

# Révision du plan de prévention du risque de submersion marine (PPRSM) de Saint-Malo

Jérémie MARMUSE et Hugo CORTIAL (DHI)

Version provisoire



# 01.

## Déroulé de la mission et planning



# Déroulé de la mission depuis son lancement

- Notification le 02/01/24 et lancement de la mission au COPIL du **14 mars 2024**
- Bâti et projets d'urbanisme : **1 mois d'échanges**
  - ☐ Envoi des données du **26/04 au 07/05** par la Ville (Direction aménagement/urbanisme)
  - ☐ Analyse de **74** projets par DHI => proposition méthodologie à la DDTM et retours à la Ville avec questions le 14/05/2024
  - ☐ Présentation méthodologie à la Ville le 22/05 => validation et envoi par DHI de éléments avec demande de vérification. Retour Ville le **31/05**.
- Réseaux EP pour le ressuyage : **échanges depuis 19/03 => en cours**
  - ☐ Envoi des données SIG le **03/05** par Saint-Malo Agglomération.
  - ☐ Ouvrages et gestion : questions DHI le 03/05 sur les modifications éventuelles depuis dernier PPR => retour SMA le 13/06
  - ☐ Réunion le 07/08 DHI/SMA avec propositions DHI et discussions toujours **en cours**

# Déroulé de la mission depuis son lancement

- Aménagements portuaires : **échanges depuis le 20/03 => en cours**
  - ☐ Envoi des données topographiques actuelles le **20/03**
  - ☐ Réunion avec Région le 04/06
  - ☐ Envoi du projet d'aménagement du terre-plein du Naye à considerer le 13/06
  - ☐ Discussions **en cours**
- Données tempêtes : encore en cours de recuperation.



# Planning initial théorique

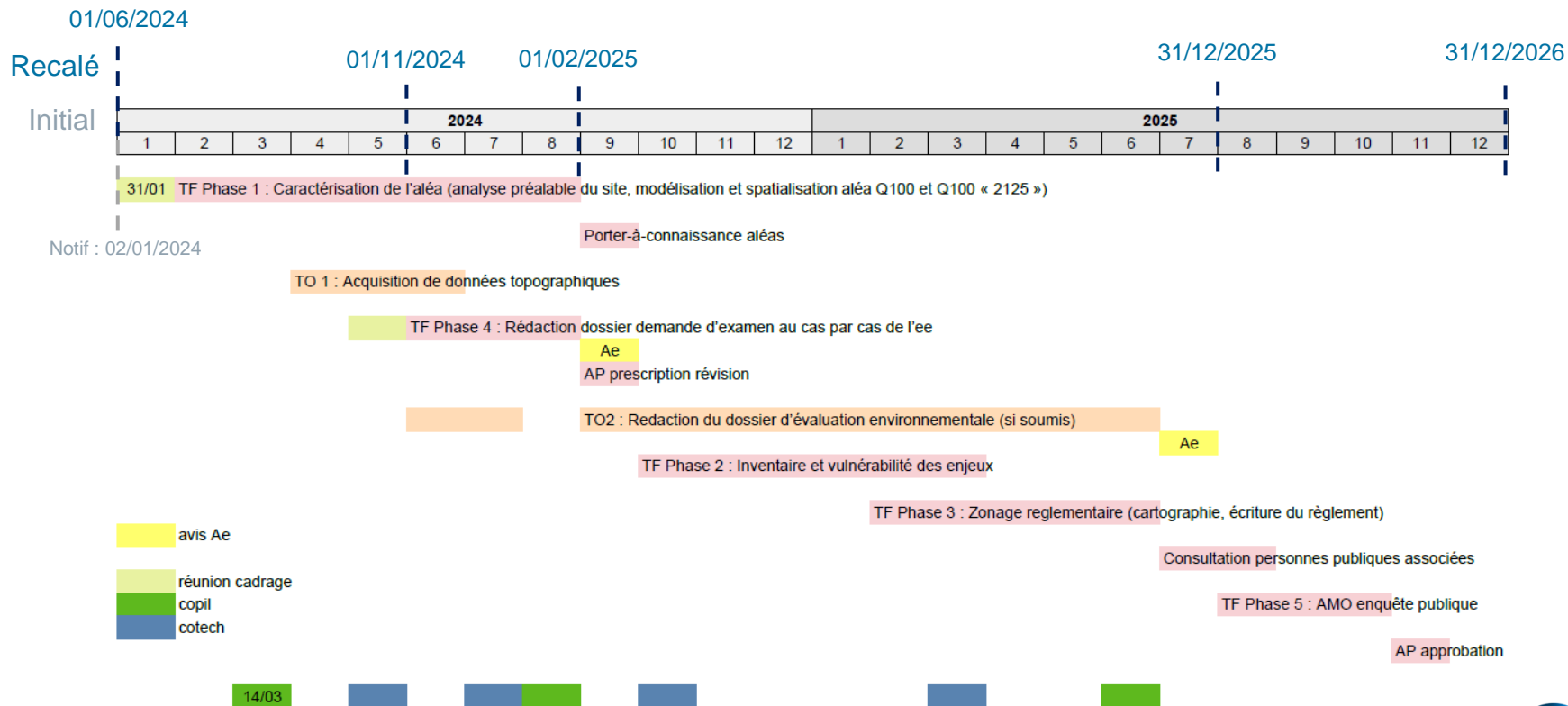
- **Tranche Ferme => 15 mois, dont :**
  - Phase 1 : caractérisation des aléas
  - Phase 2 : Inventaire et vulnérabilité des enjeux
  - Phase 3 : Cartographie du zonage réglementaire
  - Phase 4 : Rédaction du dossier de demande d'examen au cas par cas de l'évaluation environnementale
  - Phase 5 : Assistance à maîtrise d'ouvrage pour l'enquête publique
- **Tranche Optionnelle 1 => 3 mois :** réalisation de levés topographiques complémentaires aux données existantes (LiDAR de 2018)
- **Tranche Optionnelle 2=> 15 mois concomitant TF :** rédaction du dossier d'évaluation environnementale (si soumis)

# Planning à recalculer

- Décalage de la caractérisation des aléas, ie de la Tranche ferme => au moins 5 mois de retard dans la fourniture de données
- Démarrage du PAPI en parallèle (notification le 06/06/24) => phase 1 termine fin Janvier 2025 (construction modèles et simulation des scénarios état actuel)
- Cohérence de faire avancer PPRL/PAPI ensemble pour la construction des modèles

**=> proposition : fin des discussions sur les hypotheses aménagements portuaires en septembre et sur les reseaux à la Toussaint => fin de la caractérisation des aléas PPRL fin janvier 2025**

# Nouveau planning proposé



# 02.

## Conditions marines



# 02.1

## Conditions marines : mesures



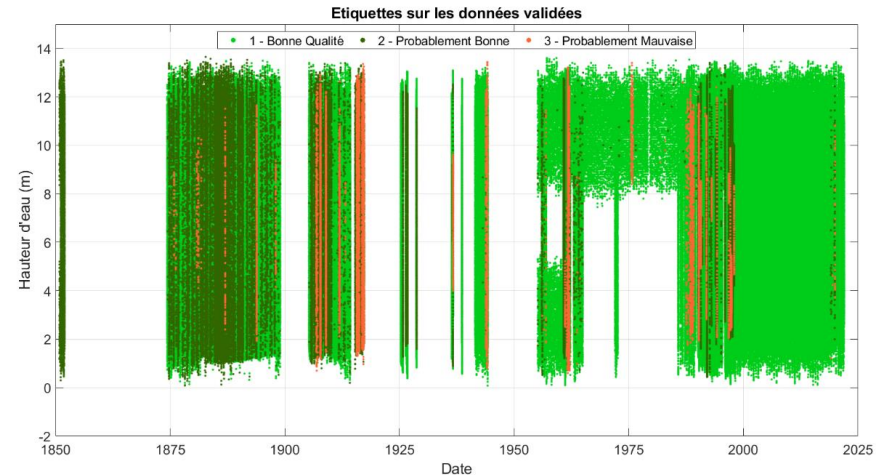
# Niveaux d'eau

- Niveaux mesurés : Deux marégraphes, port et Saint-Servan



- ❑ Mesures au port depuis avril 1986 mais continues ou presque depuis mai 1998
- ❑ Mesures à Saint-Servan de 1850 aux années 1980

=> travail de reconstitution d'une série temporelle de 1850 à 1922 par le SHOM : plus de 80% de données de bonne qualité



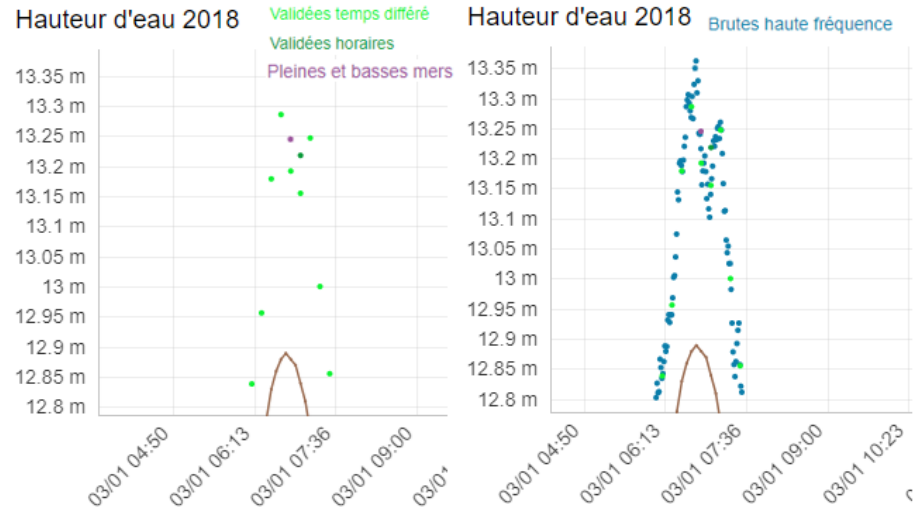
# Niveaux d'eau

- Niveaux mesurés : Marégraphe RONIM du port

Différentes données fournies par le SHOM, issues des mêmes mesures brutes :

- ❑ 2 types de données validées disponibles : horaires et « temps différé » au pas de 5 à 15 min
- ❑ Une autre mesure validée : celle de « pleine mer »

=> La valeur temps différé se rapproche du pic réel de niveau d'eau au cours d'une pleine mer. La valeur « pleine mer » représente la valeur moyenne des données brutes déterminée du pic de PM prédit



# Niveaux d'eau

- Niveaux mesurés : Marégraphe RONIM du port

10 plus hauts niveaux mesurés, données validées temps différé :

- ❑ Plus fort niveau atteint le 10 mars 2008 (Johanna) : 7,34 m IGN69 (13,63 m CM) avec surcote de près de 80 cm
- ❑ Mais globalement, ces niveaux sont minoritairement associés à des fortes surcotes
- ❑ Plus forte surcote mesurée le 30/10/2000 : 1,05 m
- ❑ Marées extrêmes plus nombreuses en mars puis septembre et octobre

Tableau 3.2 Niveaux d'eau validés les plus hauts mesurés au marégraphe du port de Saint-Malo depuis 1986, donnée validées temps différé (donnée validée « Pleines mer ») (SHOM).

Date et heure (UTC)	Tempête	Niveau (m CM)	Niveau (m IGN69)	Surcote (m)
10 mars 2008 7h50	Johanna	13,63 (13,51)	7,34	0,79
12 mars 2024 7h30		13,58	7,29	0,12
3 mars 2014 7h30	Christine	13,60 (13,59)	7,31	0,31
2 mars 2014 19h00 et 6h50	Christine	13,51 (13,51)	7,22	0,51 et 0,29
21 février 2015 7h50	-	13,50 (13,46)	7,21	0,02
30 septembre 2019 19h20	-	13,50 (13,49)	7,21	0,01
02 mars 2010 7h10	Xynthia	13,48 (13,48)	7,19	0,10
10 septembre 2010 19h40	-	13,47 (13,44)	7,18	0,06
11 mars 2020 7h20	-	13,46 (13,48)	7,17	0,05
08 octobre 2006 19h	-	13,46 (13,45)	7,17	0,09



# Vagues

- Caractéristiques mesurées : bouées du reseau CANDHIS

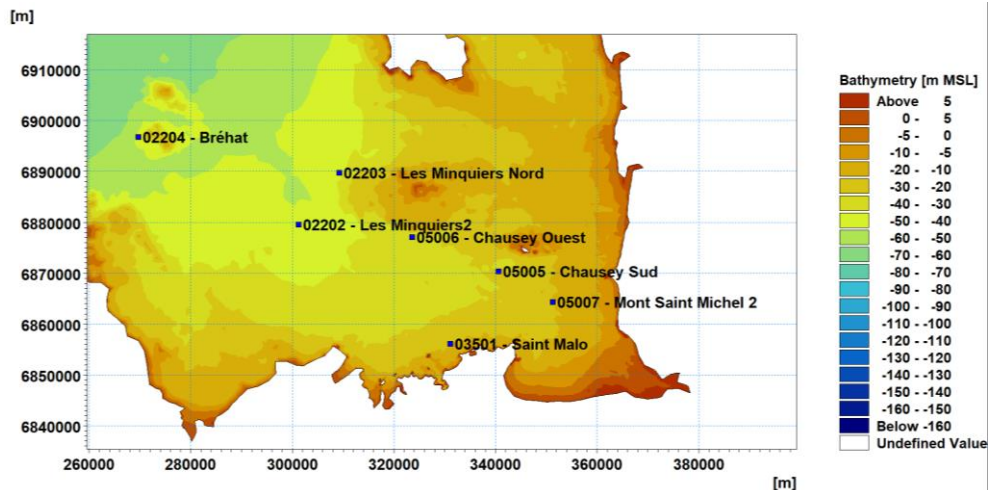


Tableau 3.1 Caractéristiques des campagnes CANDHIS exploitées pour la présente étude.

Code campagne	Nom campagne	Latitude [deg]	Longitude [deg]	Prof. [m]	Période de mesures	Direction
02202	Les Minquiers 2	-2.443	48.892	38	20/08/1997 – 16/05/2009	Oui
02203	Les Minquiers Nord	-2.343	48.988	35	30/03/2011 – 24/10/2013	Oui
02204	Bréhat	-2.889	49.026	50	21/06/2016 – 04/02/2021	Oui
02206	Basse des Sauvages	-2.242	48.768	25	02/12/2018 – 29/04/2019	Oui
03501	Saint-Malo	-2.017	48.700	16	09/08/1993 – 23/09/1995	Non
03502	Basse Trouvée	-2.083	48.813	25	15/11/2018 – 29/04/2019	Oui
05007	Mont Saint Michel 2	-1.750	48.785	15	06/02/2003 – 17/04/2003	Non

CANDHIS				Hs des vagues			
	Depth (m)	Count (h)	Mean (m)	RMS (m)	Q99 (m)	Max (m)	Max date
02204	50	18305	1,54	1,80	4,72	7,36	2018-01-03
02203	35	12164	1,01	1,14	2,65	4,03	2012-04-18
02202	38	10916	1,19	1,39	3,48	5,98	2002-10-27
03501	-	3185	0,95	1,11	3,23	3,84	1994-04-09

Tableau 5 : Statistiques descriptives aux bouées houlographiques proches de Saint-Malo

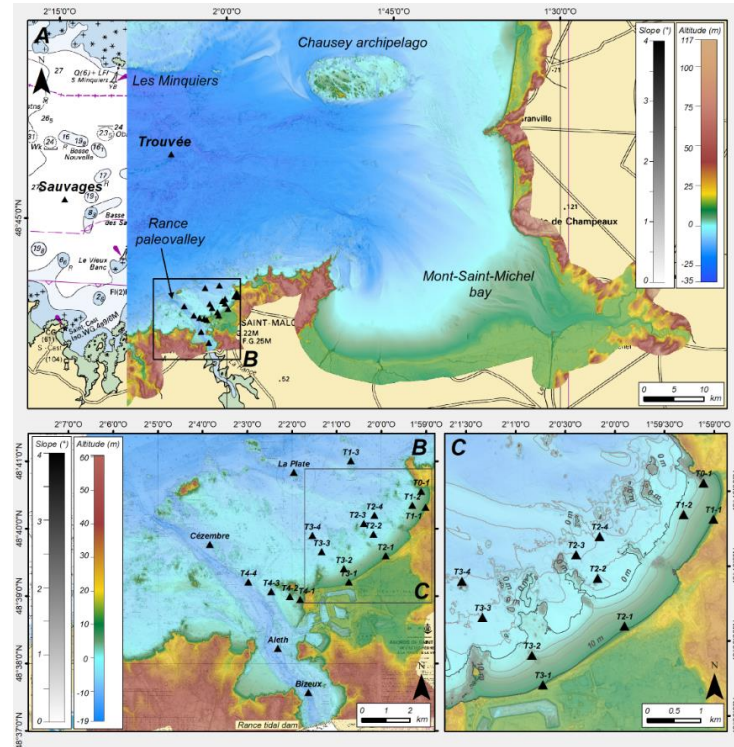
# Vagues

- Caractéristiques mesurées : Campagne du 13/11/2018 au 01/05/2019 dans le cadre du PAPI

Campagne océanographique :

- ❑ 22 mouillages et 37 instruments
- ❑ Mesures de courant
- ❑ Données de vagues (2 bouées houlographiques)
- ❑ Données de hauteurs d'eau (2 marégraphes)

=>données téléchargeables



# 02.2

## Conditions marines : modélisations régionales

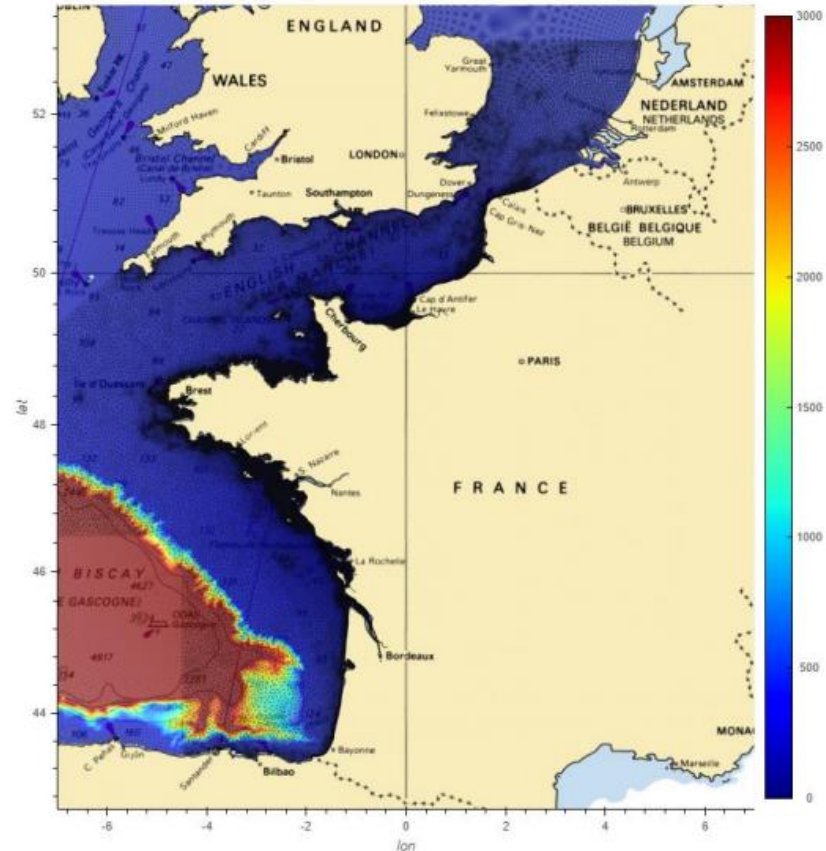


# Modélisations du SHOM (PAPI)

- Modélisations regionales : présentation

Rejeu HYWAT de 44 ans de **1979 à 2022** des surcotes et des vagues sur la façade Atlantique :

- ❑ Modèle HR vagues WavewatchIII® :
  - Maillage non structuré : 10 km au large à 400-500 m à la côte (250 m dans la baie de Saint-Malo)
  - Bathymétrie de 100 m de résolution (HOMONIM)
  - Vagues aux frontières d'un rejeu global avec résolution de 50 km environ
  - En tout point : hauteur d'eau et courant du modèle HYCOM (12 min) et vent/pression atmosphérique ERA5 (30 km de résolution, 1h)
- ❑ Modèle HR niveaux/courants HYCOM :
  - Maillage curviligne : moins de 1 km à la côte (600 m dans la baie de Saint-Malo)
  - Bathymétrie de 500/100 m de résolution (HOMONIM)
  - En tout point : vent/pression atmosphérique ERA5 (30 km de résolution, 1h)



# Modélisations du SHOM (PAPI)

- Modélisations regionales : validation niveaux

## Reproduction marée sur 1979-2020

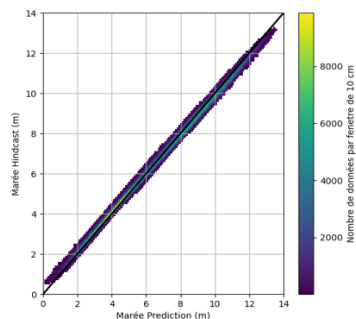


Figure 30 : Diagramme de dispersion de la marée simulé par le rejeu climatologique en fonction de la marée prédite au marégraphe de Saint-Malo.

	BIAS	MAE	RMSE	SI	R2
Marée instantanée	-2 cm	13 cm	16 cm	2 %	99
Marée de pleine mer	-12 cm	13 cm	16 cm	1 %	99

Tableau 9 : Validation statistique de la marée simulé par le rejeu climatologique au marégraphe de Saint-Malo.

## Reproduction marée sur 1979-2020

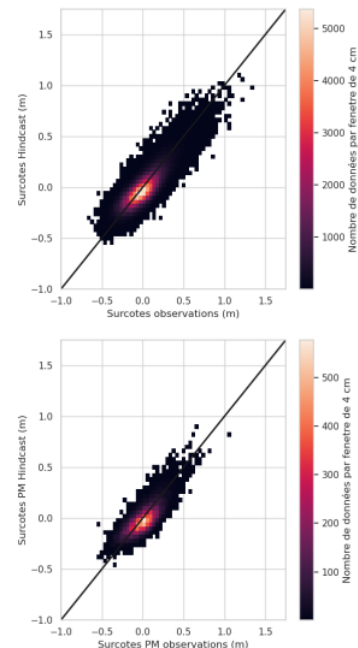


Figure 32 : Diagramme de dispersion de la surcote instantanée et de pleine mer simulé par le rejeu climatologique en fonction des surcotes observées au marégraphe de Saint-Malo.

	BIAS	MAE	RMSE	SI	R <sup>2</sup>
Surcote instantanée	-2 cm	8 cm	10 cm	60 %	64 %
Surcote de pleine mer	-2 cm	8 cm	11 cm	71 %	50 %

Tableau 10 : Validation statistique des surcotes simulées par le rejeu climatologique au marégraphe de Saint-Malo.

# Modélisations du SHOM (PAPI)

- Modélisations regionales : validation vagues

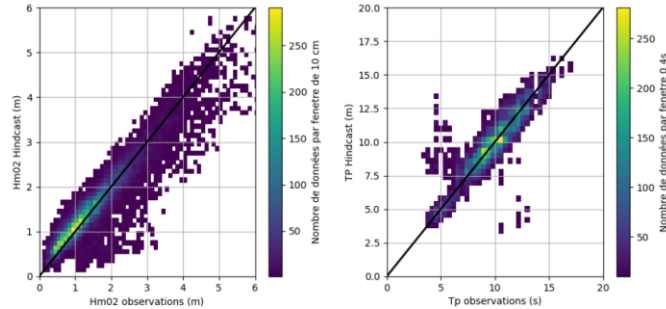
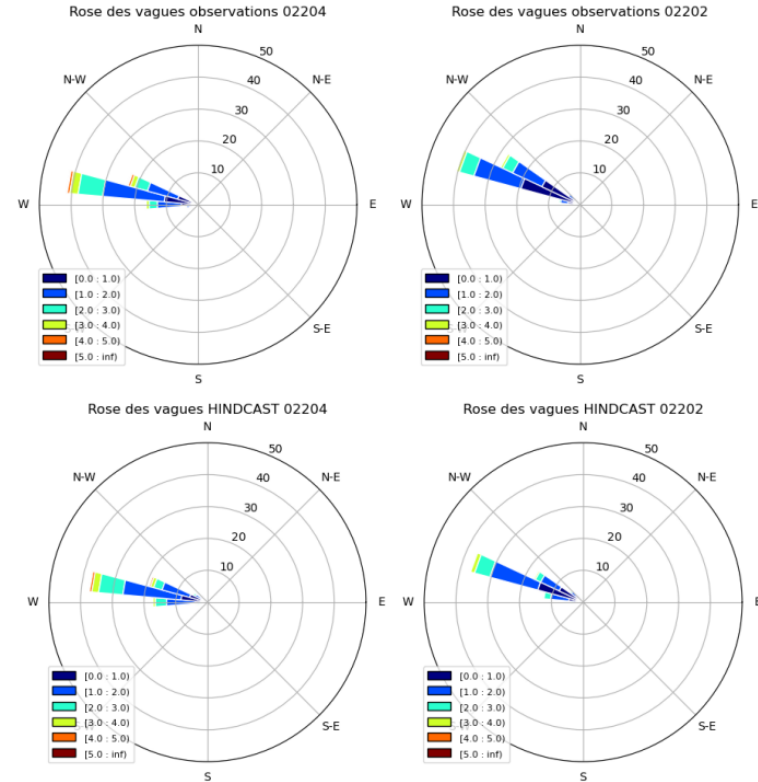


Figure 37 : Diagramme de dispersion de la Hs des vagues et de la période pic des vagues à la bouée houlographique 02202.

Hs	BIAS	MAE	RMSE	SI	R <sup>2</sup>
02202	10 cm	16 cm	21 cm	14 %	93 %
02203	21 cm	22 cm	27 cm	15 %	92 %
02204	2 cm	22 cm	33 cm	18 %	87 %
03501	3 cm	15 cm	22 cm	19 %	87 %

Tableau 12 : Score statistique de la Hs simulée par le jeu climatologique.



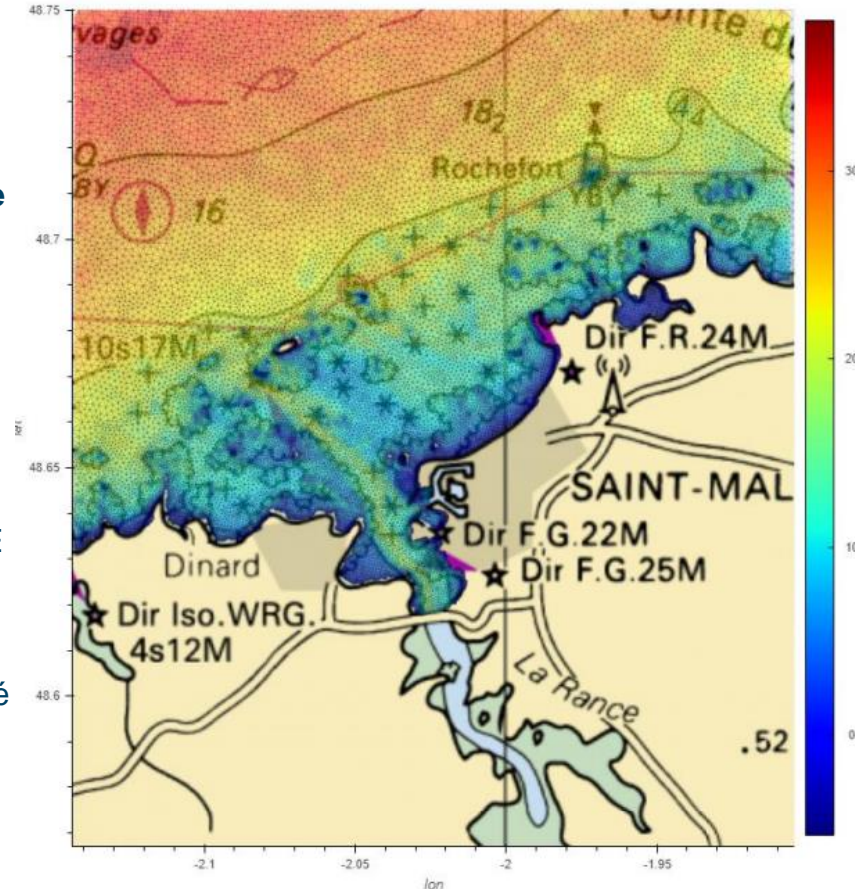


# Modélisations du SHOM (PAPI)

- Modélisations locales dans la baie

Rejeu dans la baie de Saint-Malo des surcotes et des vagues **de la période de campagne de mesures 2018-2019 et d'évènements (sur 7 jours) :**

- ❑ **Modèle THR vagues WavewatchIII® :**
    - Maillage non structuré : 30 m à la côte
    - Bathymétrie de 20 et 5 m de résolution (PAPI)
    - Vagues aux frontières issues du modèles régional
    - En tout point : hauteur d'eau et courant du modèle local HYCOM et forçages atmosphériques ARPEGE
  - ❑ **Modèle THR niveaux/courants HYCOM :**
    - Maillage curviligne : 30 m à la côte
    - Bathymétrie de 20 et 5 m de résolution (PAPI)
    - Forçage aux frontières par modèle intermédiaire forcé par modèle régional
    - En tout point : vagues du modèle local WWIII® et forçages atmosphériques ARPEGE
- => estimation de la surcote liée aux vagues

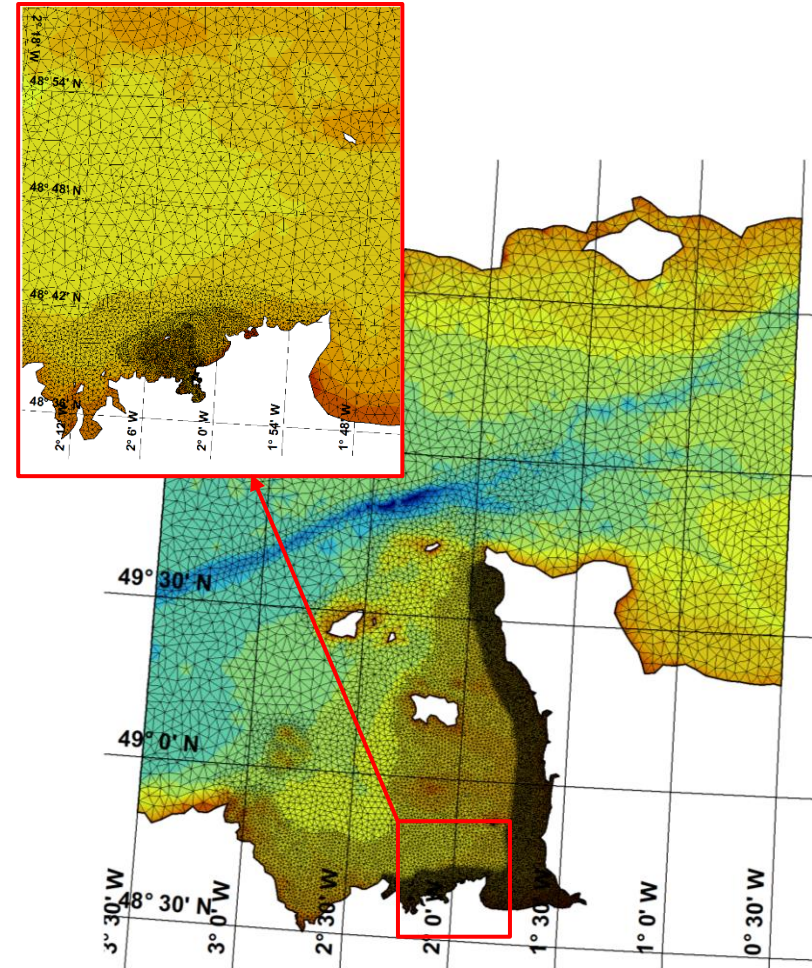


# Modélisations DHI

- Modélisations regionals GNB

Rejeu sur la période **1994 à 2023** des niveaux d'eau et des vagues sur la façade Atlantique :

- ❑ Modèle vagues MIKE21 SWGNB et modèle niveaux/courants MIKE 21HDGNB
- ❑ Maillage non structuré de 2/3 km au large à moins d'1 km à la côte, 500 m au droit de Saint-Malo
- ❑ Bathymétrie : 100 m de résolution (HOMONIM) au large et topo-bathymétrie de 20 et 5 m réalisées dans le cadre du PAPI
- ❑ Forçages aux frontières : modèles Nord-Europe de DHI
- ❑ Forçage en tout point : vent/pression atmosphérique CFSR et niveaux du HDGNB pour le modèle de vagues

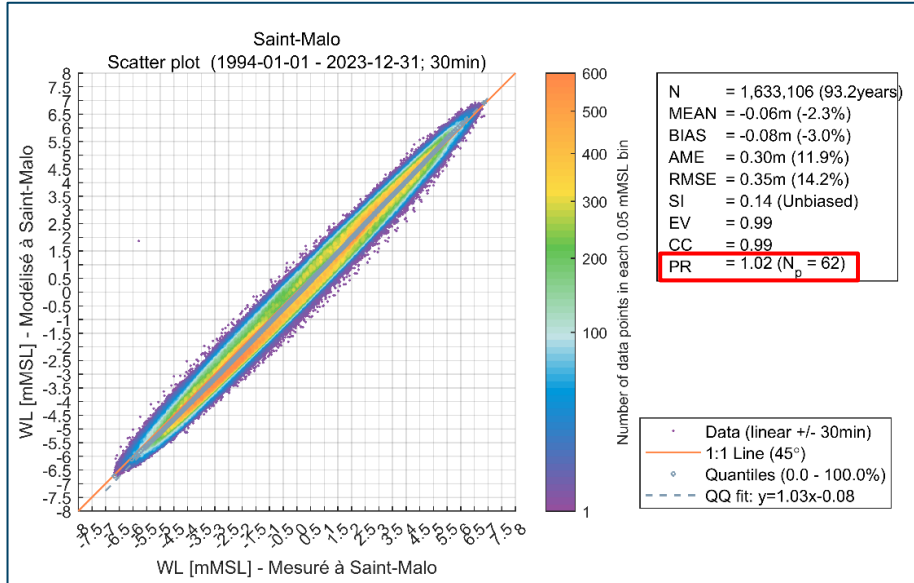




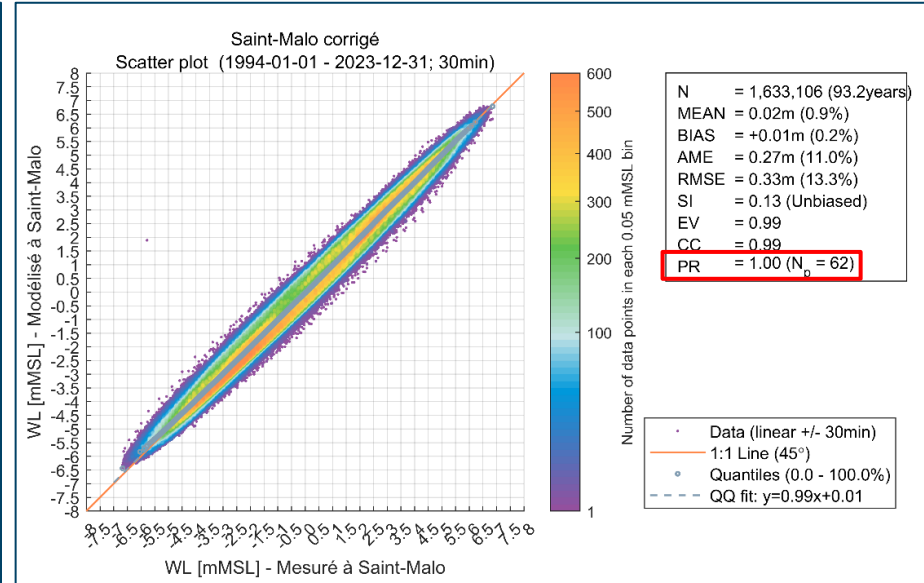
# Modélisations DHI

- Modélisations regionales : validation niveaux

Avant correction : surestimation des niveaux les plus hauts



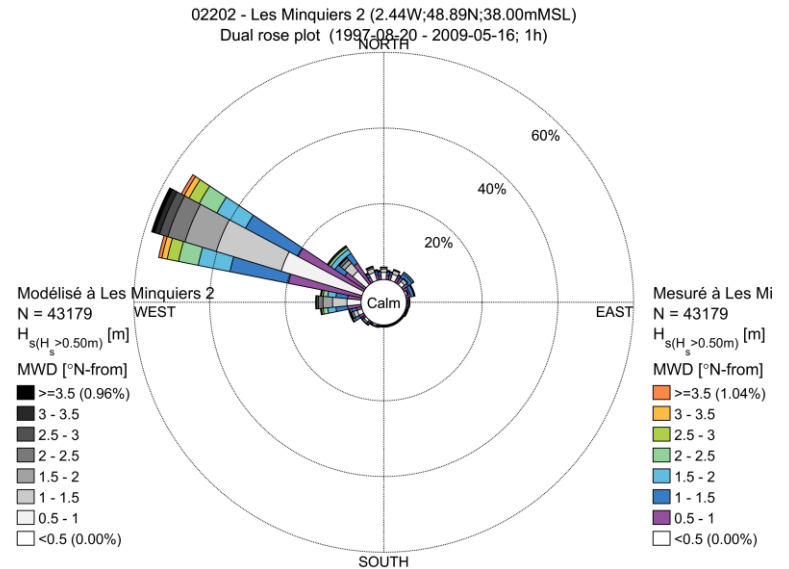
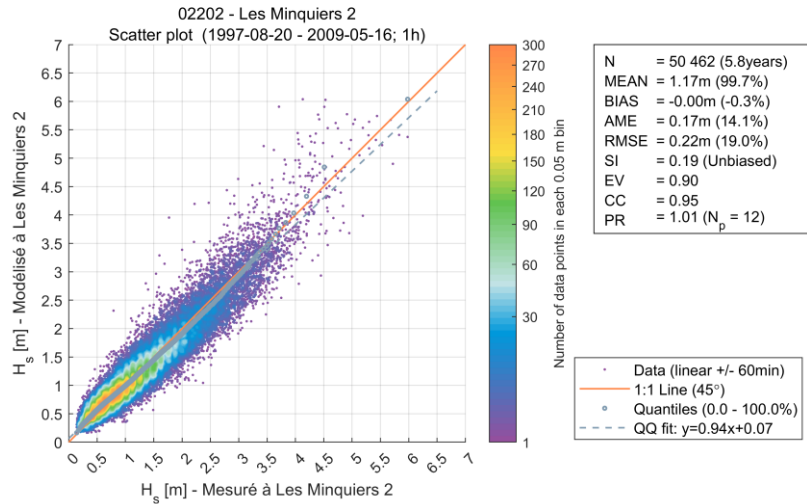
Après correction



# Modélisations DHI

- Modélisations regionales : validation vagues

**Comparaison des hauteurs et rose vagues à la bouée 02202  
=> qualité équivalente au modèle régional SHOM pour cette  
bouée et 02203 et 03501 (Saint-Malo)**



# 02.3

## Conditions marines : analyse des extrêmes



# Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes

- SHOM/CEREMA 2022

Niveaux extrêmes à Saint-Malo, port de référence, estimés sur la base des mesures marégraphiques :

- ❑ Données utilisées : 09/04/1986 au 31/12/2021 (27,43 ans)
- ❑ Méthode de modélisation de dépendance de marée surcote utilisée pour ce port (spécificité de Saint-Malo)
- ❑ T100 de 7,49 m IGN69 = 13,78 m CM (+6,29 m)
- ❑ Incertitudes:
  - Appareil de mesure : un à plusieurs cm
  - Conditions de mesure : difficilement quantifiables
  - +/- 15 cm sur la marée
  - Propres à l'analyse statistique : intervalle de confiance lié à la loi d'ajustement : -3 à +10 cm pour T100

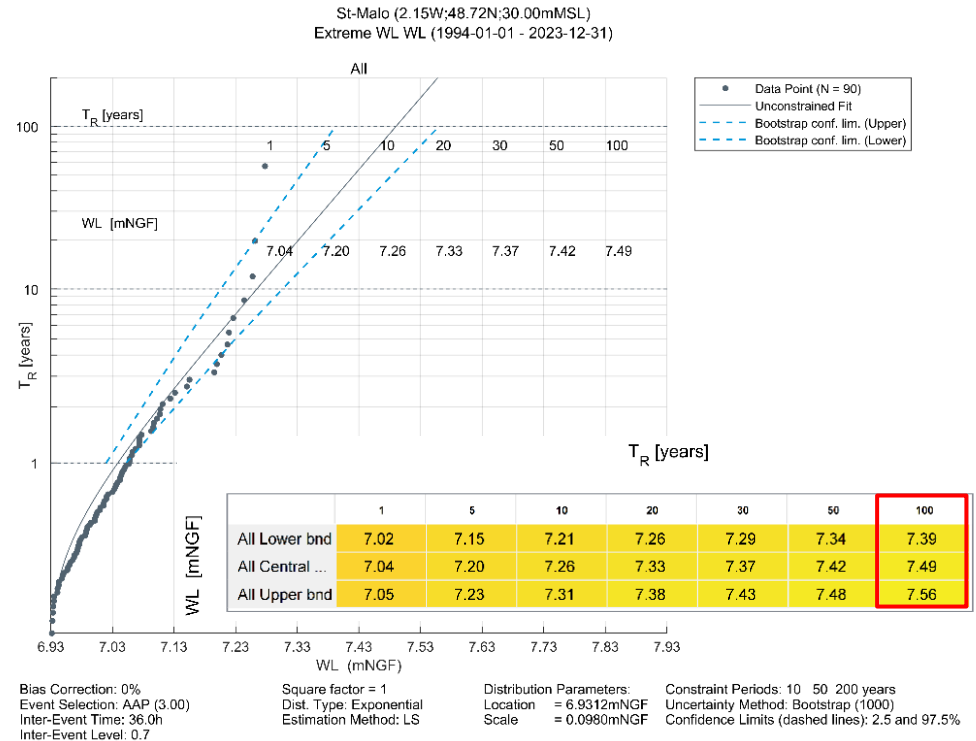
Période de retour	Niveau PM		
	(IGN69)	Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	7.24 m	7.24 m à 7.24 m	7.24 m à 7.25 m
10 ans	7.29 m	7.29 m à 7.30 m	7.29 m à 7.31 m
20 ans	7.35 m	7.34 m à 7.36 m	7.34 m à 7.37 m
50 ans	7.42 m	7.41 m à 7.44 m	7.40 m à 7.48 m
100 ans	7.49 m	7.47 m à 7.53 m	7.46 m à 7.59 m
200 ans	7.57 m	7.53 m à 7.63 m	7.51 m à 7.73 m
500 ans	7.66 m	7.60 m à 7.76 m	7.57 m à 7.95 m
1 000 ans	7.73 m	7.65 m à 7.87 m	7.62 m à 8.15 m

Tableau 22 : Saint-Malo – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

# Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes

- DHI

Niveaux extrêmes à 800 m devant le port de Saint-Malo, estimés à l'aide des résultats de la modélisation HD GNB sur la période 1994-2023



# Analyse statistique des vagues extremes

- SHOM

Vagues extrêmes en différents points au large de Saint-Malo issues de l'analyse des données de la modélisation hindcast régionale 1979-2019

Hindcast

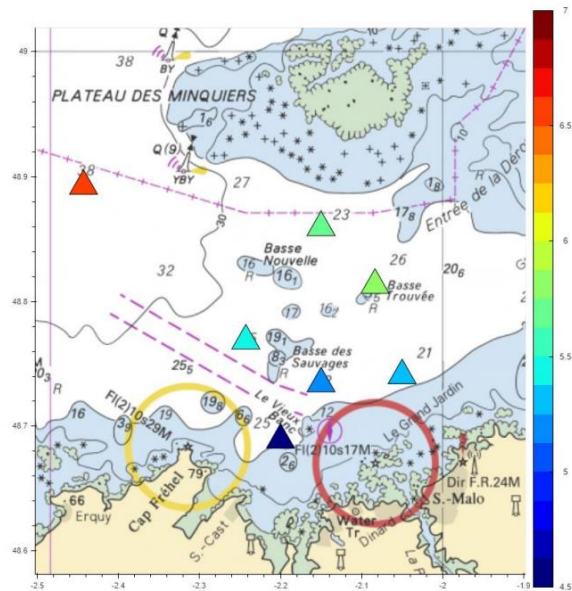
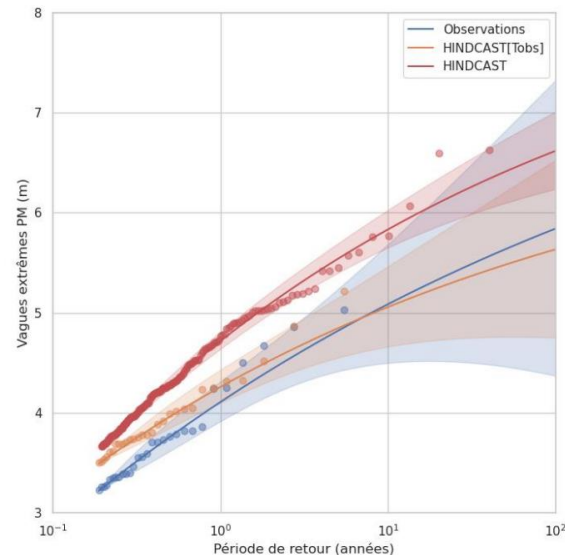


Figure 53 : Carte de la période de retour à 100 ans de la Hs des vagues à pleine mer pour différents points au large de Saint-Malo.

Comparaison mesures et ajustement statistique pour bouée 02202 : hindcast et période observation



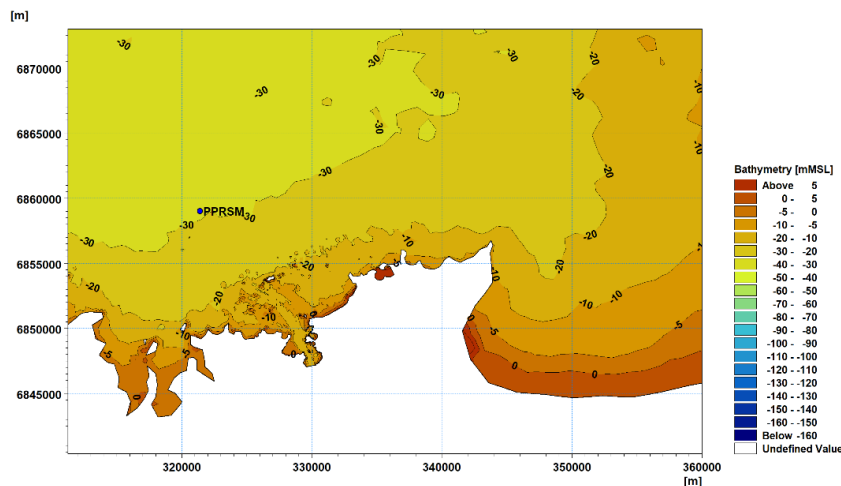
Période de retour des Hs des vagues de pleine mer	Obs	Hindcast[Tobs]	Hindcast
10 ans	$5,1 \pm 0,6 \text{ m}$	$5,1 \pm 0,4 \text{ m}$	$5,8 \pm 0,2 \text{ m}$
100 ans	$5,8 \pm 1,4 \text{ m}$	$5,6 \pm 0,9 \text{ m}$	$6,6 \pm 0,4 \text{ m}$

Tableau 14 : Période de retour des Hs des vagues de pleine mer à la bouée houlographique 02202.

# Analyse statistique des vagues extremes

- DHI

Vagues extrêmes au point PPRSM issues de l'analyse des données mesurées et de la modélisation régionale => plus élevées que celle de la modélisation SHOM (entre 5 et 5,5 m pour le T100 au même point) : à éclaircir mais différence entre vagues de pleine mer (utilisées par le SHOM) et vagues instantanées => écart de 50 cm en moyenne mentionné par le SHOM



Période de retour	Modèle SW <sub>GNB</sub> DHI	Modèle SW PPRSM DHI 2016
	(1994-2023)	(1988-2007)
1 an	4.1	<b>4.38</b>
5 ans	5.1	<b>5.14</b>
10 ans	5.4	<b>5.45</b>
20 ans	<b>5.8</b>	5.73
50 ans	<b>6.3</b>	6.10
100 ans	<b>6.7</b>	6.37

# 02.4

## Conditions marines : effets du changement climatique

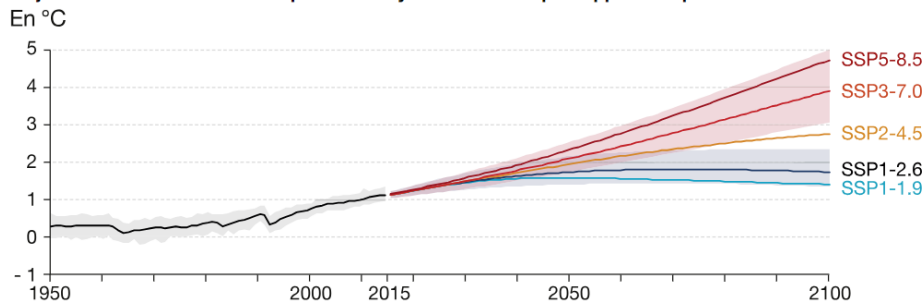




# Elevation du niveau marin moyen

- Accélération du réchauffement

Projection de la variation de température moyenne mondiale par rapport à la période 1850-1900



Source : Giec, 1<sup>er</sup> groupe de travail, 2013

## Le Monde

PLANÈTE

### Le rythme du réchauffement climatique est plus rapide que jamais

Selon une étude mettant à jour les données du GIEC, le réchauffement s'accroît désormais à un rythme de 0,26 °C par décennie, un record dans les relevés.

Par Audrey Garric

Publié le 05 juin 2024 à 01h00, modifié le 05 juin 2024 à 10h34 · Lecture 4 min. · [Read in English](#)

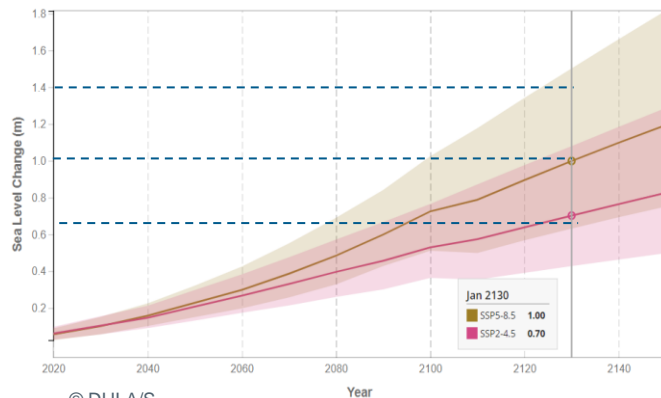
Compte-tenu des dernières données, sans action fondamentale supplémentaire, on pourrait se projeter à +3°C (par rapport à 1850-1900) d'ici 2100 => entre les scénarios SSP2-4.5 et SSP3-7.0 sans considérer d'effet d'emballement

# Elevation du niveau marin moyen

- Données du site de la NASA ([https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?psmsl\\_id=454&data\\_layer=scenario](https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?psmsl_id=454&data_layer=scenario)), issus des derniers travaux du GIEC (2019)

Données au large de Saint-Malo : moyenne de +0,90 m en 2120 et +1,0 m en 2130 pour le SSP5-8,5, par rapport à la période 1995-2014 => **+0,95 m en 2125.**

**Incertitude : entre 0,65 et 1,4 m environ. + 0,95 m correspond à la borne haute du SSP2-4.5**

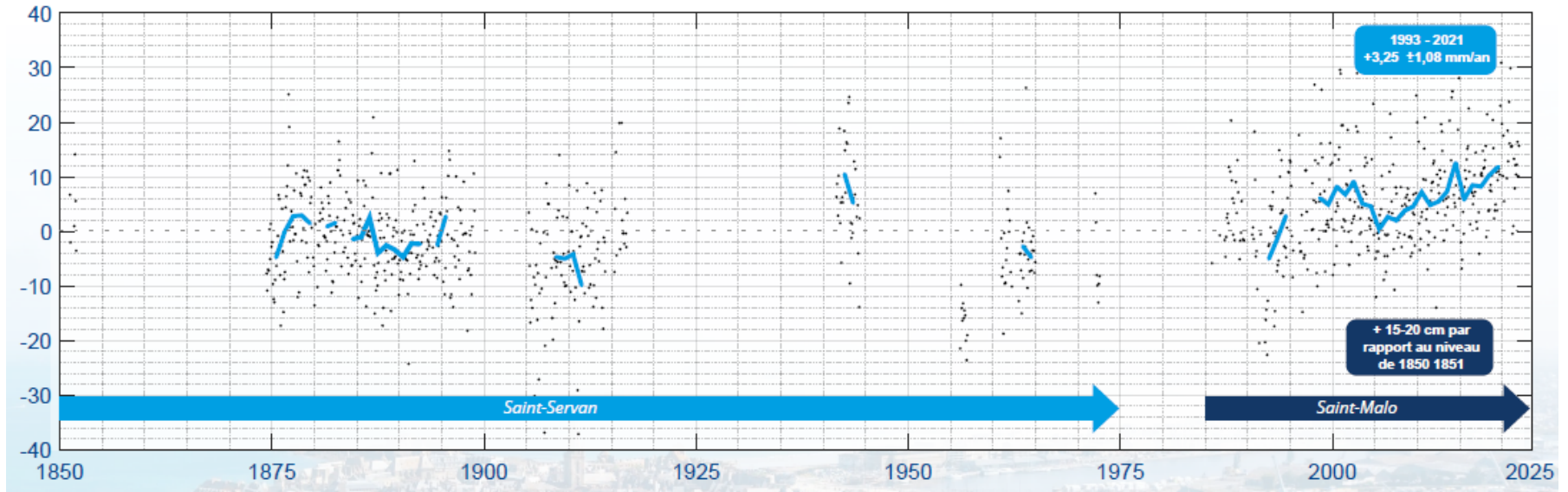


	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP1-2.6 Low Confidence	SSP5-8.5 Low Confidence
Total (2030)	0.10 (0.02–0.19)	0.10 (0.04–0.16)	0.10 (0.06–0.15)	0.10 (0.05–0.15)	0.10 (0.06–0.15)	0.10 (0.04–0.16)	0.10 (0.06–0.16)
Total (2050)	0.18 (0.07–0.30)	0.19 (0.11–0.29)	0.21 (0.13–0.30)	0.21 (0.14–0.30)	0.23 (0.15–0.32)	0.19 (0.11–0.30)	0.23 (0.14–0.35)
Total (2090)	0.34 (0.18–0.54)	0.37 (0.24–0.56)	0.46 (0.30–0.67)	0.52 (0.36–0.74)	0.60 (0.43–0.84)	0.37 (0.24–0.57)	0.65 (0.43–1.05)
Total (2100)	0.36 (0.16–0.60)	0.41 (0.24–0.63)	0.53 (0.36–0.77)	0.63 (0.43–0.89)	0.72 (0.51–1.02)	0.41 (0.24–0.64)	0.82 (0.51–1.28)
Total (2150)	0.53 (0.19–0.93)	0.58 (0.28–0.97)	0.83 (0.50–1.29)	1.05 (0.66–1.58)	1.19 (0.75–1.82)	0.61 (0.28–1.04)	1.86 (0.75–4.95)
Rate (2040–2060)	4.4 (2.3–6.9)	4.9 (2.8–7.5)	5.7 (3.6–8.4)	6.0 (3.6–8.9)	6.6 (4.0–9.8)	4.9 (2.8–8.0)	6.9 (4.0–13.1)
Rate (2080–2100)	2.8 (0.4–5.6)	3.6 (0.8–7.2)	6.2 (3.6–10.3)	8.9 (5.4–13.6)	11.0 (7.0–17.0)	3.6 (0.2–7.7)	14.7 (7.0–30.4)

# Elevation du niveau marin moyen

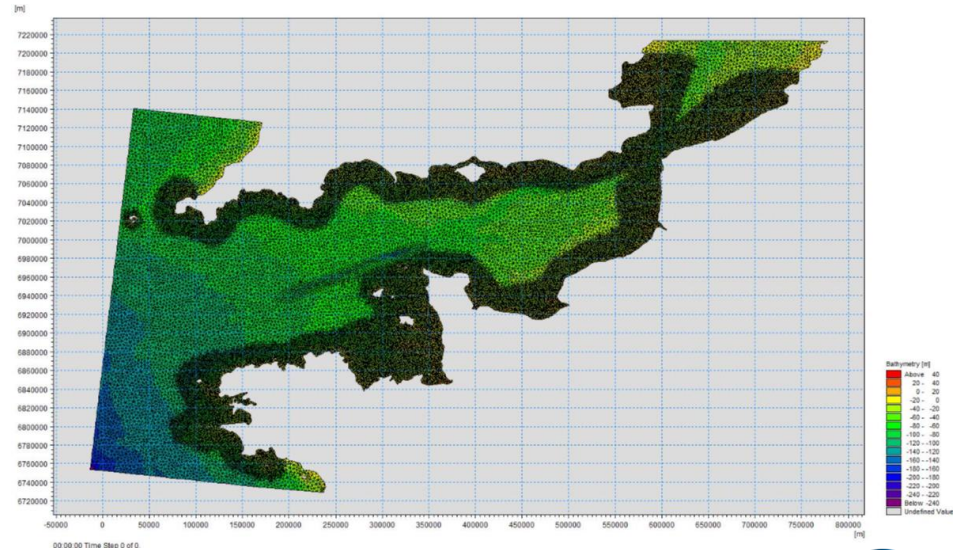
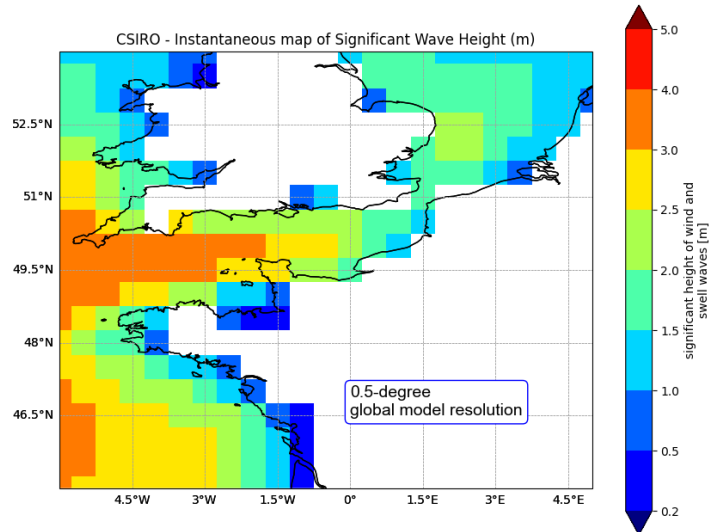
- Données issues des observations marégraphiques (SHOM)

**+3,25 ± 1,08 mm/an sur la période 1993-2021 => ce qui correspond à la prévision GIEC, mais ne représente pas l'accélération du phénomène**



# Modification des climats de vagues

- Données mondiales des vagues futures avec une faible resolution (50 km) sur période 2071-2100 pour 2 scenarios dont SSP5-8.5 . Travail en cours de DHI pour réaliser une première descente d'échelle de ces données sur une emprise régionale Manche



# 02.5

## Conditions marines : couples niveau/houle extrêmes

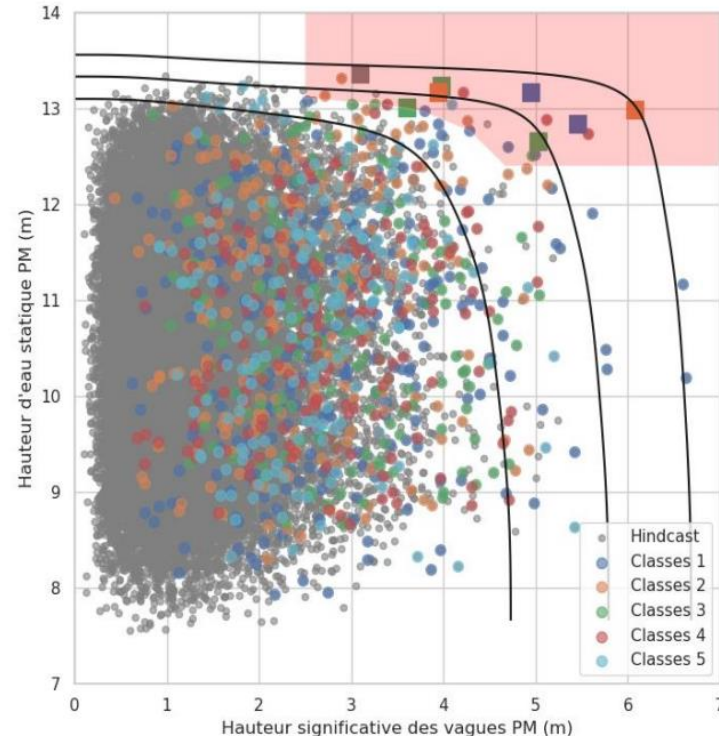
# Détermination des couples niveau/houle extrêmes

- SHOM

Couples à la bouée 02202 déterminés à partir des résultats du hindcast de la modélisation régionale, sur la période 1979-2019

Hauteur d'eau en m CM (+6,29/m IGN69)

Carrés : évènements qui ont provoqué une submersion



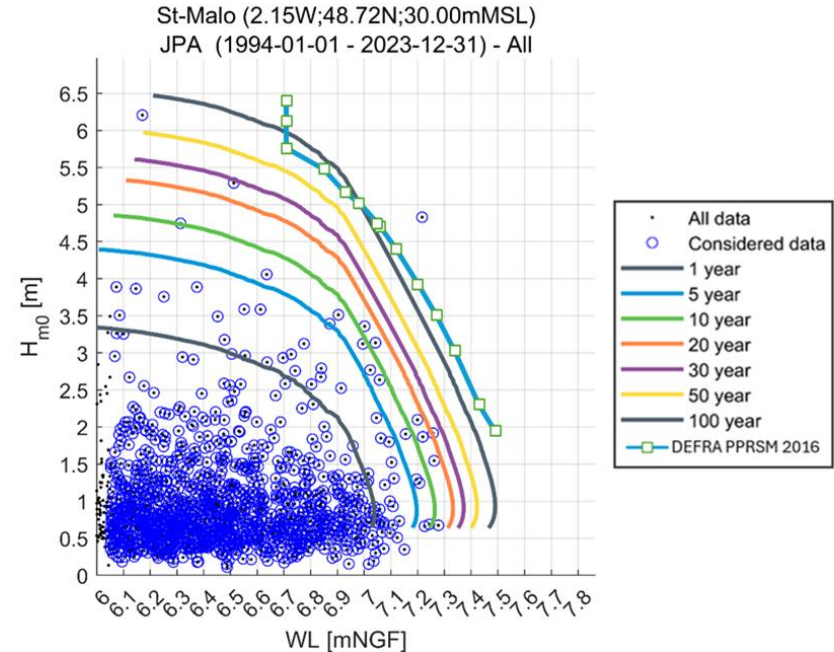
# Détermination des couples niveau/houle extrêmes

- DHI (à affiner)

Couples au point PPRSM déterminés à partir des résultats du hindcast de la modélisation régionale, hauteur d'eau en m CM (+6,29 par rapport à m IGN69)  
=> même couple Niveau = 6,7m IGN69/houle = 6 m de période de retour T100 que celui du SHOM pour le point 02202 : à éclaircir/affiner



## Superposition avec couples PPR2016 (méthode DEFRA)



# 03.

## Evènements historiques





# Présentation des évènements de submersion

- Eleanor, 3 Janvier 2018 (source : Dfmal Dik)

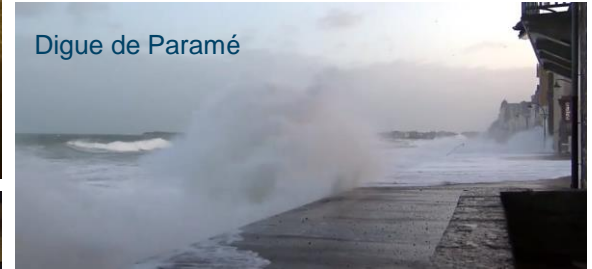
Tour des Dames



Bas rue Roger Vercel



Digue de Paramé



Digue du Sillon



Bas rue Roger Vercel



Chaussée du Sillon



Esplanade Saint-Vincent



Bas rue Roger Vercel



# Présentation des évènements de submersion

- Ciara, 10/11 Février 2020 (Easy Ride)



# Présentation des évènements de submersion

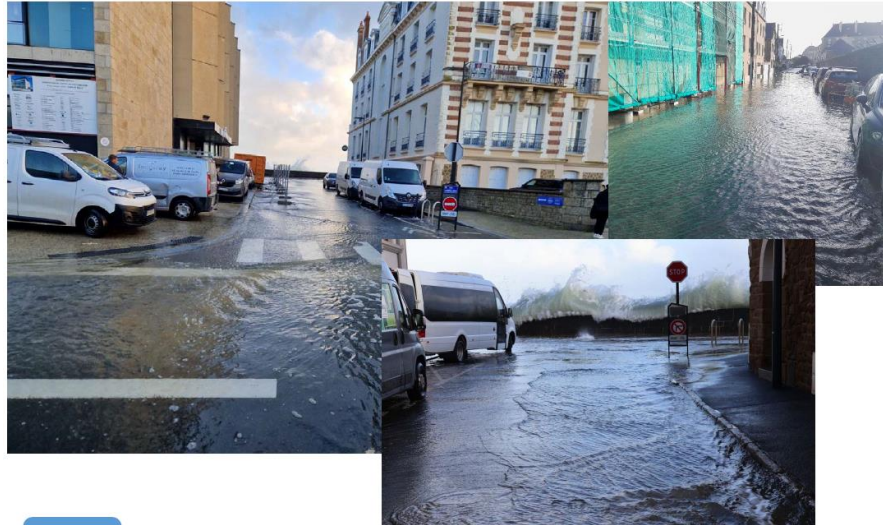
- Karlotta, 11 Février 2024



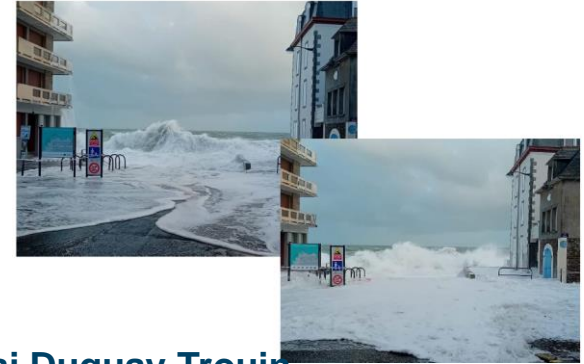


# Présentation des évènements de submersion

- Pierrick, 9 avril 2024. Estimation: environ 100 000 m<sup>3</sup> d'eau franchie étant retourné au port (20 cm sur 55ha moins 10/15 000 m<sup>3</sup> pompés)



Cale de Rochebonne



Quai Duguay-Trouin





# Autres éléments importants

- Autres éléments sur les événements issus des travaux SHOM/PAPI, sur période 1979-2019 :
    - Les surcotes et vagues extrêmes se produisent principalement entre octobre et février
    - Les tempêtes de classe 1, très longues et orientées O-E, produisent les vagues les plus fortes
    - 4 événements de vagues > T10 et 12 événements conjoints surcote PM/vagues PM > T=10 dont 1 a provoqué une submersion (Johanna), et plus depuis mars 2008
- ⇒ Les submersions sont surtout provoquées pour des vagues de PM <5m (bouée 02202) et en majorité pour un niveau d'eau supérieur ou égal à 6,71 m IGN69 (13 m CM) ou très proche de ce dernier, avec des surcotes de PM modestes => **poursuite analyse travail SHOM**

# Autres éléments importants

- Travail DHI en cours sur les périodes de retour des couples extremes des tempêtes selon les résultats de ses modèles
- Reste à évaluer la période de retour de Pierrick d'avril 2024 (Niveau d'eau max mesuré autour de 7 m IGN69 (13,29 m CM), et sa classe. Voir caractéristiques des vagues, et effets de surcote?
- Pour information, baisse de 50 cm les bassins avant une tempête (11,5/12 m CM niveau normal). Consigne de gestion réglementaire => **à valider/préciser avec la region (Niveau normal précis? quand le niveau est-il baissé?)**

# 04.

## Aléa de référence





# Evènement niveau marin seul

## Mise à jour des niveaux marins seul à considerer

Conservé. Consommées par les incertitudes sur la marée et le T100, hors incertitude cc

- Aléa de reference actuel :

$$7,94 \text{ m IGN69} = 7,49 \text{ m IGN69 (T100)} + 0,20 \text{ m cc} + 0,25 \text{ m incertitudes}$$

- Aléa de reference 2025

$$8,69 \text{ m IGN69} = 7,49 \text{ m IGN69 (T100)} + 0,95 \text{ m cc} + 0,25 \text{ m incertitudes}$$

Donnée SHOM 2022

Derniers travaux GIEC, moyenne du scénario SSP5-8.5 et borne haute du SSP2-4.5

# Evènement niveau marin seul

## Mise à jour des niveaux marins seul à considérer

	PPRSM en vigueur	PPRSM en révision
Aléa de référence (période actuelle)	7.94m NGF	
Niveau marin de pleine mer (aléa centennal)	7.49m NGF	
Prise en compte du CC	0.20cm	
Incertitudes	0.25cm	

	PPRSM en vigueur	PPRSM en révision
Aléa échéance 100ans	8.34m NGF (échéance 2100)	8.69m NGF (échéance 2125)
Niveau marin de pleine mer (aléa centennal)	7.49m NGF	7.49m NGF
Prise en compte du CC	0.60cm	0.95cm
Incertitudes	0.25cm	0.25cm

# Couple niveau/vagues de référence

- Les couples niveau/vagues de référence pour le franchissement restent à déterminer horizon actuel et futur, sur la base des travaux présentés => choix d'un couple T100 ou du "pire" du point de vue des conséquences
- A priori, couple avec niveau d'eau important (proche ou supérieur à 13 m CM)
- Valider tempête qui a été la plus impactante entre Johanna, Eleanor et Pierrick (autre?)

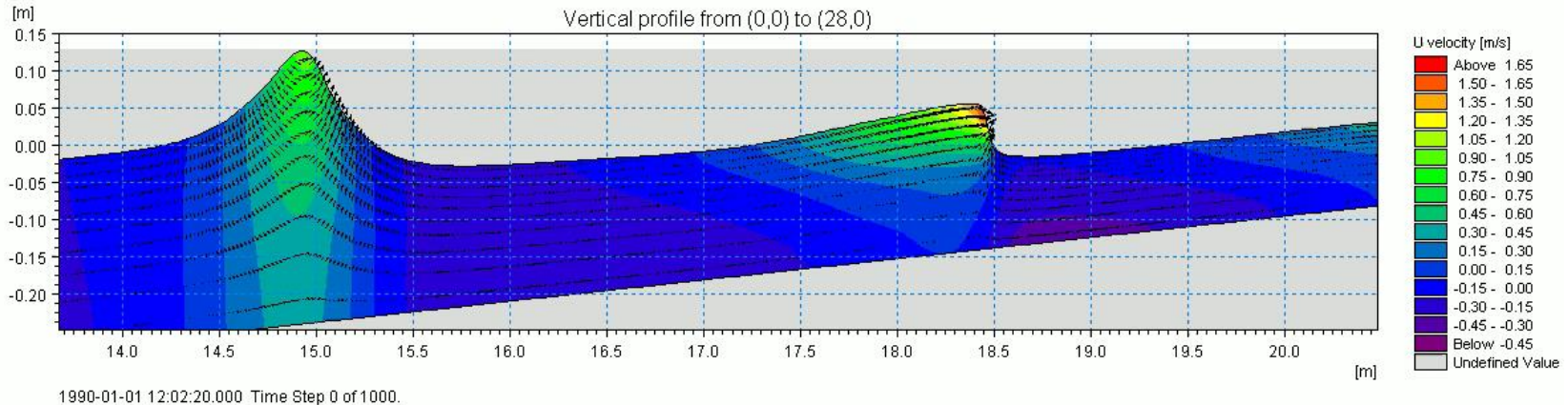
# 05.

## Modèle marin de franchissement



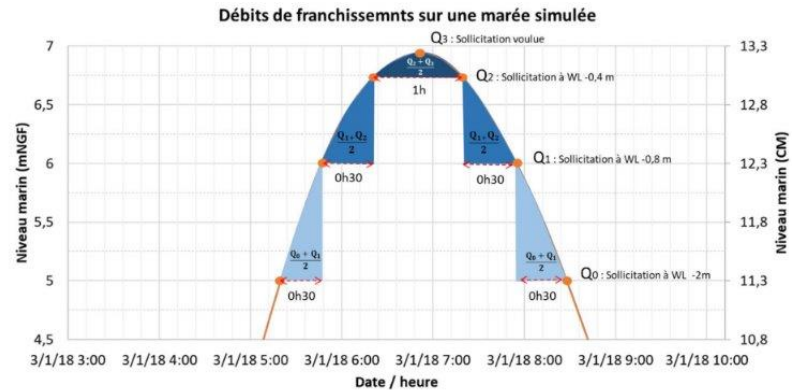
# Outil : modèle M3W, vague à vague

- MIKE 3WaveFM (M3W) : modèle vague à vague non hydrostatique, résolvant équations de Navier-Stokes moyennées
- Permet la representation de la transmission des vagues au travers des milieux poreux
- Pas de limitation de hauteur ou de période de vague
- Modélisation du déferlement, du run up et du jet de rive (franchissement)



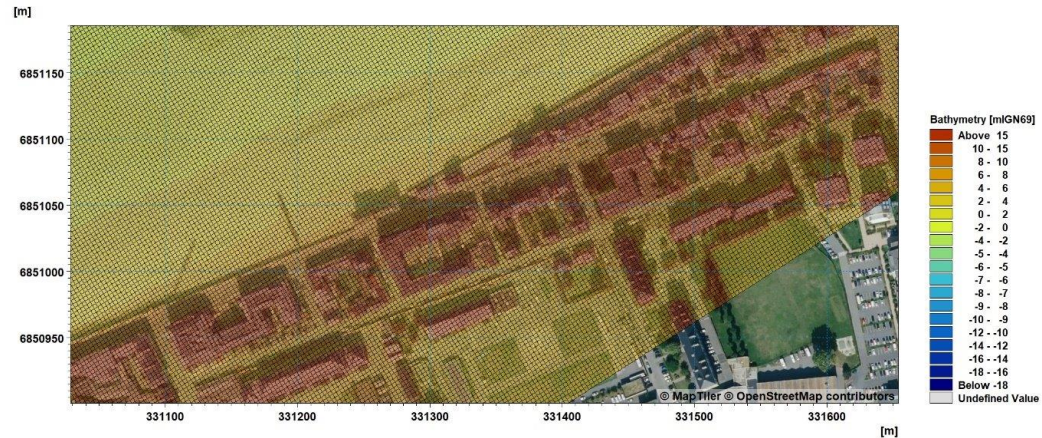
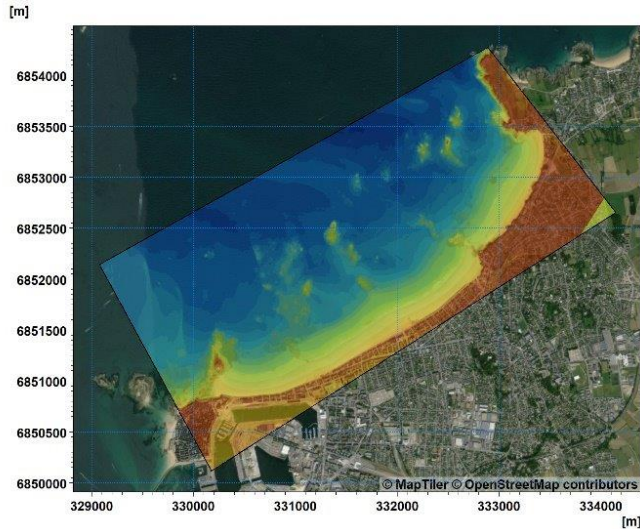
# Outil : modèle M3W, vague à vague

- Localisation/calcul des volume/débits de franchissements induits par chaque vague, et in fine pour la tempête entière : maillage fin pour bien représenter la morphologie des plages et les ouvrages le mieux possible => approche 3D différente de l'approche par profil pour des caractéristiques de vagues fixées du PPRL 2017
- Modèle prolongé à terre avec intégration du bâti (BD TOPO®) pour modéliser l'écoulement dans les rues principales et avoir une première idée des vitesses/hauteurs de submersion : réseau EP/rugosité non inclus
- **Simulation à niveau d'eau constant => plusieurs paliers à simuler pour représenter une pleine mer (comme EDD)**



# Présentation générale du modèle

- Emprise : couvre toute la côte orientée NE soumise aux franchissements
- Maillage : carré, 3 m x 3m
- Bathymétrie (pour le moment) : MNT du Lidar Bretagne réalisé entre mai et Juillet 2018 en mer => à discuter/préciser





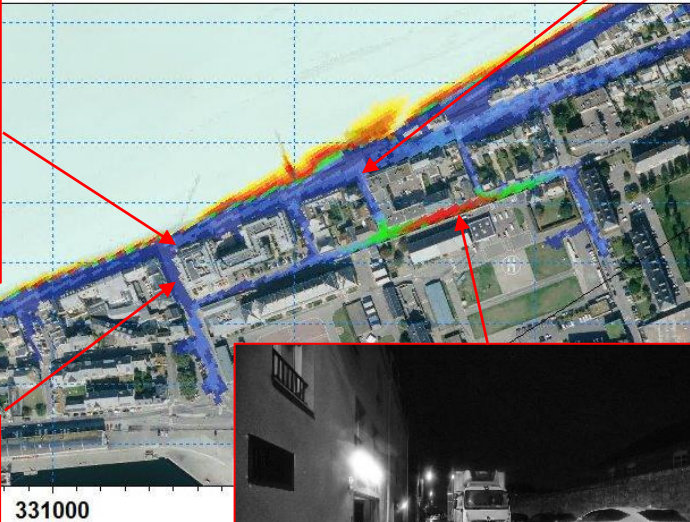
# Premier calage

- Eleanor : 3 Janvier 2018

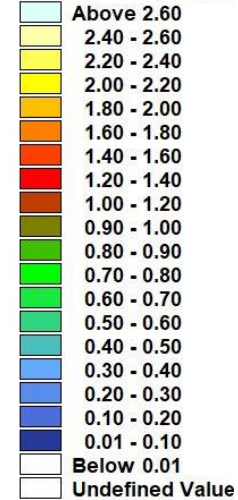


6850900

6850850



Total water depth [m]



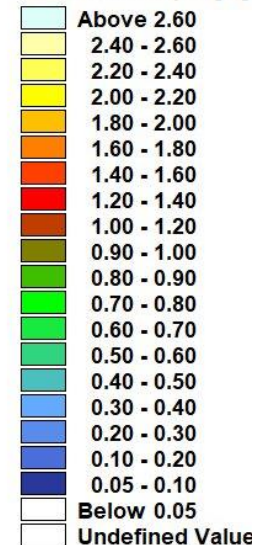


# Premier calage

- 2010



Total water depth [m]

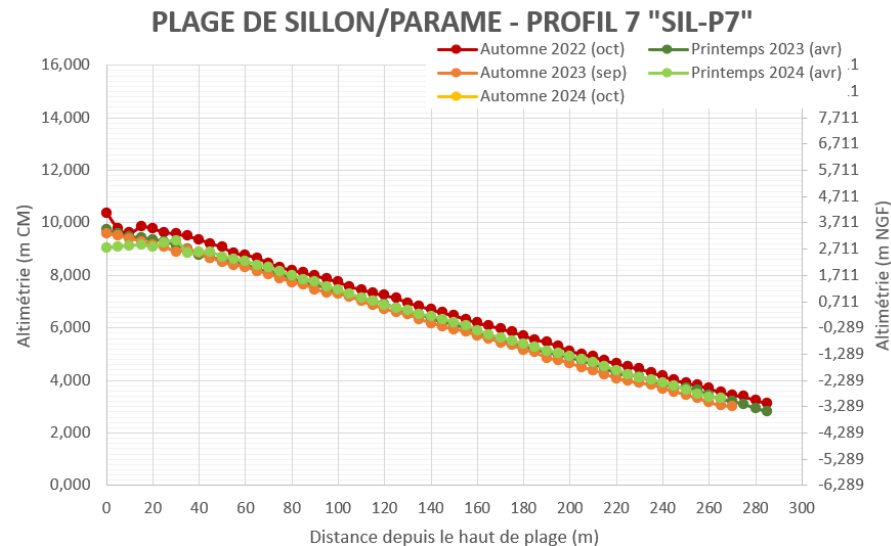
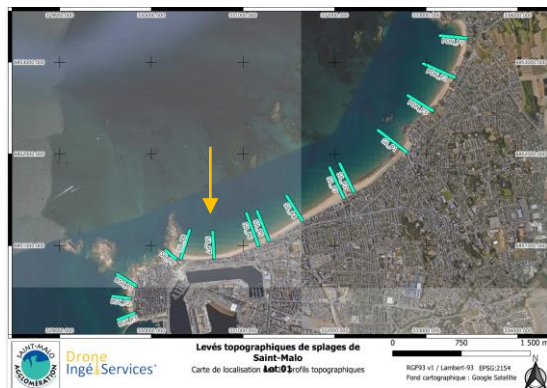


# Finalisation du calage

- Il a été décidé de finaliser le calage du modèle sur la tempête Pierrick du 9 avril 2024 car :
    - Bien documentée en photos
    - Estimation des volumes franchis étant retournés au bassin portuaire
    - Etat des reseaux EP au plus proche des données fournies
    - Levé de profils de plage réalisé le 08 avril 2024 par Drone-IngéServices
    - Données du suivi camera disponible (depuis Juillet 2023 : 3 cameras pour le suivi de la plage entre le palais du grand large et la brasserie)? **A voir avec Saint-Malo Agglomération**
- => À faire**

# Points techniques à discuter pour l'utilisation du modèle dans la caractérisation des franchissements

- Choix de la topographie de plage => joue un rôle essentiel dans la quantité d'eau franchie => **données à étudier/variabilité de la plage à analyser**
  - MNT complets disponibles : RGE Alti (IGN, 2017-2019), Lidar Bretagne (mai à juillet 2018), Drone IngéServices (octobre 2022 et juin 2023, jusqu'à 1 pt/5 cm)
  - Suivi de 15 profils de plage par Drone IngéServices : 10 levés d'octobre 2022 à avril 2024
  - Données du suivi caméra ?



# Points techniques à discuter pour l'utilisation du modèle dans la caractérisation des franchissements

- Les résultats du M3W doivent être injectés dans le modèle de propagation 2D en plusieurs points source. Chaque point représentera un tronçon homogène d'ouvrage franchi => tronçons à définir avec Antea.

# 06.

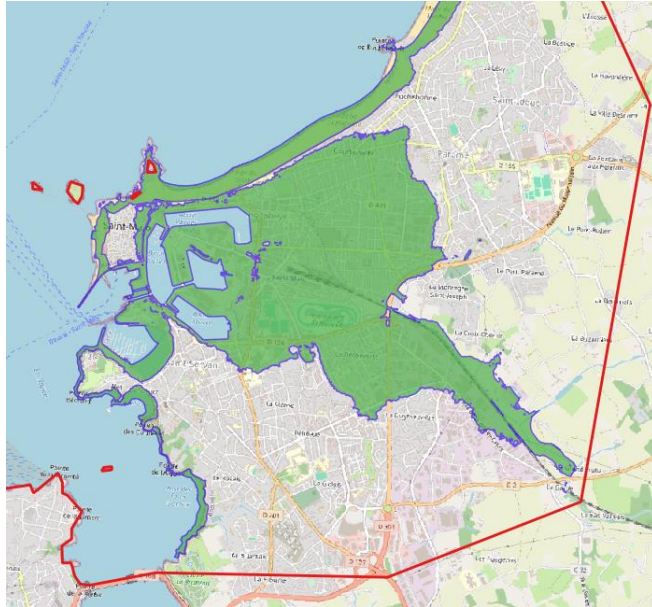
## Modèle de propagation à terre



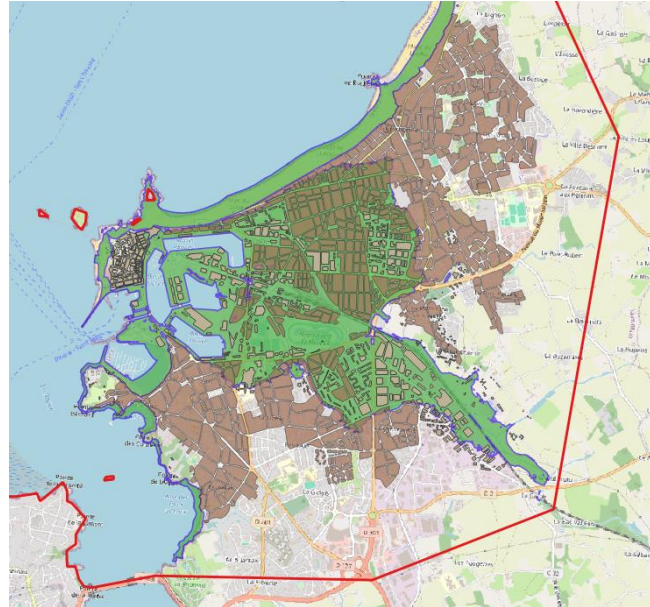
# Présentation générale du modèle

- Emprise par rapport à la cote d'eau maximale 8.69mNGF\*

\* = T100 + changement climatique à 100 ans + incertitudes



Emprise totale modèle terrestre VS zone "inondable" < 8.69 mNGF

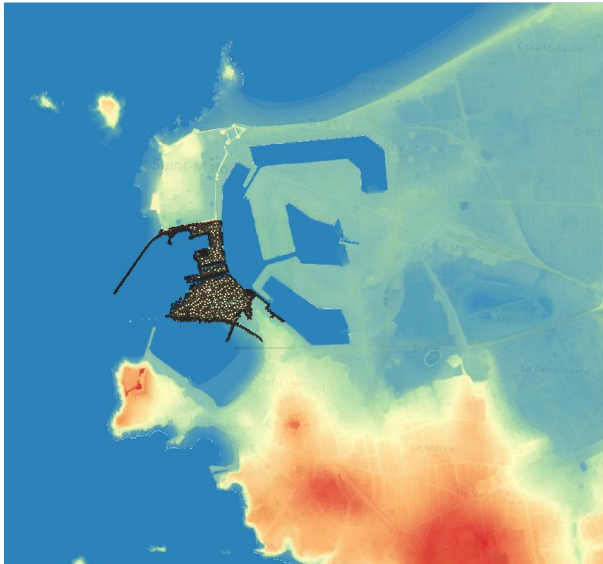


Emprise modèle terrestre avec prise en compte du bâti et parcelles



# Présentation générale du modèle

- Topographie



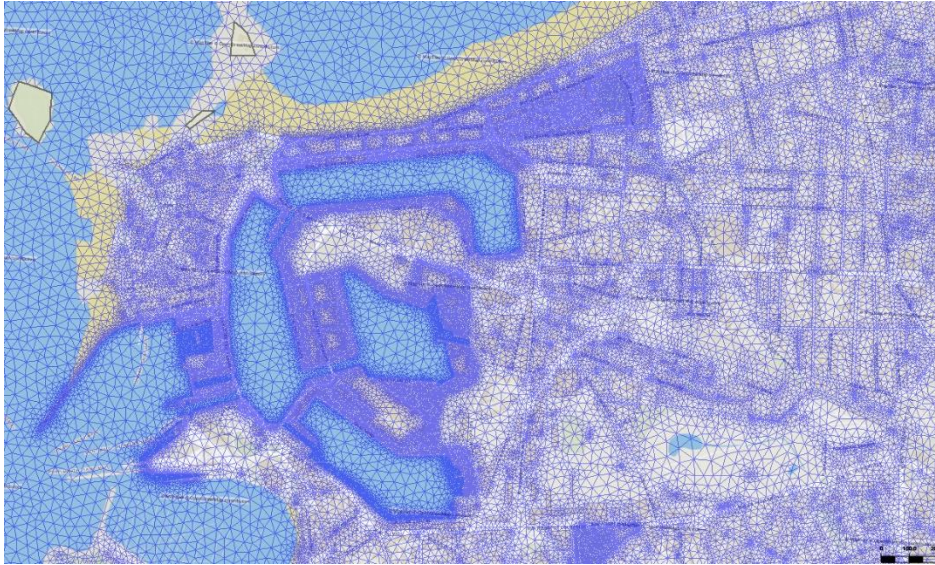
Données altimétriques générales :  
RGE Alti (terre) et Litto3D (mer + abords bassin portuaire)



Données altimétriques port : relevés topographiques  
Région Breizh

# Présentation générale du modèle

- Maillage general dans MIKE+



Maillage



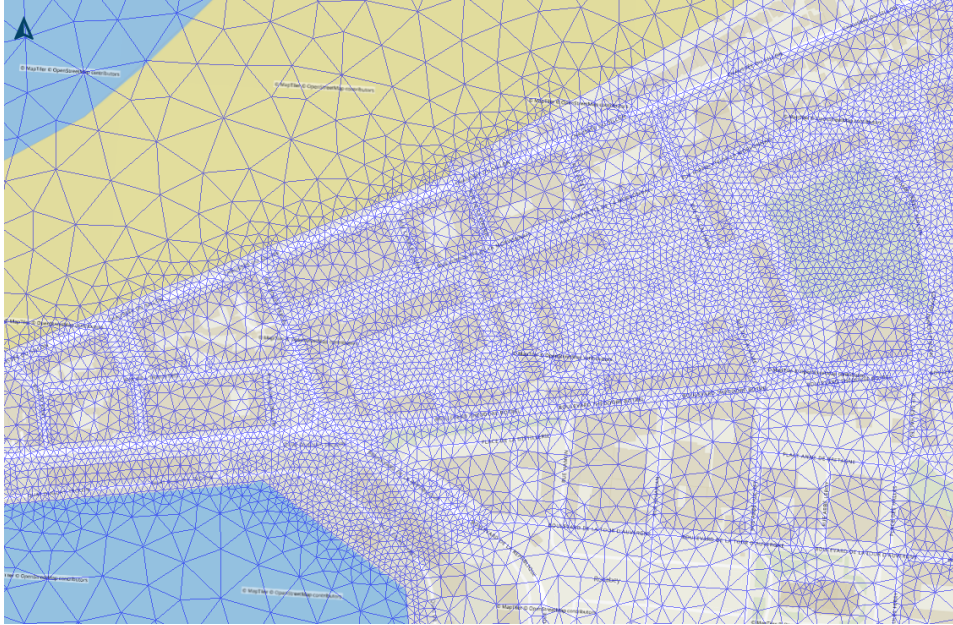
Maillage raffiné sur secteurs spécifique :

- Sillon
- Bassins portuaire
- Parcelle vélodrome

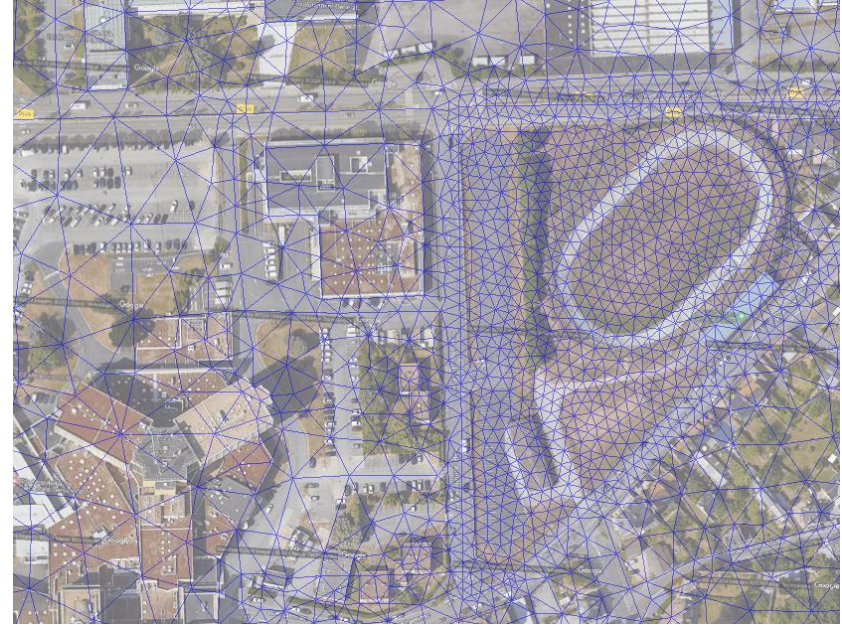


# Présentation générale du modèle

- Maillage raffiné dans MIKE+ : à éventuellement compléter en fonction aménagements PAPI



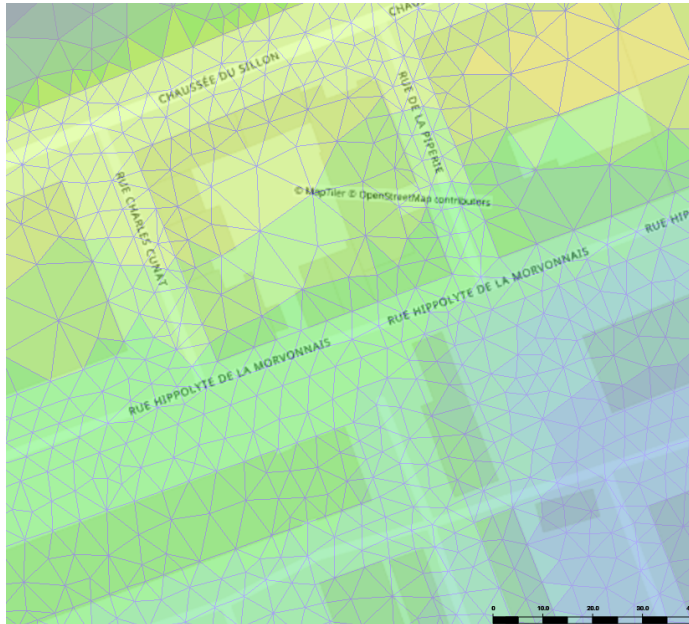
Secteur Sillon / école de police



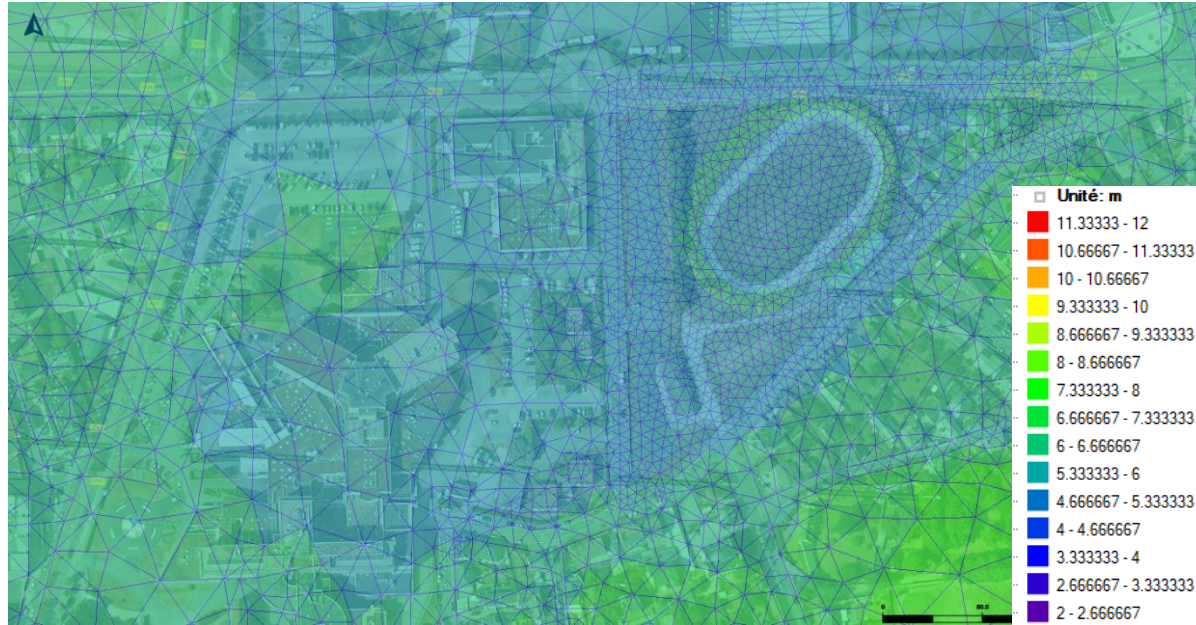
Secteur hôpital/vélodrome actuel

# Présentation générale du modèle

- Maillage interpolé avec donnée altimétrique



Secteur Sillon / école de police



Secteur hôpital/vélodrome actuel



# Présentation Générale du modèle

- Intégration des ouvrages : digues réelles et fictives



Réhausse du terminal du Naye : ligne de crête à 8.34 mNGF, représentée comme une digue dans le modèle

© DHI A/S



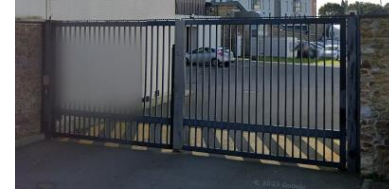
Digue du Sillon : côtes altimétriques précises (source ANTEA)

# Présentation Générale du modèle

- Intégration des ouvrages : mur d'enceinte école de police



Portail avec frein à l'écoulement



Portail sans frein à l'écoulement

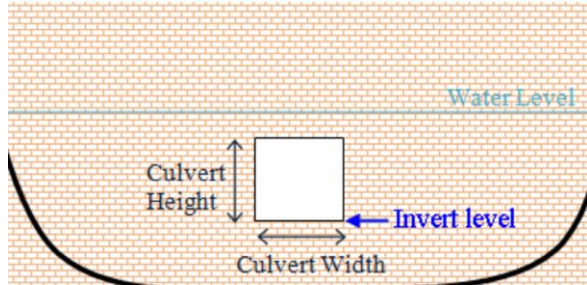


Ecole de police dans MIKE+ : digues (jaune), bâtiments (bleu) et ouverture pour portails

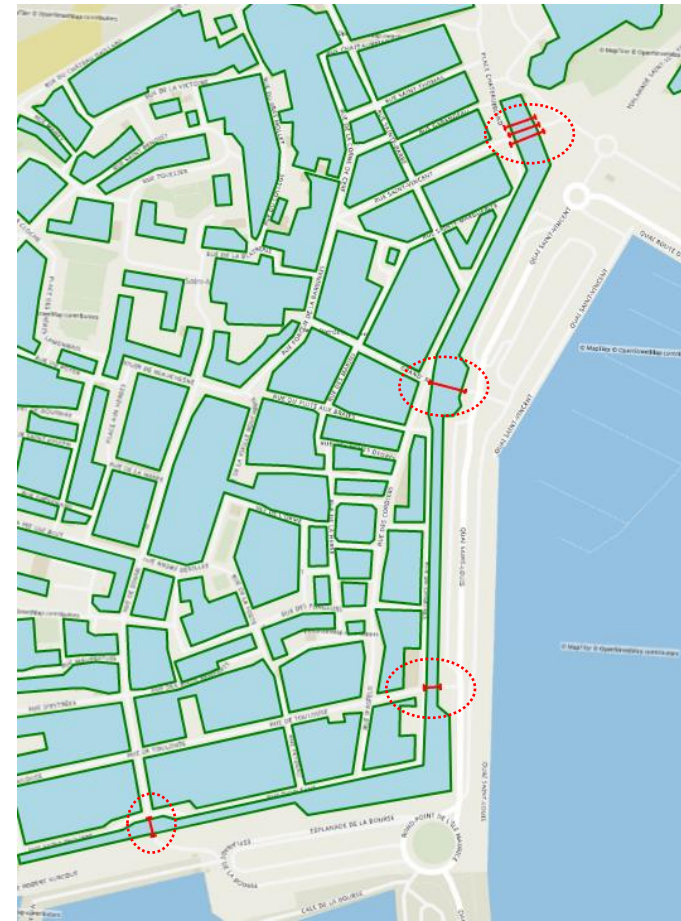


# Présentation Générale du modèle

- Intégration des ouvrages : portes remparts



Porte Saint Vincent (x3) = 3x ponceaux/buses rectangulaires



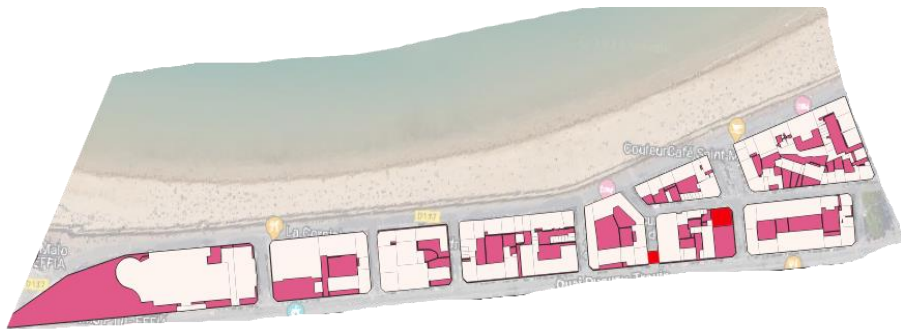
Portes de la cite dans MIKE+

# Prise en compte du bâti

- *Quelle prise en compte des obstacles bâtis dans la modélisation 2D?*
- Multiples configurations urbaines / architecturales  
→ besoin d'une approche systématique
- PPRSM prédédent : couche "bâti" pris en compte uniquement en faisant varier un coefficient de rugosité  
→ revenait à "freiner" l'écoulement sans l'en empêcher totalement
- Nouveau PPRSM : méthode plus précise (nouvelles fonctionnalités logiciel MIKE+), avec paramètres à ajuster en phase de calage du modèle



# Prise en compte du bâti : Zones Uc et Ue



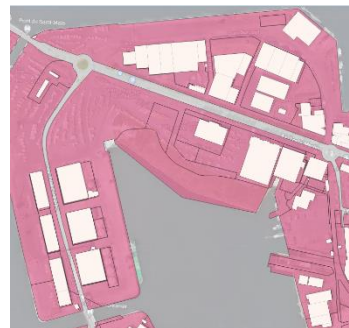
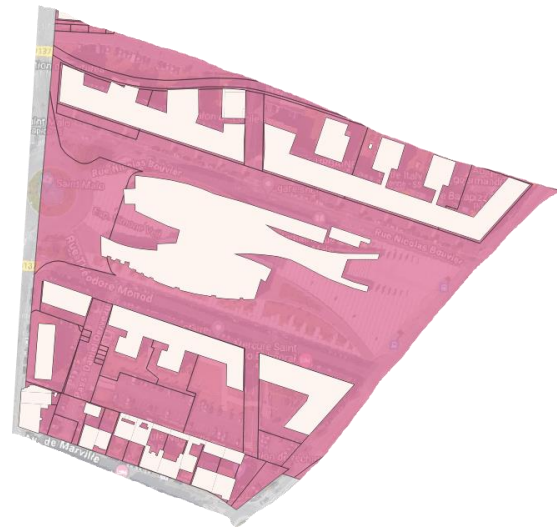
- Prise en compte des limites parcellaires pour la structuration du maillage et comme **obstacle à l'écoulement**
- Pénétration de l'eau dans les parcelles à partir d'une **lame d'eau >0cm** mais avec application d'un coefficient de **réduction de débit** (à ajuster par DHI en phase de calage)
- Application d'une rugosité très faible (ex: 5 m<sup>1/3</sup>/s) au sein de la parcelle
- Permet de **guider l'eau le long des murets et du bâti** aux limites parcellaires tout en permettant une **entrée d'eau limitée (débit moindre)** au sein des parcelles dès le premier cm d'eau



# Prise en compte du bâti :

## Zones UP, UI, UD, autres zonages et exceptions zonages Ue/Uc

- Prise en compte des limites du bâti pour la structuration du maillage et comme **obstacle** à l'écoulement
- Pré-traitement de la couche pour simplification des lignes
- Pénétration de l'eau dans le bâti à **partir d'un certain seuil (ex:20cm)** et application d'un coefficient de **réduction de débit** (seuil et coefficient à ajuster DHI en phase de calage)
- Application d'une rugosité urbaine réduite (ex: 20 m<sup>1/3</sup>/s) au sein du bâti
- Permet de **guider l'eau autour des contours bâtis**, de **laisser rentrer l'eau qu'à partir d'un certain seuil** et avec un **débit moindre** compte-tenu des obstacles rencontrés







BATI  
 BATI\*  
 MUR ENCEINTE\*  
 PARCELLE

# Prise en compte du bâti : découpage en secteurs



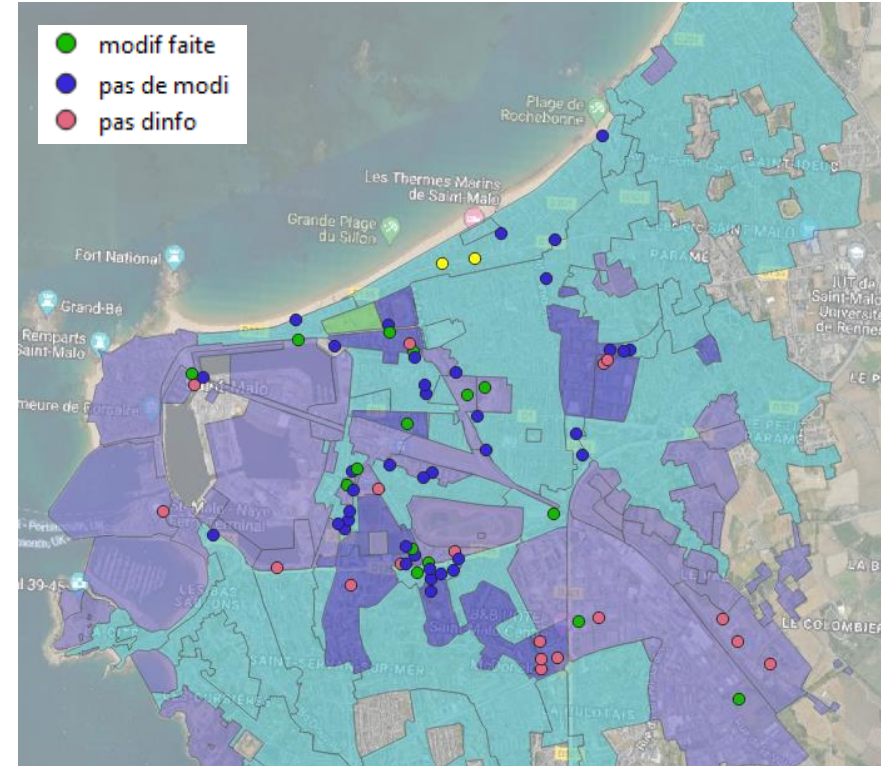
-  Limite bâtie = obstacle 20cm (à ajuster)
-  Limite parcelle = obstacle 0cm (à ajuster) avec frein à l'écoulement

Utilisation du bâti et des parcelles dans le modèle MIKE+



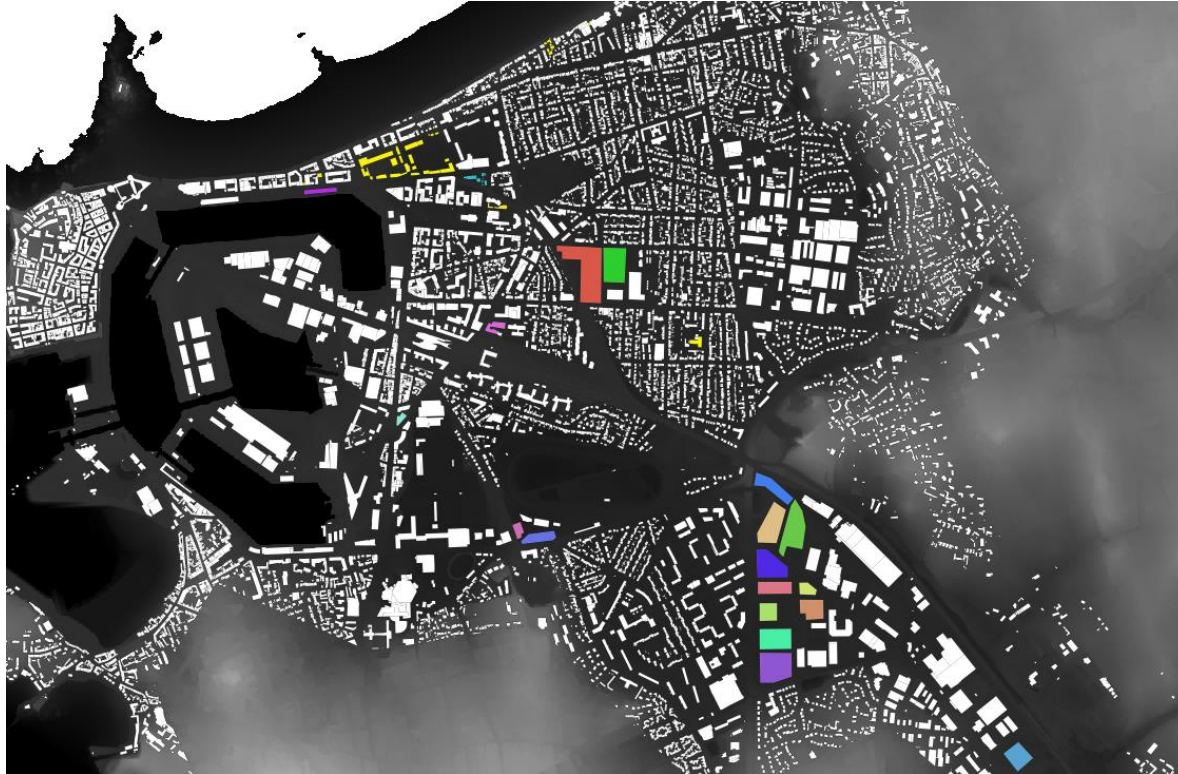
# Prise en compte des projets urbains

- Analyse au cas par cas des 74 projets urbains transmis par la ville de Saint Malo :
  - Identification du zonage "approche bâti ou parcelle" dans lequel un projet se situe
  - Soit l'aménagement ne modifie pas l'approche de base considérée => rien n'est modifié
  - Soit l'aménagement modifie l'approche de base considérée => l'approche est modifiée uniquement dans le secteur de l'aménagement
- (vert) une modification a été apportée (17 projets):
  - la parcelle est modifiée;
  - l'emprise bâtie est modifiée;
  - le MNT est modifié;
- aucune modification n'a été apportée
  - (bleu) Pas d'impact majeur sur l'écoulement (37)
  - (rose) Les informations ne sont pas suffisantes (18)



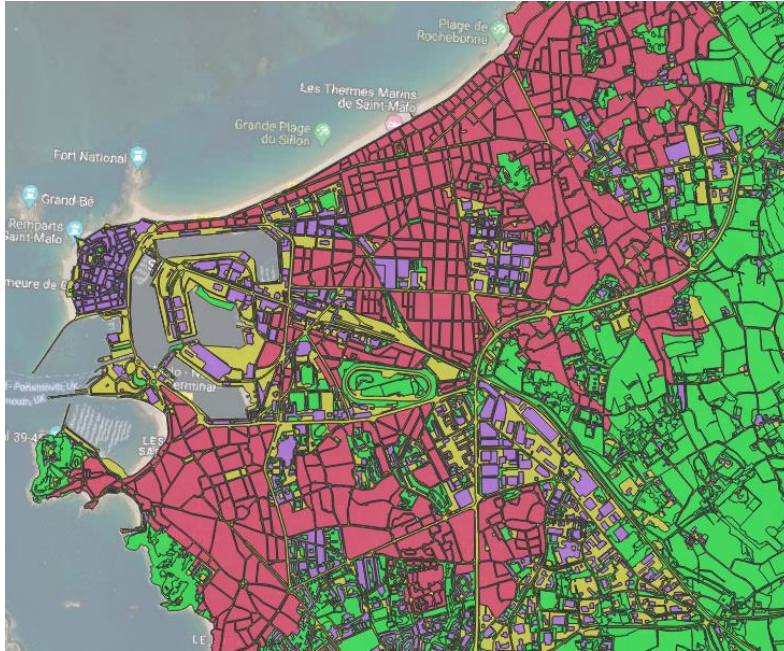
# Prise en compte des projets urbains

- En couleur les emprises de bâtiments modifiées



*Projet de gare  
maritime ?*

# Rugosité de surface



Occupation des sols et rugosité de surface

Type d'occupation OCS	Coefficient de rugosité
Parcelle*	5
Espace vert / zone naturelle	20
Bati**	20
Urbain (culverts compris)	30
Reste du modèle (bassin, mer)	45

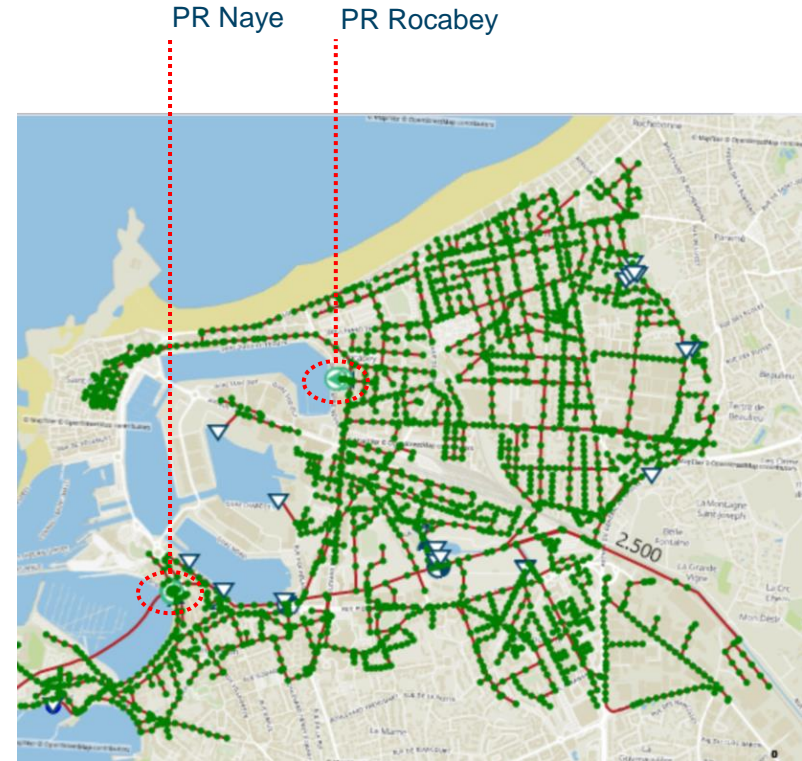
\*les parcelles font déjà l'objet d'un traitement spécifique dans MIKE+ qui pose un frein à l'écoulement via un seuil fictif de 0cm avec un coefficient de seuil volontairement réduit à 1

\*\* les zones bâties font déjà l'objet d'un traitement spécifique dans MIKE+ qui pose un obstacle à l'écoulement via un seuil de 15cm avec un coefficient de seuil classique de 1.84



# Prise en compte des réseaux

- Reprise modèle précédent 2014
- Vérification des branches structurantes
- Modifications prévues :
  - Travaux (mises en séparatif) réalisés depuis 2014;
  - Ajout réseaux secteur Rochebonne nord;
  - Simplification cite d'Alet;
  - Rajout des exutoires en mer chaussée du sillon;
  - Corrections diverses sur base du SIG actualisé;
- *Paramètres à actualiser en fonction des résultats du modèle vs vidéos tempête Pierrick (capacité de certains avaloirs : discussions en cours, etc)*
- *Données/discussions à venir sur*
  - asservissement/consignes ouvrages
  - régulation bassins de rétention

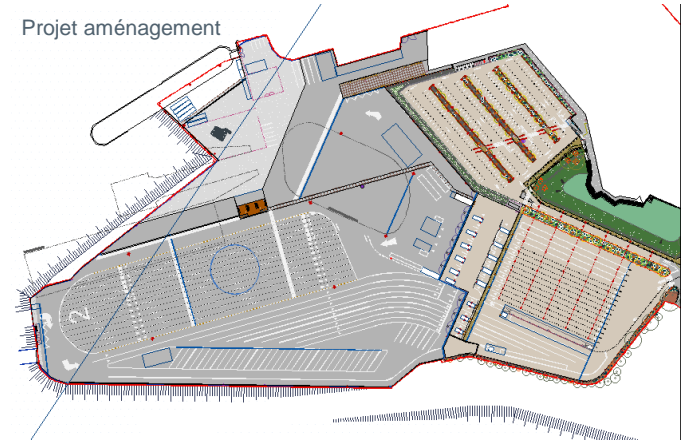


Emprise réseaux précédent PPRSM = emprise "inondable" <8.70 mNGF

# Intégration des aménagements portuaires

- Donnée dwg du projet d'aménagement (Dossier Consultation des Entreprises)
- Résolution spatiale insuffisante de la donnée altimétrique

→ Intégration dans le modèle d'une ligne de crête de l'aménagement



Représentation modèle MIKE+





# Intégration des aménagements PAPI

- Discussions à avoir sur quels aménagements considérer
- Voir comment les intégrer dans le modèle

# 07.

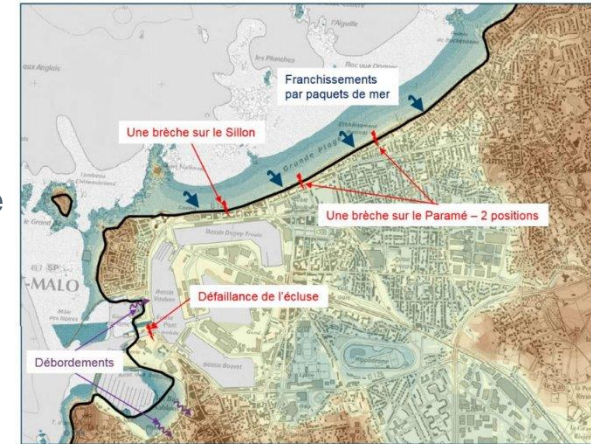
## Scénario de référence



# Généralités

- Franchissement/débordement par le nord et débordement par port, avec deux aléas de référence différents : un niveau et un couple niveau/vagues (avec configuration de plage donnée)
- A priori ensemble des défaillances considérées pour un même scénario
- Pour aléa, soit un scénario par horizon temporel avec une tempête de deux marées successives: une première PM avec aléa de référence niveau seul (débordement) et une seconde avec couple niveau/vague de référence (franchissement). Soit deux scénarios distincts par horizon et fusion des effets pour la cartographie
- Brèches dans les ouvrages front de mer à positionner et à définir (largeur, dynamique) en fonction des données sur l'état de ces derniers. La connaissance des ouvrages permettra à priori de ne pas appliquer la largeur par défaut de 100 m. A déterminer si brèches considérées arrivent pendant l'aléa débordement ou franchissement ou les 2?

=> Éléments à préciser/valider



# Prise en compte des réseaux

- Rappel hypothèses précédent PPRSM:
  - *Pas de saturation préalable des réseaux (pas de pluie concomitante à la submersion)*
  - *Intercepteurs en position évacuation*
  - *Défaillance du poste du pompage du Naye*
- Poste relevage Rocabey : proposition de le considérer également comme défaillant
- Ruissellement : une simulation sera faite sans ressuyage par les réseaux ( considérés comme saturés )=> carte informative

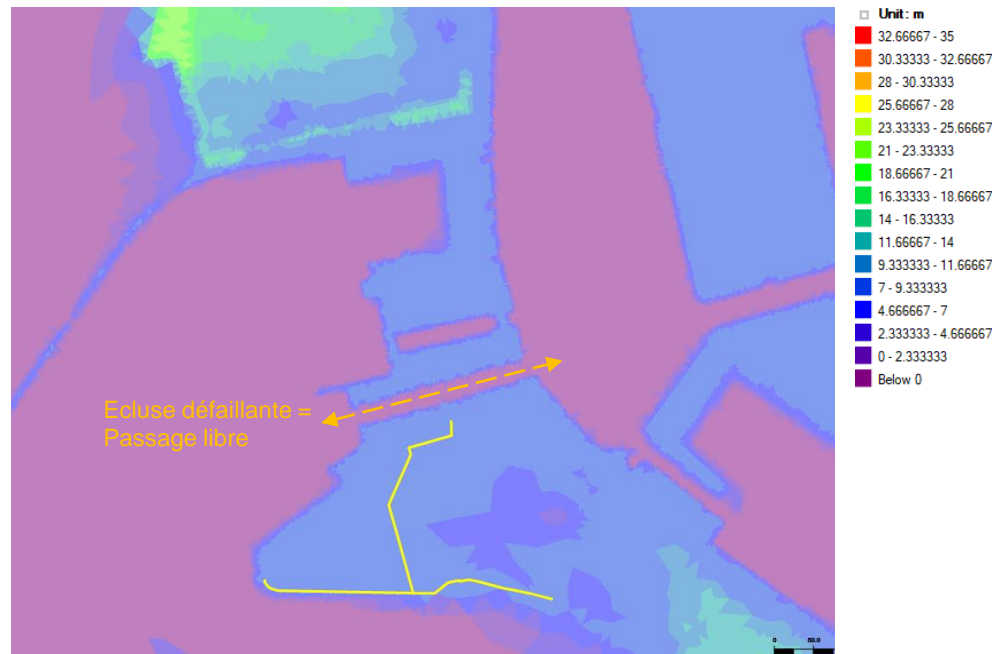


Sous-préfecture rue Roger Vercel

# Hypothèses ouvrages portuaires et bassins

- Précédent PPRSM : écluse défailante = écluse ouverte
- Seule défaillance structurelle : élargissement de l'écluse?
- Condition initiale de niveau dans les bassins à déterminer, en fonction du scénario (*hypothèse 2014 = 5.71 mNGF / 12 m CM*). Pertinence de considérer la gestion en tempête des bassins selon l'aléa de référence considéré?

=> À discuter pour révision PPRSM



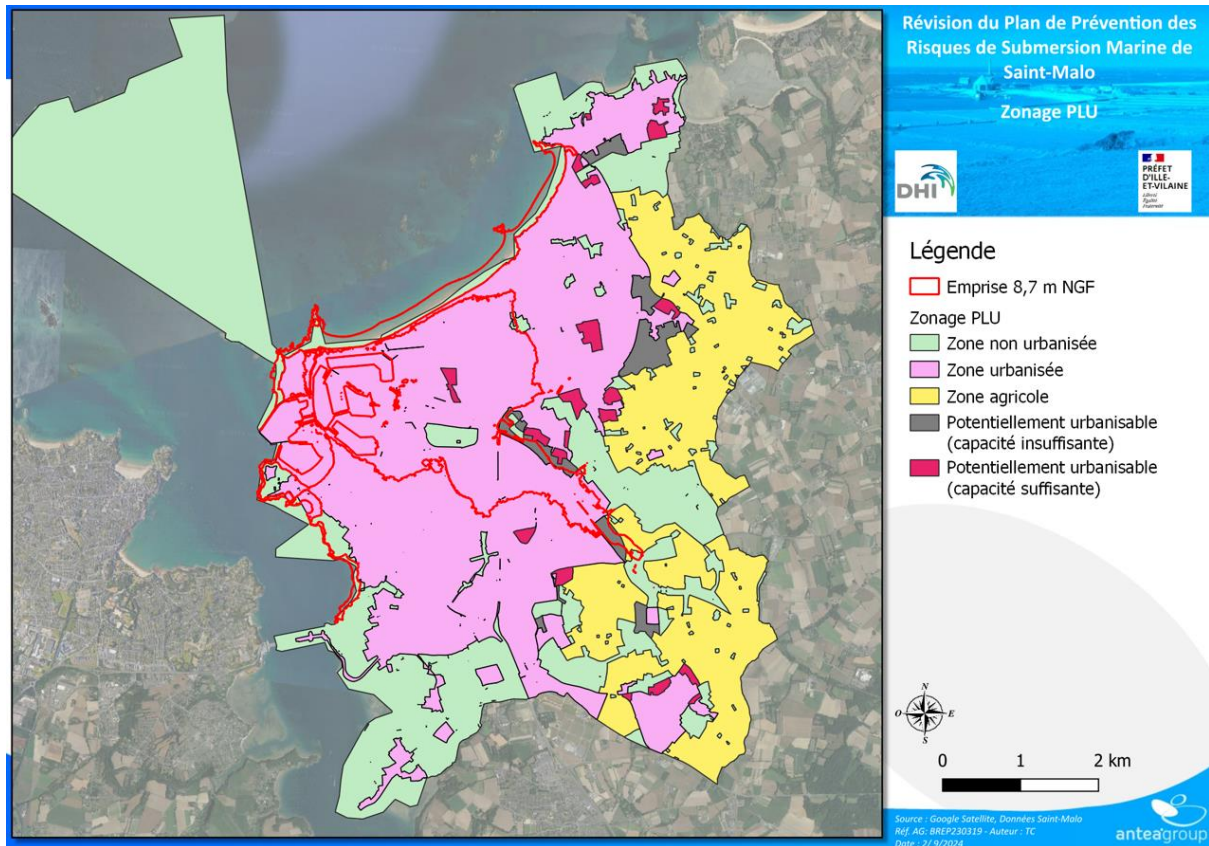
Représentation altimétrique port modèle MIKE+ (digue en jaune)

# 08.

## Première ébauche des cartographies enjeux (provisaires et informatives)

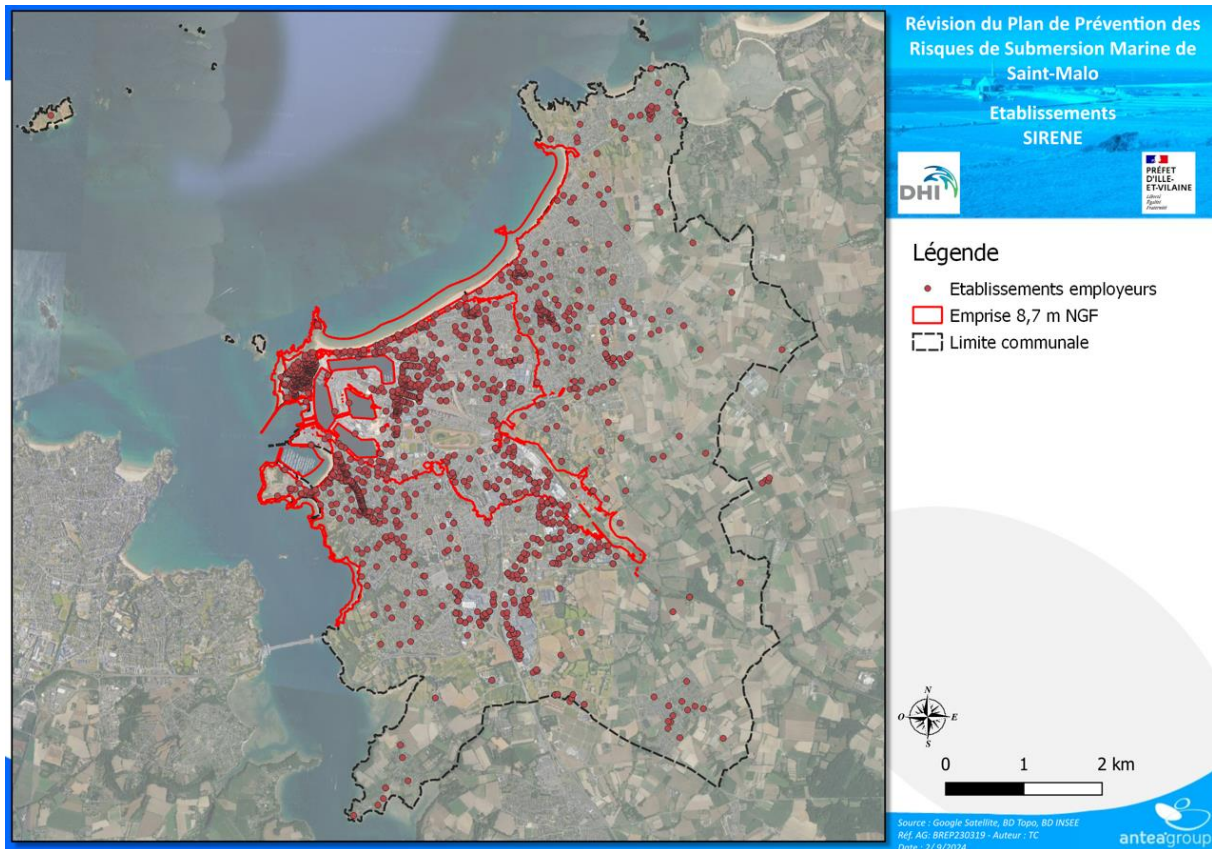


# Zonage PLU

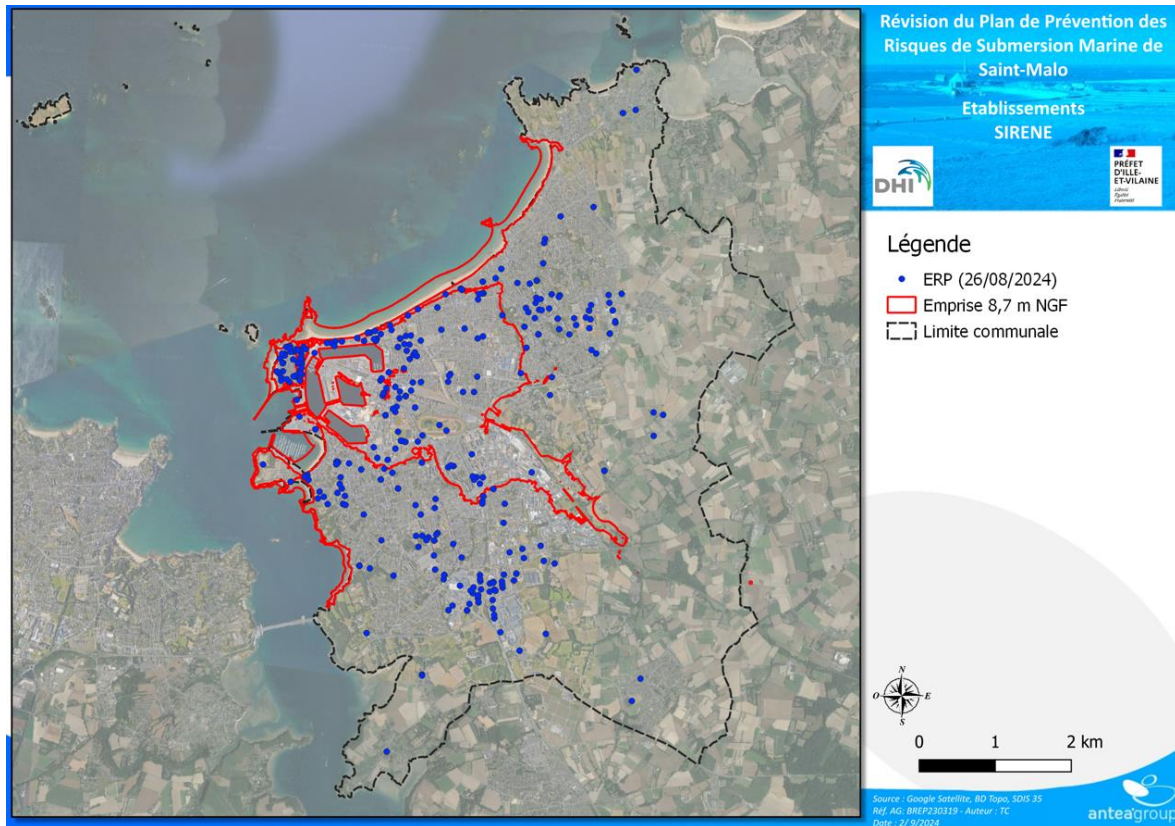




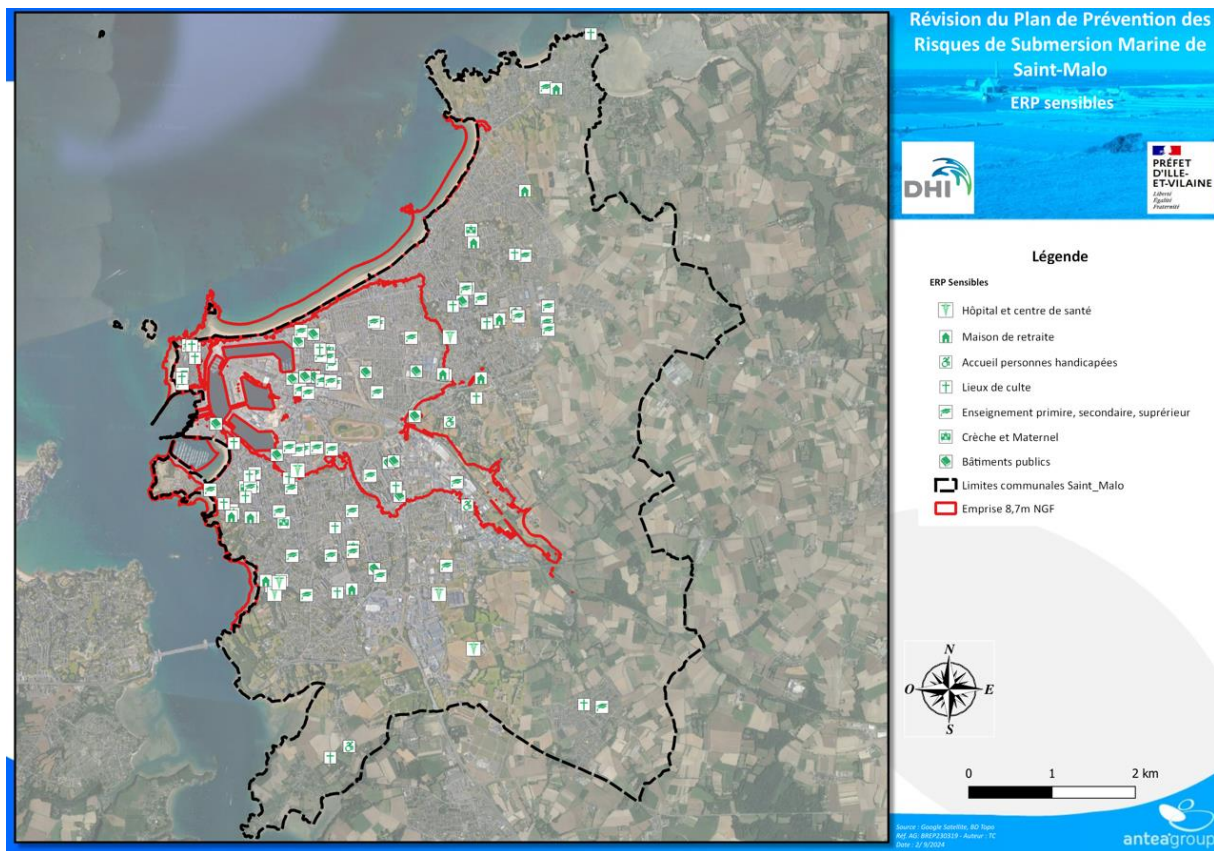
# Etablissements employeurs



# ERP



# ERP sensibles

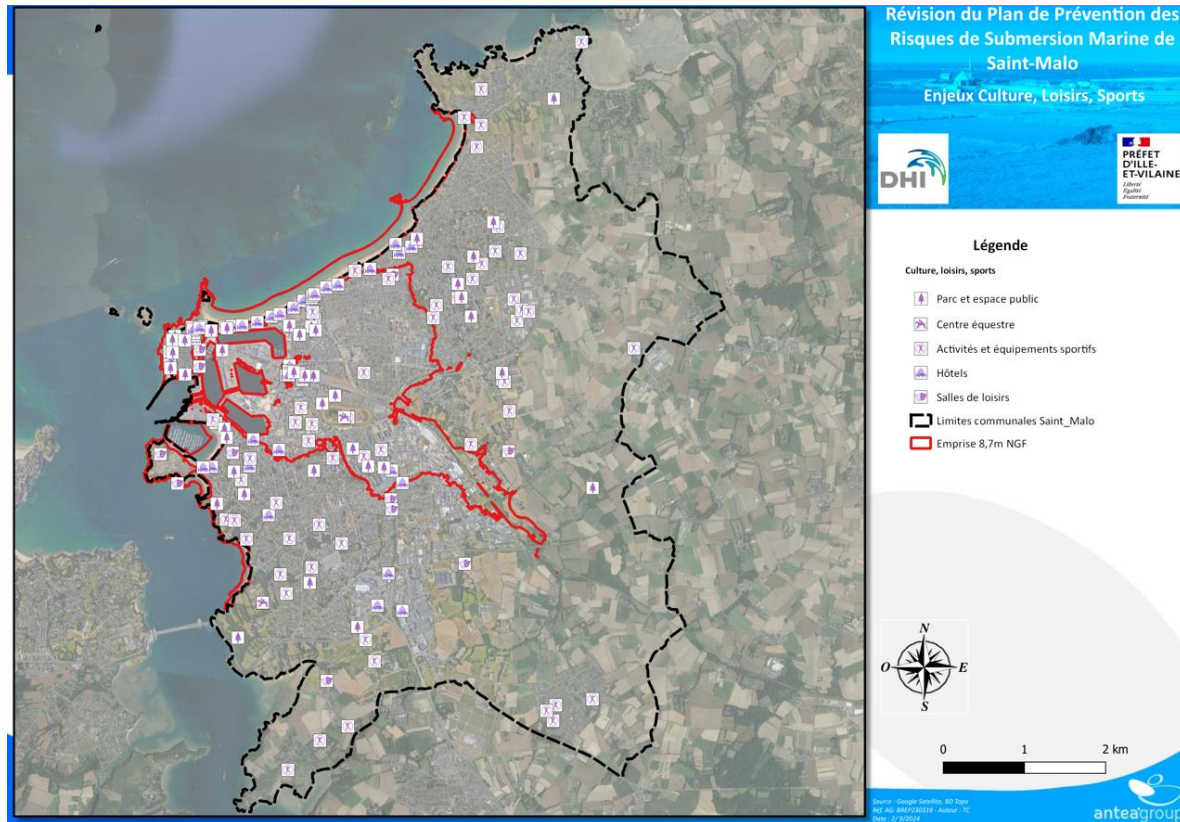




## © DHI A/S



# Culture, loisirs, sports



# Merci

Jérémie Marmuse (jmar@dhigroup.com)

Hugo Cortial (hcor@dhigroup.com)

