



Modèle 3D hydrosédimentaire et de qualité des eaux de la Loire

GIP Loire Estuaire

CONSTRUCTION ET CALAGE DU MODÈLE 3D HYDROSÉDIMENTAIRE LOCAL DE STABILITÉ DU SITE DE CLAPAGES DE LA LAMBARDE

Tranche ferme phase 1

Rapport final V3



Modèle 3D hydrosédimentaire et de qualité des eaux de la Loire

GIP Loire Estuaire

CONSTRUCTION ET CALAGE DU MODELE 3D HYDROSEDIMENTAIRE LOCAL DE STABILITE DU SITE DE CLAPAGES DE LA LAMBARDE

VERSION	DESCRIPTION	ÉTABLI PAR	APPROUVÉ PAR	DATE
0	Version de travail de support au COMEX du 09/2022	RWR, GIY	OBD	12/08/2022
1	Rapport final V1	RWR,GIY	OBD	09/12/2022
2	Rapport final V2	RWR,GIY	OBD	22/03/2023
3	Rapport final V3	RWR,GIY	OBD	07/06/2023

Artelia
6 rue de Lorraine 38130 Echirolles – TEL 04 76 33 43 45

Artelia
6 rue de Lorraine 38130 Echirolles

SOMMAIRE

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS	4
1. CONSTRUCTION	5
1.1. Emprise	5
1.2. MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN - MNT	5
1.3. Maillage	6
1.4. Forçages	6
1.4.1. Forçage hydrodynamique	6
1.4.2. La houle	7
1.4.3. Le remplissage sédimentaire	7
1.4.4. Clapages.....	7
1.4.4.1. Données	7
1.4.4.2. Sous-zones de clapages	8
1.4.4.3. Modélisation d'un clapage	9
2. CALAGE	11
2.1. Volume en place.....	13
2.1.1. Objectifs.....	13
2.1.2. Données de calage	13
2.1.3. Résultats du calage.....	16
2.2. VÉRIFICATION des cotes moyennes par SOUS-ZONE.....	18
2.2.1. Objectifs.....	18
2.2.2. Résultats	18
2.3. Cartes d'Évolutions.....	20
RÉFÉRENCES	23
ANNEXES	24

TABLEAUX

Tableau 1 – Levés-bathymétriques	13
Tableau 2 – Levés-bathymétriques et ajustement de la cote de référence	14
Tableau 3 : Taux de stabilité par sous-période de clapage	16

FIGURES

Figure 1-1 : Bathymétrie initiale du site de clapage de la Lambarde (Sources des données :GPMNSN, SHOM).....	5
Figure 1-2 : Maillage du modèle de stabilité du site de clapage de la Lambarde	6
Figure 1-3 : Remplissage sédimentaire initial.....	7
Figure 1-4 : Sous-zones et périodes de clapages de la Lambarde	8
Figure 1-5 : Masses clapées (données GPMNSN)	9
Figure 1-6 : Modélisation géométrique d'un dépôt de clapage	10
Figure 2-1 : Volume clapé et en place (issus des données de clapages et des données bathymétriques du GPMNSN)	11
Figure 2-2 : Fonds du modèle au début de la simulation	12
Figure 2-3 : Fonds du modèle après la phase de clapage dans la sous-zone 4 (la zone qui a évolué est entourée)	12
Figure 2-4 : Fonds du modèle après la phase de clapage dans la sous-zone 18 (la zone qui a évolué est entourée)	12
Figure 2-5 : Fonds du modèle à la fin de la simulation	12
Figure 2-6 : Évolution bathymétriques entre les levés de Novembre 2016 et Juin 2018, avant correction (gauche) et après correction (droite)	14
Figure 2-7 : Évolution bathymétriques entre les levés de Avril 2021 et Août 2021, avant correction (gauche) et après correction (droite)	14
Figure 2-8 : Comparaison des volumes cumulés modélisés aux volumes cumulés réels du GPMNSN	16
Figure 2-9 : Comparaison des cotes moyennes entre modèle et in situ	18
Figure 2-10 : Évolution du fond sur les périodes inter-dates des relevés bathymétriques du GPMNSN de septembre 2011 à août 2021	22

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Le Groupement d'Intérêt Public Loire Estuaire (GIP LE) souhaite disposer d'un outil de modélisation hydrosédimentaire et de qualité des eaux (HSQE) de l'estuaire de la Loire et plus largement entre la Maine et la mer.

Dans le cadre de la construction de cet outil, un « sous-modèle » est développé sur la zone de clapage de la Lambarde. Il vise à reproduire les processus d'immersion sur cette zone et à représenter de manière cohérente la stabilité de la zone (rapport entre le volume clapé par la Drague Aspiratrice en Marche (DAM) et le volume consolidé sur place).

Ce rapport présente les étapes de construction et de validation du modèle.

Le modèle a été calibré sur les années 2011 à 2021. Il est opérationnel pour pouvoir notamment étudier des scénarios prospectifs de clapage et donc de stabilité du site, autrement dit, le volume conservé par le site par rapport au volume clapé.

1. CONSTRUCTION

L'objectif de cette partie est de détailler les étapes de construction du modèle : bathymétrie, maillage et définition des forçages.

1.1. EMPRISE

L'emprise du modèle de stabilité correspond à un cercle d'un rayon de 8 kilomètres autour du point central de la zone de clapage de la Lambarde. Ce cercle était d'ores et déjà intégré dans le modèle global, afin de pouvoir combiner le modèle global et le modèle de stabilité pour la construction du modèle de dispersion avec prise en compte des dragages et clapages.

1.2. MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN - MNT

LE GPMNSN dispose de deux sources de bathymétrie distinctes : une bathymétrie sur une zone élargie, appelée zone d'influence du site et une bathymétrie sur une zone plus restreinte, appelée zone de vidage. Pour cette étude, ont été utilisées la bathymétrie de la zone d'influence de 2011, et des bathymétries de la zone de vidage entre 2009 et 2021 à raison d'environ 1 à 2 levés par an, en fonction des clapages. Pour la zone de vidage, les bathymétries sont datées au jour prêt. Le choix des données bathymétriques conditionne donc la date de départ de la période modélisée.

La bathymétrie du modèle de stabilité est donc une combinaison de trois sources :

1. La bathymétrie de la zone de vidage, réalisée le 27 Septembre 2011 ;
2. La bathymétrie de la zone d'influence, réalisée en 2011 ;
3. La bathymétrie HOMONIM (SHOM) pour compléter les zones non couvertes par les sources précédentes.

La bathymétrie finale retenue projetée sur le maillage est visible sur la Figure 1-1 ci-après.

La référence altimétrique correspond au zéro hydrographique (m CM) à Saint-Nazaire (0 m CM = -3.16 m IGN69)

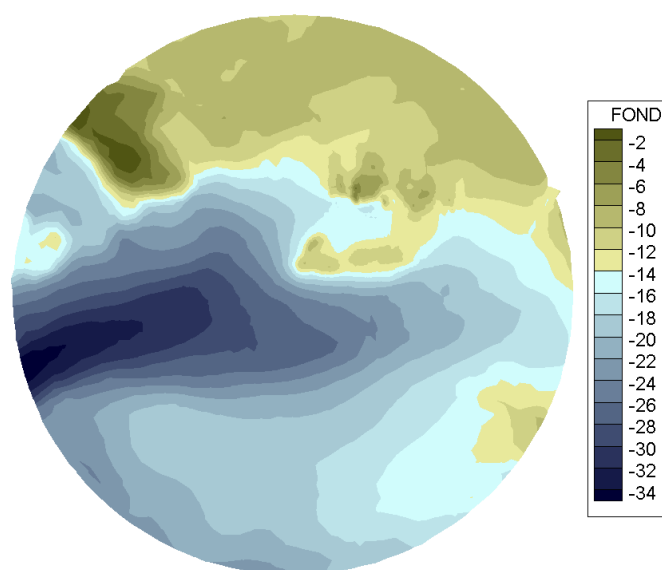


Figure 1-1 : Bathymétrie initiale du site de clapage de la Lambarde (Sources des données :GPMNSN, SHOM)

1.3. MAILLAGE

Ce cercle du contour du modèle est discrétisé avec des points espacés de 400 mètres au maximum. À l'intérieur du modèle, un raffinement progressif permet de limiter la taille des mailles à 50 mètres sur la zone de clapage.

Les différents casiers de clapage sont délimités à partir des emprises fournies par le GPMNSN et sont intégrées en tant que lignes de contrainte dans le maillage (les délimitations des casiers coïncident alors avec des faces des éléments triangulaires du maillage). Cette représentation permet de limiter au maximum les erreurs de calcul des volumes et des cotes moyennes par casier.

Le maillage final ainsi réalisé contient 8700 nœuds et 17300 éléments. Il est visible sur la Figure 1-2 ci-dessous.

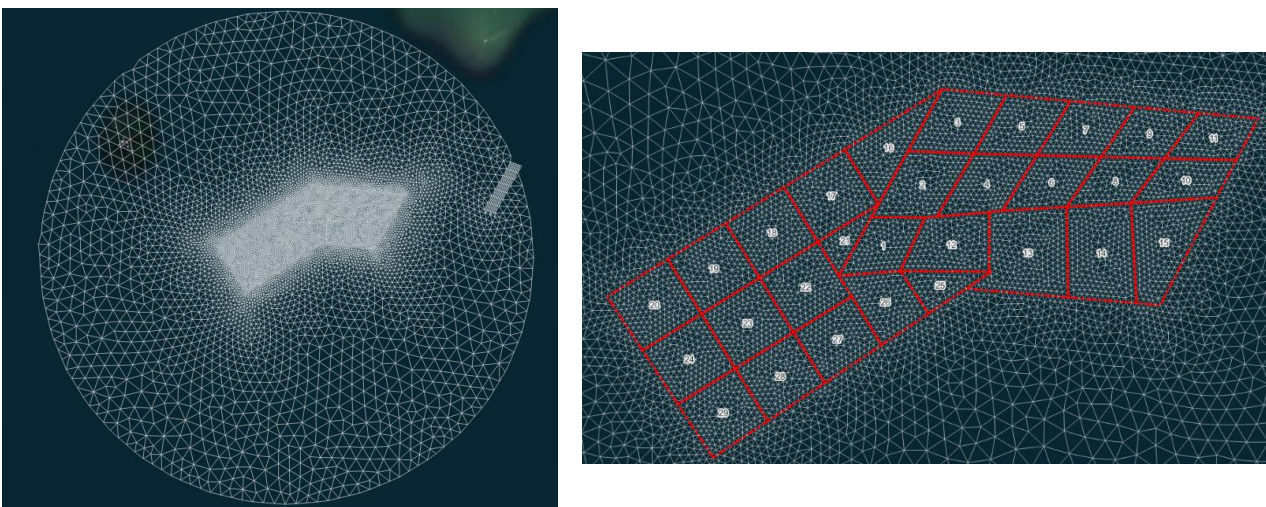


Figure 1-2 : Maillage du modèle de stabilité du site de clapage de la Lambarde¹

1.4. FORÇAGES

1.4.1. Forçage hydrodynamique

Sur l'ensemble de sa frontière, le modèle est forcé par les hauteurs et les courants issues d'une modélisation hydrodynamique de 10 ans sur le modèle global. Ces grandeurs sont extraites depuis les résultats de cette simulation sur l'ensemble des points frontières et pour les courants sur chacun des 12 plans du maillage, avec une résolution temporelle de 15 minutes.

Les influences du vent, des débits de la Loire et de la pression atmosphérique sont donc d'ores et déjà pris en compte dans les hauteurs et les champs de courants extraits depuis le modèle global.

¹ Le raffinement du maillage visible à l'Est correspond à l'aval du chenal de navigation

1.4.2. La houle

Le modèle 3D est couplé avec le modèle de propagation de houle (Tomawac). Les paramètres principaux que sont la hauteur moyenne (Hm0), la direction de pic (Dirp), la période de pic (Tp) et l'étalement directionnel (Spd) sont extraits depuis les résultats de modélisation HOMERE (Ifremer) et appliqués en chacun des points frontières. La houle est ensuite propagée dans l'ensemble du domaine.

1.4.3. Le remplissage sédimentaire

Le modèle est initialement rempli par du sédiment (couche dite de « substrat initial » dans le modèle de sol). Cette définition de la composition du sol a été effectuée à partir des données du projet EMODnetApplication (UE) et est issue du modèle global. Pour davantage de détails se rapporter à [1].

La zone de clapage de la Lambarde est incluse dans la zone estuarienne externe pour laquelle la fraction vaseuse a été retirée : le modèle doit pouvoir reproduire par lui-même le mélange au sol, au fur et à mesure des clapages.

La Figure 1-3 en suivant présente la carte de remplissage sédimentaire initial.

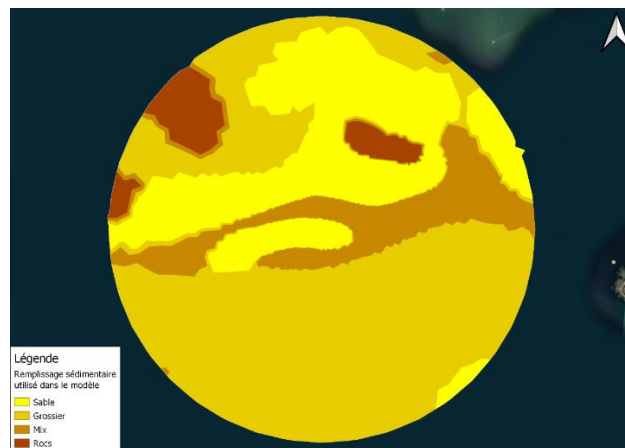


Figure 1-3 : Remplissage sédimentaire initial

1.4.4. Clapages

1.4.4.1. Données

Les clapages sont effectués un par un dans le modèle en suivant leur ordre chronologique selon les données fournies par le GPMNSN en position, date, volume en puits dans la Drague Aspiratrice en Marche (DAM) et densité.

Ces données ont d'abord été converties en volume équivalent à la densité de 1,4 (correspondant en moyenne à la densité du dépôt stabilisé) pour établir le bilan des immersions.

Elles sont ici également converties en masse pour les besoins de la modélisation numérique qui résout l'équation de conservation de la masse en sédiments, en séparant sable et vase. Cette conversion s'effectue à l'aide des formules classiques de mécanique des sols qui s'écrivent :

$$M \text{ (kg)} = V \text{ (m}^3\text{)} * C \quad \text{et} \quad C = \rho_{\text{sed}} * \frac{(\rho_{\text{hum}} - \rho_{\text{eau}})}{(\rho_{\text{sed}} - \rho_{\text{eau}})}$$

Avec :

C : concentration en sédiments (g/l ou kg/m³)

$\rho_{\text{hum}} = \frac{M_{\text{tot}}}{V_{\text{tot}}}$: masse volumique humide (kg/m³) ; ρ_{sed} : masse volumique des grains solides à 2650 kg/m³ ; ρ_{eau} : masse volumique de l'eau salée qui varie selon les sections de dragages entre 1010 kg/m³ (Donges) et 1025 kg/m³ (Saint-Nazaire).

La masse volumique humide se calcule à partir de la densité en puits (d) par la formule :

$$\rho_{\text{hum}} = 1000 * (d - \rho_{\text{eau}}/1000)$$

Ce qui conduit à la formule suivante pour la concentration en sédiments :

$$C = 1000 * \rho_{\text{sed}} * \frac{(d - \frac{\rho_{\text{eau}}}{1000})}{(\rho_{\text{sed}} - \rho_{\text{eau}})}$$

Application pratique : pour une densité de 1,4, la concentration C vaut entre 610 et 630 kg/m³ dans la gamme de masse volumique de l'eau salée considérée.

1.4.4.2. Sous-zones de clapages

La carte ci-dessous localise les sous-zones de clapage en fonction des différentes périodes.

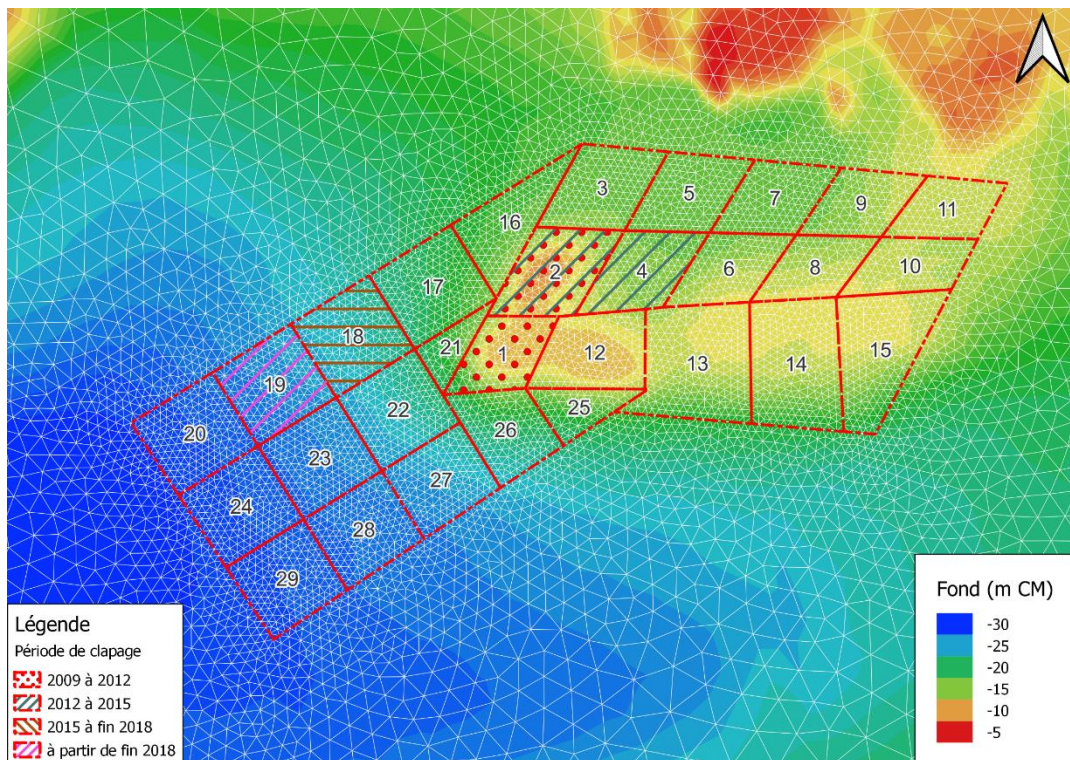


Figure 1-4 : Sous-zones et périodes de clapages de la Lambarde

Les cumuls des masses clapées sont visibles sur la Figure 1-5 ci-dessous.

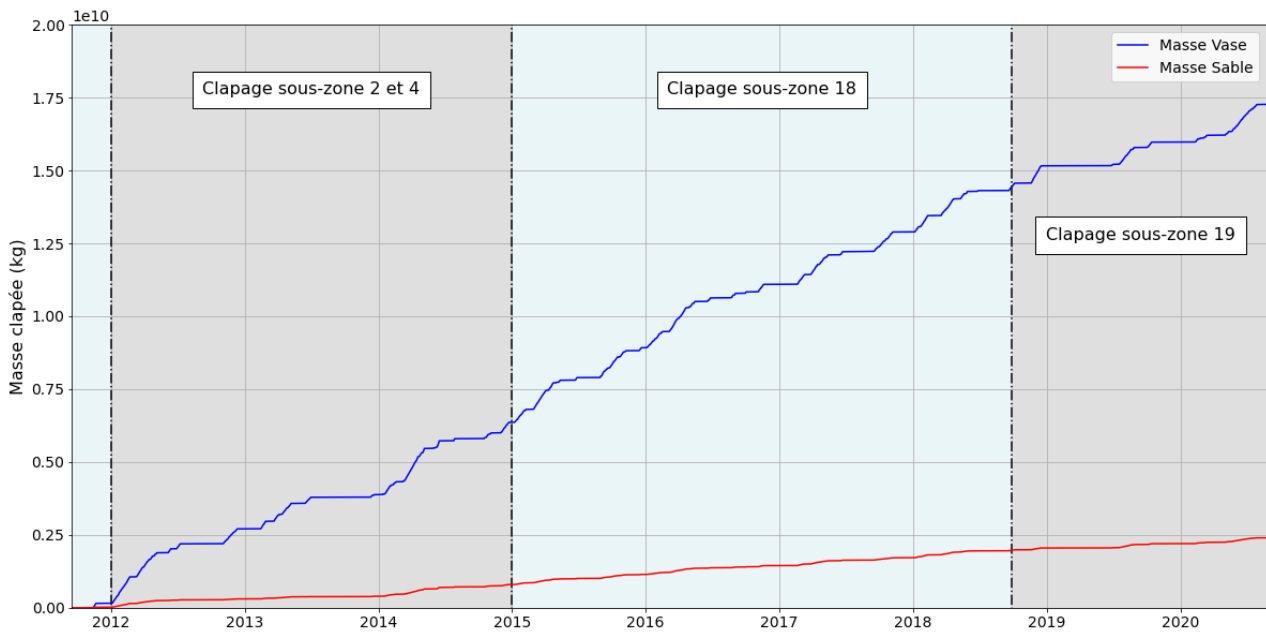


Figure 1-5 : Masses clapées (données GPMNSN)

En sortie du modèle, les cumuls des volumes clapés sont restitués avec un pas de temps de 24h.

1.4.4.3. Modélisation d'un clapage

Le principe de modélisation d'un clapage est le suivant :

- Répartition uniforme dans le temps de la masse sur 10 minutes;
- Répartition des masses en forme (champ proche) : répartition des vases et des sables dans la colonne d'eau et dans le sol suite à la convection en masse (cette phase n'étant pas résolue car pas à l'échelle temporelle et spatiale du modèle)

La représentation du champ proche dans le modèle a fait l'objet d'une amélioration suite à des études réalisées par ARTELIA sur le site d'immersion de Machu dans l'estuaire de la Seine. Un modèle de champ proche a été calé sur ce site à l'aide des résultats de deux campagnes expérimentales de 6 mois (MASED et MABIO).

D'une manière générale, un clapage peut être représenté en trois phases distinctes :

- La suspension ;
- Le panache turbide de fond ;
- Le dépôt sur le fond.

Dans le modèle actualisé, les parties suspension et panache turbide sont réunies dans la colonne d'eau au point de clapage. La descente dynamique en masse n'est pas modélisée, mais la simple descente par vitesse de chute permet d'obtenir un panache turbide de fond plus réaliste que s'il devait être imposé avec une forme géométrique pré-établie. Le panache de fond calculé après convection par vitesse de chute tient en effet compte du courant ambiant et de la géométrie des fonds.

La répartition des masses est fixée à 50% en suspension et 50% en dépôt pour la vase, 100% en dépôt pour le sable.

La partie mise en suspension est verticalement répartie uniformément sur chacun des plans horizontaux qui composent le maillage 3D.

La géométrie au sol est paramétrée directement sous forme de cratère dépendant de trois rayons (R1, R2 et R3). L'ordre de grandeur est de 75 m pour R1, 600 m pour R2 et 1000 m pour R3.

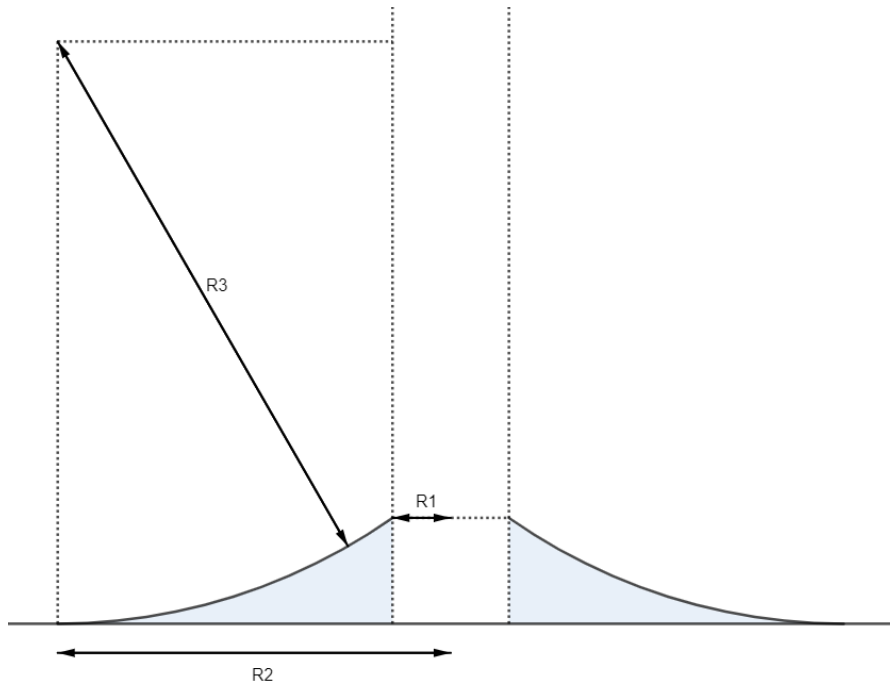


Figure 1-6 : Modélisation géométrique d'un dépôt de clapage

Les différents rayons permettent ainsi :

- Pour R1 de gérer la taille du cratère procuré par la descente en masse;
- Pour R2 de gérer la taille de l'emprise au sol du dépôt ;
- Pour R3 de gérer la répartition spatiale des masses dans la géométrie du dépôt : une valeur plus faible concentre les masses vers le centre du cratère, une valeur plus élevée étale les masses de manière plus uniforme.

Dans cette géométrie, les masses de sable et de vase sont réparties dans les couches du modèle dynamique de consolidation des dépôts (paramètres de calage).

2. CALAGE

Le modèle ainsi construit a été calé sur une dizaine d'années, entre 2011 et 2021. La date exacte du départ de la simulation est fixée par la date de la première bathymétrie de la zone de vidage utilisée à savoir le 27 septembre 2011. La date de fin est fixée au 1^{er} Octobre 2021, ce qui correspond également à la date de départ du modèle prospectif qui sera exploité par la suite.

L'évolution des fonds dans le modèle sera comparée aux différents levés bathymétriques de suivi du site réalisés par le GPMNSN. L'évolution temporelle des volumes en place sur le site d'immersion sera comparée aux volumes déduits de l'analyse de ces levés bathymétrique.

En plus de ce volume global, une comparaison de l'évolution des cotes moyennes par casier est également réalisée.

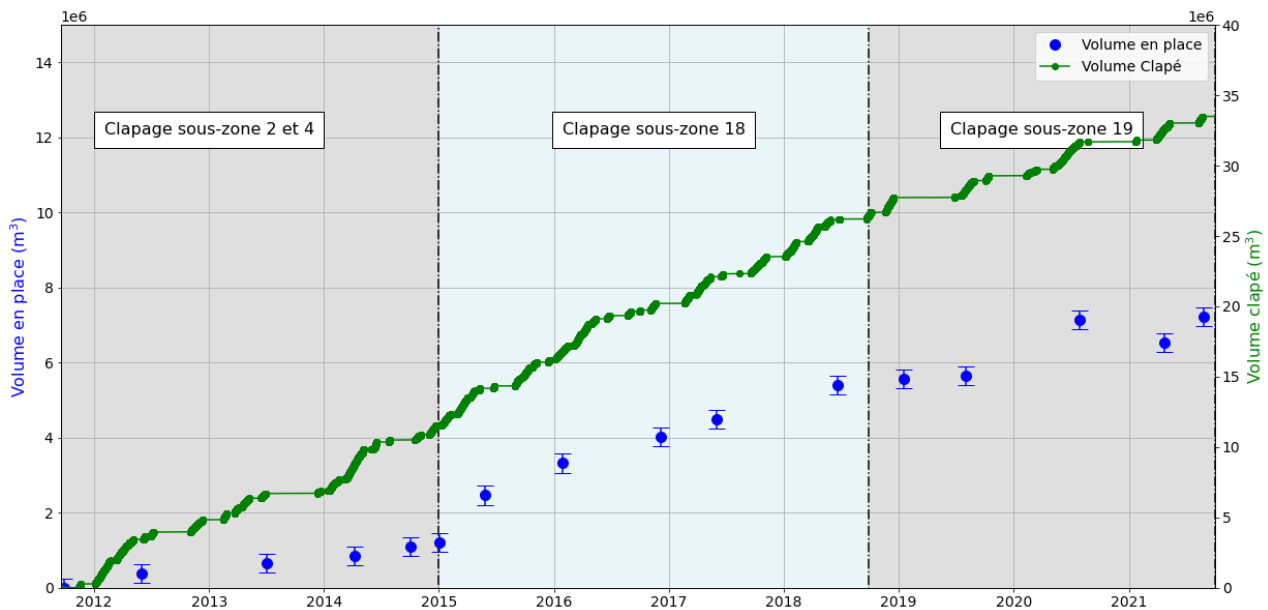


Figure 2-1 : Volume clapé et en place (issus des données de clapages et des données bathymétriques du GPMNSN)

Un taux de stabilité du modèle sera calculé à l'issue de la période complète de modélisation. Il sera comparé au taux de stabilité observé en nature déduit des données bathymétriques.

Le calage s'effectue principalement en faisant varier les paramètres suivants :

1. Forme du dépôt du champ proche – paramètres R1,R2 et R3 (c.f. 1.4.4) ;
2. Concentrations des couches de clapage pour la partie dépôt au sol ;
3. L'angle limite de glissement sur la zone ;
4. Le pourcentage en suspension de la vase dans le champ proche.

L'angle de glissement limite a été dans un premier temps estimé à partir des données bathymétriques disponibles sur le site.

Le paramétrage retenu est :

- Pourcentage de vase en suspension : 55%
- R1 au sol : 75 m, R2 au sol : 600 m , R3 au sol : 1000 m
- Concentration des couches dans lequel le sédiment au sol est réparti : 160 g/L, 180 g/L, 200 g/L, 225 g/L

- Angle limite de glissement sur la zone : 0.75° - 1.3%

À la suite d'une simulation, il est possible d'accéder à la visualisation des fonds au cours du temps. À titre d'exemple, il est présenté dans les figures ci-dessous la bathymétrie obtenue à la fin de chaque sous-période de clapage (changement de casier de clapage).

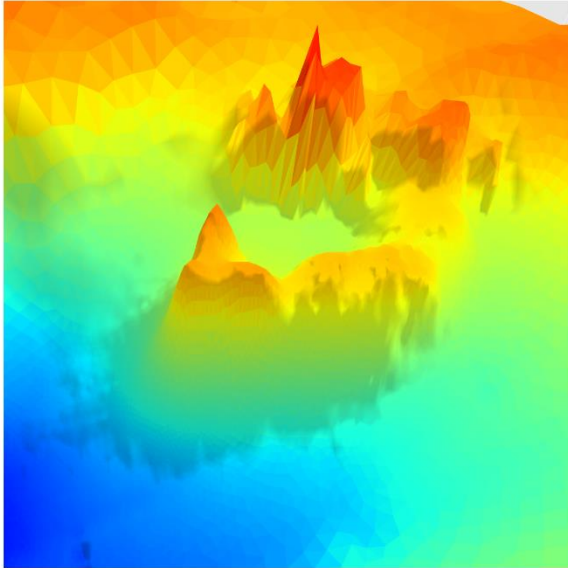


Figure 2-2 : Fonds du modèle au début de la simulation

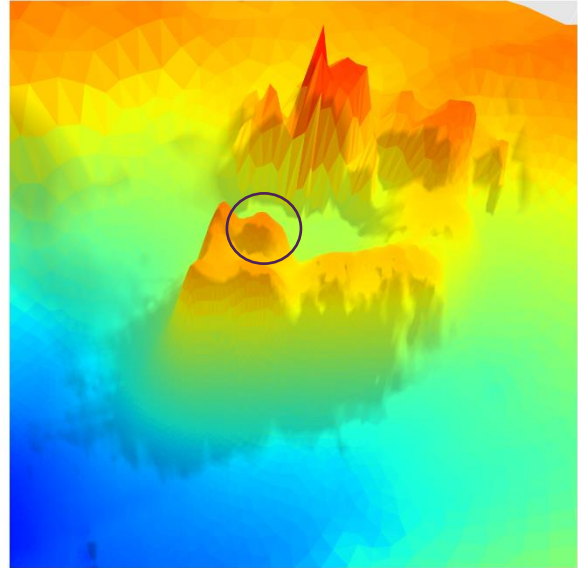


Figure 2-3 : Fonds du modèle après la phase de clapage dans la sous-zone 4 (la zone qui a évolué est entourée)

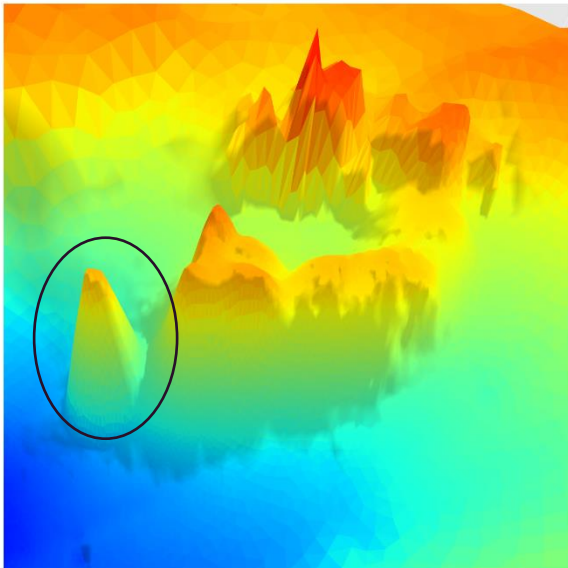


Figure 2-4 : Fonds du modèle après la phase de clapage dans la sous-zone 18 (la zone qui a évolué est entourée)

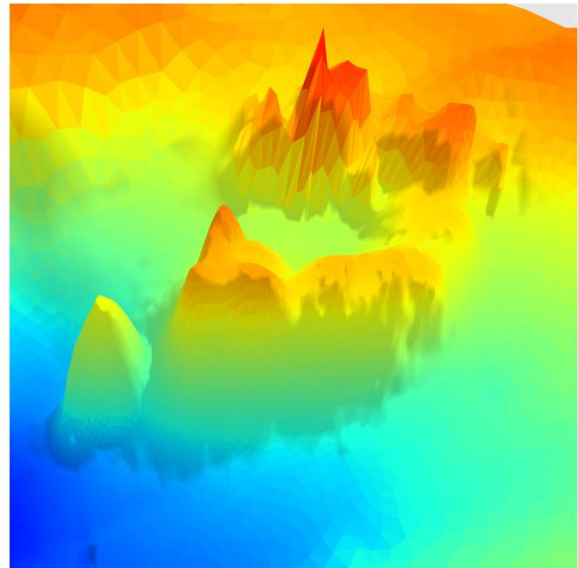


Figure 2-5 : Fonds du modèle à la fin de la simulation

À partir de ces résultats, il est alors possible d'étudier différentes variables à l'échelle du site, tel que le volume en place ou la cote moyenne de chaque sous-zone.

2.1. VOLUME EN PLACE

2.1.1. Objectifs

Cette première phase de calage permet de vérifier que le modèle répond aux problématiques suivantes :

- Bonne reproduction de la dynamique globale (érosion, consolidation, glissement) ;
- Taux de stabilité correct (volume en place/ Volume clapé à la densité 1,4).

Le calage en volume est jugé comme le critère le plus important pour la présente étude, puisqu'il permet de s'assurer que les volumes restant en place modélisés sont cohérents en fonction de la quantité clapée et de la zone de clapage. Ceci permettra par la suite d'élaborer des stratégies de clapage pendant la phase d'exploitation, permettant d'estimer une nouvelle stabilité du site.

Une comparaison des évolutions temporelles du volume et des taux de stabilité est donc réalisée. Les volumes modélisés sont calculés à partir des cubatures des fonds du modèle, tandis que les volumes réels sont déterminés à partir des différents levés bathymétriques.

2.1.2. Données de calage

Le calage, tant en termes de volume que de cotes moyennes, s'effectue sur la base des différents levés bathymétriques fournis sur la zone. Le travail d'analyse des volumes en place (incluant des possibles ajustement des repères altimétriques des levés) a d'ores et déjà été réalisé dans le cadre de l'étude de 2021 d'actualisation pour l'autorisation des dragages.(rapport Artelia : Renouvellement de l'autorisation dragages – immersions du GPMNSN- étude hydro-sédimentologique- suivi hydro-sédimentaire de la Lambarde [2])

Dans le cadre de cette nouvelle étude, les levés bathymétriques à notre disposition sont synthétisés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 – Levés-bathymétriques²

Numéro du levé	Année	Dates de levés
09_231	2009	Février
10_188	2010	Avril
11_441	2011	Septembre
12_256 et 12_525	2012	Mai et Octobre
13_256	2013	Mai
14_151 et 14_503	2014	Mars et Septembre
15_232	2015	Avril
16_044 et 16_628	2016	Janvier et Novembre
18_342	2018	Juin
19_011 et 19_394	2019	Janvier et Juillet
20_289	2020	Juillet
21_106 et 21_397	2021	Avril et Août
22_039 et 22_454	2022	Janvier et Août

² Des levés complémentaires en 2015 et 2017 avaient été transmis par le port pour une précédente étude mais n'ont pas été transmis pour le présent modèle. Des comparaisons des évolutions pour ces dates sont présentées dans les graphes ci-après pour information car sans que les données du port soient validées.

Les ajustements apportés aux levés bathymétriques dans le cadre de l'étude de 2021 sont conservés. En complément, un ajustement a été apporté au levé de Juin 2018. En effet, le différentiel de bathymétrie entre Juin 2018 et Novembre 2016 mettait en évidence une plage d'érosion importante sur la quasi-totalité du secteur sondé, jugée non représentative de l'évolution du site en lien avec les immersions. Une rehausse de la bathymétrie de 2018 de 10 cm a donc été prise en compte. Les différentiels bathymétriques avant et après cette correction sont visibles sur la Figure 2-6.

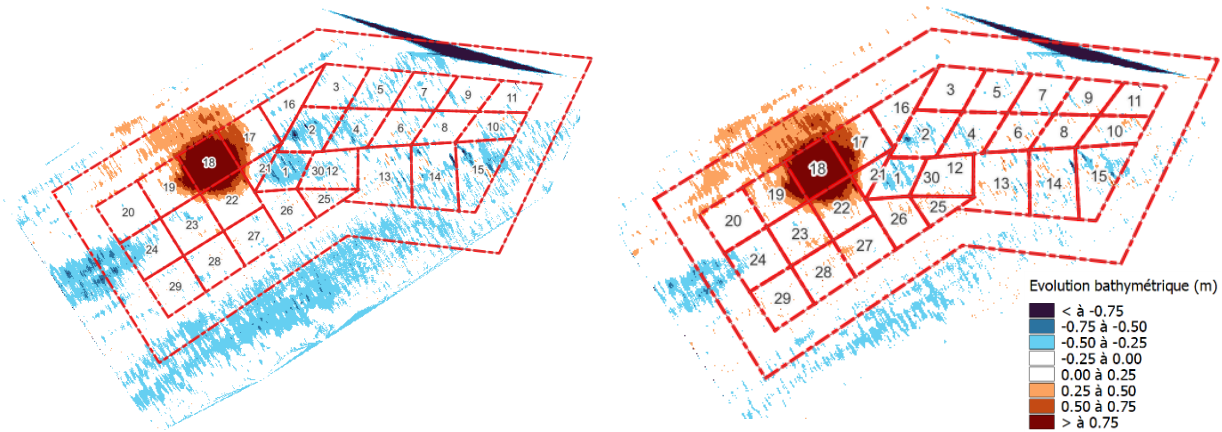


Figure 2-6 : Évolution bathymétriques entre les levés de Novembre 2016 et Juin 2018, avant correction (gauche) et après correction (droite)

Un ajustement a également été réalisé sur le levé d'août 2021 (abaissement de 10 cm).

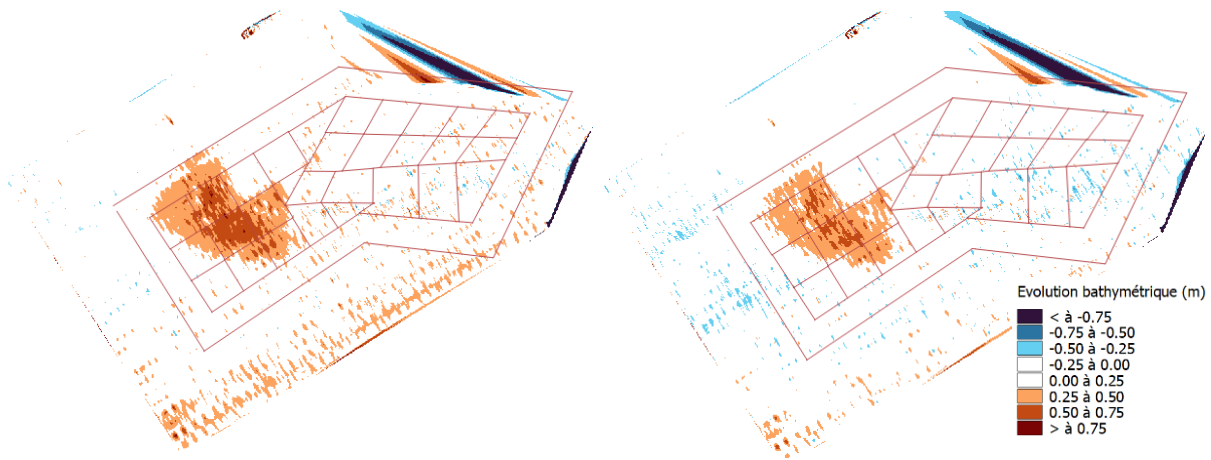


Figure 2-7 : Évolution bathymétriques entre les levés de Avril 2021 et Août 2021, avant correction (gauche) et après correction (droite)

Finalement les ajustements bathymétriques suivants sont apportés :

Tableau 2 – Levés-bathymétriques et ajustement de la cote de référence

Numéro du levé	Année	Dates de levés	Ajustement bathymétrique
09_231	2009	Février	
10_188	2010	Avril	
11_441	2011	Septembre	- 0.1 m
12_256	2012	Mai	- 0.1 m
12_525	2012	Octobre	
13_256	2013	Mai	- 0.2 m
14_151	2014	Mars	

14_503	2014	Septembre	- 0.3 m
15_232	2015	Avril	
16_044	2016	Janvier	
16_628	2016	Novembre	
18_342	2018	Juin	- 0.1 m
19_011	2019	Janvier	
19_394	2019	Juillet	+ 0.2 m
20_289	2020	Juillet	
21_106	2021	Avril	
21_397	2021	Août	- 0.1 m
22_039	2022	Janvier	
22_454	2022	Août	

2.1.3. Résultats du calage

Les évolutions temporelles des volumes modélisés et réels en place sur l'ensemble de la zone d'immersion pour l'ensemble de la période simulée sont visibles sur la Figure 2-8 ci-dessous.

Qualitativement, il est retrouvé un comportement très cohérent avec ce qui est mesuré :

- Sur la première période sept 2011-décembre 2014, les clapages ont lieu sur les sous-zones 2 et 4. Ces casiers sont déjà remplis dès 2011 à une cote moyenne supérieure à -15m CM. Les érosions dues aux courants et aux houles sont donc significatives et la stabilité reste faible : le volume en place évolue peu sur le site en comparaison des volumes clapés.
- Sur la période décembre 2014-fin 2018 : une nouvelle sous-zone (18) est utilisée avec une cote moyenne de départ d'environ -22,5 m CM. Le taux de stabilité est alors fortement amélioré au départ, puis diminue jusqu'en 2019.
- Il est à noter la présence d'un point qui paraît anormalement haut entre Juillet 2019 et Juillet 2020. Le volume clapé sur cette période est de 3 427 000 m³, et le volume restant en place in situ selon les levés bathymétriques est estimé à 1 464 000 m³. Ceci représente une stabilité sur cette période de 42%, largement supérieure aux stabilités observées sur les phases précédentes. Cette stabilité est d'autant plus surprenante qu'il ne s'agit pas du tout début de phase de clapage sur un nouveau casier (période où la stabilité d'un casier est au plus haut).

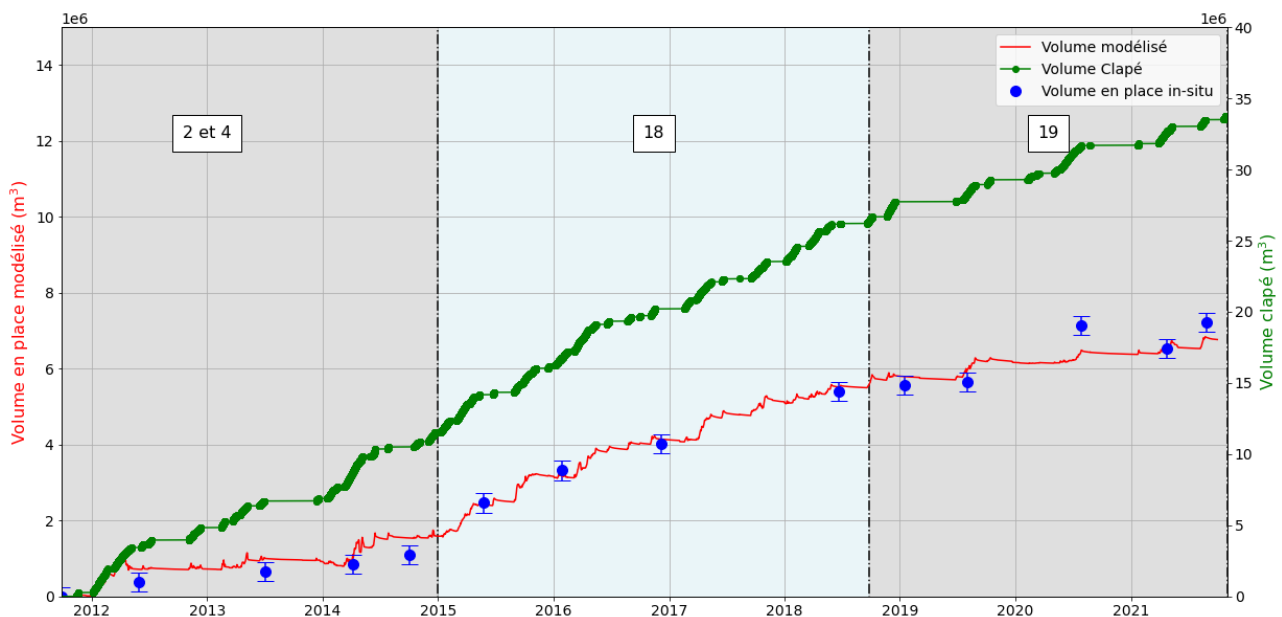


Figure 2-8 : Comparaison des volumes cumulés modélisés aux volumes cumulés réels du GPMNSN

L'évolution des volumes dans le modèle est bien représentée. Le volume final sur l'ensemble de la zone est assez proche de celui évalué à partir des données bathymétriques à l'incertitude près des levés (+ ou -10 cm), ce qui permet de s'assurer que la stabilité globale du site est relativement bien modélisée. Le Tableau 3 ci-dessous présente les taux de stabilité in-situ et modélisés. Il est à noter que les périodes dates utilisées pour le calcul de la stabilité correspondent aux dates des différents levés bathymétriques disponibles. Elles ne coïncident donc pas toujours avec la date exacte de changement de sous-casier.

Tableau 3 : Taux de stabilité par sous-période de clapage

Taux de stabilité du site sur Septembre 2011-Août 2021	Taux de stabilité du site – Clapage sous-zones 2 et 4 (Septembre 2011-Octobre 2014 5)	Taux de stabilité du site – Clapage sous-zone 18 (Octobre 2014 -Juin 2018)	Taux de stabilité du site – Clapage sous-zone 19 (Juin 2018-Août 2021)
---	--	--	--

Mesuré	21,5 %	10,4 %	27,6 %	24.7 %
Modélisé	20,4 %	14,7 %	25,4 %	17.8 %

Le calage du modèle de stabilité est donc satisfaisant sur l'ensemble de la période simulée et les sous-périodes temporelles (les sous-périodes utilisées dépendent des dates des levés, pour pouvoir réaliser directement une comparaison avec les mesures in situ).

2.2. VÉRIFICATION DES COTES MOYENNES PAR SOUS-ZONE

2.2.1. Objectifs

Les cotes moyennes par casier sont calculées en divisant le volume issu des cubatures par sous-zone par la surface de chaque sous-zone. Les évolutions temporelles de ces cotes sont comparées aux cotes moyennes calculées à partir des levés bathymétriques. Cette deuxième comparaison permet notamment de vérifier la bonne représentation de l'étalement des dépôts dans le modèle en vérifiant le comportement des zones sur lesquelles il n'y a plus de clapage.

2.2.2. Résultats

Les courbes d'évolution temporelle des cotes moyennes par sous-zone sont visibles sur la figure ci-dessous.

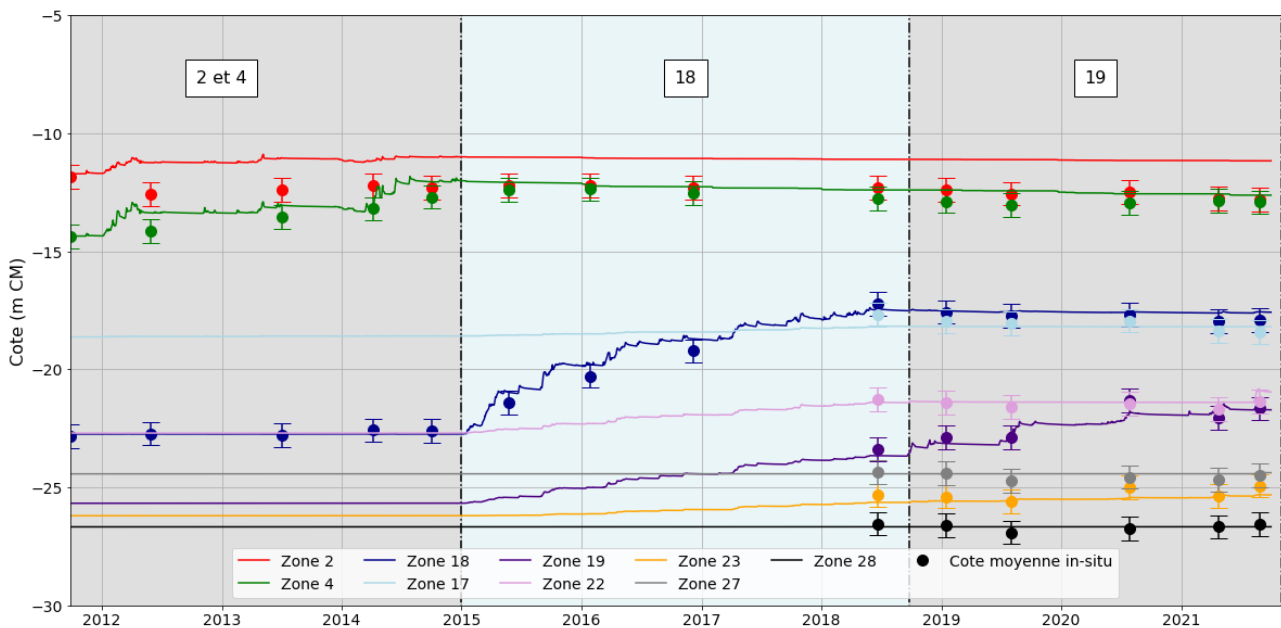


Figure 2-9 : Comparaison des cotes moyennes entre modèle et in situ

L'analyse de ces évolutions permet de mettre en évidence les points suivants :

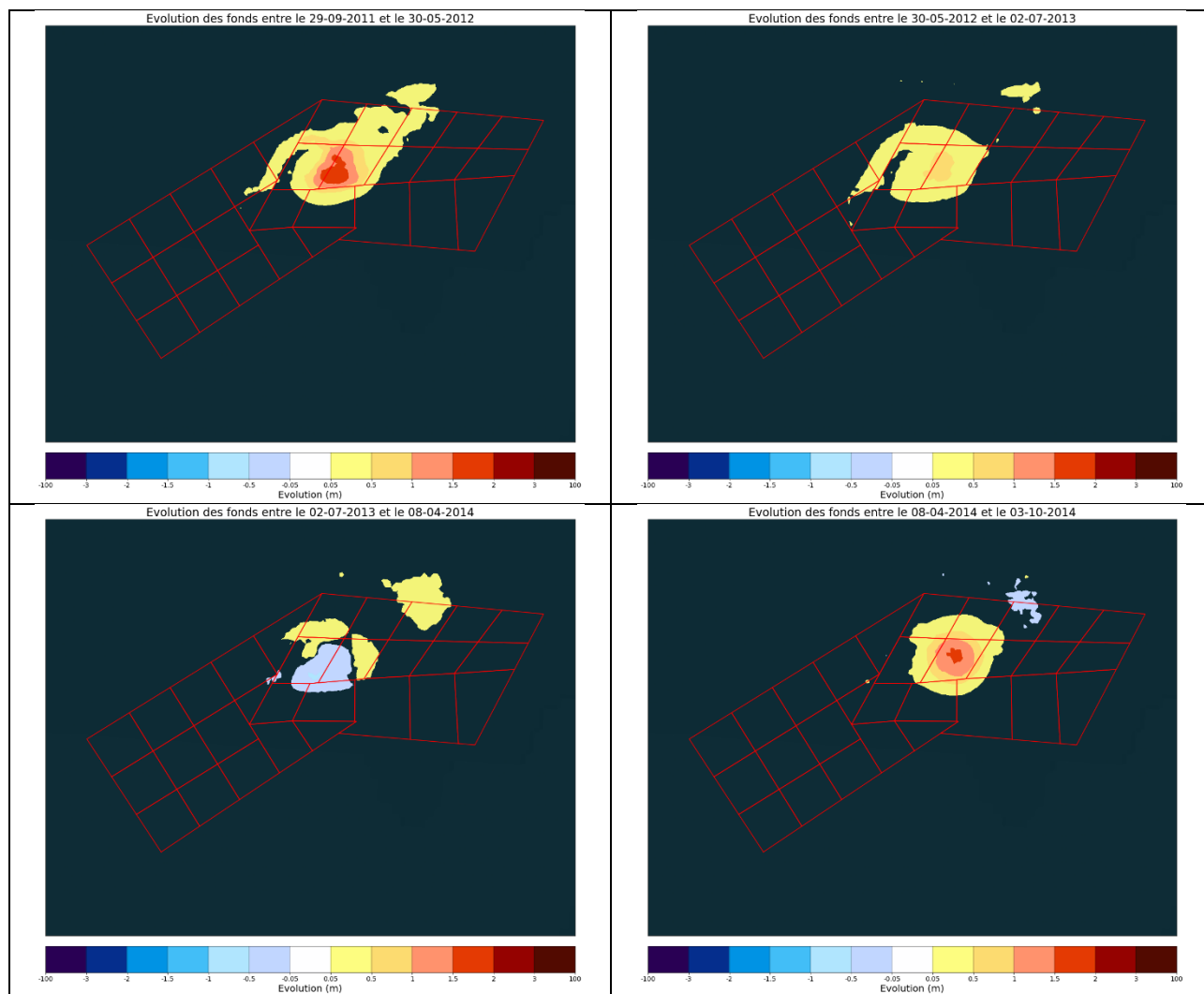
- Les processus d'érosion et de consolidation affectant les zones où les clapages ne se font plus (décroissance des courbes en sous-zone 4 après 2015 et en sous-zone 18 en 2019) sont bien respectés ;
- Sur les sous-zones où les clapages ont lieu, le modèle est assez réactif en termes de cote, avec une augmentation légèrement plus forte qu'attendue lors du passage à une nouvelle sous-zone (exemple de la sous-zone 18), mais converge rapidement vers les valeurs de cotes attendues ;
- Sur les zones avoisinant la zone de clapage, les évolutions par débordement ou glissement sont bien représentées (sous-zones 19, 22 et 23 qui avoisinent la sous-zone 18);

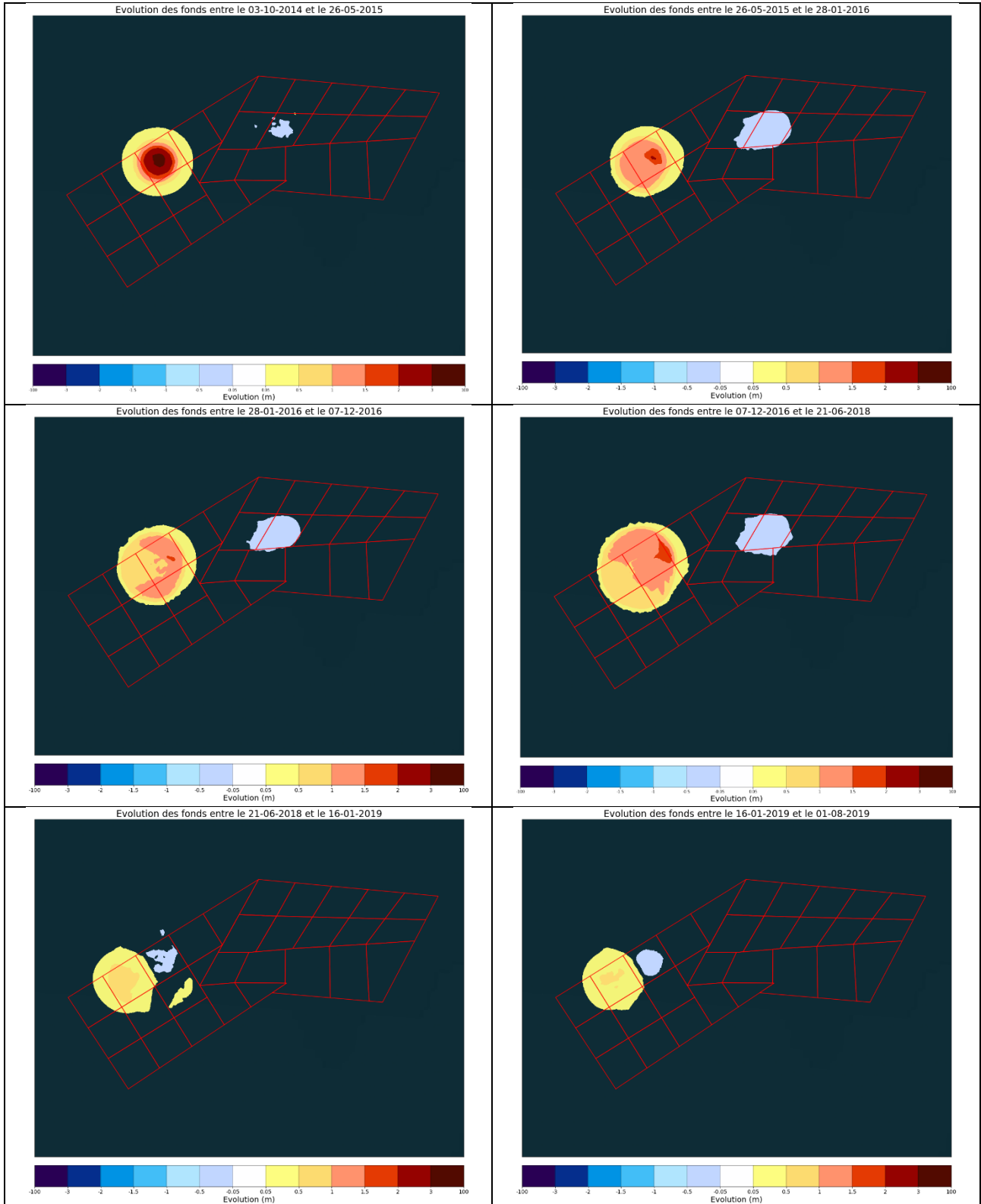
- La réponse des zones plus profondes est différenciée de celle des zones plus élevées, comme il a été démontré sur le calage en stabilité (sous-zone 4 évolue bien moins vite entre 2012 et 2015 que la sous-zone 18 entre 2015 et 2018).

Le modèle représente donc fidèlement les évolutions des cotes moyennes des sous-zones.

2.3. CARTES D'ÉVOLUTIONS

En complément des calculs de stabilités et des comparaisons en termes de cotes moyennes, des cartes d'évolutions des fonds dans le modèle entre les différentes dates de mesures in-situ des bathymétries sont réalisées. Elles sont présentées ci-dessous.





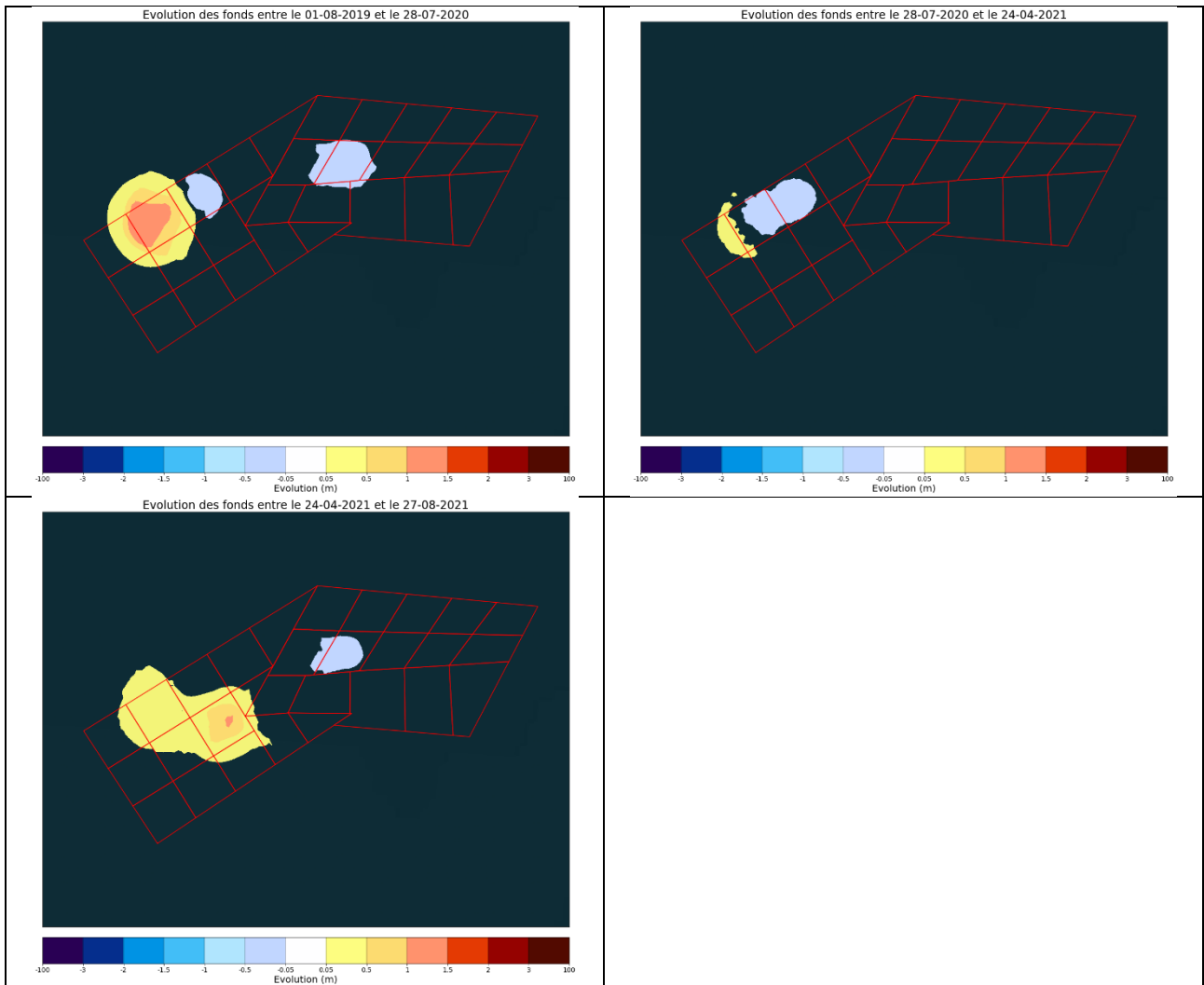


Figure 2-10 : Évolution du fond sur les périodes inter-dates des relevés bathymétriques du GPMNSN de septembre 2011 à août 2021

RÉFÉRENCES

- [1] *Modèle 3D hydrosédimentaire et de qualité des eaux de la Loire - construction, calage et validation du modèle global 3D hydrosédimentaire et d'oxygène dissous- ARTELIA-8716307-Tranche ferme phase 1-2022.*
- [2] *Renouvellement de l'autorisation dragages – immersions du GPMNSN- étude hydro-sédimentologique- R2 - annexe 4 : suivi hydro-sédimentaire de la Lambarde -ARTELIA 8716311*

ANNEXES



