

MISSION DE MAITRISE D'ŒUVRE POUR L'EXTENSION DU
Port des Heures Claires



PHASE AVANT-PROJET

Note d'hypothèses sur les données naturelles maritimes

mandataire



MAGNAN
architecture



HYDRO GC

Note d'hypothèses sur les données naturelles maritimes

Emetteur : HydroGC

Version	Date	Etabli par	Vérifié par	Observations
A	13/03/2017	DL	PL	Première diffusion

SOMMAIRE

1	Objet.....	4
2	La bathymétrie	5
3	Le vent	7
3.1	Analyse des vents mesurés à Marignane	7
3.2	Comparaison avec les stations météo d'Istres et de Port de Bouc.....	12
3.3	Comparaison avec les Eurocodes	13
4	Les clapots	15
4.1	Climatologie des états de mer	15
4.2	Clapots de projet	19
4.3	Type de spectres irréguliers.....	23
4.4	Synthèse des clapots retenus.....	24
5	Le niveau d'eau	25
6	Conclusion	28
7	Références.....	28
8	Annexe A : analyse des niveaux d'eau à Fos-sur-mer.....	29
9	Annexe B : Quelques plans de vagues représentatifs des tempêtes.....	32

1 Objet

Le projet d'extension du Port des Heures Claires s'inscrit dans une démarche globale de remise à niveau des infrastructures existantes, d'accueil de nouvelles unités de plaisance et d'harmonisation entre l'espace maritime et le milieu urbain. Les études préliminaires ont conduit à retenir les grands principes suivants pour la restructuration des infrastructures maritimes du port :

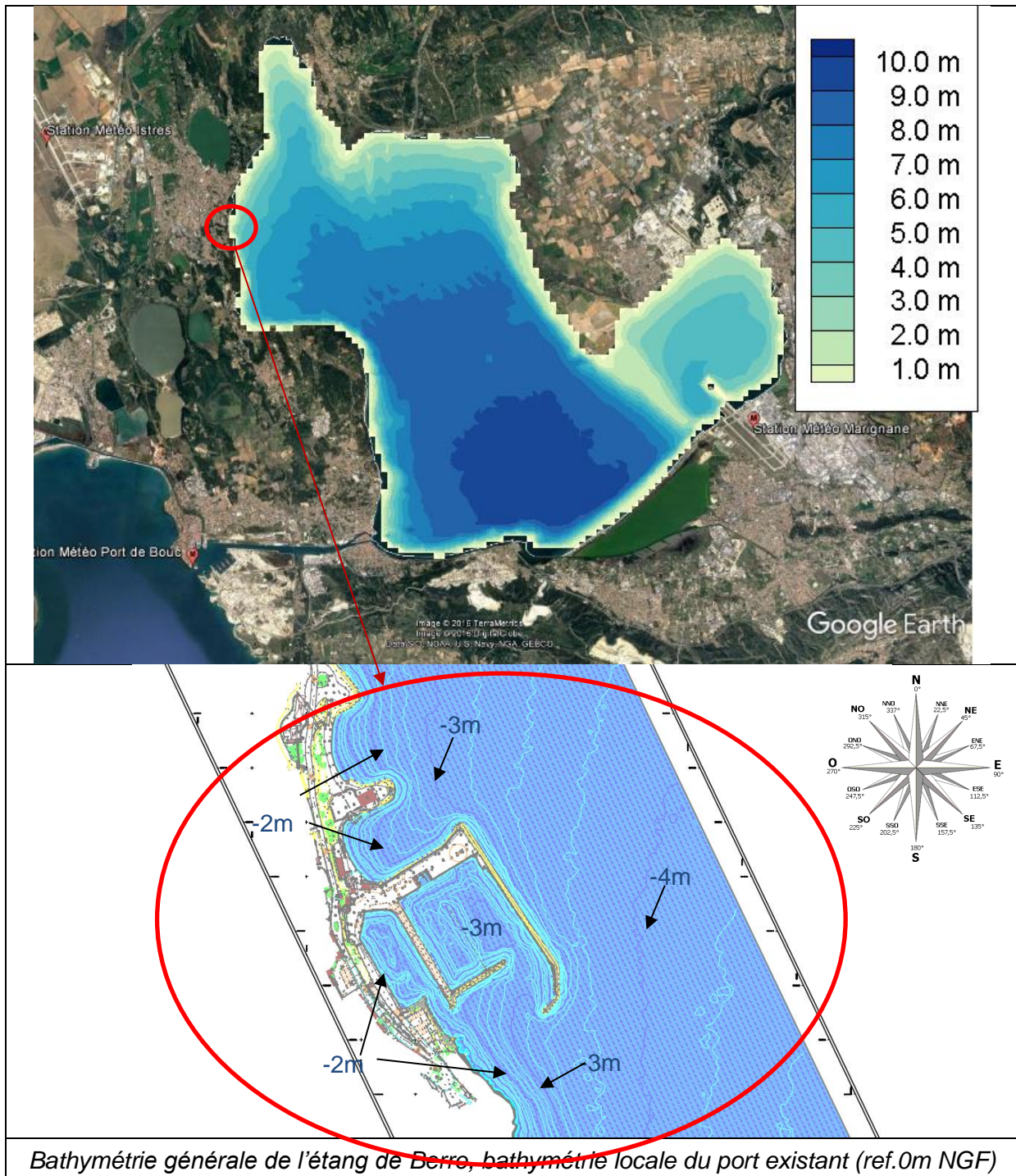
- l'extension de la digue principale vers le Nord et vers le Sud ;
- l'intégration de l'actuelle plage bordant le port côté Nord dans l'espace portuaire, de manière à disposer d'une nouvelle darse accueillant des mouillages ;
- l'aménagement de l'anse située plus au Nord pour accueillir l'espace naturel de mise à l'eau des bateaux de l'école de voile ;
- l'intégration d'une nouvelle cale de mise à l'eau ;
- la construction de nouvelles contre-jetées protégeant le bassin portuaire et les plages aménagées ;
- l'aménagement de nouveaux quais et pontons, dont le quai de la navette à passagers circulant à travers l'étang de Berre, installé dans un espace protégé.

Cette note a pour objectif de rassembler et définir l'ensemble des hypothèses sur les données naturelles maritimes.

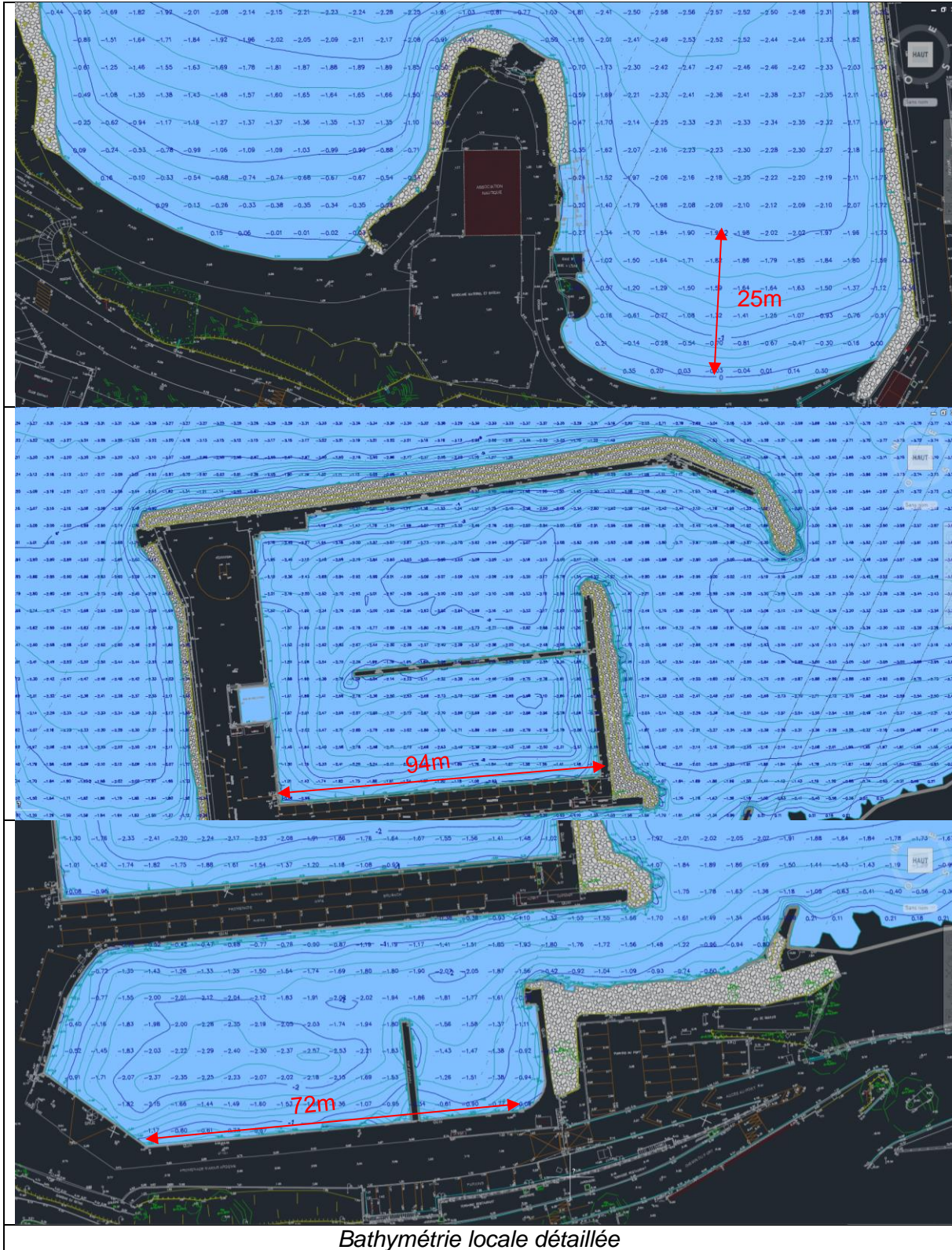
Les résultats présentés sont appliqués comme données d'entrée des études hydrodynamiques et de dimensionnement des ouvrages maritimes.

2 La bathymétrie

La bathymétrie générale de l'étang a été interpolée à partir du pavé numérique numéro 180035 du SHOM, complétée par les données en ligne Navionics pour toute l'anse Sud-Est, au niveau de l'aéroport de Marignane. L'interpolation numérique aboutit aux lignes isobathes ci-dessous. La bathymétrie fine locale dans les environs du port a été fournie par la ville d'Istres.



On note que les profondeurs sont relativement peu élevées sur l'ensemble de l'étang, atteignant environ 10m au plus profond, coté Sud. La digue du port est située vers l'isobathe -3m NGF. Les pentes naturelles sont relativement douces jusqu'à cette cote, de l'ordre de 1% entre -5m et -3m. Les fonds se raidissent progressivement en s'approchant du littoral, atteignant 3% à 6% entre -2m et -1m, puis 10% jusqu'à la ligne de rive.



3 Le vent

3.1 Analyse des vents mesurés à Marignane

La passe du port des Heures Claires est orientée vers le Sud. Le port est protégé des clapots soulevés par le mistral, souvent très violent. Les vents marins d'Est à Sud-Est sont moins forts que le mistral, mais ils soufflent sur un fetch long en direction d'Istres. Ce sont ces vents qui sont les plus pénalisants au regard des clapots sollicitant le port des Heures Claires. Pour caractériser les vents, nous nous sommes procurés les données de la station météorologique de Marignane, située au niveau de l'aéroport, en bordure de l'étang.



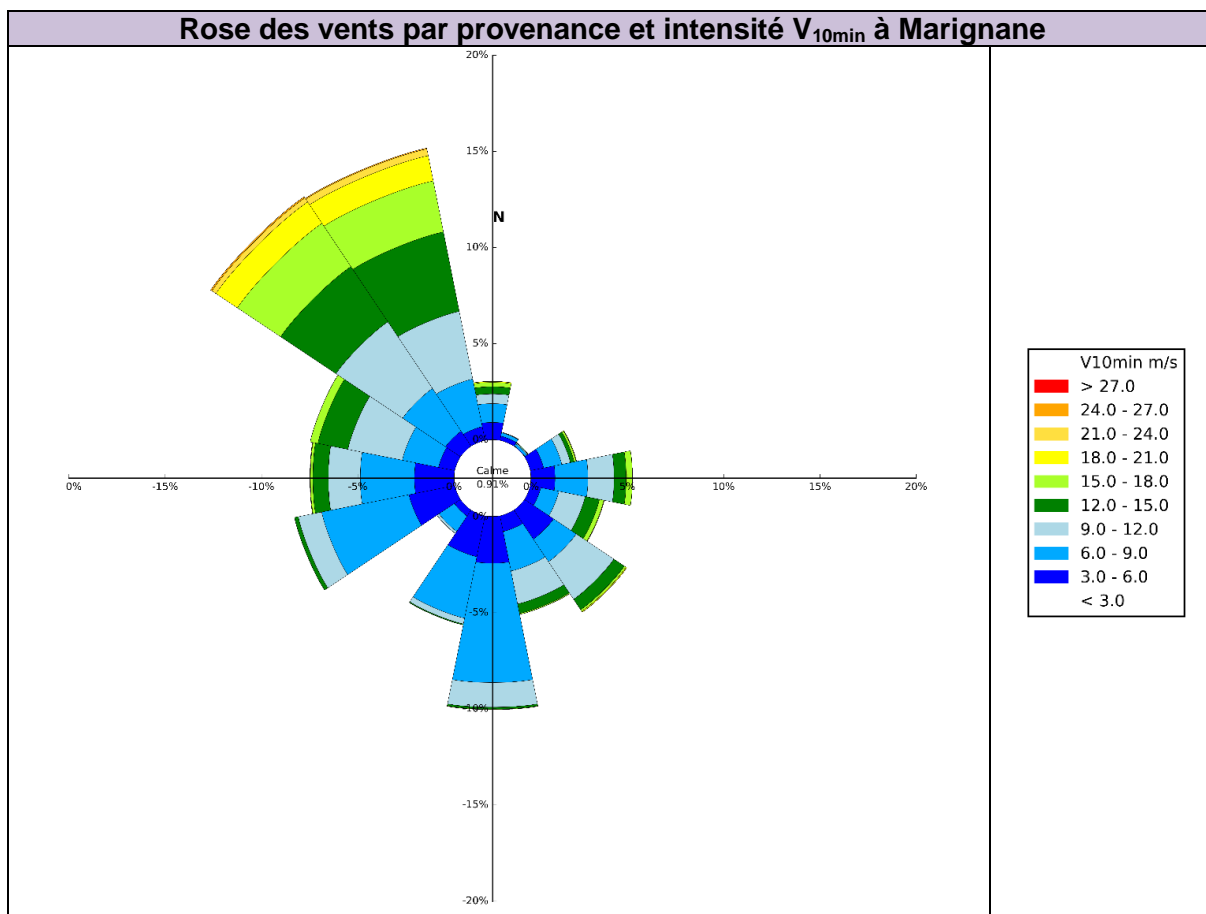
Station METEO FRANCE de l'aéroport de Marignane.

Clapots locaux soulevés par le Mistral et les vents marins d'Est à Sud-Est

Les données de vent ont été analysées sur presque 11 ans, entre le 1^{er} janvier 2006 et le 14 novembre 2016. Le tableau de statistiques et la rose des vents associée sont présentés ci-après. Le tableau et la rose indiquent la vitesse du vent $V_{10\text{min}}$ en moyenne sur 10 minutes, chaque valeur représentant la vitesse maximale $V_{10\text{min}}$ observée au cours d'une journée.

Statistique des vents, valeur maximale quotidienne de la vitesse moyenne sur 10 minutes

V_{10min}	cumulés	toute provenance	SSO	SO	SSO	S	SSE	SE	ESE	E	ENE	NE	NNE	N	NNO	NO	ONO	O
0-3 m/s	100.00%	0.91%	0.00%	0.03%	0.05%	0.00%	0.05%	0.45%	0.13%	0.00%	0.05%	0.00%	0.00%	0.05%	0.00%	0.03%	0.03%	0.05%
3-6m/s	99.09%	18.35%	2.42%	0.38%	2.17%	2.45%	0.83%	1.82%	0.56%	1.26%	0.71%	0.03%	0.23%	0.91%	0.73%	0.93%	0.86%	2.07%
6-9m/s	80.74%	33.45%	4.62%	0.96%	3.26%	6.24%	2.10%	1.41%	0.96%	1.72%	0.96%	0.13%	0.18%	0.98%	2.52%	2.68%	1.92%	2.83%
9-12m/s	47.29%	23.13%	1.24%	0.13%	0.30%	1.29%	1.74%	2.35%	1.39%	1.36%	0.45%	0.05%	0.03%	0.50%	3.58%	4.17%	2.88%	1.67%
12-15m/s	24.16%	13.58%	0.20%	0.00%	0.05%	0.10%	0.50%	0.66%	0.76%	0.63%	0.20%	0.03%	0.00%	0.38%	4.22%	3.46%	1.59%	0.81%
15-18m/s	10.58%	6.99%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.05%	0.10%	0.23%	0.33%	0.10%	0.00%	0.00%	0.23%	2.70%	2.70%	0.40%	0.13%
18-21m/s	3.58%	2.85%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.03%	0.00%	0.03%	0.00%	0.00%	0.05%	1.34%	1.34%	0.00%	0.03%
21-24m/s	0.73%	0.61%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.35%	0.25%	0.00%	0.00%
24-27m/s	0.13%	0.13%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.08%	0.00%	0.00%
Totaux	100.00%	100.00%	8.48%	1.49%	5.83%	10.10%	5.28%	6.84%	4.04%	5.30%	2.50%	0.23%	0.43%	3.11%	15.50%	15.63%	7.67%	7.57%



Le mistral, provenant du secteur NNO à NO, apparaît clairement comme le plus fréquent et le plus intense, dépassant régulièrement $V_{10min}=20m/s$ lors des événements marquants. Les vents d'Est à Sud-Est sont moins forts, dépassant $V_{10min}=15m/s$ 2 à 3 jours par an (0.6 à 0.7% du temps d'après le tableau de statistiques). Dans les tableaux ci-après, on a sélectionné les événements de vents les plus violents enregistrés à la station de Marignane, en distinguant le mistral et les tempêtes des autres provenances.

Mistral les plus intenses sur la période 2006-2016		
Date	Vitesse V_{10min}	Provenance
6/3/2006	25.0m/s	N340
11/4/2006	23.0m/s	N340
1/6/2006	22.0m/s	N330
20/3/2007	22.5m/s	N340
24/1/2009	22.1m/s	N320
17/2/2009	25.3m/s	N320
22/6/2009	22.0m/s	N330
12/10/2009	25.4m/s	N320
19/12/2009	22.9m/s	N330
29/12/2011	22.1m/s	N330
15/2/2012	23.2m/s	N330
28/10/2012	22.1m/s	N310
2/2/2013	23.4m/s	N320
14/3/2013	24.0m/s	N320

Vents de secteur N250 à N50 (hors mistral) I les plus intenses sur la période 2006-2016		
Date	Vitesse V_{10min}	Provenance
29/1/2006	17.0m/s	N100
26/10/2006	16.0m/s	N120
18/2/2007	16.0m/s	N100
4/1/2008	16.2m/s	N90
27/5/2008	18.0m/s	N140
14/12/2008	19.7m/s	N130
26/12/2008	16.6m/s	N70
26/4/2009	16.0m/s	N90
21/10/2009	16.8m/s	N120
3/3/2010	17.6m/s	N70
4/10/2010	16.0m/s	N110
11/10/2010	17.2m/s	N90
13/3/2011	17.0m/s	N90
24/10/2011	16.2m/s	N90
5/11/2011	19.3m/s	N110
6/3/2013	20.9m/s	N70

Le mistral provient du secteur relativement étroit N320 à N340. L'intensité maximale enregistrée depuis 2006 en moyenne sur 10 minutes a été $V_{10min}=25.4$ m/s en novembre 2009, le seuil $V_{10min}=25.0$ m/s (ou 90km/h soit des rafales de l'ordre de 120 à 130km/h) ayant été dépassé trois fois sur la période.

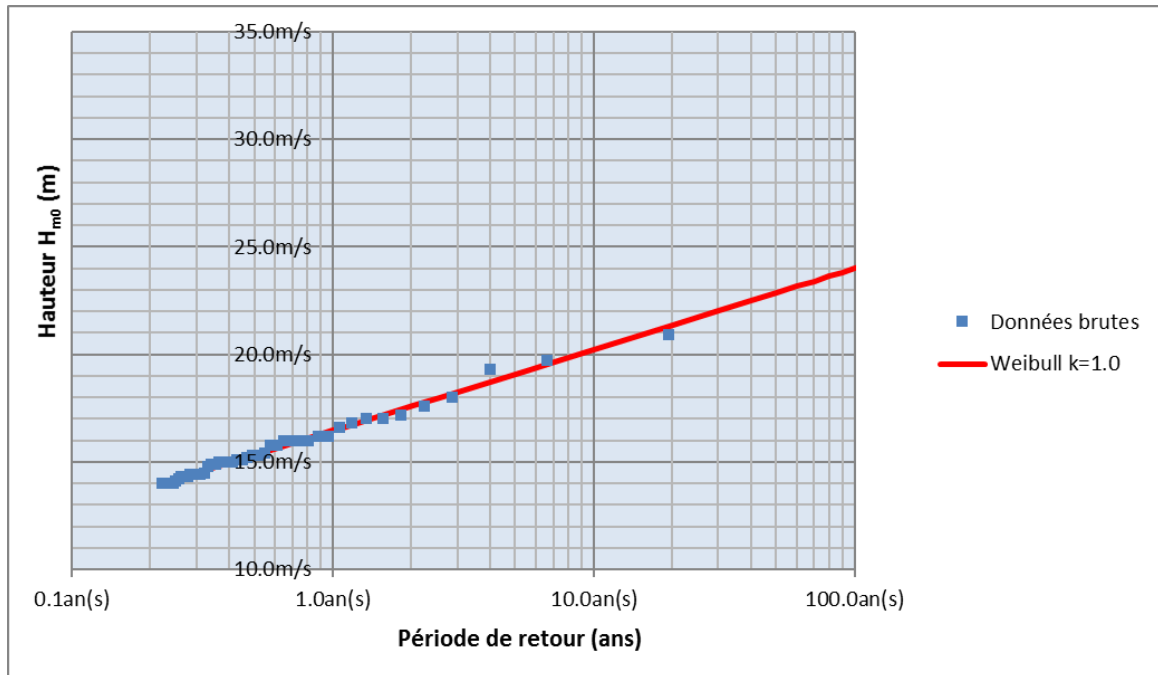
Les plus fortes tempêtes hors mistral proviennent du secteur N70 à N140, soit Est à Sud-Est. Les vents les plus violents observés depuis 10 ans depuis ce secteur ont atteint $V_{10min}=20$ m/s environ (ou 70km/h avec des rafales pouvant atteindre 100km/h).

Les caractéristiques des vents fréquents et exceptionnels ont été extrapolées en appliquant la méthode du renouvellement. La démarche suivante a été suivie :

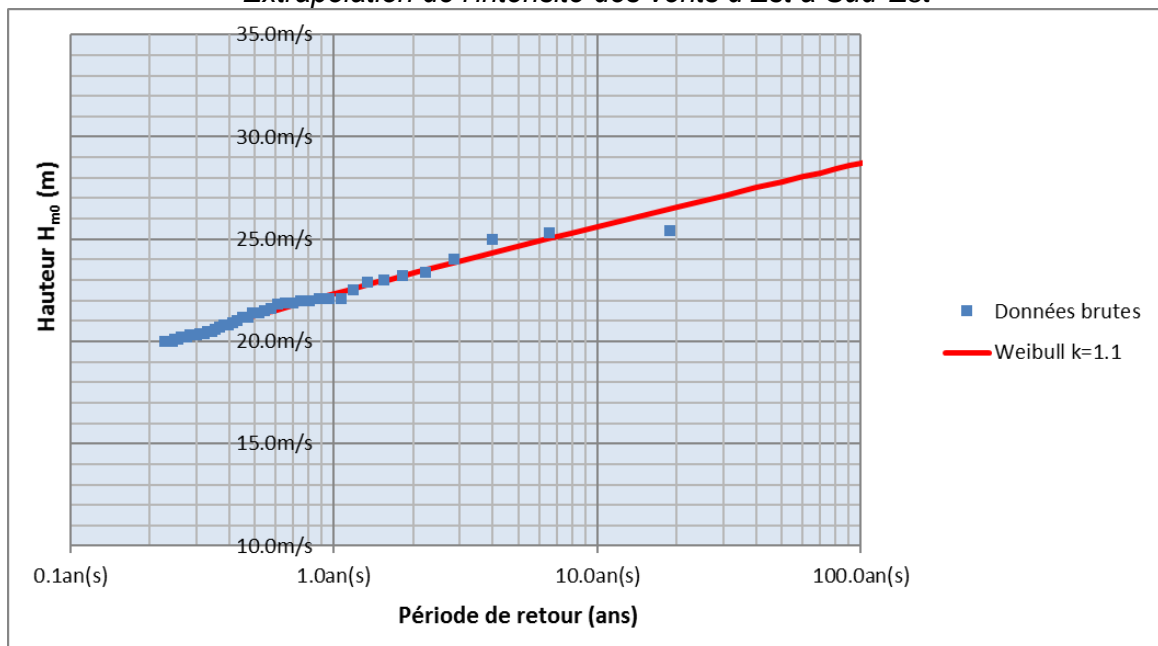
- classification des tempêtes au-dessus d'un seuil arbitraire, permettant d'analyser plusieurs tempêtes indépendantes par an ;
- vérification que les vents les plus forts servant à l'extrapolation proviennent bien du même secteur de provenance ;
- extrapolation par une loi de Weibull en retenant le paramètre de forme le plus approprié, d'abord au sens des moindres écarts entre la courbe et les données brutes, puis par une validation graphique.

Les intensités V_{10min} par occurrence annuelle à centennale, ainsi que les graphes d'extrapolation associés sont présentés ci-après.

Extrapolation des intensités V_{10min}		
Occurrence	Est à Sud-Est	Mistral
annuelle	16.5 m/s soit 59 km/h	22.3 m/s soit 83 km/h
décennale	20.2 m/s soit 73 km/h	25.6 m/s soit 92 km/h
vingtennale	21.3 m/s soit 77 km/h	26.6 m/s soit 96 km/h
cinquantennale	22.9 m/s soit 82 km/h	27.8 m/s soit 100 km/h
centennale	24.0 m/s soit 86 km/h	28.7 m/s soit 103 km/h



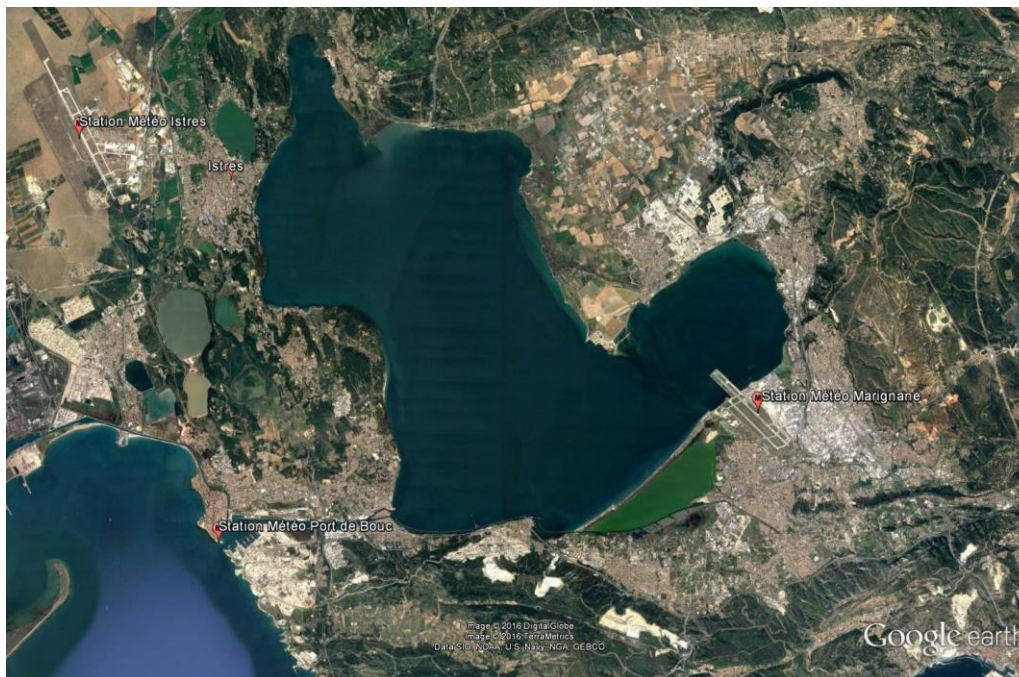
Extrapolation de l'intensité des vents d'Est à Sud-Est



Extrapolation de l'intensité du mistral (station de Marignane)

3.2 Comparaison avec les stations météo d'Istres et de Port de Bouc

Nous disposons par ailleurs de données complémentaires issues des stations d'Istres et de Port de Bouc (8 à 9 ans de mesures, Cf. emplacements ci-dessous). Celles-ci ont été analysées pour comparaison avec les observations faites à Marignane.



Localisations des stations météo Marignane, Istres et Port de Bouc

La même démarche d'extrapolation des données a été effectuée pour évaluer les intensités de projet du mistral et des vents marins. Les valeurs sont comparées dans le tableau de synthèse ci-dessous.

Extrapolation de l'intensité du vent en fonction du secteur de provenance et de la station météorologique			
	1 an	10 ans	50 ans
Mistral			
Marignane	22.3 m/s	25.6 m/s	27.8 m/s
Istres	22.0 m/s	26.0 m/s	28.0 m/s
Port de Bouc	16.0 m/s	20.0 m/s	23.5 m/s
Marins Est à Sud-Est			
Marignane	16.5 m/s	20.2 m/s	22.9 m/s
Istres	12.3 m/s	15.9 m/s	18.7 m/s
Port de Bouc	13.3 m/s	16.4 m/s	18.5 m/s

La station de Port de Bouc est moins exposée au mistral que les stations d'Istres et de Marignane, pour lesquelles le relief environnant est très peu marqué. Les caractéristiques du mistral exceptionnel sont d'ailleurs très proches pour ces deux stations, de l'ordre $V_{10min}=28$ m/s ou 100km/h en occurrence rare cinquantennale.

Le vent d'Est est par contre plus élevé à Marignane que sur les deux autres stations.

On retiendra de façon conservatrice la station de Marignane comme référence pour étudier les clapots soulevés par mistral ou par vent d'Est vers le port des Heures Claires.

3.3 Comparaison avec les Eurocodes

Les préconisations NF EN 1991-1-4 complétées et ajustées à la France par l'annexe nationale NF EN 1991-1-4/NA de mars 2008 sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

Application des Eurocodes Vent dans la zone de Marseille			
Vitesse de base en zone 3	$V_{b,0} = 26\text{m/s}$, vitesse prise en moyenne sur 10 minutes à 10m du sol sur un terrain de catégorie II (rase campagne), période de retour 50 ans.		
Coefficient de direction :	$C_{dir} = 0.85$ pour les vents provenant du N50° à N250°, lesquels sont moins forts que les vents du Nord (mistral) où $C_{dir} = 1$		
Vitesse de référence en rase campagne en moyenne sur 10 minutes à 10m du sol	$V_b = C_{dir} \times V_{b,0}$ $V_b = 22.1\text{m/s}$ [N50°-N250°] $V_b = 26.0\text{m/s}$ mistral		
Hauteurs de référence où l'on calcule les vitesses et pressions	$z_1 = 3.5\text{m}$ $z_2 = 10.0\text{m}$		
Coefficient de rugosité intégrant la surface lisse de l'eau	Longueur de rugosité $z_0=0.005\text{m}$ (mer ou zone côtière, norme française) $k_r = 0.19 \left(\frac{z_0}{0.05}\right)^{0.07} = 0.162$ $C_r = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$ $z_1 = 3.5\text{m}, C_r(z_1) = 1.06$ $z_2 = 10.0\text{m}, C_r(z_2) = 1.23$		
Coefficient d'orographie	$C_0 = 1.0$ (terrain plat)		
Vitesse moyenne sur 10 minutes ayant une période de retour de 50 ans aux hauteurs z_1, z_2 au-dessus du niveau d'eau	$V_m(z) = C_r(z)C_0(z)V_b$ Secteur N50° à N250° $z_1 = 3.5\text{m}, V_m(z_1) = 1.06 \times 22.1 = 23.4 \text{ m/s}$ $z_2 = 10.0\text{m}, V_m(z_2) = 1.23 \times 22.1 = 27.1 \text{ m/s}$ Mistral $z_1 = 3.5\text{m}, V_m(z_1) = 1.06 \times 26 = 27.6 \text{ m/s}$ $z_2 = 10.0\text{m}, V_m(z_2) = 1.23 \times 26 = 31.9 \text{ m/s}$		
Vitesse moyenne sur 10 minute en fonction de la période de retour	<table border="0"> <tr> <td>Secteur N50° à N250° $z_1 = 3.5\text{m}$ 10 ans $V_m(z_1) = 21.5 \text{ m/s}$, 50 ans $V_m(z_1) = 23.4 \text{ m/s}$, 100 ans $V_m(z_1) = 24.2 \text{ m/s}$, $z_2 = 10.0\text{m}$ 10 ans $V_m(z_2) = 24.9 \text{ m/s}$, 50 ans $V_m(z_2) = 27.2 \text{ m/s}$, 100 ans $V_m(z_2) = 28.1 \text{ m/s}$,</td> <td>Mistral $z_1 = 3.5\text{m}$ 10 ans $V_m(z_1) = 25.3 \text{ m/s}$, 50 ans $V_m(z_1) = 27.6 \text{ m/s}$, 100 ans $V_m(z_1) = 28.4 \text{ m/s}$, $z_2 = 10.0\text{m}$ 10 ans $V_m(z_2) = 29.3 \text{ m/s}$, 50 ans $V_m(z_2) = 31.9 \text{ m/s}$, 100 ans $V_m(z_2) = 33.0 \text{ m/s}$,</td> </tr> </table>	Secteur N50° à N250° $z_1 = 3.5\text{m}$ 10 ans $V_m(z_1) = 21.5 \text{ m/s}$, 50 ans $V_m(z_1) = 23.4 \text{ m/s}$, 100 ans $V_m(z_1) = 24.2 \text{ m/s}$, $z_2 = 10.0\text{m}$ 10 ans $V_m(z_2) = 24.9 \text{ m/s}$, 50 ans $V_m(z_2) = 27.2 \text{ m/s}$, 100 ans $V_m(z_2) = 28.1 \text{ m/s}$,	Mistral $z_1 = 3.5\text{m}$ 10 ans $V_m(z_1) = 25.3 \text{ m/s}$, 50 ans $V_m(z_1) = 27.6 \text{ m/s}$, 100 ans $V_m(z_1) = 28.4 \text{ m/s}$, $z_2 = 10.0\text{m}$ 10 ans $V_m(z_2) = 29.3 \text{ m/s}$, 50 ans $V_m(z_2) = 31.9 \text{ m/s}$, 100 ans $V_m(z_2) = 33.0 \text{ m/s}$,
Secteur N50° à N250° $z_1 = 3.5\text{m}$ 10 ans $V_m(z_1) = 21.5 \text{ m/s}$, 50 ans $V_m(z_1) = 23.4 \text{ m/s}$, 100 ans $V_m(z_1) = 24.2 \text{ m/s}$, $z_2 = 10.0\text{m}$ 10 ans $V_m(z_2) = 24.9 \text{ m/s}$, 50 ans $V_m(z_2) = 27.2 \text{ m/s}$, 100 ans $V_m(z_2) = 28.1 \text{ m/s}$,	Mistral $z_1 = 3.5\text{m}$ 10 ans $V_m(z_1) = 25.3 \text{ m/s}$, 50 ans $V_m(z_1) = 27.6 \text{ m/s}$, 100 ans $V_m(z_1) = 28.4 \text{ m/s}$, $z_2 = 10.0\text{m}$ 10 ans $V_m(z_2) = 29.3 \text{ m/s}$, 50 ans $V_m(z_2) = 31.9 \text{ m/s}$, 100 ans $V_m(z_2) = 33.0 \text{ m/s}$,		

Application des Eurocodes Vent dans la zone de Marseille	
Turbulence du vent	$I_v(z) = \frac{k_t}{c_0 \ln(z/z_0)} = \frac{1 - 0.0002(\log_{10}(z_0) + 3)^6}{c_0 \ln(z/z_0)}$ <p> $z_1 = 3.5\text{m}, I_v(z_1) = 0.152$ $z_2 = 10.0\text{m}, I_v(z_2) = 0.131$ </p>
Pression dynamique de pointe	$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)]. q_m(z) \text{ avec } q_m(z) = \frac{1}{2} \rho v_m^2(z)$ <p>Secteur N50° à N250° $z_1 = 3.5\text{m}, q_m(z_1) = 336 \text{ Pa}, q_p(z_1) = 696 \text{ Pa}$ $z_2 = 10.0\text{m}, q_m(z_2) = 453 \text{ Pa}, q_p(z_2) = 870 \text{ Pa}$</p> <p>Mistral $z_1 = 3.5\text{m}, q_m(z_1) = 466 \text{ Pa}, q_p(z_1) = 963 \text{ Pa}$ $z_2 = 10.0\text{m}, q_m(z_2) = 627 \text{ Pa}, q_p(z_2) = 1204 \text{ Pa}$</p>
Vitesses de pointe associées à la vitesse prise en moyenne sur 10 min, en référence à la pression de pointe.	<p>Secteur N50° à N250° $z_1 = 3.5\text{m}, V_m(z_1) = 23.4 \text{ m/s}, V_p(z_1) = 33.7\text{m/s}, \frac{V_p}{V_m} = 1.44$ $z_2 = 10.0\text{m}, V_m(z_2) = 27.1 \text{ m/s}, V_p(z_2) = 37.6\text{m/s}, \frac{V_p}{V_m} = 1.38$</p> <p>Mistral $z_1 = 3.5\text{m}, V_m(z_1) = 27.5 \text{ m/s}, V_p(z_1) = 39.6\text{m/s}, \frac{V_p}{V_m} = 1.44$ $z_2 = 10.0\text{m}, V_m(z_2) = 31.9 \text{ m/s}, V_p(z_2) = 44.3\text{m/s}, \frac{V_p}{V_m} = 1.38$</p>
Vitesse moyenne sur 10 minutes en fonction de la période de retour	<p>Secteur N50° à N250° <u>$z_1 = 3.5\text{m}$</u> 10 ans $V_m(z_1) = 21.5 \text{ m/s},$ 50 ans $V_m(z_1) = 23.4 \text{ m/s},$ 100 ans $V_m(z_1) = 24.2 \text{ m/s},$ <u>$z_2 = 10.0\text{m}$</u> 10 ans $V_m(z_2) = 24.9 \text{ m/s},$ 50 ans $V_m(z_2) = 27.2 \text{ m/s},$ 100 ans $V_m(z_2) = 28.1 \text{ m/s},$</p> <p>Mistral <u>$z_1 = 3.5\text{m}$</u> 10 ans $V_m(z_1) = 25.3 \text{ m/s},$ 50 ans $V_m(z_1) = 27.6 \text{ m/s},$ 100 ans $V_m(z_1) = 28.4 \text{ m/s},$ <u>$z_2 = 10.0\text{m}$</u> 10 ans $V_m(z_2) = 29.3 \text{ m/s},$ 50 ans $V_m(z_2) = 31.9 \text{ m/s},$ 100 ans $V_m(z_2) = 33.0 \text{ m/s},$</p>

La notion de relief très plat, applicable sur les grandes étendues de mer, conduit à des valeurs $V_{10\text{min}}$ extrêmes un peu plus élevées que les valeurs mesurées à la station de Marignane. Cette dernière reste la référence applicable, car elle correspond à des mesures in situ. On retiendra toutefois les valeurs extrêmes à 10m du sol, $V_{10\text{min}}=28.1\text{m/s}$ provenant de l'Est, ou $V_{10\text{min}}=33.0\text{m/s}$ par mistral, comme valeurs de référence majorantes pour les dimensionnements d'ouvrage à l'Etat Limite Ultime.

4 Les clapots

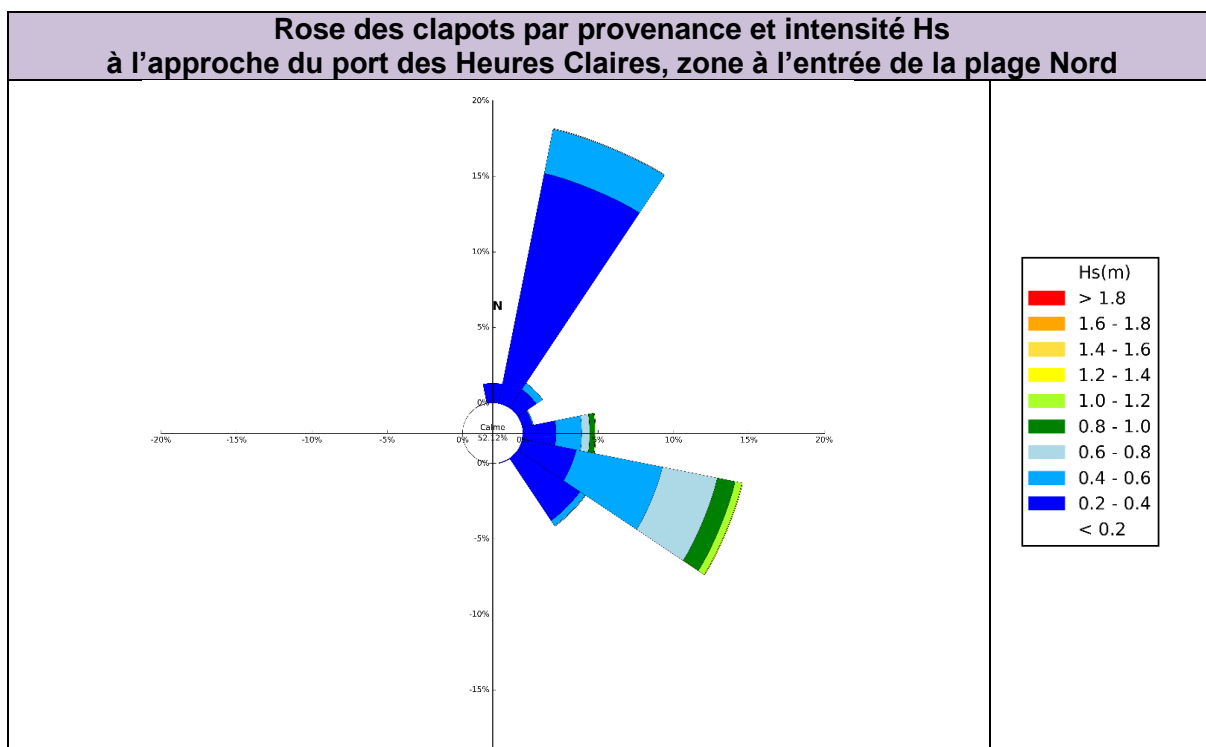
4.1 Climatologie des états de mer

La propagation des clapots à travers l'étang a été simulée à l'aide du logiciel SWAN, intégrant les effets de génération par le vent, réfraction, diffraction et dissipation par déferlement des ondes irrégulières en fréquences et directions.

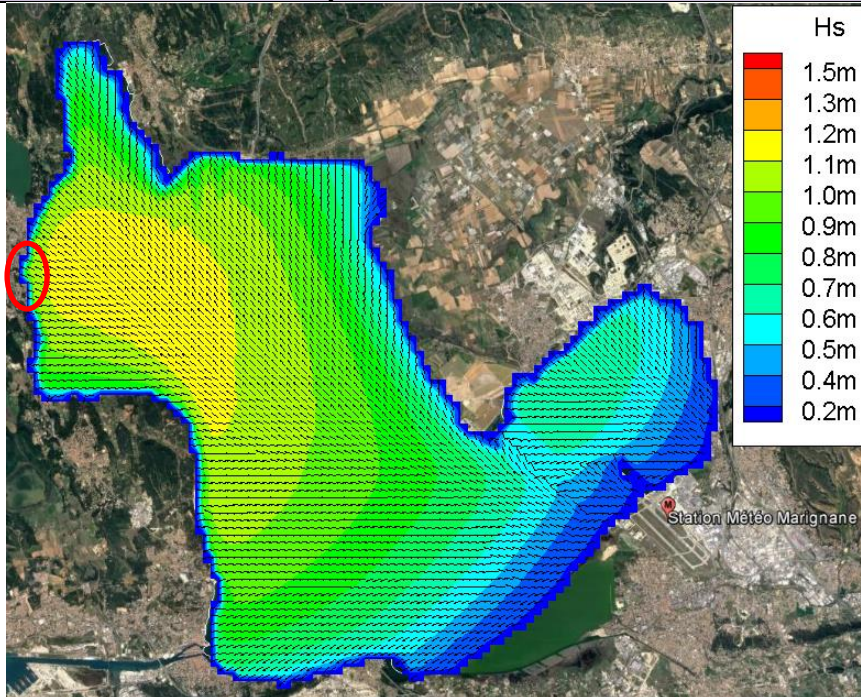
Le modèle SWAN est constitué de quatre maillages emboîtés, de plus en plus fins. Le maillage général s'étend sur tout l'étang, avec des mailles de 200m. Les modèles emboîtés couvrent successivement des zones de 12km (mailles de 100m sur la moitié Nord), 1km (mailles de 33m) et enfin 300m à l'approche de la digue du port (mailles de 11m).

Plusieurs sensibilités ont été effectuées au niveau des paramètres de simulation de manière à extraire des caractéristiques représentatives et majorantes pour des conditions de génération-réfraction vers le port des Heures Claires. Le frottement sur le fond a été négligé, mais l'effet de diffraction par moutonnement, non négligeable sur les ondes très cambrées soulevées à travers l'étang, a été intégré dans les simulations. La valeur maximale de la vitesse moyenne V_{10min} , observée quotidiennement, est appliquée sur toute une journée (24h), ce qui est conservatif au regard des variations à l'échelle de quelques heures. L'état de mer, appliqué sur une journée, correspond en réalité au clapot le plus fort observé au cours de cette journée.

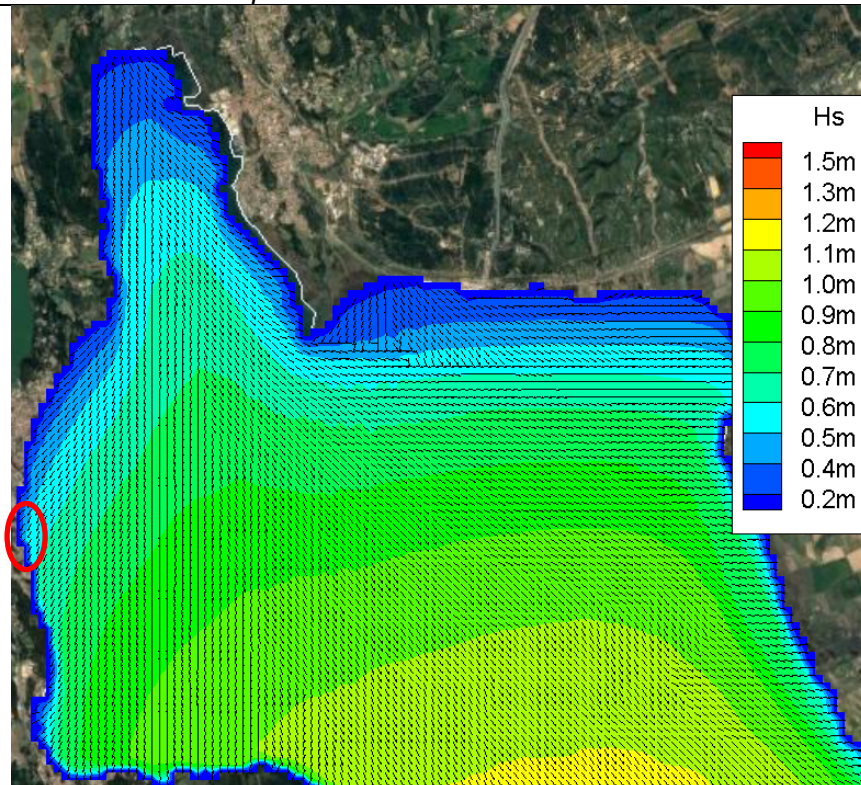
Deux exemples de plans de vagues, illustrant des clapots observés en 2006 et 2012, d'occurrence environ annuelle par vent de Sud-Est et par mistral, sont présentés ci-après. Quelques planches complémentaires, illustrant d'autres clapots plus intenses, sont reportées en annexe de ce rapport. Chaque état de mer maximal quotidien a en réalité été simulé sur toute la durée de données météorologiques disponibles (11 ans). A la rose des vents établie précédemment, correspond la rose des clapots abordant le port des Heures Claires.



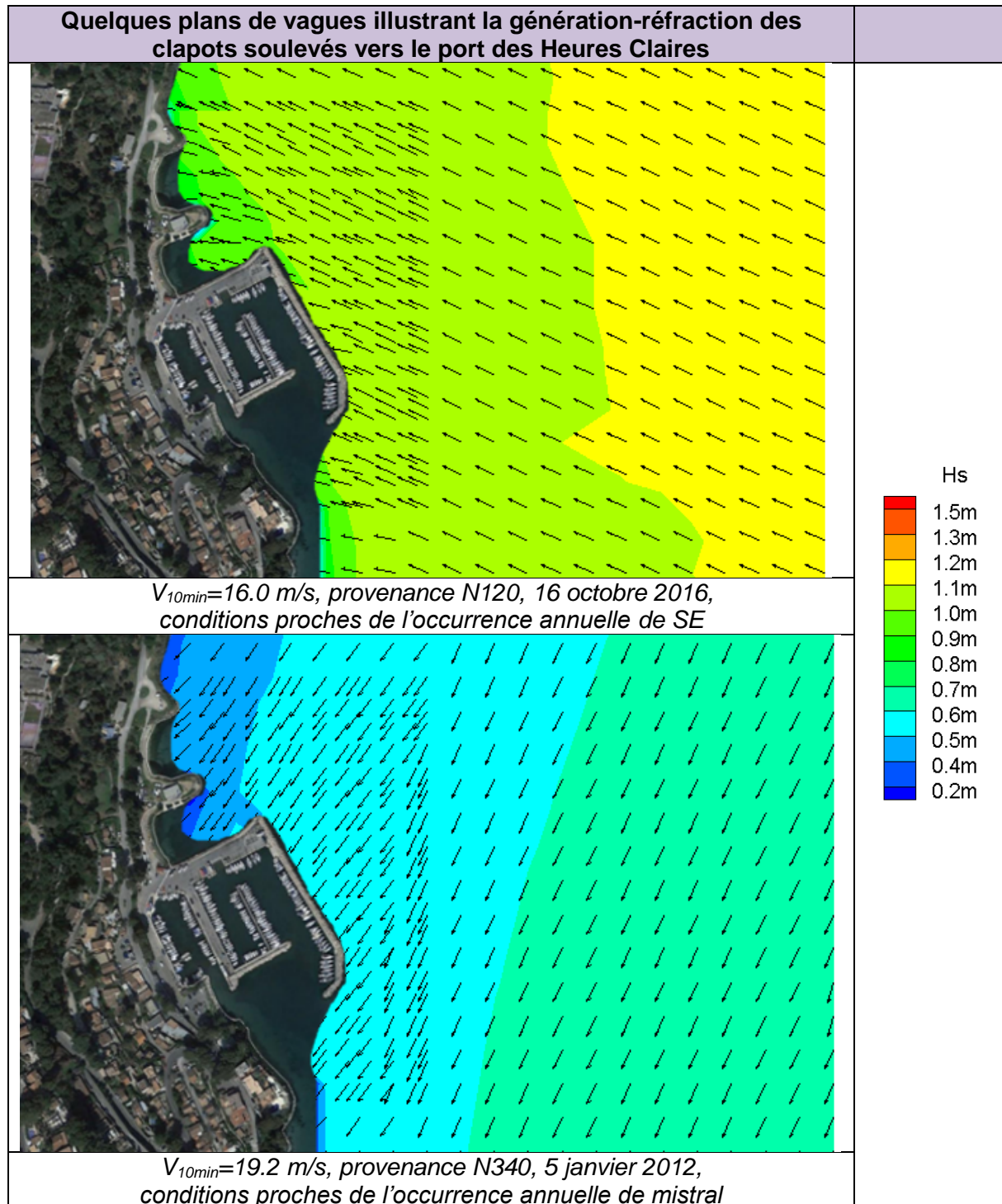
Quelques plans de vagues illustrant la génération-réfraction des clapots soulevés vers le port des Heures Claires



$V_{10min}=16.0$ m/s, provenance N120, 26 octobre 2006,
conditions proches de l'occurrence annuelle de SE



$V_{10min}=19.2$ m/s, provenance N340, 5 janvier 2012,
conditions proches de l'occurrence annuelle de mistral



Le mistral souffle très fort, mais engendre des clapots qui ne sont significatifs que vers le littoral Sud de l'étang. La zone du port des Heures Claires reçoit des clapots dont la Hauteur H_s ne dépasse pas quelques dizaines de cm, après avoir diffracté vers le secteur N30. Les clapots d'Est à Sud-Est sont logiquement plus importants.

Les statistiques de la climatologie des clapots abordant la partie Nord de la zone portuaire (vers -3m NGF) sont détaillées dans les tableaux croisés H_s / provenance et H_s /période T_p ci-dessous.

Statistique des clapots H_s/Provenance à l'approche du port des Heures Claires, zone de la plage Nord

H _{m0} ≈ H _s	cumulés	toute provenance	SSO	SO	SSO	S	SSE	SE	ESE	E	ENE	NE	NNE	N	NNO	NO	ONO	O
0.00m- 0.20m	100.00%	52.12%	0.00%	0.18%	0.08%	0.15%	11.62%	11.27%	3.05%	0.61%	0.30%	2.34%	14.60%	5.24%	1.71%	0.83%	0.13%	0.00%
0.20m- 0.40m	47.88%	29.93%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	4.97%	3.66%	2.22%	0.68%	1.49%	15.53%	1.31%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%
0.40m- 0.60m	17.95%	11.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.40%	5.82%	1.71%	0.08%	0.50%	2.98%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
0.60m- 0.80m	6.45%	4.34%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	3.71%	0.53%	0.00%	0.00%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
0.80m- 1.00m	2.12%	1.56%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.21%	0.35%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
1.00m- 1.20m	0.55%	0.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.45%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
1.20m- 1.40m	0.05%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
1.40m- 1.60m	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
1.60m- 1.80m	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Totaux	100.00%	100.00%	0.00%	0.18%	0.08%	0.15%	11.67%	16.69%	17.95%	5.47%	1.06%	4.34%	33.16%	6.56%	1.74%	0.83%	0.13%	0.00%

Statistique des clapots H_s/T_p à l'approche du port des Heures Claires, zone de la plage Nord

H _{m0} ≈ H _s	cumulés	toute provenance	0.00-0.30s	0.30-0.60s	0.60-0.90s	0.90-1.20s	1.20-1.50s	1.50-1.80s	1.80-2.10s	2.10-2.40s	2.40-2.70s	2.70-3.00s	3.00-3.30s	3.30-3.60s	3.60-3.90s	3.90-4.20s	4.20-4.50s	4.50-4.80s
0.00m- 0.20m	100.00%	52.09%	0.00%	0.00%	0.00%	12.59%	14.98%	16.25%	8.27%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
0.20m- 0.40m	47.91%	29.94%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	1.03%	9.18%	15.67%	3.96%	0.08%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
0.40m- 0.60m	17.96%	11.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.15%	2.27%	6.66%	2.40%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
0.60m- 0.80m	6.46%	4.34%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.89%	1.97%	0.43%	0.05%	0.00%	0.00%
0.80m- 1.00m	2.12%	1.56%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.30%	0.58%	0.68%	0.00%	0.00%
1.00m- 1.20m	0.55%	0.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.38%	0.13%	0.00%
1.20m- 1.40m	0.05%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.00%
1.40m- 1.60m	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
1.60m- 1.80m	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Totaux	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	12.59%	15.01%	17.28%	17.46%	15.82%	6.23%	6.74%	4.29%	2.30%	1.01%	1.11%	0.18%	0.00%

Nota : H_{m0} est la hauteur significative spectrale telle que $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$, m₀ étant la quantité d'énergie associée à l'état de mer. Au large, et dans une moindre mesure hors zone de déferlement, H_{m0} est proche de la hauteur significative H_s ou H_{1/3}, égale à la moyenne du 1/3 supérieur des vagues les plus hautes. La plus grande vague du train de houle a une hauteur H_{max} de l'ordre de 1.8 à 2 fois H_s.

4.2 Clapots de projet

Dans les deux tableaux ci-après, on a extrait les caractéristiques des clapots les plus forts rencontrés sur la période 2006-2016, provenant du secteur Est à Sud-Est, ou soulevés par le mistral.

Clapots de vents d'Est à Sud-Est les plus intenses sur la période 2006-2016, entrée Sud du port					
Date	$V_{10\text{min}}$	Provenance du vent	Hauteur H_s	Provenance	Période T_P
29/1/2006	17.0m/s	N100	1.08m	N104	4.2s
26/10/2006	16.0m/s	N120	1.03m	N109	3.9s
18/2/2007	16.0m/s	N100	1.01m	N104	3.9s
4/1/2008	16.2m/s	N90	1.02m	N101	4.0s
27/5/2008	18.0m/s	N140	1.07m	N114	4.5s
14/12/2008	19.7m/s	N130	1.24m	N111	4.5s
25/4/2009	16.0m/s	N110	1.03m	N107	3.9s
21/10/2009	16.8m/s	N120	1.08m	N109	4.2s
28/2/2010	16.4m/s	N130	1.03m	N111	4.1s
4/10/2010	16.0m/s	N110	1.03m	N107	3.9s
11/10/2010	17.2m/s	N90	1.08m	N101	4.3s
13/3/2011	17.0m/s	N90	1.07m	N101	4.2s
24/10/2011	16.2m/s	N90	1.02m	N101	4.0s
5/11/2011	19.3m/s	N110	1.23m	N107	4.5s
6/3/2013	20.9m/s	N70	1.17m	N92	4.2s
13/9/2015	15.8m/s	N110	1.02m	N107	3.9s
3/10/2015	15.8m/s	N120	1.01m	N109	3.9s

La hauteur significative des clapots soulevés par le vent marin d'Est peut dépasser $H_s=1.2\text{m}$, associée à une période pic T_P de l'ordre de 4.5s, soit une longueur d'onde d'environ 20m à l'approche du port. Selon ces simulations, en principe conservative, les clapots de hauteur supérieure à $H_s=1\text{m}$ apparaîtraient une à deux fois par an.

Clapots de mistral les plus intenses sur la période 2006-2016, plage au Nord du port					
Date	V _{10min}	Provenance du vent	Hauteur H _s	Provenance	Période T _P
2/1/2006	15.0m/s	N350	0.45m	N38	2.6s
18/1/2006	19.0m/s	N340	0.50m	N32	2.7s
7/2/2006	16.0m/s	N350	0.48m	N38	2.7s
6/3/2006	25.0m/s	N340	0.64m	N31	3.3s
11/4/2006	23.0m/s	N340	0.58m	N30	3.1s
30/5/2006	21.0m/s	N340	0.52m	N30	2.9s
6/7/2006	14.0m/s	N0	0.45m	N41	2.7s
3/8/2006	18.0m/s	N350	0.54m	N38	2.7s
30/8/2006	18.0m/s	N340	0.49m	N34	2.7s
2/11/2006	15.0m/s	N350	0.45m	N38	2.6s
12/11/2006	20.8m/s	N330	0.45m	N24	2.7s
22/11/2006	18.0m/s	N340	0.49m	N34	2.7s
12/1/2007	17.3m/s	N340	0.47m	N33	2.7s
24/1/2007	21.0m/s	N330	0.46m	N24	2.7s
10/3/2007	17.9m/s	N340	0.49m	N34	2.7s
20/3/2007	22.5m/s	N340	0.56m	N30	3.1s
18/5/2007	18.7m/s	N340	0.50m	N33	2.7s
9/8/2007	17.7m/s	N350	0.54m	N38	2.7s
4/9/2007	18.7m/s	N340	0.50m	N33	2.7s
11/9/2007	18.3m/s	N340	0.49m	N33	2.7s
18/9/2007	16.7m/s	N340	0.45m	N33	2.7s
18/10/2007	17.9m/s	N340	0.49m	N34	2.7s
30/10/2007	17.0m/s	N350	0.51m	N38	2.7s
6/11/2007	21.9m/s	N340	0.54m	N30	3.1s
15/11/2007	20.0m/s	N340	0.50m	N31	2.7s
4/12/2007	19.6m/s	N340	0.50m	N31	2.7s
11/12/2007	18.6m/s	N340	0.50m	N33	2.7s
5/3/2008	17.0m/s	N350	0.51m	N38	2.7s
25/3/2008	16.2m/s	N350	0.49m	N38	2.7s
21/7/2008	16.7m/s	N340	0.45m	N33	2.7s
17/2/2009	25.3m/s	N320	0.49m	N12	2.7s
22/6/2009	22.0m/s	N330	0.49m	N24	2.7s
12/10/2009	25.4m/s	N320	0.49m	N12	2.7s
16/10/2009	21.4m/s	N330	0.47m	N24	2.7s
19/12/2009	22.9m/s	N330	0.51m	N23	2.9s
5/3/2010	17.8m/s	N340	0.49m	N34	2.7s
29/12/2011	22.1m/s	N330	0.49m	N24	2.7s
5/1/2012	19.2m/s	N340	0.50m	N32	2.7s
15/2/2012	23.2m/s	N330	0.51m	N23	2.9s
14/3/2013	24.0m/s	N320	0.45m	N13	2.7s

Parmi les différents secteurs de mistral, c'est celui provenant du N340 qui soulève les clapots les plus forts à l'approche du port des Heures Claires. Le mistral provenant du N320, même plus violent, engendre des clapots qui sont fortement atténués lorsqu'ils abordent le littoral Istréen. Le clapot de mistral le plus fort sur la période 2006-2016 aurait dépassé H_s=0.6m pour T_P=3.3s. Les clapots de mistral, relativement fréquents, sont peu énergétiques par rapport aux clapots de Sud-Est.

De manière analogue à l'analyse des vents, la méthode du renouvellement a été appliquée sur l'historique des coups de mer indépendants, de façon à extraire les caractéristiques des clapots de projet. On obtient les résultats synthétiques suivants :

Extrapolation des clapots à l'approche du port			
Occurrence	Est à Sud-Est (entrée Sud)	Est à Sud-Est (entrée Nord)	Mistral (entrée Nord)
annuelle	$H_S=1.05\text{m}$, $T_P=4.0\text{s}$, N100 à N110	$H_S=1.02\text{m}$, $T_P=4.0\text{s}$, N100 à N110	$H_S=0.50\text{m}$, $T_P=2.7\text{s}$, N20 à N40
décennale	$H_S=1.25\text{m}$, $T_P=4.5\text{s}$, N100 à N110	$H_S=1.26\text{m}$, $T_P=4.5\text{s}$, N100 à N110	$H_S=0.60\text{m}$, $T_P=3.2\text{s}$, N20 à N40
vingtennale	$H_S=1.35\text{m}$, $T_P=4.8\text{s}$, N100 à N110	$H_S=1.34\text{m}$, $T_P=4.8\text{s}$, N100 à N110	$H_S=0.65\text{m}$, $T_P=3.3\text{s}$, N20 à N40
cinquantennale	$H_S=1.45\text{m}$, $T_P=4.9\text{s}$, N100 à N110	$H_S=1.43\text{m}$, $T_P=4.9\text{s}$, N100 à N110	$H_S=0.68\text{m}$, $T_P=3.4\text{s}$, N20 à N40
centennale	$H_S=1.50\text{m}$, $T_P=5.0\text{s}$, N100 à N110	$H_S=1.50\text{m}$, $T_P=5.0\text{s}$, N100 à N110	$H_S=0.72\text{m}$, $T_P=3.5\text{s}$, N20 à N40
Extrême ELU	$H_S=1.65\text{m}$, $T_P=5.2\text{s}$, N100 à N110	$H_S=1.65\text{m}$, $T_P=5.2\text{s}$, N100 à N110	$H_S=0.90\text{m}$, $T_P=4.0\text{s}$, N40

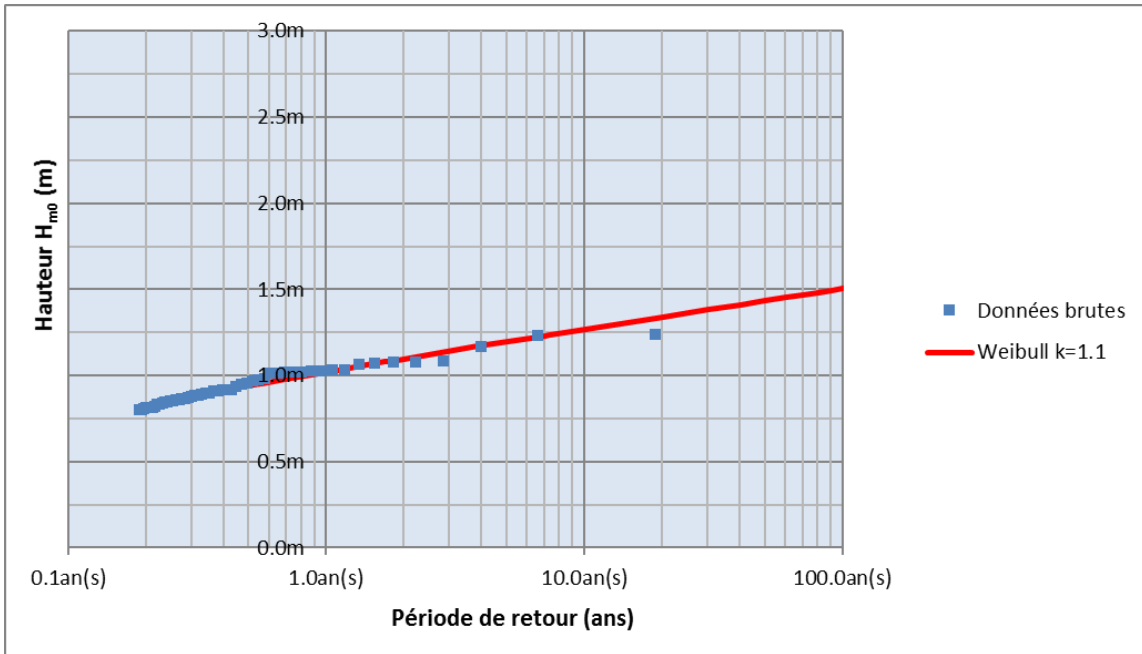
Les caractéristiques des houles incidentes de Sud-Est, abordant aussi bien l'entrée Nord que l'entrée Sud du port, sont très proches. On retiendra les valeurs à l'entrée Sud, c'est-à-dire au large immédiat de la passe actuelle du port.

Par ailleurs, on retiendra les caractéristiques des clapots de mistral abordant le côté Nord du projet d'extension, ceux-ci ayant une influence sur la tenue des plages adjacentes au port, alors qu'ils ne pénètrent pratiquement pas dans le bassin portuaire.

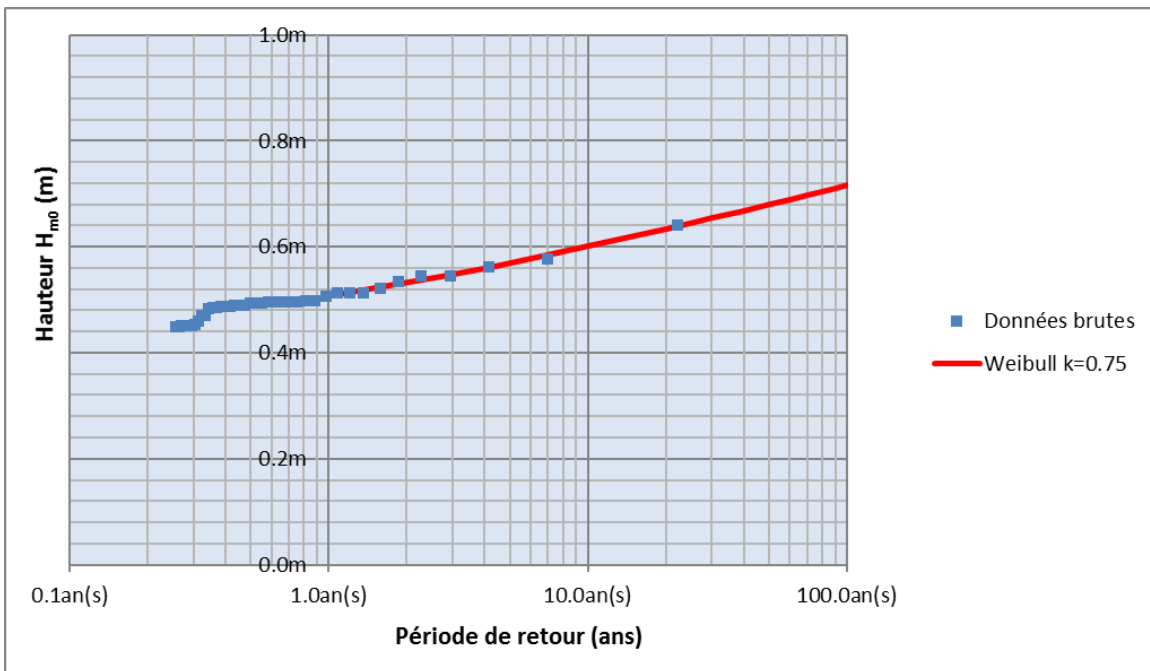
Les conditions extrêmes ELU ont été définies à partir de simulations où les fortes intensités de vent issues des Eurcodes ont été appliquées.

Commune d'Istres

Extension du port des Heures Claires. Analyse des données naturelles maritimes



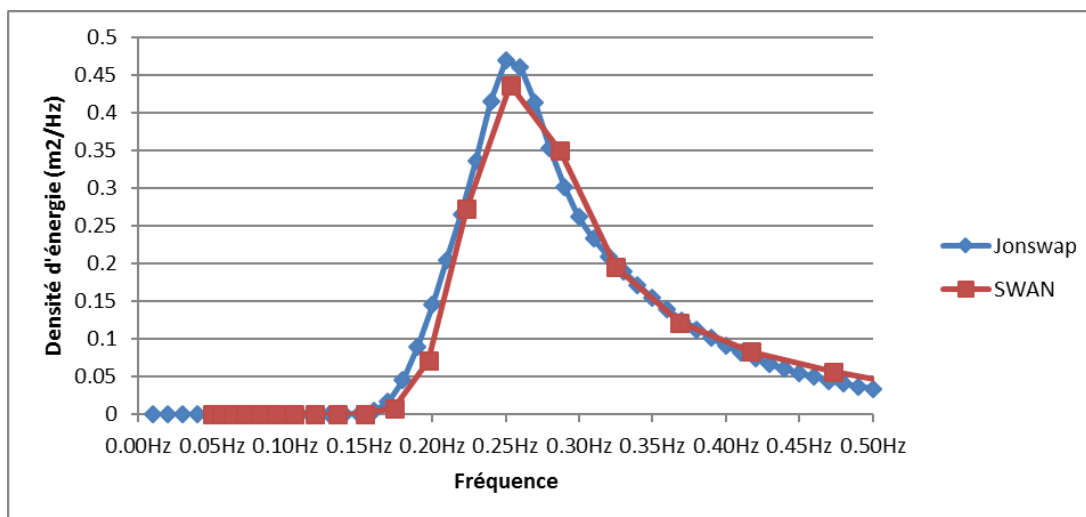
Extrapolation des hauteurs de clapot d'Est à Sud-Est (passe côté Sud)



Extrapolation des hauteurs de clapot de mistral (côté Nord de la digue)

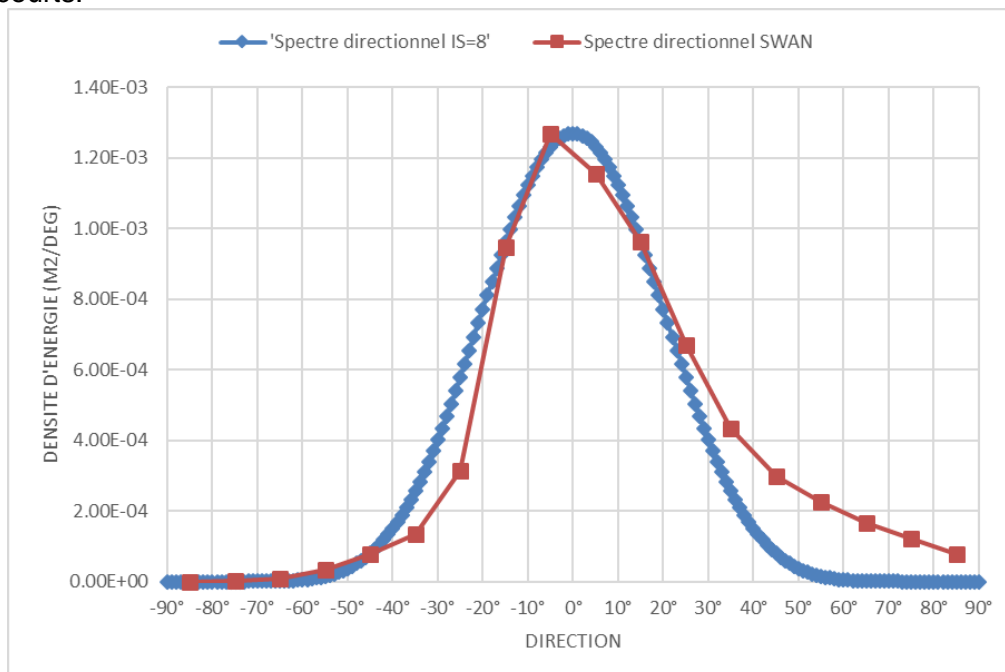
4.3 Type de spectres irréguliers

Les simulations SWAN ont permis d'établir l'allure des répartitions d'énergie de l'état de mer irrégulier en fréquence et en direction. On montre que la répartition sur le domaine des fréquences peut être correctement représentée par un spectre classique de Jonswap. Les tempêtes reconstituées sur la période 2006-2016 seraient convenablement représentées avec un coefficient d'élanement du spectre $\gamma = 1.5$ [4][6], correspondant à un étalement relativement large de l'énergie sur la plage des fréquences.



Comparaison un spectre fréquentiel JONSWAP $\gamma = 1.5$ et spectre issu de la modélisation numérique

La dispersion angulaire du spectre d'énergie directionnel peut être exprimée selon une loi classique du type $D(\theta) = \cos^{1S}(\theta - \theta_0)$. Le coefficient $IS=8$ permet de reproduire l'allure de la répartition angulaire, laquelle est relativement large pour des mers de vent générées sur des fetchs courts.



Comparaison un spectre directionnel classique $IS = 8$ et spectre issu de la modélisation numérique

4.4 Synthèse des clapots retenus

Dans le cadre des études hydrodynamiques à caractère environnemental ou dimensionnant, les clapots de projet retenus sur les deux secteurs principaux sont les suivants :

Extrapolation des clapots à l'approche immédiat du port		
Occurrence	Est à Sud-Est	Mistral
annuelle	$H_S=1.05\text{m}$, $T_P=4.0\text{s}$, N105	$H_S=0.50\text{m}$, $T_P=2.7\text{s}$, N30
quinquennale	$H_S=1.20\text{m}$, $T_P=4.3\text{s}$, N105	$H_S=0.56\text{m}$, $T_P=3.0\text{s}$, N105
décennale	$H_S=1.25\text{m}$, $T_P=4.5\text{s}$, N105	$H_S=0.60\text{m}$, $T_P=3.2\text{s}$, N30
vingtennale	$H_S=1.35\text{m}$, $T_P=4.8\text{s}$, N105	$H_S=0.65\text{m}$, $T_P=3.3\text{s}$, N30
cinquantennale	$H_S=1.45\text{m}$, $T_P=4.9\text{s}$, N105	$H_S=0.68\text{m}$, $T_P=3.4\text{s}$, N30
centennale	$H_S=1.50\text{m}$, $T_P=5.0\text{s}$, N110	$H_S=0.72\text{m}$, $T_P=3.5\text{s}$, N20 et N40
Extrême ELU	$H_S=1.65\text{m}$, $T_P=5.2\text{s}$, N110	$H_S=0.90\text{m}$, $T_P=4.0\text{s}$, N20 et N40

5 Le niveau d'eau

Le phénomène de marée engendre un marnage semi-diurne et diurne de faible amplitude, 20cm à 45cm sur les côtes méditerranéennes françaises. Le niveau d'eau moyen dans le Golfe de Fos-sur-mer est égal à 0.59m CM d'après l'ouvrage de marée publié par le SHOM [8]. Les niveaux de marées astronomiques sont compris entre 0.40m CM et 0.82m CM, soit 42cm de marnage maximum.

Le niveau de référence 0m NGF se situe 0.326m au-dessus du niveau des plus basses mers 0m CM. La marée à Fos évolue donc entre 0.07m NGF et 0.49m NGF, pour un niveau moyen à 0.26m NGF.

A ces fluctuations périodiques sur 12.5 à 25 heures, s'ajoutent les oscillations plus ou moins rapides qui accompagnent les variations de pression atmosphérique lors des périodes anticycloniques ou dépressionnaires. Les vents de mer, qui repoussent les eaux vers le littoral, ou au fond des baies, créent également une surcote supplémentaire.

Les variations de niveau d'eau dans le Golfe de Fos ne se répercutent pas directement dans l'étang de Berre. Celui-ci agit comme un filtre atténuateur des ondes de courte durée (quelques heures). Les courants de va-et-vient à travers le canal étroit de Caronte, avec une vitesse de l'ordre de plusieurs dizaines de cm/s, se dissipent allègrement au niveau des extrémités du canal. Il en résulte une atténuation non négligeable des ondes de marée, dont les valeurs ont pu être estimées dans le cadre d'une étude réalisée par Sogreah en 2009 [8] :

- l'onde semi-diurne M2, d'amplitude 0.06m à Fos, est réduite 0.01m dans l'étang de Berre, à Martigues ;
- l'onde semi-diurne S2, d'amplitude 0.02m à Fos, est réduite à 0.004m dans l'étang de Berre ;
- l'onde diurne K1, d'amplitude 0.03m à Fos, est réduite à 0.01m dans l'étang de Berre ;
- l'onde plus courte M4 est amortie avec un facteur de réduction de l'ordre de 50.

Les ondes de période 25 heures sont réduites d'un facteur 3 environ. Les ondes de période 12.5 heures sont réduites d'un facteur 5 à 6. Celles de périodes inférieures à 6h ne pénètrent quasiment pas dans l'étang. Seules les ondes associées à une grande période (2 à 3 jours) ne sont pratiquement pas filtrées.

Selon ces principes, le marnage maximal de la marée dans l'étang de Berre serait environ :

42cm à Fos divisé par au moins 3.5, voire 4 ou 5

On retiendra de façon conservative $42\text{cm} / 3.5 = 12\text{cm}$ comme valeur maximale de marnage.

L'étude de Sogreah est fondée sur une modélisation numérique, ainsi que sur l'analyse de mesures marégraphiques sur plusieurs années à l'extérieur de l'étang (Marseille, St Louis, Port de Bouc) et sur quelques mois à l'intérieur de l'étang (Martigues). Le graphe ci-après est extrait de l'étude Sogreah, illustrant les écarts des amplitudes des différentes composantes de l'onde marée.

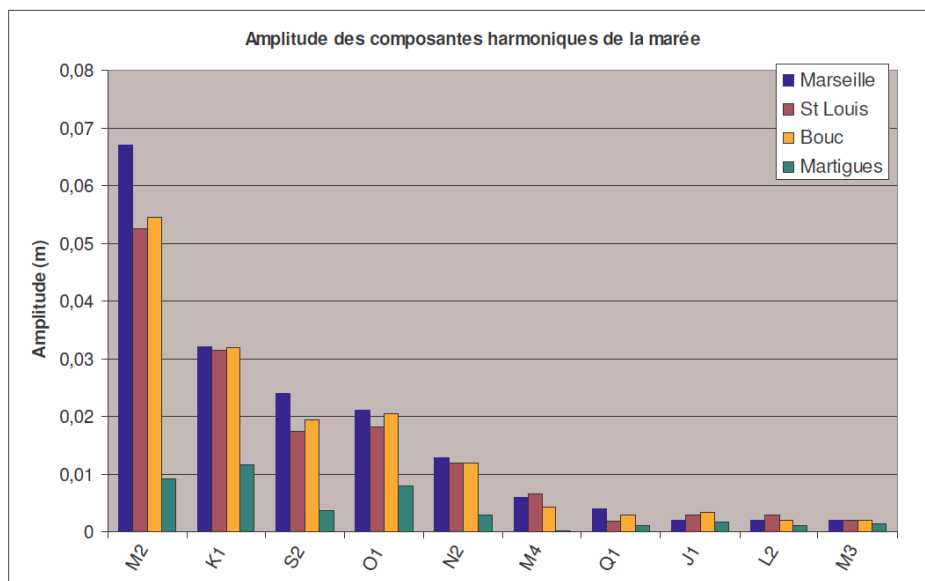


Figure 9 : Composantes harmoniques des marégraphes de Martigues, Marseille, St Louis et Bouc.

*Extrait de l'étude SOGREAH d'analyse de l'hydrodynamisme de l'étang de Berre
Comparaison des amplitudes des composantes de l'onde marée à l'extérieur de l'étang
(Marseille, Saint-Louis, Bouc) et à l'intérieur de l'étang (Martigues)*

Les surcotes associées aux dépressions atmosphériques sont généralement composées d'ondes s'étalant sur plusieurs heures à plusieurs jours, superposées à des ondes courtes qui sont automatiquement filtrées par le canal de Caronte. L'ordre de grandeur du facteur de réduction des variations des ondes de surcotes serait compris entre $\frac{1}{4}$ et $\frac{1}{2}$ selon le type d'évènement, sachant qu'une dépression ou une tempête occasionne des variations de niveau d'eau qui ne sont jamais constants à l'échelle même d'une journée.

Il s'agit là d'une approximation grossière du facteur de réduction, qui mériterait une étude approfondie, voire des notions de recherche. L'étude de submersion du CEREMA, initiée en janvier 2015 (Cf. fichier powerpoint du COPIL au moment du lancement du projet, document joint au dossier technique du marché de maîtrise d'œuvre) pourrait être une source de validation des ordres de grandeur de niveau d'eau avancés ci-après.

Selon ces estimations de première approche, nous adoptons le raisonnement suivant pour estimer les niveaux d'eau hauts exceptionnels attendus dans l'étang de Berre :

- niveau moyen : 0.1m NGF (d'après synthèse sur les contraintes de site [9])
- + niveau atteint par la marée astronomique maximale : $0.1\text{m NGF} + \frac{1}{2} \times 0.12\text{m} = 0.17\text{m NGF}$
- + surcote associée à la dépression atmosphérique = $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{2}$ x surcote évaluée à Fos-sur-mer

Les niveaux de surcote évalués à Fos sont détaillés en annexe A de ce document.

Il faut également tenir compte de la montée du niveau général des océans attendue dans les décennies à venir, variant de 0.4m jusqu'à 1.0m en hypothèse extrême à l'horizon 2100. Les dernières hypothèses avancées par le GIEC [7] dans un des scénarii les plus pessimistes, RCP8.5, indiqueraient une valeur de +0.35m à l'horizon 2060.

Les résultats de ce raisonnement sont synthétisés dans le tableau ci-après.

Approximation sommaire des niveaux d'eau exceptionnels attendus dans l'étang de Berre						
	A Fos-sur-Mer		Dans l'étang de Berre			
Niveau moyen	0.26m NGF		0.11m NGF			
Niveau de marée haute	+0.49m NGF		0.17m NGF			
	Surcote à Fos	Niveau de projet à Fos	Surcote (0.25 à 0.5 fois celle de Fos)	Surcote retenue dans l'étang de Berre	Niveau de projet (0.17mNGF+surcote)	Niveau de projet Horizon 2060 (+0.35m)
Surcote annuelle	+0.55m,	1.04m NGF	+0.14m à +0.28m	0.21m	0.38m NGF	0.73m NGF
Surcote décennale	+0.85m,	1.34m NGF	+0.21m à +0.43m	0.32m	0.49m NGF	0.84m NGF
Surcote vingtennale	+0.93m,	1.42m NGF	+0.23m à +0.47m	0.35m	0.52m NGF	0.87m NGF
Surcote cinquantennale	+1.04m,	1.53m NGF	+0.26m à +0.52m	0.52m	0.69m NGF	1.04m NGF
Surcote centennale	+1.11m,	1.60m NGF	+0.28m à +0.56m	0.56m	0.73m NGF	1.08m NGF

Le niveau d'eau bas fréquent ne devrait pas descendre sous la cote 0m NGF, considérant la faible pénétration des marées dans l'étang. Le niveau d'eau bas exceptionnel ne peut pas descendre sous la cote 0m CM à Fos, soit -0.33m NGF.

6 Conclusion

La climatologie des vents et des clapots soulevés sur l'ensemble de l'étang de Berre, puis se dirigeant vers le port des Heures Claires, a été reproduite sur une période de 11 ans. La reconstitution de l'historique des états de mer a permis de dresser les statistiques des caractéristiques des clapots abordant le port et les plages adjacentes, de même que d'extrapoler les conditions de projet en occurrence fréquente et extrême. Les résultats établis sont à la base des études hydrodynamiques nécessaires à la conception et au dimensionnement de l'extension du port. On confirme, selon toutes les observations sur site ; que les vents marins d'Est à Sud-Est sont à l'origine de la formation des clapots principaux se dirigeant vers le port des Heures Claires.

A notre connaissance, il n'y a que très peu de données disponibles sur les niveaux d'eau fréquents ou exceptionnels atteints dans l'étang de Berre. Les études antérieures ont été mises à profit pour tenter d'estimer des ordres de grandeur cohérents avec les connaissances acquises. Les valeurs estimées sont à valider ou à confirmer, notamment au regard de l'avancement des recherches du CEREMA dans ce domaine.

7 Références

[1] « Modélisation hydrodynamique de l'étang de Berre et des milieux annexes », rapport SOGREAH n°1740286, février 2009

[2] Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes, environnements maritime et estuarien, CETMEF, avril 2013.

[3] Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines. CETMEF, avril 2013.

[4] « Le guide des enrochements, l'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques » (version française du « rock manual »).

[5] EurOtop Manual. Wave overtopping of sea defences and related structures, assessment manual. Environment Agency (UK), Expertise Netwerk Waterkeren (NL), Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen.

[6] Coastal Engineering Manual, Part VI, Fundamental of design, Hans F. Burcharth and Steven A. Hughes (DE).

[7] GIEC, changements climatiques 2013, les éléments scientifiques, résumé à l'attention des décideurs – Contribution du groupe de travail 1 au cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

[8] SHOM, références altimétriques maritimes. Ports de France Métropolitaine et d'Outre-Mer. Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée. Edition 2014.

[9] Opération d'extension et de requalification du port des Heures Claires. Marché de maîtrise d'œuvre, annexe 3, contraintes de site

8 Annexe A : analyse des niveaux d'eau à Fos-sur-mer

Selon le Service Hydrographique et Océanologique de la Marine (SHOM), le niveau des plus basses mer Carte Marine (0m CM ou Zéro Hydrographique) est situé 0.326m sous le zéro NGF [8].



Figure 1 : Les différents niveaux de références

Le marnage de la plus haute marée astronomique est compris entre les niveaux 0.40m CM et 0.82m CM, avec un niveau moyen à 0.59m CM. A cela s'ajoutent les surcotes exceptionnelles sous l'effet des dépressions atmosphériques et du vent. Ces périodes de mauvais temps s'étalent sur suffisamment d'heures pour être concomitantes avec une phase de marée haute.

L'analyse des données du marégraphe de Marseille, disponibles en ligne depuis 1999 (*), permet de constater ce qui suit :

- La cote +1.0m CM est dépassée presque chaque année. On note environ 2 périodes indépendantes en moyenne par année, chacune pouvant parfois durer plusieurs jours, où le niveau d'eau est supérieur à cette cote.
- La cote +1.15m CM est plus rare. Elle est en moyenne dépassée une fois par an.
- La plus grosse surcote observée entre 1999 et 2016 est égale à 1.36m CM. Elle est survenue le 28 décembre 1999 à la suite de la grosse tempête de Sud-Ouest.



Mesures marégraphiques à Marseille entre le 19/09/1999 et le 26/09/1999 (référence 0m CM, site en ligne REFMAR)

(*) Les observations des marégraphes de Marseille sont la propriété du SHOM/IGN et sont mises à disposition sur le site des Réseaux de référence des observations marégraphiques (refmar.shom.fr)

Le site REFMAR met à disposition des données marégraphiques à Fos/mer depuis 2010. Les quelques évènements marquants de niveaux d'eau hauts observés depuis cette date à Marseille et à Fos sont comparés dans le tableau ci-après :

Niveaux d'eau hauts rares par effet de marée et de surcote		
Date	Niveau d'eau haut maximale observé (sur 10 minutes)	
	Marseille	Fos-sur-mer
12/10/2010	0.90m CM	1.00m CM
23/12/2010	1.22m CM	1.07m CM
5/11/2011	1.28m CM	0.96m CM
27/10/2012	0.96m CM	1.00m CM
25/12/2013	1.09m CM	0.81m CM
6/02/2014	1.18m CM	1.02m CM
4/11/2014	1.04m CM	0.98m CM
28/10/2015	0.84m CM	0.92m CM
12/01/2016	1.21m CM	0.90m CM

Bien que le niveau de marée à Marseille soit légèrement moins élevé que celui relevé à Fos (0.49m CM et 0.70m CM pour le niveau moyen et le niveau de pleine mer astronomique, contre 0.59m CM et 0.82m CM à Fos), les périodes de dépression et vents entraînent généralement un niveau d'eau haut à Marseille plus élevé que celui observé au cours de la même période à Fos. Sur 9 évènements recensés entre 2010 et 2016, 6 fois le niveau pic à Marseille a été supérieur celui de Fos. Le niveau peut toutefois être plus élevé à Fos, atteignant 1.0m CM entre 2010 et 2016, alors que l'on a mesuré dans le même temps 0.90m ou 0.96m CM à Marseille.

Le CETMEF a publié une analyse des surcotes par vent et dépression en dehors des effets de marée sur plusieurs sites des côtes françaises [2] [3]. L'analyse n'a pas été faite à Fos, mais elle est disponible pour Marseille, où l'on dispose de données sur une durée significative. La surcote d'occurrence rare centennale est estimée à 1.11m (valeur modale extrapolée), pouvant atteindre 1.34m à 70% d'intervalle de confiance.

Pour évaluer la surcote potentielle à Fos, on a adopté l'approche suivante :

- retenir le niveau maximal de pleine mer astronomique, soit 0.82m CM ;
- ajouter la surcote de projet évaluée à Marseille par le CETMEF (valeur modale extrapolée).

Le calcul est sécuritaire sur la concomitance des évènements, car on ajoute une surcote par vent et dépression exceptionnelle à un niveau de marée qui n'est rencontré qu'une fois par an. Cela implique une surestimation de l'ordre de 10cm à 20cm selon l'ampleur de la marée rencontrée concomitamment à la surcote. Celle-ci est en partie compensée par le choix de la valeur modale de l'extrapolation du CETMEF, plutôt que la valeur haute de l'intervalle de confiance. Au final, on aboutit malgré tout à des valeurs quinquennale à décennale qui majorent ce qui a vraiment été observé au marégraphe de Fos-sur-Mer depuis 2010.

Commune d'Istres

Extension du port des Heures Claires. Analyse des données naturelles maritimes

Niveaux d'eau hauts rares par effet de marée et de surcote estimés à FOS			
Période de retour	Niveau de marée Pleine Mer Astronomique	Surcote concomitante (valeurs Marseille)	Niveau d'eau haut
1 an	0.82m CM	0.55m	1.37m CM
5 ans	0.82m CM	0.76m	1.58m CM
10 ans	0.82m CM	0.85m	1.67m CM
20 ans	0.82m CM	0.93m	1.75m CM
50 ans	0.82m CM	1.04m	1.86m CM
100 ans	0.82m CM	1.11m	1.93m CM

Il faut également tenir compte de la montée du niveau général des océans attendue dans les décennies à venir, variant de 0.4m jusqu'à 1.0m en hypothèse extrême à l'horizon 2100. Les dernières hypothèses avancées par le GIEC [7] dans un des scénarii les plus pessimistes, RCP8.5, indiqueraient une valeur de +0.35m à l'horizon 2060 et 0.75m à l'horizon 2100. Ces valeurs ont récemment été retenues dans le cadre de projet de l'extension urbaine de Monaco.

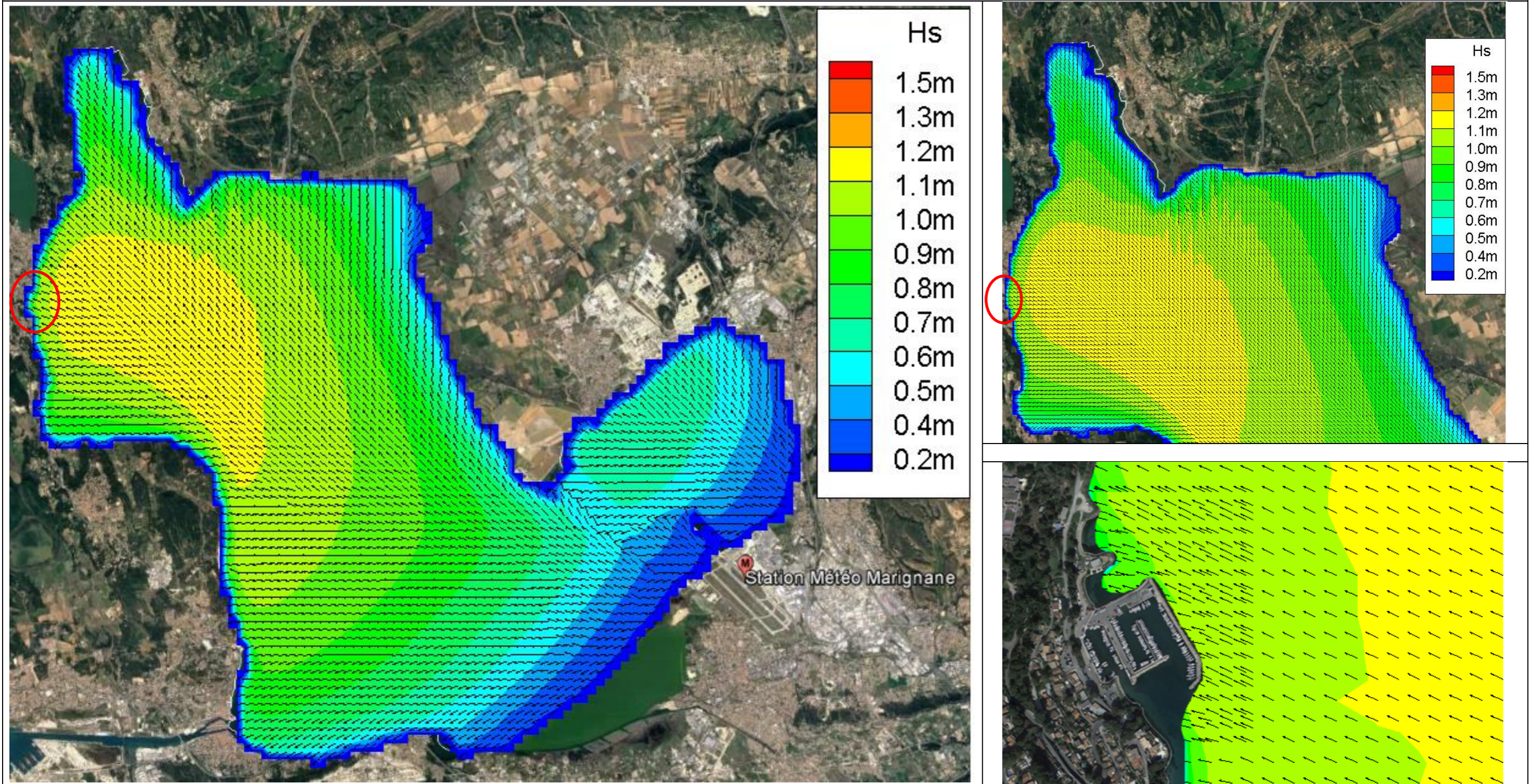
On se place raisonnablement à l'horizon 2060, soit une analyse des franchissements sur une période de l'ordre de 50 ans. Les niveaux d'eau de projet seraient dans ces conditions les suivants, en se référant au niveau 0m NGF pour être compatible avec les références topographiques habituelles :

Niveaux d'eau hauts de projet à Fos		
Période de retour	Niveau d'eau haut	Niveau d'eau haut /0m NGF
1 an	1.15m CM	0.82m NGF
5 ans	1.58m CM	1.25m NGF
10 ans	1.67m CM	1.34m NGF
20 ans	1.75m CM	1.42m NGF
50 ans	1.86m CM	1.53m NGF
100 ans	1.93m CM	1.60m NGF
50 ans, horizon 2060	2.21m CM	1.88m NGF
100 ans, horizon 2060	2.28m CM	1.95m NGF

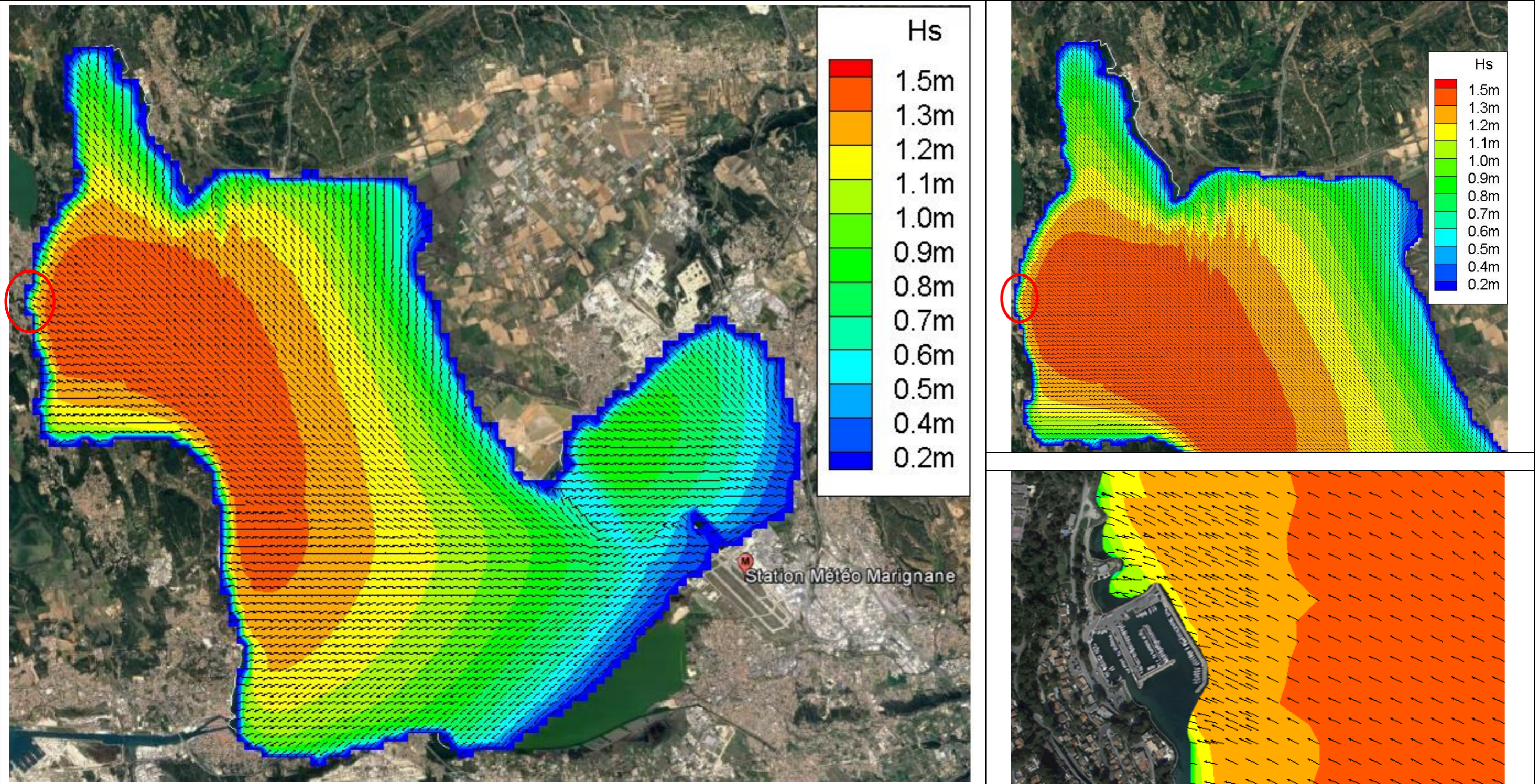
Le niveau le plus haut observé à Marseille sur la période 1999-2016 est 1.36m CM, soit 1.03m NGF.

9 Annexe B : Quelques plans de vagues représentatifs des tempêtes

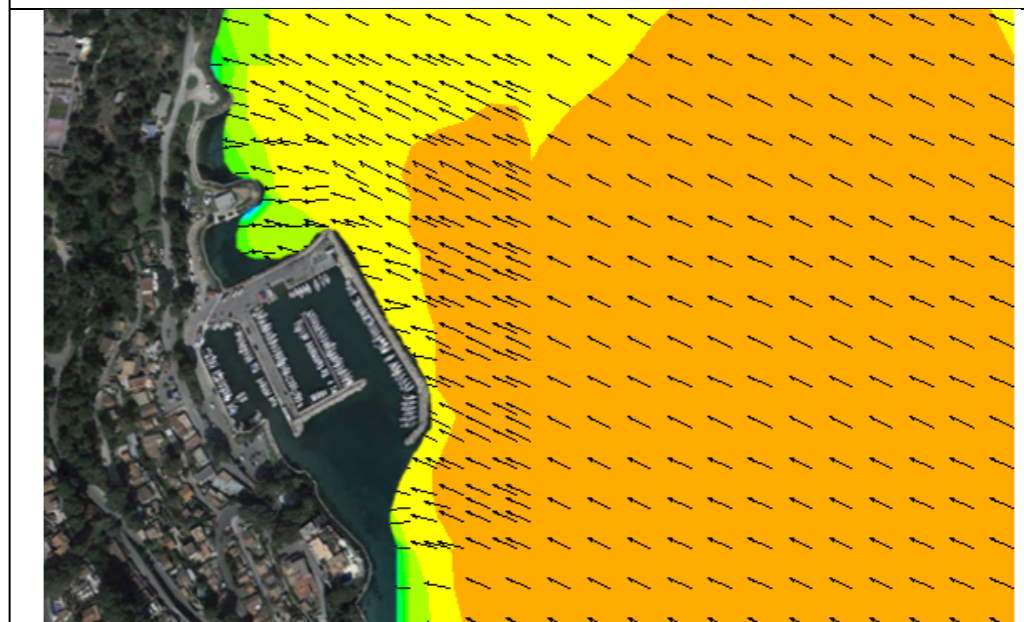
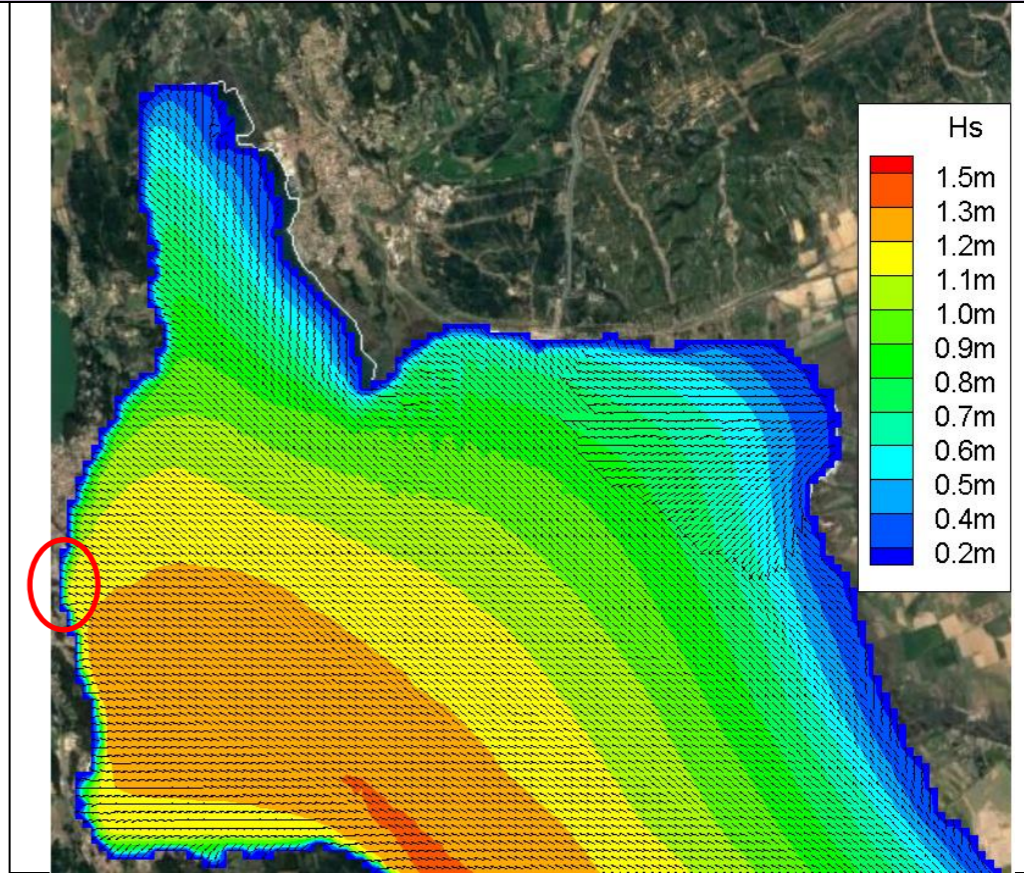
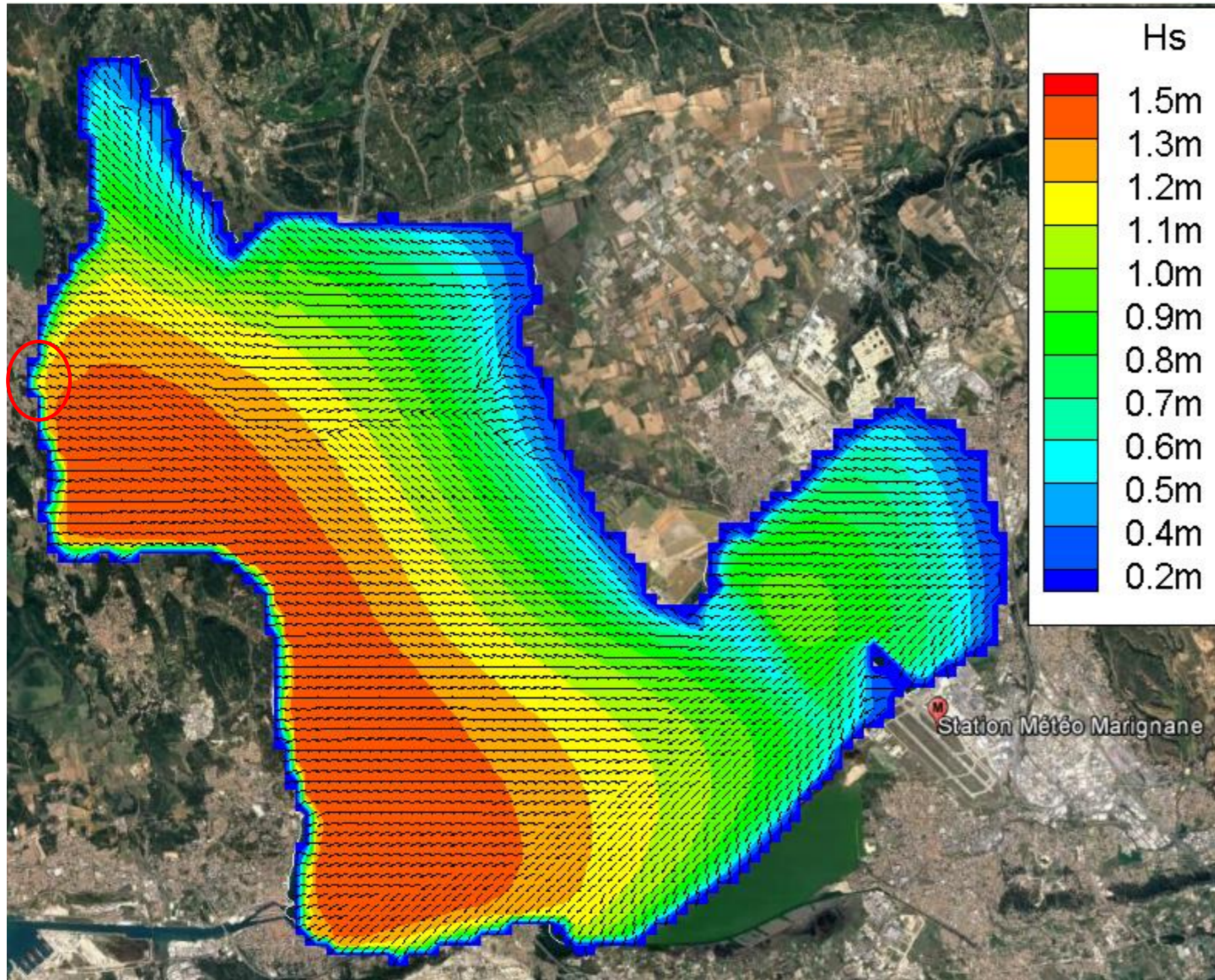
$V_{10min}=16.0$ m/s, provenance N120, 16 octobre 2016, conditions proches de l'occurrence annuelle



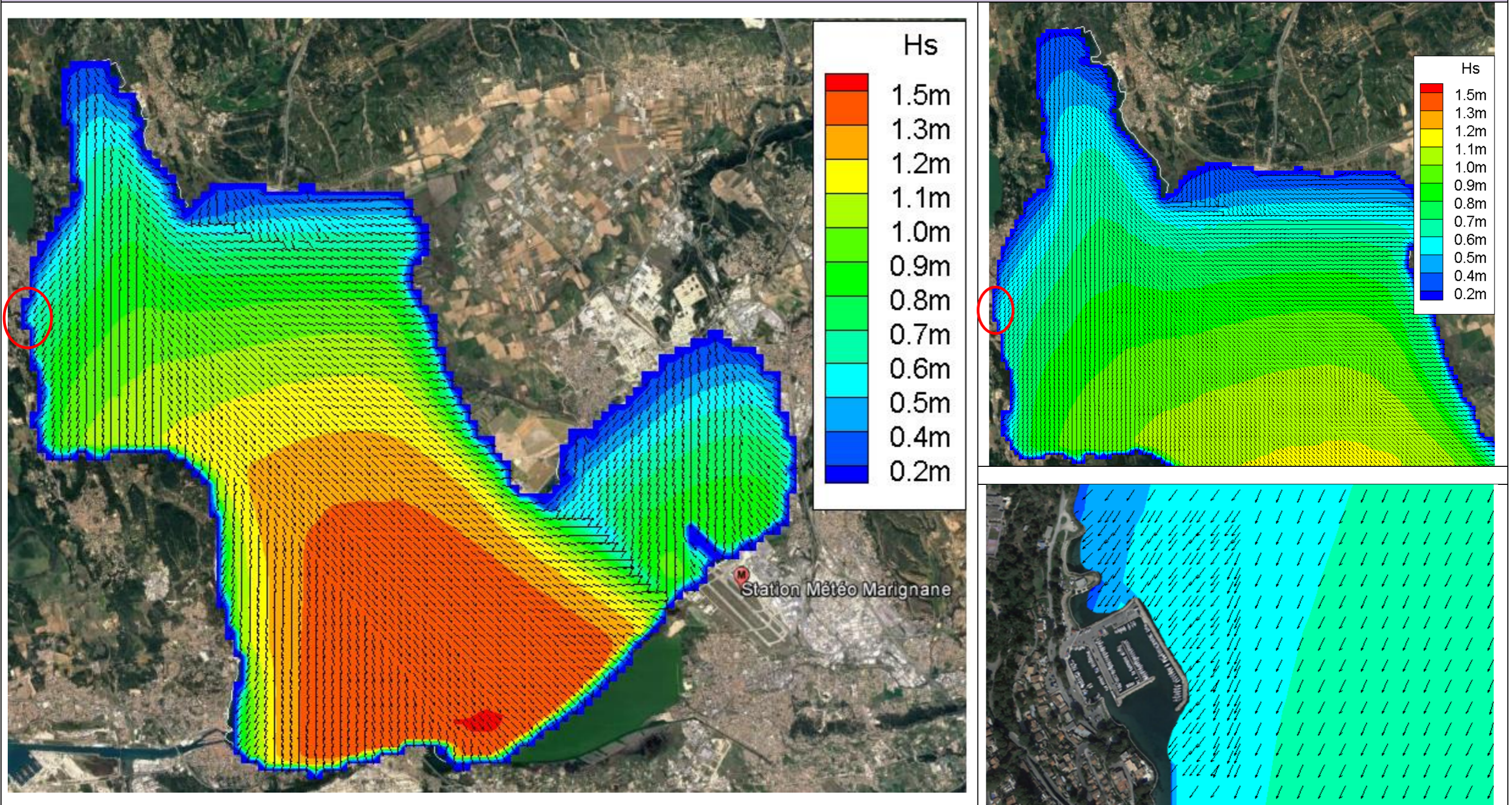
$V_{10min}=19.3$ m/s, provenance N110, 5 novembre 2011, conditions proches de l'occurrence décennale



$V_{10min}=20.9$ m/s, provenance N70, 6 mars 2013, conditions proches de l'occurrence décennale d'Est



$V_{10min}=19.2$ m/s, provenance N340, 5 janvier 2012, conditions proches de l'occurrence annuelle de mistral



$V_{10min}=25.0$ m/s, provenance N340, 6 mars 2006, conditions proches de l'occurrence décennale de mistral

