans le champ source et le code suivant :
 - 1 - Données cohérentes entre les deux jeux de données,
 - 2 - Différence entre les deux jeux de données - Zones boisées,
 - 3 - Différence entre les deux jeux de données - Zones de travaux,
 - 4 - Différence entre les deux jeux de données (hors zones boisées et zones de travaux) – avec des précisions en commentaires

- Pour les zones où seule la donnée LIDAR est disponible, il est indiqué « LIDAR » dans le champ source et le code suivant :
 - 1 - Données cohérentes / fiables,
 - 2 - Données incertaines - Zones boisées,
 - 3 - Données incertaines - Zones de travaux.



B. CONSTRUCTION DU MODELE HYDRAULIQUE

1. SYSTEME DE GEOREFERENCEMENT

Le modèle est construit dans le référentiel géodésique RGF / Lambert 93 – EPSG 2154 et rattaché au référentiel altimétrique CMH (Cote Marine Le Havre).

Certaines données topographiques et bathymétriques ont été fournies dans le référentiel altimétrique NGF-IGN69 (Nivellement Général de la France). La correspondance entre ces deux référentiels altimétriques est la suivante (référence [4]) :

$$\text{Cote NGF} = \text{Cote CMH} - 4,378 \text{ m}$$

2. EMPRISE DU MODELE

Dans le cadre de la présente étude, l'emprise du modèle existant et développé pour l'étude précédente de 2013 a été réajustée comme explicité ci-après :

- Compte tenu du REX de 2013, l'emprise du modèle a été étendue vers l'aval afin de mieux représenter les forçages météorologiques qui induisent une élévation du niveau marin (surcote) notamment en cas de tempête. Pour cela, le modèle intègre à présent l'ensemble de la baie de Seine ;
- Les emprises extérieures des sous-modèles du lit majeur ont également été ajustées afin d'englober l'enveloppe des inondations associées à un événement hydro-météorologique de période de retour millénaire (cotes atteintes projetées + 1 mètre, source : GIPSA). A titre informatif, les principales zones modifiées sont présentées sur la Figure 11 ;
- Les limites des sous-modèles du lit majeur ont été replacées à l'arrière immédiat des ouvrages de protection à la jonction avec le lit mineur ;
- L'emprise du lit mineur a été reprise localement au niveau des berges de la Seine ;
- L'emprise du modèle au niveau de la Risle (affluent en rive gauche en amont de Berville-sur-Mer) a été rallongée d'environ 8 km vers l'amont.

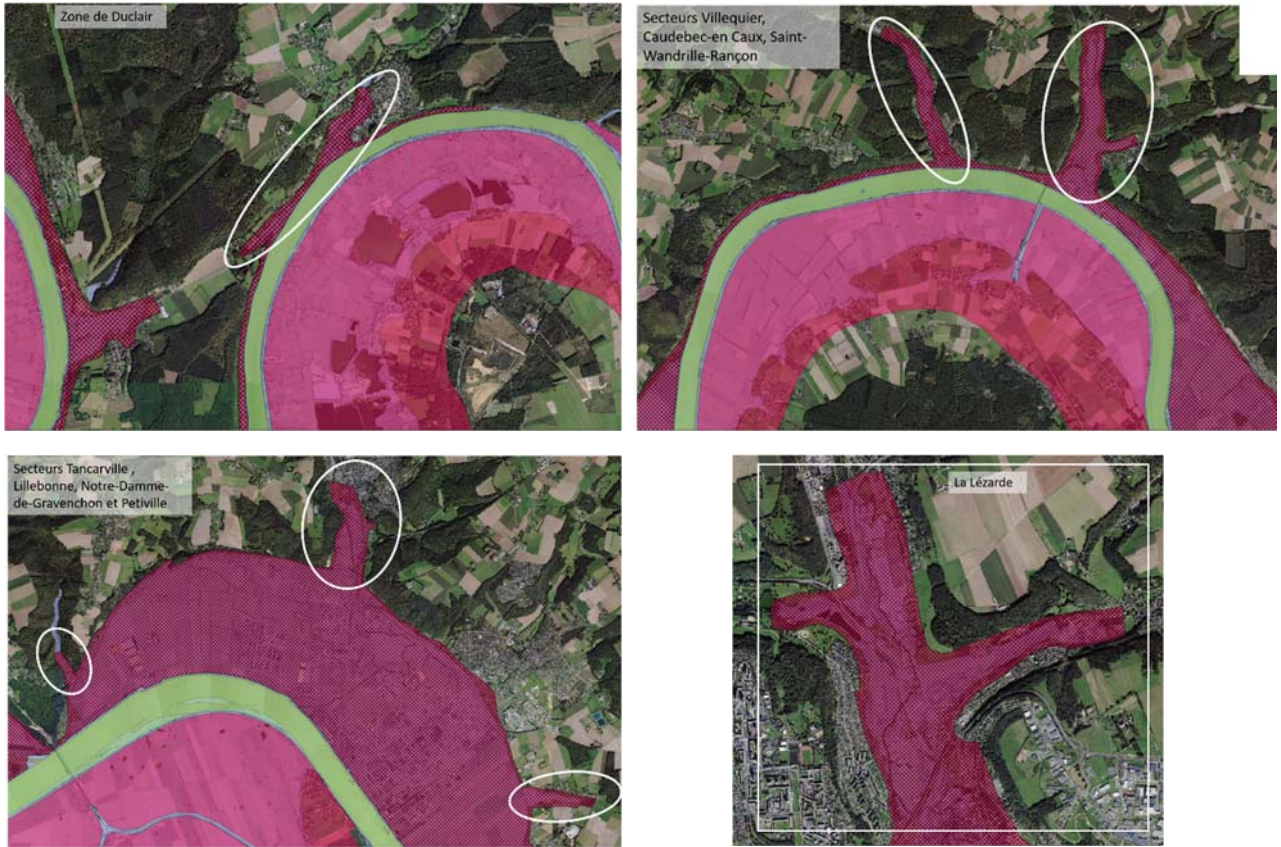


Figure 11- Principales zones ajoutées au modèle existant de 2013

L'emprise du modèle dans sa globalité est présentée sur la Figure 12. Outre le lit mineur et la baie de Seine, il se compose de 23 sous-modèles en lit majeur maillés indépendamment les uns des autres. Les emprises des différents sous-modèles en lit majeur sont présentées en détail en Annexe 2.

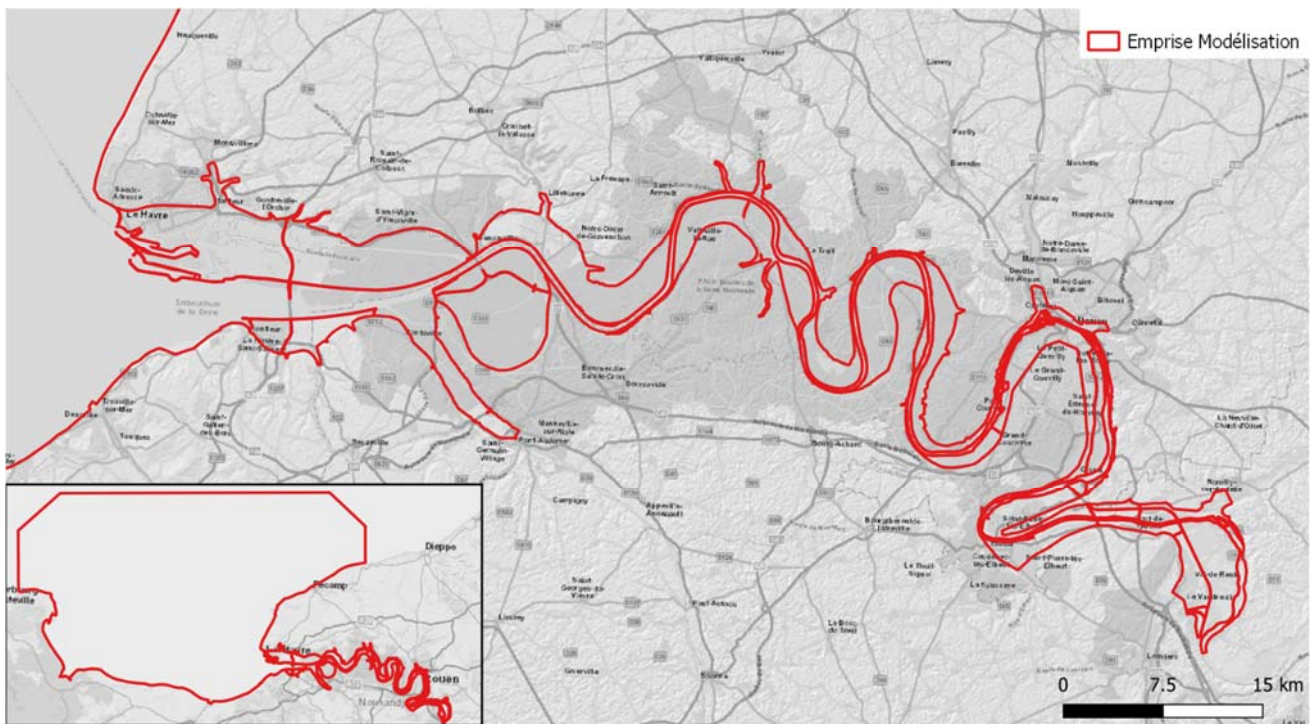


Figure 12- Emprise globale du modèle

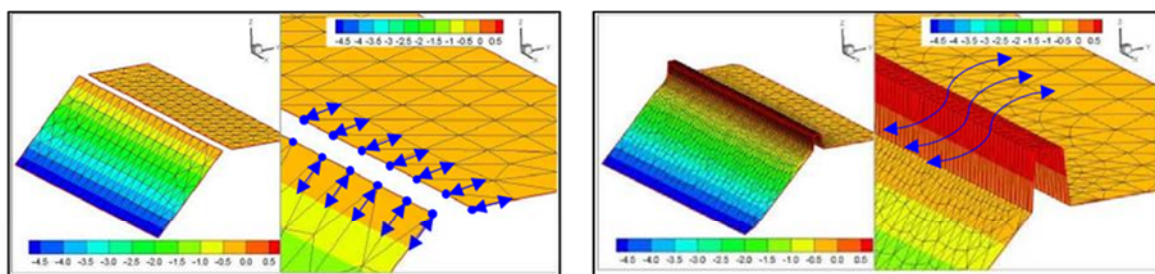
3. MODELISATION DES OUVRAGES DE PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS ET DES INFRASTRUCTURES EN REMBLAIS

3.1. PRINCIPE DE MODELISATION RETENU

Comme lors de la précédente étude menée en 2013, la prise en compte des écoulements par-dessus les ouvrages de protection à la jonction lit mineur / lit majeur est externalisée via l'outil-modèle « RIG », développé par ARTELIA dans le cadre de l'étude de modélisation « Référentiel Inondation Gironde ». Il en est de même pour les infrastructures en remblais délimitant les différents sous-modèles en lit majeur.

Les principes de fonctionnement de l'outil de modélisation RIG sont détaillés en Annexe 4.

La Figure 13 présente une comparaison entre une approche dite classique (à droite) et une approche basée sur la méthode RIG (à gauche) pour représenter un ouvrage de protection entre lit mineur et lit majeur.



Représentation des écoulements sur un ouvrage par méthode RIG → Calcul de la débitance sur l'ouvrage en fonction du profil réel de la digue et des lois de seuil

Représentation des écoulements sur un ouvrage par méthode explicite (maillage) → Calcul de l'écoulement en fonction du maillage

Figure 13- Principe de modélisation d'un ouvrage déversant : modélisation explicite à droite, modélisation par méthode RIG à gauche

Au regard de l'étendue de l'estuaire de la Seine à modéliser, une technique de modélisation explicite de ce type d'ouvrage impliquerait un raffinement excessif du maillage et conduirait à des temps de calcul prohibitifs en termes d'opérationnalité.

La méthode retenue consiste à modéliser ces structures comme des îlots non intégrés explicitement au maillage. Les possibilités de déversement au-dessus de ces ouvrages sont modélisées au moyen des formules classiques d'écoulement sur un seuil, en régime dénoyé ou noyé selon les niveaux d'eau calculés de part et d'autre (voir Annexe 4).

L'altimétrie du terrain naturel existant aux pieds amont et aval des ouvrages est décrite par les nœuds du maillage situés de part et d'autre de l'îlot. L'altimétrie en crête est quant à elle définie au moyen de triplets (x, y, z) dans un fichier externe (au format ASCII) appelé lors de la simulation. La diversité altimétrique de ces ouvrages peut ainsi être décrite à une résolution spatiale adaptée aux données topographiques disponibles, plus fine que la taille de maille choisie pour les sous-modèles de part et d'autre.

A noter que la mise en place de cet outil s'effectue postérieurement à la validation du maillage étant donné que le fichier externe nécessite la connaissance de la position exacte et de la numérotation des nœuds.

La Figure 14 ci-après, tirée du modèle de l'estuaire de la Seine, illustre le principe général de cette méthode : chaque point coté décrivant l'ouvrage de franchissement est associé à deux nœuds appartenant chacun à la frontière d'un maillage distinct de part et d'autre de la ligne RIG.

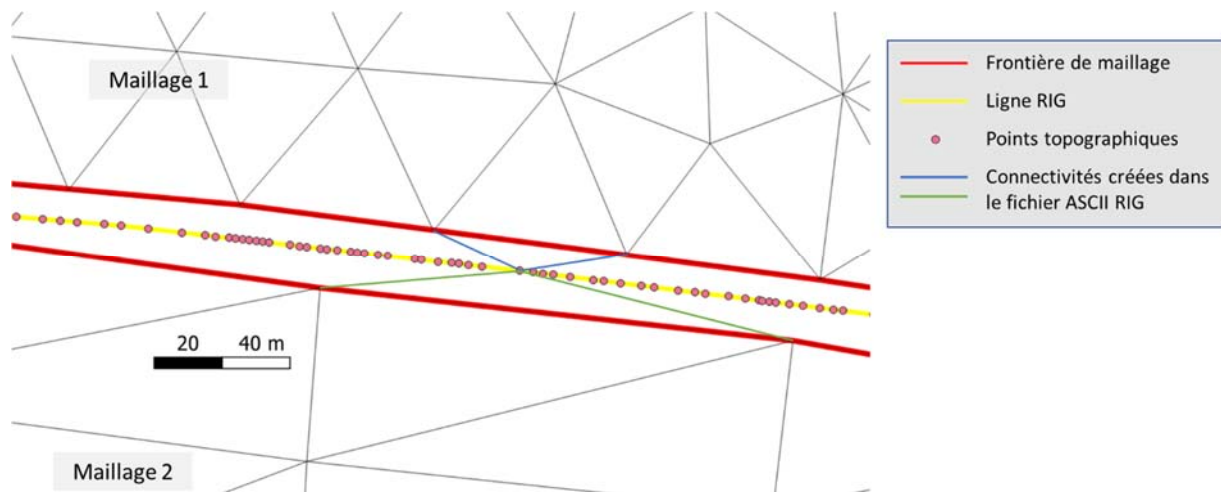


Figure 14- Maillage de l'estuaire de la Seine : Association de deux sous-modèles via les points de la ligne RIG

3.2. APPLICATION DE LA METHODE RIG AU MODELE DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE

3.2.1. Méthode générale d'élaboration de la liaison RIG

La prise en compte des singularités représentées de façon externalisée par la méthode RIG nécessite de disposer de lignes composées de points cotés à la jonction entre les différents sous-modèles.

Compte tenu du programme de simulations envisagées pour la phase ultérieure d'exploitation du modèle, deux versions distinctes de lignes RIG doivent être construites :

- Une version de liaison RIG « avec murets » qui représente l'estuaire dans sa configuration actuelle en tenant compte de la présence des murets anti-inondations. Cet ensemble de lignes est utilisé pour la phase de calibration et pour les premiers scénarios d'exploitation ;
- Une version de liaison RIG « sans muret » qui considère un arasement des murets anti-inondations au niveau du terrain naturel. Cet ensemble de lignes est utilisé pour certains scénarios d'exploitation dont l'objectif est de déterminer le rôle des murets.

Chronologiquement, l'altimétrie associée à la liaison RIG « sans muret » a été établie dans un premier temps selon la méthodologie décrite dans ce chapitre. L'altimétrie a ensuite été ajustée localement dans les secteurs où les murets sont identifiés afin de générer la liaison RIG « avec murets », sur la base des données disponibles sur les ouvrages anti-inondations (inventaire conduit par le GIP Seine-Aval en 2013 et mis à jour avec de nouvelles données acquises en 2020, cf. chapitre A.1.4). Cette méthodologie est la plus adaptée en l'absence d'autre information spatialisée sur la hauteur des murets anti-inondations.

Dans un premier temps toutes ces lignes ont été tracées sous SIG sur la base de la topographie issue du MNT LIDAR de résolution 1 m (GIPSA, 2011), en faisant ressortir les reliefs à l'aide d'une échelle de couleurs adaptée par secteurs. Dans les secteurs où des murets anti-inondations sont recensés, ces lignes RIG sont placées au niveau du tracé des ouvrages. Cette première étape fournit une position planimétrique approchée de la zone régissant les débordements entre deux sous-modèles, avant l'étape suivante de recherche précise des points hauts via un traitement géomatique.

La détermination des points hauts a ensuite été menée par recherche des cotes maximales à partir des données du MNT LIDAR de résolution 1 m, en retenant une distance de recherche réduite à +/- 4 m de part et d'autre de ces lignes RIG préalablement discrétisées au pas spatial de 1 m. Une distance de recherche de +/- 10 m (puis +/- 7.5 m) conduisait à détecter un trop grand nombre d'autres points hauts situés à l'intérieur des sous-modèles en lit majeur, mais non représentatifs de l'altimétrie à la jonction entre sous-modèles, d'où le choix final de la distance de recherche de +/- 4 m.

De manière à optimiser les temps de calcul du modèle tout en conservant des critères acceptables en matière d'altimétrie sur les jonctions entre sous-modèles, la résolution spatiale de chaque ligne RIG a fait ensuite l'objet d'une simplification en s'appuyant sur un algorithme de calcul (connu sous le nom de « Ramer - Douglas - Peucker »). Cet algorithme développé pour la généralisation cartographique permet de transformer une courbe composée de nombreux segments en une courbe similaire avec un nombre de points réduit. A partir d'une ligne initiale avec un point coté tous les mètres, il en résulte une ligne avec une résolution spatiale non régulière et adaptée en fonction des pentes des profils réels.

La Figure 15 ci-après illustre cette étape de simplification du profil altimétrique correspondant aux berges de la Seine sur le secteur portuaire du Havre. A noter que si la distance entre deux points consécutifs est supérieure à 10 m après cette étape de simplification altimétrique, un point intermédiaire est rajouté au moment de la création du fichier ASCII appelé lors de la simulation (avec une interpolation linéaire de l'altimétrie entre les deux points). En conséquence, la résolution spatiale de la ligne « RIG » est de 10 m au maximum.

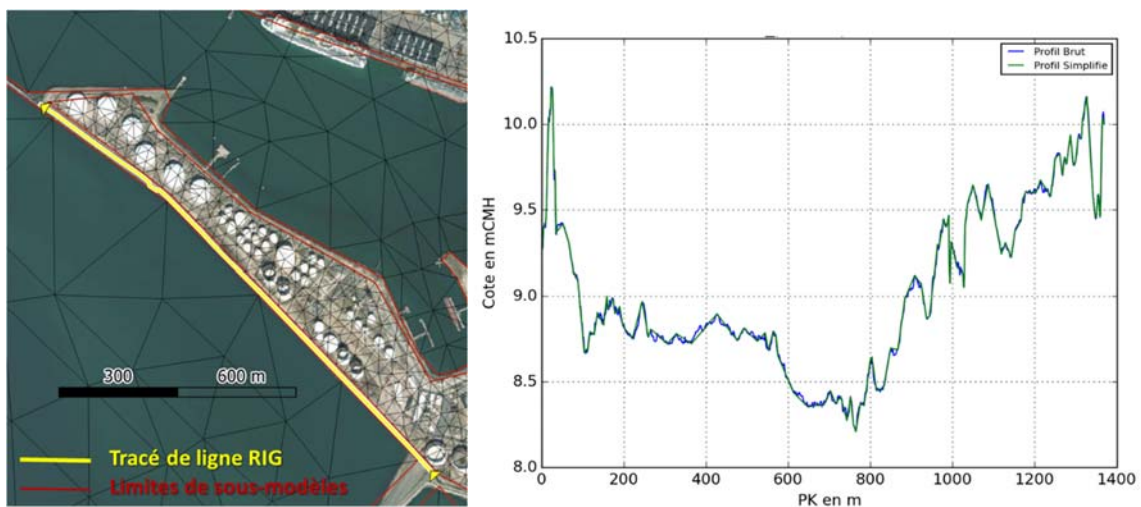


Figure 15- Simplification du profil altimétrique des berges pour la ligne RIG – Exemple sur le secteur du Havre

Il convient de préciser que ce travail préalable à la mise en œuvre de la méthode RIG a été conduit dans un premier temps sur la base des données altimétriques de résolution 20 cm couvrant les bords de Seine, issues de la campagne LIDAR de 2011 du GIP Seine-Aval (référence [2]).

Cependant les ouvrages de type murets anti-inondations, dont la largeur est d'environ 20 cm en moyenne, sont parfois identifiés par ce levé LIDAR de résolution 20 cm, mais sans que cela ne soit systématique. De plus, cette donnée ne fait pas la distinction entre un muret anti-inondations et un ouvrage transparent vis-à-vis des écoulements (barrière, rambarde, etc.), comme mentionné dans le document de travail du GIP Seine-Aval référencé [6].

La Figure 16 ci-après présente un exemple de profil altimétrique le long d'une digue surmontée d'un muret anti-inondations, en aval immédiat du pont de Normandie sur la rive gauche de la Seine. L'image de gauche illustre bien la très forte variabilité des cotes maximales détectées autour de la ligne RIG à partir du LIDAR de résolution 20 cm (parfois sur la crête du muret et parfois au pied de celui-ci).

En conséquence et après discussion avec le GIP Seine-Aval, il a finalement été décidé d'utiliser le MNT LIDAR de résolution 1 m pour la recherche altimétrique associée à l'ensemble des lignes « RIG sans murets », car statistiquement l'utilisation de cette source de données limite la probabilité de détecter les cotes hautes des murets qui seraient présentes dans la couche MNT LIDAR 20 cm (cf. Figure 16).

Sur ces illustrations est également repositionnée la cote théorique du muret anti-inondations sur ce secteur, issue du fichier de description fourni par le GIP Seine-Aval (couche SIG « 20210331_topo_ouvrages_inondation.shp »).

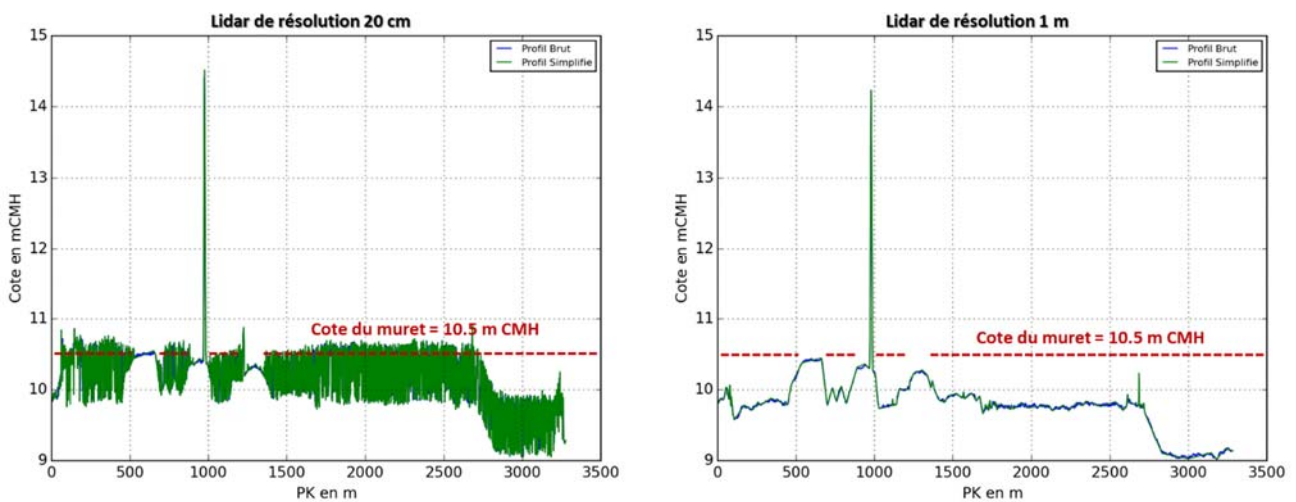


Figure 16- Profil altimétrique le long d'une digue surmontée d'un muret – Exemple sur la rive gauche en aval du pont de Normandie – Cotes maximales extraites du LIDAR 20 cm (à gauche) et du LIDAR 1 m (à droite)

Cette même Figure 16 permet également de rendre compte des irrégularités altimétriques contenues dans les données issues de la technologie LIDAR.

Ces disparités peuvent s'expliquer par la présence d'éléments remblayés très localement à proximité des bords de Seine (à une distance de +/- 4m du tracé de la ligne RIG), par la détection ponctuelle de la crête des murets sur la donnée LIDAR de résolution 1 m, ou encore par des imprécisions locales liées à la présence de points de mesure classés en « sursol » malgré le post-traitement réalisé après l'acquisition du LIDAR (référence [2]).

L'intérêt de l'approche RIG réside justement dans le fait de pouvoir calculer les débits de franchissement au-dessus des ouvrages de façon proportionnelle à la largeur de chaque tronçon, en reflétant la réalité altimétrique des ouvrages sans nécessiter un raffinement du maillage de calcul sur le secteur en question.

Comme illustré sur la Figure 17 et la Figure 18, cette méthode de représentation altimétrique permet également de bien intégrer les points bas au sein des profils de la liaison RIG comme par exemple :

- Le long des berges de Seine, notamment au droit de la confluence de cours d'eau ou de fossés (exemple sur la Figure 17 sur la rive droite de la Seine au droit de la commune de Freneuse) ;
- Le long des infrastructures en remblais entre deux sous-modèles en lit majeur, notamment au droit d'ouvertures pour le passage de chaussées routières (exemple sur la Figure 18 au droit de la commune de Tourville-la-Rivière).

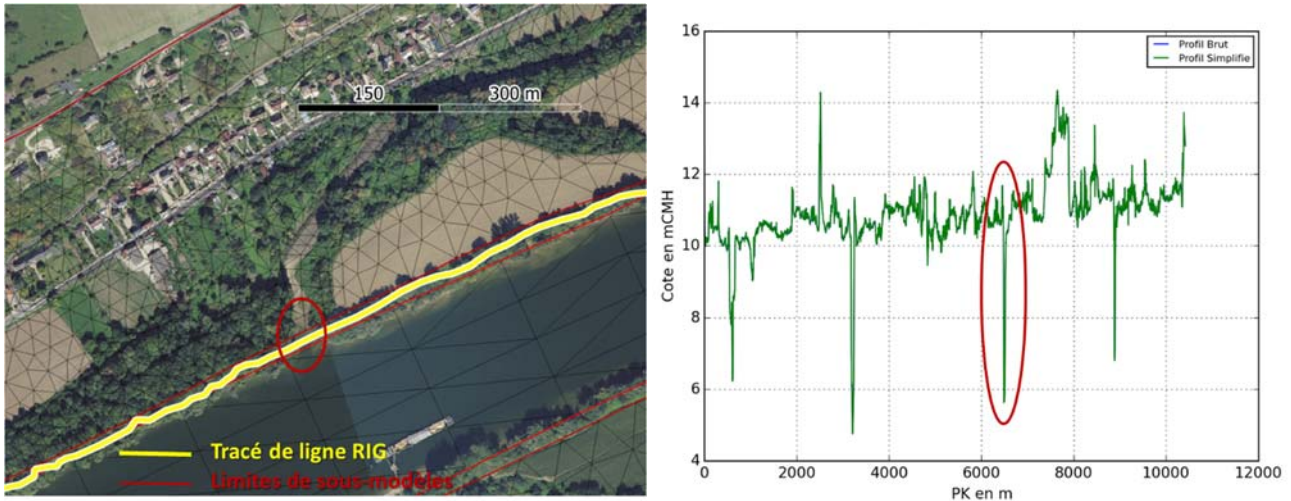


Figure 17- Profil altimétrique en bord de Seine – Cours d'eau secondaire dans le secteur de Freneuse

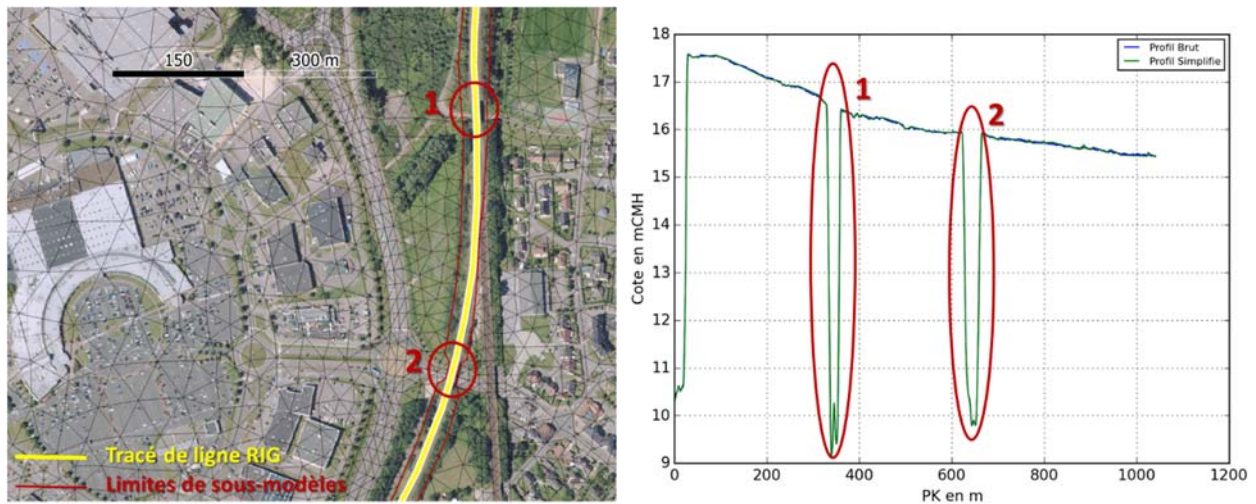


Figure 18- Profil altimétrique à la jonction entre deux sous-modèles en lit majeur – Passages inférieurs sous la voie ferroviaire en remblais dans le secteur de Tourville-la-Rivière

3.2.2. Traitement particulier des secteurs avec ouvrages anti-inondations

L'une des difficultés rencontrées en cours d'application de cette méthodologie concerne les secteurs de berges où sont identifiés des ouvrages anti-inondations.

De manière générale, les cotes maximales détectées à partir des données du MNT LIDAR de résolution 1 m fournissent d'abord l'altimétrie associée à la configuration RIG « sans muret ». La configuration RIG « avec murets » est créée dans un second temps en appliquant, pour chaque segment d'ouvrage anti-inondation identifié, la cote altimétrique issue du travail d'inventaire mis à jour par le GIP Seine Aval (couche SIG « 20210331_topo_ouvrages_inondations.shp »).

Néanmoins, pour environ 15% des points composant la liaison RIG au sein de ces secteurs, les cotes maximales ressortant d'une recherche à partir des données du MNT LIDAR sont plus élevées que celles contenues dans la couche « 20210331_topo_ouvrages_inondations.shp ». Comme illustré sur la Figure 19, une part majeure de ces secteurs concerne les ouvrages identifiés par la campagne de levés HAROPA - Port de Rouen en février 2020 (cf. Figure 3 au chapitre A.1.4).

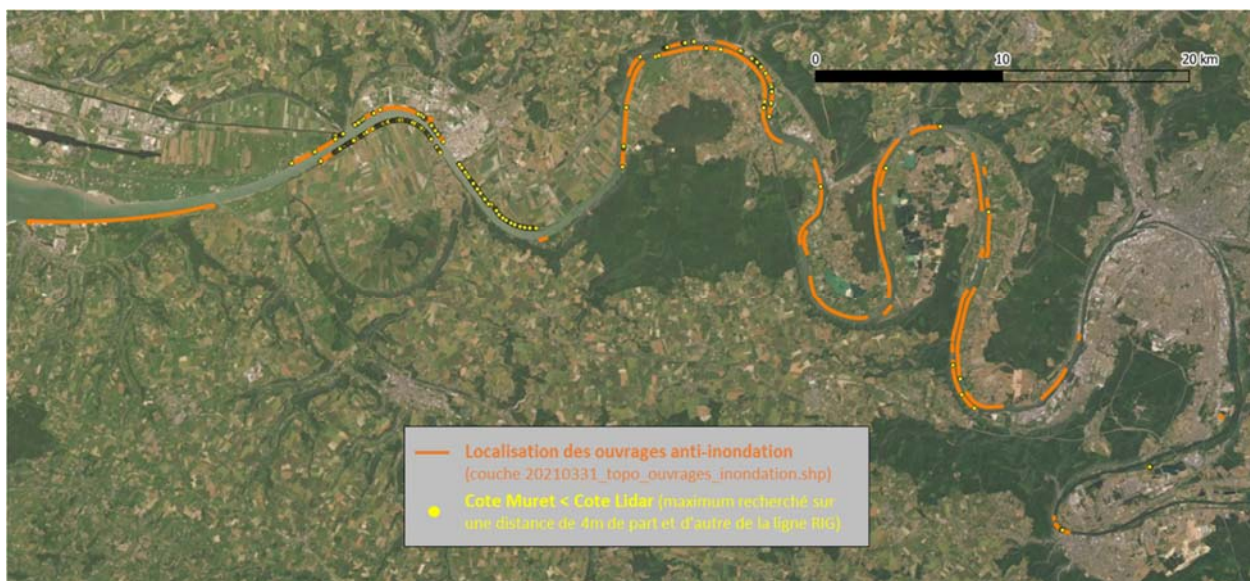


Figure 19- Localisation des secteurs où l'altimétrie extraite du LIDAR est supérieure à l'altimétrie des ouvrages anti-inondations

Plusieurs exemples reportés sur les figures ci-après illustrent les cas les plus représentatifs de cette problématique :

- Figure 20 et Figure 21 : le point haut détecté sur la donnée Lidar correspond à un élément de végétation ou à un élément ponctuel divers (parterre de fleurs, amas de terre localisé, etc.) situé à proximité immédiate du muret anti-inondations ;
- Figure 22 et Figure 23 : le muret anti-inondations est implanté à proximité d'une remontée progressive du terrain naturel ou d'un remblai de hauteur significative. Aux échelles d'intérêt pour la présente étude, le rôle du muret sur les inondations peut être considéré comme minime comparativement au remblai qui conditionne la submersion pour des niveaux d'eau importants dans la Seine.

Sur la base de ces exemples et des discussions avec le GIP Seine-Aval, il a été convenu de privilégier la donnée relative aux ouvrages anti-inondations (couche SIG « 20210331_topo_ouvrages_inondations.shp ») pour renseigner l'altimétrie de la liaison RIG sur l'ensemble des secteurs où cette problématique apparaît. Cette approche est conditionnée par la représentation au sein du maillage (lit majeur) de la crête des principaux remblais situés en arrière des berges mais non intégrés dans la liaison RIG (comme sur la Figure 23).

En conséquence, l'altimétrie de la liaison RIG avec murets (configuration actuelle de l'estuaire) et celle de la liaison RIG sans muret est identique pour les secteurs localisés sur la Figure 19.

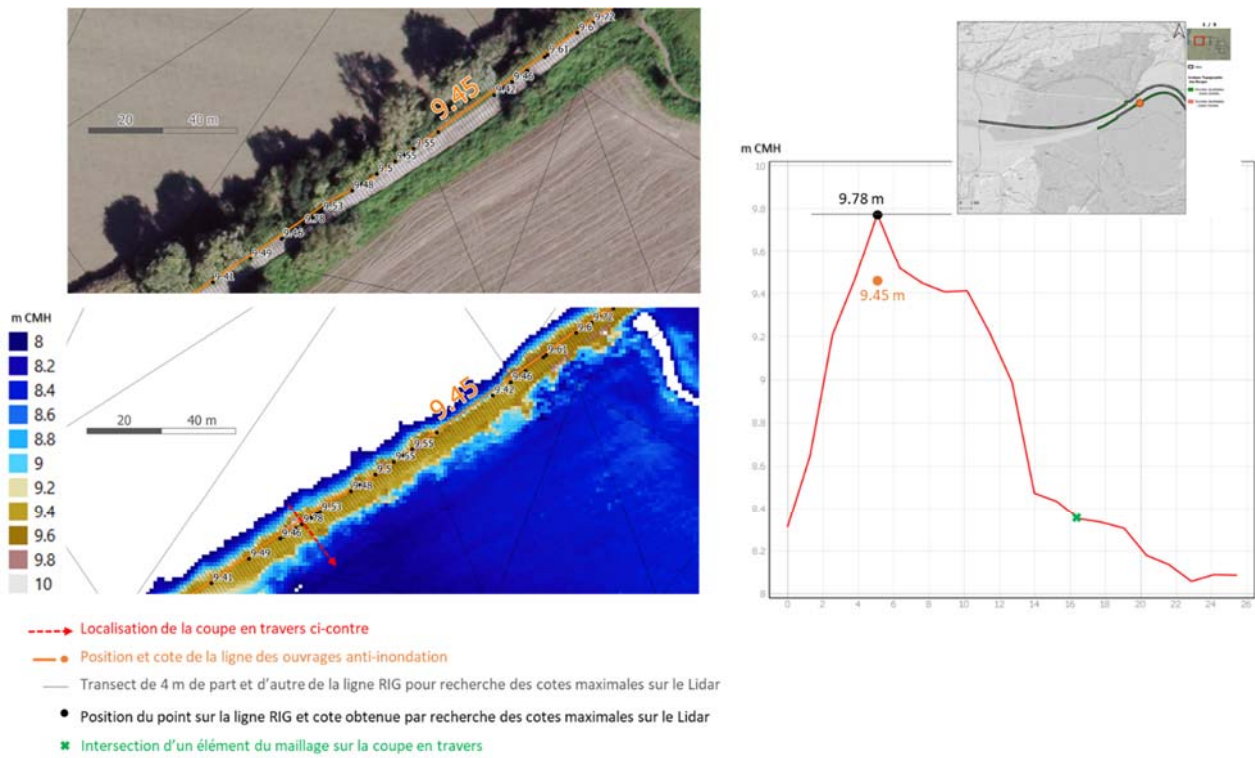


Figure 20- Cas particulier dans l'élaboration des configurations RIG avec et sans murets – Exemple sur le secteur de Marais-Vernier

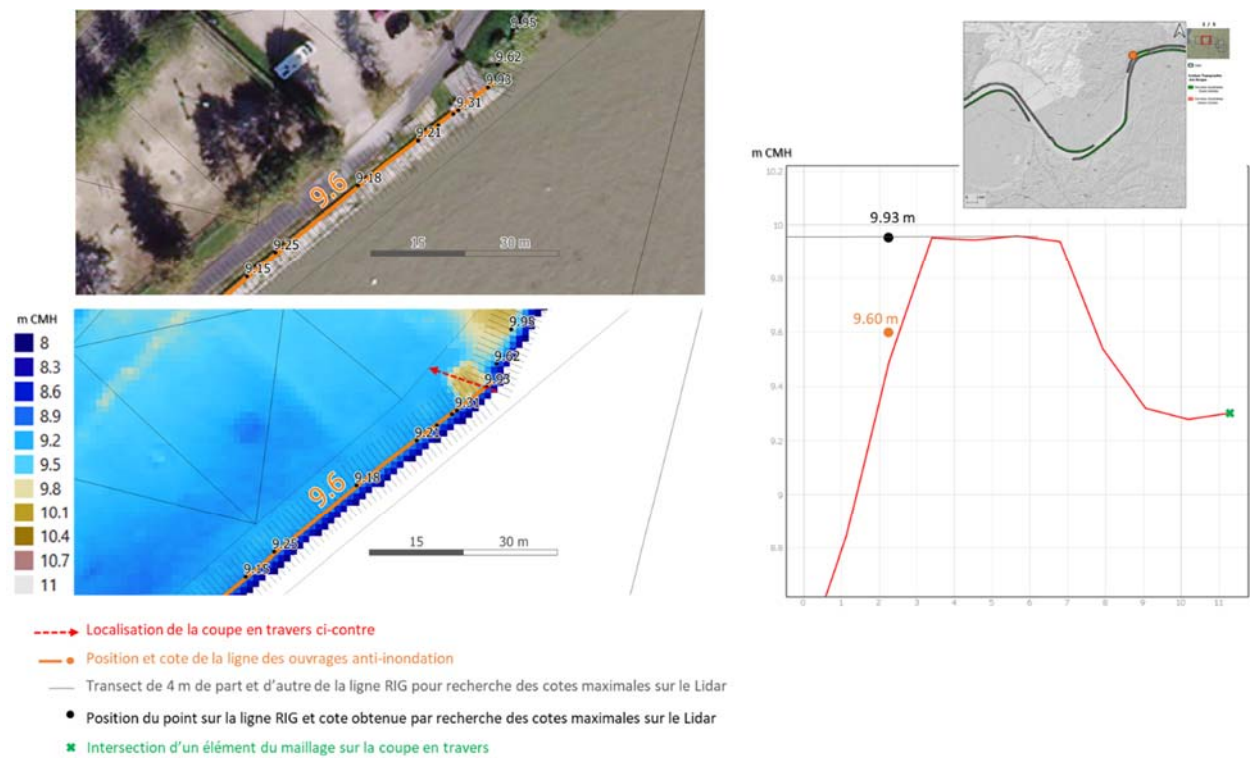


Figure 21- Cas particulier dans l'élaboration des configurations RIG avec et sans murets – Exemple sur le secteur de Rives-en-Seine

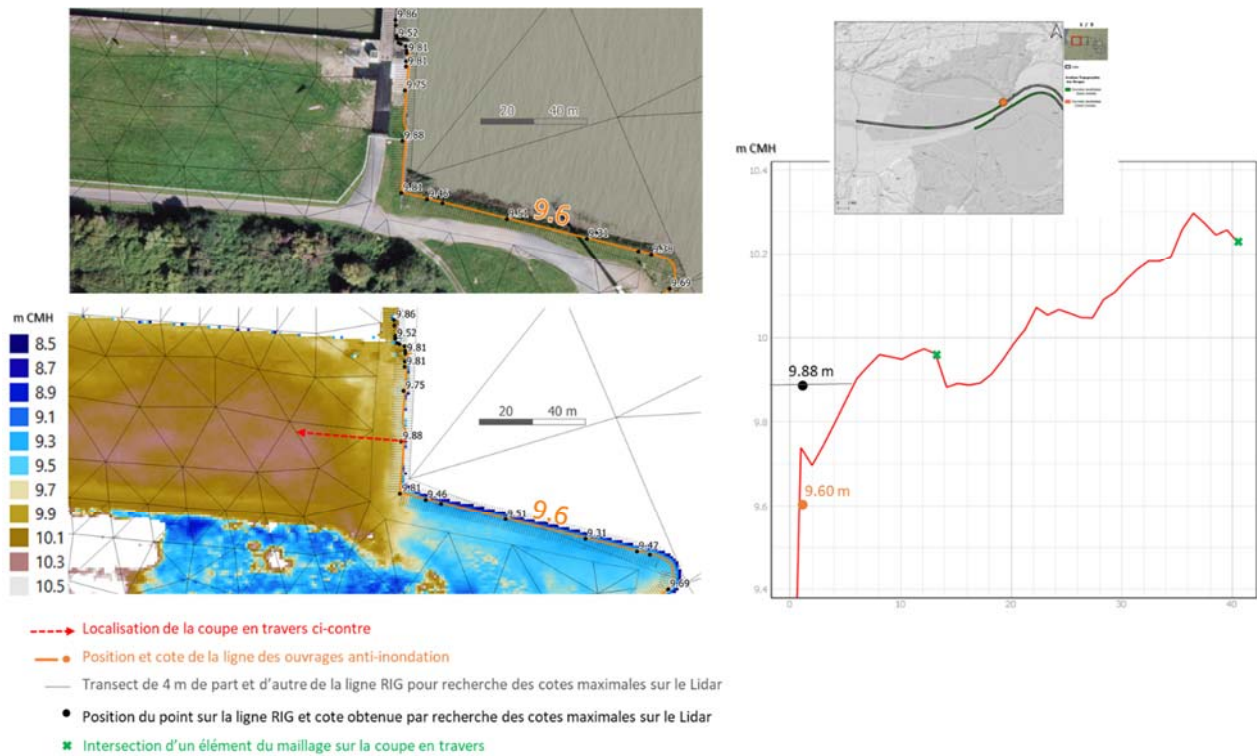


Figure 22- Cas particulier dans l'élaboration des configurations RIG avec et sans murets – Exemple sur le secteur de Tancaerville

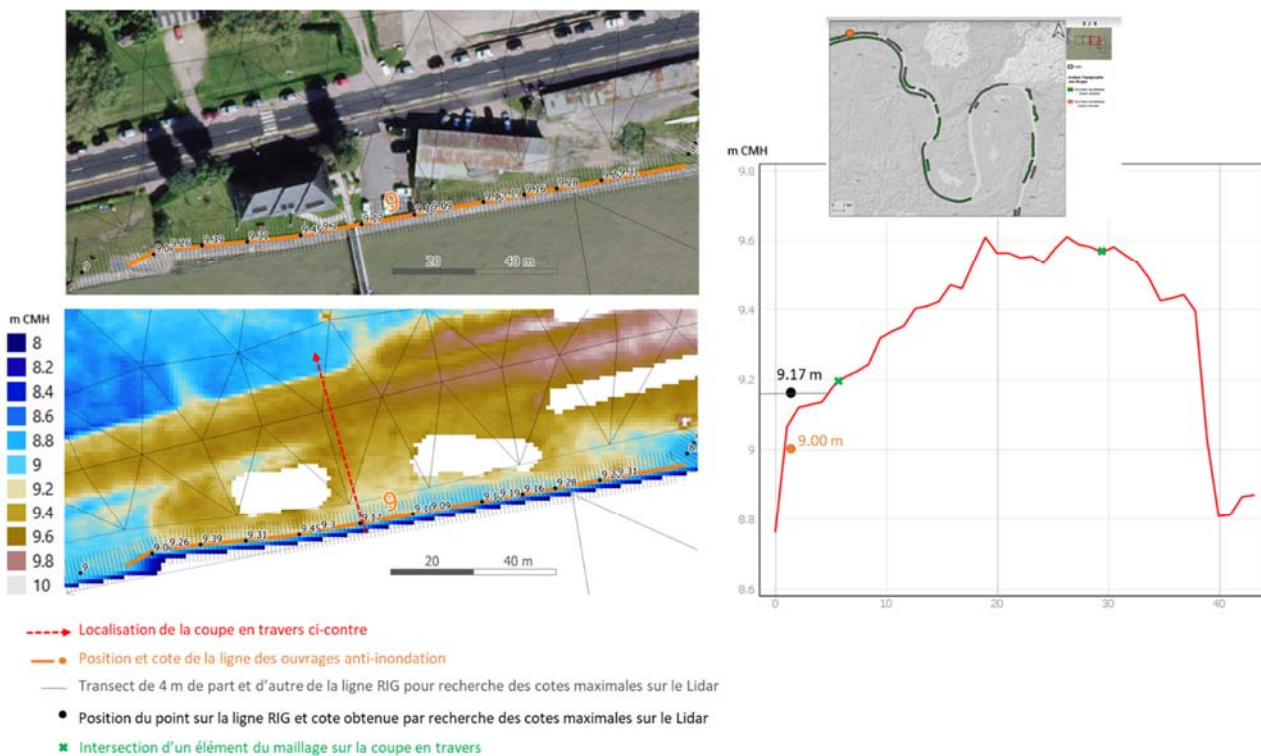


Figure 23- Cas particulier dans l'élaboration des configurations RIG avec et sans murets – Exemple sur le secteur de Caudebec

4. ELABORATION DU MAILLAGE DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE

4.1. MAILLAGE EN LIT MINEUR ET EN BAIE DE SEINE

Comme mentionné précédemment au chapitre B.2.1, la structure du maillage développé pour l'étude de 2013 a été conservée dans sa globalité pour le lit mineur de la Seine et seules les nouvelles données bathymétriques ont été projetées sur le maillage existant.

La méthodologie spécifique mise en place en 2013 est décrite de façon détaillée dans le rapport d'objectif C de l'étude précédente menée en 2013 (référence [5]).

Pour rappel, cette méthodologie consistait en une simplification des profils en travers de la Seine de manière à optimiser le nombre de nœuds au sein du modèle et ainsi respecter des temps de calcul raisonnables tout en conservant une bonne représentation des sections hydrauliques réelles. Un travail manuel de schématisation des sections du lit mineur à l'aide d'un nombre fixe de nœuds placés à intervalles réguliers avait été réalisé tous les 125 mètres, ce qui représente un total d'environ 1 400 sections en travers sur l'ensemble du lit mineur entre Saint-Pierre-de-Vauvray et Berville-sur-Mer.

Afin de respecter les pentes limites autorisées par le logiciel TELEMAC-2D tout en conservant une bonne représentation de la section hydraulique, les nœuds ne sont pas toujours placés exactement au niveau des singularités des profils que ce soit en termes d'altimétrie ou d'espacement. La position des limites des berges en lit mineur peut ainsi être décalée de quelques mètres au sein du modèle, ou l'altimétrie des points bas du lit peut être légèrement sous ou surestimée. La jonction lit mineur / lit majeur est quant à elle traitée de façon spécifique par le module RIG décrit précédemment (chapitre B.3). La cote des points hauts de la jonction (haut de berge) n'est donc pas représentée dans les sections du lit mineur.

Selon la largeur du lit au droit de la section concernée, le nombre de points définissant chaque section varie le long de l'estuaire entre 5 et 8 de manière à ce que deux points soient espacés transversalement d'une distance comprise entre 35 et 150 mètres. A titre d'exemple du travail mené en 2013, la Figure 24 montre une section simplifiée en 8 points au voisinage de Tancarville.

Une fois l'ensemble des profils schématisés, chaque point de chaque section est alors relié à son point correspondant sur le profil précédent et le profil suivant. Des lignes longitudinales sont ainsi construites dans le sens de l'écoulement. Le maillage s'appuie sur ces lignes appelées lignes de contraintes.

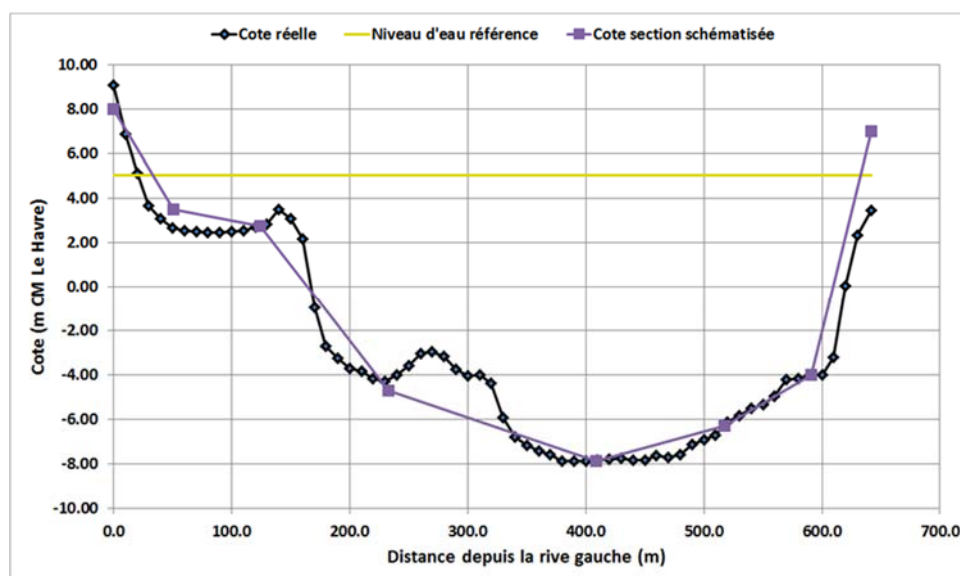


Figure 24- Exemple de traitement de profil en travers de la Seine (extrait de l'étude 2013)

Le maillage du lit mineur a été repris localement côté berges en fonction de l'emplacement de la digue RIG.

A l'embouchure de la Seine, la taille des mailles varie entre 50 m à proximité des digues submersibles et dans le chenal de la Seine, jusqu'à une centaine de mètres (notamment pour les fosses Nord et Sud).

A partir de l'extrémité Ouest de la digue basse Nord, la taille des mailles est progressivement augmentée pour atteindre 2 à 3 km en baie de Seine et jusqu'à 5 km à la frontière maritime du modèle.

Les modifications du maillage en lit mineur par rapport à l'ancien modèle consistent en :

- La prise en compte de l'intégralité de la baie de Seine ;
- Le raffinement du maillage dans le chenal de la Seine et à proximité des digues submersibles ;
- L'intégration des digues submersibles à l'embouchure de l'estuaire. Ces digues (digue basse Nord, digue du Ratier et épi en fosse Nord) sont maintenant intégrées directement au maillage du lit mineur de la Seine, alors que dans le modèle 2013 leur fonctionnement était externalisé via l'utilisation de la méthode « RIG ». Or, notre REX suite à l'étude de 2013 et à nos autres interventions sur la zone a montré que les débordements pouvaient avoir lieu perpendiculairement au lit mineur mais aussi longitudinalement par propagation de la marée. Ce type de débordement est ainsi mieux représenté par intégration des digues submersibles dans le maillage.

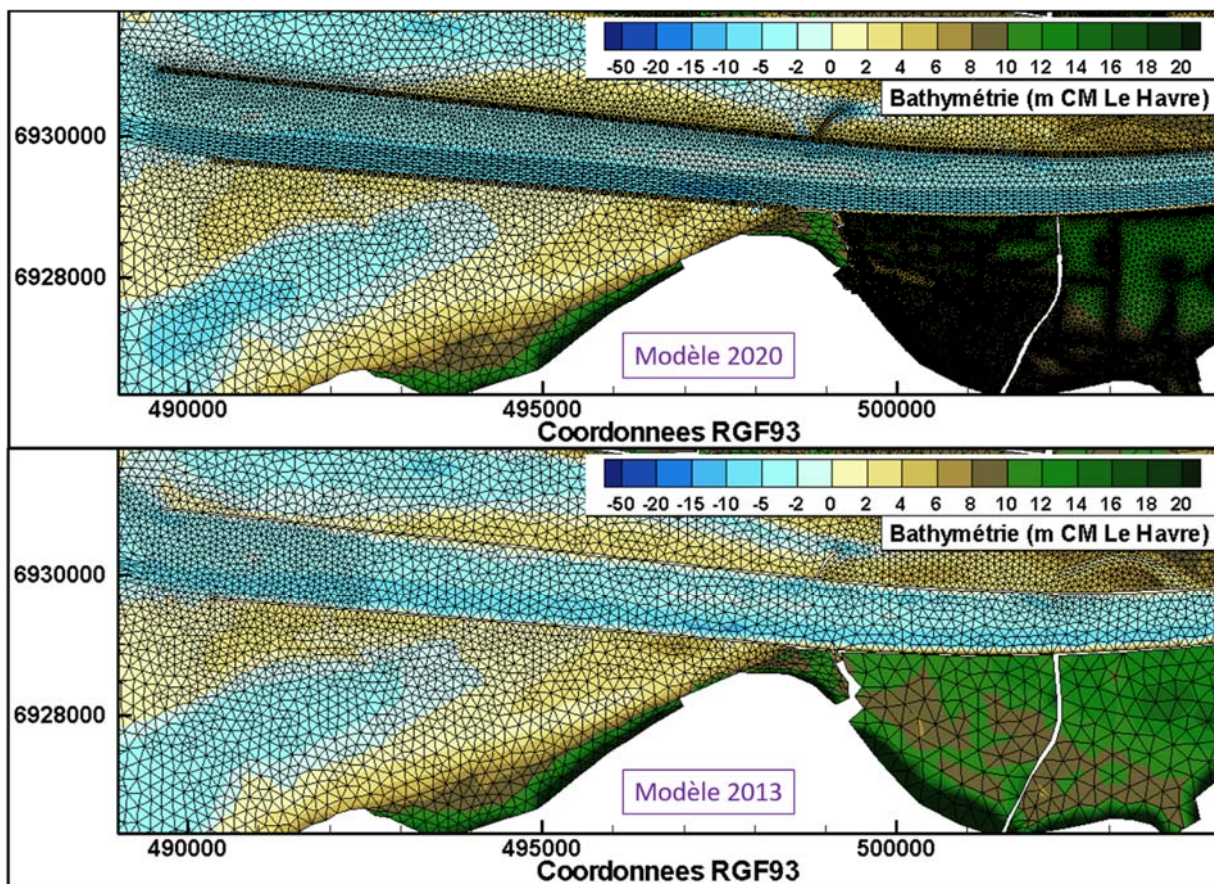


Figure 25- Mise à jour du maillage existant à l'embouchure de la Seine

4.2. MAILLAGE EN LIT MAJEUR

4.2.1. Prise en compte des éléments structurants en lit majeur

Préalablement à l'étape de construction du maillage à proprement dit, un travail d'analyse a été réalisé sur l'ensemble de l'estuaire afin d'identifier les ouvrages structurant de façon significative les écoulements dans l'emprise des sous-modèles en lit majeur. Ces éléments structurants situés à l'arrière des digues sont du type infrastructures routières ou ferroviaires, remblais ou talus, fossés ou cours d'eau, plateformes industrielles, etc. Ils sont pris en compte directement dans le maillage sous forme de lignes de contrainte (sur laquelle le maillage s'appuie obligatoirement) et/ou par le biais de tailles de mailles spécifiques.

Ces éléments ont été sélectionnés en cohérence avec les données topographiques disponibles. Les critères de sélection des éléments structurants en lit majeur sont décrits ci-dessous :

- Seuls les éléments inclus dans l'enveloppe des zones inondables pour un événement hydro-météorologique de période de retour millénale (cotes atteintes projetées + 1 mètre, source : GIPSA) ont été analysés ;
- Les ruptures de pente naturelles ou artificielles dans la topographie en lit majeur (ruptures de pente supérieures à 10%) sont retenues et sont représentées via des lignes de contraintes, notamment en pied de coteau afin de modéliser correctement l'emprise des inondations ;
- Les singularités topographiques en remblais (respectivement en fossés) présentant à la fois une hauteur de plus de 20 cm par rapport au terrain naturel et une largeur supérieure à 5 mètres en crête (respectivement en pied de thalweg) sont retenues pour être intégrées au maillage ;
- Les cours d'eau affluents de largeur significative (supérieure à 5 mètres en pied de thalweg), listés ci-après depuis l'amont vers l'aval, sont intégrés dans le maillage : l'Andelle, l'Eure, l'Austreberthe, la Rançon, la Sainte-Gertrude, le Commerce, la Risle, la Morelle. Le lit mineur de ces affluents n'est pas modélisé dans son intégralité par absence de données bathymétriques. Néanmoins une attention particulière a été portée lors de la réalisation du maillage à la jonction avec le lit mineur de la Seine afin de bien représenter les éventuels phénomènes de ressuyage du lit majeur de la Seine ;
- Les contours des principaux étangs en lit majeur (de superficie supérieure à 3 ha) sont intégrés dans le maillage ;
- Le réseau des principaux axes de circulation est représenté avec des lignes de contrainte pour structurer le maillage (exemple en zone urbaine sur la Figure 27).

Les figures reportées en Annexe 2 permettent de visualiser l'ensemble des éléments structurants considérés dans la construction du maillage. De plus, à titre illustratif, des exemples sont présentés ci-après à une échelle plus fine. Ils sont complétés par de nombreux autres exemples présentés en Annexe 3 sur plusieurs zones de l'estuaire. Ces exemples permettent de visualiser la cohérence des lignes de contraintes sélectionnées (tracées en trait rose) vis-vis des singularités topographiques.

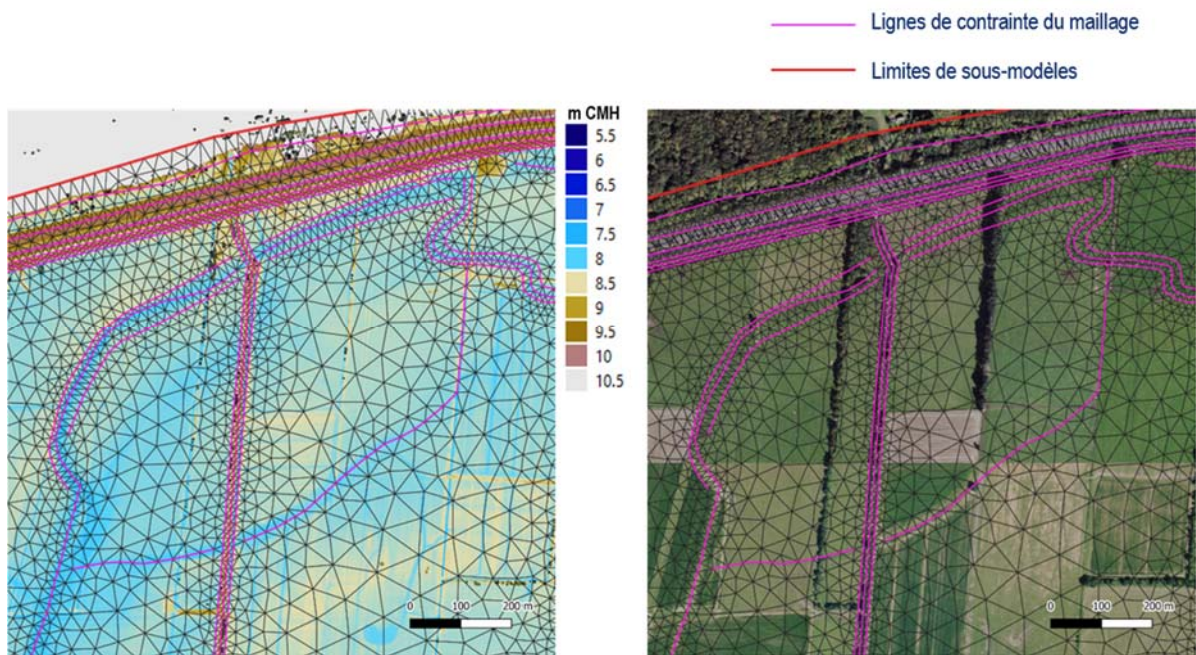


Figure 26- Exemple de prise en compte d'éléments structurants – Secteur de Cerlangue (aval de Tancarville)

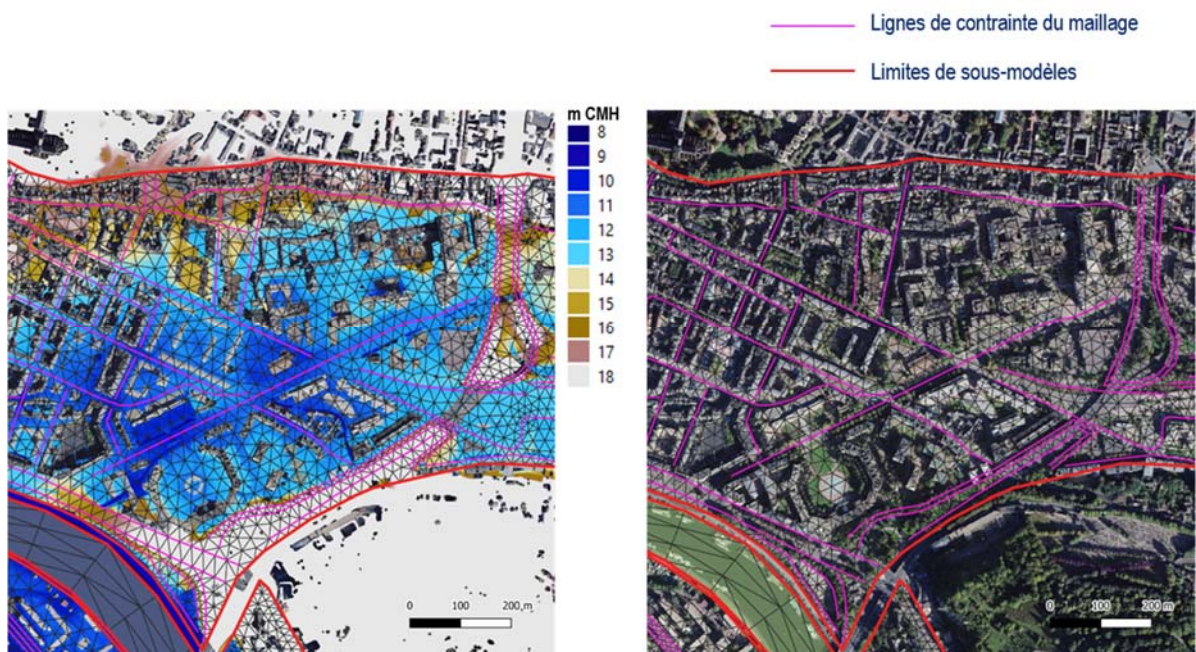


Figure 27- Exemple de prise en compte d'éléments structurants – Principaux axes de circulation en zone urbaine (Rouen)

Il a été considéré :

- Pour les routes principales (autoroute, routes nationales) : 4 lignes de contraintes (2 lignes hautes et 2 lignes basses) ;
- Pour les routes départementales ou secondaires : 3 lignes (1 ligne haute + 2 lignes basses) ;
- Pour les ruisseaux et rivières : au minimum 3 lignes décrivant les berges et l'axe d'écoulement.

Pour aider à la compréhension, une couche SIG est également fournie en complément de la présente note : la couche « *Elmts_Structurants_20200327_GIPSA.shp* » contient les éléments structurants considérés initialement dans la construction du maillage. Comme explicité dans le chapitre B.3, la taille des mailles dans chaque zone est adaptée en fonction de ces éléments de contrainte et en fonction des enjeux socio-économiques (zones urbaines, industrielles, etc.). Cette couche a été revue et complétée suite aux remarques du COPIL : la couche

« *Elmts_Structurants_202011_GIPSA.shp* » fournie est la version finale de la couche et intègre tous les éléments pris en compte dans le maillage.

Il est important de préciser que la prise en compte de la totalité des singularités topographiques de hauteur d'au moins 20 cm par rapport au terrain naturel (comme spécifié au CCTP), sur l'ensemble de l'estuaire et sans considération ni de leur niveau d'influence sur les écoulements ni de la présence d'enjeux, ne permettrait pas de générer un maillage exploitable avec des temps de calculs raisonnables.

La nécessité de préserver l'opérationnalité du modèle en limitant le degré de raffinement du maillage conduit donc inévitablement à assouplir certains critères de sélection des singularités en lit majeur.

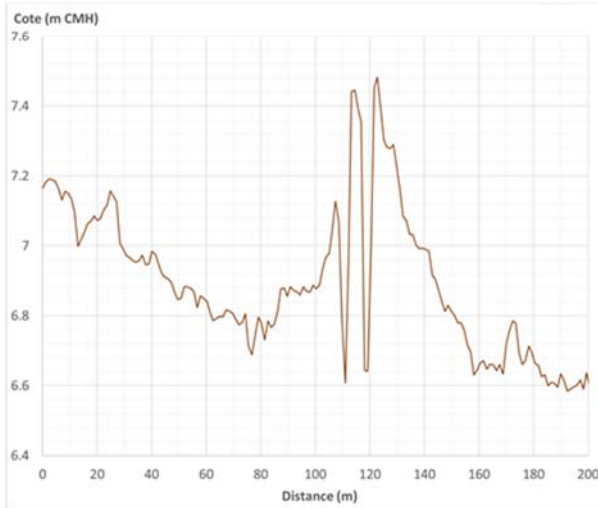
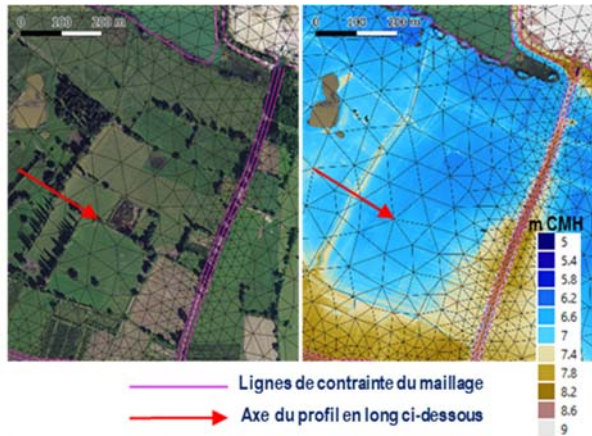
En particulier, la prise en compte d'ouvrages en remblais ou de drains secondaires de largeur inférieure à 5 m nécessiterait de former de trop petites mailles (le long de ces éléments singuliers mais aussi dans les zones de transition vers un maillage plus lâche), ce qui dégraderait fortement l'opérationnalité du modèle élaboré à l'échelle globale de l'estuaire. Celui-ci n'a pas vocation à se substituer à des modèles de détails qui pourront être développés ultérieurement pour des études à l'échelle locale.

C'est également le cas pour des ouvrages de protection locaux et/ou discontinus qui n'influent pas ou peu sur la structure globale des inondations en lit majeur.

Les figures ci-après illustrent des configurations type pour lesquelles les dimensions réduites des singularités topographiques ne permettent pas leur représentation explicite au sein du maillage. Il s'agit par exemple de talus et fossés étroits en bordure de parcelles agricoles dans une zone peu urbanisée (Figure 28 – gauche, en amont de Jumièges), ou encore de talus étroits entourant les cuves de raffinerie (Figure 28 – droite, sur le site de Port-Jérôme-sur-Seine). Les coupes en travers reportées ci-dessous sont extraites du modèle numérique de terrain de résolution 1 m.

Talus et fossés en bordure de parcelles agricoles

Exemple en amont de Jumièges en rive droite



Talus autour des cuves de raffinerie

Exemple pour le site de Port-Jérôme-sur-Seine

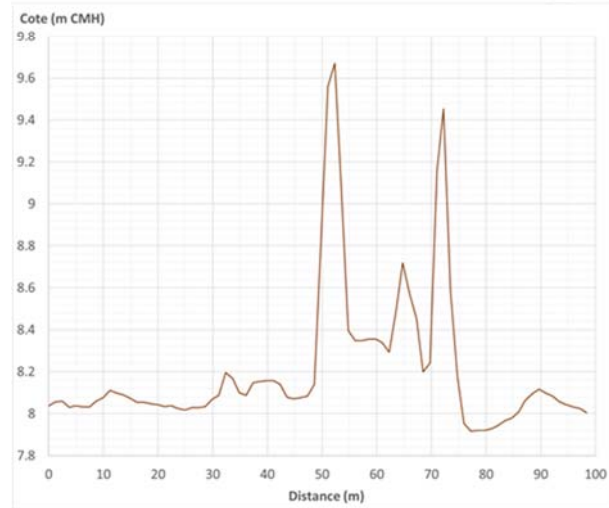
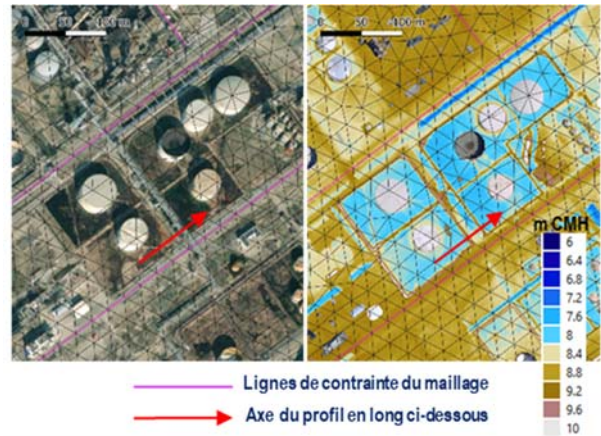


Figure 28- Illustration d'éléments topographiques exclus de la sélection des éléments structurants en lit majeur

Une autre d'hypothèse simplificatrice nécessaire à l'élaboration d'un maillage opérationnel concerne la représentation des ruptures de pente marquées dans la topographie. La Figure 29 montre un exemple type pour lequel la position des lignes de contrainte du maillage est décalée de quelques mètres par rapport à la position exacte du changement de pente.

La modélisation des écoulements dans les zones à trop fortes pentes (supérieures à 10%) peut conduire à des instabilités numériques avec le logiciel de calcul TELEMAC-2D ce qui impose de simplifier la représentation des ruptures de pente via l'utilisation de lignes de contraintes. Notre retour d'expérience permet d'augmenter la pente limite modélisée jusqu'à 30% sans générer de phénomènes d'instabilités. Cette représentation simplifiée permet également de ne pas réduire excessivement la taille des mailles autour de ces singularités du relief, tout en reproduisant fidèlement l'altimétrie du terrain grâce à deux lignes de contrainte placées de part et d'autre de la rupture de pente.

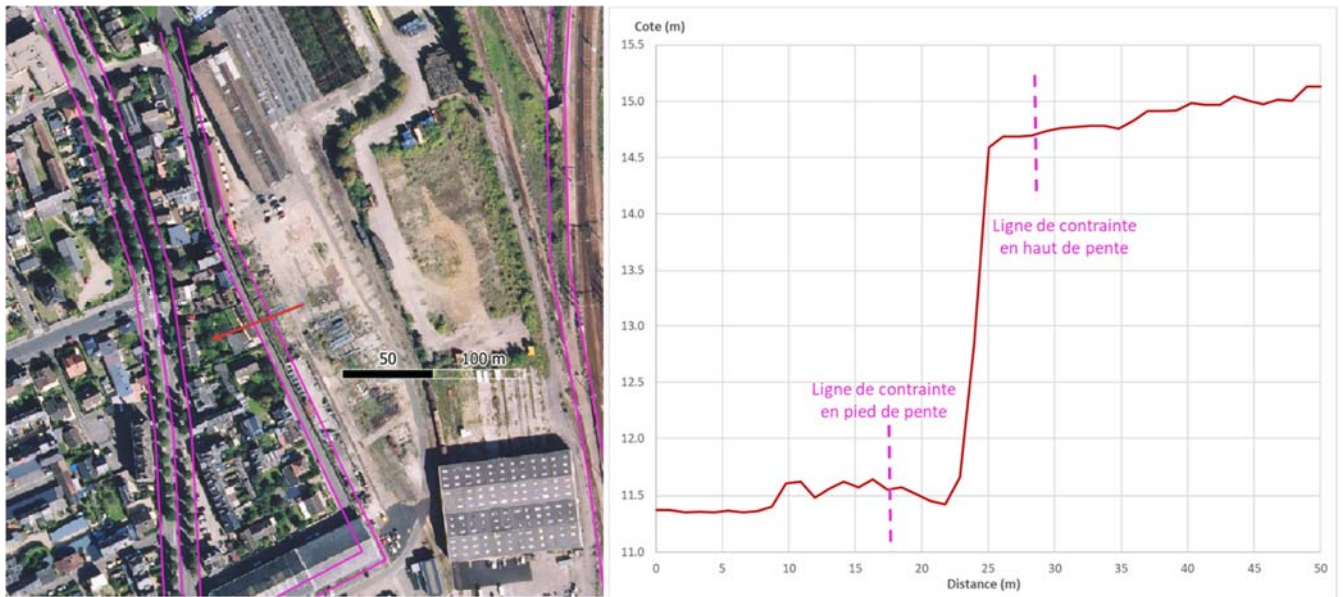


Figure 29- Exemple de simplification d'une rupture de pente forte au sein du modèle

4.2.2. Construction du maillage en lit majeur

Le lit majeur est découpé en 23 sous-modèles maillés indépendamment les uns des autres, auxquels il convient d'ajouter le modèle de la Risle qui est directement relié au maillage du lit mineur.

La méthodologie de maillage et les critères de taille de mailles décrits ci-après ont été appliqués à chacun des sous-modèles :

- Une taille de maille par défaut égale à 80 m est appliquée hors zones à enjeux (définies ci-après) ;
- Une taille de maille différente et adaptée en fonction des enjeux (zones urbaines, industrielles ou agricoles) identifiées sur la base de l'orthophotographie Haute Résolution de 2015 et des orthophotographies les plus récentes disponibles auprès du service d'ArcGis « World Ortho » ;
 Les zones à enjeux socio-économiques (zones urbaines, industrielles) sont densifiées avec un critère de 30 m. Ce critère est diminué à 20 m, voire localement 15 m dans les zones où le lit majeur est étroit car le relief est très proche du lit mineur, nécessitant un raffinement du maillage pour permettre aux écoulements de transiter.
 La taille de maille n'est pas réduite dans les zones agricoles à moindre enjeux, hormis à proximité des lignes de contrainte ajoutées pour représenter les éléments structurants ou les ruptures de pente dans la topographie.
- L'imposition de lignes de contraintes sur lesquelles le maillage s'appuie pour représenter le plus précisément possible les éléments structurants tels que définis dans le chapitre B.4.2.1. . Le critère imposé de taille de maille est de 30 m au maximum sur ces éléments structurants. Ce critère a été diminué jusqu'à 15 m lorsque les lignes de contraintes étaient très proches et pour éviter un allongement trop important des mailles.

Les maillages des différents sous-modèles en lit majeur sont présentés sur les figures en Annexe 2, qui montrent également l'ensemble des éléments structurants considérés dans la construction du maillage.

La topographie a été appliquée pour chaque sous-modèle par projection du MNT dont la construction est décrite au chapitre A.1.3.

4.3. MAILLAGE GLOBAL ASSEMBLE

Le maillage du lit mineur, de l'embouchure, de la Risle et de la baie de Seine, qui comprend environ 50 000 nœuds de calcul, est alors assemblé avec l'ensemble des 23 sous-maillages construits en lit majeur, afin de former un maillage global se composant de 681 111 nœuds de calcul (et de plus de 1 300 000 mailles triangulaires).

Le maillage global actualisé est fourni sous format SIG en complément des figures en Annexe 2 du rapport.

La Figure 30 et la Figure 31 présentent une vue générale de la topo-bathymétrie du modèle numérique et une vue zoomée sur l'estuaire de la Seine.

Tableau 1- Nombre de nœuds et surface des différents sous-modèles

Nom du sous-modèle	Surface m ²	Nombre de nœuds
Lit mineur + embouchure + baie de Seine + Risle		49983
SM_01_RD	57 896 051	51618
SM_02_RG	5 747 913	12558
SM_03_RG	10 086 477	15829
SM_04_RG	13 044 660	10623
SM_05_RG	40 102 191	19297
SM_06_RD	146 574 176	210480
SM_07_RG	31 132 600	35603
SM_08_RG	795 529	955
SM_09_RG	29 238 890	36998
SM_10_RG	5 619 582	12520
SM_11_RG	46 470 117	103109
SM_12_RG	7 468 293	17499
SM_13	200 516	480
SM_14_RD	2 400 175	8208
SM_15_RD	1 082 225	2785
SM_16_RD	14 787 576	28023
SM_17_RD	2 233 628	4957
SM_18_RD	1 718 110	5389
SM_19_RD	2 627 905	5821
SM_20_RD	6 100 000	15480
SM_21_RG	20 510 077	31501
SM_22_RG	406 963	399
SM_23_RG	941 979	996

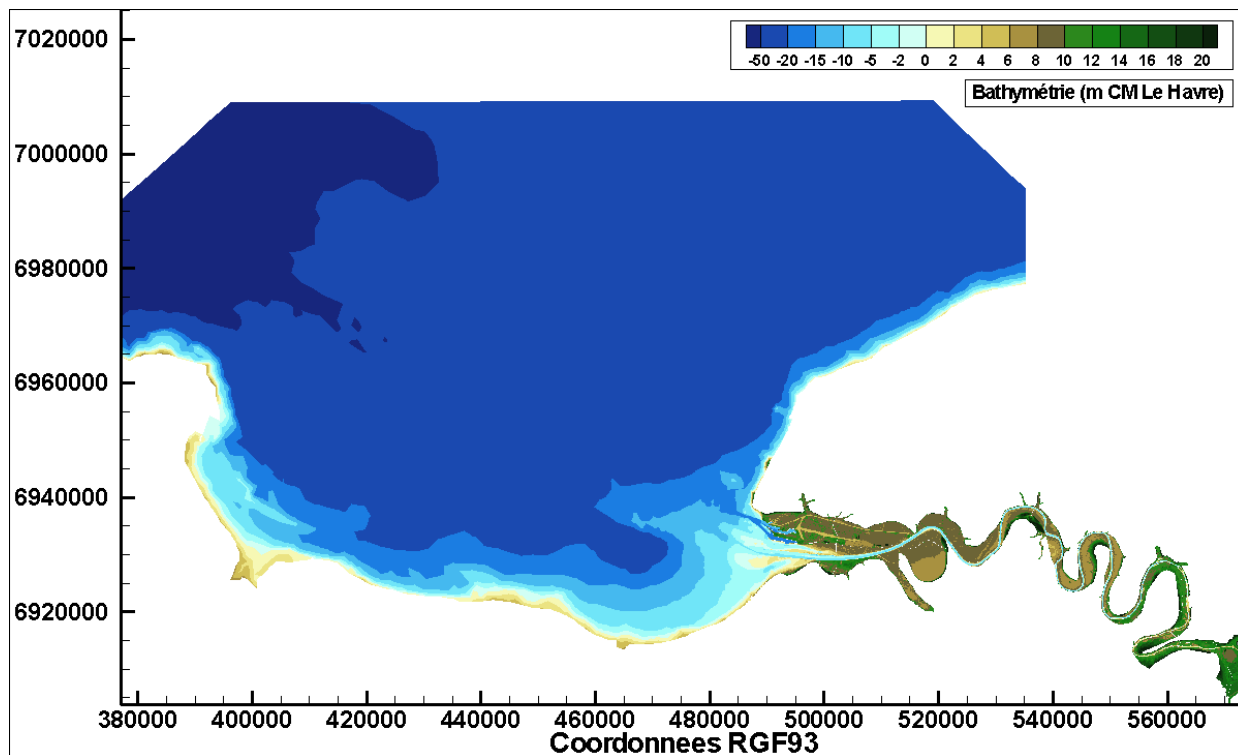


Figure 30- Altimétrie du modèle numérique actualisé (vue globale)

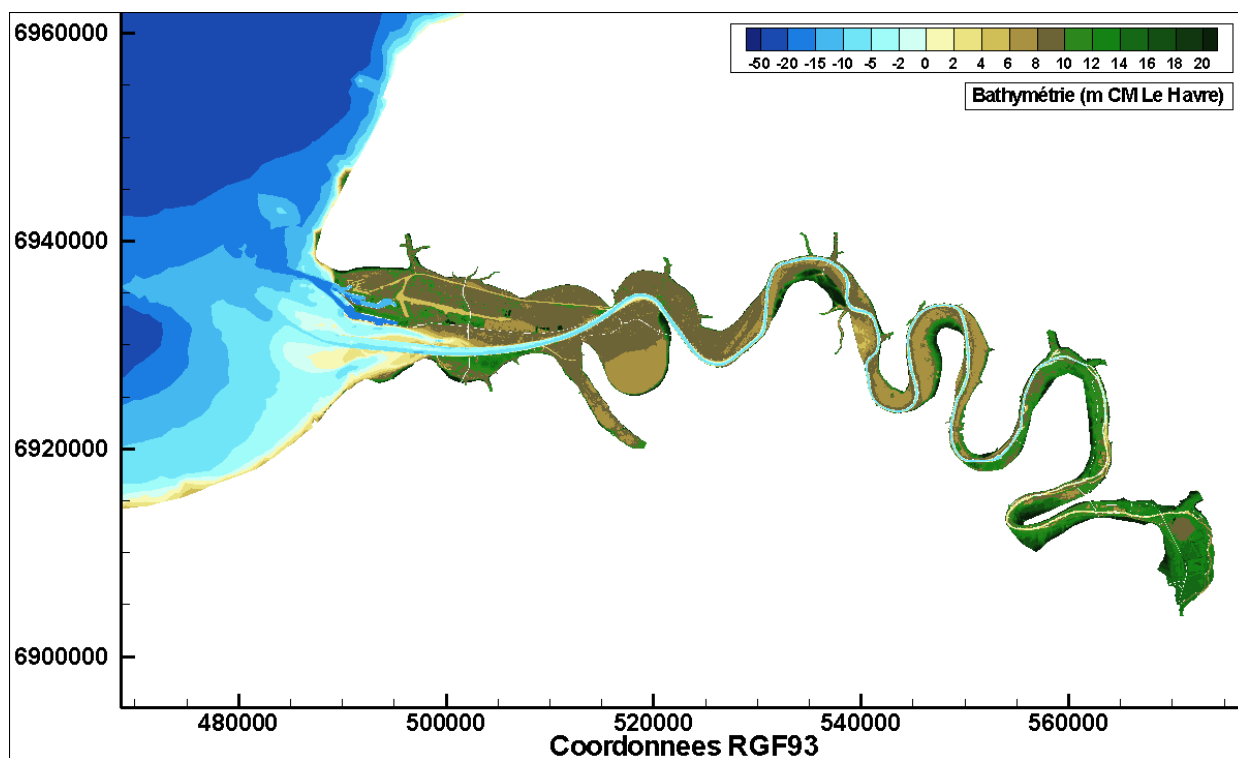


Figure 31- Altimétrie du modèle numérique actualisé (zoom sur l'estuaire de la Seine)

4.4. EVALUATION DE LA REPRESENTATIVITE TOPOGRAPHIQUE DU MODELE

A l'issue de cette phase d'élaboration du maillage dans le lit majeur sur l'ensemble de l'estuaire de la Seine, une analyse topographique a été menée dans le but de disposer d'indications quantitatives pour évaluer la conformité du maillage actualisé. Cette analyse topographique consiste à confronter :

- Le modèle numérique de terrain de résolution 1 m reconstitué à partir des différentes sources de données topographiques (MNT « *Cote Bathy_Topo_2020* », cf. Figure 1 au chapitre 1.3) ;
- Le modèle numérique de terrain généré à partir des nœuds du maillage, interpolé à la résolution 1 m en prenant soin de conserver l'information altimétrique le long des mailles (MNT « *Cote Modèle* »).

La confrontation de ces deux MNT est présentée en Annexe 5 sous forme de cartographies du différentiel altimétrique pour chacune des zones de l'estuaire.

Afin d'apporter des éléments quantitatifs sur la répartition des écarts altimétriques entre ces deux MNT, des histogrammes à l'échelle de chaque sous-modèle et à l'échelle globale du modèle ont également été réalisés. L'histogramme à l'échelle globale est reporté ci-après sur la Figure 32. Les histogrammes pour chaque sous-modèle sont proposés en fin de rapport sur la Figure 36. Ils sont élaborés avec la même échelle que l'histogramme global présenté sur la Figure 32 et sont disponibles en Annexe 5 en plus grand format.

Ces éléments d'analyse font apparaître que les écarts altimétriques sont inférieurs à +/-10 cm pour 63% de la superficie totale couverte par le modèle et sont inférieurs à +/-20 cm pour 80% des secteurs, avec toutefois des disparités selon la surface du sous-modèle considéré.

Comme illustré sur la Figure 33, les écarts apparaissent le long des arêtes des mailles et non à l'emplacement des nœuds du maillage, où l'altimétrie correspond strictement à celle du MNT source. Les différences altimétriques dépassant +/-20 cm concernent notamment :

- Les zones où le maillage est relativement grossier (80 m au maximum), c'est-à-dire dans les zones à faibles enjeux et/ou sans présence d'éléments structurants pour les écoulements (exemples sur la Figure 34 et en Annexe 5) ;
- Les zones où les ruptures de pentes dans le relief sont très prononcées, ce qui nécessite une simplification de la position des mailles pour éviter un raffinement excessif du maillage et pour assurer un bon fonctionnement du logiciel TELEMAT-2D qui se montre instable en cas de fortes pentes. Des explications supplémentaires sur ce point sont données au chapitre B.4.2.1. et sur la Figure 29. La localisation des points du maillage est légèrement décalée spatialement par rapport à la position exacte du changement de pente ce qui explique le différentiel altimétrique fréquemment supérieur à +/-20 cm le long de la pente. La mise en place de lignes de contrainte permet néanmoins de bien représenter les cotes des points hauts et/ou des points bas. Des exemples illustrant cette configuration sont donnés sur la Figure 35 et en Annexe 5.
- Dans une moindre mesure, les zones à forte densité de végétation ou de bâtiments, pour lesquelles le MNT établi par la technologie du levé LIDAR aéroporté peut comporter des imprécisions locales liées à la présence de points de mesure classés en « sursol » malgré le post-traitement réalisé après l'acquisition du LIDAR (référence [2]).

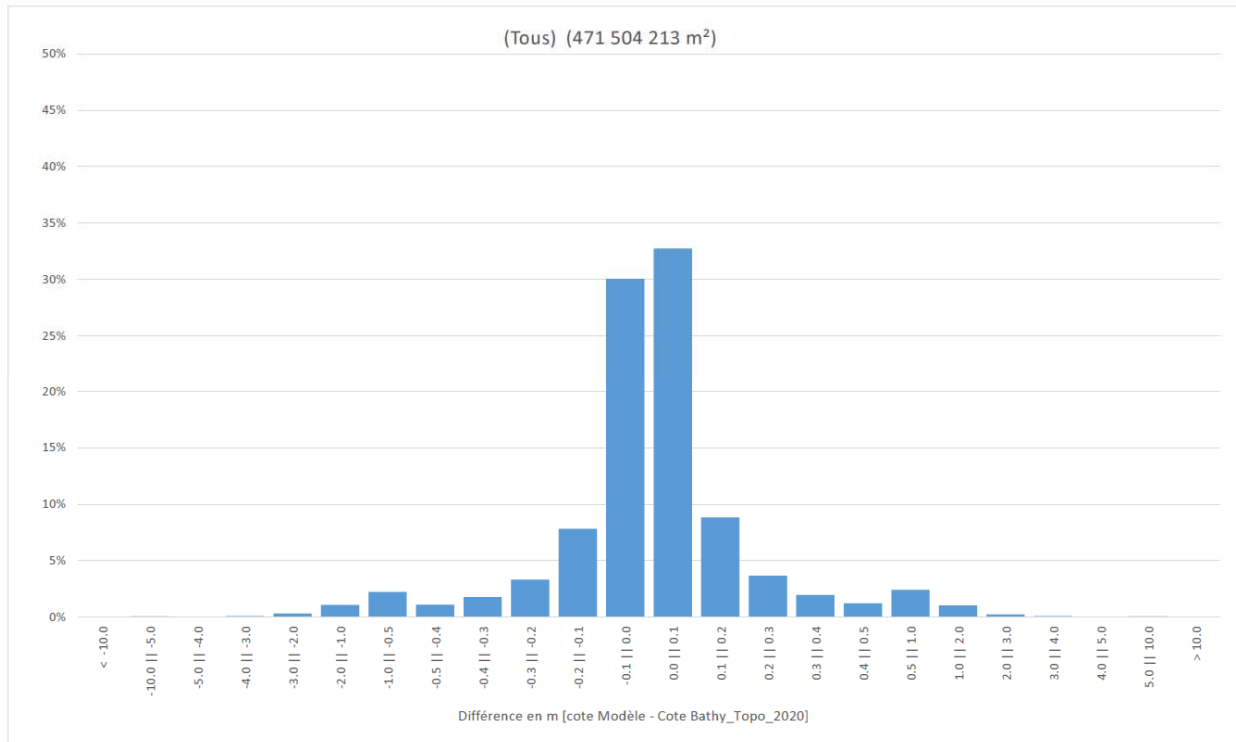


Figure 32- Histogramme des écarts altimétriques pour le maillage global du lit majeur

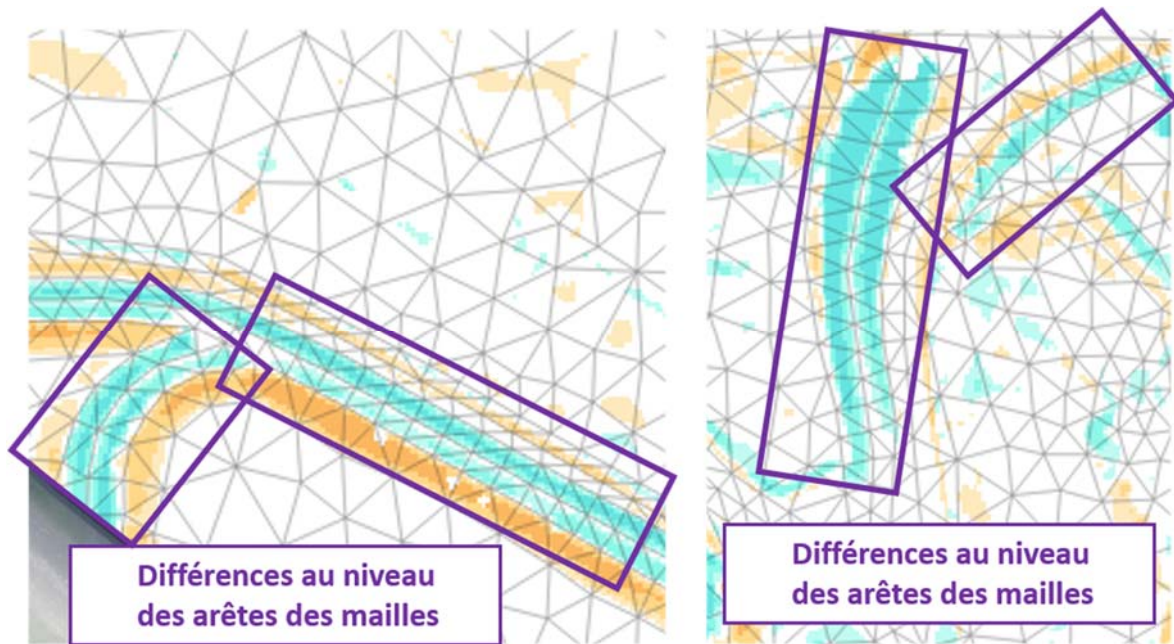


Figure 33- Exemple de différentiel altimétrique MNT/modèle

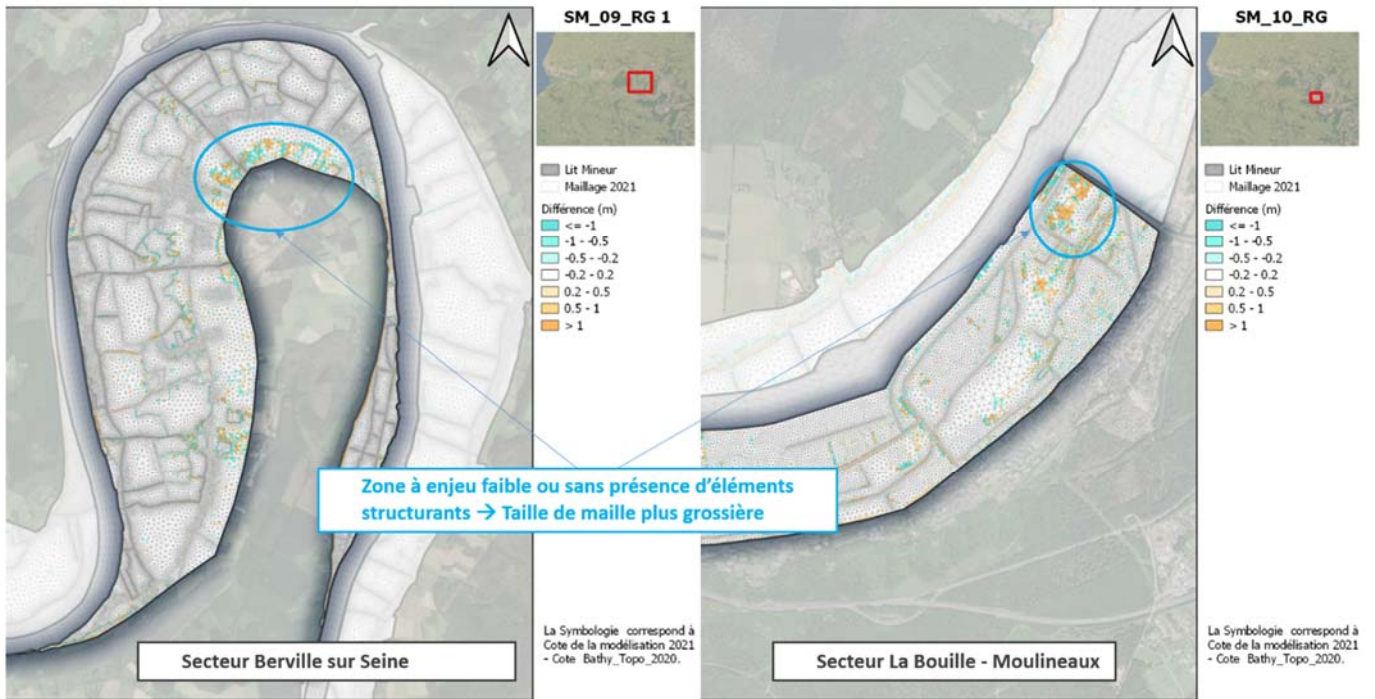


Figure 34- Exemple de différentiel altimétrique MNT/modèle – Maillage peu raffiné hors zones d'enjeu

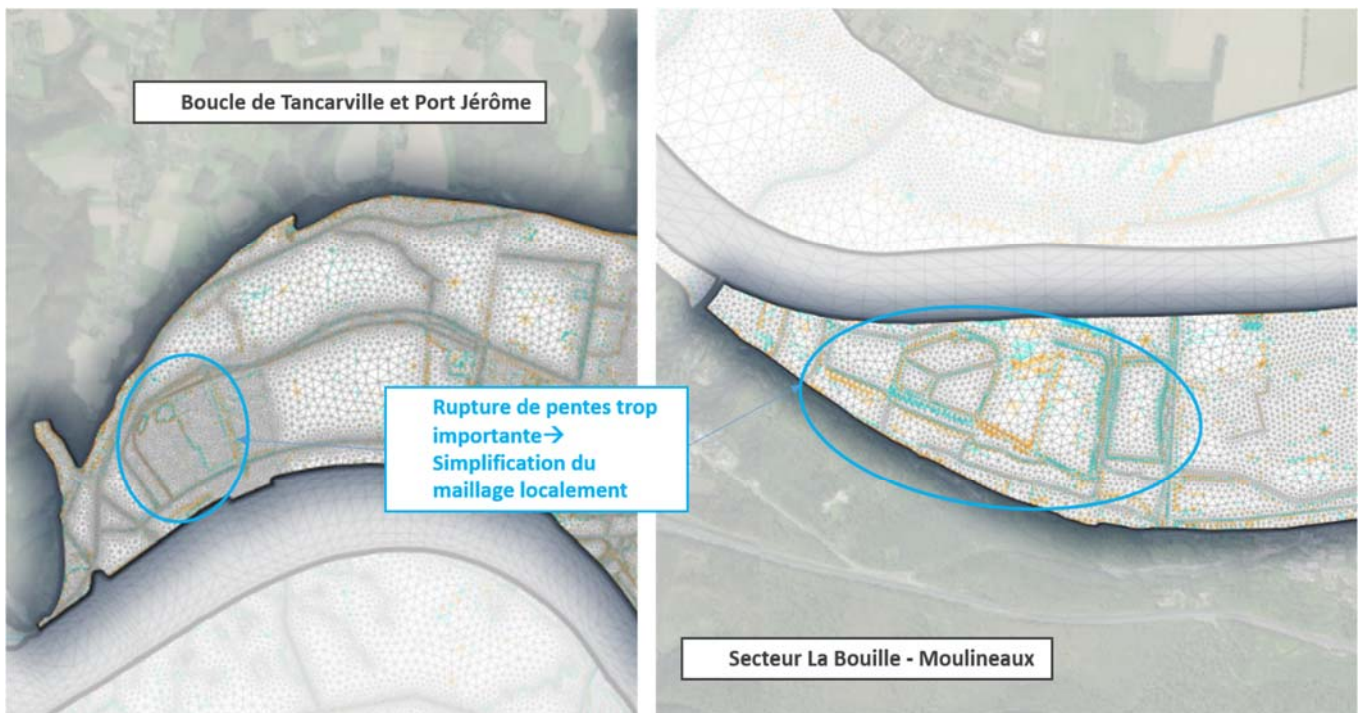
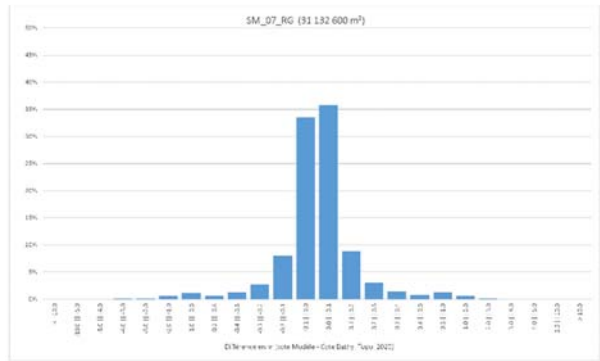
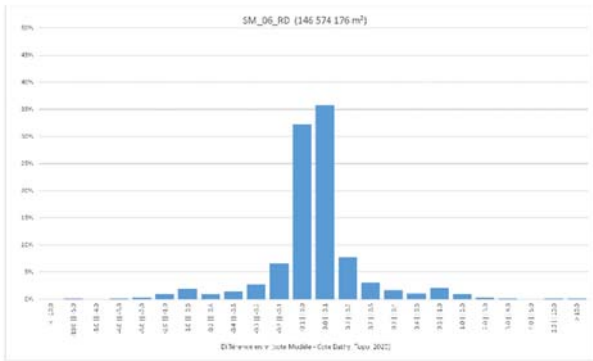
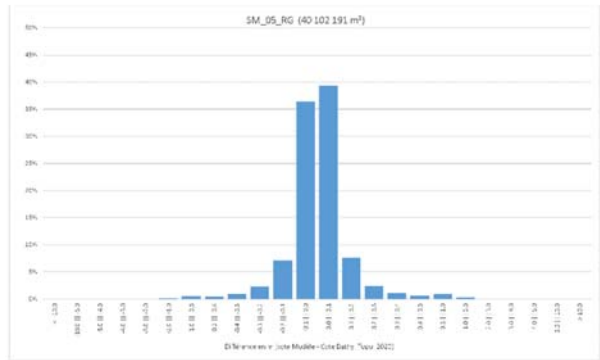
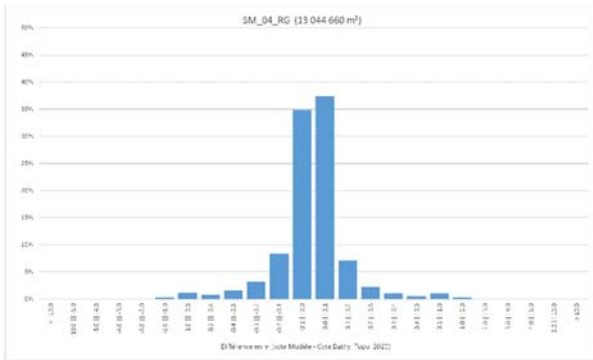
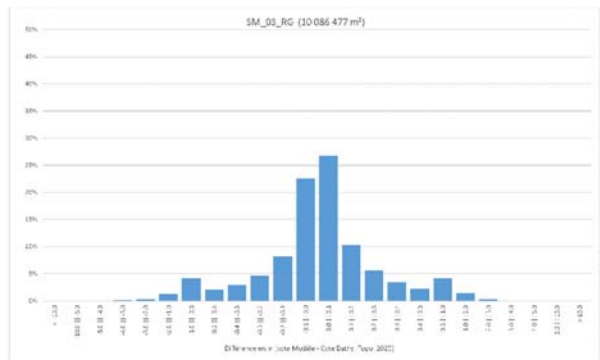
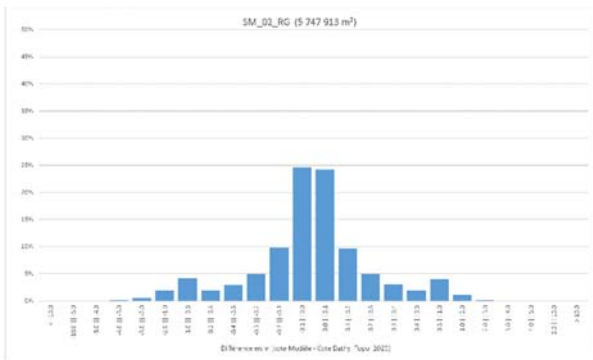
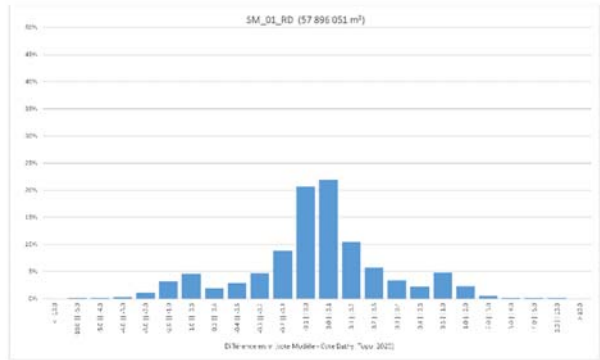
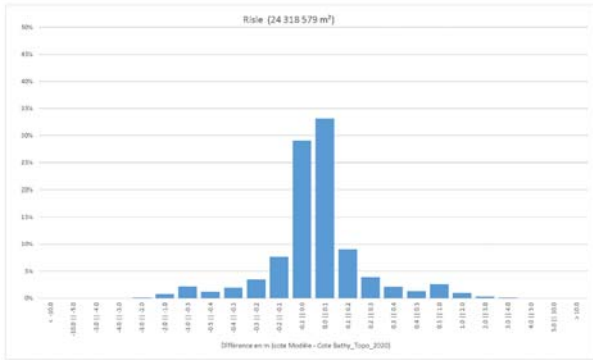
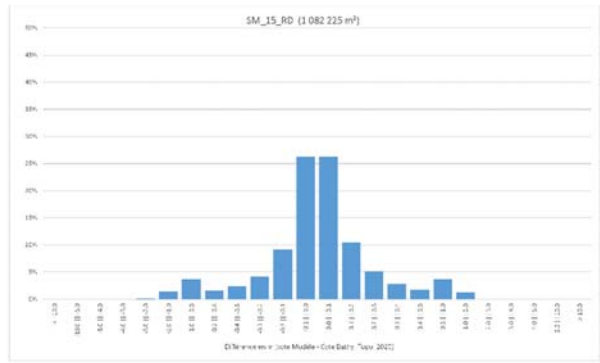
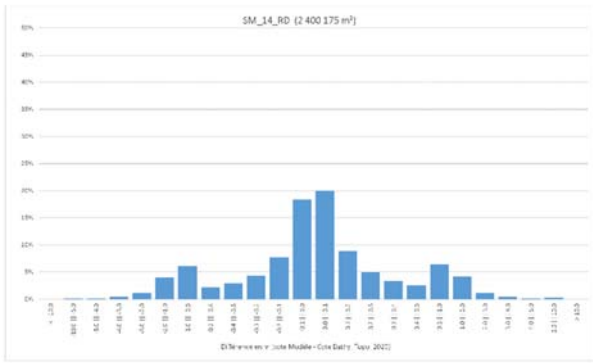
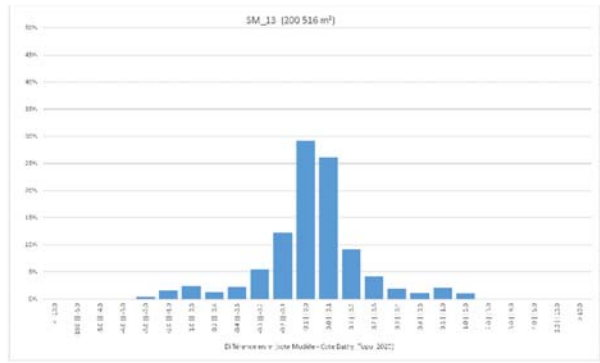
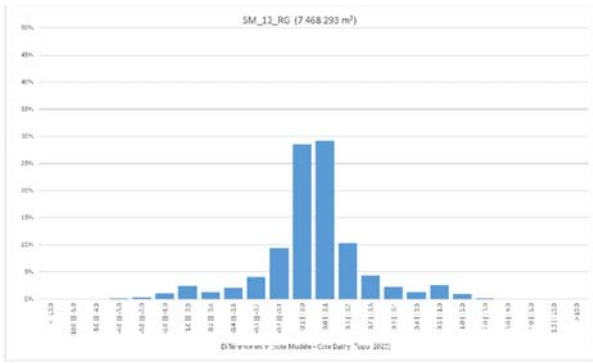
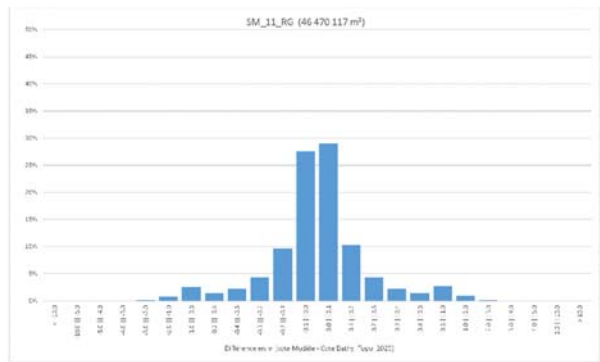
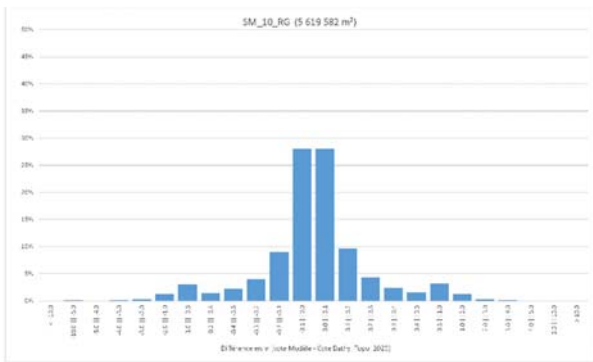
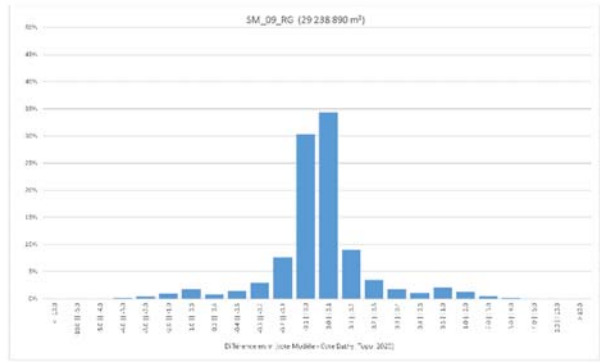
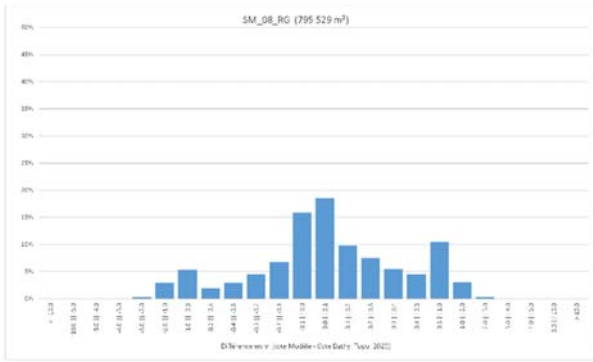


Figure 35- Exemple de différentiel altimétrique MNT/modèle – Rupture de pente importante et simplifiée au sein du modèle





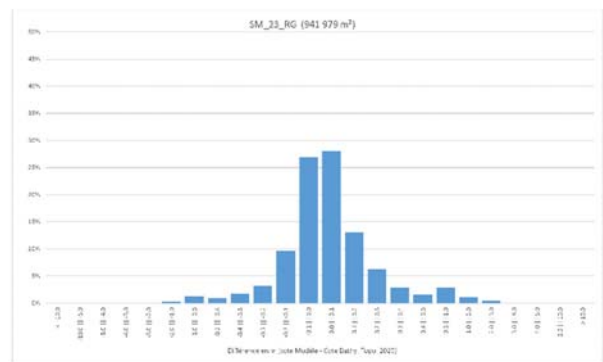
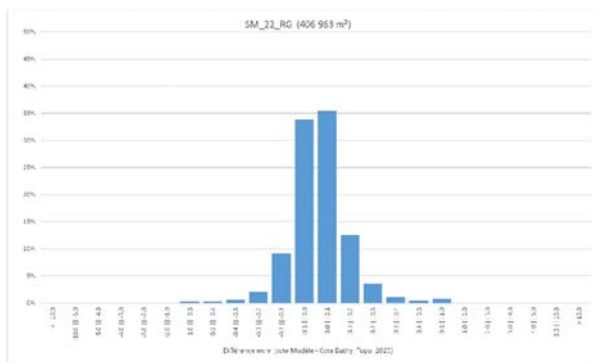
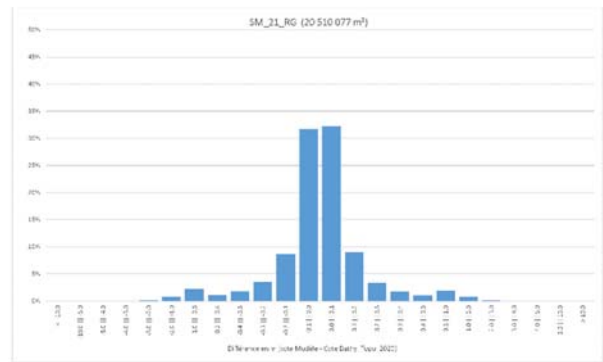
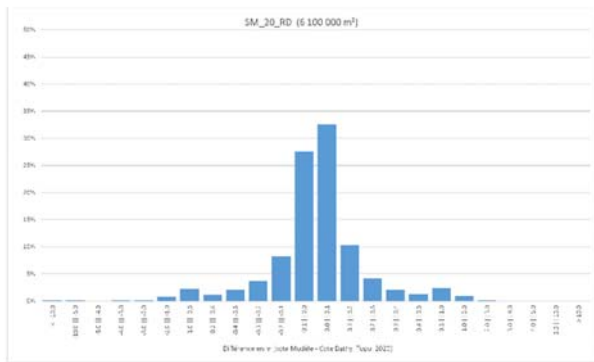
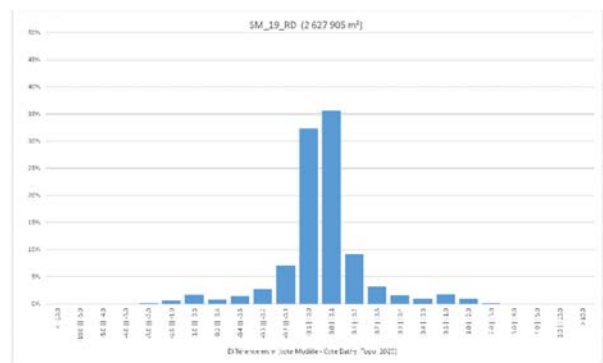
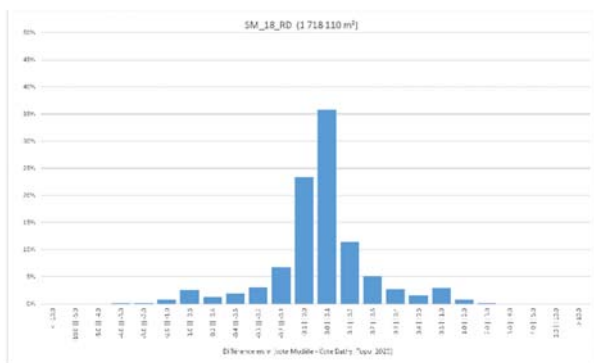
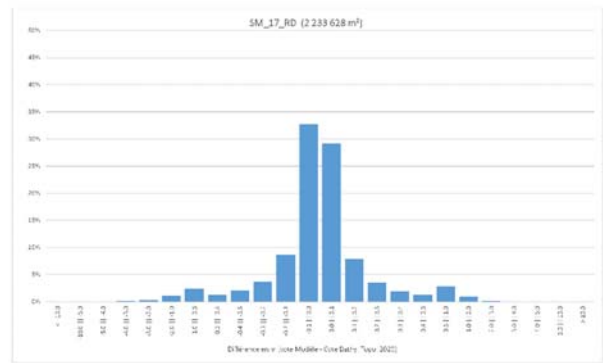
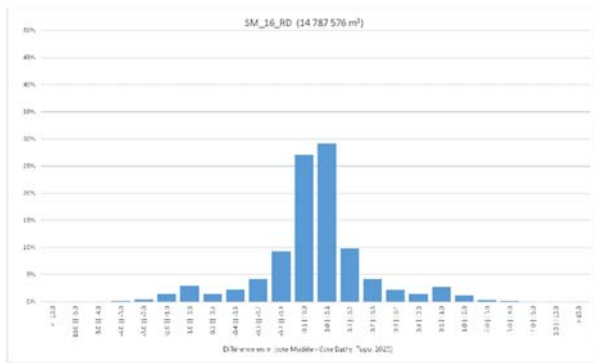


Figure 36- Histogrammes des écarts altimétriques pour chaque sous-modèle du lit majeur

5. MODELISATION DES ZONES URBAINES EN LIT MAJEUR

Dans le but de respecter la contrainte d'un temps de calcul « raisonnable » tout en garantissant des résultats réalistes, ARTELIA a recherché en amont la meilleure façon de représenter les zones urbaines présentes sur le secteur d'étude, sur la base de son expérience sur de grands modèles bidimensionnels similaires. Il s'agit de trouver le meilleur compromis entre la finesse de représentation des zones urbaines et la rapidité du temps de calcul. Ce temps de calcul est en effet directement lié au nombre total de points et à la taille des plus petites mailles du maillage.

5.1. APPROCHES POSSIBLES POUR MODELISER LES ZONES URBAINES

Plusieurs approches de représentation des zones urbaines peuvent être envisagées en fonction de la densité de l'urbanisation, de l'ampleur du secteur d'étude et des objectifs de la modélisation. Les zones urbaines peuvent être prises en compte :

- Directement via l'**imposition d'un coefficient de frottement (ou rugosité)** spécifique sur les zones urbaines en fonction de leur densité, induisant une perte de charge supplémentaire dans l'équation de continuité. Cette méthode classique est simple, robuste et rapide en durée de simulation, mais reste cependant assez schématique pour ce qui concerne la qualité de reproduction des écoulements dans les zones urbaines denses (pas de discrimination fine de l'effet d'obstacle par le bâti et d'accélération dans les rues).
- Par une **méthode de modélisation explicite** qui consiste à identifier tous les bâtiments ou groupes de bâtiments présents en lit majeur comme des îlots insubmersibles. Cette méthode est probablement celle qui permet de reproduire le plus fidèlement la structure des écoulements dans les zones urbaines, du fait de la représentation précise du positionnement et de la géométrie des différents bâtiments existants en lit majeur. Elle est cependant très coûteuse en temps, à la fois en termes d'élaboration du modèle et de durée de simulation à cause de la densité importante et de la petite taille des mailles. L'emploi de la méthode explicite est généralement réservé à l'étude de zones d'emprise réduite (quelques dizaines de km²). Compte tenu de l'emprise du modèle de l'estuaire de la Seine et en lien avec l'objectif consistant à disposer d'un modèle opérationnel en temps de calcul, cette approche ne paraît pas pertinente.
- Par la **méthode de « porosité » combinée à la rugosité**, afin de s'affranchir des limites de la première méthode. Introduire un coefficient de porosité dans les équations hydrauliques permet en effet de tenir compte de la diminution de la capacité de stockage de l'eau dans la maille du fait du volume occupé par le bâti. Ce coefficient est calculé pour chaque zone urbaine homogène par le ratio de la surface au sol (libre de tout bâtiment) par la surface totale de la zone. Il est cependant apparu que cette méthode conduit à des instabilités numériques dans les zones du modèle à forte densité urbaine, c'est pourquoi cette approche est écartée.
- Par une **approche basée sur la méthode de Lindner**. Initialement développée pour modéliser la résistance à l'écoulement produite par la végétation non submergée, cette méthode a été adaptée dans le code de calcul Telemac pour la représentation des bâtiments dans les zones urbaines. Moins coûteuse en nombre de mailles et en temps de calcul par rapport à la méthode dite explicite, cette approche fournit néanmoins des résultats robustes et proches de la méthode explicite. Cette méthode a été utilisée notamment lors de l'élaboration du modèle des écoulements de la Seine et ses principaux affluents dans la région Ile-de-France pour l'EPTB Seine Grands Lacs.

C'est cette dernière approche, dont les principes sont présentés ci-après, qui est retenue dans le cadre de la modélisation des écoulements en estuaire de la Seine.

5.2. PRINCIPES DE LA METHODE DE LINDNER

Les principes de la méthode de Lindner sont détaillés dans une note dédiée, reportée en Annexe 6.

La méthode de Lindner a été initialement développée pour la représentation de la résistance à l'écoulement produite par la végétation non submergée, telle que des boisements. Afin de valider son application pour la modélisation de zones urbaines, plusieurs cas tests ont été mis en œuvre par ARTELIA dans le cadre de précédentes études et projets en interne. Ces cas tests sont décrits en Annexe 6 à titre d'information.

Ces tests démontrent que cette approche permet de reproduire correctement la structure des écoulements dans les zones urbaines comparativement à la méthode explicite, avec des durées de simulation largement améliorées.

Cette méthode repose sur les paramètres caractéristiques suivants :

- DP : diamètre moyen des obstacles ;
- SP : inter-distance moyenne entre obstacles, comptée depuis leurs centres.

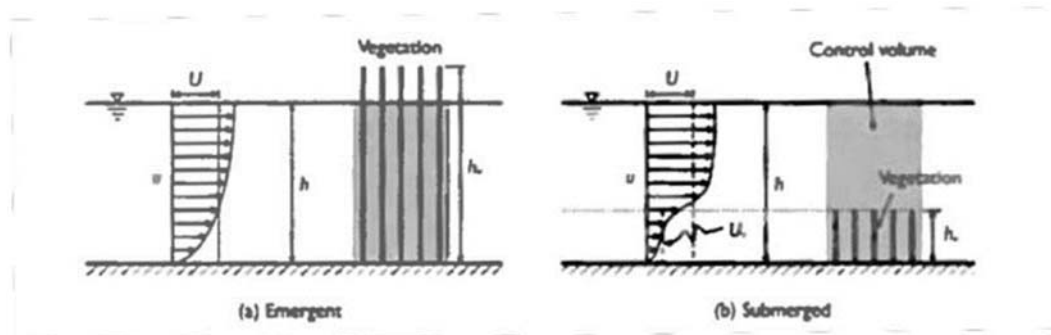


Figure 37- Schématisation de la résistance à l'écoulement provoquée par un obstacle non submergé (a) et submergé (b)

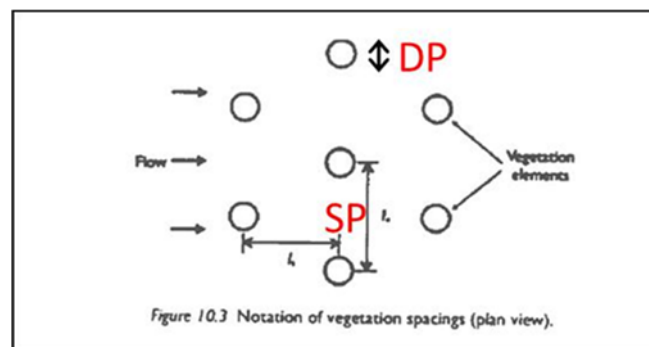


Figure 38- Schématisation des paramètres DP (diamètre moyen) et SP (inter-distance)

Pour chaque zone urbaine où la méthode est appliquée, un coefficient de traînée utilisé dans les équations résolues par Telemac est alors déterminé à chaque itération de calcul. Ce coefficient varie en fonction des conditions d'écoulement sur le nœud du maillage (hauteur d'eau et vitesse) et en fonction des paramètres géométriques DP et SP spécifiques à chaque zone bâtie.

5.3. APPLICATION DE LA METHODE DE LINDNER AU MODELE DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE

La méthode de Lindner suppose de pouvoir structurer le maillage du modèle de manière à distinguer les axes routiers (où l'écoulement n'est pas freiné) et les îlots bâtis. Comme exposé au chapitre 4.2, la densité et la forme des mailles ont été adaptées suivant la densité de l'urbanisation et suivant les axes préférentiels d'écoulement : dans les zones à enjeux avec une urbanisation dense, la taille de mailles a été diminuée à 30 m voire moins et des lignes de contraintes ont été utilisées pour représenter les principaux axes de circulation.

Les contours des polygones d'application de la méthode de Lindner ont été définis en ajustant aux contraintes du maillage les contours des zones classées en zones urbanisées/industrielles/commerciales selon la cartographie du Mode d'Occupation du Sol (MOS) réalisée en 2009 (référence [7]).

Sur l'emprise couverte par le modèle de l'estuaire de la Seine, les zones urbanisées sont ainsi décrites par plus de 2 000 polygones avec des paramètres DP et SP spécifiques. Les couches SIG reprenant l'ensemble des éléments relatifs à l'application de la méthode de Lindner est fournie en complément du présent rapport.

Les paramètres DP et SP des zones bâties, sur lesquels s'appuie la méthode de Lindner, ont ensuite été calculés sous SIG pour chacun de ces polygones. Une jonction spatiale entre chaque zone bâtie et la couche de bâtiments issue de la BD TOPO de l'IGN (2020) a permis de déterminer les variables suivantes : la surface de la zone bâtie (SurfPoly), le nombre de bâtiments présents dans la zone bâtie (NbBat) et la surface totale cumulée des bâtiments dans la zone bâtie (SurfBatCum). De ces trois variables ont été déduites :

- La surface moyenne d'un bâtiment schématique : $\frac{SurfBatCum}{NbBat}$
- La largeur moyenne d'un bâtiment schématique, représenté sous forme d'un carré de côté DP : $DP = \sqrt{\frac{SurfBatCum}{NbBat}}$
- L'espace moyen entre les centres des bâtiments schématiques : $SP = \sqrt{\frac{SurfPoly}{NbBat}}$

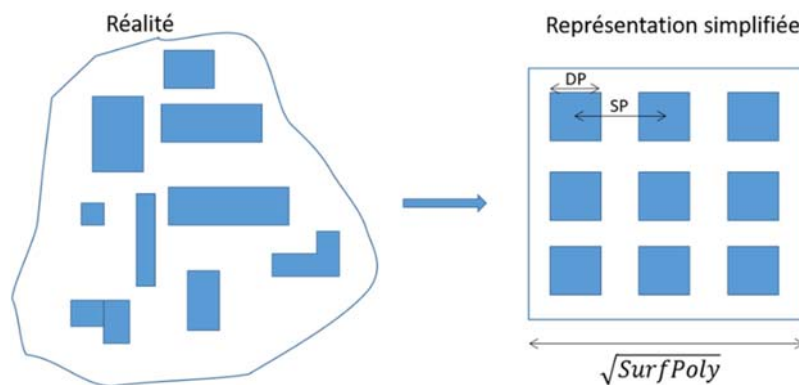


Figure 39- Schématisation des zones bâties pour l'application de la méthode de Lindner

La mise en œuvre de cette méthode sur le modèle de l'estuaire de la Seine est illustrée sur la Figure 40 au droit de deux secteurs de densité urbanisée variable (Rouen et Saint-Pierre-de-Manneville). Cette figure fait notamment apparaître le zonage d'application de la méthode de Lindner ainsi que les paramètres DP et SP associés à chaque zone.



Figure 40- Définition des zones d'application de la méthode de Lindner – Exemples sur les secteurs de Rouen (à gauche) et Saint-Pierre-de-Manneville (à droite)



C. CALAGE ET VALIDATION DU MODELE

1. EVENEMENTS DE CALAGE ET DE VALIDATION

Le principe général du calage consiste à améliorer la représentativité du modèle par la simulation d'événements naturels observés et connus. Conformément au CCTP, le calage et la validation du modèle sont réalisés sur la base des quatre épisodes de débordement de la Seine listés ci-après.

Plusieurs de ces événements ont fait l'objet d'une note établie par le GIP Seine Aval décrivant les conditions hydrométéorologiques, les hauteurs d'eau atteintes et une comparaison avec les principaux événements historiques observés sur l'estuaire de la Seine. Ces analyses sont consignées dans les documents cités en références [9]-[10]-[11]-[12] et sont reprises succinctement dans cette section :

- Evènement de mars 2001 : de type fluvial, cet épisode résulte de la combinaison d'un débit important dans la Seine (maximum observé le 28 mars avec 2280 m³/s à Poses), de fortes dépressions et de forts vents orientés sud-sud-ouest. Le coefficient de marée de vive-eau est de 89 ;
- Evènement de mars 2008 : cet épisode de type maritime survenu le 21 mars 2008 combine une marée de vive-eau exceptionnelle (coefficient de marée de 105), un vent de secteur ouest soufflant à 72 km/h au cap de la Hève, et un débit important de 929 m³/s à Poses ;
- Evènement de janvier 2018 : entre le 3 et le 5 janvier 2018, la conjugaison de la tempête Eleanor, d'un débit soutenu de la Seine (entre 1100 m³/s et 1300 m³/s à Vernon) et d'une période de vive-eau avec des coefficients de marée supérieurs à 100 a entraîné des débordements de la Seine tout au long de l'estuaire. Des rafales de vent supérieures à 100 km/h ont été mesurées au cap de la Hève le 3 janvier 2018, avec des moyennes horaires pouvant dépasser les 60 km/h et une orientation majoritairement de secteur ouest. Cet épisode de caractère maritime est décrit dans la note référencée [9] ;
- Evènement de février 2018 : fin janvier et début février 2018, la conjugaison d'un débit de la Seine supérieur à 2000 m³/s à Vernon (avec un maximum journalier de l'ordre d'une période de retour décennale) et de forts coefficients de marée (supérieurs à 90) a entraîné d'importants débordements de la Seine dans sa partie estuarienne, en particulier en amont de Caudebec-en-Caux. Les conditions météorologiques n'ont pas favorisé la formation de surcotes, que ce soit en baie de Seine ou dans l'estuaire. Cet épisode de caractère fluvio-maritime (à composante majoritaire fluviale) est décrit dans la note référencée [10].

À la suite des débordements de la Seine dans sa partie estuarienne survenus au cours du premier trimestre 2020, deux événements complémentaires à la phase de calage ont été ajoutés à l'issue du Comité de Pilotage de juillet 2020. Ces deux événements caractéristiques d'épisodes fluvio-maritimes sont simulés à l'issue de la phase de calage et validation, sans modification des paramètres de calcul établis sur la base des quatre événements antérieurs.

- Evènement de février 2020 : ce premier épisode de débordement a eu lieu du 10 au 13 février 2020, touchant principalement le secteur entre Rouen et Caudebec-en-Caux. Il s'explique par des événements tempétueux (tempête Ciara le 11 février puis Inès le 13 février) conjugués à de forts coefficients de marée (supérieurs à 100) et à un débit soutenu de la Seine (supérieur à 1200 m³/s à Vernon). L'orientation générale ouest-sud-ouest durant plusieurs jours a été favorable à la formation de surcotes à l'échelle de la Manche et de la baie de Seine. Cet épisode de caractère fluvio-maritime (à composante majoritaire maritime) est décrit dans la note référencée [11] ;
- Evènement de mars 2020 : ce second épisode de débordement a eu lieu du 9 au 14 mars 2020, touchant principalement le secteur entre Oissel et Caudebec-en-Caux. Il s'explique par la crue de la Seine (débit de la Seine supérieur à 1600 m³/s à Vernon) conjuguée à de forts coefficients de marée (supérieurs à 100). À l'échelle de la baie de Seine et de l'embouchure, des surcotes de l'ordre de quelques dizaines de centimètres ont été observées sur la période du 8 au 15 mars 2020, en lien avec la dominance des vents de secteur sud-ouest. Cet épisode de caractère fluvio-maritime est décrit dans la note référencée [12].

La ligne d'eau des niveaux d'eau maximaux mesurés le long de l'estuaire de la Seine est représentée sur la Figure 41 pour chacun des évènements de calage et de validation. En fonction des facteurs expliquant les débordements selon le secteur de l'estuaire, ces évènements peuvent être catégorisés selon la typologie suivante :

- Evènements de type fluvial (mars 2001), engendrés par une crue de la Seine et impactant plutôt les niveaux à l'amont de l'estuaire (en amont de Rouen / Oissel) ;
- Evènements de type maritime (mars 2008 et janvier 2018), assimilés à des tempêtes et engendrés par des conditions météorologiques défavorables associées à de forts coefficients de marée, dont l'impact est observé plutôt sur les niveaux à l'aval de l'estuaire (en aval de Tancarville / Aizier) ;
- Evènements de type fluvio-maritime (février 2018, février et mars 2020), liés à une conjonction défavorable des conditions fluviales, marines et météorologiques, et dont l'impact est observé sur l'ensemble de l'estuaire.

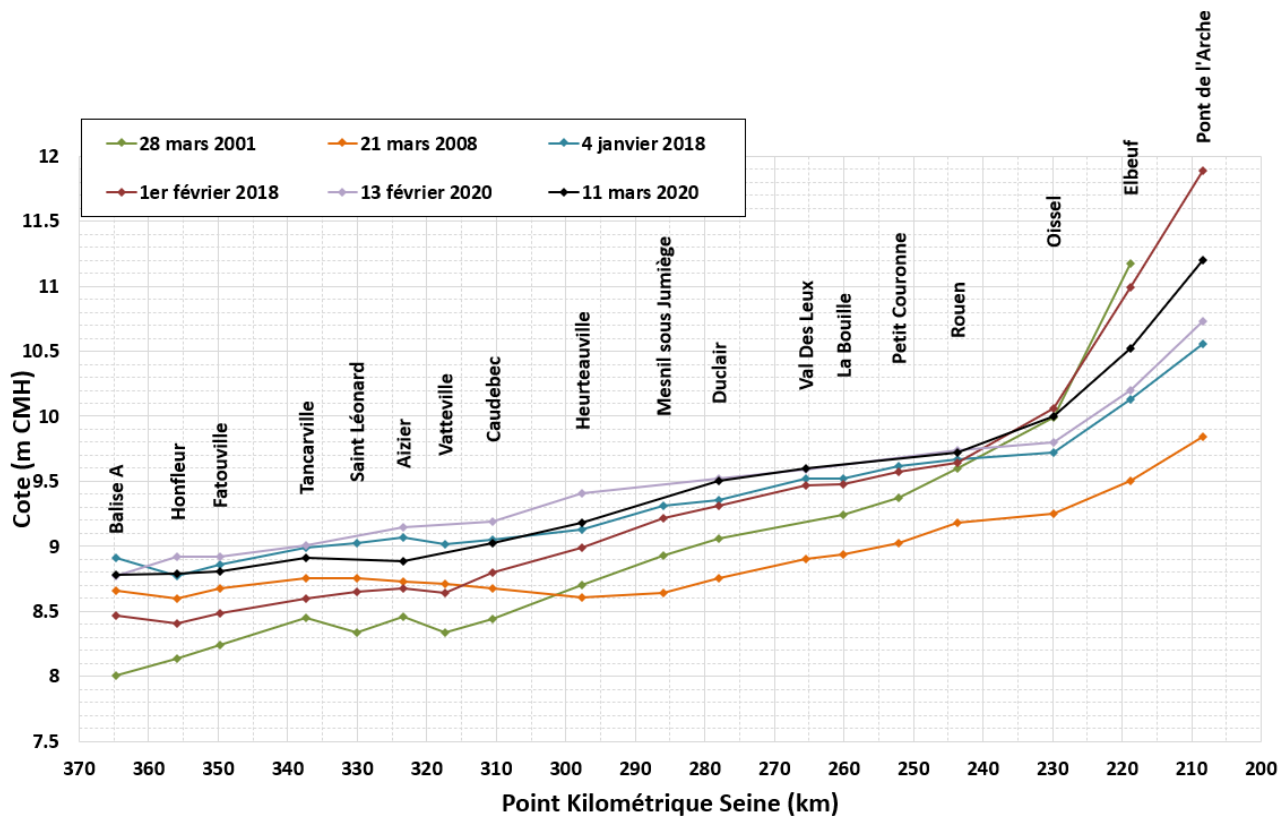


Figure 41- Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour les évènements de calage

2. DONNEES MISES A DISPOSITION POUR LE CALAGE

La validation du modèle en termes de hauteurs d'eau est effectuée sur la base des relevés de niveaux d'eau disponibles pour chaque évènement au droit des marégraphes localisés sur la Figure 42.

- Données relevées sur 18 marégraphes répartis le long de l'estuaire, entre l'embouchure (Balise A) et Pont-de-l'Arche (PK 208.4). Ces données ont été fournies au pas de temps 5 minutes par le Grand Port Maritime de Rouen (GPMR).
- Données relevées au marégraphe du Havre (pointe de Floride). Ce marégraphe maintenu par le SHOM est intégré dans le réseau RONIM en partenariat avec le Grand Port Maritime du Havre (GPMH). Ces données ont été collectées sur le site <https://data.shom.fr> au pas de temps 10 minutes. Une analyse des données marégraphiques menée par le GPMH (référence [13]) sur un réseau de 7 capteurs répartis sur l'ensemble du domaine portuaire a montré que ce marégraphe a tendance à surestimer l'amplitude des surcotes durant les périodes de tempêtes. Ce phénomène exceptionnel et très local peut s'expliquer par « l'effet de résonance lié à la forme en V du quai et la remontée brutale du fond » (extrait de [13]). D'après cette analyse le biais constaté par rapport aux autres mesures peut être de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres.



Figure 42- Localisation des marégraphes utilisés pour la validation du modèle

En complément des mesures de niveaux d'eaux aux marégraphes, une comparaison de l'emprise des zones inondables modélisée et observée est ensuite réalisée sur la base des données mises à disposition :

- Délimitation des zones inondées durant la crue de début février 2018 sur plusieurs secteurs compris entre Petit-Couronne (PK 250) et Le-Mesnil-sous-Jumièges (PK 285). Ces données établies sous forme de couches SIG sont issues d'une prestation réalisée en 2019 par le CEREMA à la demande du Département de Seine-Maritime. Il s'agissait de mener un travail d'ortho-rectification de photographies obliques acquises par un drone sur les secteurs inondés, afin de produire les limites de crues vectorisées durant cet évènement (journées du 1^{er} et du 2 février 2018). Le rapport du CEREMA associé à cette prestation (référence **[14]**) détaille la méthodologie suivie, les difficultés rencontrées et l'ensemble des rendus fournis. Les limites associées à ces données sont reprises succinctement au chapitre C. 6.2.



Figure 43- Exemple de photographie oblique réalisée sur le secteur de Sahurs lors des événements de février 2018 (extrait du CCTP)

- Laisses de crues de la Seine recensées dans la base www.reperesdecruess.developpement-durable.gouv.fr. Ces données portent sur les épisodes de débordement survenus début février 2018 ainsi qu'en février et mars 2020. Comme présenté sur la Figure 44, ces repères de crues couvrent un secteur compris entre Criquebeuf-sur-Seine (PK 210) et Caudebec-en-Caux (PK 303).

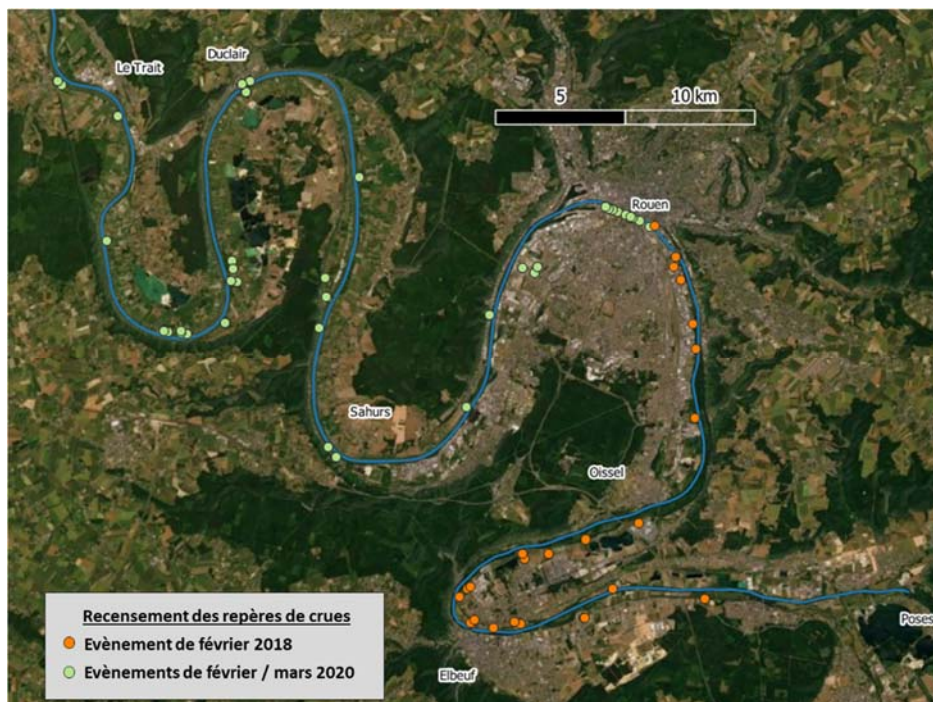


Figure 44- Localisation des repères de crues recensés en bord de Seine pour les événements de 2018 et 2020

3. FORÇAGES DU MODELE

Les conditions de forçage appliquées au modèle hydrodynamique sont décrites dans cette section.

En chaque point de calcul sur l'ensemble du domaine modélisé, les conditions atmosphériques sont imposées sous la forme d'un champ de vent et de pression atmosphérique variable en temps et en espace. La source de données mobilisée est le modèle mondial de prévision ERA5 édité par ECMWF (<https://cds.climate.copernicus.eu>), dont les données sont disponibles depuis 1979 au pas de temps horaire à la résolution spatiale de 0,25° (soit environ 30 km à la latitude de la zone modélisée).

Source des données : ERA5 hourly data on pressure levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).

En chaque point de calcul sur les frontières fluviales en amont du modèle, les débits de la Seine et des principaux affluents que sont l'Eure et la Risle sont imposés sous la forme de chroniques temporelles en moyenne journalière. Ces chroniques de débits ont été collectées sur le site de la Banque Hydro aux stations hydrométriques de la Seine à Vernon (code H8100020), de l'Eure à Louviers (code H95501010) et de la Risle à Pont-Authou (code I0211010). Le lit mineur de ces affluents est représenté de façon simplifiée au sein du maillage, néanmoins il convient de préciser que les données disponibles n'intègrent pas le fond des cours d'eau du fait de la technique d'acquisition par LIDAR.

En chaque point de calcul sur la frontière maritime du modèle, les niveaux d'eau sont imposés avec une décomposition en trois termes :

1. Les niveaux d'eau engendrés par la marée

Pour chaque évènement simulé, ces niveaux sont extraits du modèle de marée développé par ARTELIA à l'échelle de la Manche. Celui-ci permet de disposer, en chacun des points de calcul constituant la frontière maritime du modèle de l'estuaire de Seine, d'une série temporelle des niveaux de marée au **pas de temps 10 minutes**.

Le modèle Manche, établi relativement au zéro hydrographique, est calé et validé sur plusieurs marégraphes et fournit des conditions de forçages fiables pour des modèles établis à des échelles plus locales. L'emprise de ce modèle Manche est reportée sur la Figure 45 et ses caractéristiques sont présentées succinctement en Annexe 7.

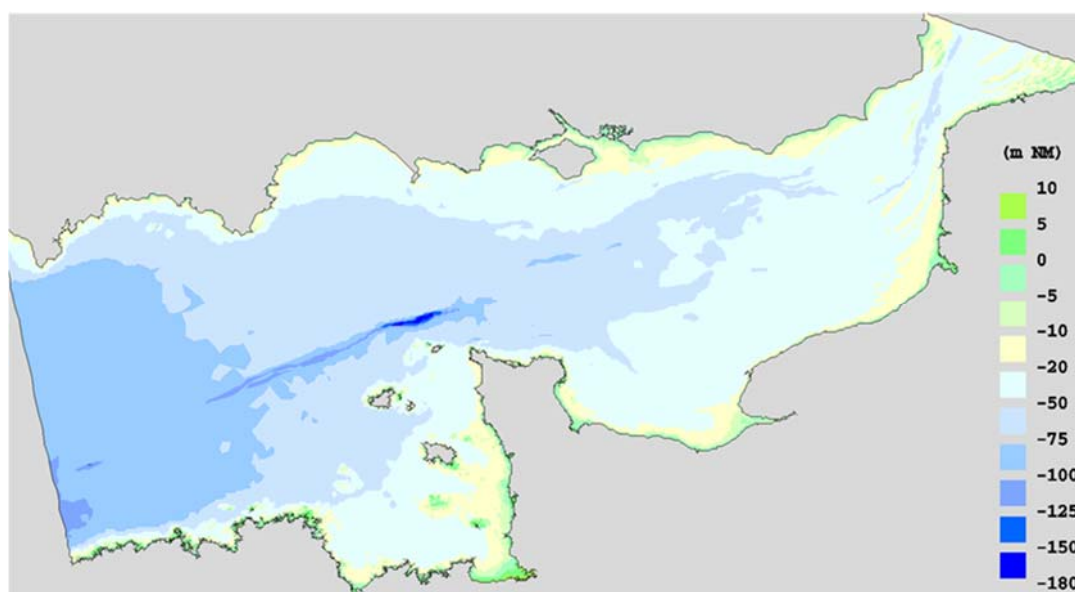


Figure 45- Emprise du modèle de la Manche développé par ARTELIA

2. Le niveau moyen

Le niveau moyen au Havre est de +4.96 m CMH d'après l'ouvrage définissant les références altimétriques maritimes publié en 2020 par le SHOM (référence [4]). Du fait de la variabilité spatiale du niveau moyen entre l'embouchure et l'entrée de la baie de Seine, il convient de prendre en compte l'écart de niveau moyen entre le Havre et la frontière maritime du modèle où les forçages sont imposés. Cet écart est estimé à 8 cm en moyenne à l'aide d'une simulation menée à l'échelle d'une année complète (2020) avec le modèle Manche. En conséquence, le niveau moyen sur la frontière maritime du modèle Seine est fixé à une valeur constante égale à +4.88 m CMH.

3. Les surcotes marines

Contrairement au précédent modèle de l'estuaire de Seine développé par ARTELIA en 2013, qui utilisait un terme de correction intitulé « résidu maritime » en fonction du niveau d'eau mesuré au Havre, le présent modèle intègre directement le terme de surcote en tant que donnée de forçage.

Le modèle de la Manche élaboré par ARTELIA permet bien de reproduire les niveaux de marée en baie de Seine mais il n'intègre pas les paramètres atmosphériques (vent et pression) susceptibles de générer des surcotes à l'échelle de la Manche et pouvant impacter les niveaux d'eau dans l'estuaire. Pour pallier ce manque, il est nécessaire d'avoir recours aux résultats d'un autre modèle de large emprise prenant en compte les paramètres atmosphériques.

La source de données retenue est le modèle MARS-2D développé par l'IFREMER, et plus spécifiquement le modèle de rang 1 couvrant la Manche et le golfe de Gascogne (MANGA). Ce modèle fournit une estimation du terme de surcote marine à la frontière du modèle de l'estuaire de la Seine construit pour la présente étude. Les données sont disponibles à partir de l'année 2006, sous forme d'une série temporelle au **pas de temps horaire** avec une résolution spatiale de 700 m.

Les caractéristiques du modèle sont détaillées dans la publication de l'IFREMER référencée [15]. Ce document expose la mise en place du modèle et l'étape de validation réalisée pour la période du 17 au 28 février 2010 (tempête Xynthia).

Comme présenté dans le tableau suivant (extrait de [15]), les surcotes modélisées restent globalement inférieures à celles mesurées avec un biais de -8 cm en moyenne sur l'ensemble des marégraphes de validation pour cet évènement. L'erreur quadratique moyenne (RMS) est quant à elle de 13 cm en moyenne.

Source des données : Données issues des simulations des modèles MARS2D, projet « Modélisation et Analyse pour le Recherche Côtière » (MARC) <https://marc.ifremer.fr>, Ifremer, University of Brest, CNRS, IRD, Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale (LOPS), IUEM, Brest, France.

Tableau 2- Erreurs RMS et biais des surcotes issues du modèle MARS2D lors de la tempête Xynthia (source IFREMER, référence [15])

Points	Erreur RMS (cm)			Biais (cm)			Nom du Rang 2
	Rang 0	Rang 1	Rang 2	Rang 0	Rang 1	Rang 2	
Dunkerque	9	9	9	2	3	4	MANE
Calais	11	11	9	-3	-3	-2	MANE
Dieppe	14	14	14	-10	-9	-9	MANE
Le Havre	11	11	10	-2	-2	-1	MANE
Cherbourg	10	10	10	-6	-6	-6	MANW
Saint-Malo	14	14	14	-6	-6	-5	MANW
Roscoff	13	13	13	-10	-10	-9	MANW
Le Conquet	11	11	11	-7	-6	-6	FINI
Brest	12	12	12	-8	-8	-8	FINI
Concarneau	13	13	13	-10	-9	-9	SUDB
Le Croesty	15	15	15	-12	-11	-11	SUDB
Saint-Nazaire	16	16	16	-11	-10	-10	SUDB
Les Sables d'Olonne	16	16	16	-12	-12	-12	AQUI
La Rochelle-Pallice	15	15	15	-10	-10	-10	AQUI
Port-Bloc	15	14	14	-9	-9	-9	AQUI
Arcachon	17	17	17	-11	-10	-11	
Boucau-Bayonne	16	15	15	-12	-12	-12	AQUI
Saint-Jean de Luz	14	13	13	-11	-10	-11	AQUI
Moyenne	13 cm	13 cm	13 cm	-8 cm	-8 cm	-8 cm	

4. PARAMETRAGE DES COEFFICIENTS DE FROTTEMENT

Le paramètre de calage le plus influent est la rugosité du lit et des terrains alentours, qui traduit le frottement plus ou moins important de l'eau sur le sol en fonction de son état de surface ou de son occupation. Un secteur fortement végétalisé présente une rugosité importante et les écoulements y sont freinés. Au contraire, le lit d'un cours d'eau constitué de sédiments présente une rugosité plus faible ce qui favorise les écoulements. Dans le modèle hydraulique bidimensionnel, la rugosité du terrain est représentée par une loi de frottement de type Strickler.

Pour les zones du lit mineur disposant de mesures des niveaux d'eau aux marégraphes, le calage de la propagation de la marée est réalisé par itérations successives afin de reproduire au mieux les événements observés, secteur par secteur depuis l'aval vers l'amont de l'estuaire. Le jeu des coefficients de frottement est modifié de façon à minimiser l'écart entre les niveaux d'eau modélisés et mesurés aux marégraphes.

Cet ajustement des paramètres s'appuie en premier lieu sur les mesures aux marégraphes pour les deux épisodes de débordement survenus en janvier et février 2018. La bathymétrie intégrée au modèle étant issue de données récentes (cf. chapitre A. 1.2) comparativement aux événements de mars 2001 et de mars 2008, ces deux événements plus anciens sont simulés dans un second temps afin de contrôler la cohérence du calage.

Au terme de la phase de calage, le linéaire du lit mineur de la Seine est divisé en près de 30 zones pour lesquelles une valeur spécifique de coefficient de frottement est appliquée. Les valeurs retenues dans le lit mineur de la Seine sont comprises entre $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ et $70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Entre Rouen et la limite amont du modèle, la programmation du modèle tient compte d'un frottement variable en fonction du débit de la Seine. Cette approche, couramment utilisée dans les modèles hydrodynamiques, traduit les modifications induites par les crues sur les sections d'écoulements et sur les faciès sédimentaires. Un premier jeu de coefficients est utilisé pour un débit inférieur à $1\,200 \text{ m}^3/\text{s}$, puis une interpolation est effectuée jusqu'au débit de $2\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ au-delà duquel un second jeu est appliqué. Cette variation du coefficient de frottement, limitée à $\pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ entre les deux jeux de paramètres, permet d'améliorer la représentation des lignes d'eau pour l'ensemble des événements de calage (en particulier janvier et février 2018).

Concernant les zones du lit majeur, qui ne bénéficient pas nécessairement de données d'observation en quantité suffisante (en temps et en espace), la répartition spatiale des frottements est déterminée à partir du zonage de l'occupation des sols extrait de la base de données Corine Land Cover (CLC) dans sa version la plus récente datée de 2018. Chaque type d'occupation des sols est associé à un coefficient de Strickler, en accord avec les plages simplifiées de valeurs prescrites dans le Tableau 3.

Tableau 3- Valeurs des coefficients de frottement affectés par type d'occupation du sol en lit majeur

Type d'occupation du sol	Coefficient de Strickler ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$)
Zones forestières	10
Zones de champs cultivés à végétation haute	13
Zones urbanisées *	15
Zones de champs cultivés à végétation basse	18
Zones de champs, prairies, sans cultures	20
Plans d'eau	30

* La densité différenciée des zones urbanisées est prise en compte via les paramètres de la méthode de Lindner (cf. chapitre B. 5).

Les coefficients de frottement adoptés à l'issue de la phase de calage sont présentés sur l'ensemble de la zone modélisée sur la Figure 46. En lit mineur, les valeurs affichées sur la figure correspondent au jeu de coefficients appliqué pour un débit de la Seine supérieur à $2\,000 \text{ m}^3/\text{s}$.

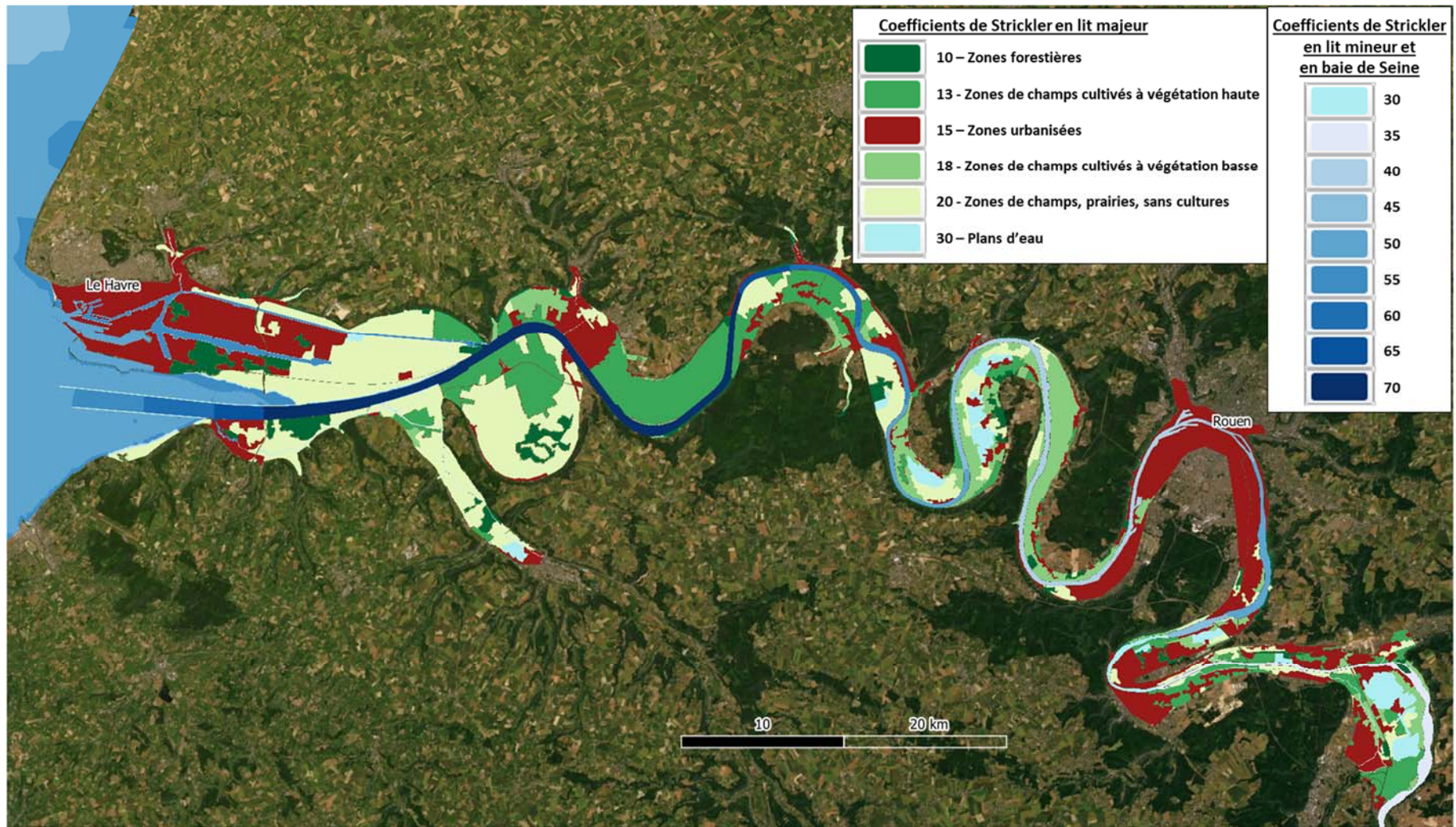


Figure 46- Cartographie des coefficients de frottement retenus après calage (débit de la Seine supérieur à 2 000 m³/s)

Note technique

MODELISATION DES INONDATIONS EN ESTUAIRE DE LA SEINE : DYNAMIQUE ET EMPRISE DES INONDATIONS

ARTELIA / SEPTEMBRE 2021 / 8712655 / PHASE 1 / R1 – REV.7

PAGE 65 / 106

5. TEST DE SENSIBILITE SUR LES OUVRAGES TRAVERSANTS

Les ouvrages traversant les digues de protection (buses, pont-cadre, etc.) ne sont pas pris en compte dans le modèle élaboré pour la présente étude car i/ils ne sont pas exhaustivement référencés à l'échelle de l'estuaire, ii/ leur mode de fonctionnement est souvent méconnu (présence ou non de clapet anti-retour). Ce choix avait été arrêté lors de la rédaction du CCTP. Dans le but d'évaluer l'impact de ce type d'ouvrage sur l'inondabilité d'un secteur donné en lit majeur, un test de sensibilité est mené pour un épisode de débordement simulé en phase de calage : février 2018.

Il convient de préciser par ailleurs que certains débouchés en Seine de fossés ou de cours d'eau secondaires apparaissent distinctement dans les données topographiques LIDAR, et sont donc directement intégrés (sans ouvrages) au sein des profils décrivant la liaison RIG entre le lit mineur et le lit majeur (cf. Figure 17 au chapitre B. 3.2).

La zone identifiée pour ce test de sensibilité sur les ouvrages est située en rive droite de la Seine au niveau des communes de Sahurs et Saint-Pierre-de-Manneville (PK 260-265). Ce secteur soumis à des débordements de la Seine pour l'épisode fluvio-maritime de début février 2018 abrite un certain nombre d'ouvrages dont les caractéristiques principales ont été fournies par le GPMR : coordonnées planimétriques, diamètre de l'ouvrage et cote du fil d'eau au débouché en Seine.

Les ouvrages pour lesquels l'une de ces trois informations est manquante ainsi que les ouvrages bouchés sont exclus de la sélection pour ce test de sensibilité. En résumé, 9 ouvrages de diamètre supérieur ou égal à 800 mm sont conservés avec les hypothèses de représentation suivantes :

- **Longueur de l'ouvrage fixée à 15 m (estimation à partir des photos aériennes) ;**
- **Cote du fil d'eau côté lit majeur égale à la cote du fil d'eau côté Seine ;**
- **Clapet anti-retour maintenu ouvert tout au long de l'évènement, en l'absence de certitude sur leur fonctionnement réel en période d'inondation (défaillance du système, possible intervention humaine).**

Ces hypothèses relativement sommaires retenues pour ce test de sensibilité, en termes de calage altimétrique des ouvrages et de fonctionnement des clapets, définissent un scénario maximisant l'inondabilité du lit majeur. Après intégration de ces ouvrages au sein du modèle, celui-ci est alors exploité en simulant de nouveau l'évènement de février 2018. L'ensemble des autres hypothèses de modélisation est inchangé par rapport au calcul de « référence » sans les ouvrages.

Dans l'objectif de comparer les résultats de ces deux simulations, la Figure 47 présente une cartographie de l'emprise maximale des zones inondées à l'arrière des digues de protection pour le cycle de marée du 1^{er} février 2018 (plus forte marée de l'évènement), ainsi que les hauteurs d'eau maximales en chaque point. Une comparaison des vitesses d'écoulement maximales sur ce même cycle de marée est également représentée sur la Figure 48.

Les trois figures suivantes permettent de comparer les durées de l'inondation en chaque point du lit majeur, calculées sur trois périodes distinctes : sur le cycle de la plus forte marée de l'évènement (Figure 49), sur deux cycles de marée consécutifs intégrant le cycle de la plus forte marée (Figure 50) et sur trois cycles de marée consécutifs intégrant les deux plus forts cycles de marée de l'évènement (Figure 51).

Les résultats de la simulation avec prise en compte des ouvrages sans clapet (image de droite sur chacune des figures ci-après) montrent une augmentation des aléas et de l'étendue des inondations au droit de Saint-Pierre-de-Manneville : en termes de surfaces inondées, cette augmentation est comprise entre 0.7 km² pour le seul cycle de marée du 1^{er} février et 0.8 km² pour une période de 3 cycles de marée consécutifs.

Du fait de l'absence de représentation des clapets anti-retour, le lit majeur est inondé au flot par le biais des ouvrages traversants, avant même le débordement sur les berges et par-dessus les murets anti-inondations.

En cas de fonctionnement normal des clapets, les zones inondées en lit majeur seraient réduites comparativement aux cartographies produites sans ouvrages traversants : en effet ces ouvrages ne sont pas mobilisés à marée montante et permettent un ressuyage des terrains inondés à chaque basse mer. Ces résultats mettent donc en évidence le rôle des clapets anti-retour vis-à-vis des inondations en lit majeur et toute l'importance de vérifier leur bon fonctionnement.

Ce test de sensibilité avec ou sans représentation des ouvrages traversants montre aussi que le volume d'eau transitant par ces ouvrages (sans clapet) au flot est plus important que celui restitué vers le lit mineur lors de la phase suivante de basse mer.

Par ailleurs, il apparaît que l'abaissement des niveaux d'eau en lit mineur est négligeable (de l'ordre de 1 cm) au droit des marégraphes situés à proximité de la zone étudiée (Petit-Couronne, La Bouille, Val-des-Leux). Il peut néanmoins être supposé que la-représentation des ouvrages sans clapet à l'échelle globale de l'estuaire impliquerait une diminution non négligeable des niveaux d'eau en lit mineur.

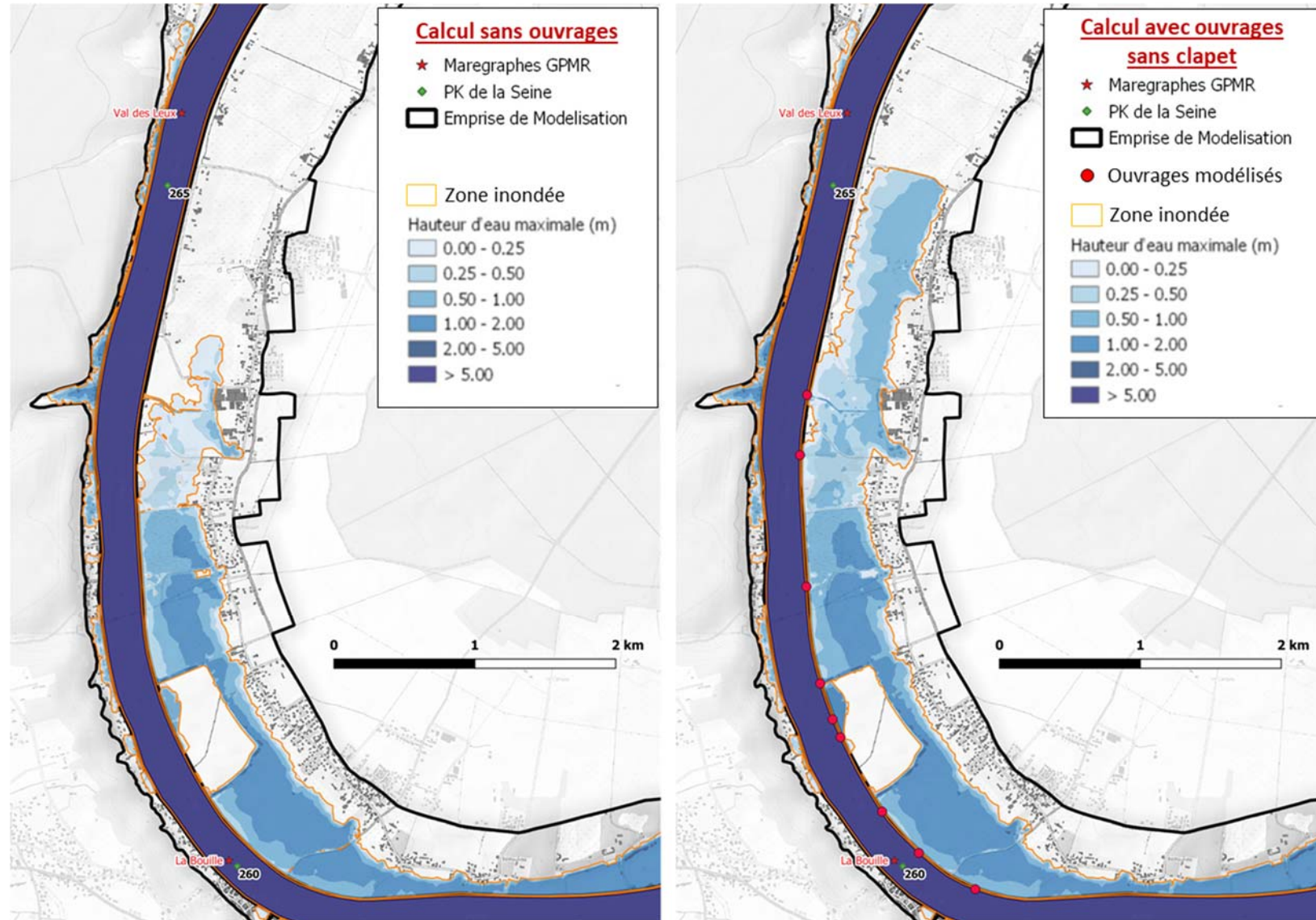


Figure 47- Hauteurs d'eau maximales et extension des zones inondées sur le secteur de Sahurs lors du cycle de marée du 1^{er} février 2018 - Test de sensibilité sur les ouvrages traversants

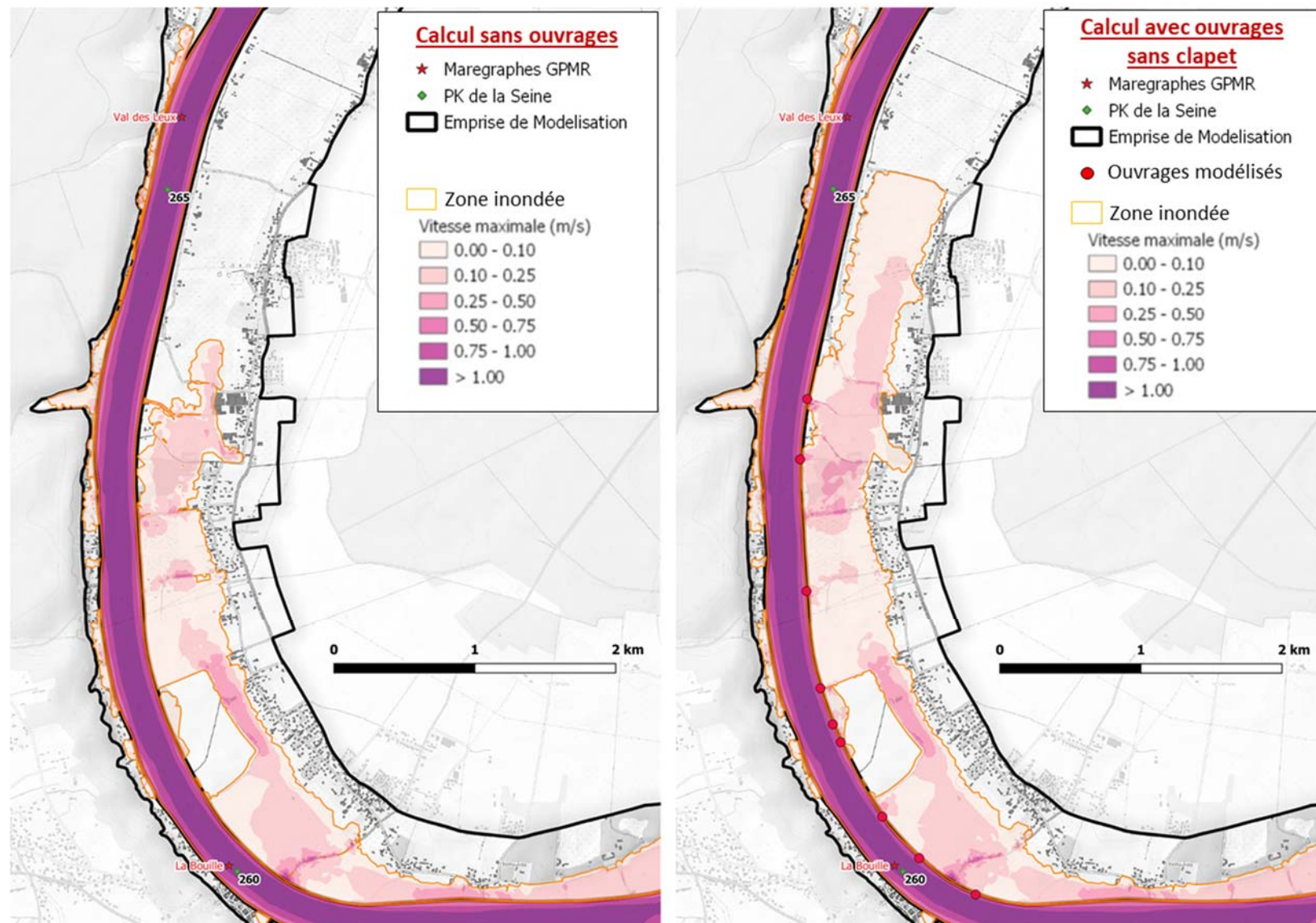


Figure 48- Vitesses d'écoulement maximales sur le secteur de Sahurs lors du cycle de marée du 1^{er} février 2018 - Test de sensibilité sur les ouvrages traversants

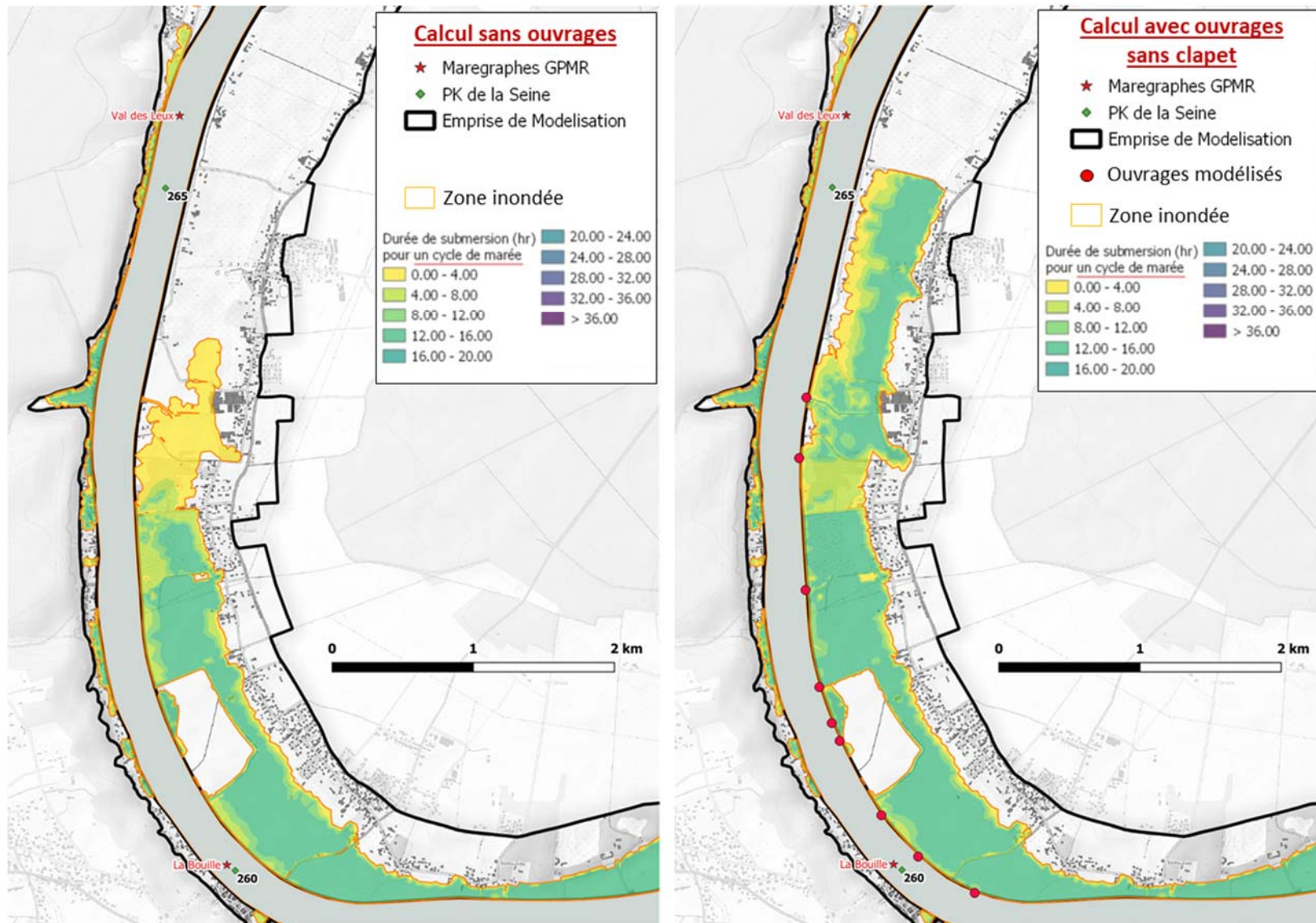


Figure 49- Durée de submersion pour un cycle de marée sur le secteur de Sahurs (marée du 1^{er} février 2018) - Test de sensibilité sur les ouvrages traversants

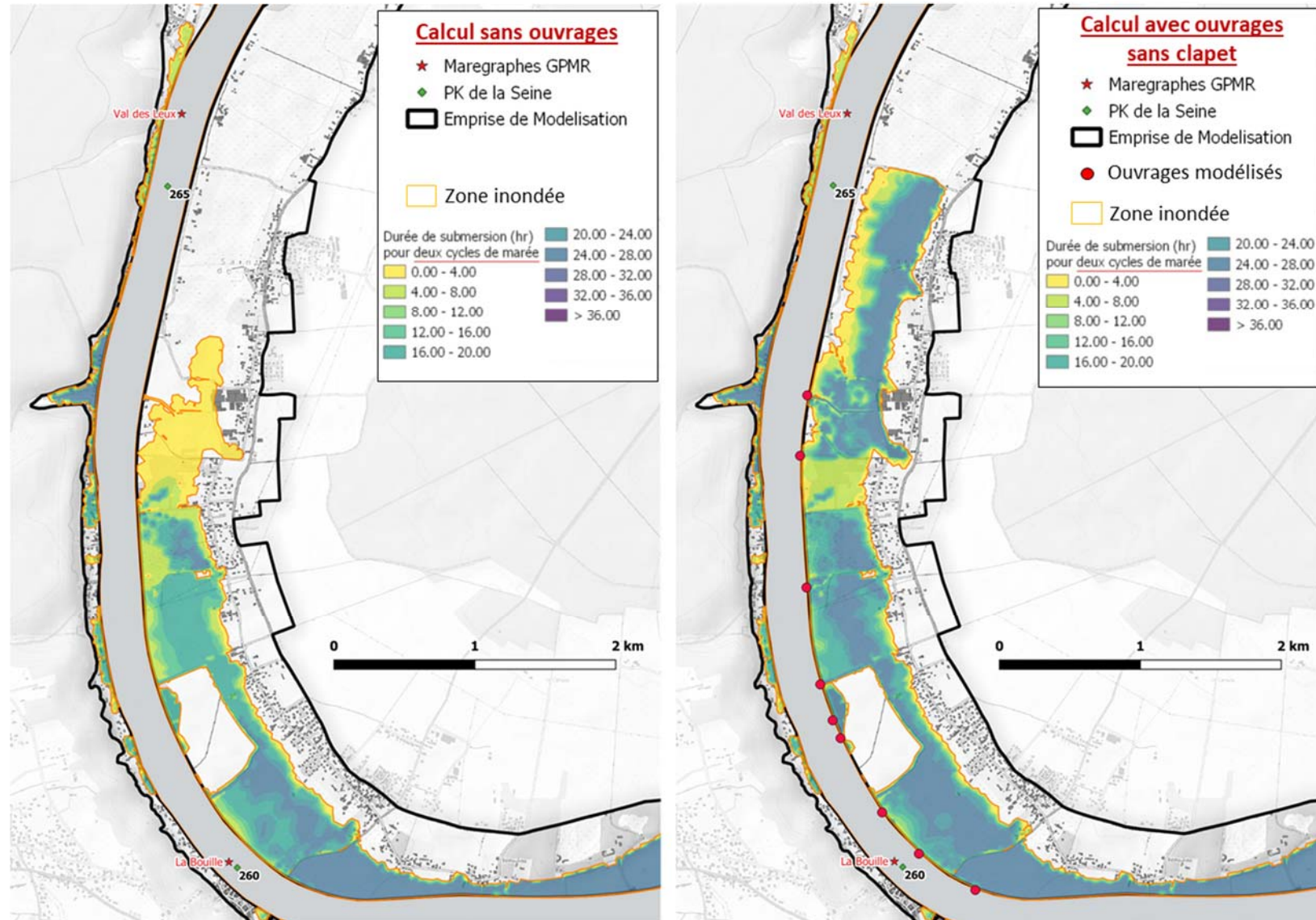


Figure 50- Durée de submersion pour deux cycles de marée sur le secteur de Sahurs (marées du 31 janvier et 1^{er} février 2018) - Test de sensibilité sur les ouvrages traversants

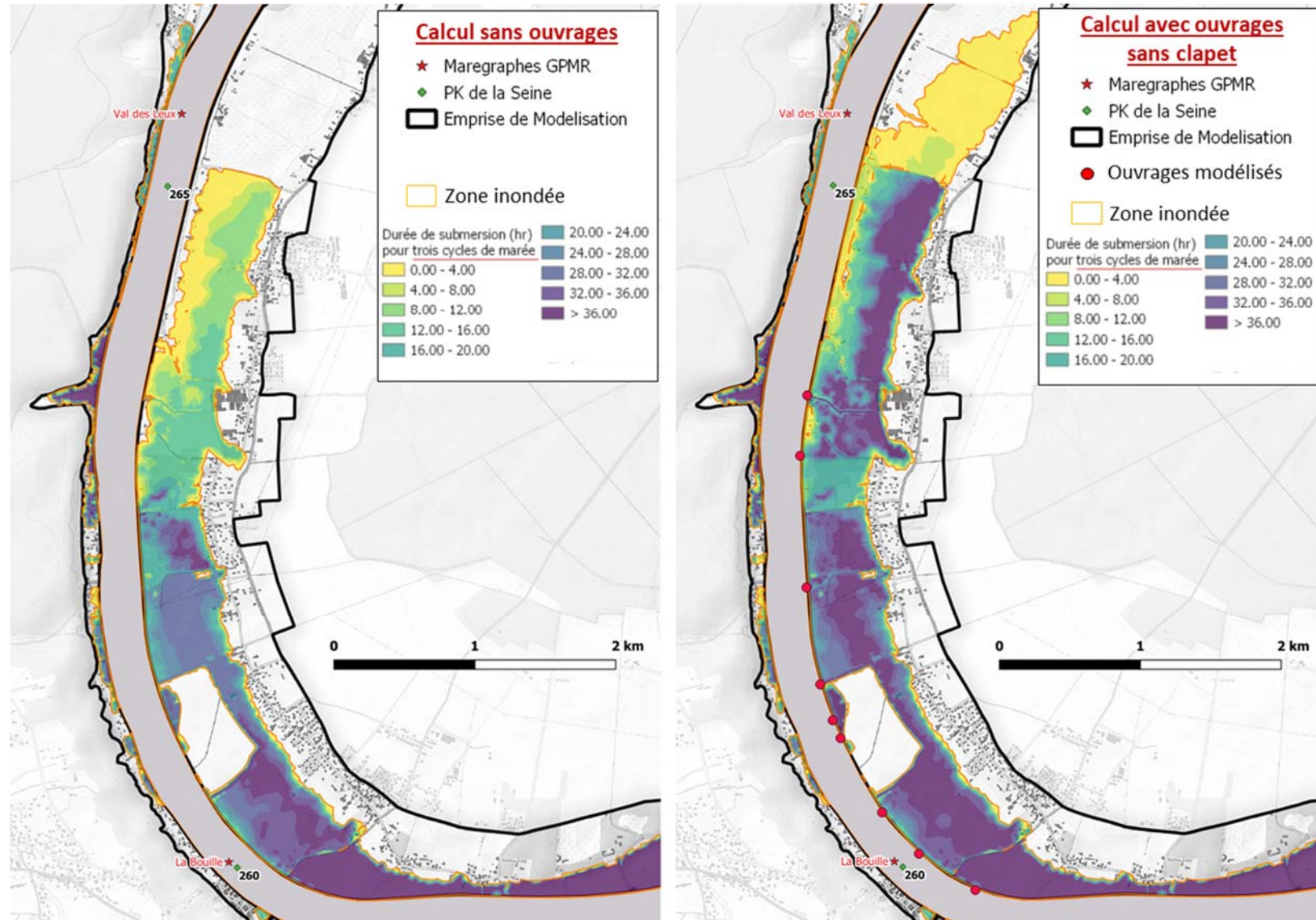


Figure 51- Durée de submersion pour trois cycles de marée sur le secteur de Sahurs (marées du 31 janvier au 2 février 2018) - Test de sensibilité sur les ouvrages traversants

6. OUTILS D'ANALYSE DU NIVEAU DE VALIDITE DU MODELE

6.1. VARIATIONS DU PLAN D'EAU LE LONG DE L'ESTUAIRE

Pour chacun des événements de calage et pour chaque marégraphe disponible, les résultats du calage en termes de niveaux d'eau sont présentés en Annexe 8 sous la forme de différents indicateurs permettant de caractériser la capacité du modèle à reproduire les épisodes d'inondation. Ces indicateurs, choisis en cohérence avec les demandes du CCTP, sont des indicateurs couramment utilisés dans les études de modélisation hydraulique. Ils ont été définis sur la base de ceux utilisés lors de la précédente étude de modélisation de l'estuaire menée en 2013 et affinés, pour certains, en fonction des objectifs de la présente étude.

- Une ligne d'eau présentant les niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée central de l'évènement considéré. Sur les graphiques présentés (exemple ci-dessous), la taille des symboles associés aux valeurs mesurées correspond à l'incertitude verticale de +/- 10 cm admissible sur les niveaux d'eau.

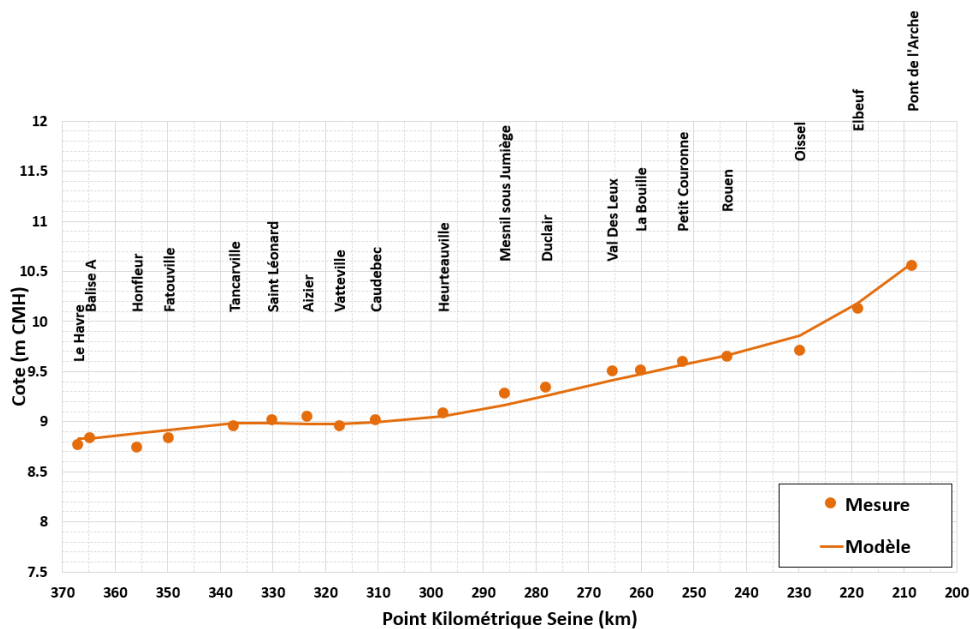


Figure 52- Ligne d'eau des niveaux maximaux le long de l'estuaire – Tempête de janvier 2018 (marée du 4 janvier)

- Pour chaque marégraphe, un graphique représentant l'évolution temporelle du niveau d'eau calculé par le modèle (au pas de temps de 5 minutes) et observé au marégraphe sur une fenêtre de 5 jours encadrant l'évènement.

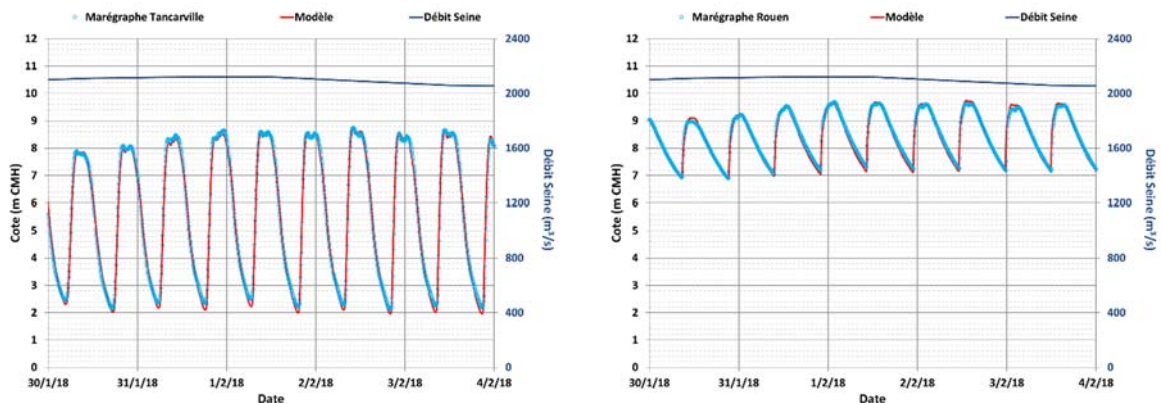


Figure 53- Evolution des niveaux d'eau sur une fenêtre temporelle de 5 jours - Episode fluvio-maritime de février 2018

Note technique

MODELISATION DES INONDATIONS EN ESTUAIRE DE LA SEINE : DYNAMIQUE ET EMPRISE DES INONDATIONS

- Une analyse statistique des écarts sous forme de tableaux afin de quantifier la précision du calage. Compte tenu des objectifs de la présente étude en lien avec la gestion du risque d'inondations, cette évaluation se concentre sur les niveaux d'eau supérieurs au percentile 50% (P50) des valeurs mesurées sur la période. L'analyse est effectuée sur les 5 jours encadrant l'événement mais également pour le cycle de marée central de l'événement. Les variables statistiques utilisées sont définies dans le Tableau 1.

Conformément aux attentes exprimées dans le CCTP, la valeur choisie pour X est 10 centimètres et la tolérance sur le déphasage temporel entre les niveaux d'eau observés et modélisés est de plus ou moins 15 minutes.

Tableau 4- Méthode d'évaluation statistique de l'erreur aux marégraphes

Variable	Définition
Erreur	L'erreur est définie comme la différence entre les valeurs obtenues par TELEMAC r et les données d : $e_i = r_i - d_i$
Erreur Absolue Moyenne (MAE)	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i $
Ecart type (SD)	$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (e_i - \bar{e})^2}$
CF(X)	Fraction (pourcentage) d'erreurs compris dans l'intervalle [-X;X]
POF(X)	Fraction (pourcentage) d'erreurs supérieures à X
NOF(-X)	Fraction (pourcentage) d'erreurs inférieures à -X
POF(2X)	Fraction (pourcentage) d'erreurs supérieures à 2X
NOF(-2X)	Fraction (pourcentage) d'erreurs inférieures à -2X

En complément, un indicateur permettant d'estimer la capacité du modèle à reproduire la tenue de plein est introduit pour le cycle de marée central de l'évènement. Comme illustré ci-dessous sur la Figure 54, cette durée est définie comme la durée pendant laquelle les hauteurs d'eau simulées sont supérieures au percentile 70% (P70) des données mesurées au marégraphe sur le cycle de marée.

Un indicateur basé sur la cote maximale de pleine mer observée, initialement suggéré, n'a pas été retenu en raison de la présence de mesures singulières (voire aberrantes) comme illustré plus loin dans le rapport pour la tempête de janvier 2018 (cf. Figure 59 au chapitre 7.1). Un tel indicateur établi à partir de la valeur maximale implique en effet une démarche d'évaluation manuelle (potentiellement subjective) des données mesurées.

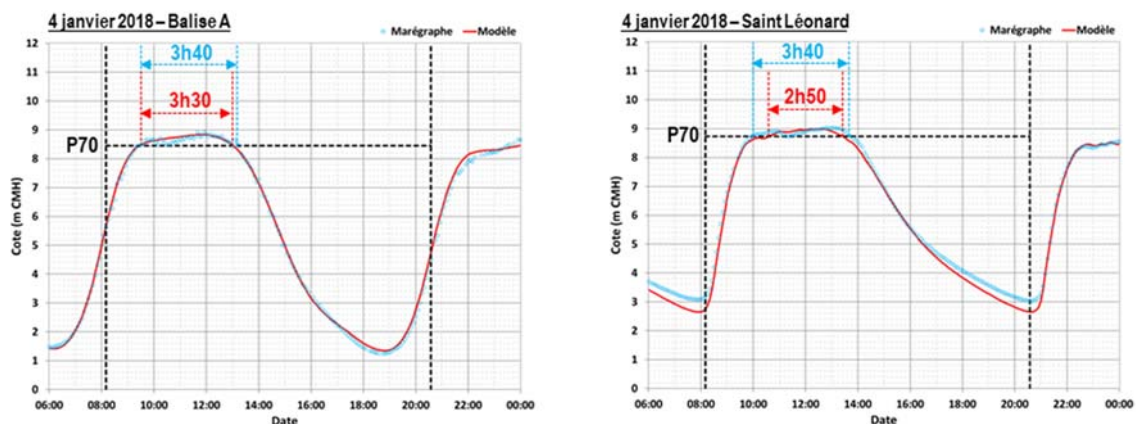


Figure 54- Durée de dépassement du percentile 70% (P70) des données mesurées, sur un cycle de marée

6.2. INONDATIONS EN LIT MAJEUR

En complément à cette analyse quantitative des variations du plan d'eau au travers des mesures aux marégraphes tout au long de l'estuaire, les résultats sont également comparés qualitativement aux observations disponibles en matière d'emprises d'inondées. L'ensemble des cartographies est reporté en Annexe 8.

- Laisses de crues recensées pour les épisodes du 1^{er} février 2018, 13 février 2020 et 11 mars 2020. Les cotes d'eau maximales modélisées peuvent également être comparées aux cotes d'eau observées pour certains repères ayant fait l'objet d'un nivellement à la suite de l'épisode de débordement. A noter cependant que ces cotes relevées sont fournies à titre indicatif sur le site www.reperesdecruces.developpement-durable.gouv.fr, à défaut d'un nivellement par un géomètre expert.

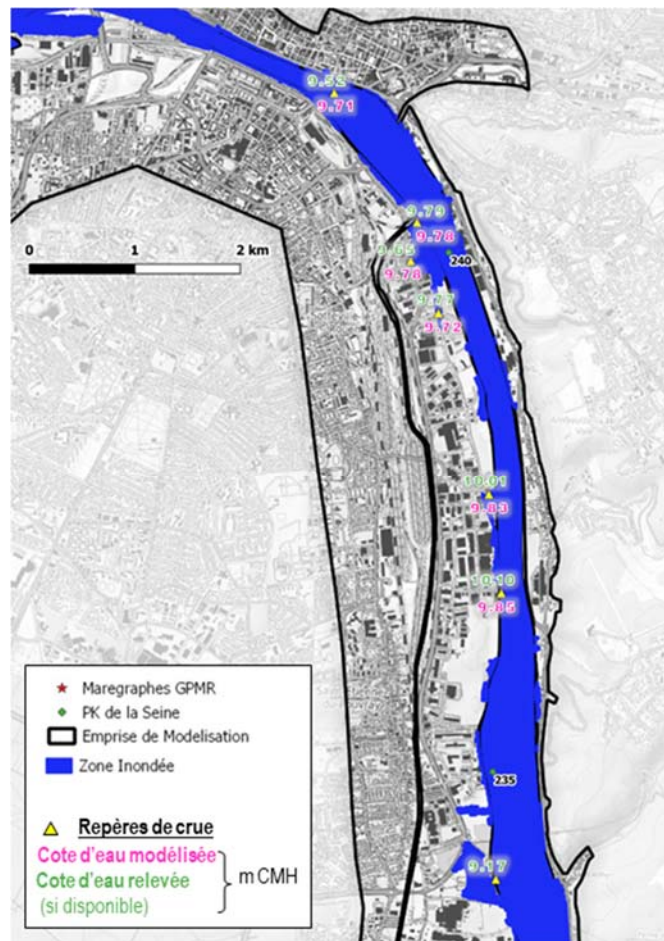


Figure 55- Comparaison des inondations maximales modélisées et des laisses d'inondations - Episode du 1^{er} février 2018 en amont de Rouen

- Délimitation des zones inondées le 1^{er} février et le 2 février 2018 entre Petit-Couronne (PK 250) et Le-Mesnil-sous-Jumièges (PK 285), établies par le CEREMA sur la base de photographies obliques acquises par un drone. Les cartographies présentées font apparaître la position planimétrique des clichés filtrés par jour. Le rapport associé à cette prestation (référence **[14]**) présente de façon détaillée la méthodologie suivie et pointe les approximations dans les données fournies. Ces approximations s'expliquent notamment par l'impossibilité de lier les clichés à un instant précis du cycle de marée au droit du site (instants de basse mer et de pleine mer) et par des difficultés diverses pour leur interprétation : masquage par la végétation ou le bâti, imprécision sur la géolocalisation des clichés, problème de luminosité ou de résolution insuffisante, faible nombre de clichés pour certaines zones, etc. De plus, il est important de préciser que ce travail de photo-interprétation ne concerne que les secteurs suffisamment couverts par les prises de vues : ainsi, une zone potentiellement inondée au cours de l'épisode mais trop éloignée des clichés n'est pas identifiée par ce travail de reconstitution des limites d'inondations.

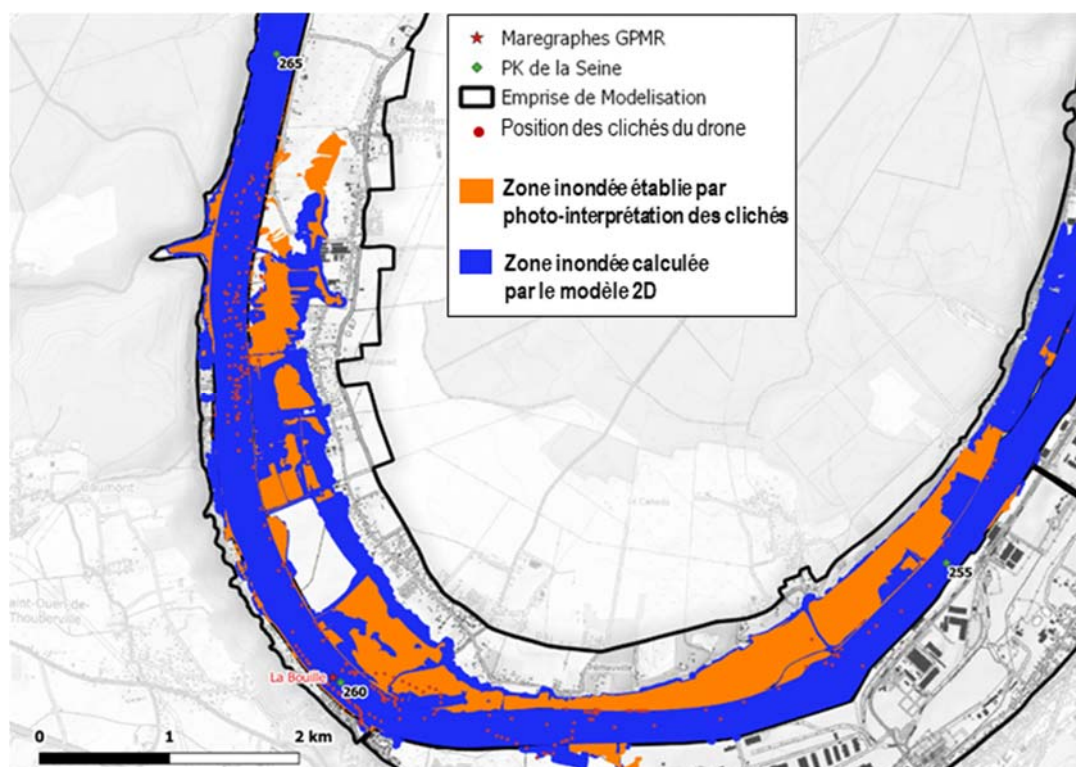


Figure 56- Comparaison des inondations maximales modélisées et reconstituées par photo-interprétation - Episode du 1^{er} février 2018 au droit de Sahurs

7. RESULTATS DU CALAGE

Les sections suivantes décrivent, évènement par évènement, les principales observations relatives aux résultats de calage. La ligne d'eau des niveaux d'eau maximaux mesurés et modélisés le long de l'estuaire de la Seine est également présentée pour chaque évènement, accompagnée d'un tableau de valeurs indiquant les écarts marégraphe par marégraphe, ainsi que l'évolution temporelle des niveaux d'eau au droit de plusieurs marégraphes répartis le long de l'estuaire : Tancarville (secteur maritime), Heurteauville (secteur fluvio-maritime aval), Rouen (secteur fluvio-maritime amont) et Elbeuf (secteur fluvial).

Pour une meilleure lisibilité, les résultats complets sous forme de graphiques, tableaux et cartographies sont reportés en Annexe 8.

7.1. TEMPETE DE JANVIER 2018 (ELEANOR)

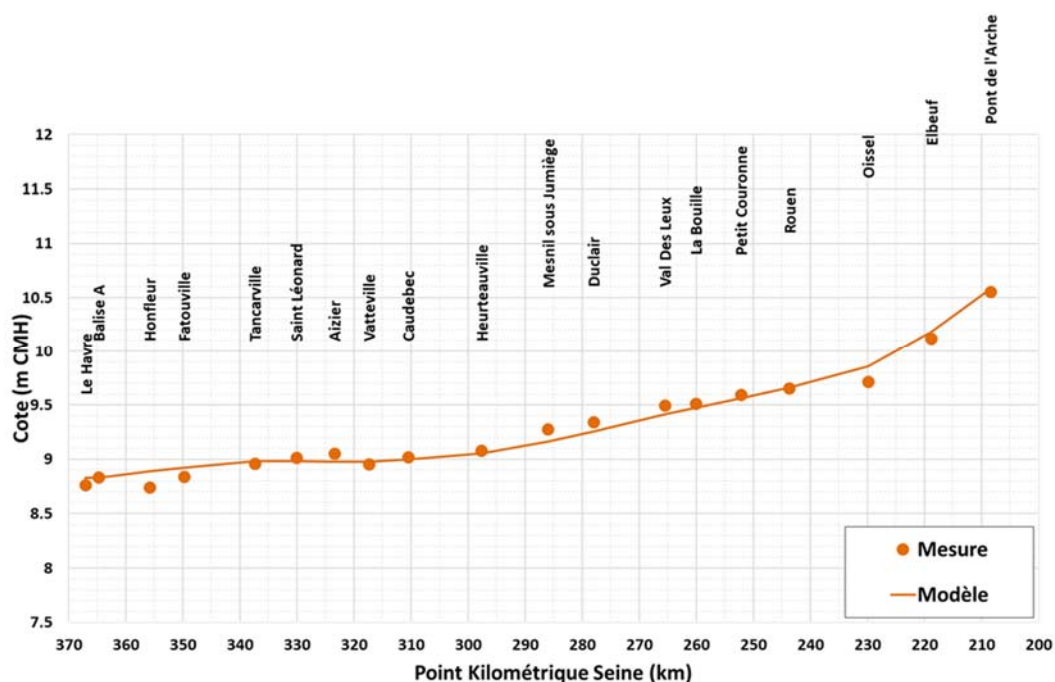


Figure 57- Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 4 janvier 2018

Tableau 5- Ecart de niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 4 janvier 2018

	Le Havre	Balise A	Honfleur	Fatouville	Tancarville	Saint Léonard	Aizier	Vatteville	Caudébec	Heurteauville	Mesnil sous Jumiègne	Duclair	Val des Leux	La Bouille	Petit Couronne	Rouen	Oissel	Elbeuf	Pont de l'Arche
Ecart (m)	0.07	0.00	0.15	0.08	0.02	-0.03	-0.07	0.02	-0.02	-0.03	-0.11	-0.08	-0.08	-0.04	-0.03	0.01	0.14	0.06	0.03

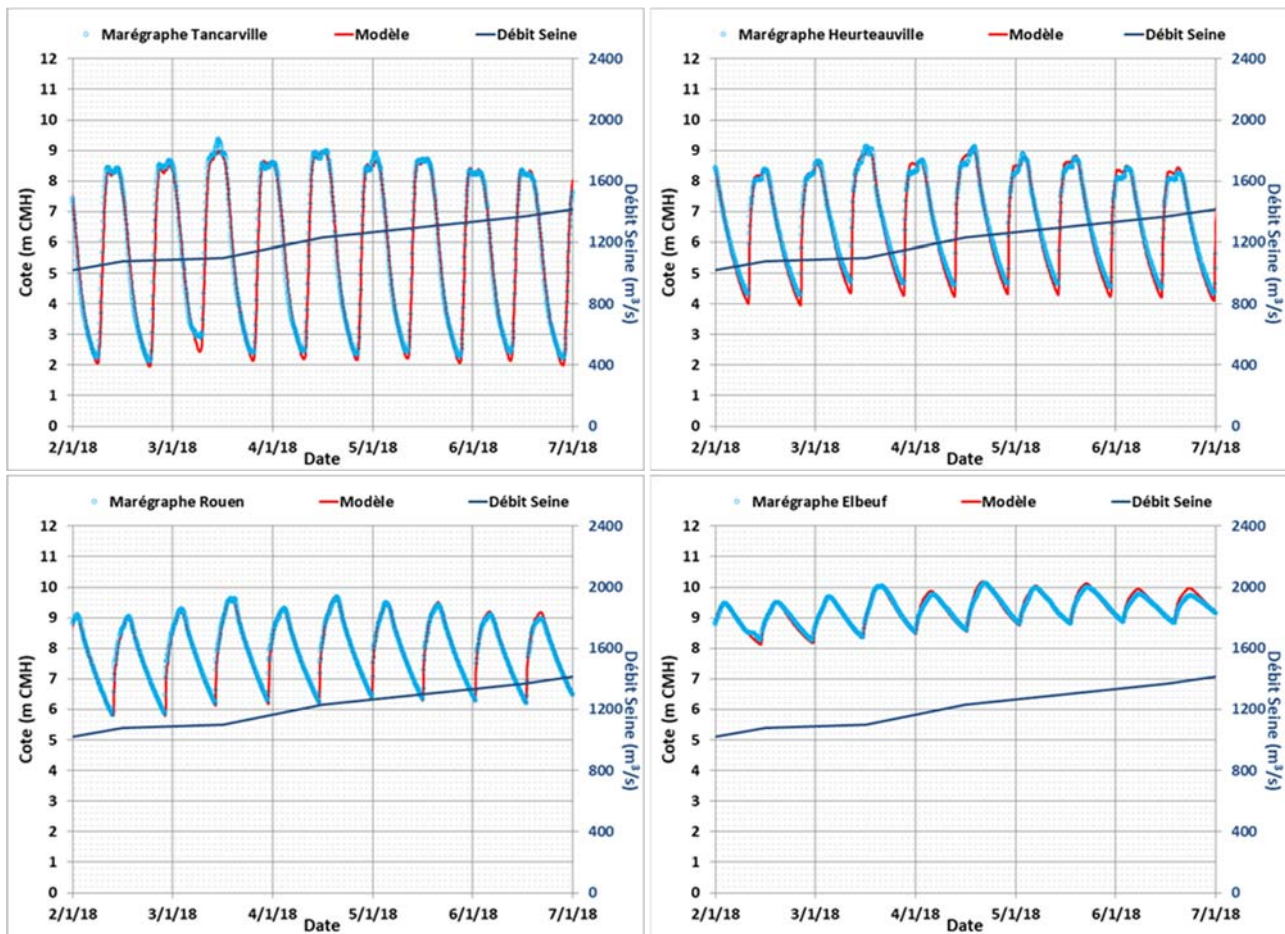


Figure 58- Evolution temporelle des niveaux d'eau mesurés et modélisés le long de l'estuaire - Tempête de janvier 2018 (Eleanor)

Les résultats de calage obtenus pour l'épisode de tempête Eleanor (début janvier 2018) sont cohérents avec les observations sur l'ensemble de l'estuaire. Le phasage du signal de marée à l'embouchure et sa déformation en remontant vers l'amont sont correctement représentés par le modèle.

Sur la période du 2 au 7 janvier 2018, l'erreur absolue moyenne (MAE) entre les niveaux d'eau modélisés et observés atteint 11 cm au marégraphe d'Oissel mais reste inférieure à 10 cm sur l'ensemble des autres marégraphes.

Les meilleures performances statistiques sont relevées au droit des marégraphes de Val-des-Leux, La Bouille et Petit-Couronne, avec plus de 90% des niveaux modélisés compris dans une enveloppe délimitée à +/- 10 cm autour de la valeur mesurée.

A l'inverse, les niveaux d'eau modélisés au marégraphe d'Oissel sont un peu surestimés pour cet événement : 44% des écarts à la mesure sont supérieurs à +10 cm (POF(X)) et 23% sont supérieurs à +20 cm (POF(2X)). Néanmoins, ces écarts ne sont pas constants temporellement puisque le modèle est cohérent durant les journées du 2 et 3 janvier.

Il convient de rappeler que cet événement de janvier 2018 est de type maritime avec un impact observé plutôt sur les niveaux d'eau en partie aval de l'estuaire. L'évènement fluvio-maritime de février 2018, qui a conduit à des niveaux d'eau plus importants entre Oissel et Pont-de-l'Arche, a été privilégié pour affiner la calibration du modèle sur ce secteur amont de l'estuaire.

Il est également noté que les niveaux de basse mer sont légèrement sous-estimés par le modèle entre Tancarville et Duclair, en lien avec une probable surestimation des courants de jusant. Bien que les niveaux bas ne soient pas examinés en priorité dans le cadre de cette étude dédiée aux niveaux d'eau conduisant à des phénomènes de débordement (niveaux extrêmes), ce défaut peut dégrader la capacité du modèle à reproduire le gonflement des niveaux d'eau dans l'estuaire sur une période longue de plusieurs cycles de marée. Ce phénomène de gonflement est observé lorsque les phases de revif se produisent avec un vent d'ouest quasi permanent, ne permettant pas à l'eau de bien s'écouler vers l'aval de l'estuaire.

Les niveaux de pleine mer sont quant à eux bien captés par le modèle pour la marée du 4 janvier 2018, comme en témoigne le graphique représentant la ligne d'eau des niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire.

En revanche, lors de la marée du 3 janvier 2018, il apparaît que le modèle tend à sous-estimer de près de 40 cm les niveaux de pleine mer atteints en partie aval de l'estuaire. Ce défaut s'explique probablement par une représentation imprécise des conditions de forçages en vent au cours de cet épisode de tempête, comme expliqué ci-après.

La Figure 59 présente une comparaison du vent mesuré à Balise A (donnée fournie par le GPMR) et du vent issu du modèle de prévision horaire ERA5 imposé en forçage du modèle hydrodynamique. Cette figure montre une nette sous-estimation par le modèle ERA5 des vents mesurés à Balise A lors de cet épisode, en particulier pendant le flot de la marée du 3 janvier. Alors que le modèle ERA5 estime une intensité du vent proche de 25 nœuds tout au long de la journée, les mesures brutes relèvent une intensité pouvant dépasser 40 nœuds avec des rafales au-delà de 50 nœuds. En conséquence, le modèle hydrodynamique ne parvient pas ici à représenter correctement le phénomène de gonflement des niveaux d'eau généré par ce fort vent de secteur ouest.

Il convient de préciser que ce défaut de sous-estimation des effets du vent, en particulier les rafales non visibles par le modèle de prévision horaire ERA5, est à relativiser puisqu'il n'aura pas de conséquence sur la modélisation des scénarios théoriques en phase d'exploitation. L'objectif de ces scénarios théoriques sera d'atteindre un niveau cible en certains secteurs de l'estuaire par une combinaison « plausible » de forçages.

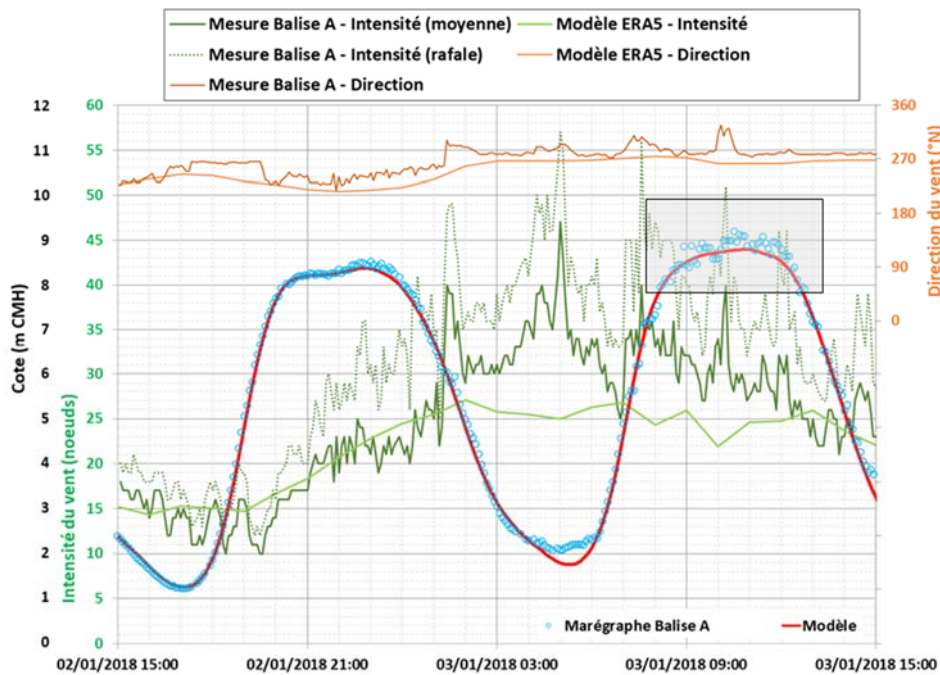


Figure 59- Comparaison du vent mesuré et issu du modèle ERA5 à Balise A le 3 janvier 2018

7.2. EPISODE FLUVIO-MARITIME DE FEVRIER 2018

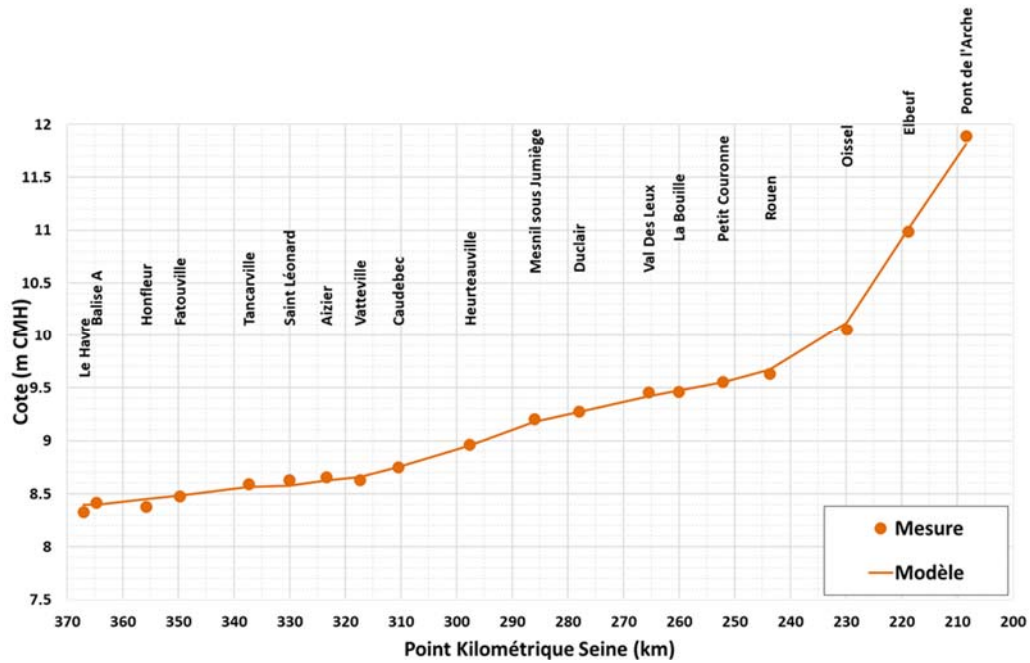


Figure 60- Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 1^{er} février 2018

Tableau 6- Ecart de niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 1^{er} février 2018

	Le Havre	Balise A	Honfleur	Fatouville	Tancarville	Saint Léonard	Aizier	Vatteville	Caudebec	Heurteauville	Mesnil sous Jumièges	Duclair	Val des Leux	La Bouille	Petit Couronne	Rouen	Oïssel	Elbeuf	Pont de l'Arche
Ecart (m)	0.06	-0.02	0.07	0.00	-0.03	-0.06	-0.04	0.03	0.00	-0.01	-0.03	-0.01	-0.04	0.01	0.00	0.03	0.07	0.02	-0.07

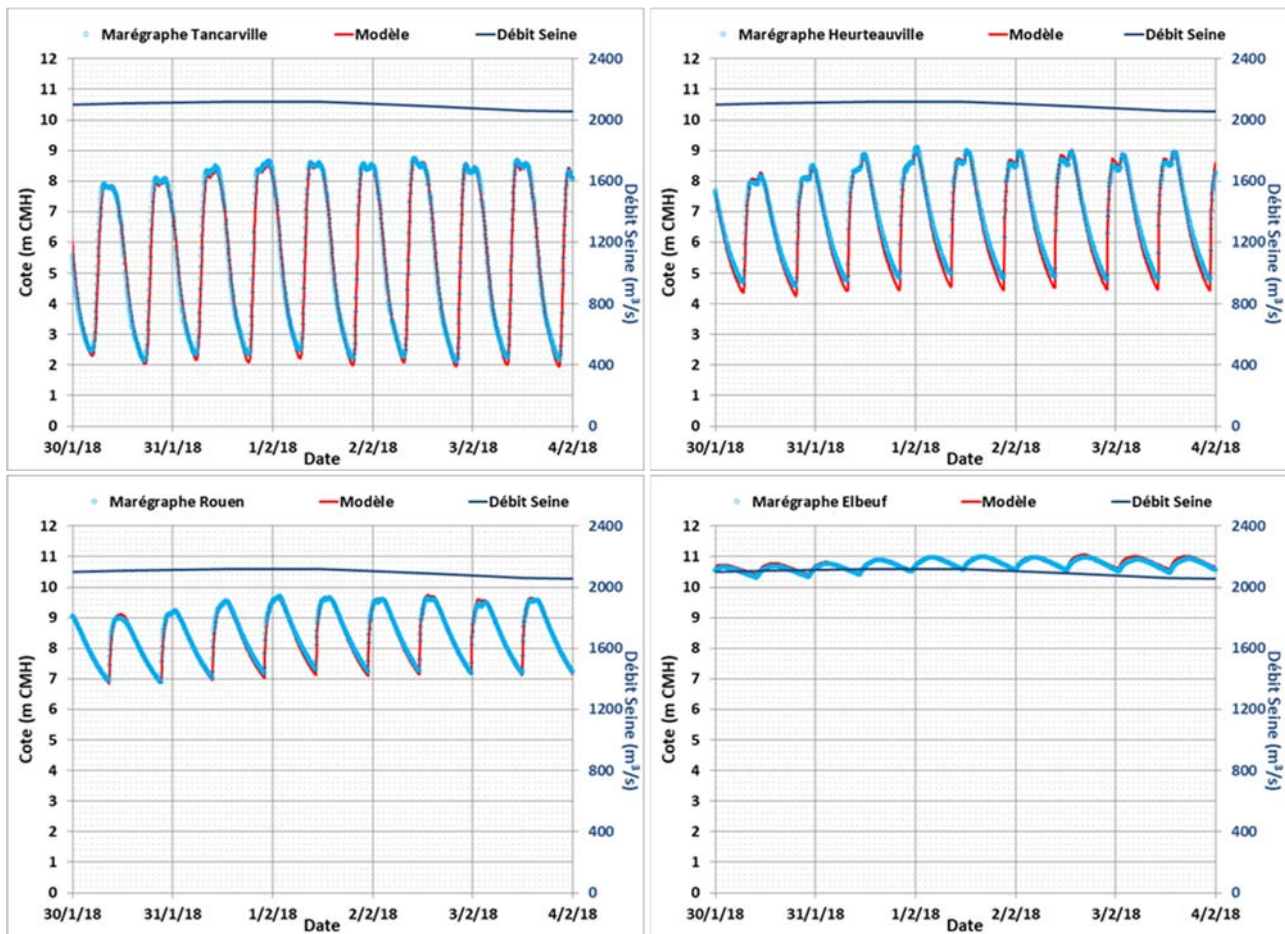


Figure 61- Evolution temporelle des niveaux d'eau mesurés et modélisés le long de l'estuaire - Episode fluvio-maritime de février 2018

Les performances du modèle sont satisfaisantes pour cet épisode de débordement à caractère fluvio-maritime survenu début février 2018. Le débit de la Seine a dépassé 2 000 m³/s pendant une dizaine de jours entre fin janvier et début février, avec un pic à 2 120 m³/s le 31 janvier soit le plus fort débit journalier observé à la station de Vernon ces dernières années.

La mise en place d'un frottement variable en fonction du débit de la Seine permet d'améliorer la modélisation des niveaux d'eau en amont de Rouen, dans un secteur où d'importants débordements ont été constatés.

La ligne d'eau des niveaux d'eau maximaux observés le long de l'estuaire durant la marée du 1^{er} février 2018 est particulièrement bien reproduite par le modèle. Durant ce même cycle de marée ayant conduit aux débordements les plus significatifs, l'erreur absolue moyenne (MAE) entre les niveaux d'eau modélisés et observés est inférieure à 5 cm sur l'ensemble des marégraphes. A l'exception de Pont-de-l'Arche où MAE = 7 cm mais qui contient des lacunes dans les données. Plus de 95% des niveaux modélisés sont situés dans une enveloppe de +/- 10 cm autour de la mesure, à l'exception de Oissel (CF(X) = 78%) et le Havre (CF(X) = 92%).

Les résultats de calage restent très satisfaisants sur une période plus étendue comprise entre le 30 janvier et le 4 février 2018. L'erreur absolue moyenne (MAE) est inférieure à 10 cm en chaque marégraphe de l'estuaire. Aucun point ne s'écarte sensiblement des observations, comme en témoignent les indicateurs statistiques POF(2X) et NOF(-2X) qui restent partout inférieurs à 2.5%.

Par ailleurs, comme évoqué pour l'évènement de janvier 2018, les niveaux de basse mer ont tendance à être légèrement sous-estimés par le modèle entre Tancarville et Duclair.

De nombreuses laisses de crues de la Seine ont été répertoriées durant cet évènement entre l'île Lacroix à Rouen (PK 242) et Criquebeuf-sur-Seine (PK 210). La comparaison de ces données et des résultats simulés montre que le modèle reproduit globalement bien les hauteurs d'inondations en lit majeur. Les cotes d'eau maximales modélisées durant le cycle de marée du 1^{er} février sont pour la plupart cohérentes aux repères ayant fait l'objet d'un nivellement, comme en témoignent la Figure 55 (cf. section C. 6.2) et la Figure 62 ci-après.

Les seuls écarts notables concernent le secteur de Criquebeuf-sur-Seine et Martot où les cotes maximales modélisées ont tendance à surestimer les observations. Une probable explication à ces écarts réside dans la représentation approximative de la section d'écoulement de l'Eure, en l'absence de données bathymétriques autre que le LIDAR qui ne permet pas de relever le fond du cours d'eau.

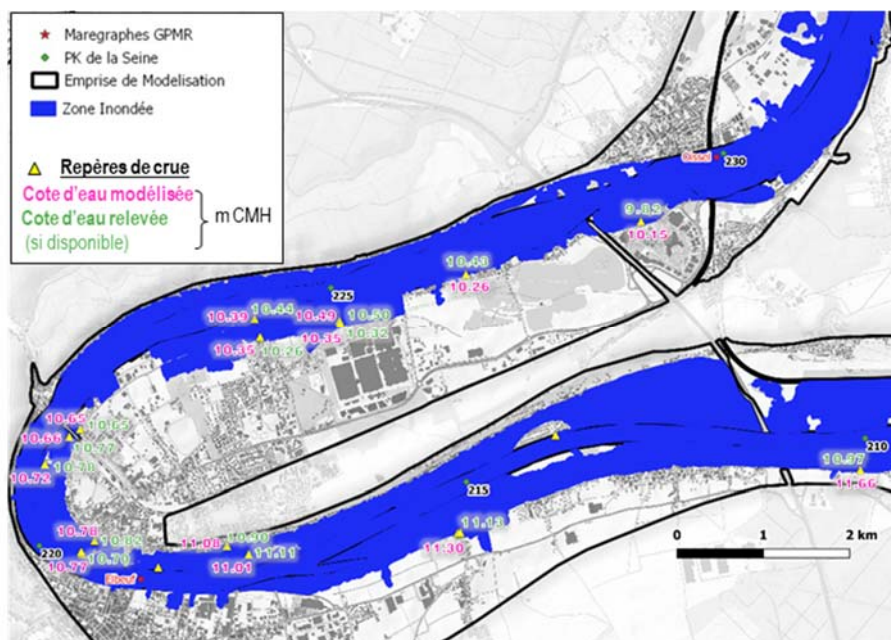


Figure 62- Comparaison des inondations maximales modélisées et des laisses d'inondations - Episode du 1^{er} février 2018 entre Criquebeuf-sur-Seine et Oissel

Les cartographies reportées en Annexe 8 (et sur la Figure 56 au chapitre C. 6.2) présentent également l'enveloppe maximale des inondations pour les cycles de marée du 1^{er} février et du 2 février, pour comparaison avec les contours des zones inondées reconstituées par le CEREMA à partir des photographies obliques acquises par un drone entre Petit-Couronne et Le-Mesnil-sous-Jumièges (référence [14]).

Le modèle se montre globalement cohérent dans la représentation des zones inondées sur ce secteur. Néanmoins ces contours ne peuvent constituer un critère de calage mais seulement un point de comparaison compte tenu des approximations associées à la création de ces données vectorielles, explicitées précédemment au chapitre C 6.2 et dans le document [14]. Il convient notamment de rappeler que des zones potentiellement inondées, mais trop éloignées ou insuffisamment couvertes par les clichés, ne sont pas traitées par ce travail de photo-interprétation.

Au-delà des limites d'utilisation associées à ces données, le modèle hydrodynamique de l'estuaire de la Seine comporte lui aussi des imperfections qui peuvent expliquer les écarts constatés sur les emprises d'inondations :

- Le modèle résout les équations régissant la dynamique des écoulements à surface libre mais ne permet pas de représenter les échanges entre les nappes phréatiques et la Seine (fond perméable).
- Par manque d'homogénéité dans la donnée à l'échelle de l'estuaire, les ouvrages traversant les digues de protection (buses, pont-cadre, etc.) équipés pour certains de clapets anti-retour ne sont pas pris en compte dans le modèle. Le phénomène de ressuyage des terrains inondés en lit majeur entre deux cycles de marée ne peut donc être modélisé de manière complète, en dehors des connexions au lit mineur par des zones basses sans ouvrages. Le test de sensibilité mené au chapitre C 5 met en évidence les potentiels impacts de ce choix sur l'inondabilité du lit majeur.
- Les passages inférieurs sous des infrastructures en remblais en lit majeur (chaussées routières, passages busés) ne sont pas représentés de façon exhaustive au sein du modèle, du fait de leur absence de détection par la technologie LIDAR ou en raison de leur taille réduite comparativement au maillage.

7.3. TEMPETE DE MARS 2008

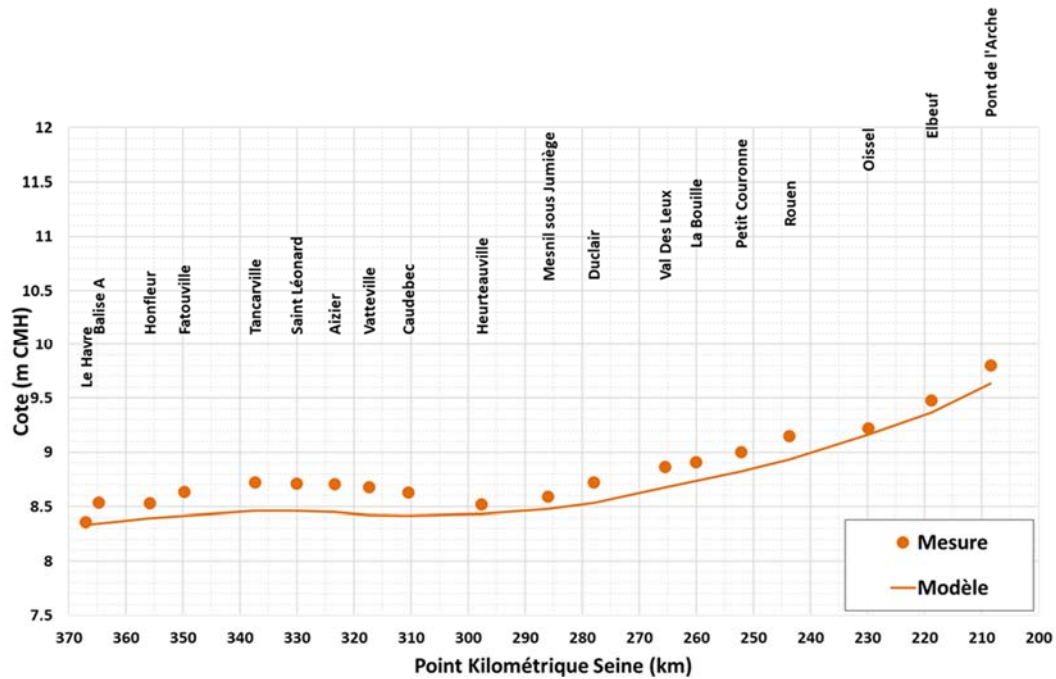


Figure 63- Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 21 mars 2008

Tableau 7- Ecart de niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 21 mars 2008

	Le Havre	Balise A	Honfleur	Fatouville	Tancarville	Saint Léonard	Aizier	Vatteville	Caudebec	Heurteauville	Mesnil sous Jumiège	Duclair	Val des Leux	La Bouille	Petit Couronne	Rouen	Oissel	Elbeuf	Pont de l'Arche
Ecart (m)	-0.03	-0.19	-0.14	-0.22	-0.26	-0.25	-0.26	-0.26	-0.22	-0.09	-0.11	-0.19	-0.19	-0.17	-0.18	-0.22	-0.06	-0.12	-0.17

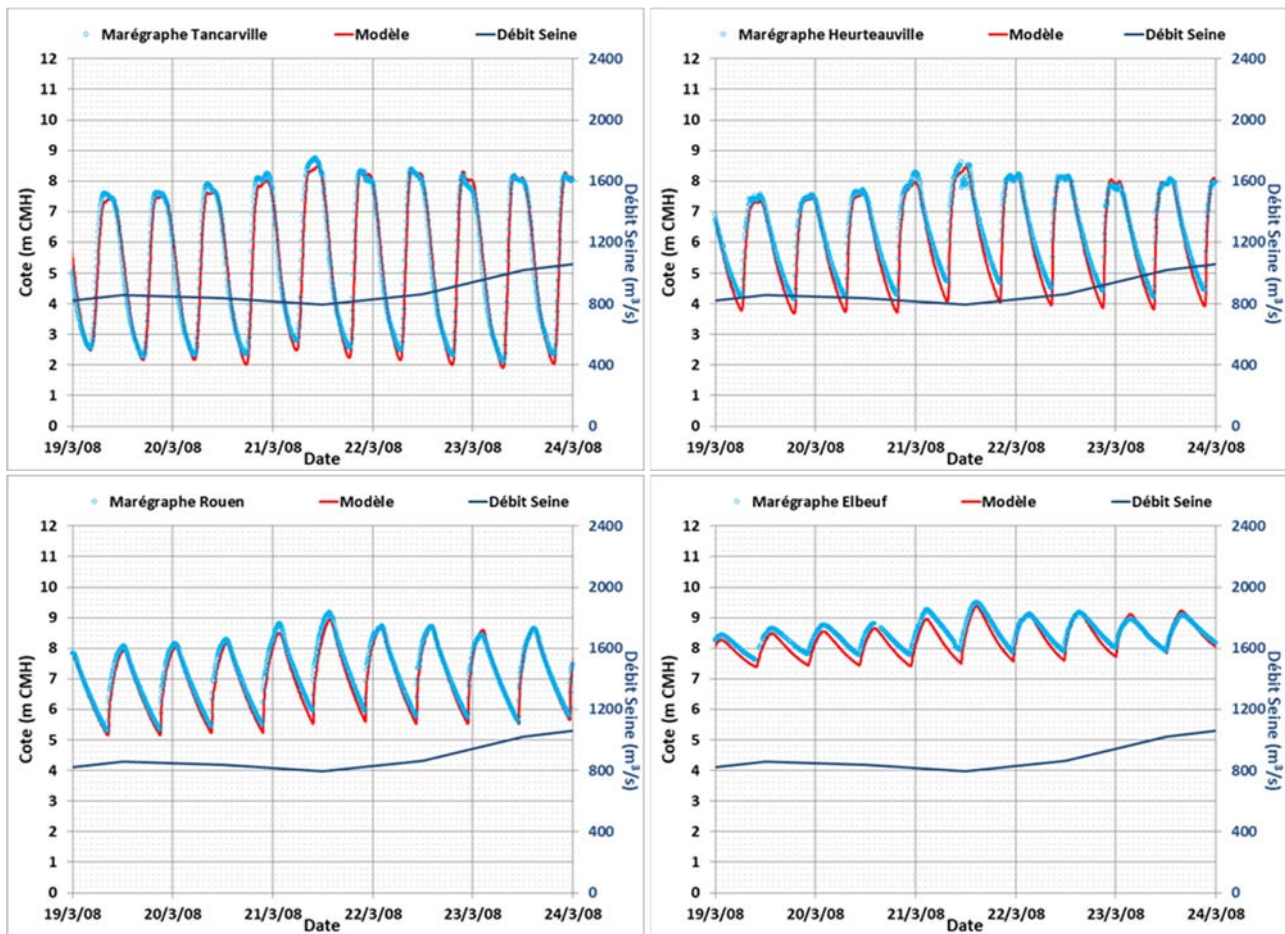


Figure 64- Evolution temporelle des niveaux d'eau mesurés et modélisés le long de l'estuaire – Tempête de mars 2008

Pour cet épisode à caractère maritime survenu en mars 2008, combinant un vent fort de secteur ouest et une marée de vive-eau exceptionnelle, les niveaux d'eau simulés par le modèle sont globalement inférieurs aux observations sur l'ensemble de l'estuaire.

Les écarts sur les niveaux d'eau maximaux atteints durant le cycle de marée du 21 mars varient entre -5 cm (marégraphe du Havre) et -30 cm (marégraphe de Balise A) avec une erreur moyenne autour de -20 cm. Sur une période de 5 jours entre le 19 et le 24 mars 2008, l'erreur absolue moyenne (MAE) entre les niveaux d'eau modélisés et observés est de 13 cm à Pont-de-l'Arche, 15 cm à Elbeuf, et reste inférieure ou égale à 10 cm sur l'ensemble des autres marégraphes.

Les principaux facteurs susceptibles d'expliquer ces écarts sur la modélisation des niveaux de pleine mer sont :

- La bathymétrie intégrée au modèle, issue de données relativement récentes comme décrit au chapitre A. 1.2. Compte tenu de l'évolution morphologique naturelle du lit de la Seine au fil des crues ou d'origine anthropique (approfondissement du chenal notamment), cette bathymétrie présente nécessairement des incohérences avec celle associée à l'évènement de mars 2008 que le modèle cherche à reproduire.
- L'incertitude liée aux surcotes imposées sur la frontière maritime du modèle. Comme mentionné dans la description des forçages au chapitre C 3.3, le modèle de grande emprise MARS2D peut en effet présenter une tendance à sous-estimer les surcotes observées aux marégraphes le long des côtes. A titre indicatif pour la tempête Xynthia (février 2010), ces biais sont estimés par l'IFREMER à -8 cm en moyenne (référence [15]) avec des variations possibles de plusieurs cm d'un secteur à un autre (cf. Tableau 2). Comme explicité au chapitre C 7.1 pour l'évènement de janvier 2018, une représentation imprécise de la chronologie infra-horaire des variations de vent et de pression peut impacter sensiblement la modélisation des niveaux d'eau de pleine mer.
- Comme évoqué précédemment pour l'évènement de janvier 2018 (section C. 7.1), la difficulté pour le modèle à reproduire le gonflement des niveaux d'eau dans l'estuaire induit par un vent de secteur ouest soufflant sur plusieurs cycles de marée.

7.4. CRUE DE MARS 2001

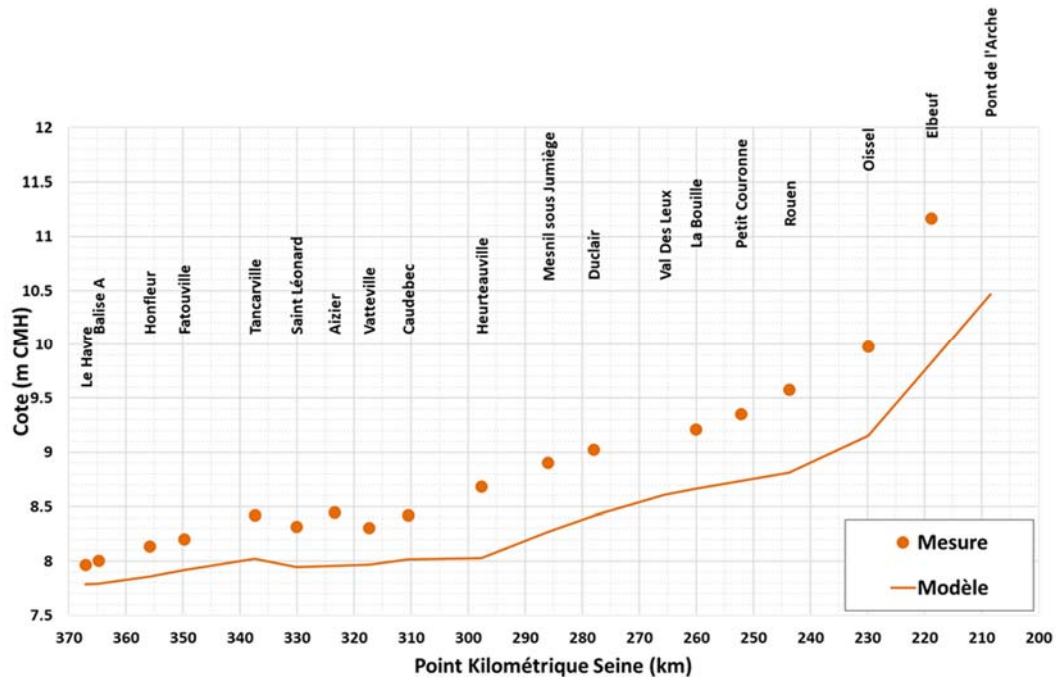


Figure 65- Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 28 mars 2001

Tableau 8- Ecart de niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 28 mars 2001

	Le Havre	Balise A	Honfleur	Fatouville	Tancarville	Saint Léonard	Aizier	Vatteville	Caudebec	Heurteauville	Mesnil sous Jumièges	Duclair	Val des Leux	La Bouille	Petit Couronne	Rouen	Oissel	Elbeuf	Pont de l'Arche
Ecart (m)	-0.18	-0.21	-0.28	-0.28	-0.40	-0.37	-0.49	-0.34	-0.41	-0.66	-0.63	-0.61		-0.55	-0.62	-0.77	-0.83	-1.35	

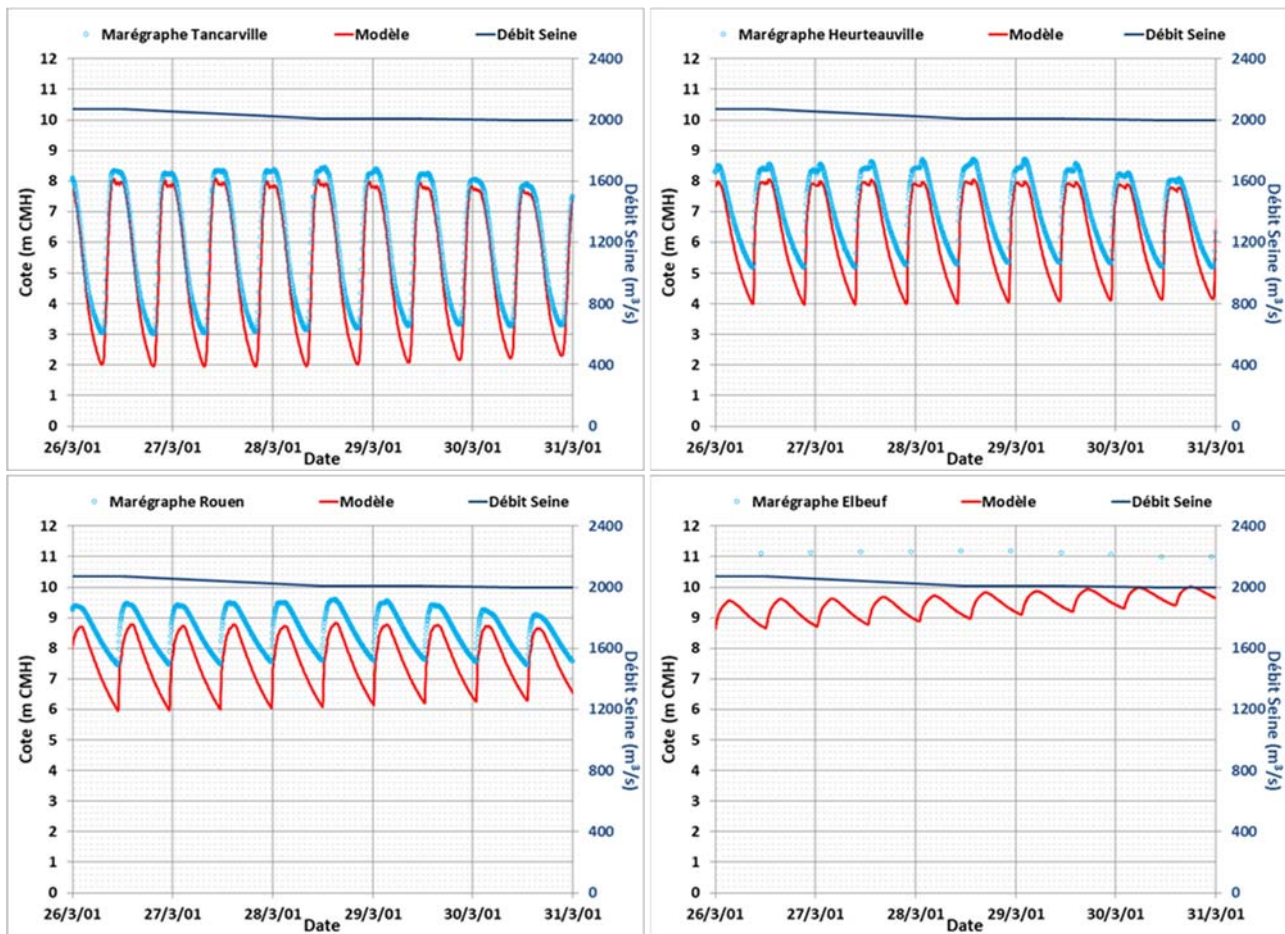


Figure 66- Evolution temporelle des niveaux d'eau mesurés et modélisés le long de l'estuaire – Crue de mars 2001

Pour cet évènement de type fluvial survenu en mars 2001, les niveaux d'eau simulés par le modèle se situent assez nettement en-dessous des niveaux observés au droit des marégraphes et cette sous-estimation semble s'accroître à mesure que l'on remonte vers l'amont de l'estuaire.

L'un des facteurs à l'origine de ces importants écarts est possiblement la bathymétrie de l'estuaire puisque cet évènement de 2001 est assez ancien comparativement aux dates d'acquisition des données bathymétriques intégrées au modèle. Ces données récentes prennent en compte les différentes phases d'approfondissement du chenal ainsi que les modifications morphologiques consécutives au passage des crues de la Seine depuis 2001.

Dans une moindre mesure, les aménagements de Port 2000 achevés après la crue de mars 2001 ont aussi pu contribuer à modifier la dynamique des écoulements au niveau des marégraphes implantés à l'embouchure de la Seine.

Un autre facteur majeur à l'origine de ces écarts est certainement l'absence complète de surcote atmosphérique imposée en condition de forçage pour cet évènement datant de 2001. En effet, les données de surcotes issues du modèle MARS-2D élaboré par l'IFREMER (référence [15]) ne sont disponibles qu'à partir de l'année 2006. Ceci peut en partie expliquer l'incapacité du modèle à bien représenter, à l'échelle d'une marée, la cote de pleine mer pour les marégraphes situés en partie aval de l'estuaire.

Cette sous-estimation est aussi à relier à une difficulté pour le modèle à reproduire le gonflement des niveaux d'eau dans l'estuaire sur une période de plusieurs cycles de mortes-eaux et vives-eaux, et à un défaut de représentation des variations infra-horaires du vent par le modèle de prévision ERA5 (cf. chapitre 7.1 pour l'épisode de janvier 2018).

L'estimation du débit de la Seine imposé en condition limite amont du modèle pourrait également constituer une autre source d'incertitude pour la représentation de cet évènement de 2001. Sur le site de la Banque Hydro, il est précisé que les mesures de débit journalier à la station hydrométrique de Vernon (code H8100020) ne sont effectives qu'à partir de l'année 2009. Avant cette date, les débits de la Seine à Vernon sont reconstitués par extrapolation à partir des débits mesurés en amont à la station de Poissy (code H7900010).

A titre de comparaison, l'utilisation par la DREAL Normandie (Service Ressources Naturelles) d'un modèle hydraulique unidimensionnel de l'estuaire conduit à une sous-estimation de l'ordre de 30 cm de la plus forte cote de pleine mer observée à Elbeuf (10.84 m CMH contre 11.17 m CMH observé). Ce modèle hydraulique 1D est forcé en amont à partir des débits observés de la Seine à Vernon et de l'Eure à Louviers, et en aval à partir des niveaux d'eau mesurés au marégraphe de Tancarville. Ce retour d'expérience partagée par la DREAL Normandie apporte un éclairage complémentaire et met en évidence les limitations du modèle bidimensionnel pour cet épisode de crue en partie amont de l'estuaire.

Il est également important de souligner que cet évènement de mars 2001 est caractéristique d'une situation de crue de nappe, processus non pris en compte par le logiciel de modélisation développé pour la présente étude. Au-delà de l'incertitude attachée à la valeur du débit à Vernon, il est donc probable que ce débit soit en réalité fortement soutenu voire augmenté par les apports de la nappe phréatique à l'entrée et tout au long de l'estuaire de la Seine.

A titre d'information, une majoration de 200 m³/s du débit de la Seine et de l'Eure aboutit à un niveau de pleine mer de 11.06 m CMH à Elbeuf à partir du modèle hydraulique 1D utilisé par la DREAL Normandie, soit une augmentation de 22 cm par rapport à une simulation avec les hypothèses initiales de débit.

7.5. COMPLEMENT : EPISODE FLUVIO-MARITIME DE FEVRIER 2020

Rappel : cette simulation complémentaire est menée à l'issue de la phase de calage et validation, sans modification des paramètres de calcul établis précédemment. Les observations disponibles pour cet évènement sont exploitées à titre de comparaison mais ne constituent pas des critères de calage du modèle.

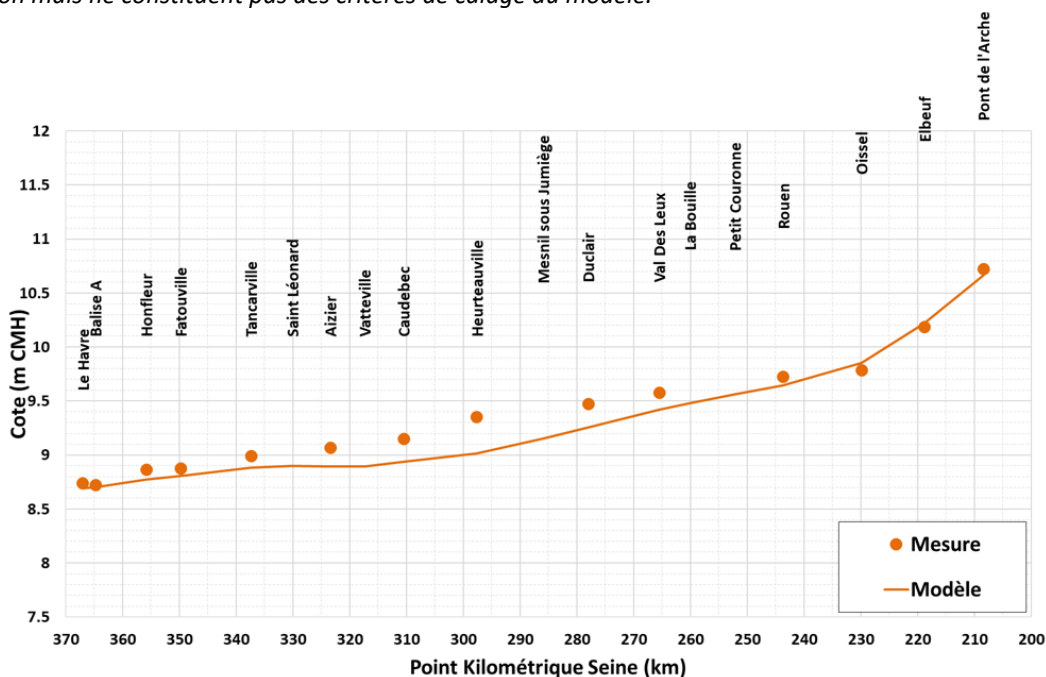


Figure 67- Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 13 février 2020

Tableau 9- Ecart de niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 13 février 2020

	Le Havre	Balise A	Honfleur	Fatouville	Tancarville	Saint Léonard	Aizier	Vatteville	Caudebec	Heurteauville	Mesnil sous Jumiège	Duclair	Val des Leux	La Bouille	Petit Couronne	Rouen	Oissel	Elbeuf	Pont de l'Arche
Ecart (m)	-0.05	-0.02	-0.09	-0.07	-0.11		-0.18		-0.21	-0.34		-0.22	-0.16			-0.08	0.06	0.03	-0.06

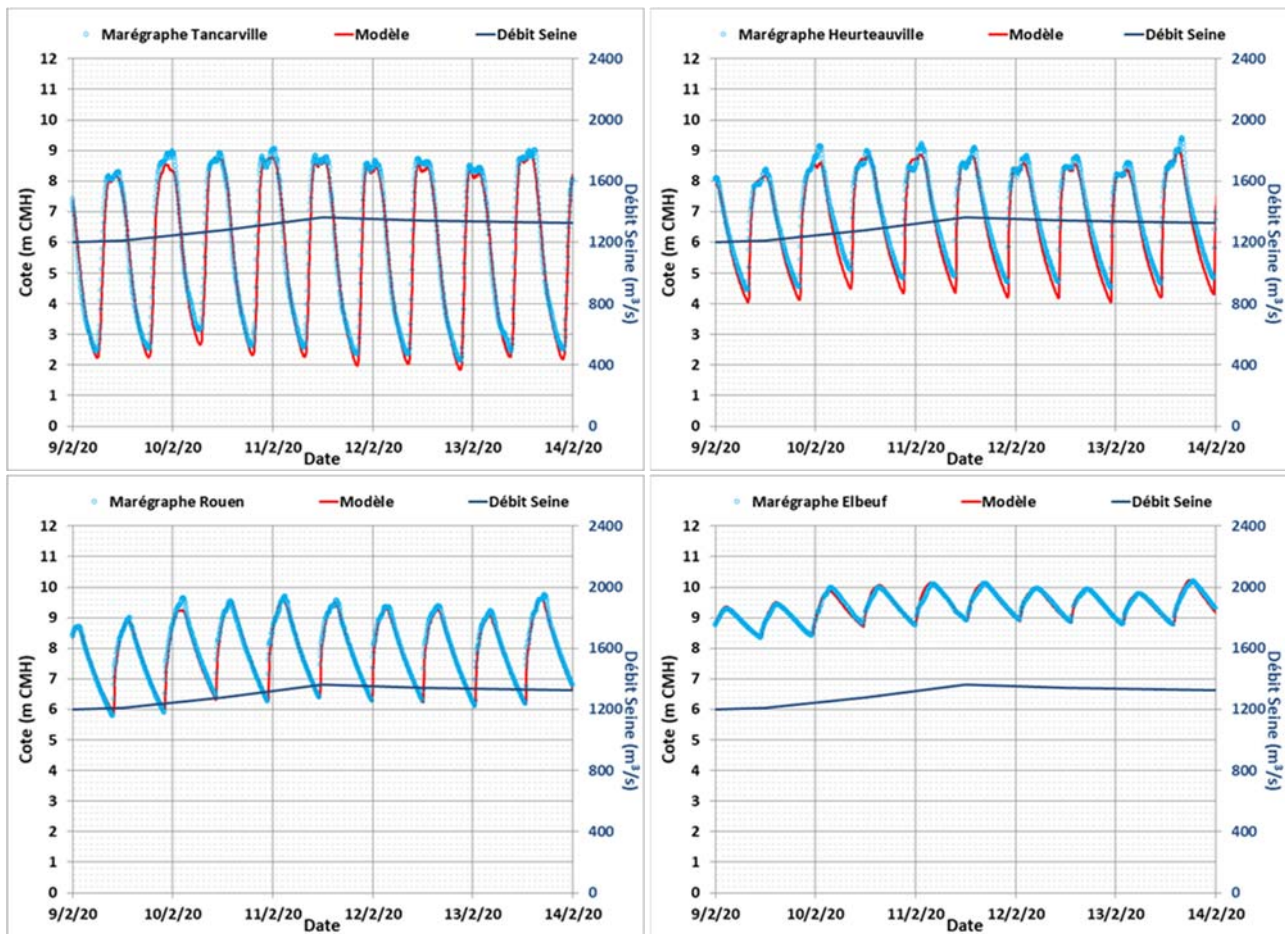


Figure 68- Evolution temporelle des niveaux d'eau mesurés et modélisés le long de l'estuaire - Episode fluvio-maritime de février 2020

L'erreur absolue moyenne (MAE) entre les niveaux d'eau modélisés et observés (supérieurs au percentile 50%) est évaluée sur l'ensemble de l'estuaire pour la période du 9 au 14 février 2020. Les meilleures performances du modèle sont relevées sur le secteur de l'estuaire en amont de Rouen (MAE comprise entre 5 cm et 7 cm) et à l'inverse le modèle est moins performant entre les marégraphes de Tancarville et Heurteauville (MAE comprise entre 10 cm et 11 cm).

La ligne d'eau des niveaux d'eau maximaux observés durant le cycle de marée du 11 février est très bien représentée par le modèle en amont de Rouen (secteur à dominante fluviale), tout comme l'ensemble de la chronique temporelle autour de cette date.

En revanche, cette ligne d'eau maximale est légèrement sous-estimée par le modèle sur la partie restante de l'estuaire : cette sous-estimation est de -14 cm en moyenne entre les marégraphes de Honfleur et Val-des-Leux. La forme du signal de marée pour les niveaux de pleine mer (forte variabilité temporelle avec une double bosse assez marquée jusqu'à Heurteauville) laisse supposer l'influence d'une surcote océanique pour cet évènement.

Deux paramètres de forçage du modèle, déjà abordés dans les précédentes sections, sont susceptibles d'expliquer ces écarts sur la modélisation des niveaux de pleine mer :

- La représentation des conditions de vent : le modèle de prévision ERA5, imposé au pas de temps horaire en donnée de forçage, ne prend pas bien en compte les rafales de vent observées durant les épisodes de tempêtes. Ce défaut a été mis en évidence par comparaison aux mesures à Balise A le 3 janvier 2018 lors de la tempête Eleanor (Figure 59 au chapitre C 7.1).
- La représentation de la surcote atmosphérique à la frontière maritime du modèle : comme exposé au chapitre C 3.3 et dans la publication de l'IFREMER (référence [15]), le modèle de grande emprise MARS2D présente globalement une tendance à la sous-estimation des surcotes observées au droit des marégraphes le long des côtes.

Ces deux paramètres peuvent avoir une influence particulièrement sensible pour cet évènement de février 2020, caractérisé par une succession de deux tempêtes (Ciara le 11 février puis Inès le 13 février) pendant lesquelles des

rafales supérieures à 100 km/h ont été mesurées au cap de la Hève. Selon l'estimation faite par le modèle ERA5, l'intensité maximale horaire du vent estimée au cap de la Hève durant cette même période est de l'ordre de 60 km/h.

La note descriptive de cet évènement (GIP Seine-Aval, référence **[11]**) explique que les conditions météorologiques ont été favorables à la formation de surcotes à l'échelle de la Manche et de la baie de Seine. Une surcote océanique de l'ordre du mètre a été observée au Havre le 11 février puis le 13 février.

Les marégrammes modélisés et observés à Honfleur et Tancarville sont reportés sur la figure suivante (extrait zoomé sur la journée du 13 février 2020). Cette figure illustre le phénomène de tenue du plein observé dans le secteur de l'embouchure de la Seine lors de cet épisode fluvio-maritime. Ce phénomène se manifeste par une déformation de l'onde de marée lors de sa propagation sur les faibles profondeurs et se traduit par un allongement de la durée pendant laquelle la courbe de marée oscille avec le niveau de pleine mer.

Il apparaît pour cet évènement que le modèle ne parvient pas à reproduire correctement ce phénomène au droit des marégraphes de Honfleur et Tancarville, au-delà d'une sous-estimation de l'ordre de 10 cm du niveau observé de pleine mer. Ce défaut peut nuire à la capacité du modèle à reproduire le gonflement des niveaux d'eau sur une échelle de plusieurs cycles de marée, et ainsi expliquer la sous-estimation plus importante des niveaux de pleine mer en remontant vers l'amont (en particulier entre les marégraphes de Caudebec et Val-des-Leux).

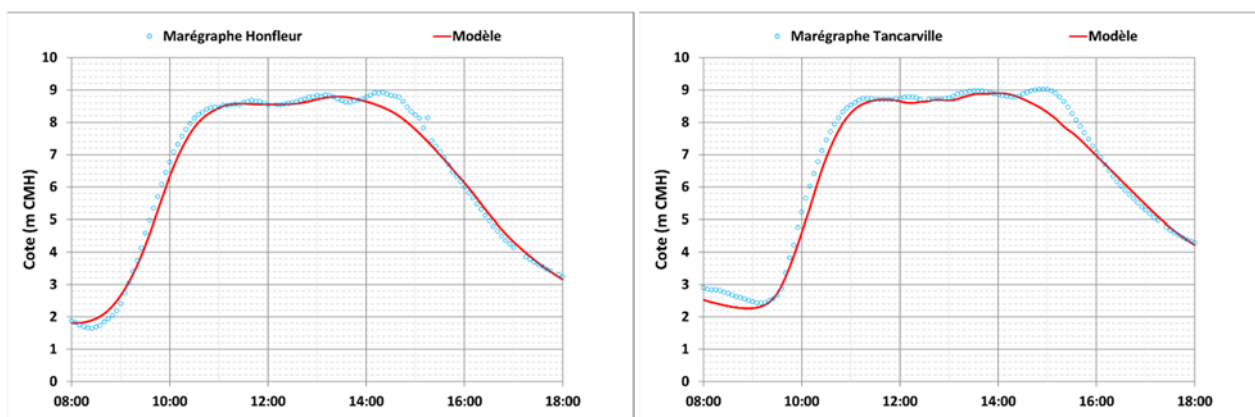


Figure 69- Marégrammes modélisés et observés à Honfleur et Tancarville pour le cycle de marée du 13 février 2020

7.6. COMPLEMENT : EPISODE FLUVIO-MARITIME DE MARS 2020

Rappel : cette simulation complémentaire est menée à l'issue de la phase de calage et validation, sans modification des paramètres de calcul établis précédemment. Les observations disponibles pour cet évènement sont exploitées à titre de comparaison mais ne constituent pas des critères de calage du modèle.

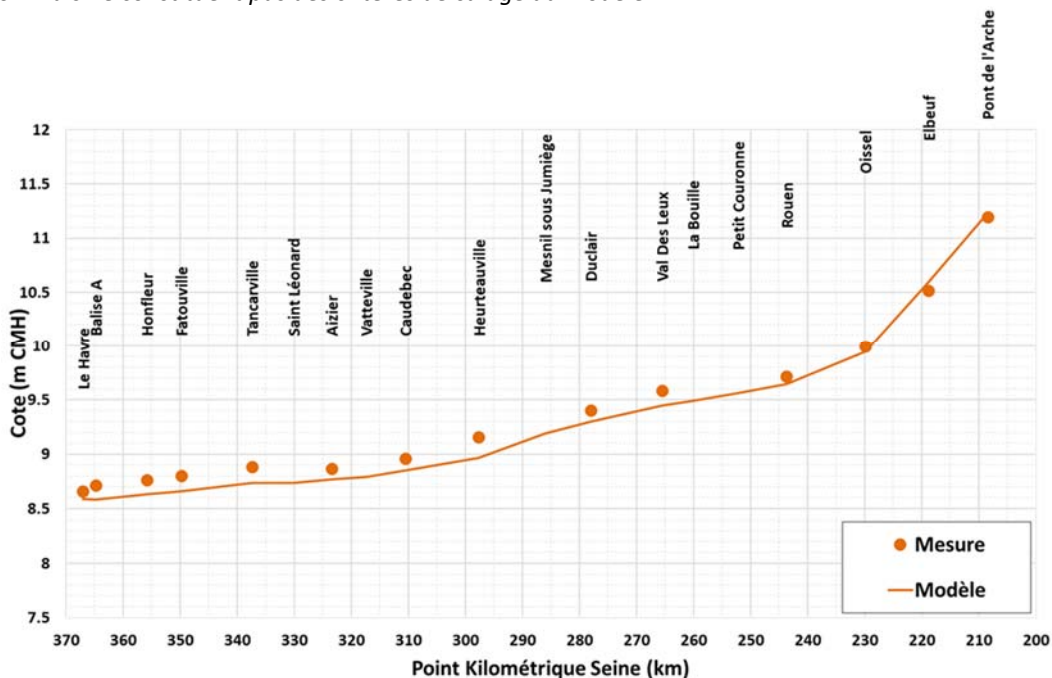


Figure 70- Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 11 mars 2020

Tableau 10- Ecart de niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire pour le cycle de marée du 11 mars 2020

	Le Havre	Balise A	Honfleur	Fatouville	Tancarville	Saint Léonard	Aizier	Vatteville	Caudebéc	Heurteauville	Mesnil sous Jumièges	Duclair	Val des Leux	La Bouille	Petit Couronne	Rouen	Oïssel	Elbeuf	Pont de l'Arche
Ecart (m)	-0.07	-0.13	-0.13	-0.14	-0.15		-0.10		-0.11	-0.19		-0.11	-0.14			-0.07	-0.05	0.08	0.04

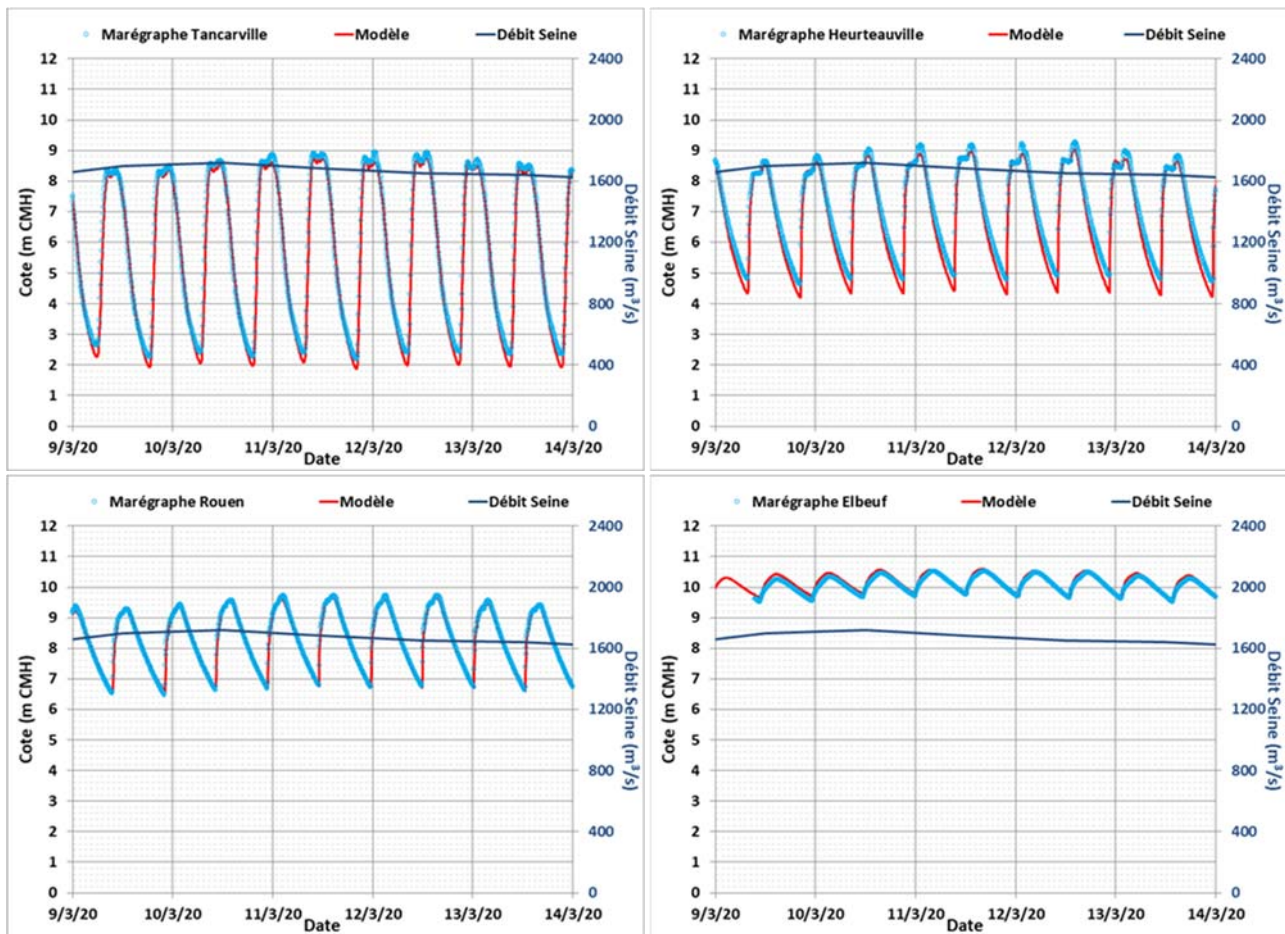


Figure 71- Evolution temporelle des niveaux d'eau mesurés et modélisés le long de l'estuaire – Episode fluvio-maritime de mars 2020

Sur la période du 9 au 14 mars 2020, l'erreur absolue moyenne (MAE) entre les niveaux d'eau modélisés et observés (supérieurs au percentile 50%) reste inférieure ou égale à 10 cm sur l'ensemble de l'estuaire.

En regardant de plus près l'analyse statistique de la répartition des écarts autour de la mesure (cf. tableau en annexe), une légère surestimation est identifiée à Elbeuf et Pont-de-l'Arche avec respectivement 38% et 20% des valeurs simulées comprises entre +10 cm et +20 cm par rapport à la mesure. A l'inverse, les niveaux d'eau simulés entre les marégraphes de Honfleur et Val-des-Leux sont un peu sous-estimés par le modèle avec un indicateur NOF(-X) compris entre 20% et 40%.

Comme pour l'épisode de février 2020 décrit précédemment, mais dans une proportion moindre, cette sous-estimation sur le secteur aval de l'estuaire est surtout portée par les niveaux d'eau atteints durant la pleine mer. Durant le cycle de marée du 11 mars 2020, la ligne d'eau maximale est sous-estimée par le modèle de -12 cm en moyenne entre les marégraphes de Balise A et Val-des-Leux.

La représentation de la surcote atmosphérique au sein du modèle constitue de nouveau un facteur susceptible d'expliquer en partie des écarts, pour les raisons expliquées précédemment.

Comme mentionné dans la note descriptive de cet évènement (GIP Seine-Aval, référence [12]), des surcotes de l'ordre de quelques dizaines de centimètres ont été observées sur la période du 8 au 15 mars 2020 à l'échelle de la baie et à l'embouchure de la Seine.

Pour cet épisode fluvio-maritime de mars 2020, les limitations du modèle ERA5 quant à la représentation des rafales de vent est probablement de second ordre puisque cette période ne comportait pas de rafales particulièrement marquées.

8. LIMITATIONS DU MODELE

En lien avec la précision des données disponibles, les processus pris en compte par le logiciel de modélisation, et la nécessité de préserver le caractère opérationnel de l'outil (temps de calcul limité), la modélisation développée pour la présente étude comporte un certain nombre de limites qu'il convient de souligner :

- Le référentiel bathy-topographique utilisé présente des incertitudes. La donnée topographique issue du levé LIDAR présente notamment une incertitude verticale d'en moyenne 6 cm (42 cm en xy). De plus, la topographie de la crête de berge (environ 340 km de berges modélisées) est dans certains cas incertaine (végétation, ouvrages transparents aux écoulements, etc.). Enfin, afin de limiter les temps de calcul, cette connaissance de la topographie a été simplifiée selon les critères indiqués dans la section B. 4.2 du rapport.
- Les données de forçages (débit, marée, pression, vent, surcote) présentent des incertitudes devant être considérées. En particulier les données de vent et pression sont à un pas de temps horaire ce qui ne permet pas de représenter les potentielles rafales. Ce défaut a été mis en évidence par comparaison aux mesures réalisées à Balise A le 3 janvier 2018 lors de la tempête Eleanor. Le modèle de grande emprise MARS2D développé par l'IFREMER, utilisé pour imposer les surcotes océaniques à l'entrée de la baie de Seine, présente une tendance globale de sous-estimation comparativement aux mesures marégraphiques le long des côtes. En cas de conditions météorologiques favorables à la formation de surcotes à l'échelle de la Manche, ce défaut peut conduire à une sous-estimation des niveaux de pleine mer modélisés dans l'estuaire.
- Les données utilisées pour vérifier le niveau de validité du modèle comportent également des incertitudes. Concernant les données de hauteurs d'eau, les incertitudes ne sont pas particulièrement problématiques étant donné le nombre important de mesures (en temps et en espace), à l'inverse les données caractérisant les emprises inondées s'avèrent être trop éparpillées pour permettre une validation quantitative des submersions.
- Les interactions et potentiels apports des nappes phréatiques ne sont pas pris en compte par le modèle. En effet, celui-ci résout les équations régissant la dynamique des écoulements à surface libre mais ne permet pas de représenter les échanges entre les nappes phréatiques et la Seine : ni les remontées de nappes, ni le ressuyage ne sont simulés (fond imperméable).
- Les phénomènes de ruissellement liés à des événements pluvieux intenses sont négligés. Le modèle permet de caractériser l'aléa inondation par débordement du cours d'eau mais n'est pas en mesure de répondre à la problématique de l'aléa inondation par ruissellement lié à des événements pluvieux intenses.
- Les réseaux d'écoulements des eaux pluviales, dont la saturation provoquée par des débordements de cours d'eau peut induire des inondations déconnectées du lit mineur, ne sont pas pris en compte.
- Le type de modélisation mis en œuvre suppose intrinsèquement que le fond du lit de la Seine est fixe, c'est-à-dire qu'il ne peut pas évoluer sous l'action de l'écoulement. Dans la réalité, les courants occasionnent des modifications morphologiques plus ou moins rapides, qui résultent de l'adaptation mutuelle au cours du temps de l'écoulement et de la topographie des fonds : érosion des sédiments, charriage par les courants et dépôt lorsque la force tractrice de l'écoulement devient trop faible. Une approche avec un coefficient de frottement variable en fonction du débit de la Seine permet de prendre en compte partiellement ce phénomène.
- Par manque d'homogénéité dans la donnée à l'échelle de l'estuaire, les ouvrages traversant les digues de protection (buses, pont-cadre, etc.) équipés pour certains de clapets anti-retour ne sont pas pris en compte dans le modèle. Le phénomène de ressuyage des terrains inondés en lit majeur entre deux cycles de marée ne peut donc être modélisé de manière complète, en dehors des connexions au lit mineur par des zones basses sans ouvrages. De même, les passages inférieurs sous des infrastructures en remblais en lit majeur (chaussées routières, passages busés) ne sont pas représentés de façon exhaustive au sein du modèle, du fait de leur absence de détection par la technologie LIDAR ou en raison de leur taille réduite comparativement au maillage.

En lien avec les limites intrinsèques des données et de l'outil décrites précédemment, les simulations menées durant la phase de validation ont également permis de mettre en avant des lacunes dans la capacité du modèle :

- Le modèle a été calibré de façon à optimiser la reproduction des niveaux de pleine mer. De manière générale, les niveaux de basse mer apparaissent quant à eux sous-estimés. Cette sous-estimation des niveaux de basse mer est vraisemblablement à associer à une surestimation des courants de jusant. Si cela n'est pas problématique sur des évènements courts (*i.e.* 2 à 3 cycles de marées), ceci peut nuire à la capacité du modèle à reproduire les augmentations des niveaux se déroulant sur des périodes plus longues : typiquement les gonflements observés lorsque les phases de revif (augmentation des coefficients de marées) se déroulent avec un vent d'ouest quasi permanent (comme ce fut le cas sur les évènements de janvier 2018 et février 2020). Par ailleurs, ceci peut conduire à une légère surestimation des durées de submersions.
- En lien avec les limites associées au pas de temps horaire des données de forçages en vent et pression issues du modèle de prévision ERA5, le modèle hydrodynamique ne parvient pas toujours à représenter correctement le phénomène de surcote sur la partie aval de l'estuaire.
- Les conséquences de la non prise en compte des ouvrages traversants, munis pour certains de clapets anti-retour, ont été examinées au moyen d'un test de sensibilité mené à l'échelle de quelques kilomètres sur le secteur de Sahurs. Ce test de sensibilité révèle l'importance des clapets anti-retour vis-à-vis des inondations en lit majeur, puisque leur absence de représentation conduit à mobiliser les ouvrages à marée montante et donc à augmenter les flux vers le lit majeur. En cas de fonctionnement normal des clapets, dont le rôle est d'assurer un ressuyage des terrains inondés durant les phases de basse mer consécutives aux débordements, l'enveloppe des inondations en lit majeur serait au contraire réduite par rapport à celle modélisée sans tenir compte des ouvrages traversants. Les répercussions de la non-représentation des ouvrages à l'échelle de l'estuaire n'ont pas été étudiées, toutefois il peut être supposé que ceci n'est pas négligeable et que leur prise en compte à cette échelle globale impliquerait aussi une diminution des niveaux d'eau en lit mineur, remettant ainsi en cause le niveau de validité du modèle.

Remarque : Le paramétrage du modèle obtenu lors de la phase de calage sur la base des évènements décrits précédemment est dépendant de l'ensemble des données considérées, en particulier de la bathy-topographie et des données de forçages. L'utilisation d'autres sources de données (nouvelle source de données de bathymétrie, de vent, etc.) implique de vérifier si le niveau de validité du modèle est toujours acceptable.

9. SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS SUR LE CALAGE DU MODÈLE

Un modèle hydrodynamique bidimensionnel (TELEMAC-2D) de l'estuaire de la Seine est développé dans le but d'améliorer la caractérisation et la compréhension des phénomènes de débordement pour un ensemble de scénarios hydrométéorologiques. Le modèle intègre le lit mineur de la Seine entre Saint-Pierre-du-Vauvray et l'embouchure, l'ensemble de la baie de Seine et les zones du lit majeur potentiellement inondables pour un évènement de période de retour millénaire.

Le calage du modèle est réalisé sur la base de quatre épisodes de débordement de la Seine : crue de mars 2001, tempêtes de mars 2008 et janvier 2018, évènement fluvio-maritime de février 2018. Les évènements fluvio-maritimes survenus en février et mars 2020 font l'objet d'une simulation complémentaire à l'issue de la phase de calage.

Les conditions de forçage appliquées au modèle tiennent compte des paramètres hydrométéorologiques suivants : un champ de vent et de pression atmosphérique variable en temps et en espace, une chronique des débits journaliers de la Seine et des principaux affluents (Eure et Risle), des niveaux d'eau variables en temps et en espace à l'entrée de la baie de Seine qui incluent une composante de marée pure et une composante de surcote atmosphérique extraites de modèles de plus grande emprise.

Le calage du frottement en lit mineur est réalisé par itérations successives afin de reproduire au mieux les niveaux d'eau mesurés au droit des marégraphes répartis tout au long de l'estuaire. Cet ajustement des paramètres s'appuie en premier lieu sur les mesures disponibles pour les épisodes de débordement de janvier et février 2018.

Le phasage du signal de marée à l'embouchure et sa déformation en remontant vers l'amont sont correctement représentés par le modèle pour l'ensemble des évènements. Différents indicateurs de validation sont mis en place afin de caractériser la capacité du modèle à reproduire les épisodes d'inondation, avec une attention particulière sur les niveaux d'eau conduisant à des débordements de la Seine.

- Les résultats de calage pour l'épisode de début janvier 2018 (tempête Eleanor) sont cohérents avec les observations sur l'ensemble de l'estuaire. En dehors du marégraphe d'Oissel pour lequel les niveaux d'eau modélisés sont légèrement surestimés, les niveaux de pleine mer sont partout bien reproduits par le modèle pour la plus forte marée observée le 4 janvier 2018.
- Les performances du modèle sont satisfaisantes pour l'épisode de débordement à caractère fluvio-maritime de début février 2018. La mise en place d'un frottement variable en fonction du débit de la Seine permet d'améliorer la modélisation des niveaux d'eau en amont de Rouen. Durant le cycle de marée du 1^{er} février 2018 qui a amené les débordements les plus significatifs, l'erreur absolue moyenne (MAE) entre les niveaux d'eau modélisés et observés est inférieure à 5 cm sur l'ensemble des marégraphes à l'exception de Pont-de-l'Arche (7 cm).
La confrontation des résultats simulés et des laisses de crues recensées entre Rouen et Criquebeuf-sur-Seine montre que le modèle reproduit globalement bien les hauteurs d'inondations en lit majeur pour cet évènement. Des différences un peu plus marquées sont constatées sur le secteur compris entre Petit-Couronne et Le-Mesnil-sous-Jumièges, où l'enveloppe maximale des inondations a pu être délimitée par interprétation de photographies obliques acquises par un drone. Ces résultats sont néanmoins plus délicats à analyser du fait des approximations associées à ces données reconstituées.
- Pour l'épisode de type fluvial de mars 2001, et dans une moindre mesure pour l'épisode à caractère maritime de mars 2008, les niveaux d'eau simulés par le modèle sont globalement inférieurs aux observations sur l'ensemble de l'estuaire.
Une des explications à ces écarts repose sur la bathymétrie intégrée au modèle qui est issue de données relativement récentes. Compte tenu de l'évolution morphologique naturelle du lit de la Seine au fil des crues ou d'origine anthropique, cette bathymétrie présente nécessairement des incohérences avec celles associées aux évènements que le modèle cherche à reproduire. L'autre facteur majeur à l'origine de ces écarts est l'absence de surcote océanique à la frontière marine.
- Les résultats du modèle sont relativement comparables pour les deux épisodes à caractère fluvio-maritime survenus en février et mars 2020. Les niveaux d'eau observés en amont de Rouen sont bien représentés par le modèle mais celui-ci a tendance à légèrement sous-estimer les niveaux de pleine mer en aval du marégraphe de Val-des-Leux (de l'ordre de -12 cm à -14 cm en moyenne). Les conditions météorologiques lors de ces deux évènements ont été favorables à la formation de surcotes océaniques, et celles-ci sont probablement sous-estimées par le modèle.

En conclusion, le modèle élaboré dans le cadre de la présente étude est jugé fiable pour reproduire les évènements observés, tout en gardant à l'esprit ses limites explicitées au chapitre précédent. Ce modèle sera utilisé pour simuler les différents scénarios d'exploitation qui seront définis au cours de la phase suivante de la mission. Les scénarios simulés sont pour la plupart des scénarios théoriques, ce qui amène à relativiser les limites du modèle pour la suite de l'étude.

10. DESCRIPTION DES RENDUS CARTOGRAPHIQUES

Conformément aux attentes exprimées dans le CCTP, les résultats du modèle pour chaque évènement simulé sont exploités afin d'établir des cartographies permettant de caractériser les inondations sur l'ensemble de l'estuaire. Les variables cartographiées sont listées ci-après :

- Les hauteurs d'eau maximales en chaque point, calculées sur la totalité de l'évènement simulé ;
- Les vitesses d'écoulement maximales en chaque point, calculées sur la totalité de l'évènement simulé ;
- La durée de l'inondation en chaque point du lit majeur, calculée sur trois périodes distinctes :
 - Sur le cycle de la plus forte marée de l'évènement,
 - Sur deux cycles de marée consécutifs, intégrant le cycle de la plus forte marée de l'évènement,
 - Sur trois cycles de marée consécutifs, intégrant les deux plus forts cycles de marée de l'évènement.
- Les vitesses maximales de montée des eaux en chaque point du lit majeur, calculées sur la totalité de l'évènement simulé, et déterminées par différence de hauteur d'eau entre deux pas de temps de calcul consécutifs (espacés de 5 minutes). Sur les cartographies, les valeurs de vitesses de montée des eaux sont affichées en centimètres par minute.

Ces cartes sont à analyser avec précaution compte tenu des limitations du modèle sur la représentation du ressuyage des terrains inondés en lit majeur entre deux cycles de marée : en l'absence d'une représentation des ouvrages au sein des digues de protection (munis de clapets anti-retour), les volumes débordants lors d'une période de pleine mer se cumulent à ceux déjà présents lors de la pleine mer précédente. De plus, comme explicité au chapitre C 8, le modèle ne permet pas de simuler les échanges avec la nappe ou encore le phénomène de ruissellement lié à des évènements pluvieux intenses.

Après consultation du Comité de Pilotage en juin 2021, le choix s'est porté vers **l'échelle du 1/15 000^e** pour l'ensemble des cartographies (au format d'impression A3). Chaque variable est présentée sous forme d'un atlas cartographique composé de 47 planches couvrant l'estuaire de la Seine entre Honfleur et Poses. A noter que ces cartographies ne couvrent pas le Havre et sa zone industrialo portuaire puisque ce secteur fait déjà l'objet d'une étude avec une modélisation dédiée dans le cadre du PPRL Plaine Alluviale Nord de l'Estuaire de la Seine (PANES).

Une carte de situation générale avec le dallage complet de l'atlas est représentée sur la Figure 72.

Ces atlas cartographiques seront produits à l'identique pour les scénarios d'exploitation lors de la phase suivante de l'étude.

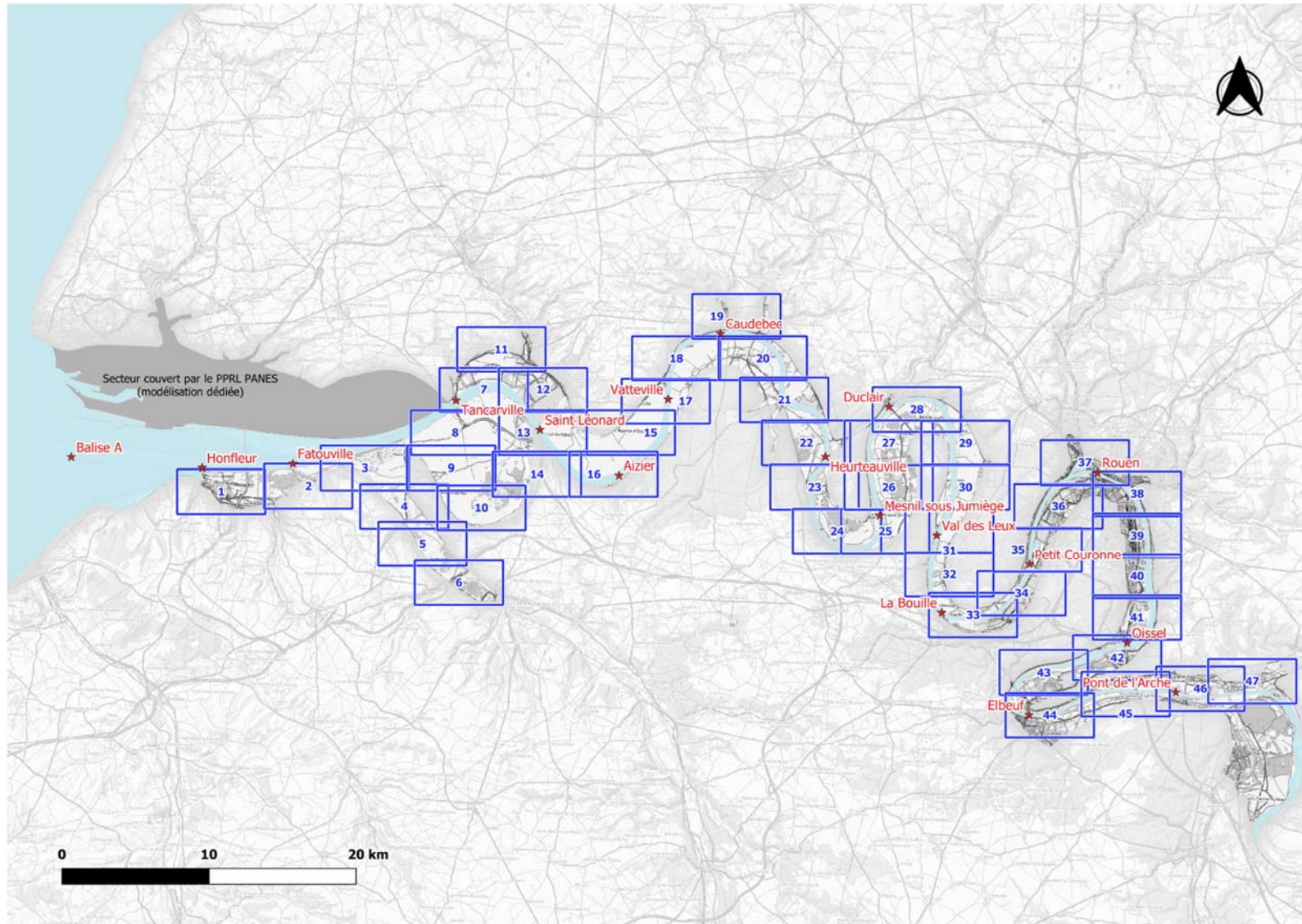


Figure 72- Carte générale du dallage de l'atlas cartographique couvrant l'ensemble de l'estuaire de la Seine

REFERENCES

- [1] *Mise à jour de la couche bathy-topographie de l'estuaire de la Seine*. GIP Seine Aval, 28 octobre 2020.
- [2] *Projet LIDAR Estuaire de la Seine - Acquisition, contrôle qualité et produits disponibles*. GIP Seine Aval, Juin 2013.
- [3] *Topographie des crêtes de berges en estuaire de la Seine : confrontation des relevés réalisés par géomètres et des données LIDAR*. GIP Seine Aval, Janvier 2020.
- [4] *Références altimétriques maritimes – Ports de France métropolitaine et d'outre-mer – Cote du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée*. SHOM, 2017.
- [5] *Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine - Objectif C*. ARTELIA – GIP Seine Aval, Octobre 2013.
- [6] *Localisation et altimétrie des murets anti-inondations le long de l'estuaire de la Seine*. GIP Seine Aval, Septembre 2013.
- [7] *Mise à jour de la couche des ouvrages anti-inondations en intégrant les données des levés topographiques de février 2020 de HAROPA - Port de Rouen*. GIP Seine Aval, Mars 2021.
- [8] *Mise en œuvre d'une base de données sur l'évolution de l'occupation du sol du territoire du Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande*, SIRS, Octobre 2012.
- [9] *Débordement de l'estuaire de la Seine : épisode du 3-4-5 janvier 2018*. GIP Seine-Aval & DREAL-SPC, Février 2018.
- [10] *Débordement de l'estuaire de la Seine : épisode de fin janvier - début février 2018*. GIP Seine-Aval & DREAL-SPC, Mars 2018.
- [11] *Débordement de l'estuaire de la Seine : épisodes de février 2020*. GIP Seine-Aval & DREAL-SPC, Juillet 2020.
- [12] *Débordement de l'estuaire de la Seine : épisode de mars 2020*. GIP Seine-Aval & DREAL-SPC, Juillet 2020.
- [13] *Analyse des données marégraphiques issues du réseau GPMH, HAROPA – Grand Port Maritime du Havre*, Février 2020.
- [14] *Production SIG des lignes de crues des inondations de l'hiver 2018 en aval de Rouen et sur les bords de la Seine*, CEREMA, Novembre 2019.
- [15] *Validation des modèles hydrodynamiques 2D des côtes de la Manche et de l'Atlantique*. PREVIMER. Pineau-Guillou Lucia (2013).



ANNEXES



ANNEXE 1 – Différentiel altimétrique en lit mineur [Modèle 2013 – Modèle 2021]



ANNEXE 2 – Emprise, altimétrie et maillage des sous-modèles



ANNEXE 3 – Exemples illustratifs de sélection des lignes de contrainte du maillage



ANNEXE 4 – Prise en compte des infrastructures en remblais et des digues via la méthode RIG



ANNEXE 5 – Différentiel altimétrique en lit majeur [MNT Modèle – MNT Données 2020]



ANNEXE 6 – Modélisation des zones urbaines via la méthode de Lindner



ANNEXE 7 – Description du modèle de marée développé par ARTELIA à l'échelle de la Manche



ANNEXE 8 – Résultats de calage et validation du modèle

POUR PLUS D'INFORMATIONS SUR LE GIP SEINE-AVAL

www.seine-aval.fr

CONTACT

Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval
Hangar C – Espace des Marégraphes
CS 41174
76176 ROUEN Cedex 1
Tél : 02 35 08 37 64
gipsa@seine-aval.fr

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il devra être cité sous la forme suivante :

ARTELIA, 2021. Modélisation des inondations en estuaire de la Seine : dynamique et emprise des inondations. Phase 1 : Elaboration du modèle. Rapport réalisé pour le GIP Seine-Aval. 106 pp.

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.

Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval.

Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :

