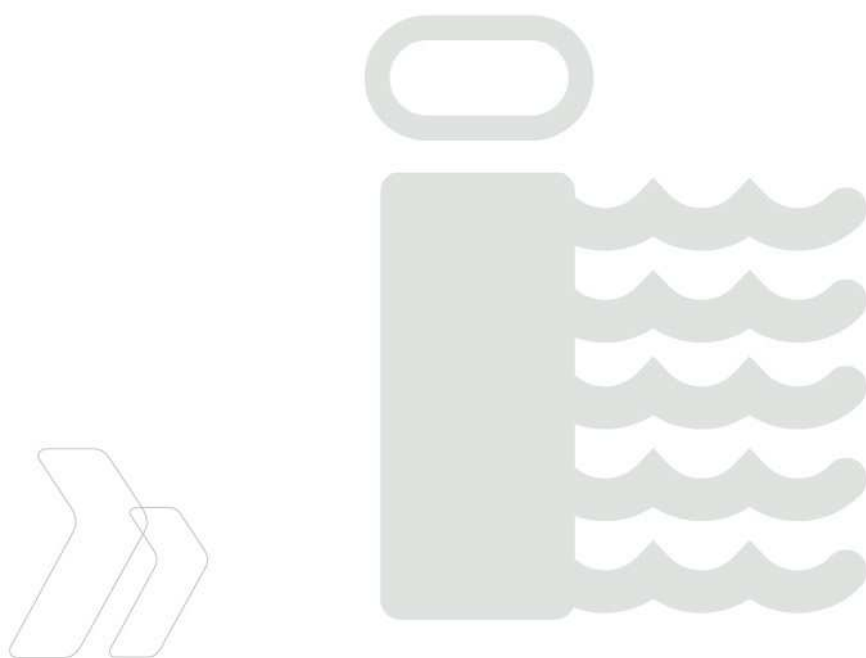


Infrastructures
Aménagements
hydrauliques



⊕
COMMUNAUTE
URBAINE CAEN LA MER

SYSTEMES D'ENDIGUEMENT DANS L'AGGLOMERATION CAENNAISE

Rapport d'étude de dangers

Rapport n° : 20F-201-RP-3
Révision n° : A
Date : 24/06/2021

Votre contact :
Olivier BARBET
barbet@isl.fr

Rapport

ISL Ingénierie SAS - PARIS
75 boulevard Mac Donald
75019 - Paris
FRANCE
Tel. : +33.1.55.26.99.99
Fax : +33.1.40.34.63.36

www.isl.fr

ISL
Ingénierie

Visa

Document actualisé le 24/06/2021.

Révision	Date	Auteur	Chef de Projet	Superviseur	Commentaire
A	24/06/2021	OBA	OBA	OBA	Version pour dépôt du dossier au 30 juin 2021

OBA : BARBET Olivier

Rapport ISL
20F-201-RP-3
Revision A

<http://www.isl.fr/r.php?c=197090>



SOMMAIRE

1	OBJET DE LA NOTE	1
2	CONSTRUCTION DU MODELE	2
2.1	PRINCIPES GENERAUX	2
2.2	LIMITES DU MODELE	3
2.3	GRANDES LIGNES DU MAILLAGE	4
2.4	DEFINITION DE LA BATHYMETRIE DU MODELE – NIVEAU DU TERRAIN NATUREL	4
2.5	INTEGRATION DES SINGULARITES	5
2.5.1	PRISE EN COMPTE DU BATI	5
2.5.2	INTEGRATION DES OUVRAGES	5
2.5.3	INTEGRATION DES OUVRAGES DE GESTION DES NIVEAUX DU CANAL	6
2.6	CONDITIONS AUX LIMITES	6
2.6.1	CONDITIONS AMONT – HYDROGRAMMES	7
2.6.2	CONDITION AVAL – MAREE	7
2.7	CHOIX DES COEFFICIENTS DE FROTTEMENT	7
3	CALAGE ET VALIDATION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE 2D	9
3.1	METHODOLOGIE DU CALAGE	9
3.2	CALAGE SUR DES CRUES RECENTES	9
3.2.1	CRUE DE JANVIER 2018	9
3.2.2	CRUE DE FEVRIER 2021	11
3.3	VERIFICATION EN SIMULANT LA CRUE DE L'ORNE A 625 M ³ /S	12
4	SIMULATIONS DE CRUES DE L'ORNE	15
4.1	HYPOTHESES	15
4.2	RESULTATS	16
5	SIMULATIONS D'EVENEMENTS MARINS	17
5.1	HYPOTHESES	17
5.2	RESULTATS	18

6	PROPOSITIONS DE SCENARIOS	20
6.1	SECTEUR MARITIMEET DIGUE DE COLOMBELLES	20
6.2	LES SCENARIOS DE L'ETUDE DE DANGERS – ARRETE DU 7 AVRIL 2017	21
6.3	SCENARIO 1	21
6.4	SCENARIO 2	21
6.5	SCENARIO 3	22
6.6	SCENARIO 4	22
7	BIBLIOGRAPHIE	23

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 TITRE ANNEXE

TABLE DES FIGURES

Figure 2-1 : lignes directrices permettant de « forcer » le maillage le long des éléments structurants.	2
Figure 2-2 : emprise du modèle 2D.	3
Figure 2-3 : maillage du modèle 2D – détails.	4
Figure 2-4 : modèle après intégration des données bathymétriques.	5
Figure 2-5 : illustration des deux méthodes d'intégration des ouvrages de gestion du canal dans le centre de Caen : à gauche la première méthode, à droite la seconde.	6
Figure 3-1 : niveaux d'eau mesurés et calculés par le modèle TELEMAC-2D – janvier 2018.	10
Figure 3-2 : niveaux d'eau mesurés et calculés par le modèle TELEMAC-2D – février 2021.	12
Figure 4-1 : hydrogrammes de crues de l'Orne à Caen.	15
Figure 4-2 : lignes d'eau pour les crues de référence.	16
Figure 5-1 : surcote observée à Ouistreham en février/mars 2010.	17
Figure 5-2 : surcotes observées à Ouistreham, décalage du pic de surcote avec la pleine mer (PM).	18
Figure 4-2 : lignes d'eau pour les évènements marins de référence.	19
Figure 6-1 : profil en long des deux évènements centennaux le long de l'Orne maritime.	20
Figure 6-2 : profil en long des deux évènements centennaux le long du canal.	20

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : coefficients de Strickler retenus.....	8
Tableau 3-1 : résultats de la crue de 625 m ³ /s.	13
Tableau 4-2 : débits de pointe de l'Orne à Caen.	15

|

1 OBJET DE LA NOTE

La présente note hydraulique décrit la construction et le calage du modèle hydrodynamique 2D de la basse vallée de l'Orne sur le territoire de la CU Caen la mer.

Ce modèle a été développé par ISL-Ingénierie sur la suite TELEMAC-2D développée par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (EDF-R&D).

2 CONSTRUCTION DU MODELE

2.1 PRINCIPES GENERAUX

Le maillage est construit avec le logiciel MATISSE fourni avec la distribution de TELEMAR. Ce logiciel permet de définir le maillage en s'appuyant sur des points, des lignes ou encore des profils en travers et en paramétrant des critères de maillage variables qui fixent les tailles de mailles en tout point du domaine.

Le maillage a été construit en deux étapes :

- Maillage de la vallée de l'Orne jusqu'à l'estuaire ;
- Assemblage avec le maillage du modèle existant en front de mer (modèle développé lors de l'étude de dangers des digues de Ouistreham et Hermanville).

Le principe retenu pour la construction du modèle est de s'appuyer sur les éléments structurants (berges, digues, routes et rues principales, remblais, groupes de bâtis, lits mineurs, ...) pour affiner le maillage en leurs voisinages. Ce principe se justifie d'une part pour bien prendre en compte ces éléments structurants qui peuvent influencer les écoulements, d'autre part pour densifier le maillage au voisinage des enjeux.

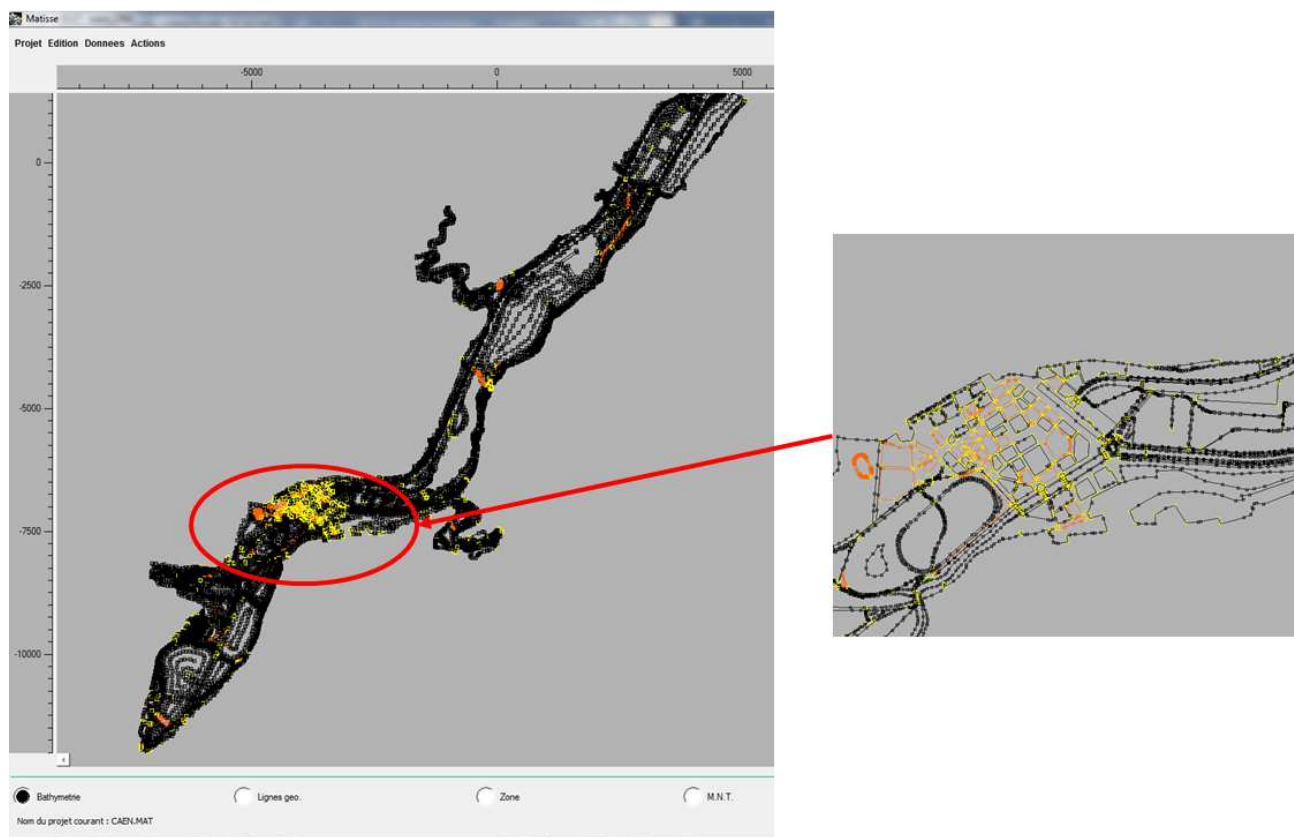


Figure 2-1 : lignes directrices permettant de « forcer » le maillage le long des éléments structurants.

Le modèle est référencé en Lambert 93. Néanmoins, une translation est opérée sur l'axe des ordonnées Y (- 6 000 000 m) afin de réduire la longueur des nombres (limitation dans TELEMAR à 7 chiffres représentatifs).

Pour ce qui concerne les altitudes, le modèle est référencé dans le système du nivellement général de la France, NGF-IGN69.

2.2 LIMITES DU MODELE

Le modèle hydraulique 2D compte quatre limites amont :

- Sur l'Orne, la limite amont se situe sur la commune de Saint-André-sur-Orne, à proximité d'Etavaux ;
- Sur l'Odon, la limite amont se situe au droit du Mesnil, à cheval sur les communes de Louvigny et Caen ;
- Sur le Biez (ou la Gronde), la limite amont se situe sur la commune de Mondeville, environ 500 m en amont du périphérique ;
- Sur la Seine, la limite se situe dans l'estuaire au droit d'Honfleur.

La limite aval se situe en pleine mer, à environ 20 km de la côte.

Sur les bords, les limites du modèle suivent les courbes de niveaux correspondant aux limites des plus hautes eaux avec une revanche de l'ordre de 1 m.

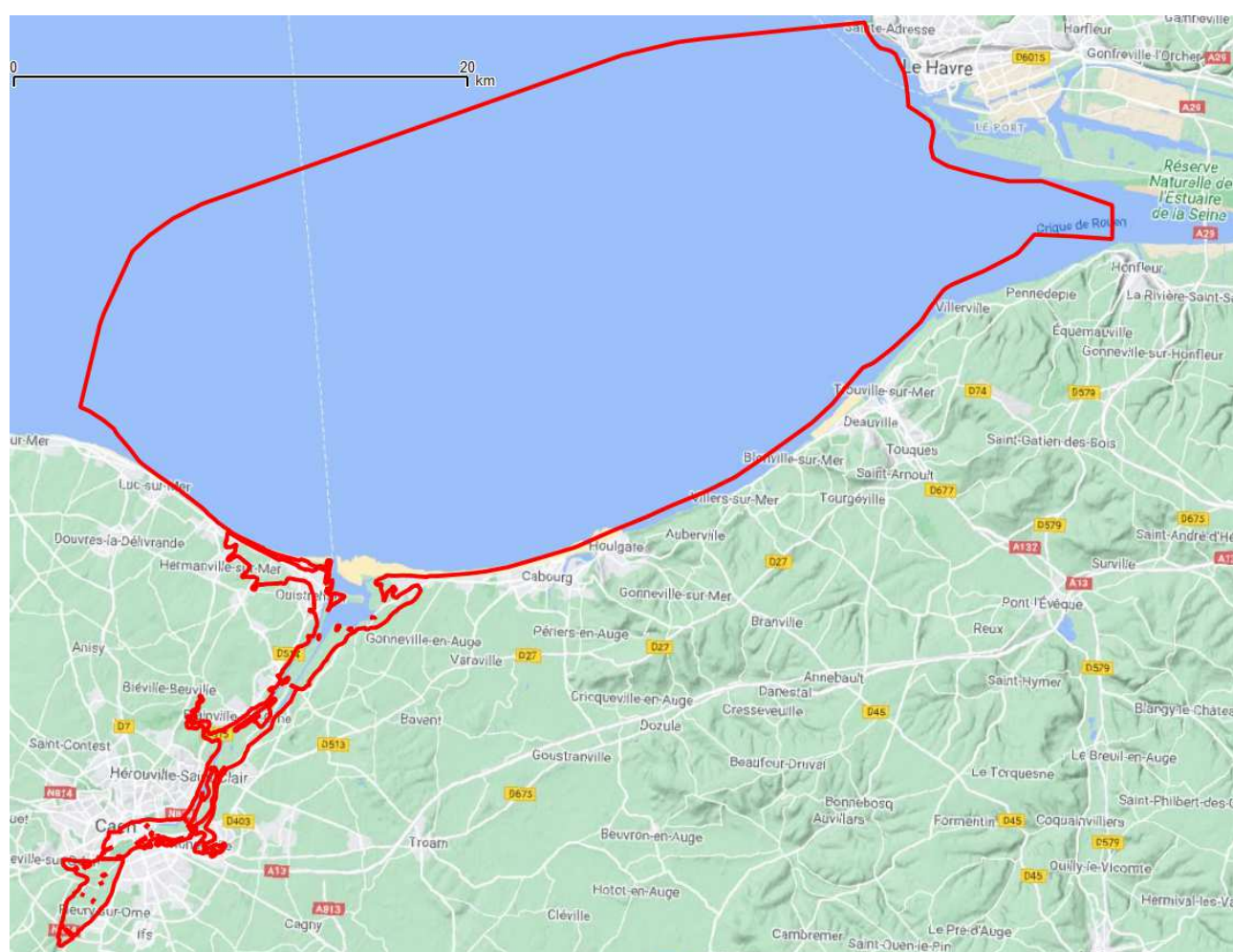


Figure 2-2 : emprise du modèle 2D.

Au total, le modèle s'étend sur 690 km².

La partie maritime occupe une large part de cette superficie, environ 650 km². La partie « terrestre », vallée de l'Orne et son estuaire, occupe ainsi un peu moins de 40 km².

Le linéaire de l'Orne modélisé est d'environ 25 km.

2.3 GRANDES LIGNES DU MAILLAGE

Le maillage est construit à partir d'éléments triangulaires, de différentes tailles en fonction des besoins :

- 5 à 10 m en lits mineurs (Orne et canal) ;
- 3 à 8 m en lits mineurs (Odon, Biez) ;
- 10 à 20 m dans les zones urbanisées ;
- 3 à 6 m le long des digues ;
- 15 à 50 m en lit majeur ;
- Plusieurs centaines de mètres en mer.

La construction du maillage s'appuie sur les éléments linéaires (routes, bâtiments principaux, berges, remblai en lit majeur, ...).

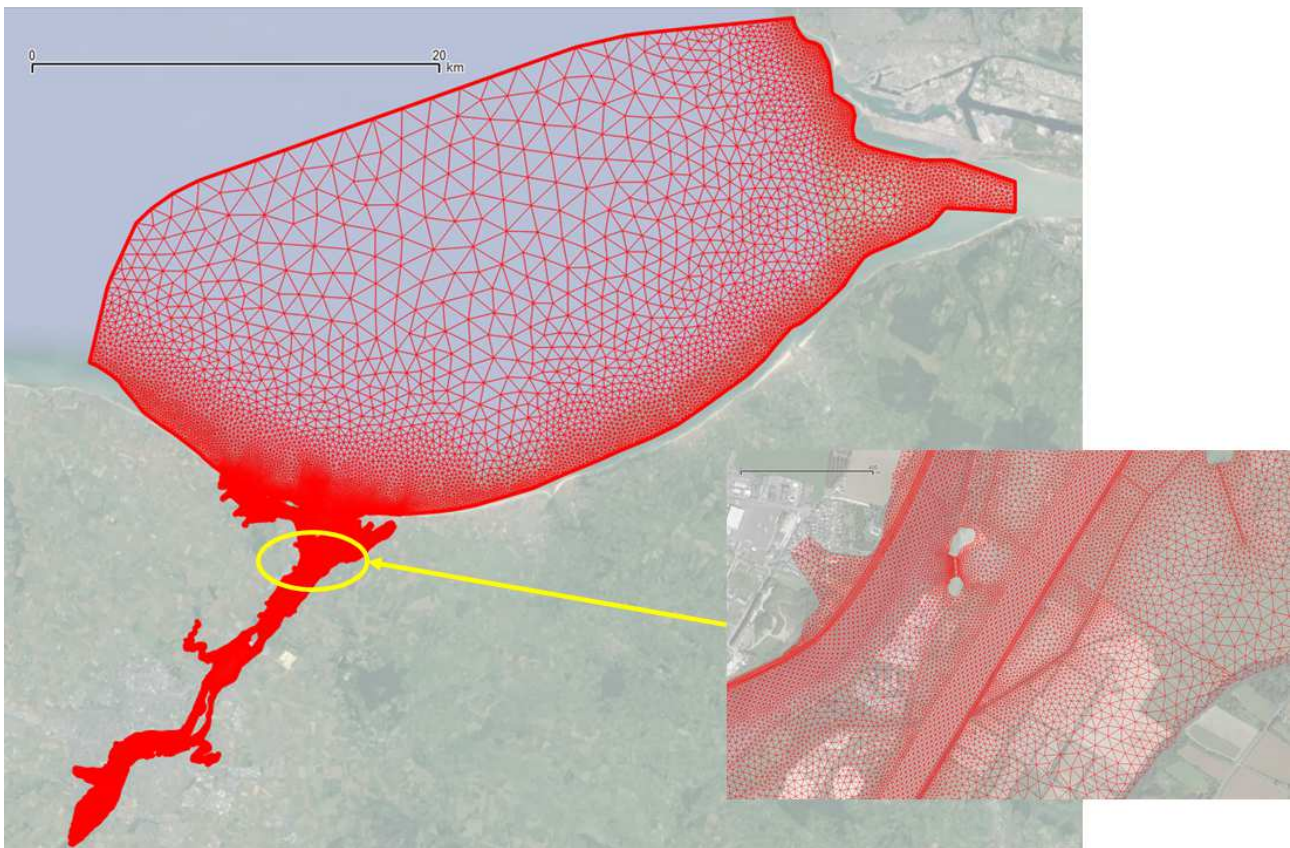


Figure 2-3 : maillage du modèle 2D – détails.

2.4 DEFINITION DE LA BATHYMETRIE DU MODELE – NIVEAU DU TERRAIN NATUREL

de points insuffisamment denses pour être représentatifs du terrain naturel.

Plusieurs traitements successifs permettent d'affecter à chaque nœud du maillage sa cote de terrain naturel :

- Extraction de l'ensemble des nœuds du maillage sous SIG ;
- Affectation automatique des cotes de terrain naturel avec le MNT : le MNT est construit à partir de l'ensemble des données topographiques et bathymétriques fournies ;

- Affectation manuelle et traitements particuliers sur certains nœuds ;
- Export des nœuds sous forme de semis de points ;
- Mise à jour des cotes du modèle sous l'éditeur de projet de FUDAA-PREPRO à partir du semis de points édité.

Les images suivantes représentent le modèle après l'intégration des données bathymétriques.

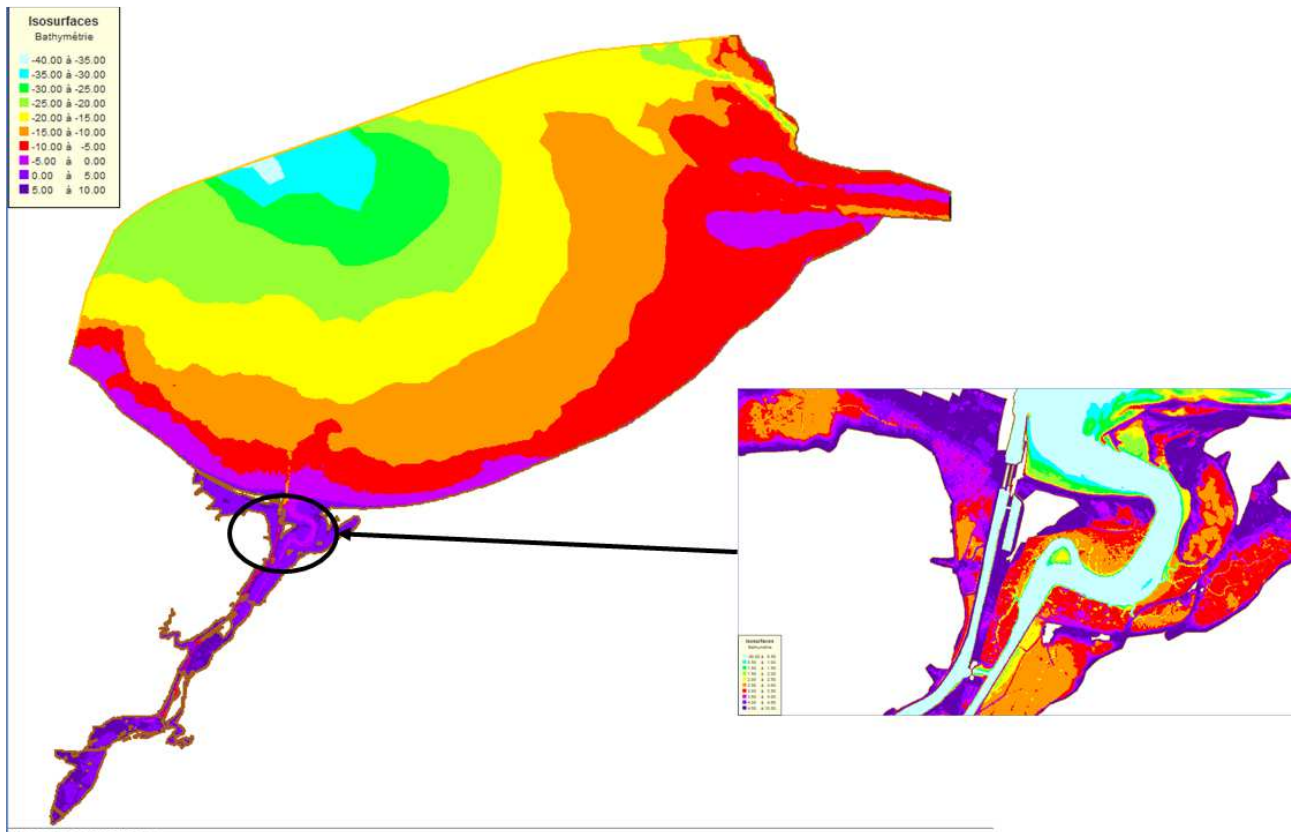


Figure 2-4 : modèle après intégration des données bathymétriques.

2.5 INTEGRATION DES SINGULARITES

2.5.1 PRISE EN COMPTE DU BATI

Le maillage est adapté dans les zones urbaines pour délimiter le bâti par grands ensembles en suivant les rues principales. Cette définition permet de différencier les coefficients de frottement (Strickler) appliqués aux rues de ceux appliqués sur l'emprise du bâti.

La valeur 40 est retenue pour les rues.

Une valeur particulièrement faible, de 1 est retenue sur l'emprise du bâti.

Cette méthode permet de favoriser les écoulements dans les rues tout en laissant la possibilité de transfert d'eau au travers des ensembles bâtis qui ne sont pas totalement imperméables.

2.5.2 INTEGRATION DES OUVRAGES

Les ponts sont représentés dans le modèle en intégrant les culées et les piles au maillage. En pratique, les culées et les piles sont « retirées » du maillage afin d'empêcher tout écoulement au travers des piles et des culées. Cette méthode présente l'avantage de la continuité des équations ce qui assure une meilleure stabilité du calcul.

Cette méthode présente l'inconvénient de ne pas tenir compte de la mise en charge : toutefois, pour les événements simulés, les ponts sur le domaine d'étude ne sont pas sensés se mettre en charge. Cette hypothèse est vérifiée a posteriori.

2.5.3 INTEGRATION DES OUVRAGES DE GESTION DES NIVEAUX DU CANAL

Quatre ouvrages principaux permettent la gestion des niveaux d'eau dans le canal et dans l'Orne à Caen : barrage de Montalivet sur l'Orne, vanne des Portes de l'Orne à l'entrée du bassin Saint-Pierre, vannes du canal de la presqu'île (ou vanne Victor Hugo), vannes de barrage de Maresquier.

Les règles de gestion de ces ouvrages sont particulièrement complexes, elles sont fonction de la hauteur d'eau de l'Orne mesurée à Thury-Harcourt, ainsi que des hauteurs d'eau mesurées dans l'Orne à Caen (échelle du pont de Vendevre) et des hauteurs mesurées dans le canal maritime.

Ces ouvrages sont traités de deux manières différentes selon les événements simulés :

- Crues faibles et événements maritimes : pour ces événements, les ouvrages du centre de Caen ne sont pas totalement effacés (ouverts). Les quatre ouvrages sont intégrés sous formes de frontières dans le maillage, le débit sortant de la frontière amont étant réinjecté sur la frontière aval de l'ouvrage. Un algorithme spécifique est programmé pour gérer l'ouverture des différents ouvrages en respectant au mieux les règles de gestion : celles-ci étant très complexes, l'algorithme de gestion est simplifié (par définition, il ne peut pas prendre en compte les interventions humaines, pour modifier les cotes de consigne par exemple) ;
- Crues importantes : la première méthode faisant intervenir des ouvrages mobiles dont les ouvertures sont interdépendantes, des instabilités de calcul peuvent résulter selon les événements simulés. Pour les crues importantes, les ouvrages du centre de Caen (Montalivet, Portes de l'Orne et vannes Victor Hugo) sont totalement relevés. Afin de simplifier le calcul et s'affranchir des instabilités, les ouvrages sont intégrés au maillage, le calcul des écoulements au travers de leurs ouvertures se faisant à surface libre. Cette méthode sous-estime l'effet de la mise en charge des vannes met assure une meilleure stabilité des calculs.

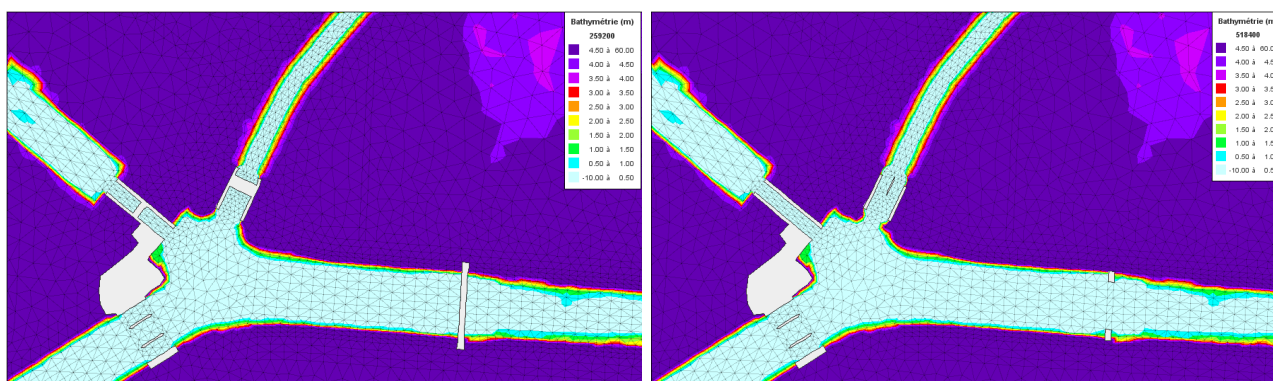


Figure 2-5 : illustration des deux méthodes d'intégration des ouvrages de gestion du canal dans le centre de Caen : à gauche la première méthode, à droite la seconde.

Concernant les ouvrages « secondaires », vannes d'alimentation et ouvrages du fossé de ligne notamment, ils sont intégrés sous formes de « buses » et « siphons » dans TELEMAC-2D.

2.6 CONDITIONS AUX LIMITES

Le référentiel temporel est l'heure universelle : toutes les données temporelles sont donc exprimées en heures UTC. De manière générale, les événements étudiés ont plutôt lieu en hiver, le décalage avec l'heure légale est de 1 heure (heure légale = heure UTC + 1 heure). Pour l'heure d'été, le décalage est de 2 heures.

2.6.1 CONDITIONS AMONT – HYDROGRAMMES

Pour les crues réelles de calage, les hydrogrammes injectés à l'amont sont issus de la station de May-sur-Orne pour la frontière sur l'Orne (sans correction, la frontière amont du modèle étant proche de la station, à environ 3,5 km en aval) et des stations de l'Odon (Epinay et/ou Gavrus). Sur l'Odon, une correction est appliquée compte tenu de l'éloignement des stations (décalage en temps pour la propagation et homothétie sur les débits pour tenir compte de la taille du bassin versant plus grande).

Pour les crues théoriques de différentes périodes de retour, les hydrogrammes à Caen ont été reconstitués à partir d'hydrogrammes normés sur les plus fortes crues observées. Une répartition entre l'Orne amont et l'Odon est opérée afin d'avoir l'hydrogramme complet à l'entrée de Caen.

2.6.2 CONDITION AVAL – MAREE

La frontière aval est localisée en mer. Une condition de marée est imposée.

La suite TELEMAC-2D intègre un générateur de marée s'appuyant sur différentes bases de données de constantes harmoniques. Pour la présente étude, la base de données TPXO issue des travaux de l'OSU (Oregon State University) est retenue : cette base de données donne des résultats satisfaisants en Manche.

Le générateur de marée est calé sur les prédictions de marée à Ouistreham. Une correction en hauteur d'eau est appliquée à la frontière afin de bien représenter l'aplatissement du marégramme à la pleine mer, phénomène caractéristique en Manche Est et assez mal représenté par le générateur.

Pour l'étude des événements réels, les observations du marégraphe de Ouistreham permettent d'évaluer les surcotes marines lors de chaque événement : ces surcotes sont ajoutées, uniformément sur la frontière maritime, aux niveaux d'eau calculés par le générateur de marée.

2.7 CHOIX DES COEFFICIENTS DE FROTTEMENT

Les coefficients de frottement sont définis à partir de l'occupation du sol pour les parties terrestres et sur la base de notre expérience pour les lits mineurs.

Les valeurs retenues sont ainsi résumées dans le Tableau 2-1 :

Situation		Coefficient de Strickler retenu
Lit mineur de l'Orne	Amont Caen	25
	Traversée de Caen	35
	Aval Montalivet	35
	Estuaire aval Ranville	50 à 60
Lit mineur affluents		20 à 25
Domaine maritime		60
Lit majeur		10 à 12
Zones urbaines selon densité		1 à 5
Rues et routes		40

Tableau 2-1 : coefficients de Strickler retenus.

3 CALAGE ET VALIDATION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE 2D

3.1 METHODOLOGIE DU CALAGE

Le calage est mené en état actuel, c'est-à-dire après réalisation des aménagements de protection contre les inondations. Depuis la réalisation de ces travaux, l'Orne n'a pas connu de crue significative.

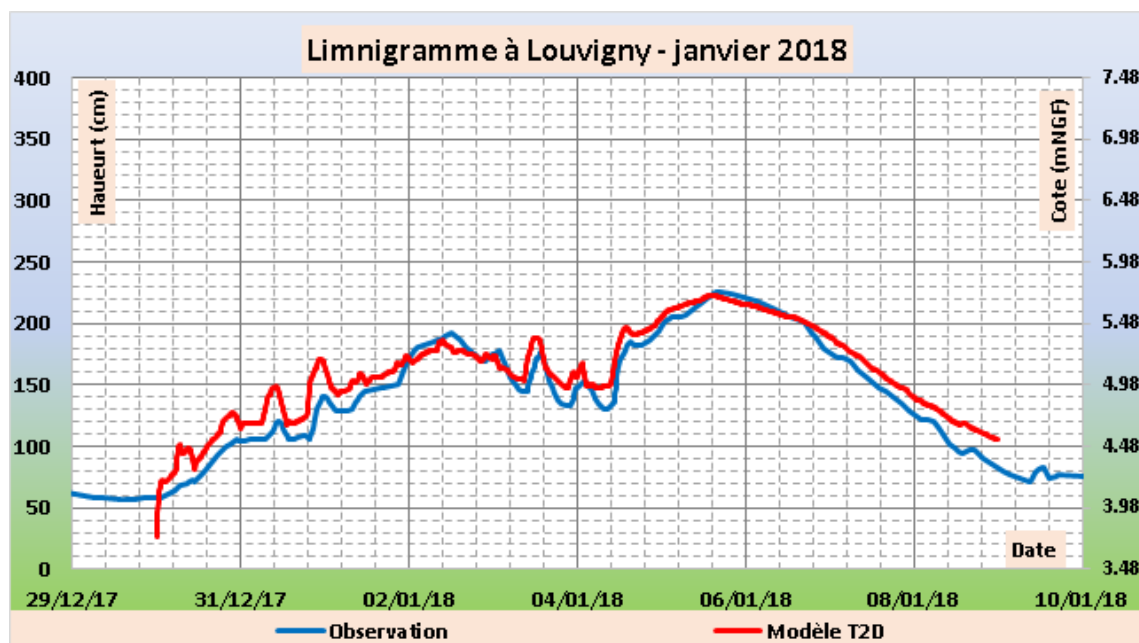
Le calage est ainsi réalisé sur des crues récentes avec peu d'observations hormis les mesures aux stations : stations du SPC et marégraphe de Ouistreham. Ces crues n'ayant pas causé de débordements significatifs, aucun repère de crue n'est disponible.

Pour les crues théoriques, les niveaux obtenus sont comparés aux niveaux calculés par (SOGREAH, septembre 2005) pour un débit de 625 m³/S à Caen.

3.2 CALAGE SUR DES CRUES RECENTES

3.2.1 CRUE DE JANVIER 2018

Les graphiques suivants présentent le calage des niveaux d'eau aux stations sur le domaine de calcul :



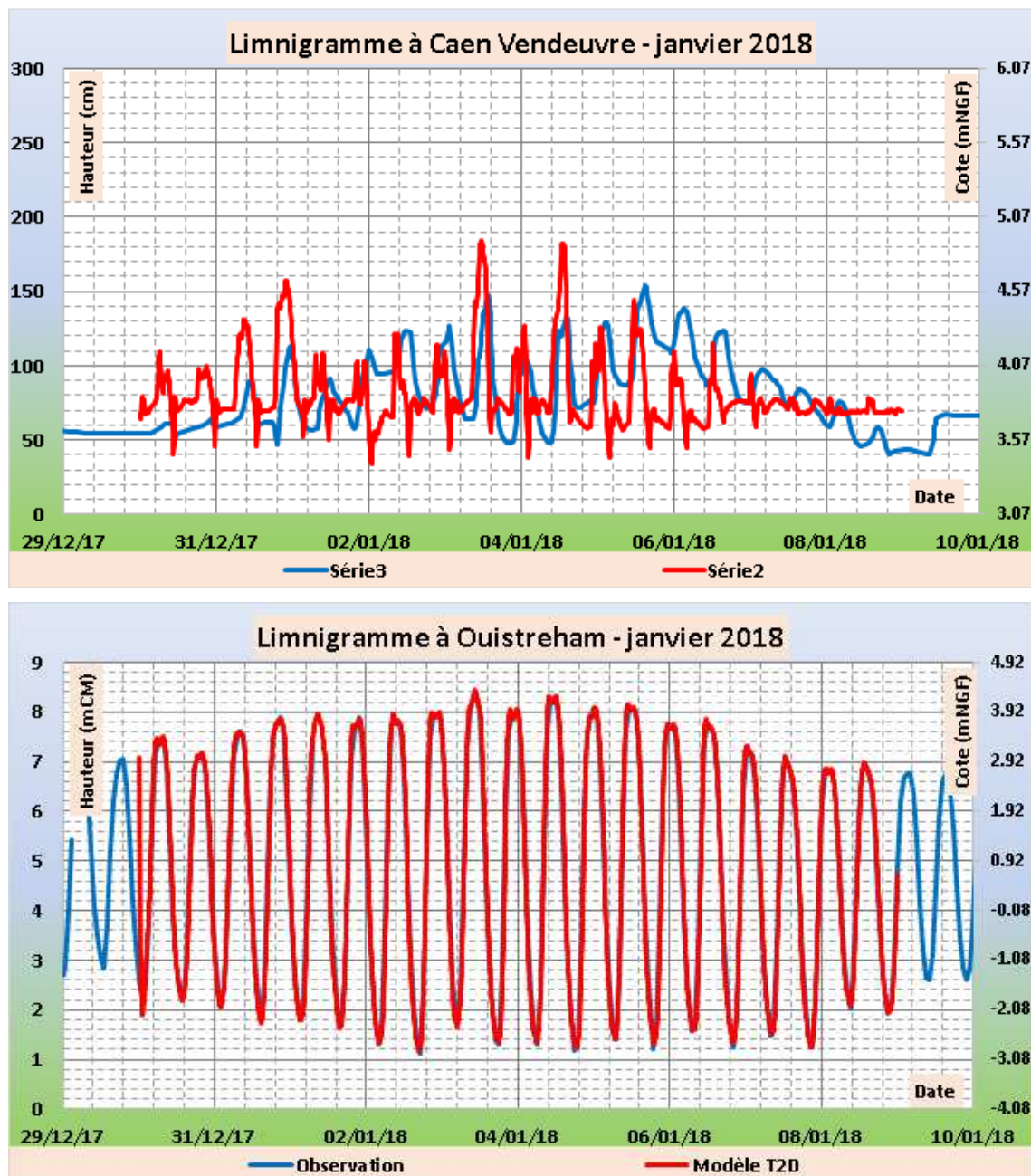


Figure 3-1 : niveaux d'eau mesurés et calculés par le modèle TELEMAC-2D – janvier 2018.

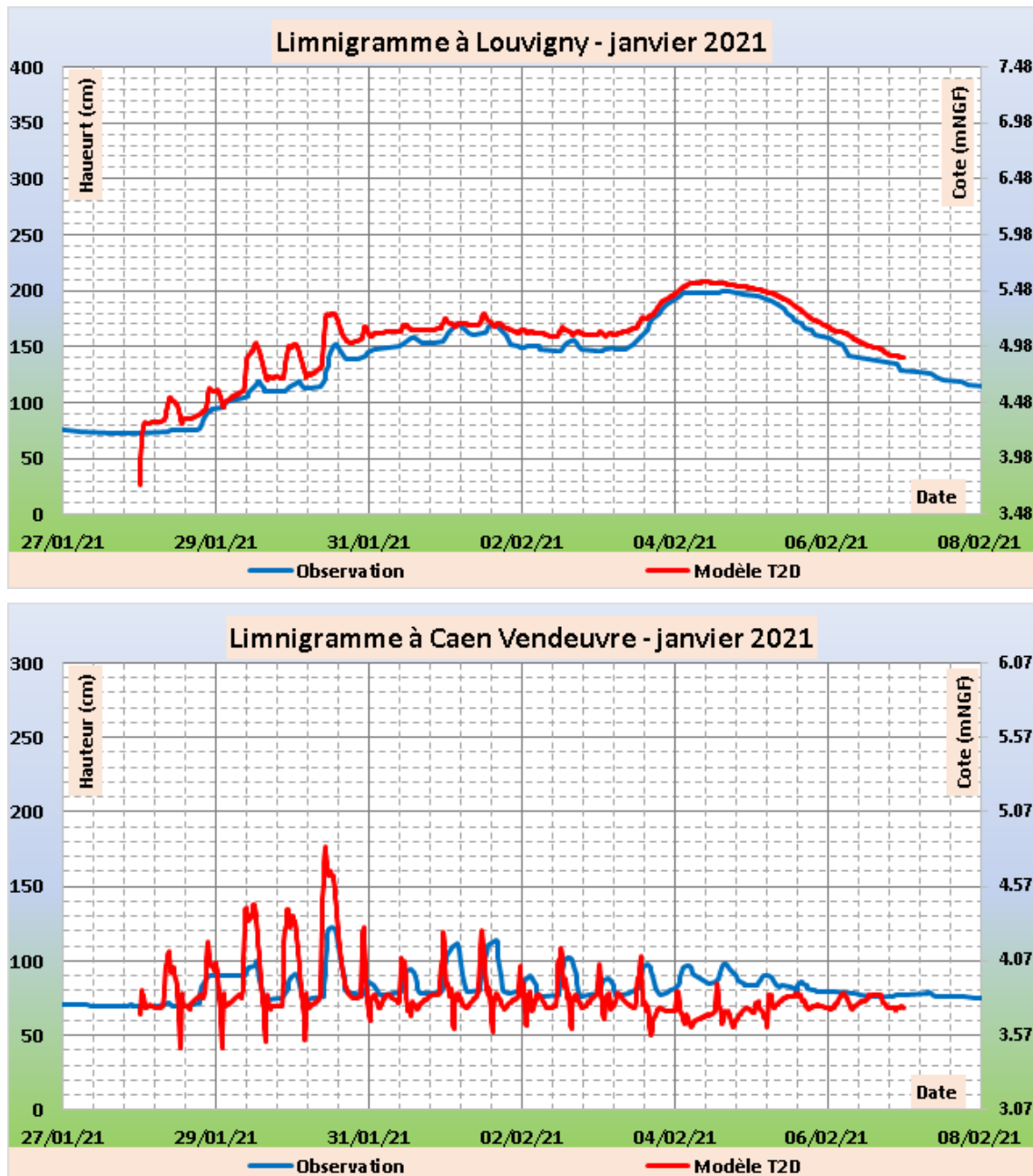
Les niveaux à Ouistreham sont très bien représentés par le modèle.

A l'échelle de Louvigny, les niveaux observés sont également bien représentés, le pic de la crue étant bien calculé par le modèle.

A la station de Caen Vendeuvre, la gestion des ouvrages de gestion du canal influe fortement sur les niveaux calculés. Le calage y est moins satisfaisant.

3.2.2 CRUE DE FEVRIER 2021

Les graphiques suivants présentent le calage des niveaux d'eau aux stations sur le domaine de calcul :



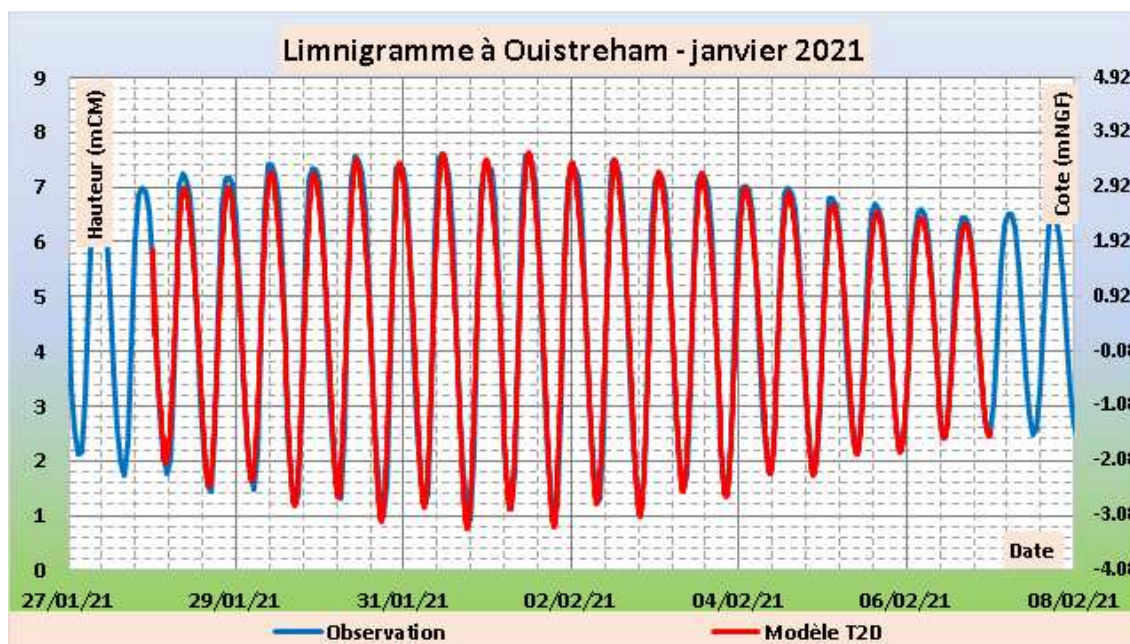


Figure 3-2 : niveaux d'eau mesurés et calculés par le modèle TELEMAC-2D – février 2021.

Les mêmes remarques que pour la crue de janvier 2018 peuvent être formulées : excellent calage à Ouistreham, calage satisfaisant à Louvigny (légère sur-estimation du niveau observé) et calage peu satisfaisant à Caen Vendeuvre du fait de l'influence de la gestion des ouvrages.

3.3 VERIFICATION EN SIMULANT LA CRUE DE L'ORNE A 625 M³/S

Le calage a été mené sur des crues récentes mais de faible intensité : débit de pointe inférieur au débit décennal de l'Orne.

En fait, depuis les travaux de protection contre les crues menés dans l'agglomération caennaise, l'Orne n'a pas connu de crue significative. Il n'est donc pas possible de caler le modèle dans l'état actuel (après les aménagements) pour de fortes crues.

En conséquence, les résultats pour de fortes crues sont comparés aux résultats de l'étude SOGREAH de 2005. La crue de 625 m³/s est retenue pour cette vérification¹.

Le Tableau 3-1 reprend les résultats de l'étude SOGREAH (tableau 2 du rapport (SOGREAH, septembre 2005)) comparés aux résultats du modèle TELEMAC-2D développé pour la présente étude :

¹ : il ne s'agit pas à proprement parler d'un calage mais d'une vérification de cohérence/adéquation du modèle 2D au regard des modélisations de l'étude SOGREAH de 2005. Le modèle SOGREAH avait été calé en situation avant travaux sur des crues réelles, en particulier la crue de janvier 1995.

Situation	Cote calculée (mNGF) SOGREAH 2005	Cote calculée (mNGF) ISL-2021	Ecart (cm)
1 Ferme Athis	7,31	7,48	+17
2 Louvigny	7,32	7,39	+7
3 Amont pont SNCF	7,29	7,31	+2
4 Aval pont SNCF	7,25	7,24	-1
5 Coude de l'île Enchantée RD	7,27	7,22	-5
6 Amont de la Cavée	6,80	6,75	-5
7 Aval de la Cavée	6,69	6,61	-8
8 Hippodrome	6,47	6,30	-17
9 Amont pont de Bir Hakeim	6,13	6,03	-10
10 Aval pont de Bir Hakeim	5,94	5,69	-25
11 Amont pont de Vaucelles	5,87	5,63	-24
12 Aval pont de Vaucelles	5,64	5,43	-21
13 Amont pont Churchill	5,52	5,29	-23
14 Aval pont Churchill	5,34	5,22	-12
15 Amont pont de Vendeuvre	5,20	5,10	-10
16 Amont barrage de Montalivet	5,12	5,04	-8
17 Aval barrage de Montalivet	5,08	5,01	-7
18 400 m en aval du barrage de Montalivet	4,98	4,93	-5
19 100 m en amont du viaduc de Calix	4,90	4,79	-11
20 900 m en aval du viaduc de Calix	4,76	4,61	-15
21 Entre les ponts miniers SMN1 et SMN2	4,67	4,46	-21
22 500 m en aval des ponts de Colombelles	4,37	4,09	-28
23 Vers le pont des ciments français ²	3,45	3,98	+53
24 Orne du Maresquier	3,26	3,60	+34
25 Canal maritime – Amont pont de la Fonderie	4,47	4,60	+13
26 Canal maritime – Aval pont de la Fonderie	4,15	4,30	+15
27 Canal maritime – Viaduc de Calix	4,11	4,21	+10
28 Canal maritime – Pegasus Bridge	4,01	4,18	+17
29 Canal maritime – Amont Maresquier	4,02	4,09	+7
30 Canal maritime – Ecluses de Ouistreham	4,02	4,09	+7

Tableau 3-1 : résultats de la crue de 625 m³/s.² : la localisation de l'ouvrage n'est pas bien connue ce qui peut en partie expliquer l'importance de l'écart.

Les résultats des deux modèles sont cohérents dans l'ensemble avec des écarts pouvant être importants localement : traversée de Caen par exemple entre les ponts Bir Hakeim et Vendeuvre.

4 SIMULATIONS DE CRUES DE L'ORNE

4.1 HYPOTHESES

Les hydrogrammes des crues théoriques de différentes périodes de retour ont été établis dans le cadre de l'étude de dangers de la digue du canal maritime (PNA, 2018). Les hydrogrammes sont rappelés sur la Figure 4-1 :

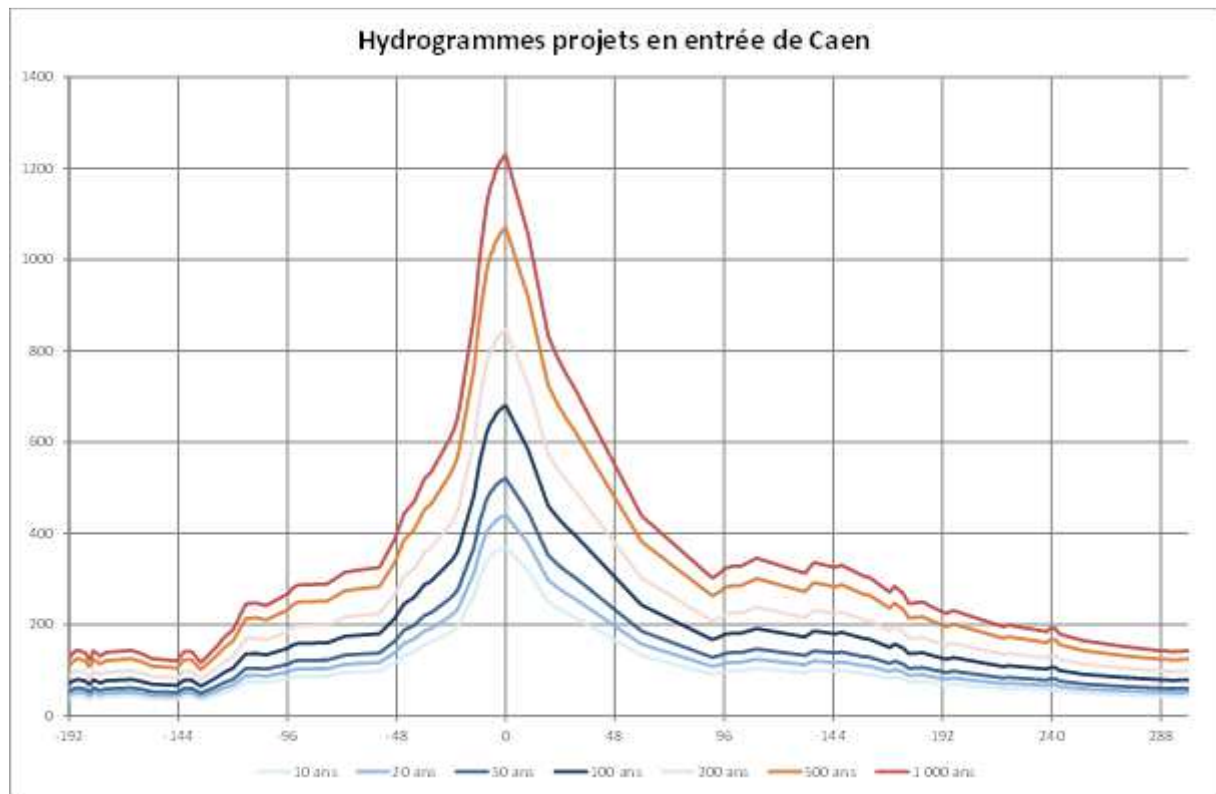


Figure 4-1 : hydrogrammes de crues de l'Orne à Caen.

Les valeurs de débits de pointe sont rappelées dans le Tableau 4-1 :

Agglomération de Caen	Période de retour					
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	500 ans	1 000 ans
Débit de pointe en m ³ /s	400	460	550	665	925	1 040

Tableau 4-1 : débits de pointe de l'Orne à Caen.

Les valeurs retenues dans le cadre du PAPI de l'Orne (cf. (Institution Interdépartementale du Bassin de l'Orne, septembre 2011)) sont de 390 m³/s pour la crue de période de retour 10 ans et 640 m³/s pour la crue de période de retour 100 ans. Les valeurs obtenues sont cohérentes avec les études antérieures.

4.2 RESULTATS

L'ensemble des crues ont été simulées avec le modèle hydraulique 2D. Les lignes d'eau le long de l'Orne maritime et le long du canal maritime sont données sur les graphiques suivants :

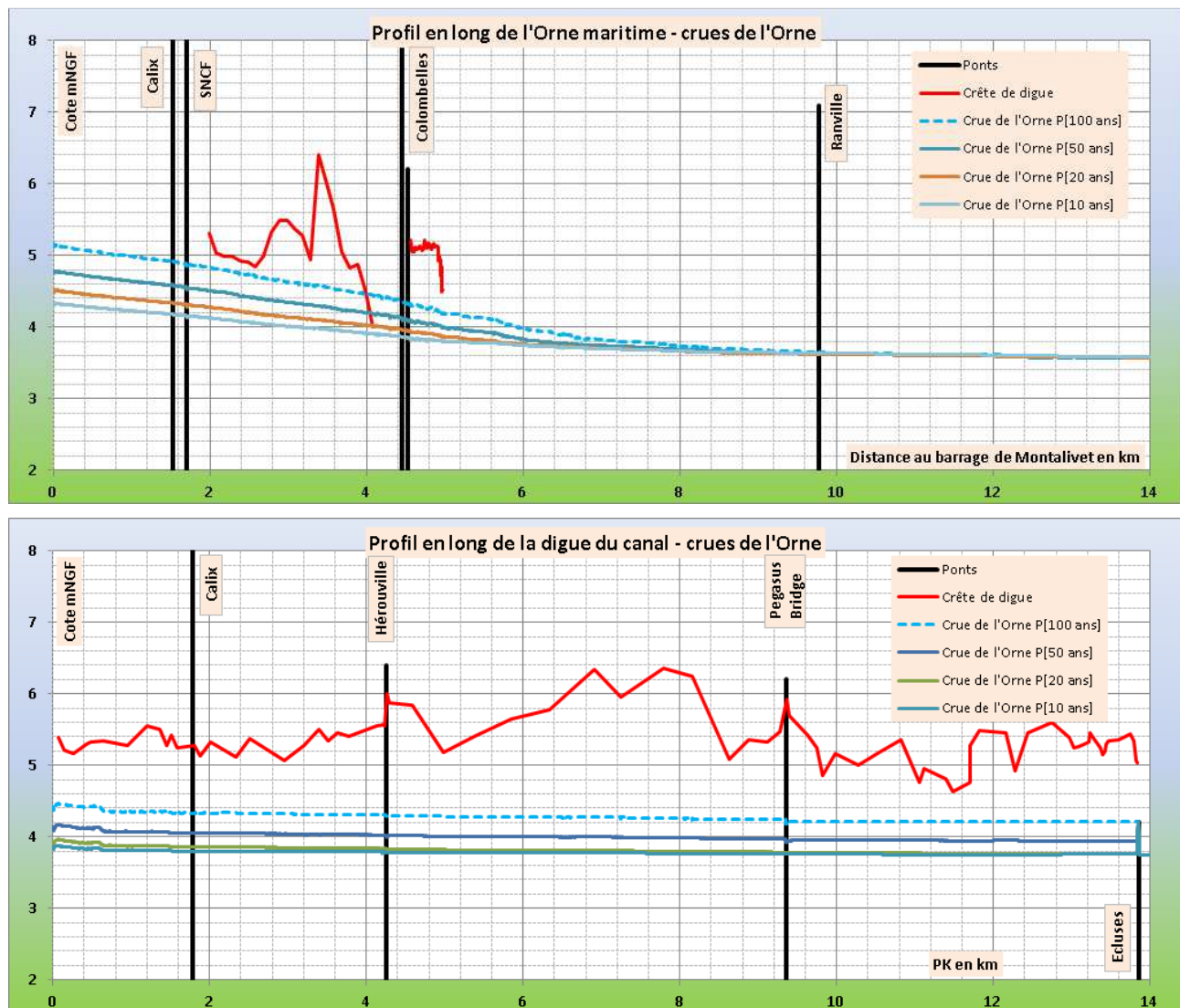


Figure 4-2 : lignes d'eau pour les crues de référence.

5 SIMULATIONS D'ÉVÉNEMENTS MARINS

5.1 HYPOTHESES

Les simulations d'événements marins sont menées sans prendre en compte de crue de l'Orne. Un débit de l'Orne et de l'Odon est injecté en amont du modèle de sorte à obtenir un débit constant à Caen correspondant au débit moyen de l'Orne en hiver, environ 70 m³/s (dans ces conditions, seules les vannes du barrage de Montalivet sont manœuvrées).

Les événements marins sont construits à partir du générateur de marée et en ajoutant à la frontière une surcote sur les niveaux d'eau.

Cette surcote est paramétrée à partir de la surcote observée en février/mars 2010 (tempête Xynthia) à Ouistreham.

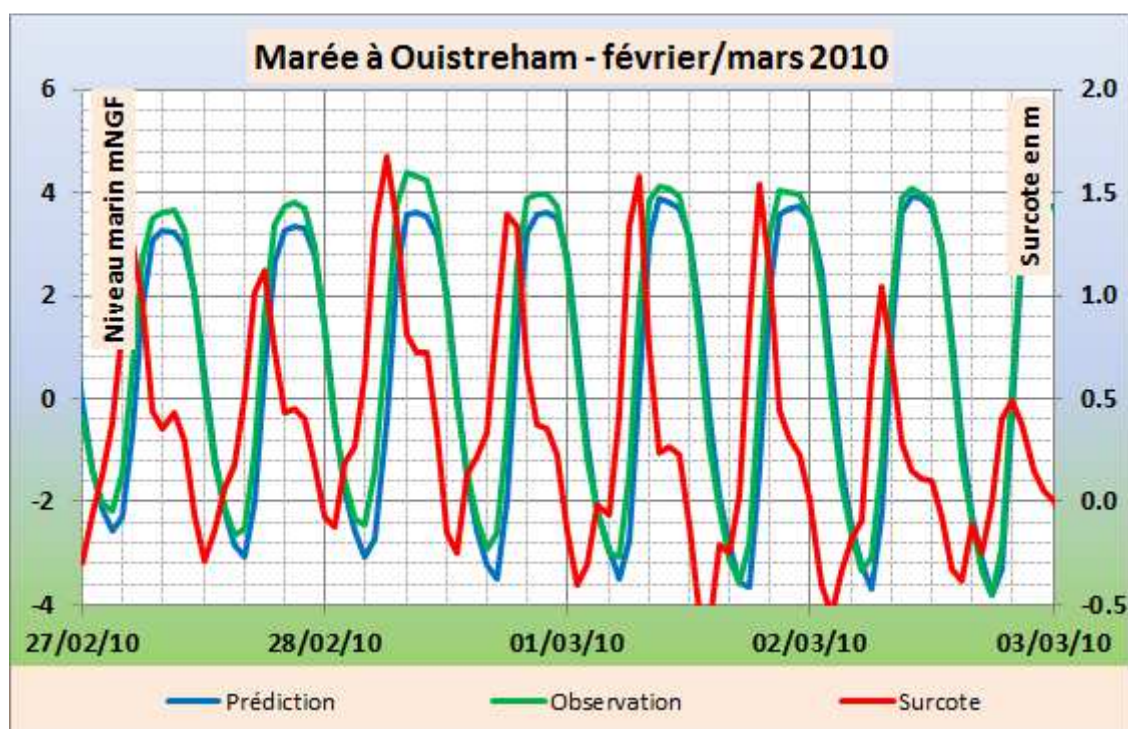


Figure 5-1 : surcote observée à Ouistreham en février/mars 2010.

Le phénomène de surcote en Manche présente une particularité : le maximum de la surcote intervient généralement à mi-marée montante et est rarement en phase avec la pleine mer. Cette particularité a été mise en évidence dans le cadre du projet VIMER mené par Météo-France (Etude des tempêtes menaçant le littoral breton, janvier 2015). Elle est illustrée sur la Figure 5-2 avec la superposition de plusieurs surcotes observées lors d'événements récents à Ouistreham :

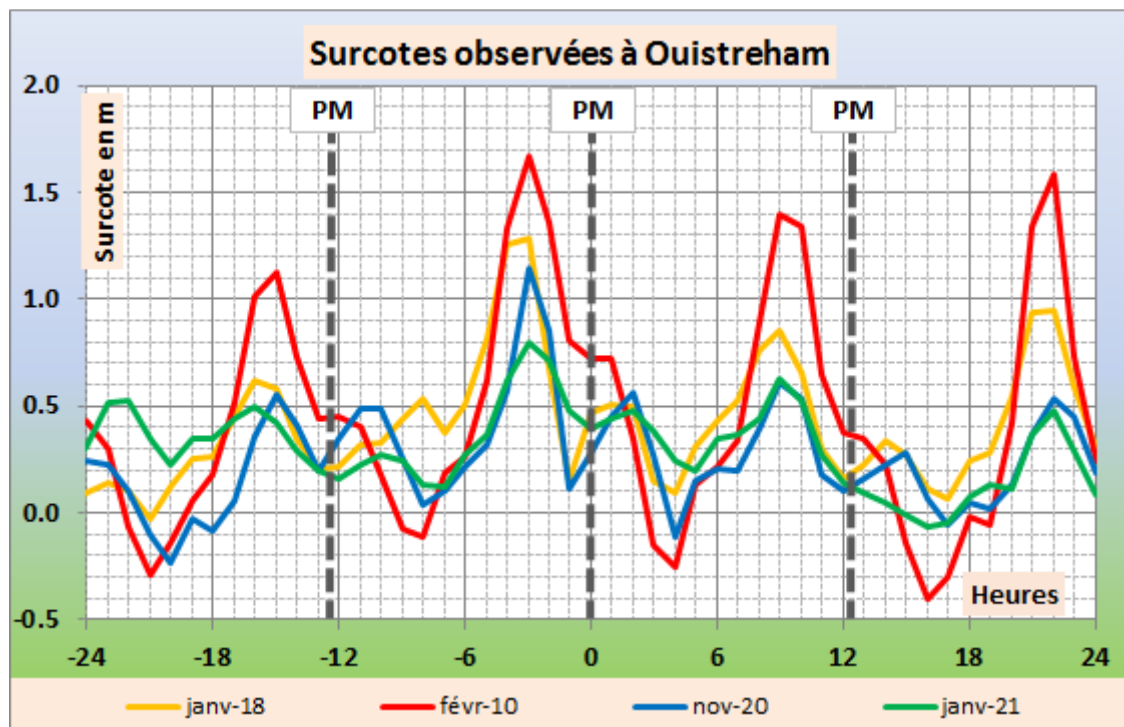
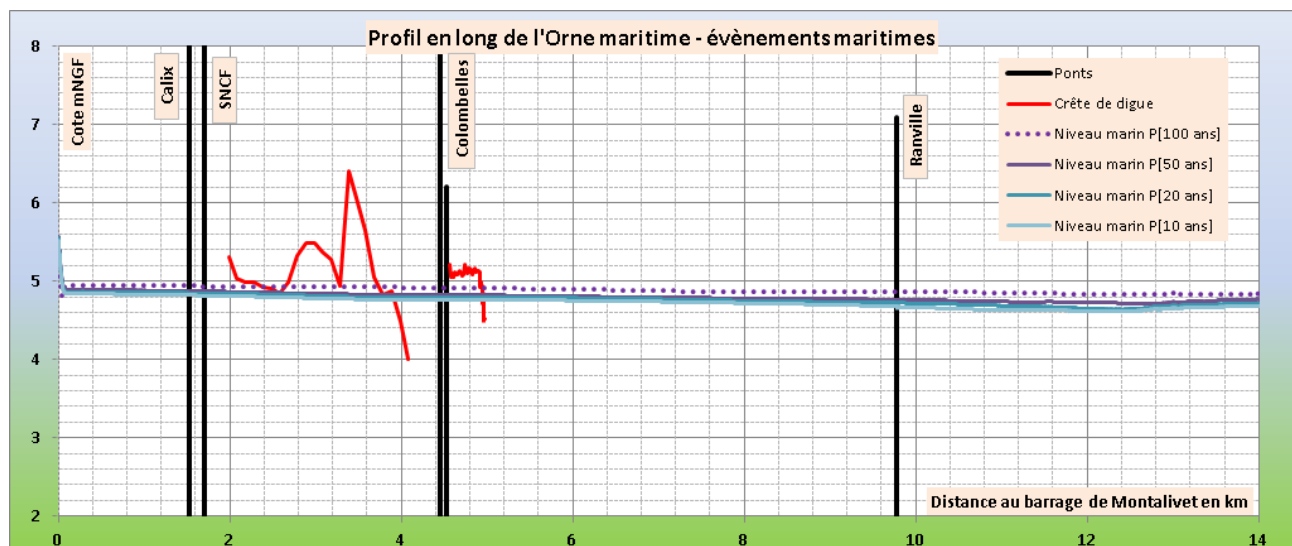


Figure 5-2 : surcotes observées à Ouistreham, décalage du pic de surcote avec la pleine mer (PM).

5.2 RESULTATS

Les graphiques suivants présentent les lignes d'eau le long du canal maritime et le long de l'Orne maritime :



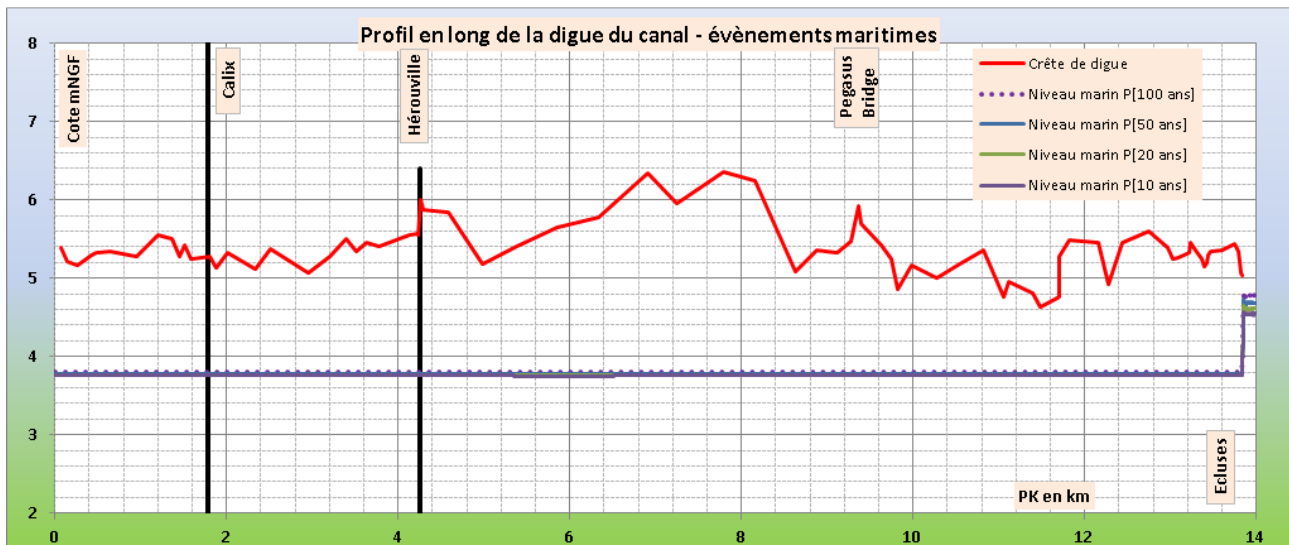


Figure 5-3 : lignes d'eau pour les évènements marins de référence.

Sur le canal maritime, des surverses ont lieu au niveau des écluses et des entrées d'eau sont calculées dans le canal. Toutefois, les volumes entrant sont très faibles (sous réserve de la bonne tenue des portes des écluses) et sont stockés dans le canal avec une sur-élévation du canal d'à peine 10 cm pour l'évènement centennal.

6 PROPOSITIONS DE SCENARIOS

6.1 SECTEUR MARITIME ET DIGUE DE COLOMBELLES

Les scénarios proposés ci-dessous concerne les digues maritimes et du canal ainsi que la digue de Colombelles.

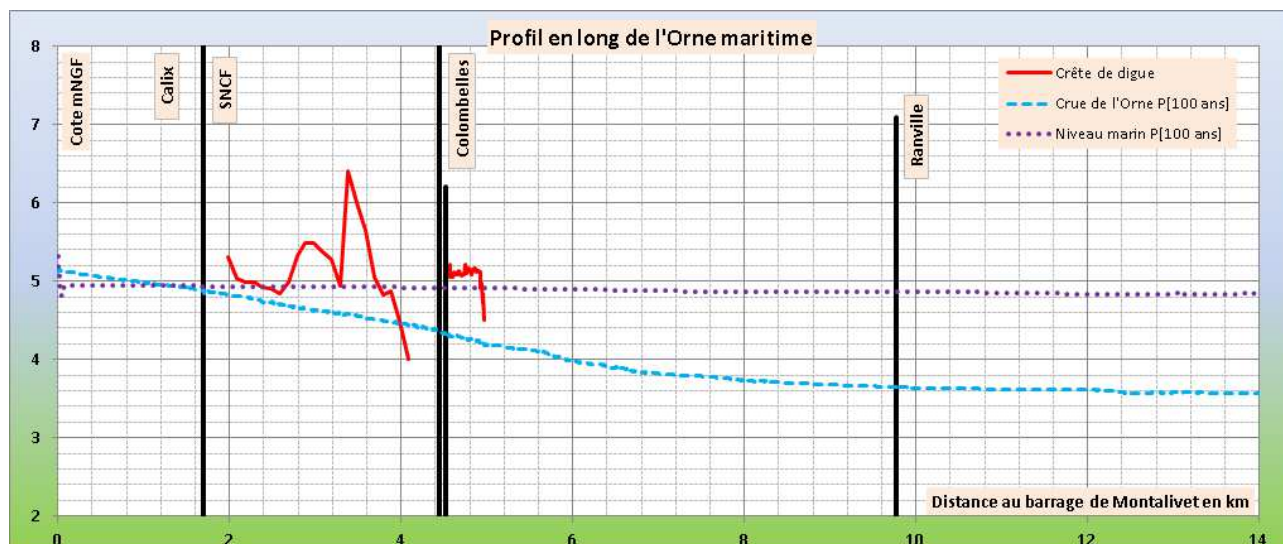


Figure 6-1 : profil en long des deux événements centennaux le long de l'Orne maritime.

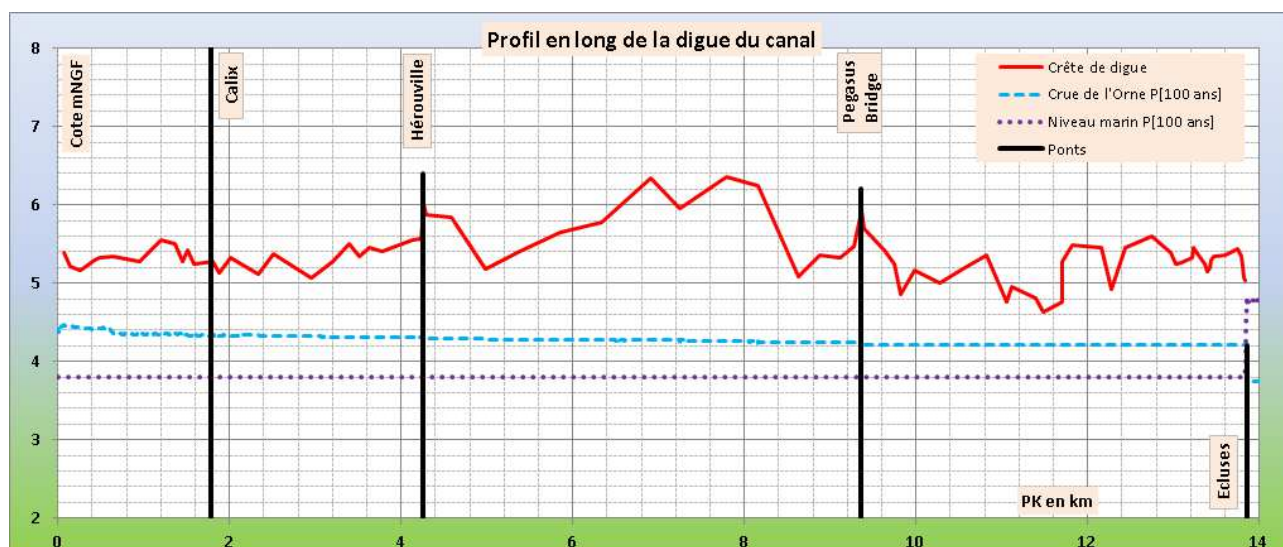


Figure 6-2 : profil en long des deux événements centennaux le long du canal.

Le long du canal, les niveaux atteints en fonctionnement normal sont inférieurs à la crête de digue. Le point bas de la digue est atteint pour une crue de période de retour comprise entre 100 et 200 ans ce qui est cohérent avec l'étude de dangers initiale³.

³ : la modélisation 2D donne des niveaux d'eau légèrement inférieurs au modèle 1D mis en œuvre lors de l'étude de dangers initiale. La période de retour de la crue de début de surverse demeure inférieure à 200 ans, en cohérence avec l'étude de dangers initiale.

Sur l'Orne, les niveaux en crues sont inférieurs à ceux estimés lors des études de dangers des digues de Caen la mer (2019), avec des écarts de l'ordre de 10 à 15 cm. Pour les événements marins, les niveaux calculés avec le modèle 2D sont très similaires.

Le long de la digue de Colombelles, l'évènement marin est prépondérant : les résultats des deux modèles (1D et 2D) sont très proches.

6.2 LES SCENARIOS DE L'ETUDE DE DANGERS – ARRETE DU 7 AVRIL 2017

L'arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers des digues organisées en systèmes d'endiguement définit 4 scénarios hydrauliques à intégrer dans l'étude de dangers :

- Le **scénario 1** est celui du fonctionnement nominal du système d'endiguement quand le niveau de l'eau, sous l'effet de la crue ou d'une submersion marine, correspond au plus au niveau de protection ;
- Le **scénario 2** est représentatif d'une défaillance fonctionnelle du système d'endiguement au moment où se produit un aléa dont l'intensité équivaut à l'intensité de l'aléa correspondant au niveau de protection ;
- Le **scénario 3** est représentatif d'une défaillance structurelle du système d'endiguement ;
- Le **scénario 4** est représentatif du comportement du système d'endiguement quand se produit l'aléa de référence du plan de prévention des risques naturels inondation ou littoraux.

L'arrêté du 22 juillet 2019 rend le scénario 4 facultatif.

6.3 SCENARIO 1

Sur le secteur d'étude, deux aléas sont à considérer : l'aléa maritime et l'aléa fluvial. Deux niveaux de protection peuvent être ainsi définis, chacun étant rattaché à l'un ou l'autre des aléas.

Deux scénarios de type 1 sont simulés :

- Scénario 1-F : scénario 1 pour le niveau de protection lié à l'aléa fluvial ;
- Scénario 1-M : scénario 1 pour le niveau de protection lié à l'aléa maritime.

A priori, le niveau de protection attendu pour les deux aléas correspond à la l'aléa d'occurrence centennale.

6.4 SCENARIO 2

Compte tenu des nombreux ouvrages, les scénarios de type 2 sont relativement nombreux. Deux scénarios sont envisagés sur la façade maritime :

- Scénario 2-M-a : scénario 2 sur la façade maritime, incluant l'ouverture totale et permanente des clapets anti-retour pendant toute la durée de l'évènement correspondant au niveau de protection ;
- Scénario 2-M-b : non ouverture des clapets pendant un évènement pluvieux sur le bassin versant. La durée de l'évènement est de 24 heures.

Deux scénarios sont envisagés pour le secteur de Colombelles :

- Scénario 2-M-a : défaut de fermeture des clapets anti-retour pendant toute la durée de l'évènement correspondant au niveau de protection. Il s'agit du même scénario que ci-dessus.
- Scénario 2-F-b : défaillance dans l'évacuation de la crue vers le canal. Le cas le plus défavorable consiste en une non ouverture des vannes du Maresquier en crue ;

Quatre scénarios sont envisagés pour la digue Ouest du canal :

- Scénario 2-M-c : ouverture accidentelle des portes d'une des deux écluses de Ouistreham pendant l'évènement marin correspondant au niveau de protection ;
- Scénario 2-F-a : non fermeture des clapets anti-retour des ouvrages traversant pendant l'évènement fluvial de référence ;
- Scénario 2-F-b : défaillance dans l'évacuation de la crue vers le canal. Le cas le plus défavorable consiste en une non ouverture des vannes du Maresquier en crue ;
- Scénario 2-F-c : défaillance dans l'évacuation de la crue vers l'Orne maritime par non ouverture des vannes du barrage de Montalivet.

Concernant le secteur du canal, le scénario correspondant à une impossibilité totale d'évacuer les eaux de pluies venant des bassins versants n'est pas étudié : un tel scénario implique une défaillance simultanée de l'ensemble des ouvrages liés au fossé de ligne : clapets, vannes, siphons et pompes. Un tel scénario apparaît peu réaliste.

Au total, plusieurs scénarios pouvant être communs à plusieurs secteurs, six variantes sont proposées pour le scénario 2.

6.5 SCENARIO 3

Le scénario 3 correspond à une défaillance structurelle entraînant un risque de rupture supérieur à 50 %.

Sur la façade maritime, un tel risque de rupture implique des niveaux d'eau particulièrement « extraordinaires ». La précédente étude de danger avait évalué à 10 000 ans la période de retour de l'évènement maritime pouvant être à l'origine d'une rupture du cordon dunaire. Un tel évènement ne répond pas au caractère « réaliste et porteur d'enseignements » attendu dans l'arrêté du 7 avril 2017. Il n'est pas proposé de simuler ce scénario de défaillance.

Les scénarios de défaillance structurelle concernent donc le secteur de Colombelles et la digue du canal. Les études de dangers existantes sur ces deux secteurs ont montré qu'il faut considérer des scénarios amenant à la surverse sur les digues pour atteindre des risques de rupture de 50 %.

Les scénarios proposés sont ainsi :

- Scénario 3-M-a : évènement maritime occasionnant une surverse et la rupture de la digue de Colombelles, période de retour supérieure à 100 ans ;
- Scénario 3-F-a : évènement de crue dépassant les capacités d'évacuation du canal, occasionnant la surverse sur la digue puis sa rupture, crue de l'Orne de période de retour supérieure à 200 ans.

6.6 SCENARIO 4

De la même manière que pour le scénario 1, deux aléas sont à considérer : l'aléa maritime et l'aléa fluvial.

Deux scénarios de type 4 sont simulés :

- Scénario 4-F : scénario 4 pour le niveau de référence lié au PPRi de la Basse Vallée de l'Orne ;
- Scénario 4-M : scénario 4 pour le niveau de référence lié au PPRL.

Dans le cas où le niveau de protection attendu correspond à la l'aléa d'occurrence centennale, ces deux scénarios sont identiques aux scénarios 1.

Par ailleurs, ce scénario 4 est devenu facultatif.

7 BIBLIOGRAPHIE

- Alp'Géorisques - IMDC. (2014). *PPRL Bessin et Dives-Orne - Phase 1 : Analyse préalable des sites*. DDTM du Calvados.
- Alp'Géorisques - IMDC. (2015). *PPRL Bessin et Dives-Orne - Cartographie des aléas littoraux - Secteur Dives-Orne*. DDTM du Calvados.
- Boudiere Edwige, M. C.-G. (2013). A suitable metocean hindcast database for the design of Marine energy converters. *International Journal of Marine Energy*, 3-4, pp. e40-e52.
- BRGM. (2014). *Méthodologie de détermination du recul maximal des dunes pour les évènements extrêmes - BRGM/RP-63157-FR*. BRGM.
- Cerema. (Juin 2018). *Etude de dangers de systèmes d'endiguement - Concepts et principes de réalisation des études*.
- CETMEF. (2013). *Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes - Environnements maritime et estuarien*. CETMEF.
- Charier. (2015). *Note de calcul du rideau - Confortement de berges de l'Orne à Colombelles*.
- CIRIA. (1996). *Beach Management Manual*. CIRIA.
- CIRIA/CUR/CETMEF. (2009). *Guide Enrochement - L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques - Version française du Rock Manual*. CETMEF.
- DREAL Basse-Normandie. (septembre 2014). *Territoire à risque important de Caen – Cartographie des aléas et des enjeux – Rapport explicatif*.
- EDF R&D - LCHF. (1986). *Catalogue sédimentologique des côtes françaises - Côtes de la Mer du Nord et de la Manche*. Eyrolles.
- GRESARC. (2002). *Suivi de l'évolution des côtes du département du Calvados - novembre 1995-février 2002 - Analyses*. Conseil Général du Calvados.
- Institution Interdépartementale du Bassin de l'Orne. (septembre 2011). *Programme d'actions de prévention des inondations des bassins versants de l'Orne et de la Seulles – Diagnostic du territoire*.
- ISL-Ingénierie. (2017). *Etude de dangers de la digue berge Ouest du canal de Caen à la mer*. PNA.
- Météo France. (juillet 1999). *Estimation des hauteurs de précipitations d'occurrence rare pour des durées de cumul de 1 à 10 jours sur 3000 postes français*.
- SEMOFI. (2015). *Confortement des berges de l'Orne - Chemin de Halage Colombelles - Rapport d'étude géotechnique préalable et rapport d'étude de conception*.
- Service Hydrographique et Océanographique de la Marine. (2012). *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique)*. SHOM/CETMEF.
- Service Hydrographique et Océanographique de la Marine. (2014). *Référence Altimétriques Maritimes - Ports de France métropolitaine et d'outre-mer - Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée*. SHOM.
- SOCOTEC. (2015). *Etude de dangers - Digue de Caffarelli*.
- SOGREAH. (mars 1999). *Etude hydraulique sur modèles mathématique et physique des aménagements de lutte contre les inondations dans l'agglomération caennaise*. Syndicat Mixte de lutte contre les inondations dans la vallée de l'Orne et son bassin versant.

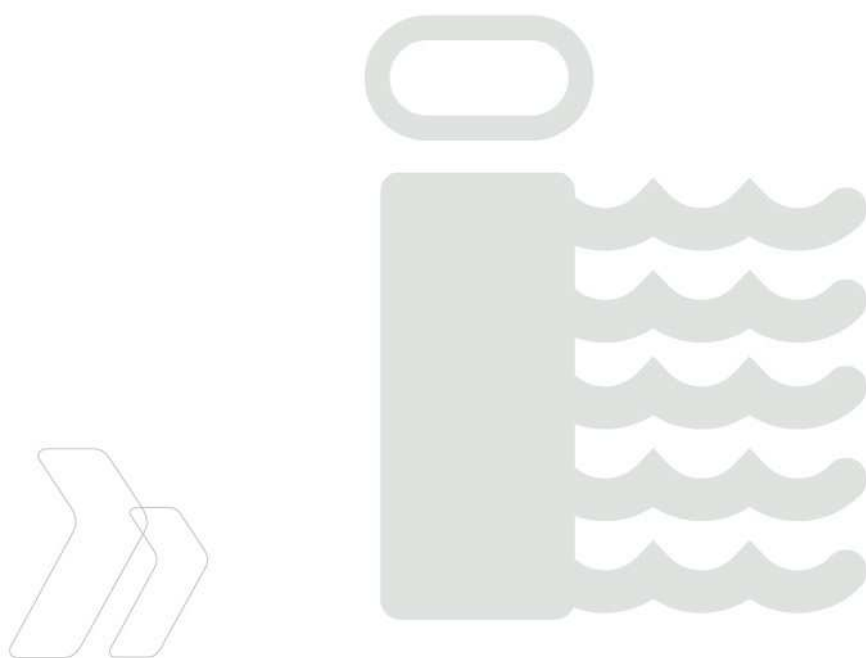
SOGREAH. (septembre 2005). *Modélisation comparative des aménagements préconisés en 1999 et de la situation réelle en 2005*. Syndicat Mixte de lutte contre les inondations dans la vallée de l'Orne et son bassin versant.

Van der Meer J.W, & a. (2016). *Eurotop 2016 - Manual on wave overtopping of sea defences and related structures*.

ANNEXE 1 TITRE ANNEXE

Texte

Infrastructures
Aménagements
hydrauliques



⊕
COMMUNAUTE
URBAINE CAEN LA MER

SYSTEMES D'ENDIGUEMENT DANS L'AGGLOMERATION CAENNAISE

Rapport d'étude de dangers

Rapport n° : 20F-201-RP-3
Révision n° : A
Date : 24/06/2021

Votre contact :
Olivier BARBET
barbet@isl.fr

Rapport

ISL Ingénierie SAS - PARIS
75 boulevard Mac Donald
75019 - Paris
FRANCE
Tel. : +33.1.55.26.99.99
Fax : +33.1.40.34.63.36

www.isl.fr

ISL
Ingénierie

Visa

Document actualisé le 24/06/2021.

Révision	Date	Auteur	Chef de Projet	Superviseur	Commentaire
A	24/06/2021	OBA	OBA	OBA	Version pour dépôt du dossier au 30 juin 2021

OBA : BARBET Olivier

Rapport ISL
20F-201-RP-3
Revision A

<http://www.isl.fr/r.php?c=197090>



SOMMAIRE

1	OBJET DE LA NOTE	1
2	CONSTRUCTION DU MODELE	2
2.1	PRINCIPES GENERAUX	2
2.2	LIMITES DU MODELE	3
2.3	GRANDES LIGNES DU MAILLAGE	4
2.4	DEFINITION DE LA BATHYMETRIE DU MODELE – NIVEAU DU TERRAIN NATUREL	4
2.5	INTEGRATION DES SINGULARITES	5
2.5.1	PRISE EN COMPTE DU BATI	5
2.5.2	INTEGRATION DES OUVRAGES	5
2.5.3	INTEGRATION DES OUVRAGES DE GESTION DES NIVEAUX DU CANAL	6
2.6	CONDITIONS AUX LIMITES	6
2.6.1	CONDITIONS AMONT – HYDROGRAMMES	7
2.6.2	CONDITION AVAL – MAREE	7
2.7	CHOIX DES COEFFICIENTS DE FROTTEMENT	7
3	CALAGE ET VALIDATION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE 2D	9
3.1	METHODOLOGIE DU CALAGE	9
3.2	CALAGE SUR DES CRUES RECENTES	9
3.2.1	CRUE DE JANVIER 2018	9
3.2.2	CRUE DE FEVRIER 2021	11
3.3	VERIFICATION EN SIMULANT LA CRUE DE L'ORNE A 625 M ³ /S	12
4	SIMULATIONS DE CRUES DE L'ORNE	15
4.1	HYPOTHESES	15
4.2	RESULTATS	16
5	SIMULATIONS D'EVENEMENTS MARINS	17
5.1	HYPOTHESES	17
5.2	RESULTATS	18

6	PROPOSITIONS DE SCENARIOS	20
6.1	SECTEUR MARITIME ET DIGUE DE COLOMBELLES	20
6.2	LES SCENARIOS DE L'ETUDE DE DANGERS – ARRETE DU 7 AVRIL 2017	21
6.3	SCENARIO 1	21
6.4	SCENARIO 2	21
6.5	SCENARIO 3	22
6.6	SCENARIO 4	22
7	BIBLIOGRAPHIE	23

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 TITRE ANNEXE

TABLE DES FIGURES

Figure 2-1 : lignes directrices permettant de « forcer » le maillage le long des éléments structurants.	2
Figure 2-2 : emprise du modèle 2D.	3
Figure 2-3 : maillage du modèle 2D – détails.	4
Figure 2-4 : modèle après intégration des données bathymétriques.	5
Figure 2-5 : illustration des deux méthodes d'intégration des ouvrages de gestion du canal dans le centre de Caen : à gauche la première méthode, à droite la seconde.	6
Figure 3-1 : niveaux d'eau mesurés et calculés par le modèle TELEMAC-2D – janvier 2018.	10
Figure 3-2 : niveaux d'eau mesurés et calculés par le modèle TELEMAC-2D – février 2021.	12
Figure 4-1 : hydrogrammes de crues de l'Orne à Caen.	15
Figure 4-2 : lignes d'eau pour les crues de référence.	16
Figure 5-1 : surcote observée à Ouistreham en février/mars 2010.	17
Figure 5-2 : surcotes observées à Ouistreham, décalage du pic de surcote avec la pleine mer (PM).	18
Figure 4-2 : lignes d'eau pour les événements marins de référence.	19
Figure 6-1 : profil en long des deux événements centennaux le long de l'Orne maritime.	20
Figure 6-2 : profil en long des deux événements centennaux le long du canal.	20

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : coefficients de Strickler retenus.....	8
Tableau 3-1 : résultats de la crue de 625 m ³ /s.	13
Tableau 4-2 : débits de pointe de l'Orne à Caen.	15

]

1 OBJET DE LA NOTE

La présente note hydraulique décrit la construction et le calage du modèle hydrodynamique 2D de la basse vallée de l'Orne sur le territoire de la CU Caen la mer.

Ce modèle a été développé par ISL-Ingénierie sur la suite TELEMAC-2D développée par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (EDF-R&D).

2 CONSTRUCTION DU MODELE

2.1 PRINCIPES GENERAUX

Le maillage est construit avec le logiciel MATISSE fourni avec la distribution de TELEMAT. Ce logiciel permet de définir le maillage en s'appuyant sur des points, des lignes ou encore des profils en travers et en paramétrant des critères de maillage variables qui fixent les tailles de mailles en tout point du domaine.

Le maillage a été construit en deux étapes :

- Maillage de la vallée de l'Orne jusqu'à l'estuaire ;
- Assemblage avec le maillage du modèle existant en front de mer (modèle développé lors de l'étude de dangers des digues de Ouistreham et Hermanville).

Le principe retenu pour la construction du modèle est de s'appuyer sur les éléments structurants (berges, digues, routes et rues principales, remblais, groupes de bâtis, lits mineurs, ...) pour affiner le maillage en leurs voisinages. Ce principe se justifie d'une part pour bien prendre en compte ces éléments structurants qui peuvent influencer les écoulements, d'autre part pour densifier le maillage au voisinage des enjeux.

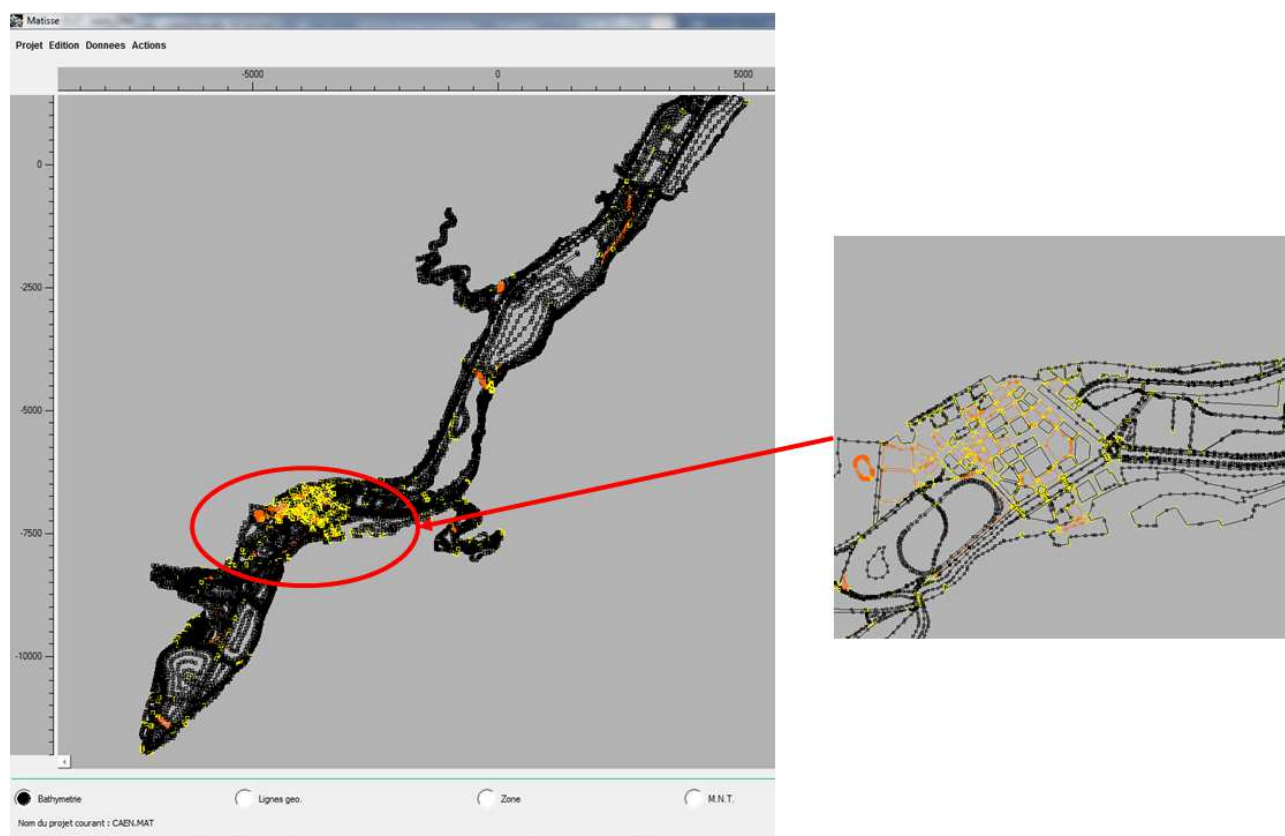


Figure 2-1 : lignes directrices permettant de « forcer » le maillage le long des éléments structurants.

Le modèle est référencé en Lambert 93. Néanmoins, une translation est opérée sur l'axe des ordonnées Y (- 6 000 000 m) afin de réduire la longueur des nombres (limitation dans TELEMAT à 7 chiffres représentatifs).

Pour ce qui concerne les altitudes, le modèle est référencé dans le système du nivellement général de la France, NGF-IGN69.

2.2 LIMITES DU MODELE

Le modèle hydraulique 2D compte quatre limites amont :

- Sur l'Orne, la limite amont se situe sur la commune de Saint-André-sur-Orne, à proximité d'Etavaux ;
- Sur l'Odon, la limite amont se situe au droit du Mesnil, à cheval sur les communes de Louvigny et Caen ;
- Sur le Biez (ou la Gronde), la limite amont se situe sur la commune de Mondeville, environ 500 m en amont du périphérique ;
- Sur la Seine, la limite se situe dans l'estuaire au droit d'Honfleur.

La limite aval se situe en pleine mer, à environ 20 km de la côte.

Sur les bords, les limites du modèle suivent les courbes de niveaux correspondant aux limites des plus hautes eaux avec une revanche de l'ordre de 1 m.

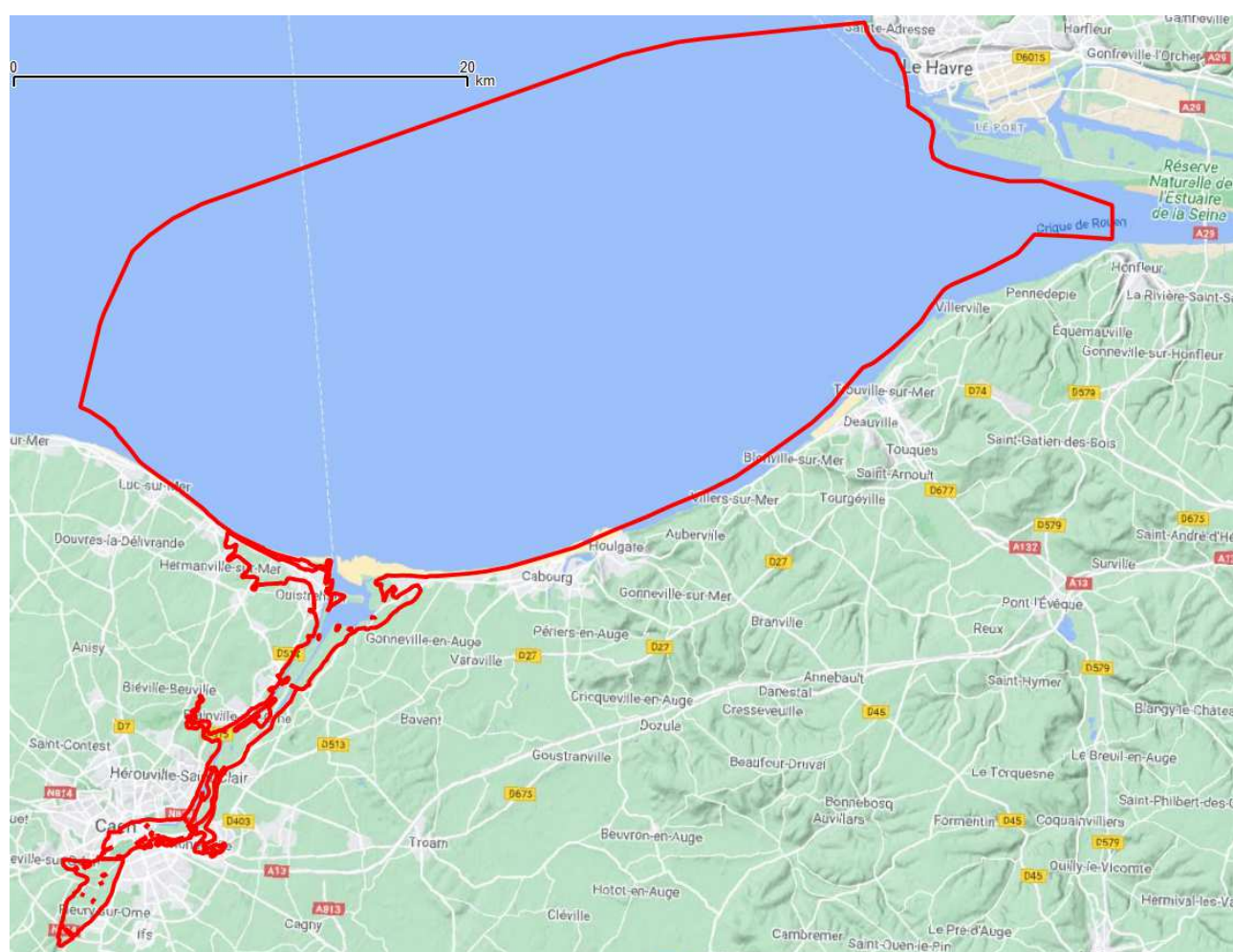


Figure 2-2 : emprise du modèle 2D.

Au total, le modèle s'étend sur 690 km².

La partie maritime occupe une large part de cette superficie, environ 650 km². La partie « terrestre », vallée de l'Orne et son estuaire, occupe ainsi un peu moins de 40 km².

Le linéaire de l'Orne modélisé est d'environ 25 km.

2.3 GRANDES LIGNES DU MAILLAGE

Le maillage est construit à partir d'éléments triangulaires, de différentes tailles en fonction des besoins :

- 5 à 10 m en lits mineurs (Orne et canal) ;
- 3 à 8 m en lits mineurs (Odon, Biez) ;
- 10 à 20 m dans les zones urbanisées ;
- 3 à 6 m le long des digues ;
- 15 à 50 m en lit majeur ;
- Plusieurs centaines de mètres en mer.

La construction du maillage s'appuie sur les éléments linéaires (routes, bâtiments principaux, berges, remblai en lit majeur, ...).

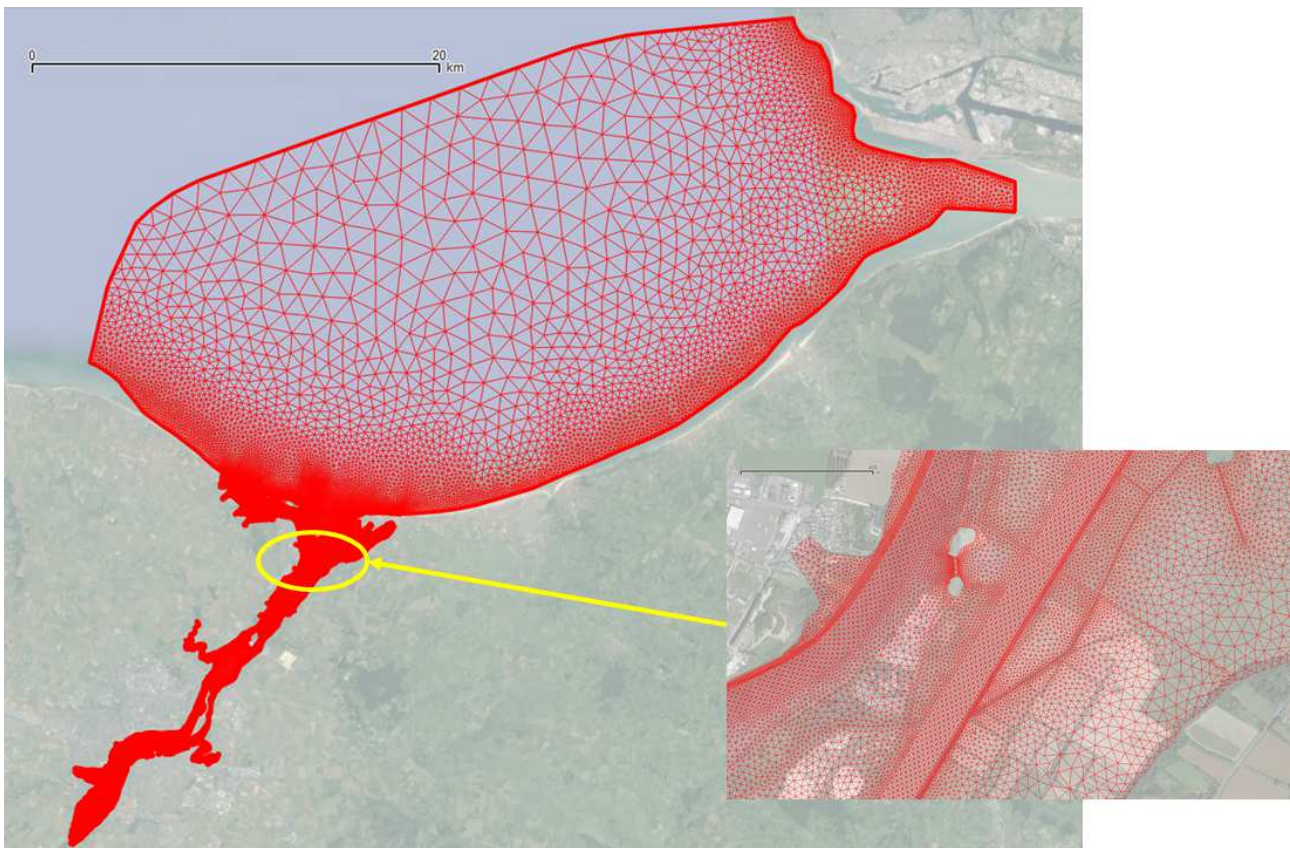


Figure 2-3 : maillage du modèle 2D – détails.

2.4 DEFINITION DE LA BATHYMETRIE DU MODELE – NIVEAU DU TERRAIN NATUREL

de points insuffisamment denses pour être représentatifs du terrain naturel.

Plusieurs traitements successifs permettent d'affecter à chaque nœud du maillage sa cote de terrain naturel :

- Extraction de l'ensemble des nœuds du maillage sous SIG ;
- Affectation automatique des cotes de terrain naturel avec le MNT : le MNT est construit à partir de l'ensemble des données topographiques et bathymétriques fournies ;

- Affectation manuelle et traitements particuliers sur certains nœuds ;
- Export des nœuds sous forme de semis de points ;
- Mise à jour des cotes du modèle sous l'éditeur de projet de FUDAA-PREPRO à partir du semis de points édité.

Les images suivantes représentent le modèle après l'intégration des données bathymétriques.

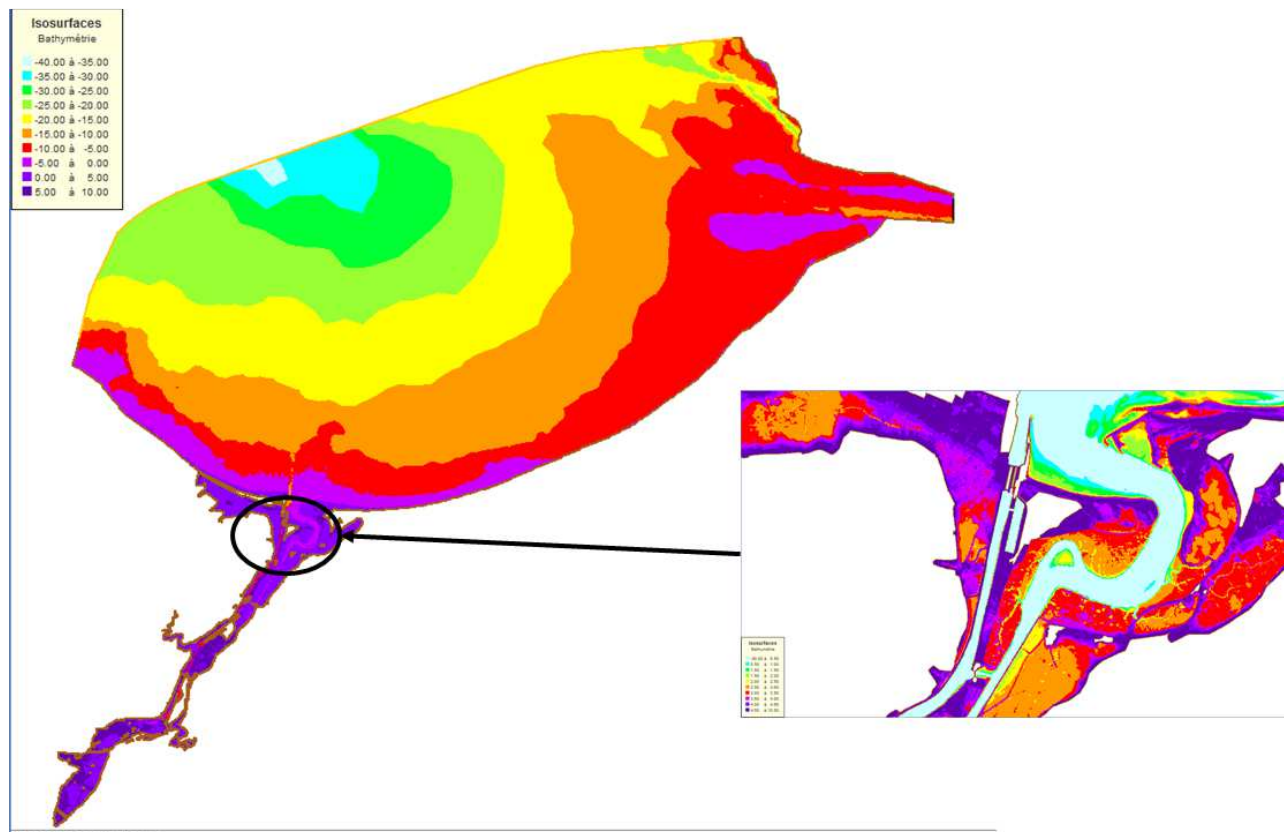


Figure 2-4 : modèle après intégration des données bathymétriques.

2.5 INTEGRATION DES SINGULARITES

2.5.1 PRISE EN COMPTE DU BATI

Le maillage est adapté dans les zones urbaines pour délimiter le bâti par grands ensembles en suivant les rues principales. Cette définition permet de différencier les coefficients de frottement (Strickler) appliqués aux rues de ceux appliqués sur l'emprise du bâti.

La valeur 40 est retenue pour les rues.

Une valeur particulièrement faible, de 1 est retenue sur l'emprise du bâti.

Cette méthode permet de favoriser les écoulements dans les rues tout en laissant la possibilité de transfert d'eau au travers des ensembles bâtis qui ne sont pas totalement imperméables.

2.5.2 INTEGRATION DES OUVRAGES

Les ponts sont représentés dans le modèle en intégrant les culées et les piles au maillage. En pratique, les culées et les piles sont « retirées » du maillage afin d'empêcher tout écoulement au travers des piles et des culées. Cette méthode présente l'avantage de la continuité des équations ce qui assure une meilleure stabilité du calcul.

Cette méthode présente l'inconvénient de ne pas tenir compte de la mise en charge : toutefois, pour les événements simulés, les ponts sur le domaine d'étude ne sont pas sensés se mettre en charge. Cette hypothèse est vérifiée a posteriori.

2.5.3 INTEGRATION DES OUVRAGES DE GESTION DES NIVEAUX DU CANAL

Quatre ouvrages principaux permettent la gestion des niveaux d'eau dans le canal et dans l'Orne à Caen : barrage de Montalivet sur l'Orne, vanne des Portes de l'Orne à l'entrée du bassin Saint-Pierre, vannes du canal de la presqu'île (ou vanne Victor Hugo), vannes de barrage de Maresquier.

Les règles de gestion de ces ouvrages sont particulièrement complexes, elles sont fonction de la hauteur d'eau de l'Orne mesurée à Thury-Harcourt, ainsi que des hauteurs d'eau mesurées dans l'Orne à Caen (échelle du pont de Vendevre) et des hauteurs mesurées dans le canal maritime.

Ces ouvrages sont traités de deux manières différentes selon les événements simulés :

- Crues faibles et événements maritimes : pour ces événements, les ouvrages du centre de Caen ne sont pas totalement effacés (ouverts). Les quatre ouvrages sont intégrés sous formes de frontières dans le maillage, le débit sortant de la frontière amont étant réinjecté sur la frontière aval de l'ouvrage. Un algorithme spécifique est programmé pour gérer l'ouverture des différents ouvrages en respectant au mieux les règles de gestion : celles-ci étant très complexes, l'algorithme de gestion est simplifié (par définition, il ne peut pas prendre en compte les interventions humaines, pour modifier les cotes de consigne par exemple) ;
- Crues importantes : la première méthode faisant intervenir des ouvrages mobiles dont les ouvertures sont interdépendantes, des instabilités de calcul peuvent résulter selon les événements simulés. Pour les crues importantes, les ouvrages du centre de Caen (Montalivet, Portes de l'Orne et vannes Victor Hugo) sont totalement relevés. Afin de simplifier le calcul et s'affranchir des instabilités, les ouvrages sont intégrés au maillage, le calcul des écoulements au travers de leurs ouvertures se faisant à surface libre. Cette méthode sous-estime l'effet de la mise en charge des vannes met assure une meilleure stabilité des calculs.

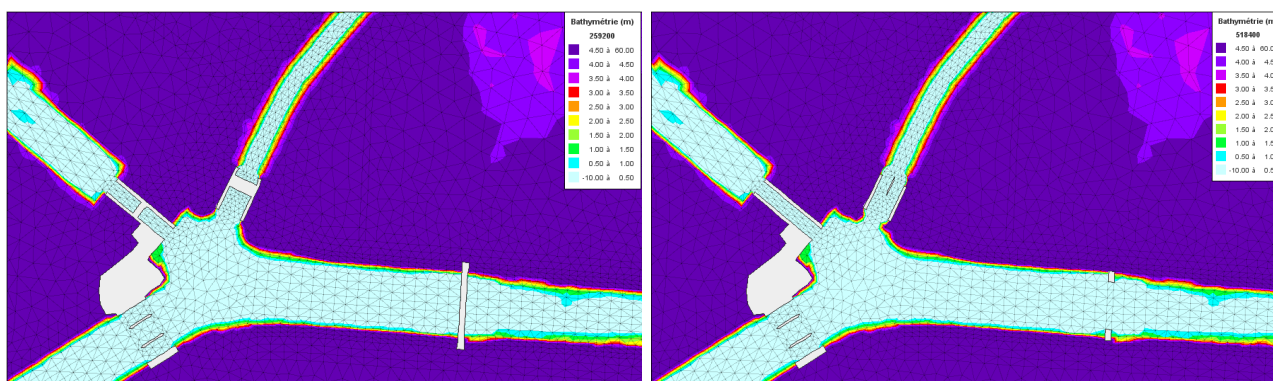


Figure 2-5 : illustration des deux méthodes d'intégration des ouvrages de gestion du canal dans le centre de Caen : à gauche la première méthode, à droite la seconde.

Concernant les ouvrages « secondaires », vannes d'alimentation et ouvrages du fossé de ligne notamment, ils sont intégrés sous formes de « buses » et « siphons » dans TELEMAC-2D.

2.6 CONDITIONS AUX LIMITES

Le référentiel temporel est l'heure universelle : toutes les données temporelles sont donc exprimées en heures UTC. De manière générale, les événements étudiés ont plutôt lieu en hiver, le décalage avec l'heure légale est de 1 heure (heure légale = heure UTC + 1 heure). Pour l'heure d'été, le décalage est de 2 heures.

2.6.1 CONDITIONS AMONT – HYDROGRAMMES

Pour les crues réelles de calage, les hydrogrammes injectés à l'amont sont issus de la station de May-sur-Orne pour la frontière sur l'Orne (sans correction, la frontière amont du modèle étant proche de la station, à environ 3,5 km en aval) et des stations de l'Odon (Epinay et/ou Gavrus). Sur l'Odon, une correction est appliquée compte tenu de l'éloignement des stations (décalage en temps pour la propagation et homothétie sur les débits pour tenir compte de la taille du bassin versant plus grande).

Pour les crues théoriques de différentes périodes de retour, les hydrogrammes à Caen ont été reconstitués à partir d'hydrogrammes normés sur les plus fortes crues observées. Une répartition entre l'Orne amont et l'Odon est opérée afin d'avoir l'hydrogramme complet à l'entrée de Caen.

2.6.2 CONDITION AVAL – MAREE

La frontière aval est localisée en mer. Une condition de marée est imposée.

La suite TELEMAT-2D intègre un générateur de marée s'appuyant sur différentes bases de données de constantes harmoniques. Pour la présente étude, la base de données TPXO issue des travaux de l'OSU (Oregon State University) est retenue : cette base de données donne des résultats satisfaisants en Manche.

Le générateur de marée est calé sur les prédictions de marée à Ouistreham. Une correction en hauteur d'eau est appliquée à la frontière afin de bien représenter l'aplatissement du marégramme à la pleine mer, phénomène caractéristique en Manche Est et assez mal représenté par le générateur.

Pour l'étude des événements réels, les observations du marégraphe de Ouistreham permettent d'évaluer les surcotes marines lors de chaque événement : ces surcotes sont ajoutées, uniformément sur la frontière maritime, aux niveaux d'eau calculés par le générateur de marée.

2.7 CHOIX DES COEFFICIENTS DE FROTTEMENT

Les coefficients de frottement sont définis à partir de l'occupation du sol pour les parties terrestres et sur la base de notre expérience pour les lits mineurs.

Les valeurs retenues sont ainsi résumées dans le Tableau 2-1 :

Situation		Coefficient de Strickler retenu
Lit mineur de l'Orne	Amont Caen	25
	Traversée de Caen	35
	Aval Montalivet	35
	Estuaire aval Ranville	50 à 60
Lit mineur affluents		20 à 25
Domaine maritime		60
Lit majeur		10 à 12
Zones urbaines selon densité		1 à 5
Rues et routes		40

Tableau 2-1 : coefficients de Strickler retenus.

3 CALAGE ET VALIDATION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE 2D

3.1 METHODOLOGIE DU CALAGE

Le calage est mené en état actuel, c'est-à-dire après réalisation des aménagements de protection contre les inondations. Depuis la réalisation de ces travaux, l'Orne n'a pas connu de crue significative.

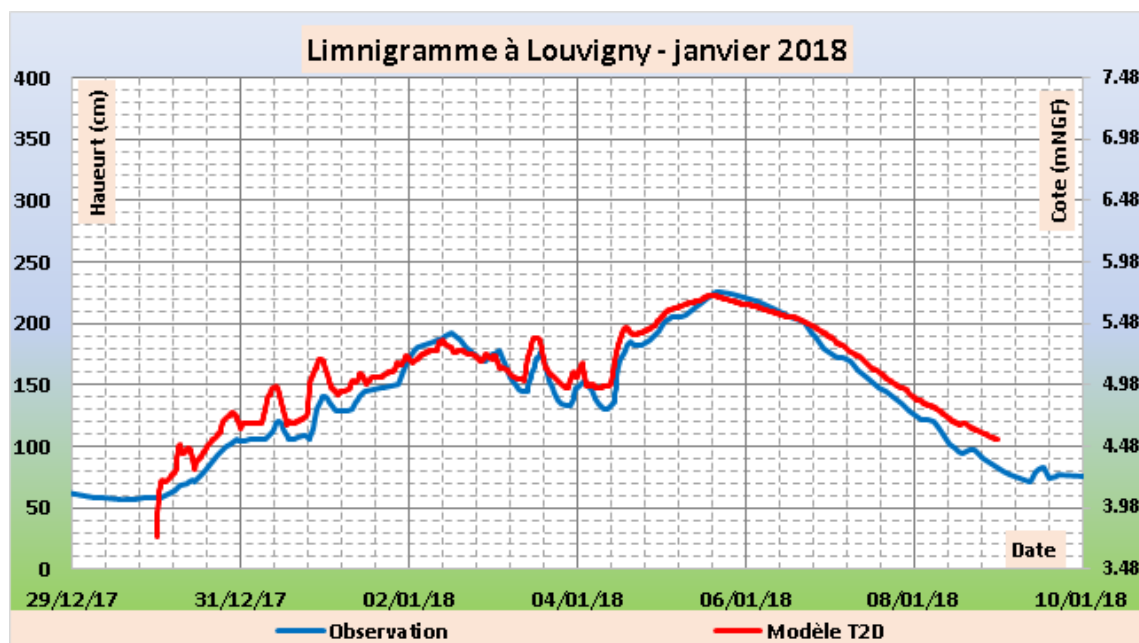
Le calage est ainsi réalisé sur des crues récentes avec peu d'observations hormis les mesures aux stations : stations du SPC et marégraphe de Ouistreham. Ces crues n'ayant pas causé de débordements significatifs, aucun repère de crue n'est disponible.

Pour les crues théoriques, les niveaux obtenus sont comparés aux niveaux calculés par (SOGREAH, septembre 2005) pour un débit de 625 m³/S à Caen.

3.2 CALAGE SUR DES CRUES RECENTES

3.2.1 CRUE DE JANVIER 2018

Les graphiques suivants présentent le calage des niveaux d'eau aux stations sur le domaine de calcul :



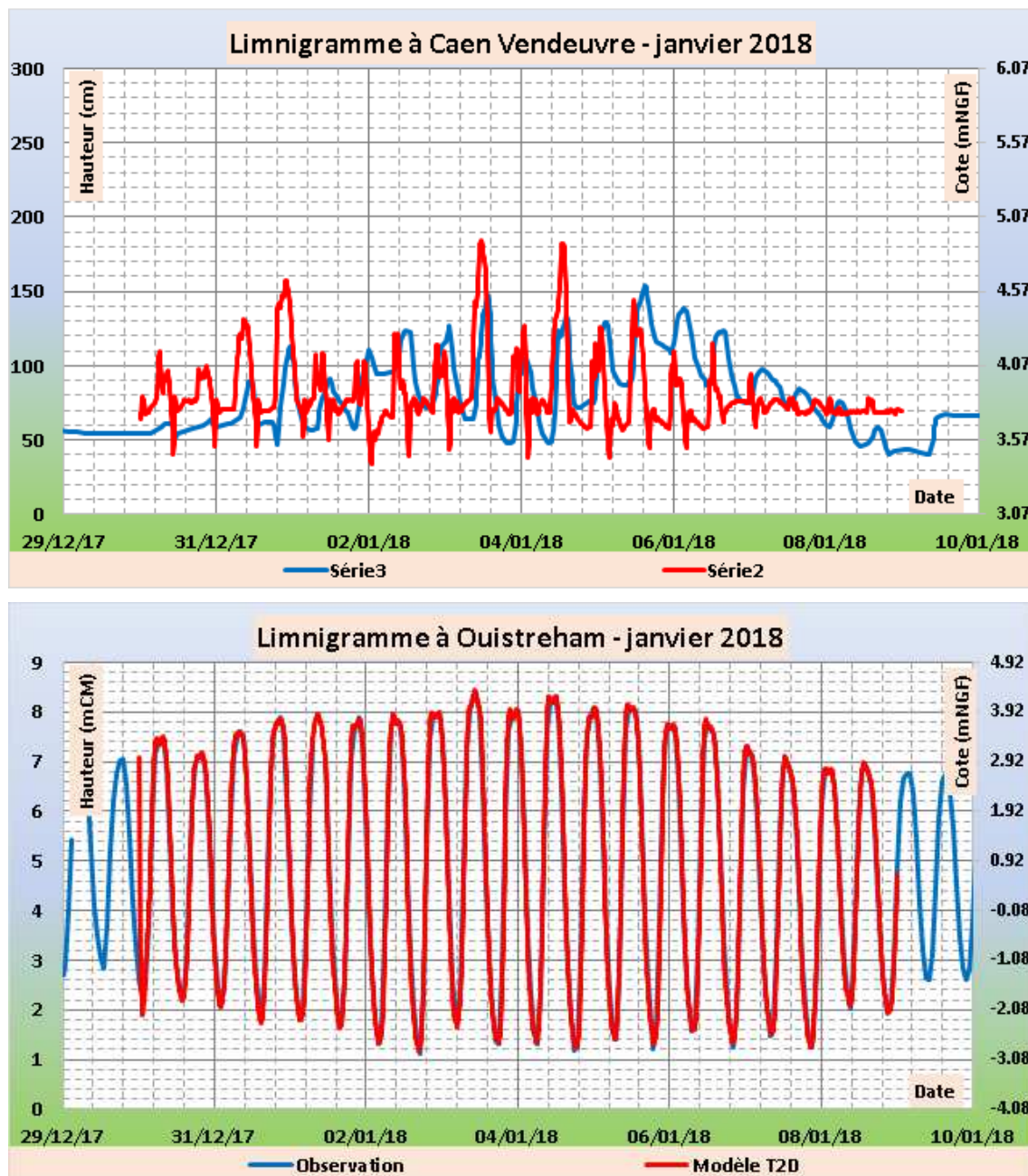


Figure 3-1 : niveaux d'eau mesurés et calculés par le modèle TELEMAC-2D – janvier 2018.

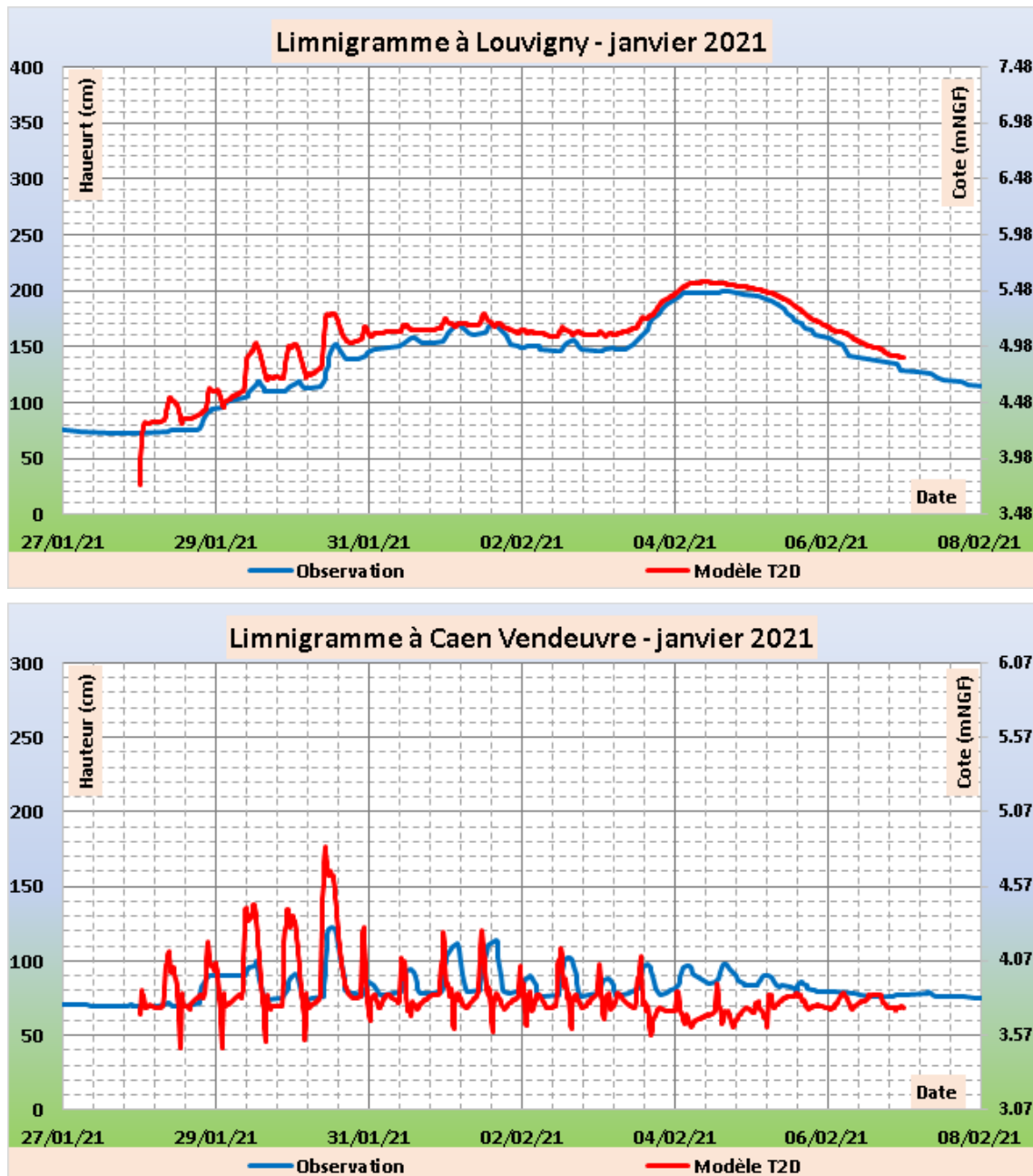
Les niveaux à Ouistreham sont très bien représentés par le modèle.

A l'échelle de Louvigny, les niveaux observés sont également bien représentés, le pic de la crue étant bien calculé par le modèle.

A la station de Caen Vendeuvre, la gestion des ouvrages de gestion du canal influe fortement sur les niveaux calculés. Le calage y est moins satisfaisant.

3.2.2 CRUE DE FEVRIER 2021

Les graphiques suivants présentent le calage des niveaux d'eau aux stations sur le domaine de calcul :



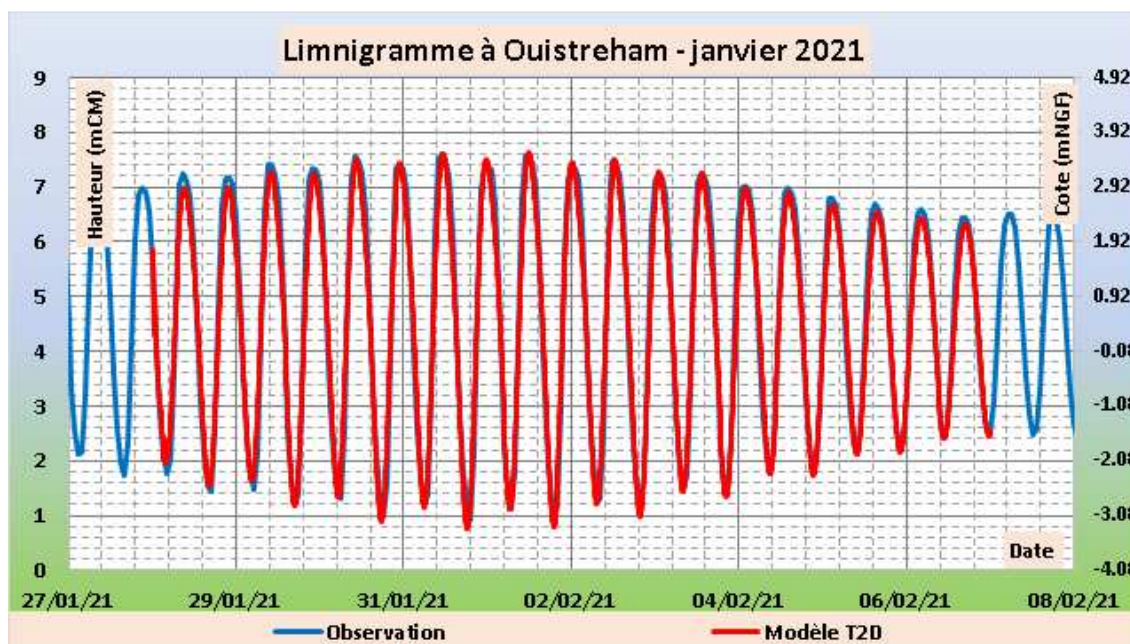


Figure 3-2 : niveaux d'eau mesurés et calculés par le modèle TELEMAC-2D – février 2021.

Les mêmes remarques que pour la crue de janvier 2018 peuvent être formulées : excellent calage à Ouistreham, calage satisfaisant à Louvigny (légère sur-estimation du niveau observé) et calage peu satisfaisant à Caen Vendeuvre du fait de l'influence de la gestion des ouvrages.

3.3 VERIFICATION EN SIMULANT LA CRUE DE L'ORNE A 625 M³/S

Le calage a été mené sur des crues récentes mais de faible intensité : débit de pointe inférieur au débit décennal de l'Orne.

En fait, depuis les travaux de protection contre les crues menés dans l'agglomération caennaise, l'Orne n'a pas connu de crue significative. Il n'est donc pas possible de caler le modèle dans l'état actuel (après les aménagements) pour de fortes crues.

En conséquence, les résultats pour de fortes crues sont comparés aux résultats de l'étude SOGREAH de 2005. La crue de 625 m³/s est retenue pour cette vérification¹.

Le Tableau 3-1 reprend les résultats de l'étude SOGREAH (tableau 2 du rapport (SOGREAH, septembre 2005)) comparés aux résultats du modèle TELEMAC-2D développé pour la présente étude :

¹ : il ne s'agit pas à proprement parler d'un calage mais d'une vérification de cohérence/adéquation du modèle 2D au regard des modélisations de l'étude SOGREAH de 2005. Le modèle SOGREAH avait été calé en situation avant travaux sur des crues réelles, en particulier la crue de janvier 1995.

Situation	Cote calculée (mNGF) SOGREAH 2005	Cote calculée (mNGF) ISL-2021	Ecart (cm)
1 Ferme Athis	7,31	7,48	+17
2 Louvigny	7,32	7,39	+7
3 Amont pont SNCF	7,29	7,31	+2
4 Aval pont SNCF	7,25	7,24	-1
5 Coude de l'île Enchantée RD	7,27	7,22	-5
6 Amont de la Cavée	6,80	6,75	-5
7 Aval de la Cavée	6,69	6,61	-8
8 Hippodrome	6,47	6,30	-17
9 Amont pont de Bir Hakeim	6,13	6,03	-10
10 Aval pont de Bir Hakeim	5,94	5,69	-25
11 Amont pont de Vaucelles	5,87	5,63	-24
12 Aval pont de Vaucelles	5,64	5,43	-21
13 Amont pont Churchill	5,52	5,29	-23
14 Aval pont Churchill	5,34	5,22	-12
15 Amont pont de Vendeuvre	5,20	5,10	-10
16 Amont barrage de Montalivet	5,12	5,04	-8
17 Aval barrage de Montalivet	5,08	5,01	-7
18 400 m en aval du barrage de Montalivet	4,98	4,93	-5
19 100 m en amont du viaduc de Calix	4,90	4,79	-11
20 900 m en aval du viaduc de Calix	4,76	4,61	-15
21 Entre les ponts miniers SMN1 et SMN2	4,67	4,46	-21
22 500 m en aval des ponts de Colombelles	4,37	4,09	-28
23 Vers le pont des ciments français ²	3,45	3,98	+53
24 Orne du Maresquier	3,26	3,60	+34
25 Canal maritime – Amont pont de la Fonderie	4,47	4,60	+13
26 Canal maritime – Aval pont de la Fonderie	4,15	4,30	+15
27 Canal maritime – Viaduc de Calix	4,11	4,21	+10
28 Canal maritime – Pegasus Bridge	4,01	4,18	+17
29 Canal maritime – Amont Maresquier	4,02	4,09	+7
30 Canal maritime – Ecluses de Ouistreham	4,02	4,09	+7

Tableau 3-1 : résultats de la crue de 625 m³/s.² : la localisation de l'ouvrage n'est pas bien connue ce qui peut en partie expliquer l'importance de l'écart.

Les résultats des deux modèles sont cohérents dans l'ensemble avec des écarts pouvant être importants localement : traversée de Caen par exemple entre les ponts Bir Hakeim et Vendeuvre.

4 SIMULATIONS DE CRUES DE L'ORNE

4.1 HYPOTHESES

Les hydrogrammes des crues théoriques de différentes périodes de retour ont été établis dans le cadre de l'étude de dangers de la digue du canal maritime (PNA, 2018). Les hydrogrammes sont rappelés sur la Figure 4-1 :

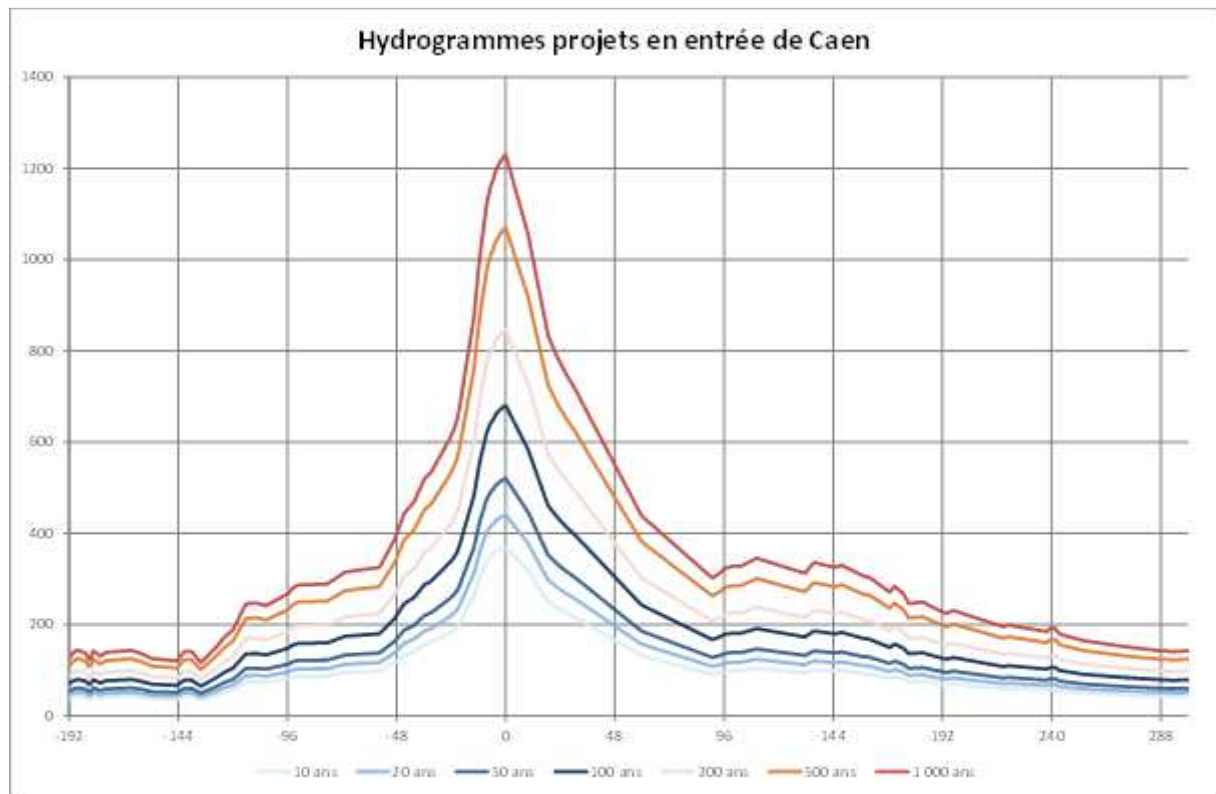


Figure 4-1 : hydrogrammes de crues de l'Orne à Caen.

Les valeurs de débits de pointe sont rappelées dans le Tableau 4-1 :

Agglomération de Caen	Période de retour					
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	500 ans	1 000 ans
Débit de pointe en m ³ /s	400	460	550	665	925	1 040

Tableau 4-1 : débits de pointe de l'Orne à Caen.

Les valeurs retenues dans le cadre du PAPI de l'Orne (cf. (Institution Interdépartementale du Bassin de l'Orne, septembre 2011)) sont de 390 m³/s pour la crue de période de retour 10 ans et 640 m³/s pour la crue de période de retour 100 ans. Les valeurs obtenues sont cohérentes avec les études antérieures.

4.2 RESULTATS

L'ensemble des crues ont été simulées avec le modèle hydraulique 2D. Les lignes d'eau le long de l'Orne maritime et le long du canal maritime sont données sur les graphiques suivants :

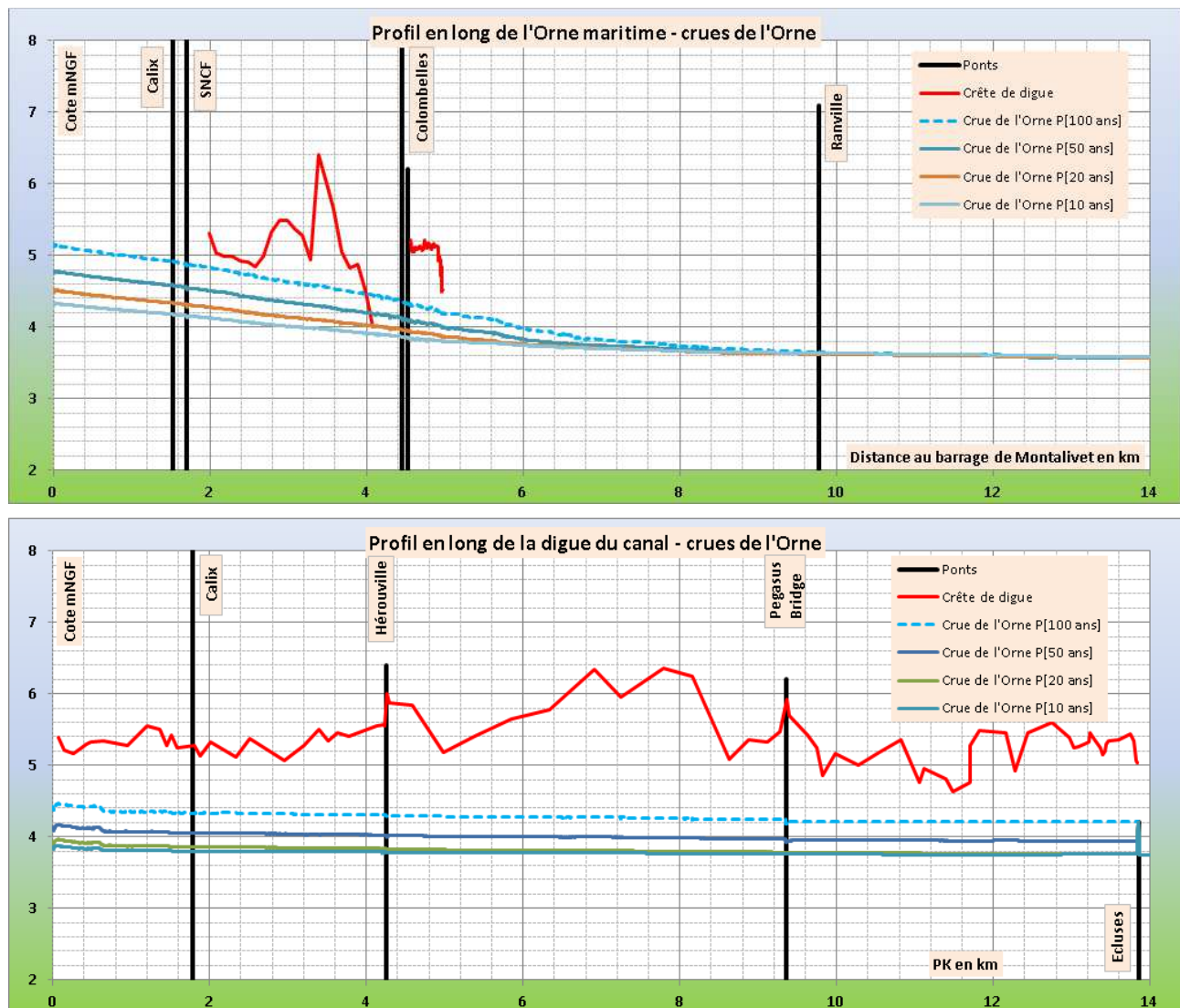


Figure 4-2 : lignes d'eau pour les crues de référence.

5 SIMULATIONS D'ÉVÉNEMENTS MARINS

5.1 HYPOTHESES

Les simulations d'événements marins sont menées sans prendre en compte de crue de l'Orne. Un débit de l'Orne et de l'Odon est injecté en amont du modèle de sorte à obtenir un débit constant à Caen correspondant au débit moyen de l'Orne en hiver, environ 70 m³/s (dans ces conditions, seules les vannes du barrage de Montalivet sont manœuvrées).

Les événements marins sont construits à partir du générateur de marée et en ajoutant à la frontière une surcote sur les niveaux d'eau.

Cette surcote est paramétrée à partir de la surcote observée en février/mars 2010 (tempête Xynthia) à Ouistreham.

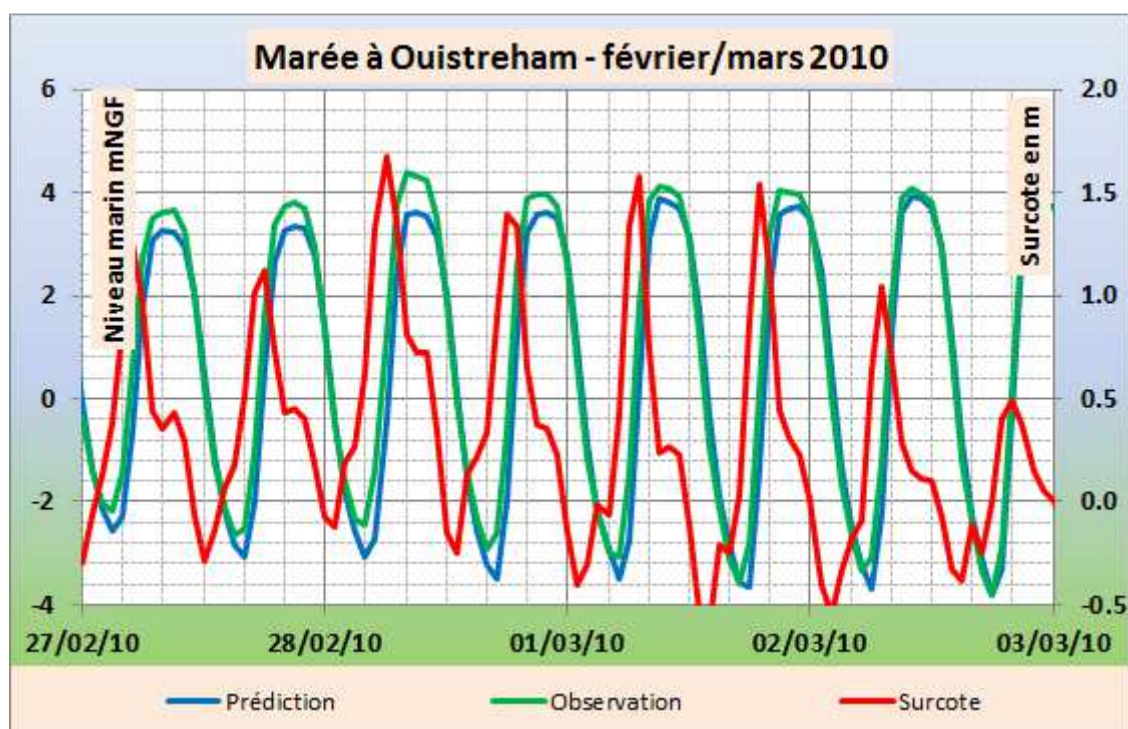


Figure 5-1 : surcote observée à Ouistreham en février/mars 2010.

Le phénomène de surcote en Manche présente une particularité : le maximum de la surcote intervient généralement à mi-marée montante et est rarement en phase avec la pleine mer. Cette particularité a été mise en évidence dans le cadre du projet VIMER mené par Météo-France (Etude des tempêtes menaçant le littoral breton, janvier 2015). Elle est illustrée sur la Figure 5-2 avec la superposition de plusieurs surcotes observées lors d'événements récents à Ouistreham :

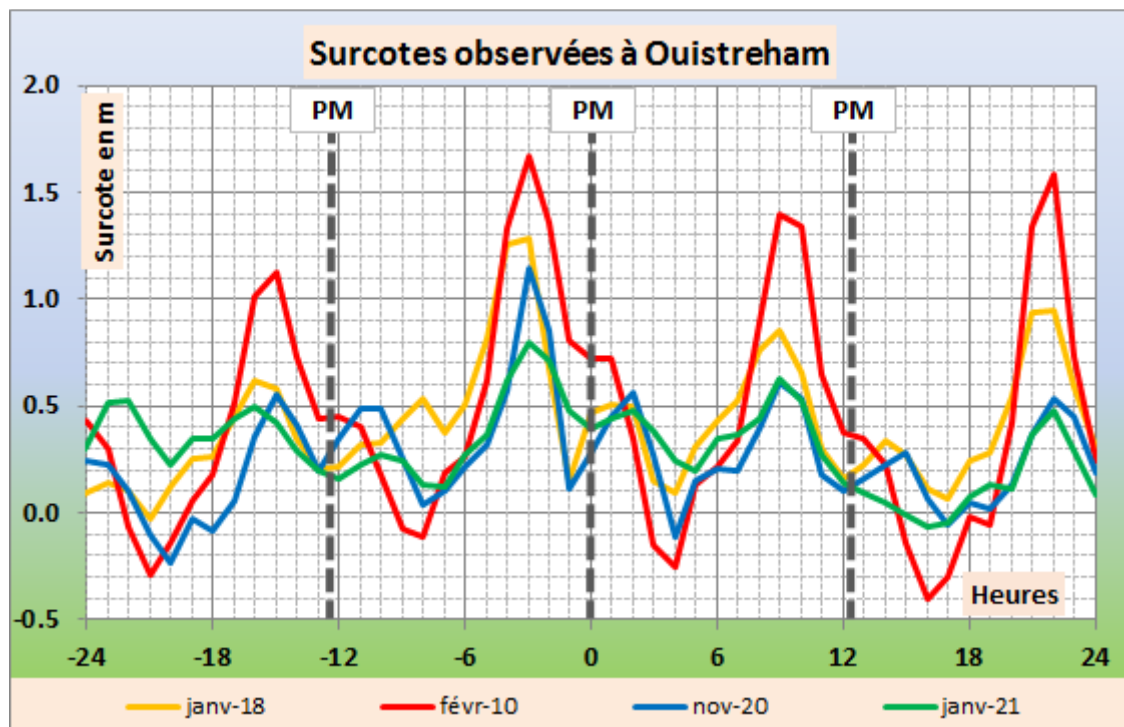
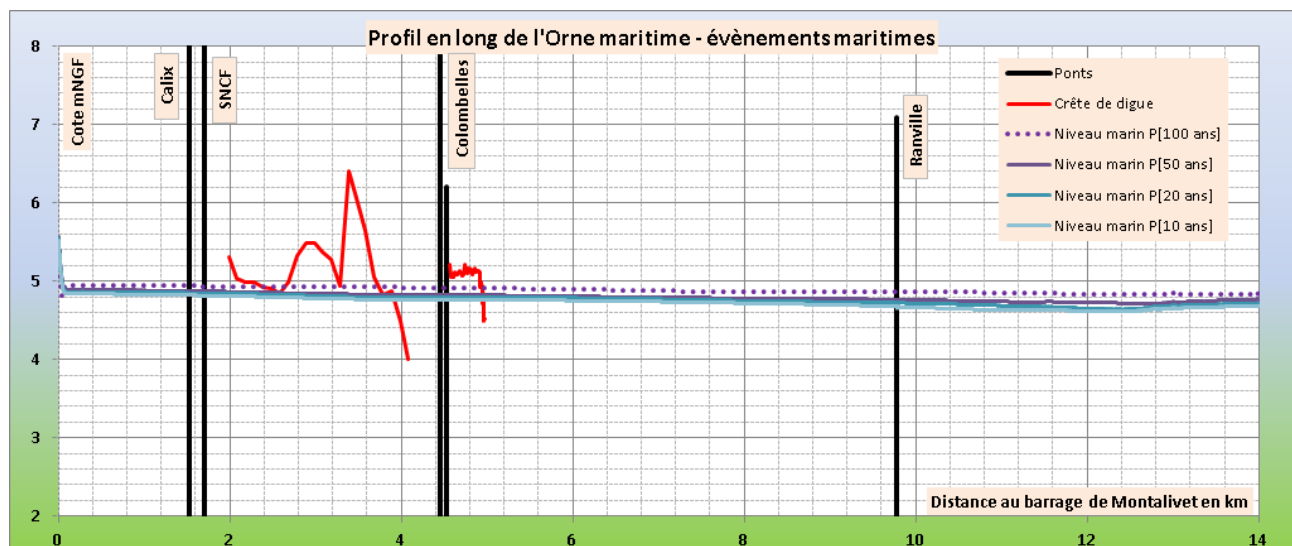


Figure 5-2 : surcotes observées à Ouistreham, décalage du pic de surcote avec la pleine mer (PM).

5.2 RESULTATS

Les graphiques suivants présentent les lignes d'eau le long du canal maritime et le long de l'Orne maritime :



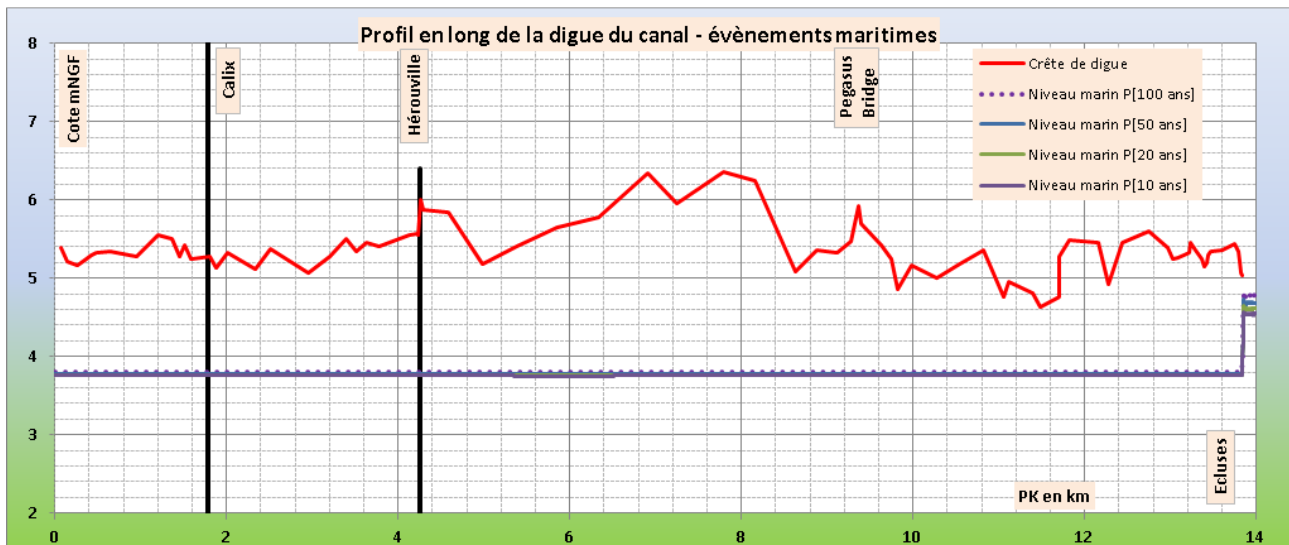


Figure 5-3 : lignes d'eau pour les évènements marins de référence.

Sur le canal maritime, des surverses ont lieu au niveau des écluses et des entrées d'eau sont calculées dans le canal. Toutefois, les volumes entrant sont très faibles (sous réserve de la bonne tenue des portes des écluses) et sont stockés dans le canal avec une sur-élévation du canal d'à peine 10 cm pour l'évènement centennal.

6 PROPOSITIONS DE SCENARIOS

6.1 SECTEUR MARITIME ET DIGUE DE COLOMBELLES

Les scénarios proposés ci-dessous concerne les digues maritimes et du canal ainsi que la digue de Colombelles.

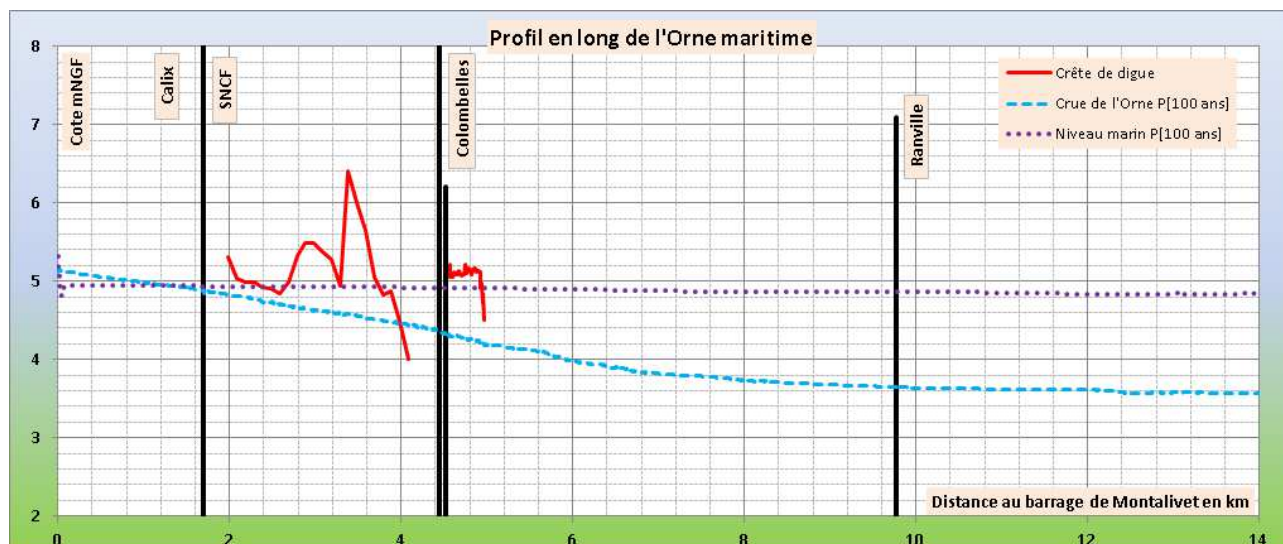


Figure 6-1 : profil en long des deux événements centennaux le long de l'Orne maritime.

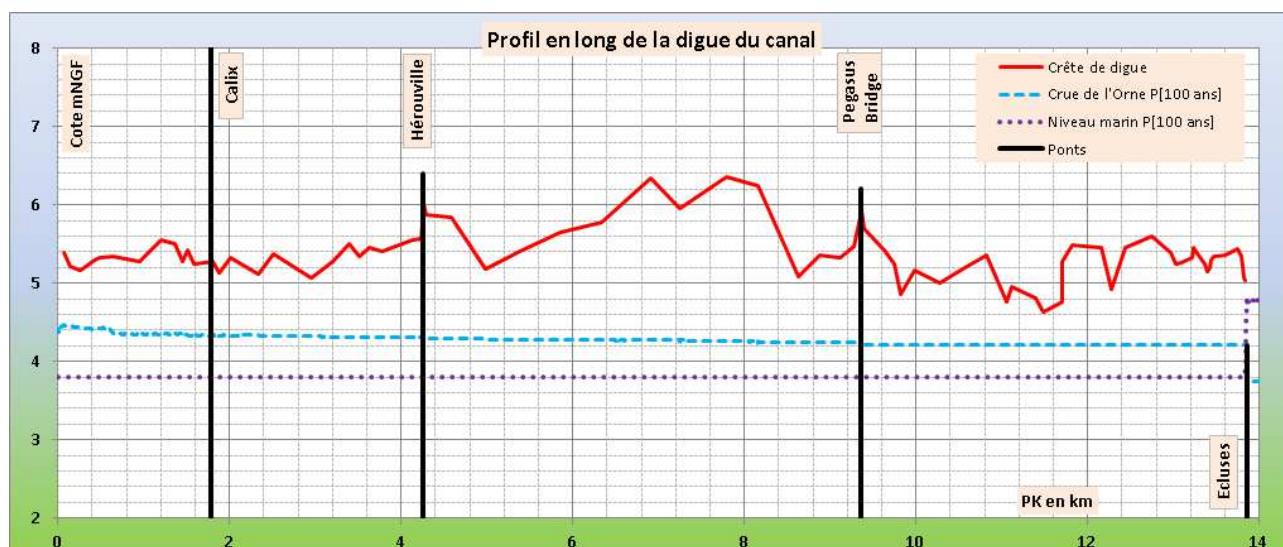


Figure 6-2 : profil en long des deux événements centennaux le long du canal.

Le long du canal, les niveaux atteints en fonctionnement normal sont inférieurs à la crête de digue. Le point bas de la digue est atteint pour une crue de période de retour comprise entre 100 et 200 ans ce qui est cohérent avec l'étude de dangers initiale³.

³ : la modélisation 2D donne des niveaux d'eau légèrement inférieurs au modèle 1D mis en œuvre lors de l'étude de dangers initiale. La période de retour de la crue de début de surverse demeure inférieure à 200 ans, en cohérence avec l'étude de dangers initiale.

Sur l'Orne, les niveaux en crues sont inférieurs à ceux estimés lors des études de dangers des digues de Caen la mer (2019), avec des écarts de l'ordre de 10 à 15 cm. Pour les événements marins, les niveaux calculés avec le modèle 2D sont très similaires.

Le long de la digue de Colombelles, l'évènement marin est prépondérant : les résultats des deux modèles (1D et 2D) sont très proches.

6.2 LES SCENARIOS DE L'ETUDE DE DANGERS – ARRETE DU 7 AVRIL 2017

L'arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers des digues organisées en systèmes d'endiguement définit 4 scénarios hydrauliques à intégrer dans l'étude de dangers :

- Le **scénario 1** est celui du fonctionnement nominal du système d'endiguement quand le niveau de l'eau, sous l'effet de la crue ou d'une submersion marine, correspond au plus au niveau de protection ;
- Le **scénario 2** est représentatif d'une défaillance fonctionnelle du système d'endiguement au moment où se produit un aléa dont l'intensité équivaut à l'intensité de l'aléa correspondant au niveau de protection ;
- Le **scénario 3** est représentatif d'une défaillance structurelle du système d'endiguement ;
- Le **scénario 4** est représentatif du comportement du système d'endiguement quand se produit l'aléa de référence du plan de prévention des risques naturels inondation ou littoraux.

L'arrêté du 22 juillet 2019 rend le scénario 4 facultatif.

6.3 SCENARIO 1

Sur le secteur d'étude, deux aléas sont à considérer : l'aléa maritime et l'aléa fluvial. Deux niveaux de protection peuvent être ainsi définis, chacun étant rattaché à l'un ou l'autre des aléas.

Deux scénarios de type 1 sont simulés :

- Scénario 1-F : scénario 1 pour le niveau de protection lié à l'aléa fluvial ;
- Scénario 1-M : scénario 1 pour le niveau de protection lié à l'aléa maritime.

A priori, le niveau de protection attendu pour les deux aléas correspond à la l'aléa d'occurrence centennale.

6.4 SCENARIO 2

Compte tenu des nombreux ouvrages, les scénarios de type 2 sont relativement nombreux. Deux scénarios sont envisagés sur la façade maritime :

- Scénario 2-M-a : scénario 2 sur la façade maritime, incluant l'ouverture totale et permanente des clapets anti-retour pendant toute la durée de l'évènement correspondant au niveau de protection ;
- Scénario 2-M-b : non ouverture des clapets pendant un évènement pluvieux sur le bassin versant. La durée de l'évènement est de 24 heures.

Deux scénarios sont envisagés pour le secteur de Colombelles :

- Scénario 2-M-a : défaut de fermeture des clapets anti-retour pendant toute la durée de l'évènement correspondant au niveau de protection. Il s'agit du même scénario que ci-dessus.
- Scénario 2-F-b : défaillance dans l'évacuation de la crue vers le canal. Le cas le plus défavorable consiste en une non ouverture des vannes du Maresquier en crue ;

Quatre scénarios sont envisagés pour la digue Ouest du canal :

- Scénario 2-M-c : ouverture accidentelle des portes d'une des deux écluses de Ouistreham pendant l'évènement marin correspondant au niveau de protection ;
- Scénario 2-F-a : non fermeture des clapets anti-retour des ouvrages traversant pendant l'évènement fluvial de référence ;
- Scénario 2-F-b : défaillance dans l'évacuation de la crue vers le canal. Le cas le plus défavorable consiste en une non ouverture des vannes du Maresquier en crue ;
- Scénario 2-F-c : défaillance dans l'évacuation de la crue vers l'Orne maritime par non ouverture des vannes du barrage de Montalivet.

Concernant le secteur du canal, le scénario correspondant à une impossibilité totale d'évacuer les eaux de pluies venant des bassins versants n'est pas étudié : un tel scénario implique une défaillance simultanée de l'ensemble des ouvrages liés au fossé de ligne : clapets, vannes, siphons et pompes. Un tel scénario apparaît peu réaliste.

Au total, plusieurs scénarios pouvant être communs à plusieurs secteurs, six variantes sont proposées pour le scénario 2.

6.5 SCENARIO 3

Le scénario 3 correspond à une défaillance structurelle entraînant un risque de rupture supérieur à 50 %.

Sur la façade maritime, un tel risque de rupture implique des niveaux d'eau particulièrement « extraordinaires ». La précédente étude de danger avait évalué à 10 000 ans la période de retour de l'évènement maritime pouvant être à l'origine d'une rupture du cordon dunaire. Un tel évènement ne répond pas au caractère « réaliste et porteur d'enseignements » attendu dans l'arrêté du 7 avril 2017. Il n'est pas proposé de simuler ce scénario de défaillance.

Les scénarios de défaillance structurelle concernent donc le secteur de Colombelles et la digue du canal. Les études de dangers existantes sur ces deux secteurs ont montré qu'il faut considérer des scénarios amenant à la surverse sur les digues pour atteindre des risques de rupture de 50 %.

Les scénarios proposés sont ainsi :

- Scénario 3-M-a : évènement maritime occasionnant une surverse et la rupture de la digue de Colombelles, période de retour supérieure à 100 ans ;
- Scénario 3-F-a : évènement de crue dépassant les capacités d'évacuation du canal, occasionnant la surverse sur la digue puis sa rupture, crue de l'Orne de période de retour supérieure à 200 ans.

6.6 SCENARIO 4

De la même manière que pour le scénario 1, deux aléas sont à considérer : l'aléa maritime et l'aléa fluvial.

Deux scénarios de type 4 sont simulés :

- Scénario 4-F : scénario 4 pour le niveau de référence lié au PPRi de la Basse Vallée de l'Orne ;
- Scénario 4-M : scénario 4 pour le niveau de référence lié au PPRL.

Dans le cas où le niveau de protection attendu correspond à la l'aléa d'occurrence centennale, ces deux scénarios sont identiques aux scénarios 1.

Par ailleurs, ce scénario 4 est devenu facultatif.

7 BIBLIOGRAPHIE

- Alp'Géorisques - IMDC. (2014). *PPRL Bessin et Dives-Orne - Phase 1 : Analyse préalable des sites*. DDTM du Calvados.
- Alp'Géorisques - IMDC. (2015). *PPRL Bessin et Dives-Orne - Cartographie des aléas littoraux - Secteur Dives-Orne*. DDTM du Calvados.
- Boudiere Edwige, M. C.-G. (2013). A suitable metocean hindcast database for the design of Marine energy converters. *International Journal of Marine Energy*, 3-4, pp. e40-e52.
- BRGM. (2014). *Méthodologie de détermination du recul maximal des dunes pour les évènements extrêmes - BRGM/RP-63157-FR*. BRGM.
- Cerema. (Juin 2018). *Etude de dangers de systèmes d'endiguement - Concepts et principes de réalisation des études*.
- CETMEF. (2013). *Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes - Environnements maritime et estuarien*. CETMEF.
- Charier. (2015). *Note de calcul du rideau - Confortement de berges de l'Orne à Colombelles*.
- CIRIA. (1996). *Beach Management Manual*. CIRIA.
- CIRIA/CUR/CETMEF. (2009). *Guide Enrochement - L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques - Version française du Rock Manual*. CETMEF.
- DREAL Basse-Normandie. (septembre 2014). *Territoire à risque important de Caen – Cartographie des aléas et des enjeux – Rapport explicatif*.
- EDF R&D - LCHF. (1986). *Catalogue sédimentologique des côtes françaises - Côtes de la Mer du Nord et de la Manche*. Eyrolles.
- GRESARC. (2002). *Suivi de l'évolution des côtes du département du Calvados - novembre 1995-février 2002 - Analyses*. Conseil Général du Calvados.
- Institution Interdépartementale du Bassin de l'Orne. (septembre 2011). *Programme d'actions de prévention des inondations des bassins versants de l'Orne et de la Seulles – Diagnostic du territoire*.
- ISL-Ingénierie. (2017). *Etude de dangers de la digue berge Ouest du canal de Caen à la mer*. PNA.
- Météo France. (juillet 1999). *Estimation des hauteurs de précipitations d'occurrence rare pour des durées de cumul de 1 à 10 jours sur 3000 postes français*.
- SEMOFI. (2015). *Confortement des berges de l'Orne - Chemin de Halage Colombelles - Rapport d'étude géotechnique préalable et rapport d'étude de conception*.
- Service Hydrographique et Océanographique de la Marine. (2012). *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique)*. SHOM/CETMEF.
- Service Hydrographique et Océanographique de la Marine. (2014). *Référence Altimétriques Maritimes - Ports de France métropolitaine et d'outre-mer - Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée*. SHOM.
- SOCOTEC. (2015). *Etude de dangers - Digue de Caffarelli*.
- SOGREAH. (mars 1999). *Etude hydraulique sur modèles mathématique et physique des aménagements de lutte contre les inondations dans l'agglomération caennaise*. Syndicat Mixte de lutte contre les inondations dans la vallée de l'Orne et son bassin versant.

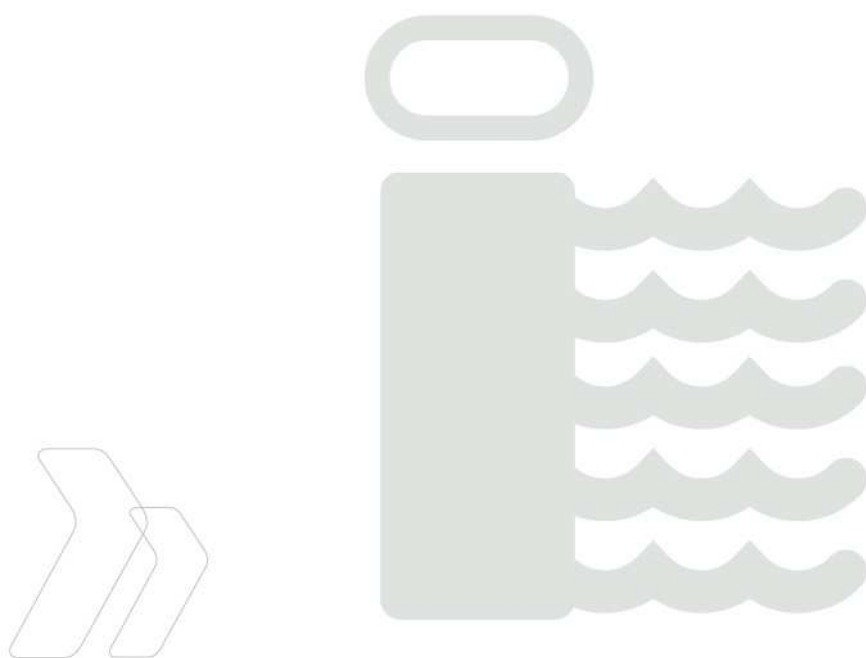
SOGREAH. (septembre 2005). *Modélisation comparative des aménagements préconisés en 1999 et de la situation réelle en 2005*. Syndicat Mixte de lutte contre les inondations dans la vallée de l'Orne et son bassin versant.

Van der Meer J.W, & a. (2016). *Eurotop 2016 - Manual on wave overtopping of sea defences and related structures*.

ANNEXE 1 TITRE ANNEXE

Texte

Infrastructures
Aménagements
hydrauliques



⊕
COMMUNAUTE
URBAINE CAEN LA MER

SYSTEMES D'ENDIGUEMENT DANS L'AGGLOMERATION CAENNAISE

Rapport d'étude de dangers

Rapport n° : 20F-201-RP-3
Révision n° : A
Date : 24/06/2021

Votre contact :
Olivier BARBET
barbet@isl.fr

Rapport

ISL Ingénierie SAS - PARIS
75 boulevard Mac Donald
75019 - Paris
FRANCE
Tel. : +33.1.55.26.99.99
Fax : +33.1.40.34.63.36

www.isl.fr

ISL
Ingénierie

Visa

Document actualisé le 24/06/2021.

Révision	Date	Auteur	Chef de Projet	Superviseur	Commentaire
A	24/06/2021	OBA	OBA	OBA	Version pour dépôt du dossier au 30 juin 2021

OBA : BARBET Olivier

Rapport ISL
20F-201-RP-3
Revision A

<http://www.isl.fr/r.php?c=197090>



SOMMAIRE

1	OBJET DE LA NOTE	1
2	CONSTRUCTION DU MODELE	2
2.1	PRINCIPES GENERAUX	2
2.2	LIMITES DU MODELE	3
2.3	GRANDES LIGNES DU MAILLAGE	4
2.4	DEFINITION DE LA BATHYMETRIE DU MODELE – NIVEAU DU TERRAIN NATUREL	4
2.5	INTEGRATION DES SINGULARITES	5
2.5.1	PRISE EN COMPTE DU BATI	5
2.5.2	INTEGRATION DES OUVRAGES	5
2.5.3	INTEGRATION DES OUVRAGES DE GESTION DES NIVEAUX DU CANAL	6
2.6	CONDITIONS AUX LIMITES	6
2.6.1	CONDITIONS AMONT – HYDROGRAMMES	7
2.6.2	CONDITION AVAL – MAREE	7
2.7	CHOIX DES COEFFICIENTS DE FROTTEMENT	7
3	CALAGE ET VALIDATION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE 2D	9
3.1	METHODOLOGIE DU CALAGE	9
3.2	CALAGE SUR DES CRUES RECENTES	9
3.2.1	CRUE DE JANVIER 2018	9
3.2.2	CRUE DE FEVRIER 2021	11
3.3	VERIFICATION EN SIMULANT LA CRUE DE L'ORNE A 625 M ³ /S	12
4	SIMULATIONS DE CRUES DE L'ORNE	15
4.1	HYPOTHESES	15
4.2	RESULTATS	16
5	SIMULATIONS D'EVENEMENTS MARINS	17
5.1	HYPOTHESES	17
5.2	RESULTATS	18

6	PROPOSITIONS DE SCENARIOS	20
6.1	SECTEUR MARITIME ET DIGUE DE COLOMBELLES	20
6.2	LES SCENARIOS DE L'ETUDE DE DANGERS – ARRETE DU 7 AVRIL 2017	21
6.3	SCENARIO 1	21
6.4	SCENARIO 2	21
6.5	SCENARIO 3	22
6.6	SCENARIO 4	22
7	BIBLIOGRAPHIE	23

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 TITRE ANNEXE

TABLE DES FIGURES

Figure 2-1 : lignes directrices permettant de « forcer » le maillage le long des éléments structurants.	2
Figure 2-2 : emprise du modèle 2D.	3
Figure 2-3 : maillage du modèle 2D – détails.	4
Figure 2-4 : modèle après intégration des données bathymétriques.	5
Figure 2-5 : illustration des deux méthodes d'intégration des ouvrages de gestion du canal dans le centre de Caen : à gauche la première méthode, à droite la seconde.	6
Figure 3-1 : niveaux d'eau mesurés et calculés par le modèle TELEMAC-2D – janvier 2018.	10
Figure 3-2 : niveaux d'eau mesurés et calculés par le modèle TELEMAC-2D – février 2021.	12
Figure 4-1 : hydrogrammes de crues de l'Orne à Caen.	15
Figure 4-2 : lignes d'eau pour les crues de référence.	16
Figure 5-1 : surcote observée à Ouistreham en février/mars 2010.	17
Figure 5-2 : surcotes observées à Ouistreham, décalage du pic de surcote avec la pleine mer (PM).	18
Figure 4-2 : lignes d'eau pour les événements marins de référence.	19
Figure 6-1 : profil en long des deux événements centennaux le long de l'Orne maritime.	20
Figure 6-2 : profil en long des deux événements centennaux le long du canal.	20

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : coefficients de Strickler retenus.....	8
Tableau 3-1 : résultats de la crue de 625 m ³ /s.	13
Tableau 4-2 : débits de pointe de l'Orne à Caen.	15

|

1 OBJET DE LA NOTE

La présente note hydraulique décrit la construction et le calage du modèle hydrodynamique 2D de la basse vallée de l'Orne sur le territoire de la CU Caen la mer.

Ce modèle a été développé par ISL-Ingénierie sur la suite TELEMAC-2D développée par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (EDF-R&D).

2 CONSTRUCTION DU MODELE

2.1 PRINCIPES GENERAUX

Le maillage est construit avec le logiciel MATISSE fourni avec la distribution de TELEMAT. Ce logiciel permet de définir le maillage en s'appuyant sur des points, des lignes ou encore des profils en travers et en paramétrant des critères de maillage variables qui fixent les tailles de mailles en tout point du domaine.

Le maillage a été construit en deux étapes :

- Maillage de la vallée de l'Orne jusqu'à l'estuaire ;
- Assemblage avec le maillage du modèle existant en front de mer (modèle développé lors de l'étude de dangers des digues de Ouistreham et Hermanville).

Le principe retenu pour la construction du modèle est de s'appuyer sur les éléments structurants (berges, digues, routes et rues principales, remblais, groupes de bâtis, lits mineurs, ...) pour affiner le maillage en leurs voisinages. Ce principe se justifie d'une part pour bien prendre en compte ces éléments structurants qui peuvent influencer les écoulements, d'autre part pour densifier le maillage au voisinage des enjeux.

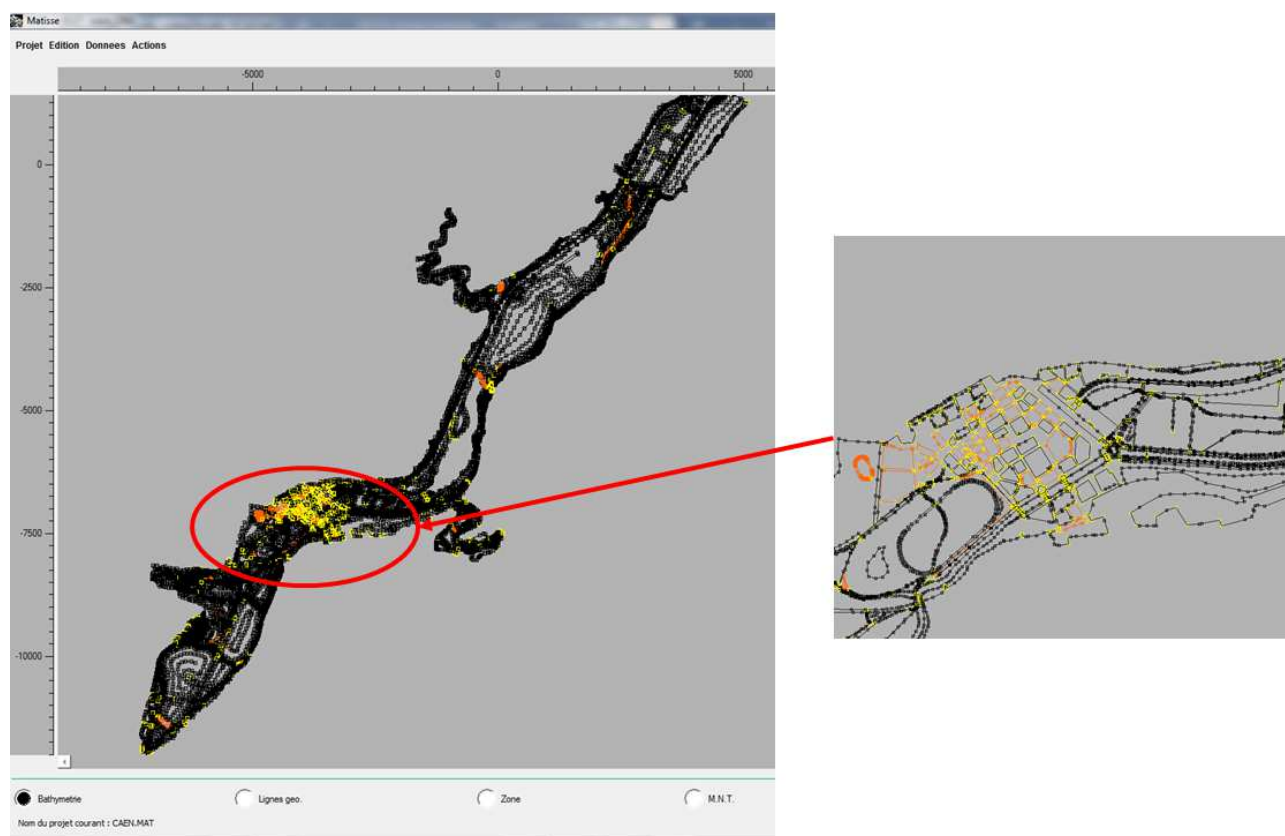


Figure 2-1 : lignes directrices permettant de « forcer » le maillage le long des éléments structurants.

Le modèle est référencé en Lambert 93. Néanmoins, une translation est opérée sur l'axe des ordonnées Y (- 6 000 000 m) afin de réduire la longueur des nombres (limitation dans TELEMAT à 7 chiffres représentatifs).

Pour ce qui concerne les altitudes, le modèle est référencé dans le système du nivellement général de la France, NGF-IGN69.

2.2 LIMITES DU MODELE

Le modèle hydraulique 2D compte quatre limites amont :

- Sur l'Orne, la limite amont se situe sur la commune de Saint-André-sur-Orne, à proximité d'Etavaux ;
- Sur l'Odon, la limite amont se situe au droit du Mesnil, à cheval sur les communes de Louvigny et Caen ;
- Sur le Biez (ou la Gronde), la limite amont se situe sur la commune de Mondeville, environ 500 m en amont du périphérique ;
- Sur la Seine, la limite se situe dans l'estuaire au droit d'Honfleur.

La limite aval se situe en pleine mer, à environ 20 km de la côte.

Sur les bords, les limites du modèle suivent les courbes de niveaux correspondant aux limites des plus hautes eaux avec une revanche de l'ordre de 1 m.

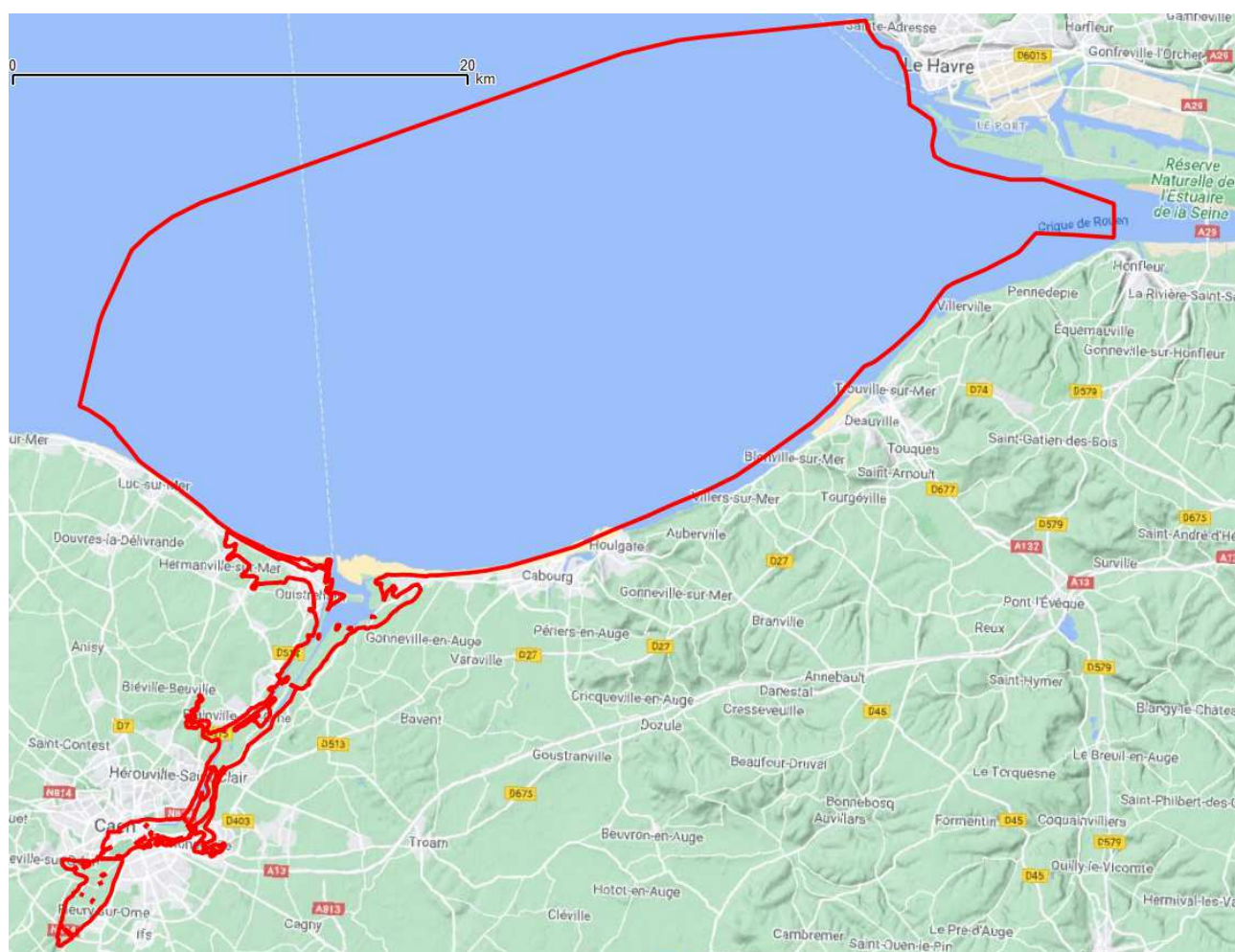


Figure 2-2 : emprise du modèle 2D.

Au total, le modèle s'étend sur 690 km².

La partie maritime occupe une large part de cette superficie, environ 650 km². La partie « terrestre », vallée de l'Orne et son estuaire, occupe ainsi un peu moins de 40 km².

Le linéaire de l'Orne modélisé est d'environ 25 km.

2.3 GRANDES LIGNES DU MAILLAGE

Le maillage est construit à partir d'éléments triangulaires, de différentes tailles en fonction des besoins :

- 5 à 10 m en lits mineurs (Orne et canal) ;
- 3 à 8 m en lits mineurs (Odon, Biez) ;
- 10 à 20 m dans les zones urbanisées ;
- 3 à 6 m le long des digues ;
- 15 à 50 m en lit majeur ;
- Plusieurs centaines de mètres en mer.

La construction du maillage s'appuie sur les éléments linéaires (routes, bâtiments principaux, berges, remblai en lit majeur, ...).

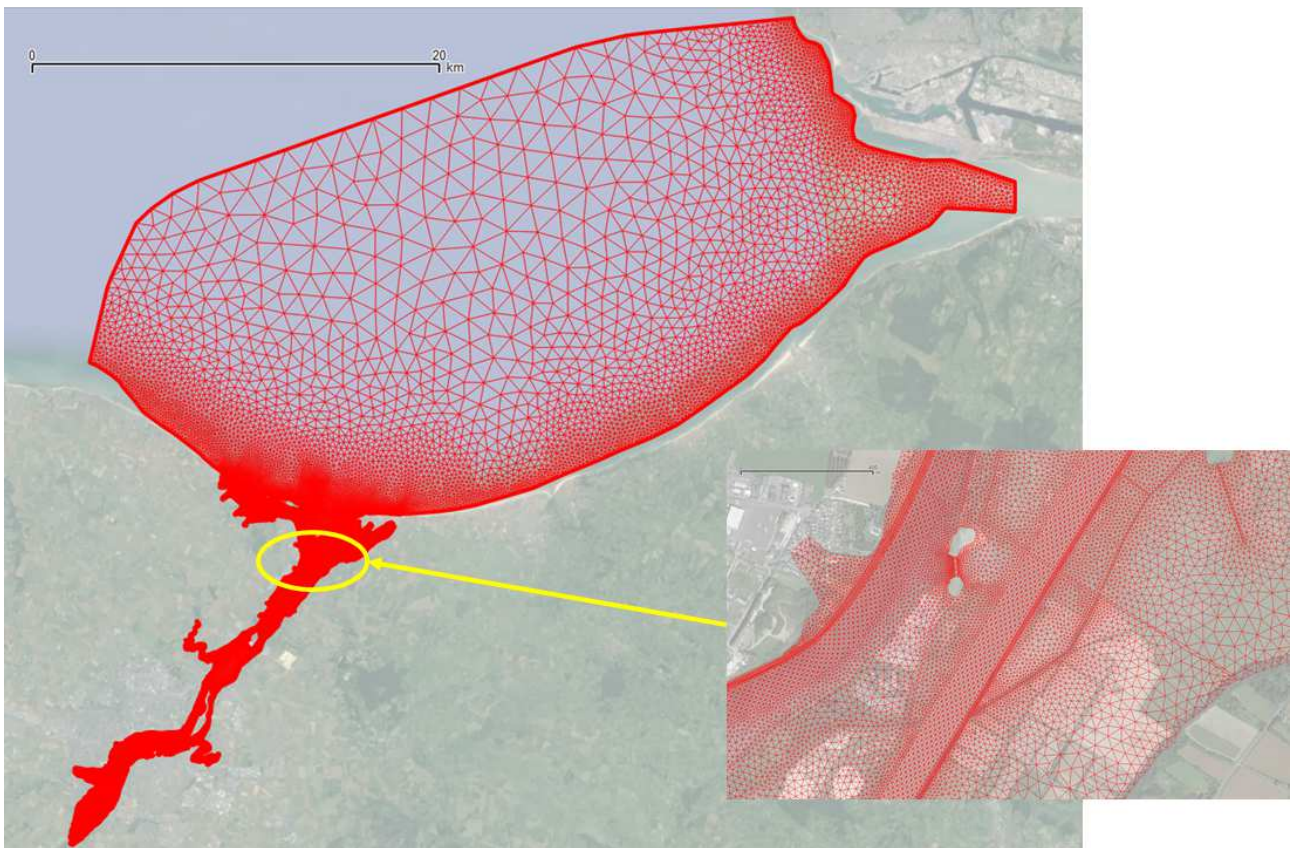


Figure 2-3 : maillage du modèle 2D – détails.

2.4 DEFINITION DE LA BATHYMETRIE DU MODELE – NIVEAU DU TERRAIN NATUREL

de points insuffisamment denses pour être représentatifs du terrain naturel.

Plusieurs traitements successifs permettent d'affecter à chaque nœud du maillage sa cote de terrain naturel :

- Extraction de l'ensemble des nœuds du maillage sous SIG ;
- Affectation automatique des cotes de terrain naturel avec le MNT : le MNT est construit à partir de l'ensemble des données topographiques et bathymétriques fournies ;

- Affectation manuelle et traitements particuliers sur certains nœuds ;
- Export des nœuds sous forme de semis de points ;
- Mise à jour des cotes du modèle sous l'éditeur de projet de FUDAA-PREPRO à partir du semis de points édité.

Les images suivantes représentent le modèle après l'intégration des données bathymétriques.

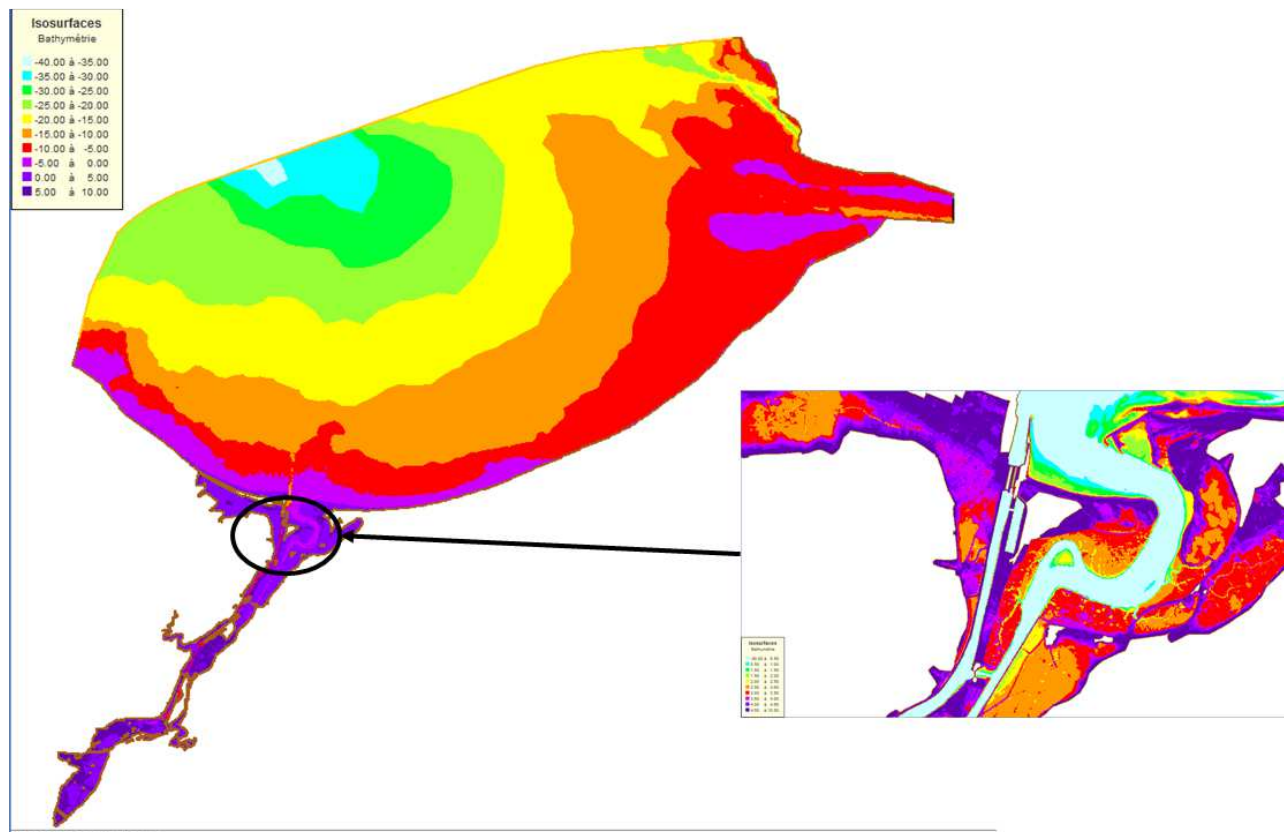


Figure 2-4 : modèle après intégration des données bathymétriques.

2.5 INTEGRATION DES SINGULARITES

2.5.1 PRISE EN COMPTE DU BATI

Le maillage est adapté dans les zones urbaines pour délimiter le bâti par grands ensembles en suivant les rues principales. Cette définition permet de différencier les coefficients de frottement (Strickler) appliqués aux rues de ceux appliqués sur l'emprise du bâti.

La valeur 40 est retenue pour les rues.

Une valeur particulièrement faible, de 1 est retenue sur l'emprise du bâti.

Cette méthode permet de favoriser les écoulements dans les rues tout en laissant la possibilité de transfert d'eau au travers des ensembles bâtis qui ne sont pas totalement imperméables.

2.5.2 INTEGRATION DES OUVRAGES

Les ponts sont représentés dans le modèle en intégrant les culées et les piles au maillage. En pratique, les culées et les piles sont « retirées » du maillage afin d'empêcher tout écoulement au travers des piles et des culées. Cette méthode présente l'avantage de la continuité des équations ce qui assure une meilleure stabilité du calcul.

Cette méthode présente l'inconvénient de ne pas tenir compte de la mise en charge : toutefois, pour les événements simulés, les ponts sur le domaine d'étude ne sont pas sensés se mettre en charge. Cette hypothèse est vérifiée a posteriori.

2.5.3 INTEGRATION DES OUVRAGES DE GESTION DES NIVEAUX DU CANAL

Quatre ouvrages principaux permettent la gestion des niveaux d'eau dans le canal et dans l'Orne à Caen : barrage de Montalivet sur l'Orne, vanne des Portes de l'Orne à l'entrée du bassin Saint-Pierre, vannes du canal de la presqu'île (ou vanne Victor Hugo), vannes de barrage de Maresquier.

Les règles de gestion de ces ouvrages sont particulièrement complexes, elles sont fonction de la hauteur d'eau de l'Orne mesurée à Thury-Harcourt, ainsi que des hauteurs d'eau mesurées dans l'Orne à Caen (échelle du pont de Vendevre) et des hauteurs mesurées dans le canal maritime.

Ces ouvrages sont traités de deux manières différentes selon les événements simulés :

- Crues faibles et événements maritimes : pour ces événements, les ouvrages du centre de Caen ne sont pas totalement effacés (ouverts). Les quatre ouvrages sont intégrés sous formes de frontières dans le maillage, le débit sortant de la frontière amont étant réinjecté sur la frontière aval de l'ouvrage. Un algorithme spécifique est programmé pour gérer l'ouverture des différents ouvrages en respectant au mieux les règles de gestion : celles-ci étant très complexes, l'algorithme de gestion est simplifié (par définition, il ne peut pas prendre en compte les interventions humaines, pour modifier les cotes de consigne par exemple) ;
- Crues importantes : la première méthode faisant intervenir des ouvrages mobiles dont les ouvertures sont interdépendantes, des instabilités de calcul peuvent résulter selon les événements simulés. Pour les crues importantes, les ouvrages du centre de Caen (Montalivet, Portes de l'Orne et vannes Victor Hugo) sont totalement relevés. Afin de simplifier le calcul et s'affranchir des instabilités, les ouvrages sont intégrés au maillage, le calcul des écoulements au travers de leurs ouvertures se faisant à surface libre. Cette méthode sous-estime l'effet de la mise en charge des vannes met assure une meilleure stabilité des calculs.

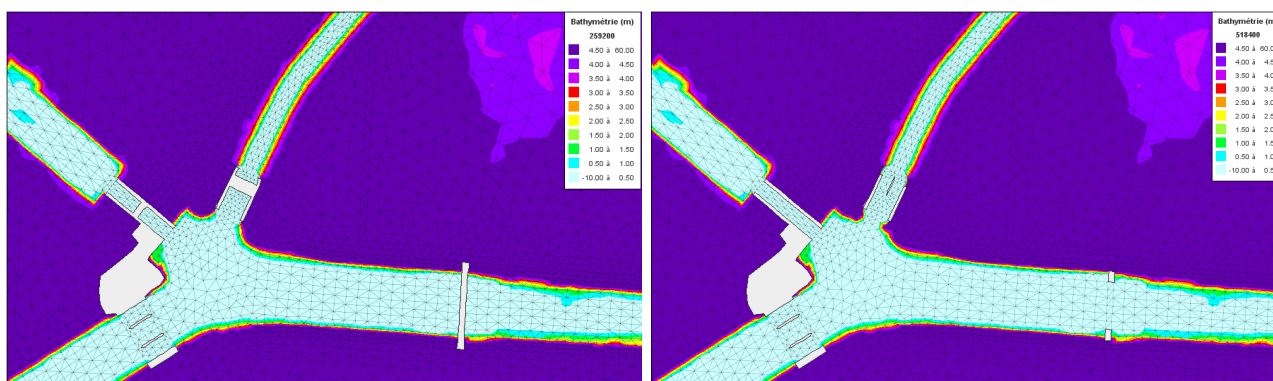


Figure 2-5 : illustration des deux méthodes d'intégration des ouvrages de gestion du canal dans le centre de Caen : à gauche la première méthode, à droite la seconde.

Concernant les ouvrages « secondaires », vannes d'alimentation et ouvrages du fossé de ligne notamment, ils sont intégrés sous formes de « buses » et « siphons » dans TELEMAC-2D.

2.6 CONDITIONS AUX LIMITES

Le référentiel temporel est l'heure universelle : toutes les données temporelles sont donc exprimées en heures UTC. De manière générale, les événements étudiés ont plutôt lieu en hiver, le décalage avec l'heure légale est de 1 heure (heure légale = heure UTC + 1 heure). Pour l'heure d'été, le décalage est de 2 heures.

2.6.1 CONDITIONS AMONT – HYDROGRAMMES

Pour les crues réelles de calage, les hydrogrammes injectés à l'amont sont issus de la station de May-sur-Orne pour la frontière sur l'Orne (sans correction, la frontière amont du modèle étant proche de la station, à environ 3,5 km en aval) et des stations de l'Odon (Epinay et/ou Gavrus). Sur l'Odon, une correction est appliquée compte tenu de l'éloignement des stations (décalage en temps pour la propagation et homothétie sur les débits pour tenir compte de la taille du bassin versant plus grande).

Pour les crues théoriques de différentes périodes de retour, les hydrogrammes à Caen ont été reconstitués à partir d'hydrogrammes normés sur les plus fortes crues observées. Une répartition entre l'Orne amont et l'Odon est opérée afin d'avoir l'hydrogramme complet à l'entrée de Caen.

2.6.2 CONDITION AVAL – MAREE

La frontière aval est localisée en mer. Une condition de marée est imposée.

La suite TELEMAC-2D intègre un générateur de marée s'appuyant sur différentes bases de données de constantes harmoniques. Pour la présente étude, la base de données TPXO issue des travaux de l'OSU (Oregon State University) est retenue : cette base de données donne des résultats satisfaisants en Manche.

Le générateur de marée est calé sur les prédictions de marée à Ouistreham. Une correction en hauteur d'eau est appliquée à la frontière afin de bien représenter l'aplatissement du marégramme à la pleine mer, phénomène caractéristique en Manche Est et assez mal représenté par le générateur.

Pour l'étude des événements réels, les observations du marégraphe de Ouistreham permettent d'évaluer les surcotes marines lors de chaque événement : ces surcotes sont ajoutées, uniformément sur la frontière maritime, aux niveaux d'eau calculés par le générateur de marée.

2.7 CHOIX DES COEFFICIENTS DE FROTTEMENT

Les coefficients de frottement sont définis à partir de l'occupation du sol pour les parties terrestres et sur la base de notre expérience pour les lits mineurs.

Les valeurs retenues sont ainsi résumées dans le Tableau 2-1 :

Situation		Coefficient de Strickler retenu
Lit mineur de l'Orne	Amont Caen	25
	Traversée de Caen	35
	Aval Montalivet	35
	Estuaire aval Ranville	50 à 60
Lit mineur affluents		20 à 25
Domaine maritime		60
Lit majeur		10 à 12
Zones urbaines selon densité		1 à 5
Rues et routes		40

Tableau 2-1 : coefficients de Strickler retenus.

3 CALAGE ET VALIDATION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE 2D

3.1 METHODOLOGIE DU CALAGE

Le calage est mené en état actuel, c'est-à-dire après réalisation des aménagements de protection contre les inondations. Depuis la réalisation de ces travaux, l'Orne n'a pas connu de crue significative.

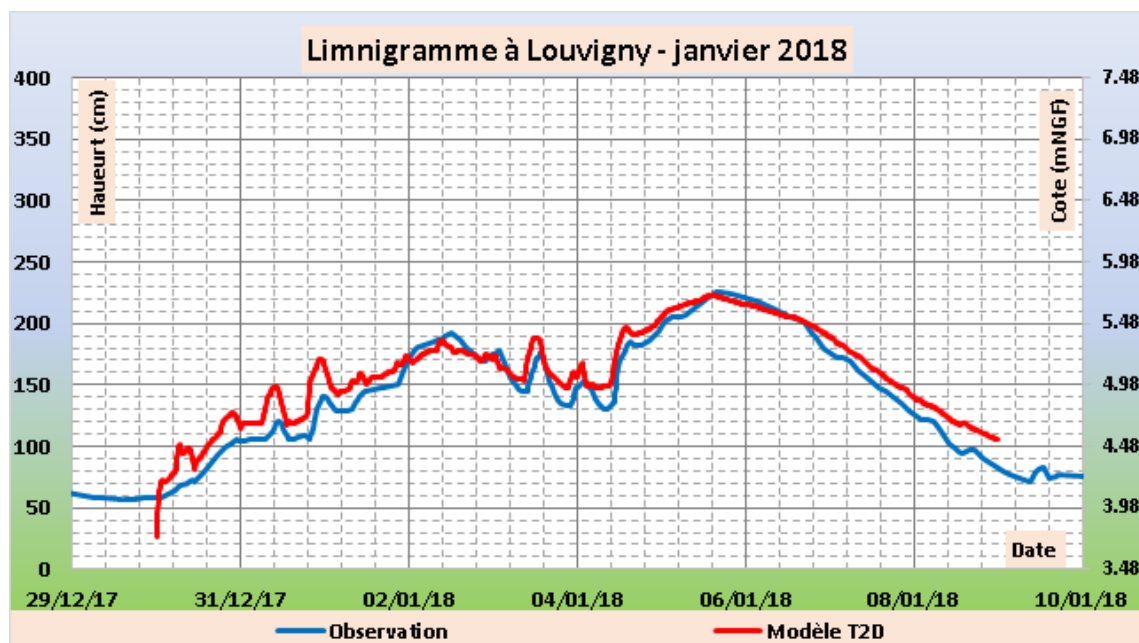
Le calage est ainsi réalisé sur des crues récentes avec peu d'observations hormis les mesures aux stations : stations du SPC et marégraphe de Ouistreham. Ces crues n'ayant pas causé de débordements significatifs, aucun repère de crue n'est disponible.

Pour les crues théoriques, les niveaux obtenus sont comparés aux niveaux calculés par (SOGREAH, septembre 2005) pour un débit de 625 m³/S à Caen.

3.2 CALAGE SUR DES CRUES RECENTES

3.2.1 CRUE DE JANVIER 2018

Les graphiques suivants présentent le calage des niveaux d'eau aux stations sur le domaine de calcul :



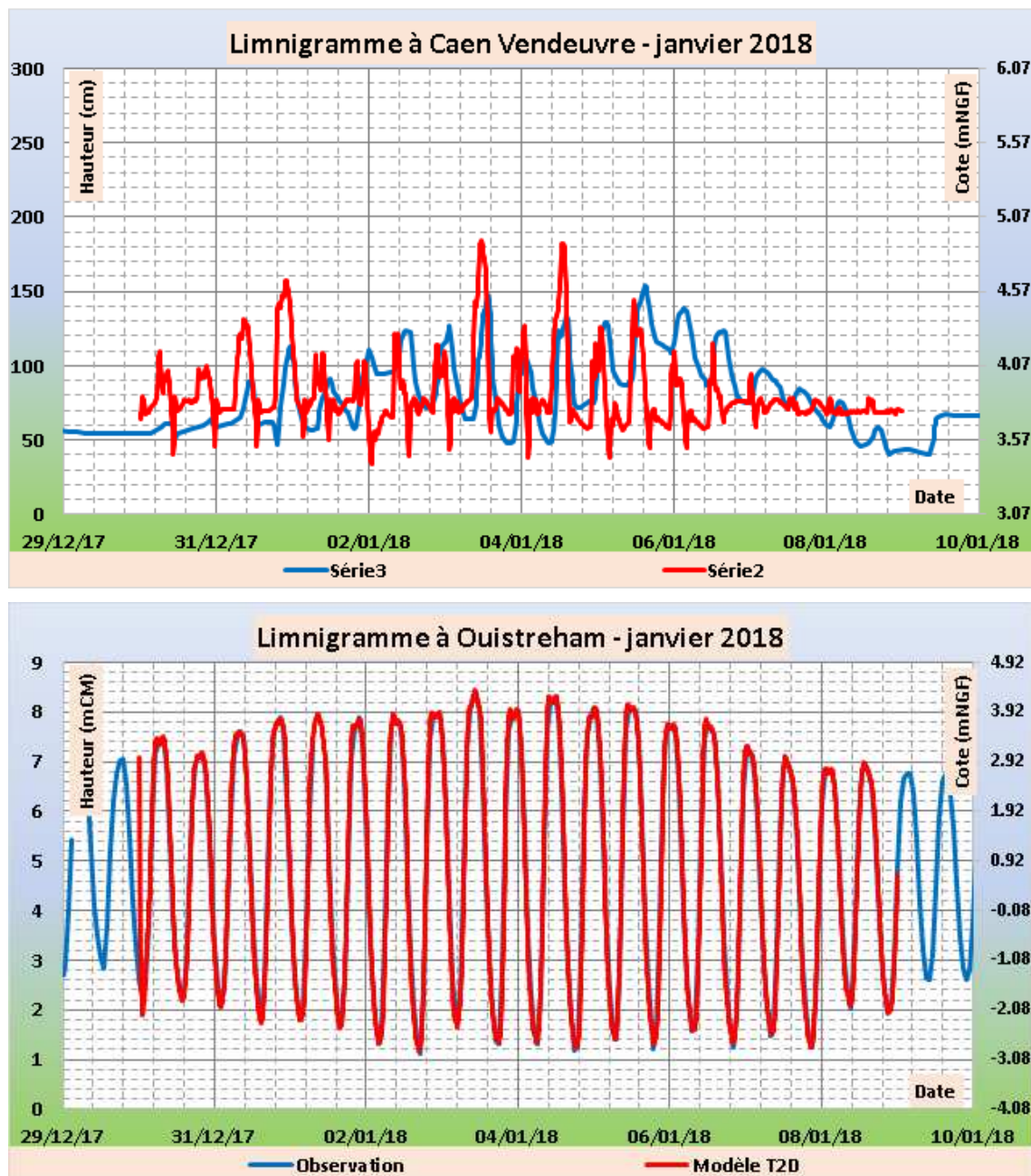


Figure 3-1 : niveaux d'eau mesurés et calculés par le modèle TELEMAC-2D – janvier 2018.

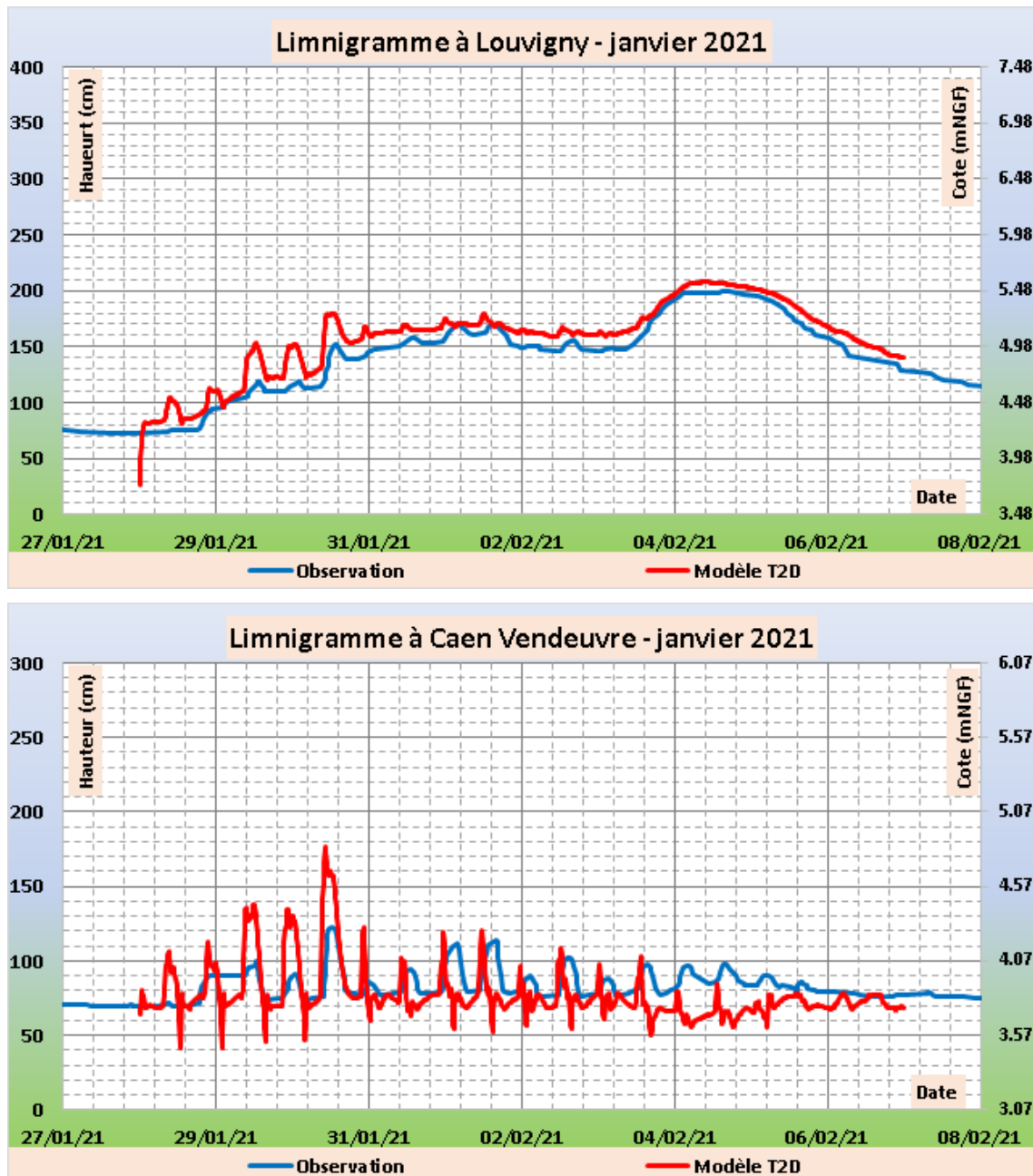
Les niveaux à Ouistreham sont très bien représentés par le modèle.

A l'échelle de Louvigny, les niveaux observés sont également bien représentés, le pic de la crue étant bien calculé par le modèle.

A la station de Caen Vendeuvre, la gestion des ouvrages de gestion du canal influe fortement sur les niveaux calculés. Le calage y est moins satisfaisant.

3.2.2 CRUE DE FEVRIER 2021

Les graphiques suivants présentent le calage des niveaux d'eau aux stations sur le domaine de calcul :



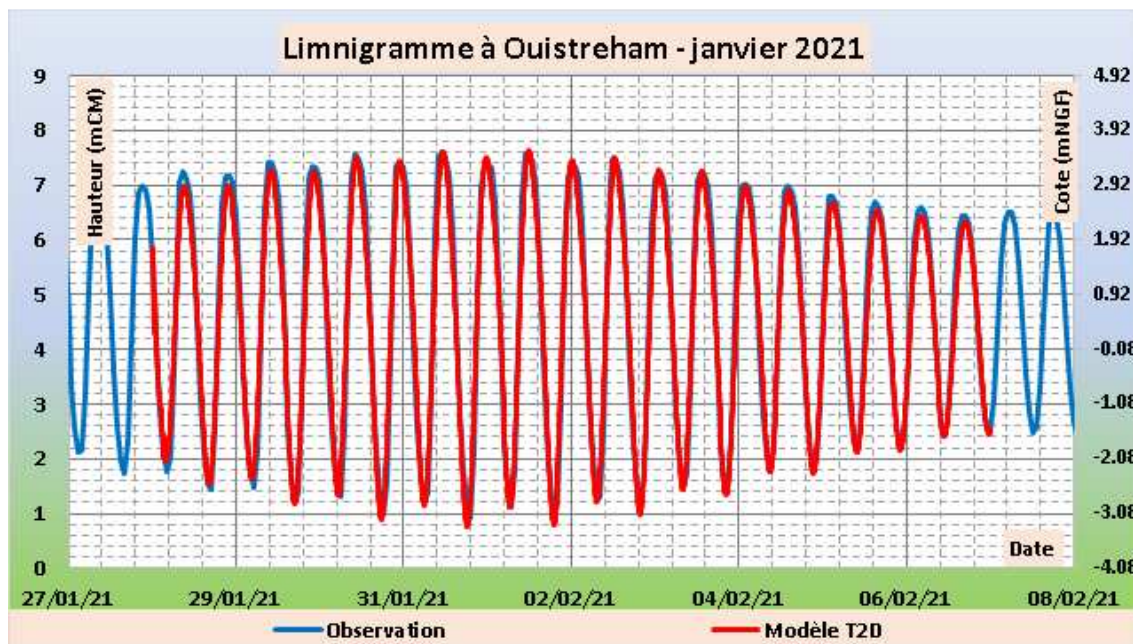


Figure 3-2 : niveaux d'eau mesurés et calculés par le modèle TELEMAC-2D – février 2021.

Les mêmes remarques que pour la crue de janvier 2018 peuvent être formulées : excellent calage à Ouistreham, calage satisfaisant à Louvigny (légère sur-estimation du niveau observé) et calage peu satisfaisant à Caen Vendevre du fait de l'influence de la gestion des ouvrages.

3.3 VERIFICATION EN SIMULANT LA CRUE DE L'ORNE A 625 M³/S

Le calage a été mené sur des crues récentes mais de faible intensité : débit de pointe inférieur au débit décennal de l'Orne.

En fait, depuis les travaux de protection contre les crues menés dans l'agglomération caennaise, l'Orne n'a pas connu de crue significative. Il n'est donc pas possible de caler le modèle dans l'état actuel (après les aménagements) pour de fortes crues.

En conséquence, les résultats pour de fortes crues sont comparés aux résultats de l'étude SOGREAH de 2005. La crue de 625 m³/s est retenue pour cette vérification¹.

Le Tableau 3-1 reprend les résultats de l'étude SOGREAH (tableau 2 du rapport (SOGREAH, septembre 2005)) comparés aux résultats du modèle TELEMAC-2D développé pour la présente étude :

¹ : il ne s'agit pas à proprement parler d'un calage mais d'une vérification de cohérence/adéquation du modèle 2D au regard des modélisations de l'étude SOGREAH de 2005. Le modèle SOGREAH avait été calé en situation avant travaux sur des crues réelles, en particulier la crue de janvier 1995.

Situation	Cote calculée (mNGF) SOGREAH 2005	Cote calculée (mNGF) ISL-2021	Ecart (cm)
1 Ferme Athis	7,31	7,48	+17
2 Louvigny	7,32	7,39	+7
3 Amont pont SNCF	7,29	7,31	+2
4 Aval pont SNCF	7,25	7,24	-1
5 Coude de l'île Enchantée RD	7,27	7,22	-5
6 Amont de la Cavée	6,80	6,75	-5
7 Aval de la Cavée	6,69	6,61	-8
8 Hippodrome	6,47	6,30	-17
9 Amont pont de Bir Hakeim	6,13	6,03	-10
10 Aval pont de Bir Hakeim	5,94	5,69	-25
11 Amont pont de Vaucelles	5,87	5,63	-24
12 Aval pont de Vaucelles	5,64	5,43	-21
13 Amont pont Churchill	5,52	5,29	-23
14 Aval pont Churchill	5,34	5,22	-12
15 Amont pont de Vendeuvre	5,20	5,10	-10
16 Amont barrage de Montalivet	5,12	5,04	-8
17 Aval barrage de Montalivet	5,08	5,01	-7
18 400 m en aval du barrage de Montalivet	4,98	4,93	-5
19 100 m en amont du viaduc de Calix	4,90	4,79	-11
20 900 m en aval du viaduc de Calix	4,76	4,61	-15
21 Entre les ponts miniers SMN1 et SMN2	4,67	4,46	-21
22 500 m en aval des ponts de Colombelles	4,37	4,09	-28
23 Vers le pont des ciments français ²	3,45	3,98	+53
24 Orne du Maresquier	3,26	3,60	+34
25 Canal maritime – Amont pont de la Fonderie	4,47	4,60	+13
26 Canal maritime – Aval pont de la Fonderie	4,15	4,30	+15
27 Canal maritime – Viaduc de Calix	4,11	4,21	+10
28 Canal maritime – Pegasus Bridge	4,01	4,18	+17
29 Canal maritime – Amont Maresquier	4,02	4,09	+7
30 Canal maritime – Ecluses de Ouistreham	4,02	4,09	+7

Tableau 3-1 : résultats de la crue de 625 m³/s.² : la localisation de l'ouvrage n'est pas bien connue ce qui peut en partie expliquer l'importance de l'écart.

Les résultats des deux modèles sont cohérents dans l'ensemble avec des écarts pouvant être importants localement : traversée de Caen par exemple entre les ponts Bir Hakeim et Vendeuvre.

4 SIMULATIONS DE CRUES DE L'ORNE

4.1 HYPOTHESES

Les hydrogrammes des crues théoriques de différentes périodes de retour ont été établis dans le cadre de l'étude de dangers de la digue du canal maritime (PNA, 2018). Les hydrogrammes sont rappelés sur la Figure 4-1 :

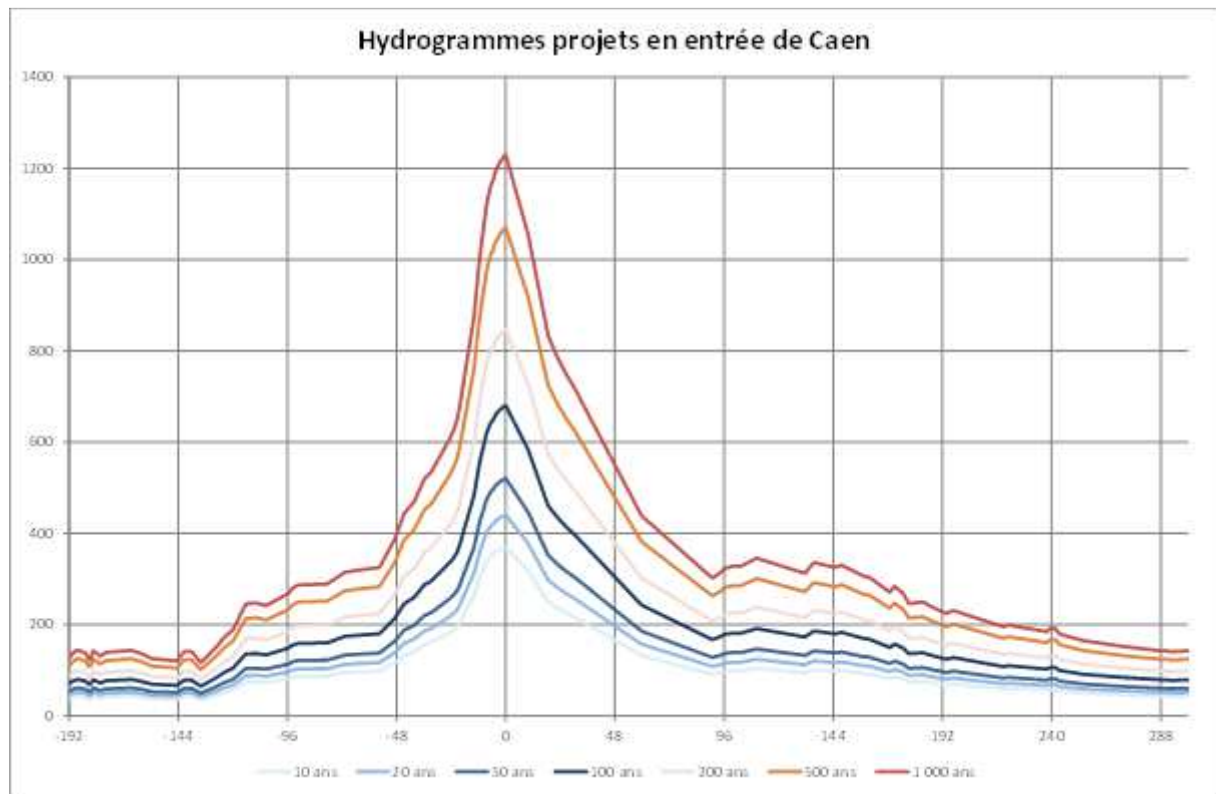


Figure 4-1 : hydrogrammes de crues de l'Orne à Caen.

Les valeurs de débits de pointe sont rappelées dans le Tableau 4-1 :

Agglomération de Caen	Période de retour					
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	500 ans	1 000 ans
Débit de pointe en m³/s	400	460	550	665	925	1 040

Tableau 4-1 : débits de pointe de l'Orne à Caen.

Les valeurs retenues dans le cadre du PAPI de l'Orne (cf. (Institution Interdépartementale du Bassin de l'Orne, septembre 2011)) sont de 390 m³/s pour la crue de période de retour 10 ans et 640 m³/s pour la crue de période de retour 100 ans. Les valeurs obtenues sont cohérentes avec les études antérieures.

4.2 RESULTATS

L'ensemble des crues ont été simulées avec le modèle hydraulique 2D. Les lignes d'eau le long de l'Orne maritime et le long du canal maritime sont données sur les graphiques suivants :

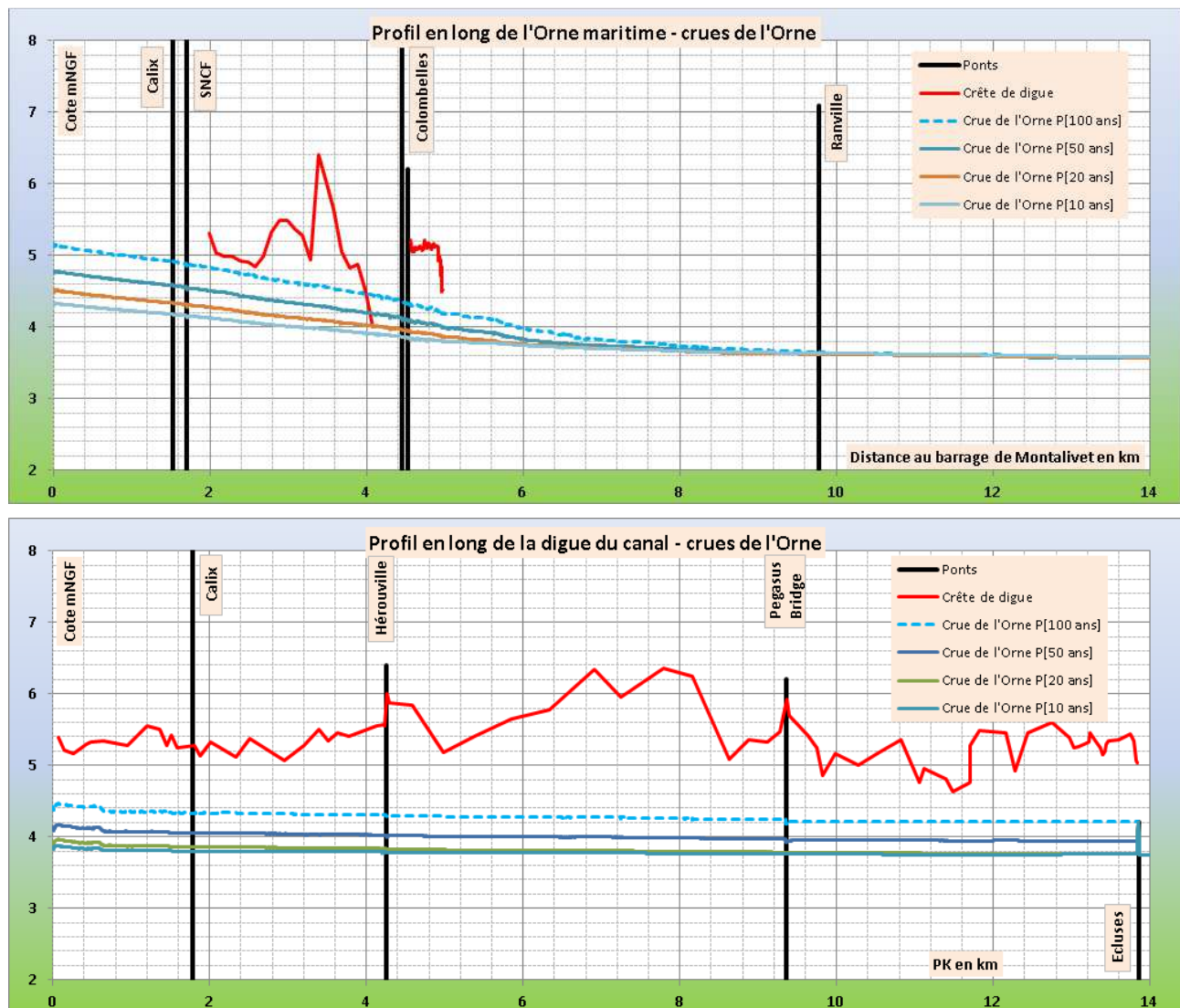


Figure 4-2 : lignes d'eau pour les crues de référence.

5 SIMULATIONS D'ÉVÉNEMENTS MARINS

5.1 HYPOTHESES

Les simulations d'événements marins sont menées sans prendre en compte de crue de l'Orne. Un débit de l'Orne et de l'Odon est injecté en amont du modèle de sorte à obtenir un débit constant à Caen correspondant au débit moyen de l'Orne en hiver, environ 70 m³/s (dans ces conditions, seules les vannes du barrage de Montalivet sont manœuvrées).

Les événements marins sont construits à partir du générateur de marée et en ajoutant à la frontière une surcote sur les niveaux d'eau.

Cette surcote est paramétrée à partir de la surcote observée en février/mars 2010 (tempête Xynthia) à Ouistreham.

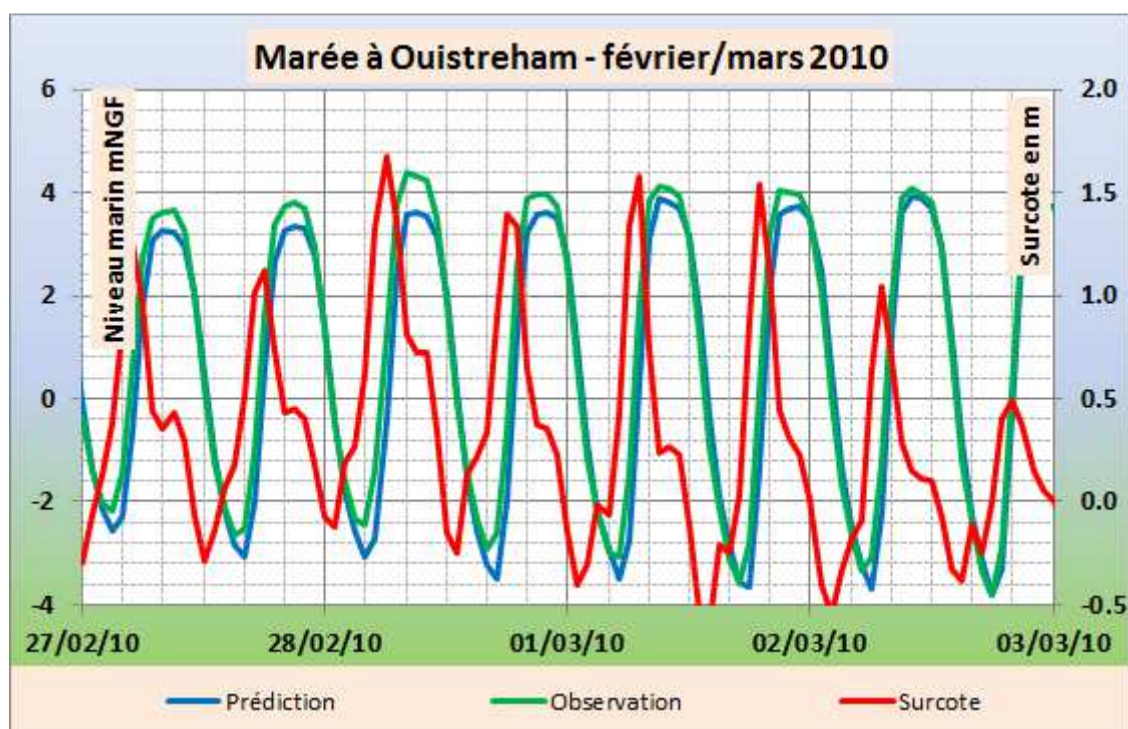


Figure 5-1 : surcote observée à Ouistreham en février/mars 2010.

Le phénomène de surcote en Manche présente une particularité : le maximum de la surcote intervient généralement à mi-marée montante et est rarement en phase avec la pleine mer. Cette particularité a été mise en évidence dans le cadre du projet VIMER mené par Météo-France (Etude des tempêtes menaçant le littoral breton, janvier 2015). Elle est illustrée sur la Figure 5-2 avec la superposition de plusieurs surcotes observées lors d'événements récents à Ouistreham :

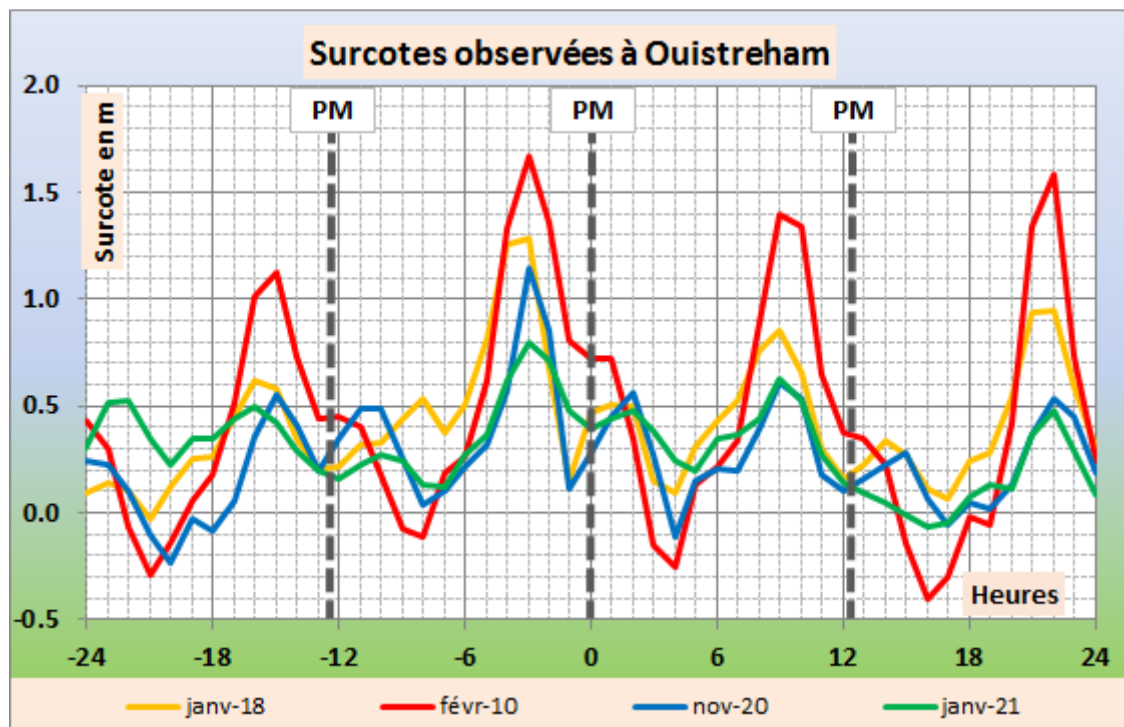
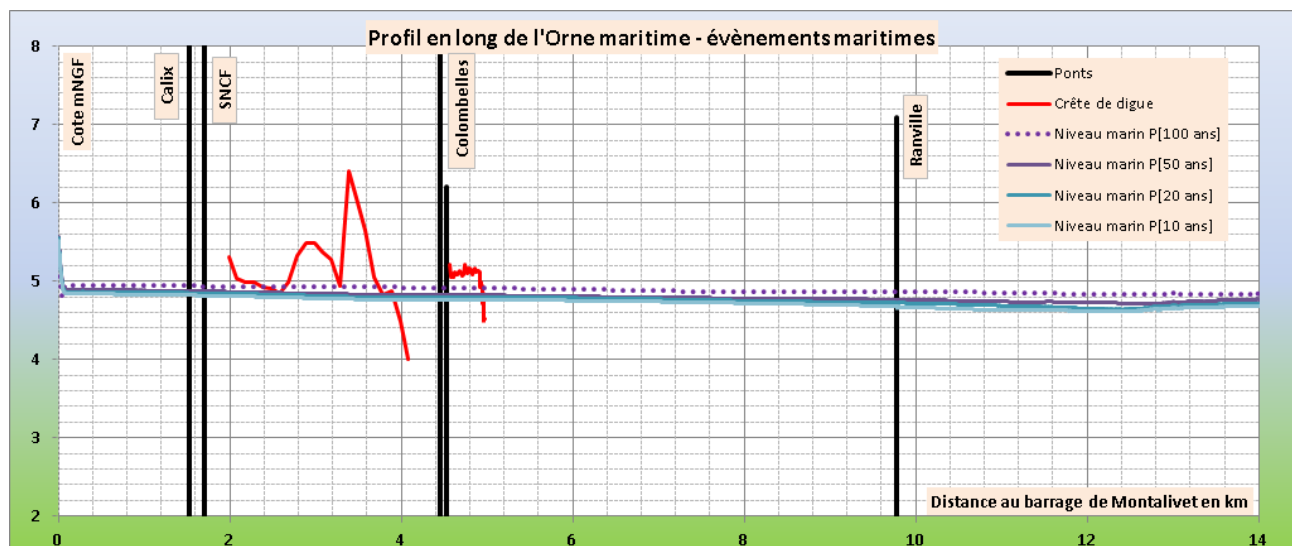


Figure 5-2 : surcotes observées à Ouistreham, décalage du pic de surcote avec la pleine mer (PM).

5.2 RESULTATS

Les graphiques suivants présentent les lignes d'eau le long du canal maritime et le long de l'Orne maritime :



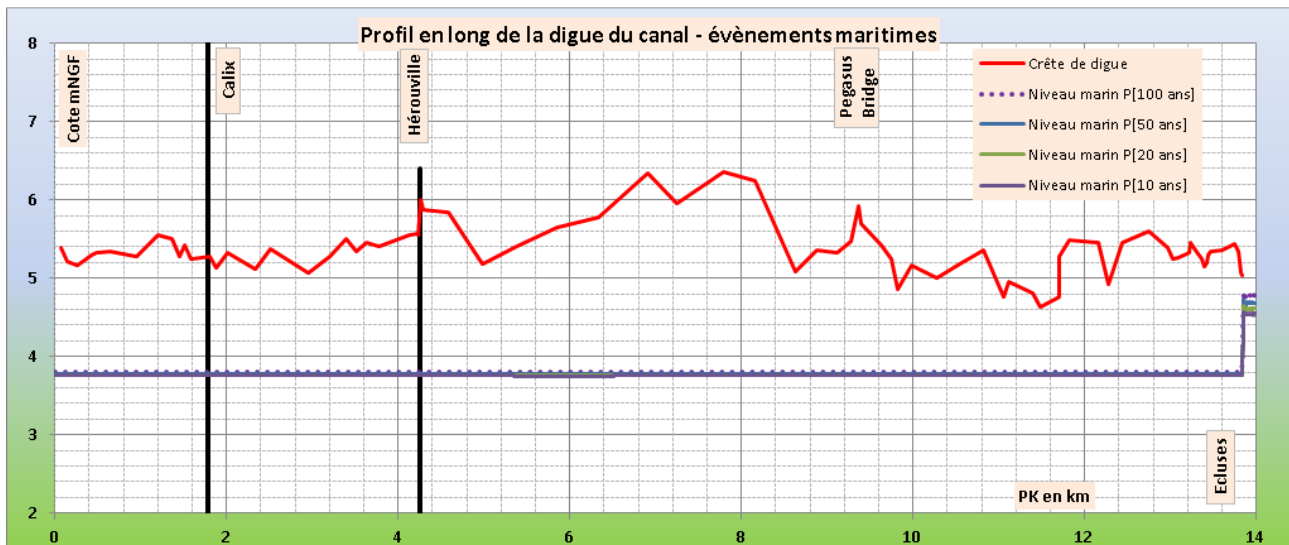


Figure 5-3 : lignes d'eau pour les évènements marins de référence.

Sur le canal maritime, des surverses ont lieu au niveau des écluses et des entrées d'eau sont calculées dans le canal. Toutefois, les volumes entrant sont très faibles (sous réserve de la bonne tenue des portes des écluses) et sont stockés dans le canal avec une sur-élévation du canal d'à peine 10 cm pour l'évènement centennal.

6 PROPOSITIONS DE SCENARIOS

6.1 SECTEUR MARITIME ET DIGUE DE COLOMBELLES

Les scénarios proposés ci-dessous concerne les digues maritimes et du canal ainsi que la digue de Colombelles.

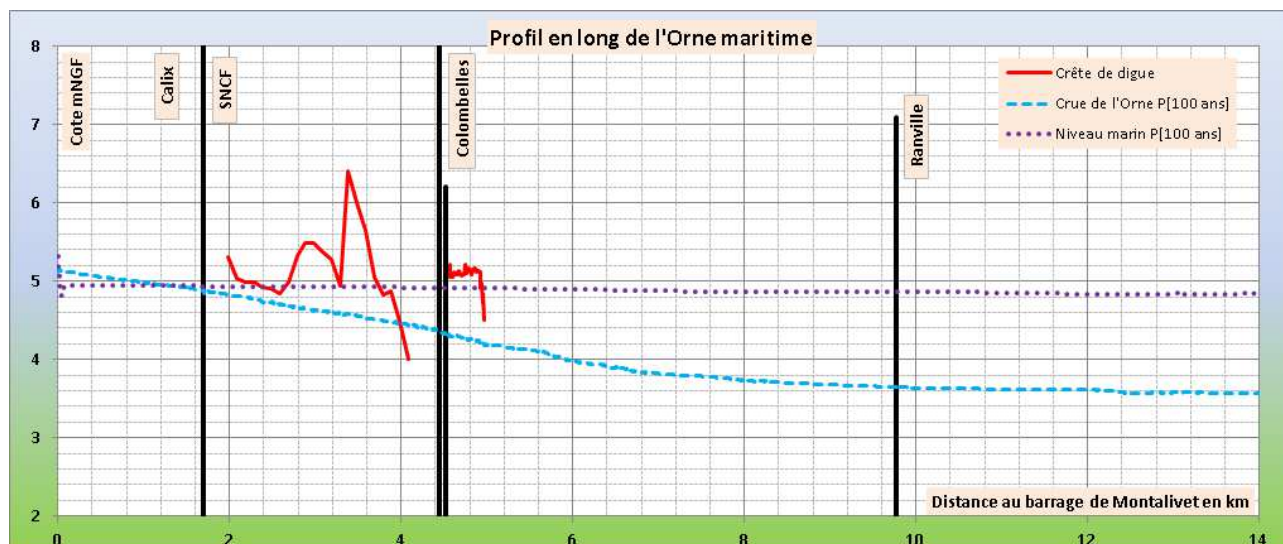


Figure 6-1 : profil en long des deux événements centennaux le long de l'Orne maritime.

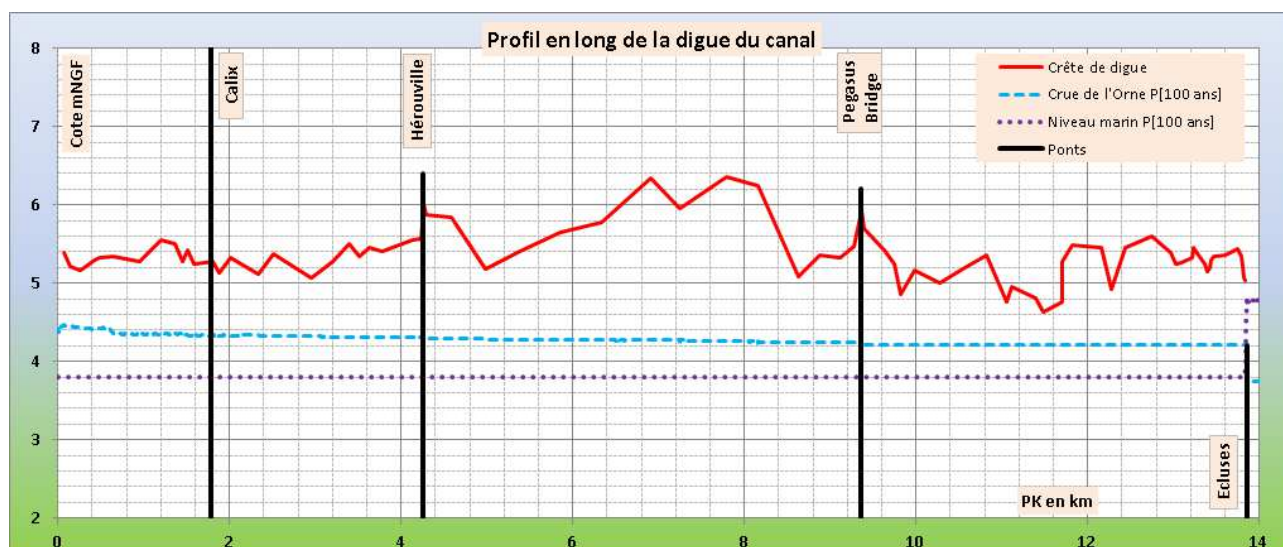


Figure 6-2 : profil en long des deux événements centennaux le long du canal.

Le long du canal, les niveaux atteints en fonctionnement normal sont inférieurs à la crête de digue. Le point bas de la digue est atteint pour une crue de période de retour comprise entre 100 et 200 ans ce qui est cohérent avec l'étude de dangers initiale³.

³ : la modélisation 2D donne des niveaux d'eau légèrement inférieurs au modèle 1D mis en œuvre lors de l'étude de dangers initiale. La période de retour de la crue de début de surverse demeure inférieure à 200 ans, en cohérence avec l'étude de dangers initiale.

Sur l'Orne, les niveaux en crues sont inférieurs à ceux estimés lors des études de dangers des digues de Caen la mer (2019), avec des écarts de l'ordre de 10 à 15 cm. Pour les événements marins, les niveaux calculés avec le modèle 2D sont très similaires.

Le long de la digue de Colombelles, l'évènement marin est prépondérant : les résultats des deux modèles (1D et 2D) sont très proches.

6.2 LES SCENARIOS DE L'ETUDE DE DANGERS – ARRETE DU 7 AVRIL 2017

L'arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers des digues organisées en systèmes d'endiguement définit 4 scénarios hydrauliques à intégrer dans l'étude de dangers :

- Le **scénario 1** est celui du fonctionnement nominal du système d'endiguement quand le niveau de l'eau, sous l'effet de la crue ou d'une submersion marine, correspond au plus au niveau de protection ;
- Le **scénario 2** est représentatif d'une défaillance fonctionnelle du système d'endiguement au moment où se produit un aléa dont l'intensité équivaut à l'intensité de l'aléa correspondant au niveau de protection ;
- Le **scénario 3** est représentatif d'une défaillance structurelle du système d'endiguement ;
- Le **scénario 4** est représentatif du comportement du système d'endiguement quand se produit l'aléa de référence du plan de prévention des risques naturels inondation ou littoraux.

L'arrêté du 22 juillet 2019 rend le scénario 4 facultatif.

6.3 SCENARIO 1

Sur le secteur d'étude, deux aléas sont à considérer : l'aléa maritime et l'aléa fluvial. Deux niveaux de protection peuvent être ainsi définis, chacun étant rattaché à l'un ou l'autre des aléas.

Deux scénarios de type 1 sont simulés :

- Scénario 1-F : scénario 1 pour le niveau de protection lié à l'aléa fluvial ;
- Scénario 1-M : scénario 1 pour le niveau de protection lié à l'aléa maritime.

A priori, le niveau de protection attendu pour les deux aléas correspond à la l'aléa d'occurrence centennale.

6.4 SCENARIO 2

Compte tenu des nombreux ouvrages, les scénarios de type 2 sont relativement nombreux. Deux scénarios sont envisagés sur la façade maritime :

- Scénario 2-M-a : scénario 2 sur la façade maritime, incluant l'ouverture totale et permanente des clapets anti-retour pendant toute la durée de l'évènement correspondant au niveau de protection ;
- Scénario 2-M-b : non ouverture des clapets pendant un évènement pluvieux sur le bassin versant. La durée de l'évènement est de 24 heures.

Deux scénarios sont envisagés pour le secteur de Colombelles :

- Scénario 2-M-a : défaut de fermeture des clapets anti-retour pendant toute la durée de l'évènement correspondant au niveau de protection. Il s'agit du même scénario que ci-dessus.
- Scénario 2-F-b : défaillance dans l'évacuation de la crue vers le canal. Le cas le plus défavorable consiste en une non ouverture des vannes du Maresquier en crue ;

Quatre scénarios sont envisagés pour la digue Ouest du canal :

- Scénario 2-M-c : ouverture accidentelle des portes d'une des deux écluses de Ouistreham pendant l'évènement marin correspondant au niveau de protection ;
- Scénario 2-F-a : non fermeture des clapets anti-retour des ouvrages traversant pendant l'évènement fluvial de référence ;
- Scénario 2-F-b : défaillance dans l'évacuation de la crue vers le canal. Le cas le plus défavorable consiste en une non ouverture des vannes du Maresquier en crue ;
- Scénario 2-F-c : défaillance dans l'évacuation de la crue vers l'Orne maritime par non ouverture des vannes du barrage de Montalivet.

Concernant le secteur du canal, le scénario correspondant à une impossibilité totale d'évacuer les eaux de pluies venant des bassins versants n'est pas étudié : un tel scénario implique une défaillance simultanée de l'ensemble des ouvrages liés au fossé de ligne : clapets, vannes, siphons et pompes. Un tel scénario apparaît peu réaliste.

Au total, plusieurs scénarios pouvant être communs à plusieurs secteurs, six variantes sont proposées pour le scénario 2.

6.5 SCENARIO 3

Le scénario 3 correspond à une défaillance structurelle entraînant un risque de rupture supérieur à 50 %.

Sur la façade maritime, un tel risque de rupture implique des niveaux d'eau particulièrement « extraordinaires ». La précédente étude de danger avait évalué à 10 000 ans la période de retour de l'évènement maritime pouvant être à l'origine d'une rupture du cordon dunaire. Un tel évènement ne répond pas au caractère « réaliste et porteur d'enseignements » attendu dans l'arrêté du 7 avril 2017. Il n'est pas proposé de simuler ce scénario de défaillance.

Les scénarios de défaillance structurelle concernent donc le secteur de Colombelles et la digue du canal. Les études de dangers existantes sur ces deux secteurs ont montré qu'il faut considérer des scénarios amenant à la surverse sur les digues pour atteindre des risques de rupture de 50 %.

Les scénarios proposés sont ainsi :

- Scénario 3-M-a : évènement maritime occasionnant une surverse et la rupture de la digue de Colombelles, période de retour supérieure à 100 ans ;
- Scénario 3-F-a : évènement de crue dépassant les capacités d'évacuation du canal, occasionnant la surverse sur la digue puis sa rupture, crue de l'Orne de période de retour supérieure à 200 ans.

6.6 SCENARIO 4

De la même manière que pour le scénario 1, deux aléas sont à considérer : l'aléa maritime et l'aléa fluvial.

Deux scénarios de type 4 sont simulés :

- Scénario 4-F : scénario 4 pour le niveau de référence lié au PPRi de la Basse Vallée de l'Orne ;
- Scénario 4-M : scénario 4 pour le niveau de référence lié au PPRL.

Dans le cas où le niveau de protection attendu correspond à la l'aléa d'occurrence centennale, ces deux scénarios sont identiques aux scénarios 1.

Par ailleurs, ce scénario 4 est devenu facultatif.

7 BIBLIOGRAPHIE

- Alp'Géorisques - IMDC. (2014). *PPRL Bessin et Dives-Orne - Phase 1 : Analyse préalable des sites*. DDTM du Calvados.
- Alp'Géorisques - IMDC. (2015). *PPRL Bessin et Dives-Orne - Cartographie des aléas littoraux - Secteur Dives-Orne*. DDTM du Calvados.
- Boudiere Edwige, M. C.-G. (2013). A suitable metocean hindcast database for the design of Marine energy converters. *International Journal of Marine Energy*, 3-4, pp. e40-e52.
- BRGM. (2014). *Méthodologie de détermination du recul maximal des dunes pour les évènements extrêmes - BRGM/RP-63157-FR*. BRGM.
- Cerema. (Juin 2018). *Etude de dangers de systèmes d'endiguement - Concepts et principes de réalisation des études*.
- CETMEF. (2013). *Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes - Environnements maritime et estuarien*. CETMEF.
- Charier. (2015). *Note de calcul du rideau - Confortement de berges de l'Orne à Colombelles*.
- CIRIA. (1996). *Beach Management Manual*. CIRIA.
- CIRIA/CUR/CETMEF. (2009). *Guide Enrochement - L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques - Version française du Rock Manual*. CETMEF.
- DREAL Basse-Normandie. (septembre 2014). *Territoire à risque important de Caen – Cartographie des aléas et des enjeux – Rapport explicatif*.
- EDF R&D - LCHF. (1986). *Catalogue sédimentologique des côtes françaises - Côtes de la Mer du Nord et de la Manche*. Eyrolles.
- GRESARC. (2002). *Suivi de l'évolution des côtes du département du Calvados - novembre 1995-février 2002 - Analyses*. Conseil Général du Calvados.
- Institution Interdépartementale du Bassin de l'Orne. (septembre 2011). *Programme d'actions de prévention des inondations des bassins versants de l'Orne et de la Seulles – Diagnostic du territoire*.
- ISL-Ingénierie. (2017). *Etude de dangers de la digue berge Ouest du canal de Caen à la mer*. PNA.
- Météo France. (juillet 1999). *Estimation des hauteurs de précipitations d'occurrence rare pour des durées de cumul de 1 à 10 jours sur 3000 postes français*.
- SEMOFI. (2015). *Confortement des berges de l'Orne - Chemin de Halage Colombelles - Rapport d'étude géotechnique préalable et rapport d'étude de conception*.
- Service Hydrographique et Océanographique de la Marine. (2012). *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique)*. SHOM/CETMEF.
- Service Hydrographique et Océanographique de la Marine. (2014). *Référence Altimétriques Maritimes - Ports de France métropolitaine et d'outre-mer - Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée*. SHOM.
- SOCOTEC. (2015). *Etude de dangers - Digue de Caffarelli*.
- SOGREAH. (mars 1999). *Etude hydraulique sur modèles mathématique et physique des aménagements de lutte contre les inondations dans l'agglomération caennaise*. Syndicat Mixte de lutte contre les inondations dans la vallée de l'Orne et son bassin versant.

SOGREAH. (septembre 2005). *Modélisation comparative des aménagements préconisés en 1999 et de la situation réelle en 2005*. Syndicat Mixte de lutte contre les inondations dans la vallée de l'Orne et son bassin versant.

Van der Meer J.W, & a. (2016). *Eurotop 2016 - Manual on wave overtopping of sea defences and related structures*.

ANNEXE 1 TITRE ANNEXE

Texte