

Analyse critique de situation préliminaire à des travaux publics : Almanarre

par

Yves Lacroix (Professeur, SEATECH/U. dell'Aquila)

Van Van Than (Docteur AMU, Assistant Hanoi University)

Minh Tuan Vu (Docteur UTLN, Assistant Hanoi University)

Novembre 2018

La mairie de Hyères a mandaté le cabinet Artelia pour dimensionner des ouvrages de protection contre l'érosion au tombolo Occidental de la presqu'île de Giens (plage de l'Almanarre), en 2017-2018. Les zones érodées sont situées sur le secteur Nord de la plage, le golf de Giens présente un vaste champ de Posidonies, qui contribue à la protection contre les agressions de la mer, en diminuant courant et puissance des vagues, mais également en réhaussant le fonds marin par la génération de matie. Ce champ contribue également à la protection par la génération de feuilles mortes qui viennent s'agglomérer en bordure littorale et servent de tampon pour absorber l'énergie des vagues (les « banquettes » de posidonies). Autrefois alimenté par le Roubaud en apports sédimentaires - détourné au 19^{ème} siècle, le tombolo Ouest n'est désormais plus alimenté et la mer grignote chaque année un peu plus la plage là où ses vagues les plus puissantes l'atteignent, au Nord, de secteur Sud-Ouest ou Ouest. Son sable a été prélevé et a permis la construction de nombreux ouvrages au port de Toulon notamment. Ces prélèvements ont accentué l'érosion et fragilisé le cordon littoral.

0. INTRODUCTION

De nombreuses études de protection et campagnes de mesure ont été mandatées par la ville de Hyères, et la DDTM du Var. D'autres organismes ont contribué à enrichir l'ensemble des données disponibles comme le SHOM, METEO France, GIS Posidonie, Cartham, CEREMA, REFMAR, CETMEF, LANDSAT, UTLN, AMU. La ville est délégataire de la gestion du cordon depuis les années 1970. Son objectif est de maintenir le cordon qui depuis la fin des années 1960 supporte la « route du sel », un des deux axes routiers permettant la liaison presqu'île de Giens – continent. L'intérêt touristique et paysager de la plage de l'Almanarre s'impose à tous comme une évidence.

Le cordon, fragilisé par les prélèvements, et la disparition des apports du Roubaud, est, chaque année, grignoté un peu plus par les tempêtes hivernales de secteur ouest et sud-ouest. Il est reconstitué désormais plusieurs fois chaque hiver, période durant laquelle la route du sel est fermée. Cela coûte cher à la ville, plus de 500000€/an actuellement.

Les études de protection antérieures préconisaient, outre celles ne concernant que les méthodes douces de surface (ganivelles etc.), des digues de butées de pied conjuguées à des rechargements et focalisaient la difficulté sur le

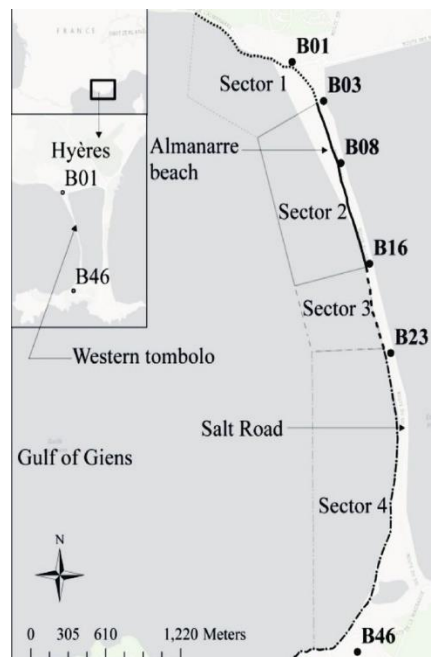
secteur B08-B011 (le long de la route du sel sont positionnées des bornes béton numérotées qui servent de repères, voir pages suivantes). Les interventions plus lourdes de type épis, digues émergées, digues sous-marines, n'ont pas été proposées pour le secteur Almanarre antérieurement à la thèse de V.-V. Than (AMU 2015).

L'approche par des modèles numériques complets est apparue dans les études OCEANIDE 2011 pour la rade de Hyères, et Than 2015 pour le golfe de Giens. Elle s'est poursuivie par les études M.-T. Vu (SEATECH 2017) et Artelia (Hyères 2018).

Nos travaux nous ont conduits à préconiser l'implantation de digues sous-marines pour protéger le littoral, que ce soit en rade de Hyères (thèse de M.-T. Vu SEATECH 2018), ou le golfe de Giens (travaux Lacroix-Vu 2017 et la présente). Nous avons contacté la mairie de Hyères en ce sens dès 2011, et le maire actuel qui a été sensibilisé en 2015, une fois les travaux de V.-V. Than achevés.

Nos objectifs étaient :

1. Identifier les facteurs érosifs et les conditions climatiques typiques principaux ;
2. Développer un modèle numérique complet pour la rade de Hyères et le golfe de Giens, couplant les vagues, le vent, les courants, le transport sédimentaire, et prenant en compte la nature des fonds marins.
3. Valider le modèle numérique sur des données de terrain (type mesures à La Capte par exemple lors des études d'efficacité des géotextiles, ou certaines mesures de courant au large de Carqueiranne).
4. Evaluer l'effet de différents types d'ouvrages de protection (épis, rechargements, reprofilages, digues sous-marines, récifs artificiels). Les dimensionner pour leur permettre d'être efficaces contre les conditions climatiques visées (principalement tempêtes décennales et trentennales type Largade ou coup de vent d'Est pour la rade de Hyères).
5. Proposer des solutions n'impactant pas le champ de Posidonies et préservant la dérive littorale, essentielle au rechargement des plages en périodes calmes (conditions type estivales).
6. Evaluer l'évolution du trait de côte à partir d'images satellite, et les équilibres. Prévoir son évolution après l'implantation des digues.



Ces travaux ont été conduits de manière indépendante, et gracieuse. Le groupe DHI a mis gratuitement à notre disposition une licence complète d'utilisation de la suite de logiciels MIKE, reconnue comme l'une des toutes meilleures pour ce type d'études. Les résultats qui en découlent sont publics (tous les détails). Ils sont publiés dans diverses revues. Le Vietnam a financé les thèses, y trouvant un intérêt relatif aux problèmes d'érosion qui y sont de premier ordre.

Le cordon littoral ouest est assorti d'un chapelet de bornes béton servant de points fixes terrestres. Elles sont situées en bordure du canal de ceinture des salins du Pesquiers, en voici une carte :

Nos conclusions pour l'Almanarre sont qu'il faut prévoir des digues sous-marines, implantées en limite de la bordure haute du champ de posidonie, pas trop longues, compte tenu de la faiblesse de leur distance à la côte, afin de préserver la dérive littorale, et d'éviter les transferts de masses d'eau vers le Nord, couvrant la zone B2 à B19.

Nous avons en effet examiné l'opportunité de ne procéder qu'à un rechargement, ou bien « combler la brèche » (étude ERAM des années 2000 qui en a créé le « mythe »). Ces deux solutions, ne réduisent l'impact à la côte que d'au plus 10%, et pour la première, est éphémère (demi-durée de vie de deux ans). Ces éléments ont été communiqués à la mairie en 2016 et 2017.

Les photos qui suivent datent de Décembre 2017, et permettent de bien comprendre l'étendue réelle du littoral à protéger, de B2 à B19 pour le plus sévèrement touché. Certains secteurs (regroupés dans le secteur 4 de la figure ci-contre) sont accrétifs, principalement au Nord du secteur 4, où les courants de retour redéposent des sédiments arrachés plus au Nord, ou plus au Sud. Le 30/10/2018 la plage se retrouve dans le même état une fois de plus....

Vers B02 après la tempête (pas plus que décennale) du 11/12/2017 :



Voici à la même date la même plage vers B3 ou B4 (on voit le bitume de l'ancienne route) :



Idem, vers B8 (la zone la plus fragile actuellement mais pas la seule à protéger, loin s'en faut) :



Même jour après la même tempête, vers B19 (la route actuelle est couverte de 30 à 50cm de sable) :



On comprend que ce sont chaque année plusieurs centaines de milliers d'euros qui sont dépensés simplement pour « remettre en ordre » le littoral de l'Almanarre Nord. Une tempête aurait coûté selon le maire 500000€ à elle seule.

Sur 50 ans, on peut donc penser que la seule remise en état de la plage après les tempêtes hivernales (dont la force s'accroît, sans tenir compte de l'élévation du niveau marin estimée à 2mm/an minimum), coûtera au minimum 20M€ au contribuable.

Dans ce qui suit nous présentons :

- une analyse critique du mythe de la brèche.
- le design d'un rechargement incluant le comblement de la fameuse brèche, ce qui permet ensuite au vu des résultats numériques que cette combinaison rechargement-comblement ne permet pas d'atteindre des niveaux d'états de mer acceptables à la côte au regard de la protection contre l'érosion. Ceci malgré un rechargement massif, 1.5Mm³...
- ensuite nous présentons la solution Artelia : nous examinons son impact en conditions Mistral et Largade, et concluons sans ambiguïté qu'elle est insuffisante.
- puis nous tentons de compléter la digue Artelia par des ajours successifs d'une digue au Sud, puis d'une autre au Nord. Nous atteignons alors des niveaux de protection suffisants au droit des digues, mais notons un défaut dans le concept de longue digue, qui à la fois guide les masses d'eau vers le Nord, et génère des espaces interstitiels, nécessaires, mais trop importants.
- Nous concluons en proposant un concept plus modulable, qui inclut la prise en compte de la hausse du niveau marin, ainsi qu'une protection pour des conditions au-delà des décennales, ce qui semble aller de soi pour une protection dont l'investissement porte naturellement sur des échelles de temps de l'ordre du demi-siècle ou du siècle.
- Des illustrations champs de vagues des puissances graduelles des conditions climatiques de conditions estivales à tempête centennale du SW.
- enfin, nous proposons une bibliographie rapidement commentée, qui, bien entendu, n'est pas exhaustive.

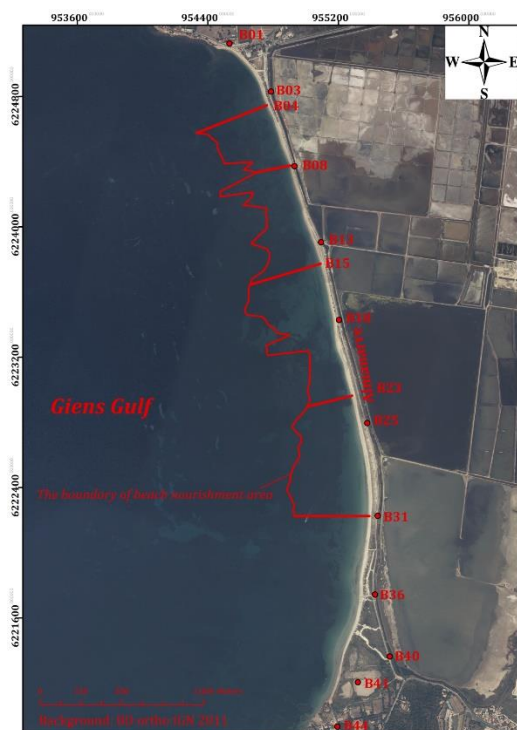
Merci à Artelia pour la fourniture bathymétrie 2017 et cotes de sa digue, la mairie de Hyères, DDTM83, REFMAR, CETMEF, LANDSAT, DHI, CARTHAM , GIS POSIDONIES, METEO France, SHOM pour des mégaoctets de données, logiciels, documents et compagnie.

1. DU RECHARGEMENT ET DU MYTHE DE LA BRECHE

Une brèche sous-marine a été identifiée au droit de la borne B08 où conjointement on observe la partie la plus fine du cordon littoral. Certaines études (ERAMM 2001) ont mis en avant ce constat pour développer une théorie selon laquelle les perturbations hydrodynamiques constatées dans ce secteur et l'intensité des conditions de mer à la côte résulteraient de ces défauts de fonds marins. Nous avons donc pris notre modèle numérique et propagé les conditions de mer annuelles, estivales, hivernales, tempête maximale, décennales, trentennales, cinquantennales et centennales, puis observé les variations de courant moyen (Vc) et hauteur significative de vagues (Hs) au droit des bornes B4,B8,B23,B31. Voici les résultats. On espère plutôt des baisses de 50% en Hs, et Vc. Il est clair qu'on en est loin, sauf en B31, le rechargement accentuant souvent le courant.

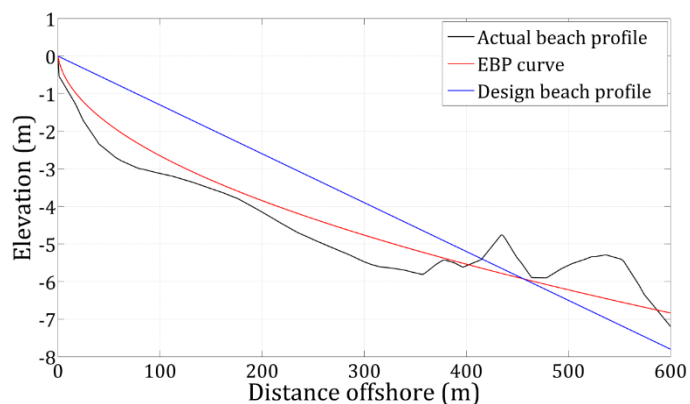
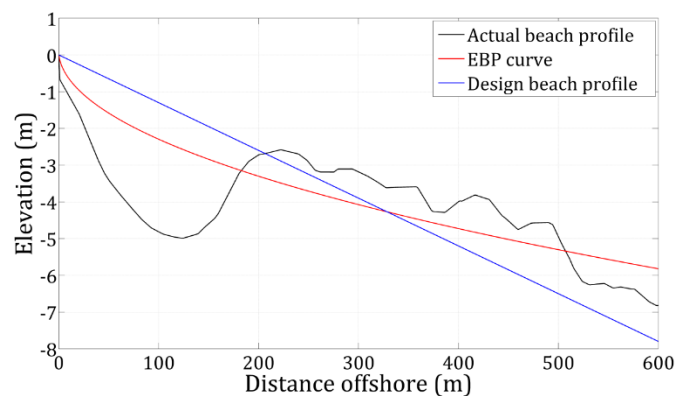
			B4		B8		B23		B31	
Parameter			Hs	Vc	Hs	Vc	Hs	Vc	Hs	Vc
bathy EOL 2010	Annuelles	NW	0,544323	0,11905	0,525211	0,149975	0,471935	0,191847	0,5121	0,195225
		W	0,558859	0,104094	0,542949	0,126593	0,479207	0,161003	0,516037	0,148817
		SW	0,577607	0,095925	0,558048	0,113842	0,479719	0,138684	0,528269	0,085526
	Hivernales		0,410772	0,075457	0,394758	0,090509	0,32623	0,12134	0,343679	0,120915
	Estivales		0,350447	0,066261	0,339995	0,075708	0,28797	0,093203	0,291824	0,09422
	Tempête maximale		0,849708	0,170199	0,774383	0,181997	0,643057	0,265805	0,767319	0,275977
	Décennales		1,12594	0,183495	1,06217	0,168813	0,871611	0,238005	1,02477	0,221105
	Trentennales		1,31639	0,214393	1,17844	0,188255	0,98064	0,240604	1,17264	0,150494
	Cinquantennales		1,49977	0,322224	1,30997	0,330885	1,20229	0,311042	1,35123	0,30226
	Centennales		1,64002	0,337096	1,44818	0,338992	1,28137	0,154462	1,46732	0,438593
Rechargement massif	Annuelles	NW	0,503805	0,128872	0,556893	0,207624	0,458385	0,219021	0,532768	0,220224
		W	0,513704	0,104573	0,558753	0,096958	0,465846	0,167492	0,525597	0,082767
		SW	0,523046	0,095616	0,571164	0,077006	0,469625	0,126573	0,513635	0,124788
	Hivernales		0,372938	0,075122	0,383068	0,097621	0,310287	0,128904	0,343037	0,125035
	Estivales		0,328446	0,066006	0,33388	0,088275	0,274249	0,105197	0,294754	0,101846
	Tempête maximale		0,706463	0,133597	0,70303	0,167267	0,581693	0,291656	0,707837	0,290585
	Décennales		0,9343	0,205333	0,94954	0,101825	0,804176	0,262189	0,963487	0,106716
	Trentennales		1,03356	0,277438	1,00455	0,160263	0,881219	0,265833	1,06854	0,112344
	Cinquantennales		1,21632	0,275151	1,09678	0,22806	0,955933	0,279312	1,19276	0,144086
	Centennales		1,36569	0,283664	1,24393	0,20921	1,07761	0,423173	1,29527	0,349262
Différence (%)	Annuelles	NW	-7,44	8,25	6,03	38,44	-2,87	14,16	4,04	12,81
		W	-8,08	0,46	2,91	-23,41	-2,79	4,03	1,85	-44,38
		SW	-9,45	-0,32	2,35	-32,36	-2,10	-8,73	-2,77	45,91
	Hivernales		-9,21	-0,44	-2,96	7,86	-4,89	6,23	-0,19	3,41
	Estivales		-6,28	-0,39	-1,80	16,60	-4,76	12,87	1,00	8,09
	Tempête maximale		-16,86	-21,51	-9,21	-8,09	-9,54	9,73	-7,75	5,29
	Décennales		-17,02	11,90	-10,60	-39,68	-7,74	10,16	-5,98	-51,74
	Trentennales		-21,49	29,41	-14,76	-14,87	-10,14	10,49	-8,88	-25,35
	Cinquantennales		-18,90	-14,61	-16,27	-31,08	-20,49	-10,20	-11,73	-52,33
	Centennales		-16,73	-15,85	-14,10	-38,28	-15,90	173,97	-11,73	-20,37

Pour les rechargements, nous nous sommes basés sur les profils fournis par les campagnes de mesure EOL, et sur un calcul de profils d'équilibre (EBP) pour chaque transect, ce qui permet d'évaluer selon le point de linéaire côtier,



Cette étude complète a été fournie à la mairie de Hyères et la DDTM83 le 16/4/2018.

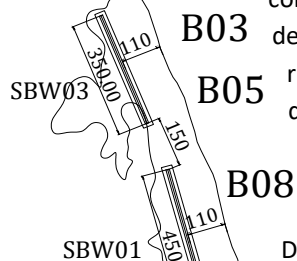
le type de rechargement à effectuer. Nous avons aussi pour ces rechargements déterminer la granulométrie selon les règles de l'art. Ci-contre sont représentés les secteurs rechargés. Ci-dessous, les profils en B8 puis B4 par exemple.



2. DIMENSIONS DES DIGUES (ARTELIA ET EXTENSIONS)

North

Artelia propose l'implantation d'une unique digue (SBW01 ci-contre) et suggère d'observer son impact pour ensuite éventuellement compléter le dispositif par un réhaussement, ou l'ajout d'autres digues. Nous comprenons mal cependant qu'une étude préliminaire de « complémentabilité » ne soit pas proposée, car rien n'indique que cela soit possible, et la première digue construite sera inamovible. Voici quelques caractéristiques techniques des digues « type Artelia » :



Distance à la côte : 110 (m);

B13 Longueur de digue : (SBW=Submerged BreakWater)

1^{er} SBW: 450 (m); SBW01, la solution préconisée par Artelia

B18 2nd SBW: 500 (m); SBW02, un ajout que nous préconisons au Sud de la digue Artelia
B21

3^{ème} SBW: 350 (m) ; SBW03, un ajout que nous préconisons au Nord de la digue Artelia
B25

B28 Intervalles entre les SBW : 150 (m)

B31 Profondeur de crête : -1.0 (m) (référence zéro hydrographique (LSL)), nous préconisons -0.2 LSL, ou -0.3.

B36 Largeur de crête : 10 (m) (nous préconisons 20m).

B40 La pente considérée du plateau au fond marin est de 3/1.

Leur localisation est indiquée ci-contre.



Digue Artelia (SBW01) complétée par MEMOCS/SEATECH

The upper limit of Posidonia in 2010 (Cartham)

Ci-dessus notre proposition de complétion de la solution Artelia. Voir infra l'analyse critique. Les points bleus sont les trois points de mesure envisagés.

3. RESULTATS DE LA SIMULATION AVEC UNE SEULE DIGUE (OPTION ARTELIA)

La digue Artelia a été positionnée selon les cotes reproduites ci-dessous (digue SBW01, Lambert 93) et fournies par Artelia fin août 2018.

Point	Longitude	Latitude	Elevation	Note	
A	954776.4	6224438.6	-5	Exterior point	basement
B	954746.5	6224430.2	-5	Exterior point	
C	954875.0	6223969.5	-5	Exterior point	
D	954904.6	6223977.2	-5	Exterior point	
AI	954769.3	6224426.3	-1	Interior point	Plateau
BI	954759.5	6224423.6	-1	Interior point	
CI	954881.6	6223981.3	-1	Interior point	
DI	954891.2	6223984.1	-1	Interior point	

Nos simulations ont été conduites en conditions de Mistral et de Largade selon les données Artelia. La bathymétrie utilisée est celle qui a été actualisée par Artelia en 2017. Mais les résultats avec la bathymétrie EOL de 2010 sont très proches (nous avons conduit des comparatifs en ce sens et l'intérêt centimétrique d'une bathymétrie à cette échelle est nul) .

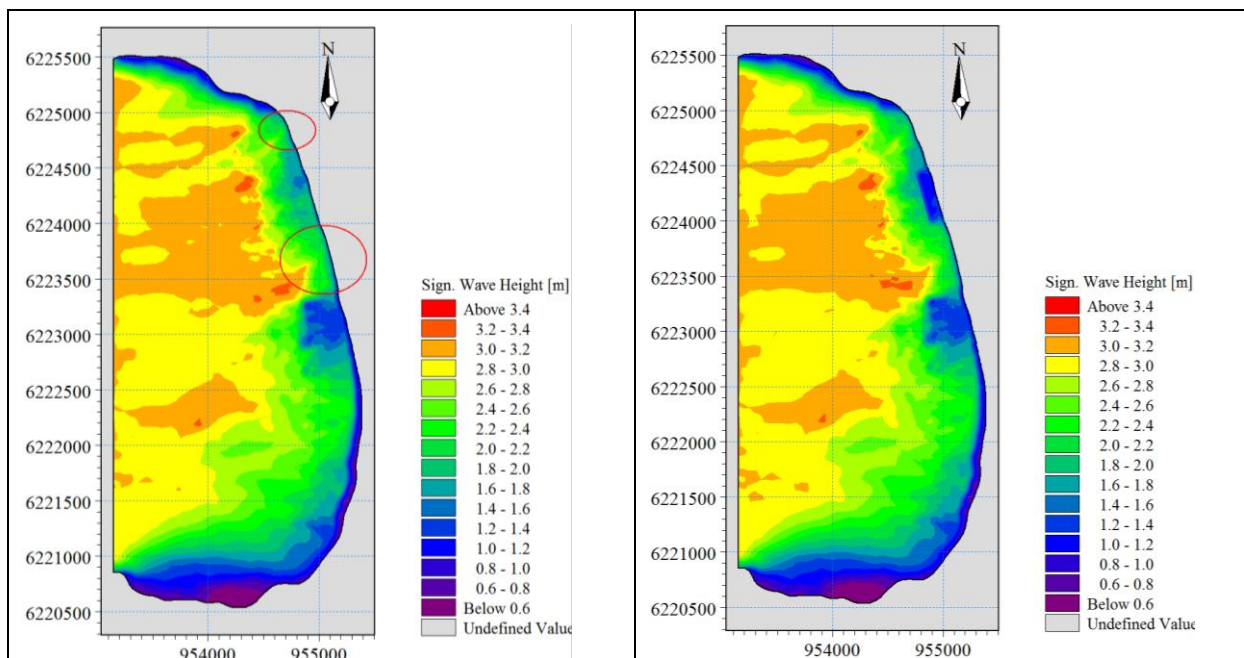
Les résultats de nos simulations sont reproduits au tableau ci-dessous, le point de mesure est le point de coordonnées (954829.6918;6224266.0159) situé à environ 80m du rivage derrière le SBW01. Les résultats indiquent la modification de la Hauteur significative des vagues (Hs), la vitesse du courant (courant moyen sur la colonne d'eau, Vc), le volume de transport sédimentaire en m³ par secondes par mètre linéaire (Q), et la variation moyenne du fond marin en mètres (BLC).

Scenario	Mistral				Largade			
	0 SBWs	1 SBW	2 SBWs	3 SBWs	0 SBWs	1 SBW	2 SBWs	3 SBWs
Hs (m)	1.94302	1.12224	1.1237	1.11804	2.06721	1.27382	1.25202	1.25965
Vc (m/s)	0.438304	0.265672	0.133379	0.12335	0.42602	0.16006	0.32774	0.40884
Q (m ³ /s/m)	0.000897	3.06E-05	1.02E-05	8.76E-06	0.00082	2.69E-05	9.12E-05	1.73E-04
BLC (m)	0.078586	-0.00472	0.001895	0.01824	-0.0967	0.02855	0.02313	-0.00752

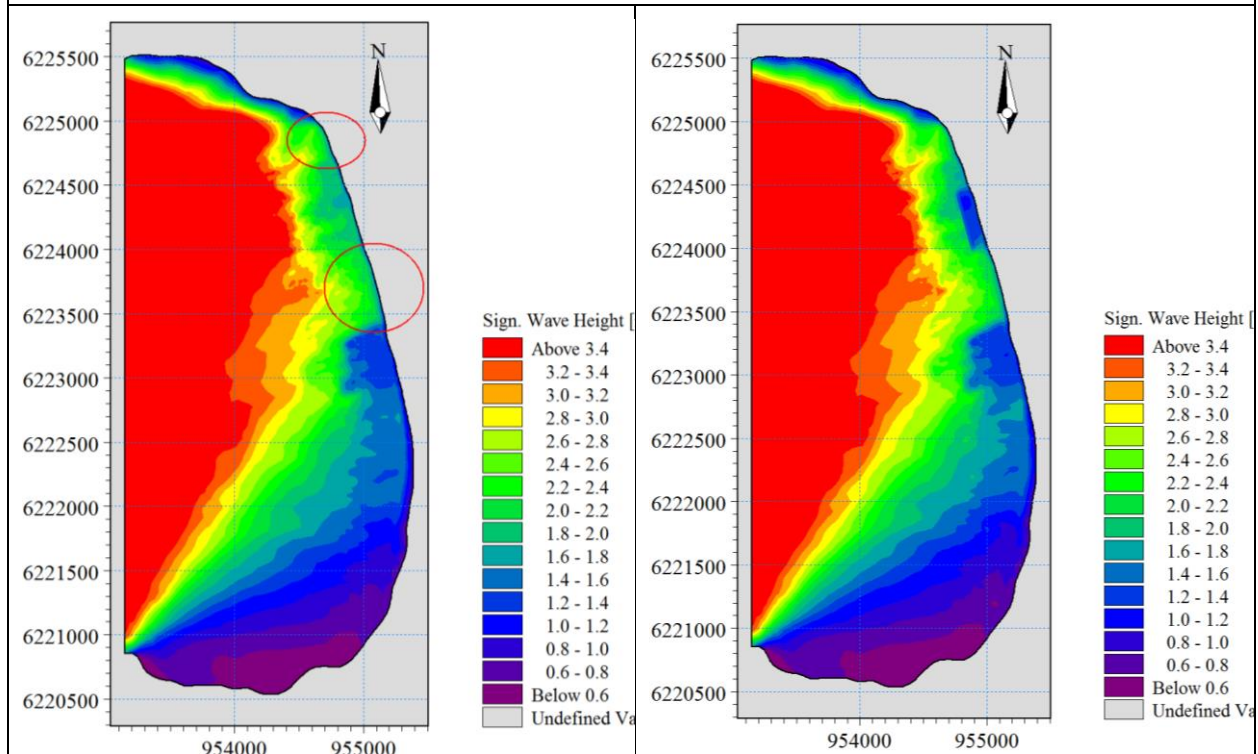
Ces résultats ne sont qu'en un seul point (colonne 1 SBW, les colonnes 2 et 3 SBW le même point mais sont à prendre en compte avec l'ajout des autres digues, pages à suivre), et par conséquent ont une portée limitée. On constate cependant que la hauteur significative des vagues est bien diminuée (environ 40%), le transport sédimentaire aussi. Il faut cependant plutôt visualiser les variations constatées à la côte des champs de vagues, courants, transport sédimentaire et BLC, un simple point de mesure n'étant pas suffisant : suivent des illustrations de l'efficacité d'un seul SBW versus 0 (le SBW01 initial d'Artelia). On constate assez clairement que l'érosion n'est en rien diminuée sur les secteurs Nord B2-B6 et Sud B13-B19, dans les deux cas (Mistral/Largade), pour tous les coefficients (Hs,Vc,BLC).

On constate en conditions Mistral la formation au droit de SBW01 d'un tombolo, ce qui résulte du fait que le ratio longueur/(distance à la côte) soit trop fort. Ceci pourrait avoir un effet contre-productif dans la mesure ou le tombolo ainsi formé pourrait entraver la dérive littorale en période calme (Nord-Sud) qui redistribue des sédiments sur le

profil et permet une reconstitution, partielle, naturelle, du profil de plage. C'est ici à notre sens que se justifie le concept de digue plus courte, moins profonde, plus large....



Mistral case

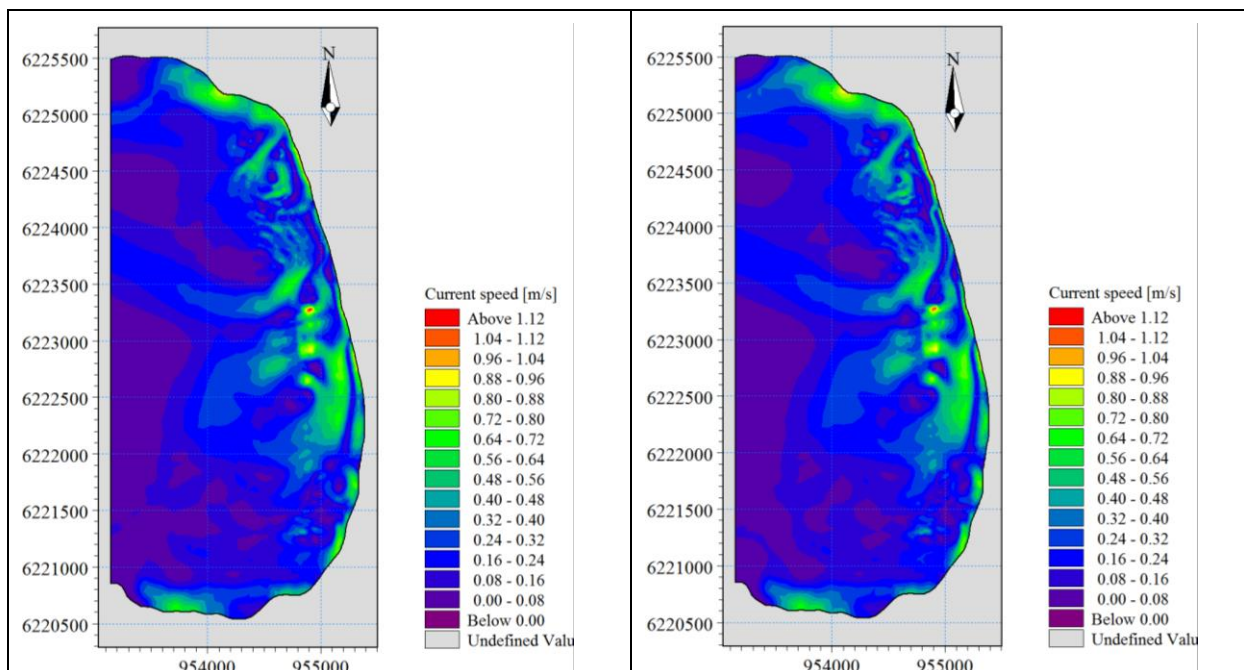


Lagarde case

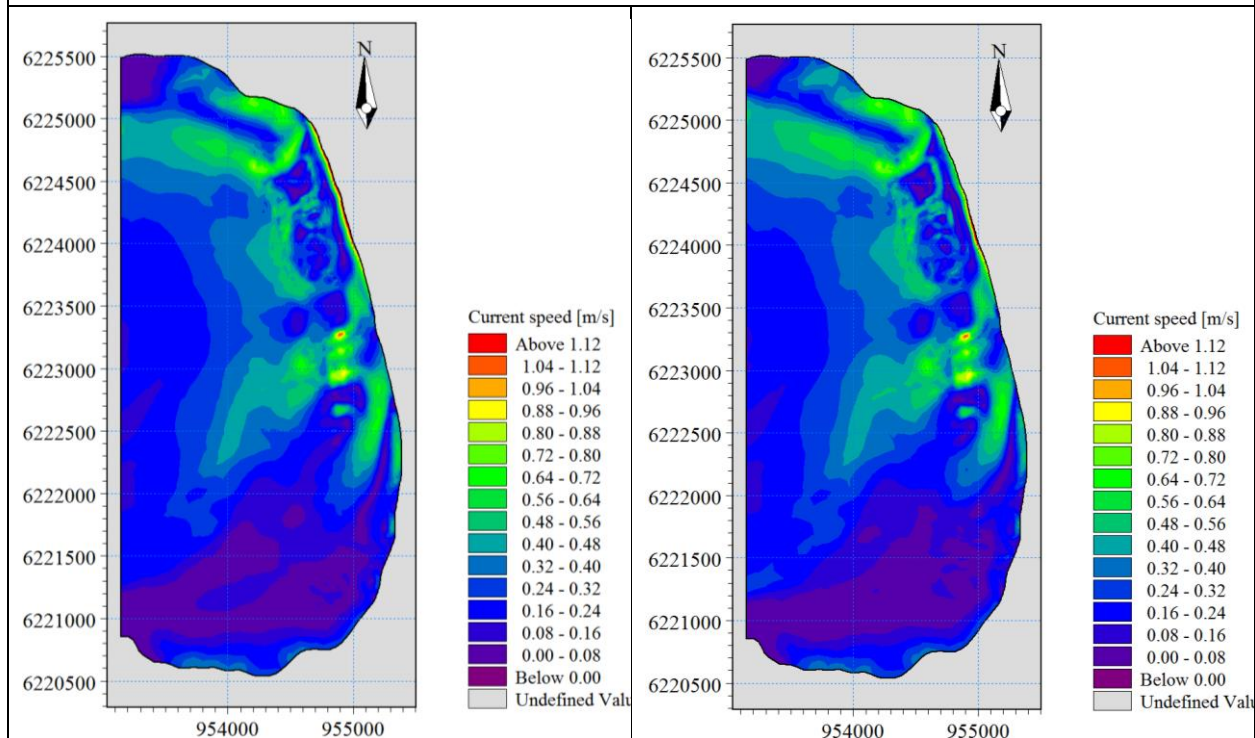
a. No SBW

b. SBW01

Champs de vagues Hs on voit bien la persistance des vagues au Nord et au Sud.



Mistral case

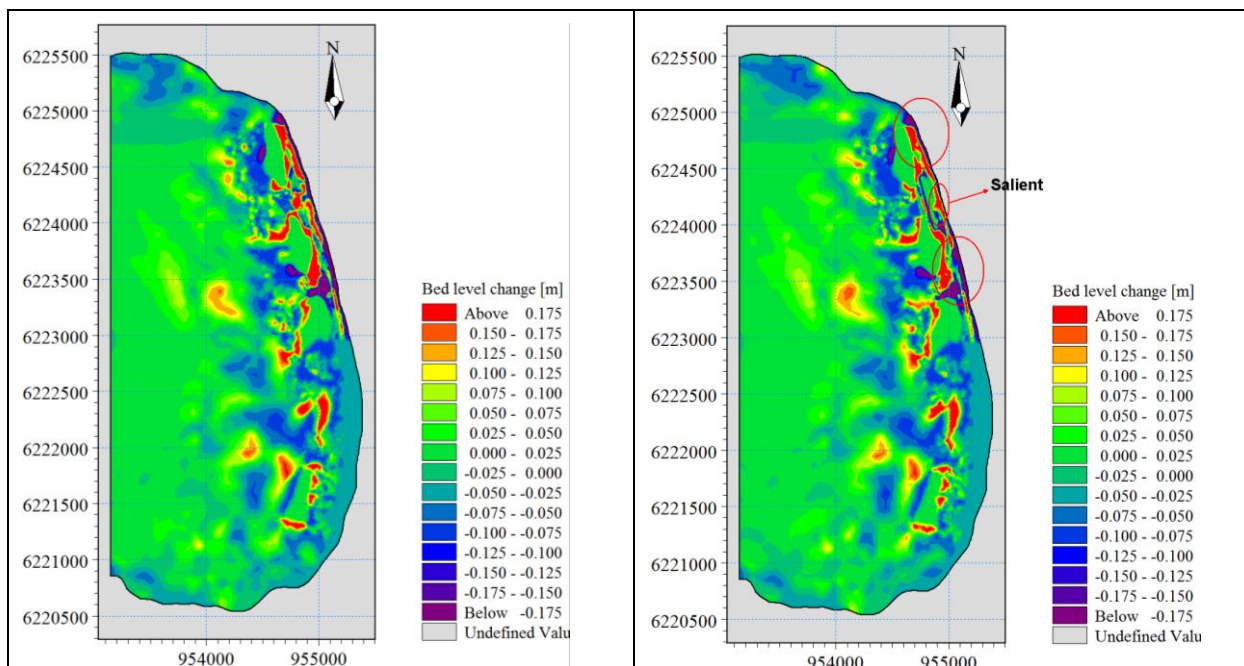


Lagarde case

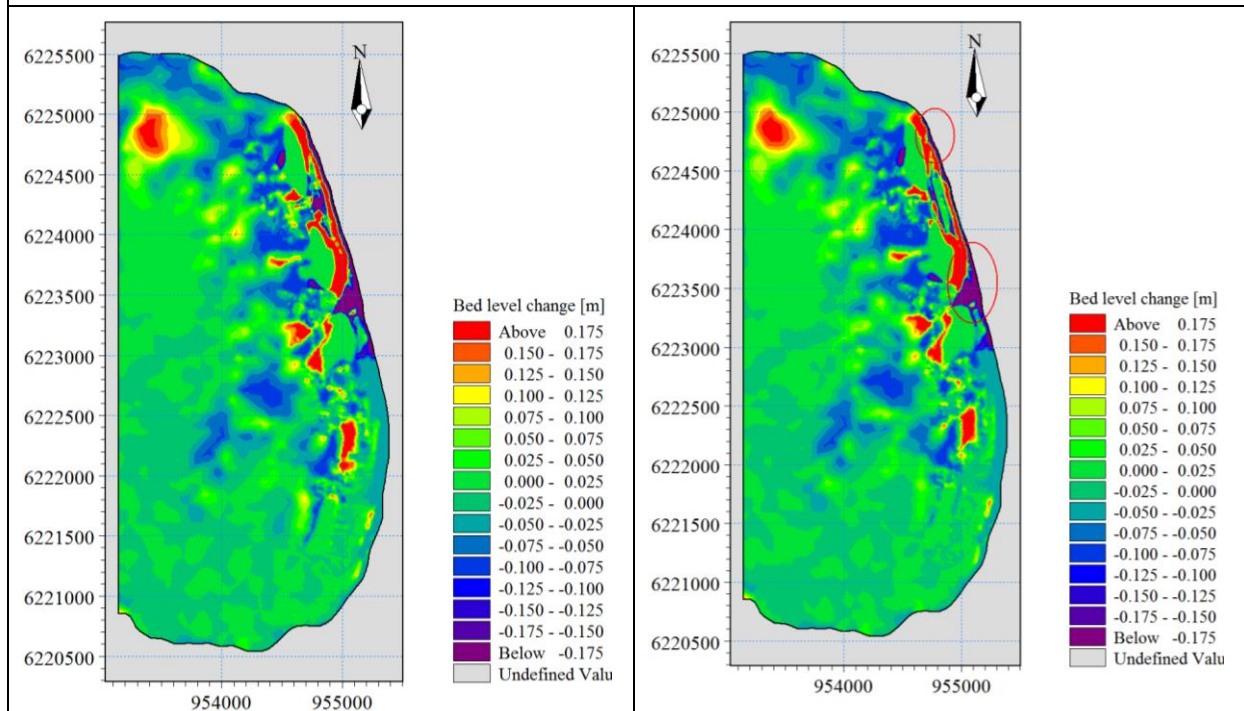
a. No SBW

b. SBW01

Champs de courant : peu de variations en zoomant on constate un déplacement du courant fort en Mistral au Sud de SBW01, et en Lagarde une atténuation du courant à la côte au Nord de SBW01, ce qui est cohérent.



Mistral case



Lagarde case

a. No SBW

b. SBW

Champs de variation du fond marin (élévation ou creusement, BLC) : on constate en Mistral la création d'un petit tombolo, et une situation quasi inchangée au Nord et au Sud de SBW01, que ce soit en Mistral ou Lagarde.

Ceci nous conduit à fortement recommander de compléter le dispositif de protection.

4. CAS DE DEUX DIGUES SBW01 ET SBW02

Nous préconisons un positionnement de la seconde digue comme suit, au droit du secteur B13-B19, cf. Page 2, SBW02. Elle fait 500m de long et l'intervalle entre SBW01 et SBW02 est de 150m plateau à plateau. Les autres caractéristiques sont identiques à celles de SBW01. Cependant plusieurs petites pourraient avoir un meilleur effet.

Voici les coordonnées GPS de SBW02 (deux rectangles, plateau (intérieur) et base (extérieure)).

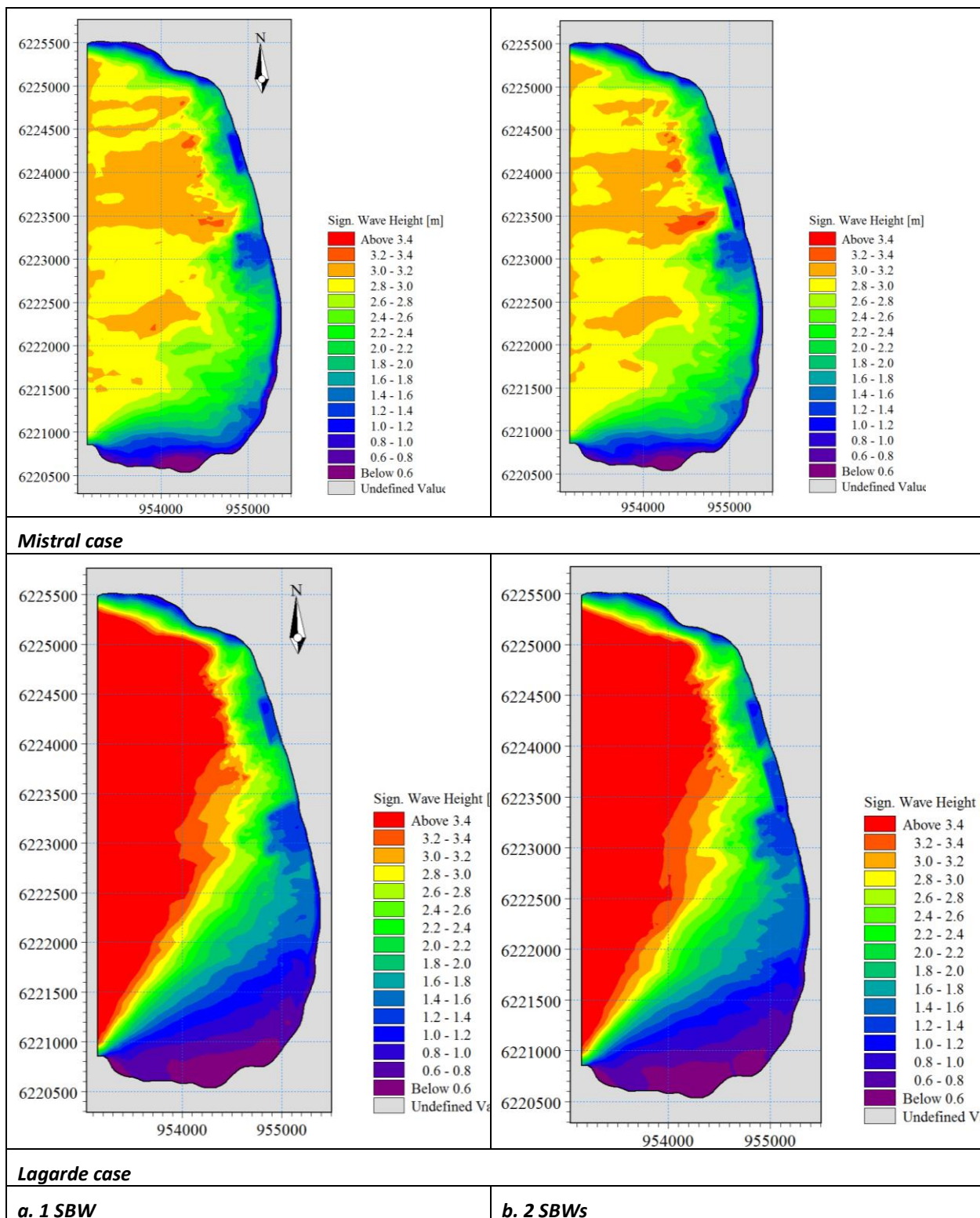
Point	Longitude	Latitude	Elevation	Note	
A	954938.1323	6223851.6695	-5	Exterior point	Basement
B	954909.2151	6223843.6867	-5	Exterior point	
C	955049.9423	6223333.9106	-5	Exterior point	
D	955078.8595	6223341.8934	-5	Exterior point	
AI	954931.1547	6223839.3659	-1	Interior point	Plateau
BI	954921.5155	6223836.7083	-1	Interior point	
CI	955056.9207	6223346.2111	-1	Interior point	
DI	955066.5600	6223348.8687	-1	Interior point	

On adopte la même démarche que précédemment, on évalue en un point supplémentaire placé au droit du SBW02 de coordonnées (955049.035;6223607.9692), le tableau qui suit résume pour ce point les variations des paramètres caractéristiques choisis.

Scenario	Mistral				Lagarde			
	0 SBW	1 SBW	2 SBWs	3 SBWs	0 SBW	1 SBW	2 SBWs	3 SBWs
Hs (m)	2.13656	2.12836	1.22361	1.2208	2.23612	2.24373	1.32626	1.33557
Vc (m/s)	0.27921	0.41257	0.18306	0.1551	0.55525	0.589	0.33253	0.46256
Q (m3/s/m)	0.00025	5.12E-04	3.35E-05	2.79E-05	0.000876	9.45E-04	9.53E-05	3.04E-04
BLC (m)	0.01081	0.00175	0.00606	0.0093	0.04204	0.02796	0.00436	0.02365

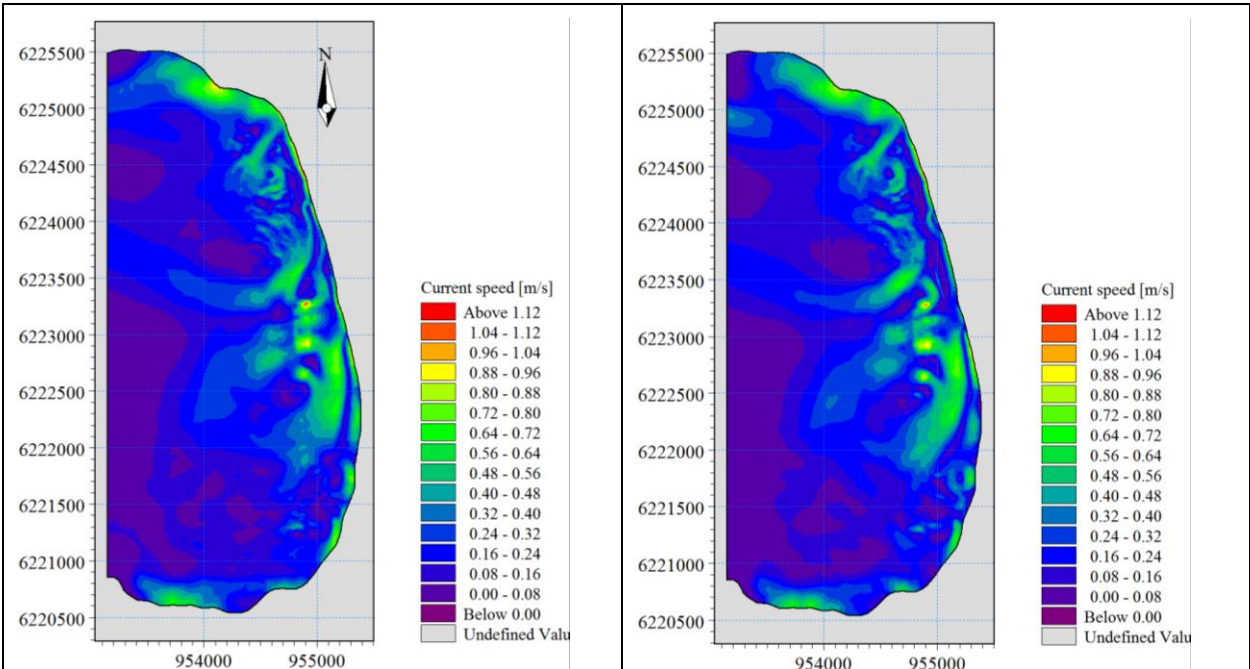
Les visuels qui suivent et qui comparent les champs paramétriques des cas (SBW01) et (SBW01+SBW02) permettent de conclure assez clairement qu'il reste un trou dans la raquette au Nord de SBW01, bien que SBW01 et SBW02 semblent jouer un rôle acceptable au regard du secteur côtier qu'ils couvrent.

Voici les champs de houle Hs en conditions Mistral puis Lagarde :

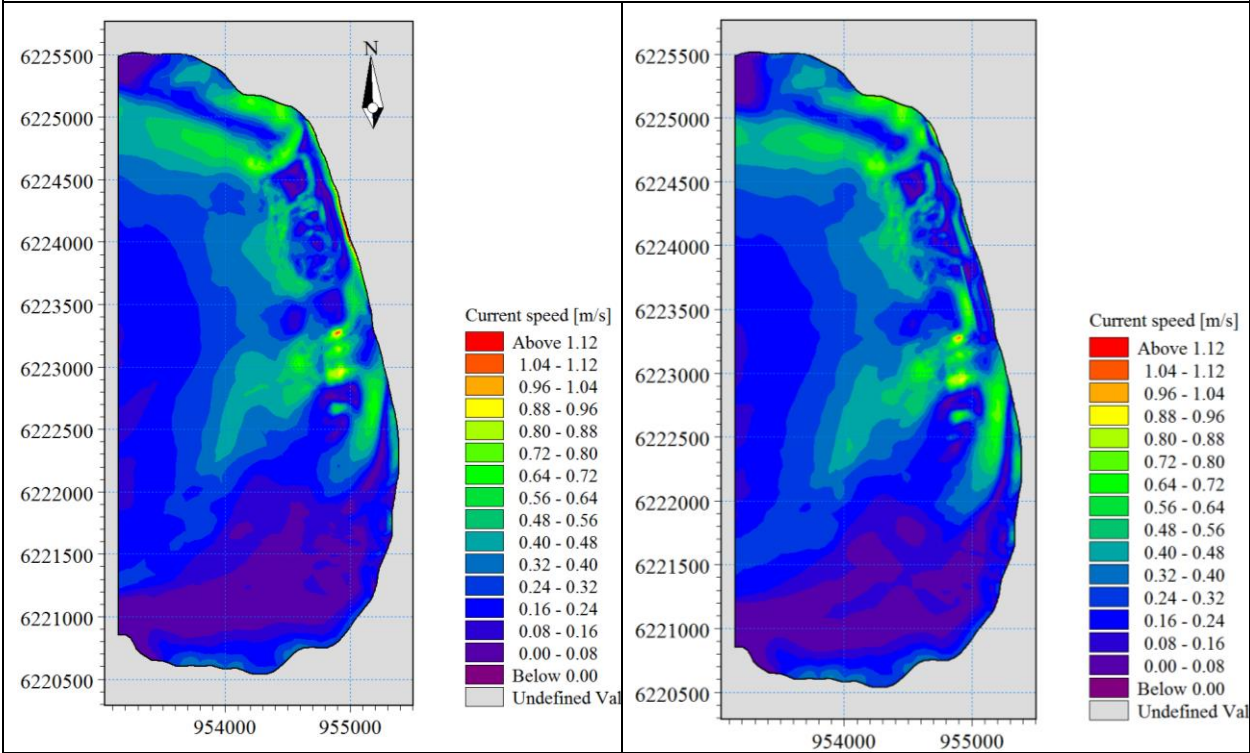


Suivent les champs de courant moyen V_c : on constate une nette amélioration des conditions de courant à la côte en cas Lagarde, sur tout le linéaire y compris celui au droit de SBW01. En cas Mistral, on constate la disparition du

courant au sud de SBW01, et de bonnes conditions de courant à la côte au droit de SBW02, avec un maintien sur SBW01.



Mistral case

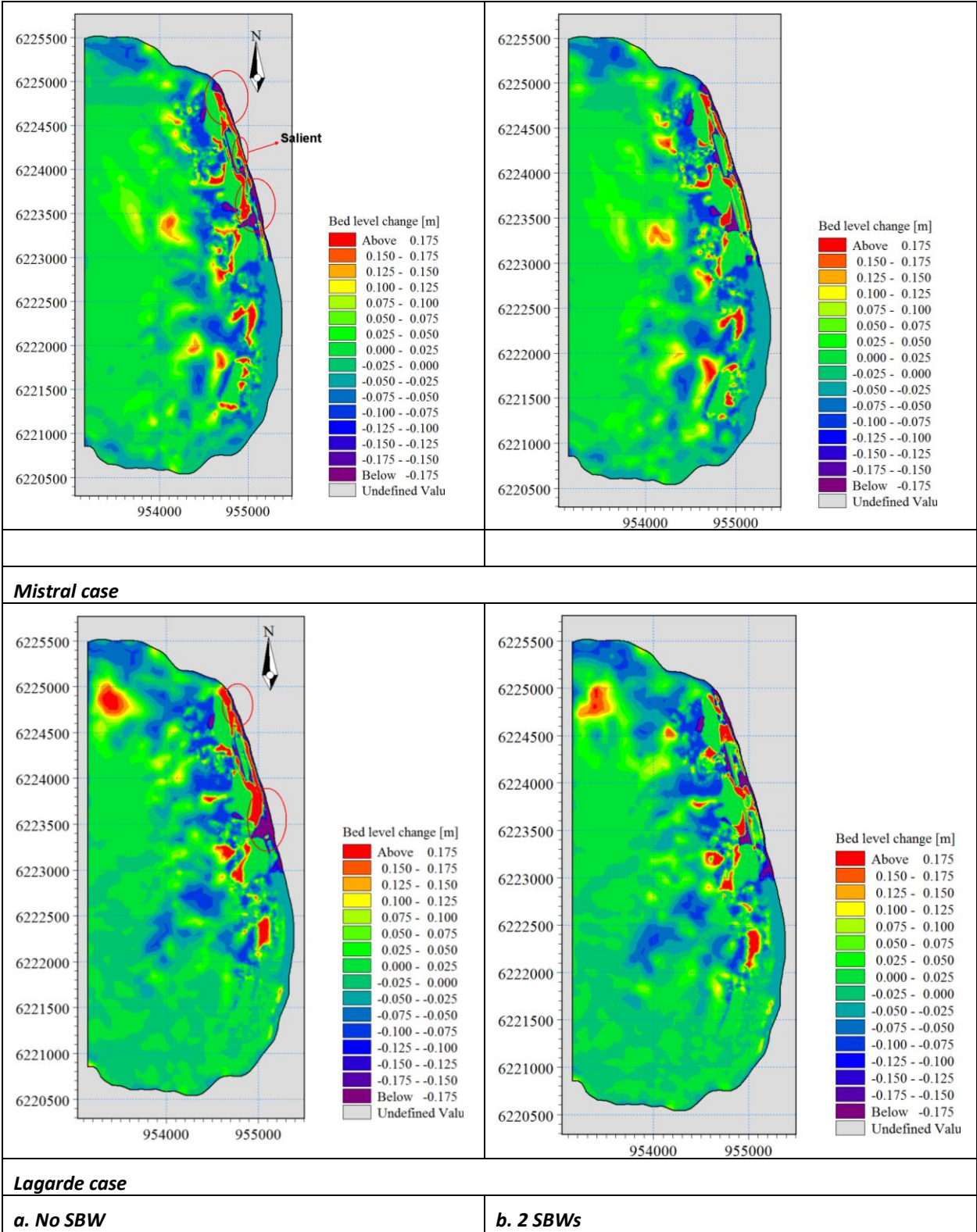


Lagarde case

a. 1 SBW

b. 2 SBWs

Suivent les champs BLC : le tombolo en cas Mistral au droit de SBW01 disparaît, la situation au droit de SBW02 s’améliore nettement. En cas Lagarde, on constate une perte d’efficacité au Sud de SBW01, ce qui suggère d’envisager de rapprocher les digues (diminuer l’espace interstitiel entre deux digues consécutives).



Notre conclusion sur l'efficacité de l'ajout de cette seconde digue est plutôt positive. En effet, à part un problème de resserrement éventuel pour palier à la diminution d'efficacité de la première digue faisant suite à l'ajout de la seconde, en secteur sud SBW01, Largade, l'impact global est positif, pour les courants, au droit de la nouvelle digue mais au-delà sur le linéaire côtier également. Cependant, les conditions de mer à la côte au Nord de SBW01 restent bien trop sévères, et motivent l'insertion d'une troisième digue.

5. TROIS DIGUES SOUS-MARINES

La troisième digue est placée au regard de B01-B05 à une distance équivalente des précédentes de la côte, soit 110m. Ses coordonnées géographiques sont les suivantes, le design étant similaire par ailleurs :

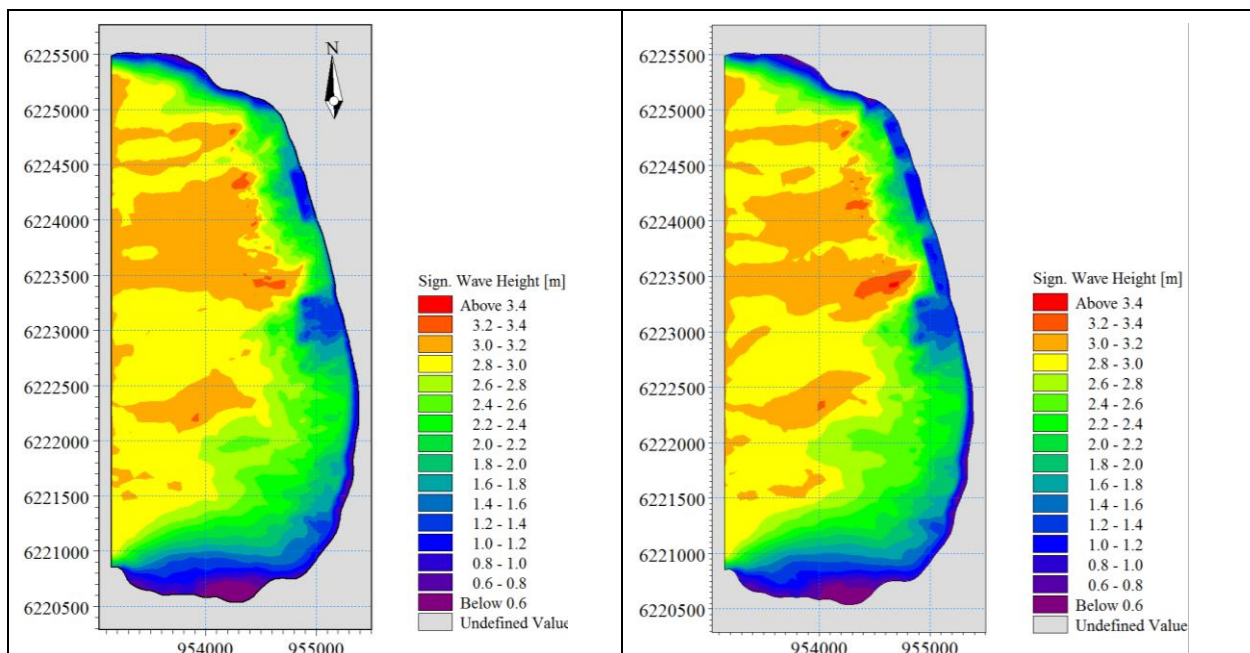
Point	Longitude	Latitude	Elevation	Note	
A	954581.4954	6224902.1484	-5	Exterior point	Basement
B	954553.3638	6224890.0649	-5	Exterior point	
C	954695.1705	6224548.8941	-5	Exterior point	
D	954723.6144	6224560.1367	-5	Exterior point	
AI	954576.1173	6224888.9561	-1	Interior point	Plateau
BI	954566.8126	6224884.9594	-1	Interior point	
CI	954700.2865	6224561.4092	-1	Interior point	
DI	954709.4747	6224565.3559	-1	Interior point	

Comme pour les deux digues précédentes, nous plaçons un point de mesure au droit de SBW03 aux coordonnées (954676.4376;6224741.0199), y enregistrons les paramètres significatifs dans les quatre configurations 0,1,2,3 SBW, puis reproduisons les extraits graphiques pour Hs, Vc et BLC, commentés.

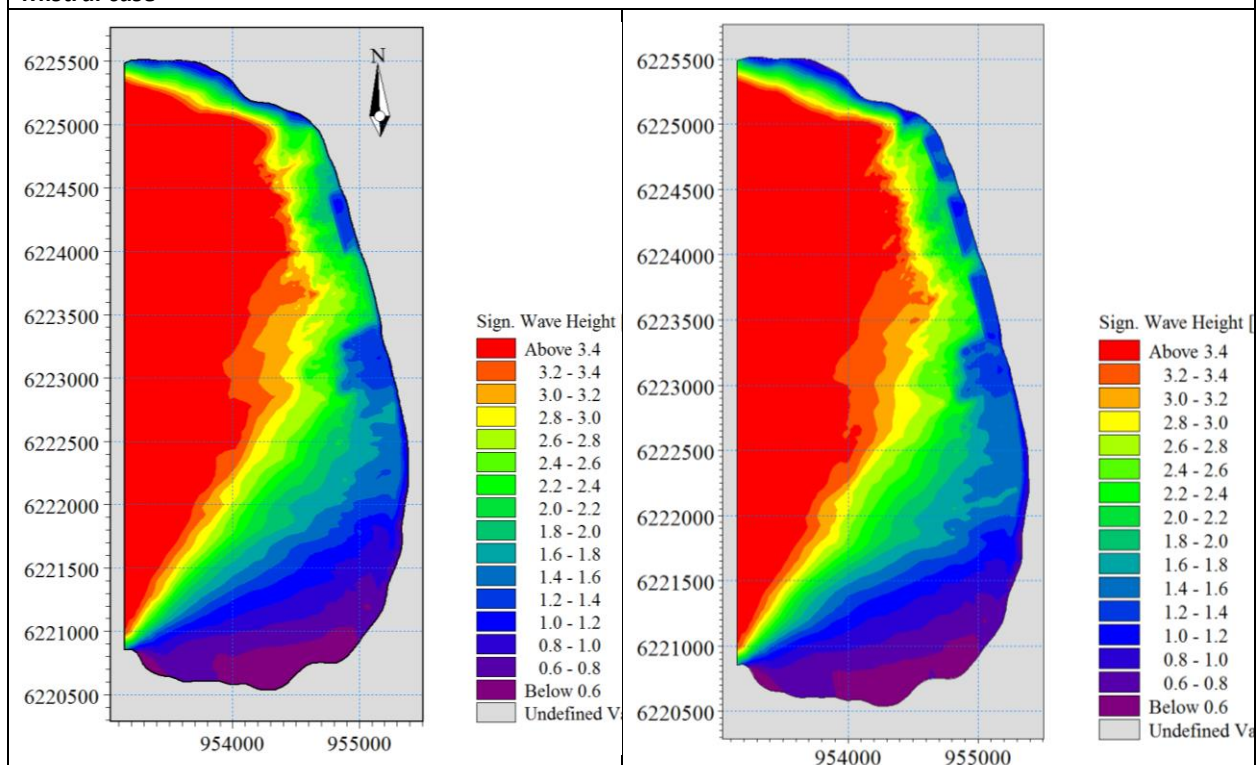
Scenario	Mistral				Largade			
	0 SBW	1 SBW	2 SBWs	3 SBWs	0 SBW	1 SBW	2 SBWs	3 SBWs
H _s (m)	2.2552	2.2617	2.23664	1.27171	2.31246	2.33169	2.33579	1.4320
V _c (m/s)	0.21	0.3	0.127	0.38	0.28	0.23	0.44	0.62
Q (m ³ /s/m)	0.0002	3E-04	1.5E-04	1.5E-04	0.0002	1.5E-04	6.3E-04	6.1E-04
BLC (m)	0.0977	0.0957	0.0977	0.0761	0.09042	0.0879	0.0602	0.0967

On constate une bonne efficacité sur Hs, par contre une hausse des paramètres Vc dans le cas de 2SBW et 3SBW en régime Largade, et hausse Vc en 3SBW pour mistral. Nous pensons que la longueur des digues révèle ici un autre défaut, à savoir que ce linéaire redirige les masses d'eau et accentue les perturbations hydrodynamiques du secteur nord B1-B6.

Suivent les extractions graphiques comparant les paramètres caractéristiques 1SBW versus 3SBW. Pour le champ de vagues, on peut considérer qu'on atteint un niveau de protection suffisant du linéaire B1-B19. L'espace interstitiel SBW01-SBW02 reste cependant peut être un peu trop grand (mais il ne faut pas trop le diminuer au risque de créer des courants de retour locaux forts, c'est le problème avec les longues digues).



Mistral case

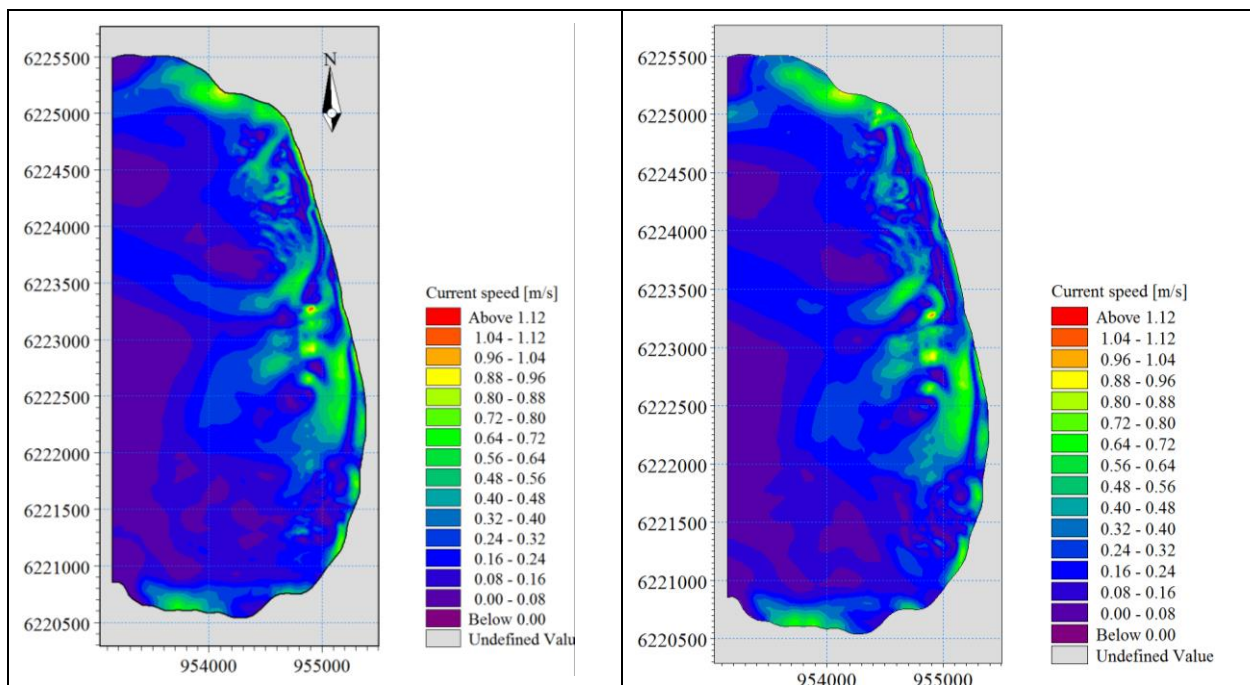


Lagarde case

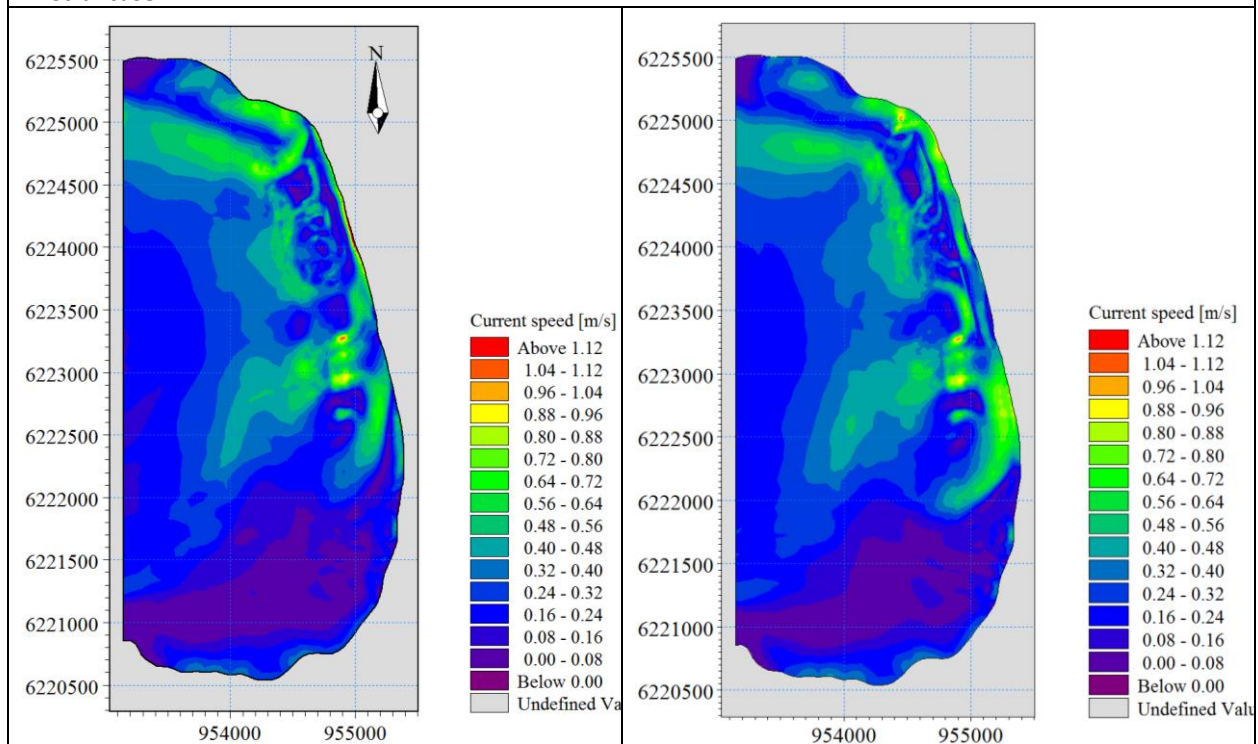
a. 1 SBW

b. 3 SBWs

Voici à présent les champs de courants qui sont tout à fait acceptables. On y constate finalement une légère augmentation du courant au droit de SBW03 à distance intermédiaire de la côte, mais une diminution, aux mêmes transects, du courant de contact au linéaire côtier.



Mistral case

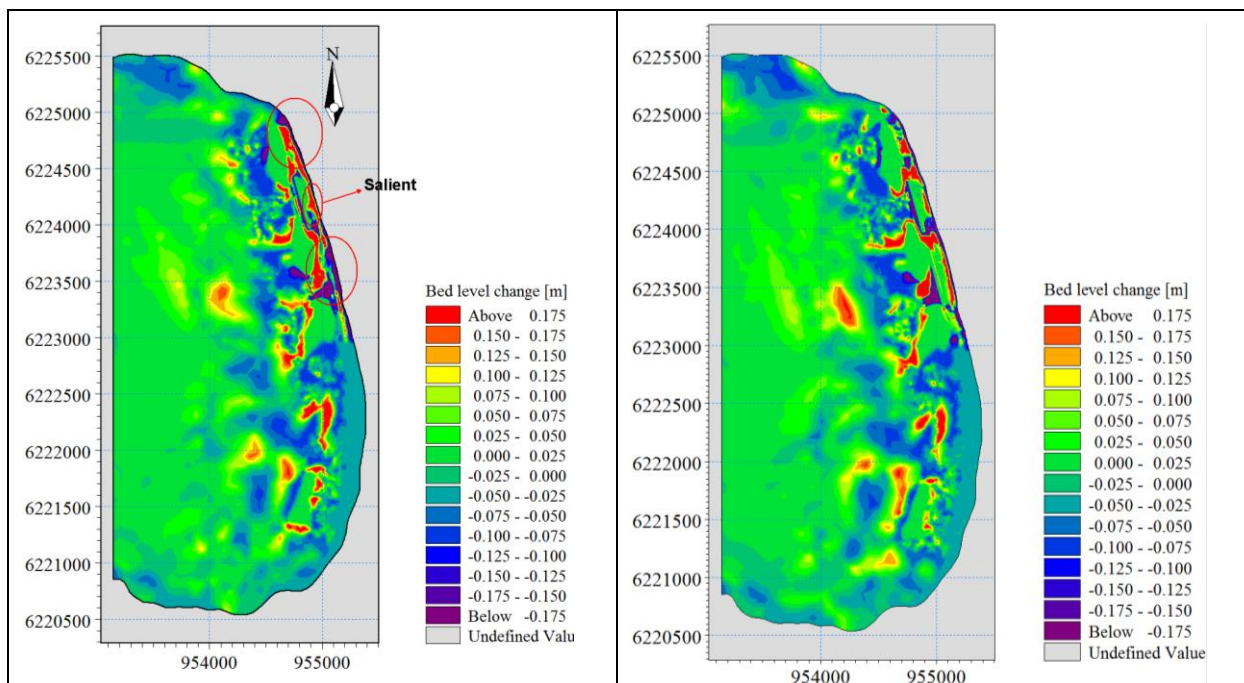


Lagarde case

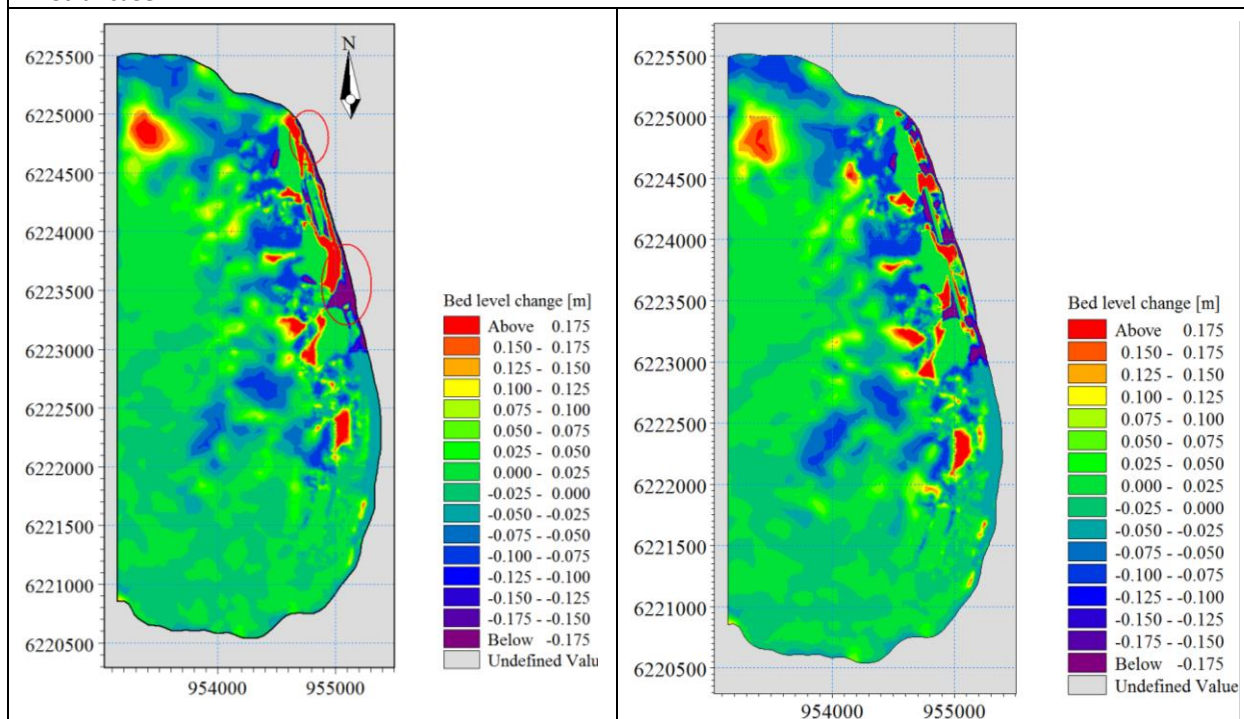
a. 1 SBW

b. 3 SBWs

Voici à présent les champs BLC : on constate une augmentation au droit de SBW3 du champ BLC négatif en régime Lagarde. Ceci est probablement dû aux effets de linéaire qui en régime sud-ouest concentrent les masses d'eau de façon accentuée en secteur Nord.



Mistral case



Lagarde case

a. No SBW

b. 3 SBWs

6. CONCLUSIONS CONFIGURATION SBW01, SBW02, SBW03, UNE AUTRE PROPOSITION

Il est absolument clair que SBW01 seul n'est pas suffisant, bien que son rôle de protection du linéaire côtier qu'il couvre (B7-B12) soit satisfaisant en conditions décennales au plus. L'ajout de deux structures supplémentaires SBW02 et SBW03 pour couvrir le restant de la zone impactée apporte clairement les mêmes effets aux zones B1-B6 et B13-B19. Cependant, il est nécessaire de relever que la longueur des digues peut avoir les impacts négatifs suivants :

- Générer la formation de tombolos perpendiculaires aux digues qui risquent de dégrader le transit longitudinal en période de reconstitution (typiquement conditions estivales) ;
- Canaliser les masses d'eau en régime sud-ouest vers le secteur Nord où les conditions de courant et de BLC s'en trouvent aggravées (bien que celles Hs soient convenablement diminuées). Rappelons que les conditions sud-ouest sont les plus dévastatrices.

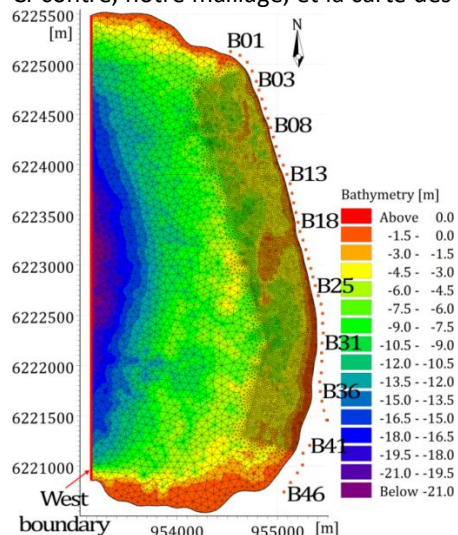
La conception proposée appelle d'autres remarques de fond :

- Pourquoi ne pas rehausser la profondeur de submersion des plateaux ce qui permettra d'augmenter l'efficacité face aux conditions trentennales, cinquantennales voire centennales, qui ne manqueront pas de se produire sur la période d'amortissement de l'investissement envisagé ; sans compter que sur 50 ans on envisage une hausse de 10 à 20cm du niveau de la mer.
- Pourquoi ne pas proposer des plateaux plus larges, les plateaux proposés ici étant d'une largeur susceptible de contenir de façon appropriée les conditions de mer à combattre en rade de Hyères, alors qu'il est clair qu'elles sont plus sévères en golfe de Giens (cf. thèse M.-T. Vu 2018).

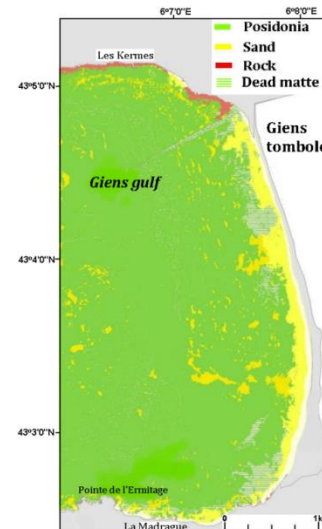
Globalement, des digues plus larges, plus hautes, et plus courtes, semblent donc clairement préférables, le niveau d'investissement à réaliser devant être évalué à l'aune des coûts annuels engendrés par les reconstitutions périodiques de cordons dunaires, les dégagements de la route du sel, et le désensablement du canal de ceinture. À cet égard, notre calcul est de $0.5 \times 50 = 25\text{M€}$ sans digues, ce qui laisse de la marge.

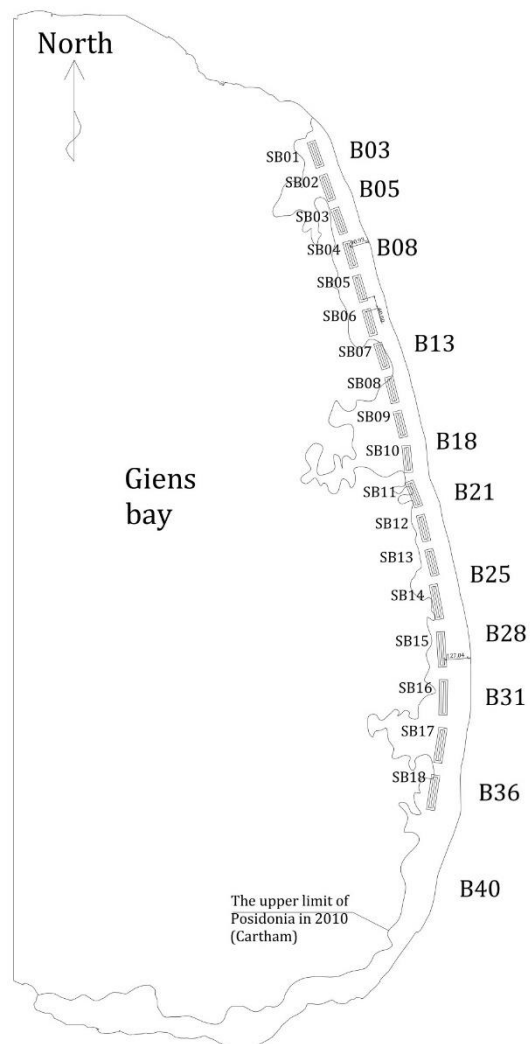
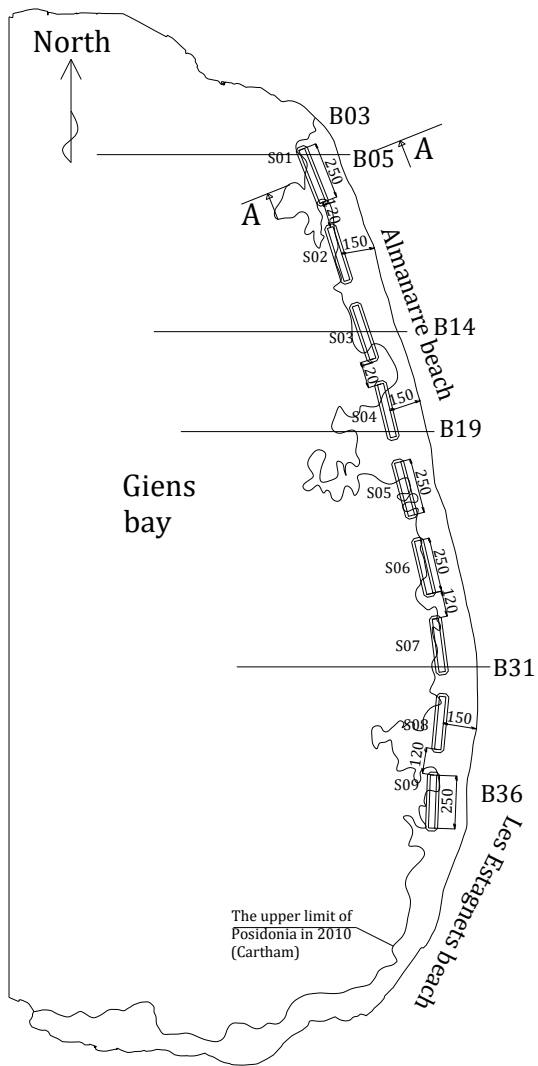
Nous présentons ci-après une configuration possible de protection, constituée d'un chapelet de petites digues longues de 120m, larges, espacées de 60m, distantes de 90 à 120m de la côte, dont la partie couvrant la zone B1-19 voire B-B21. Ce type de configuration a été calculé par nos soins dès Juillet 2016.

Ci-contre, notre maillage, et la carte des posidonies établie par CARTHAM en 2012,



qui a très peu changé depuis. Page suivante, vous reproduisons notre proposition de digues pour la zone Nord à couvrir, ainsi que le plan de coupe de l'une d'entre elles.

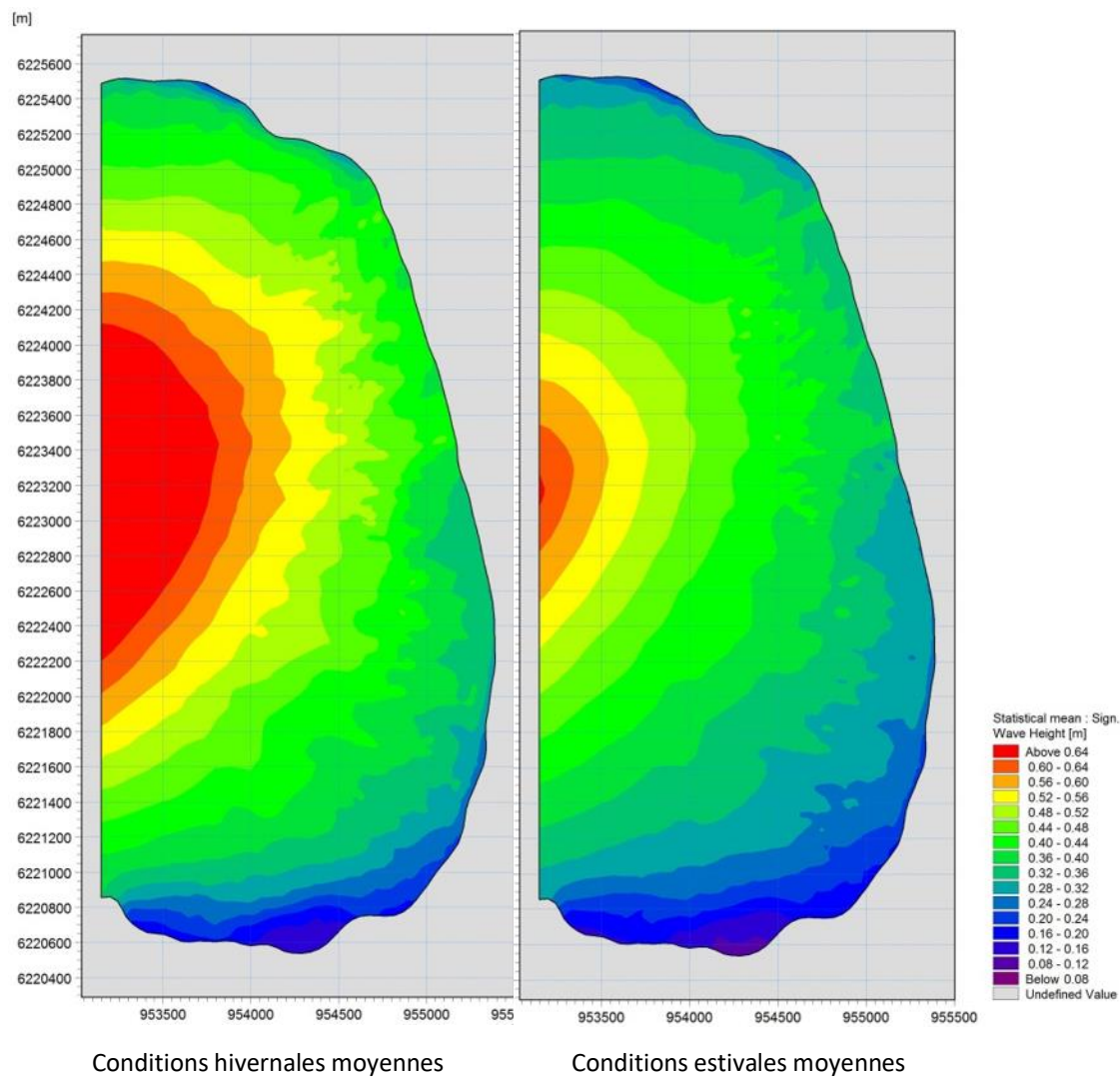




Plan-view of SBWs in Almanarre beach

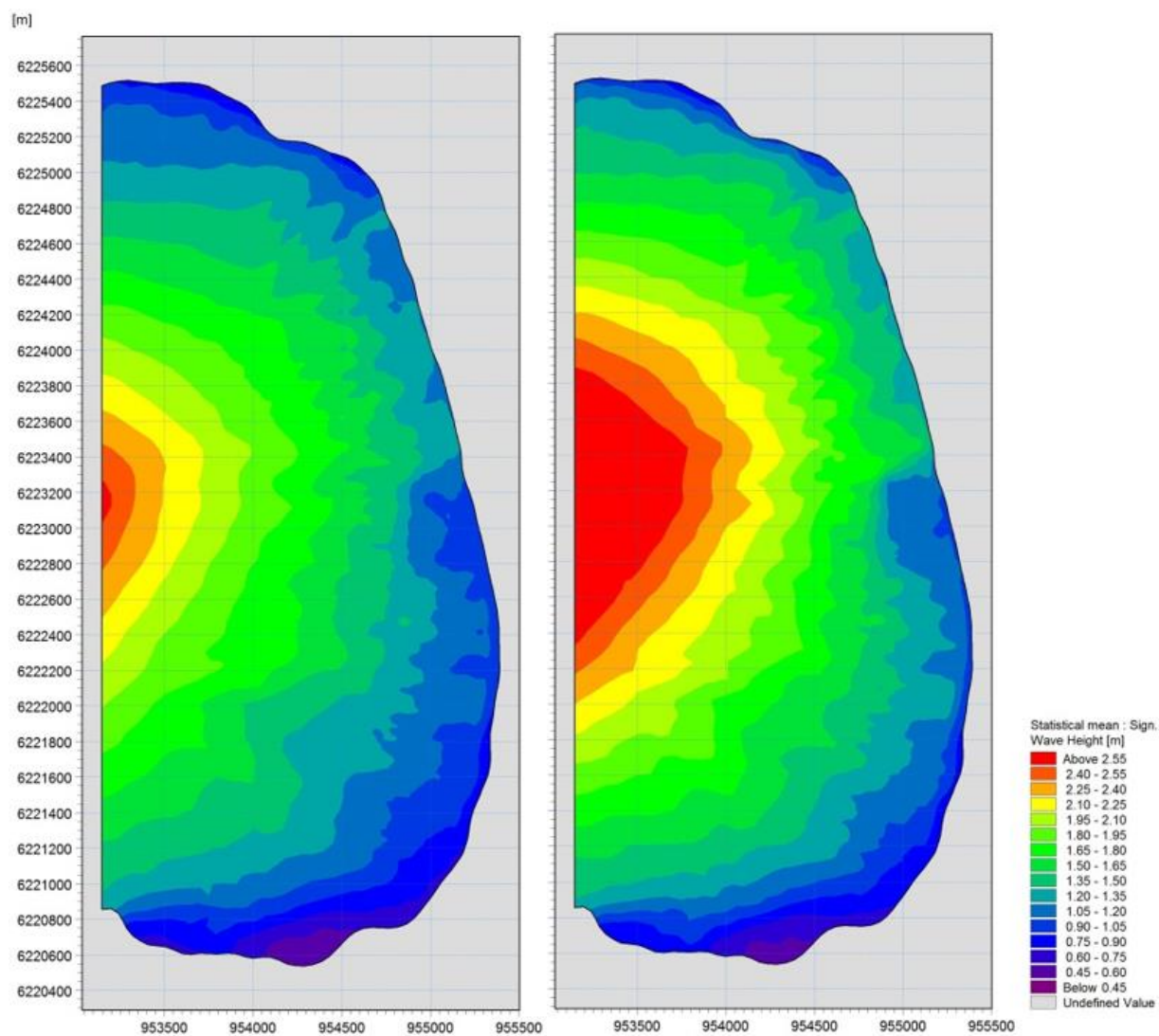
7. DE LA PUISSANCE DES TEMPETES

Ici nous reproduisons pour information des illustrations montrant les champs de vagues en golfe de Giens pour différents évènements climatiques :



On observe à la côte une houle de 0.5m en hiver, 0.3m en été. Il s'agit de conditions moyennées d'après données météo.

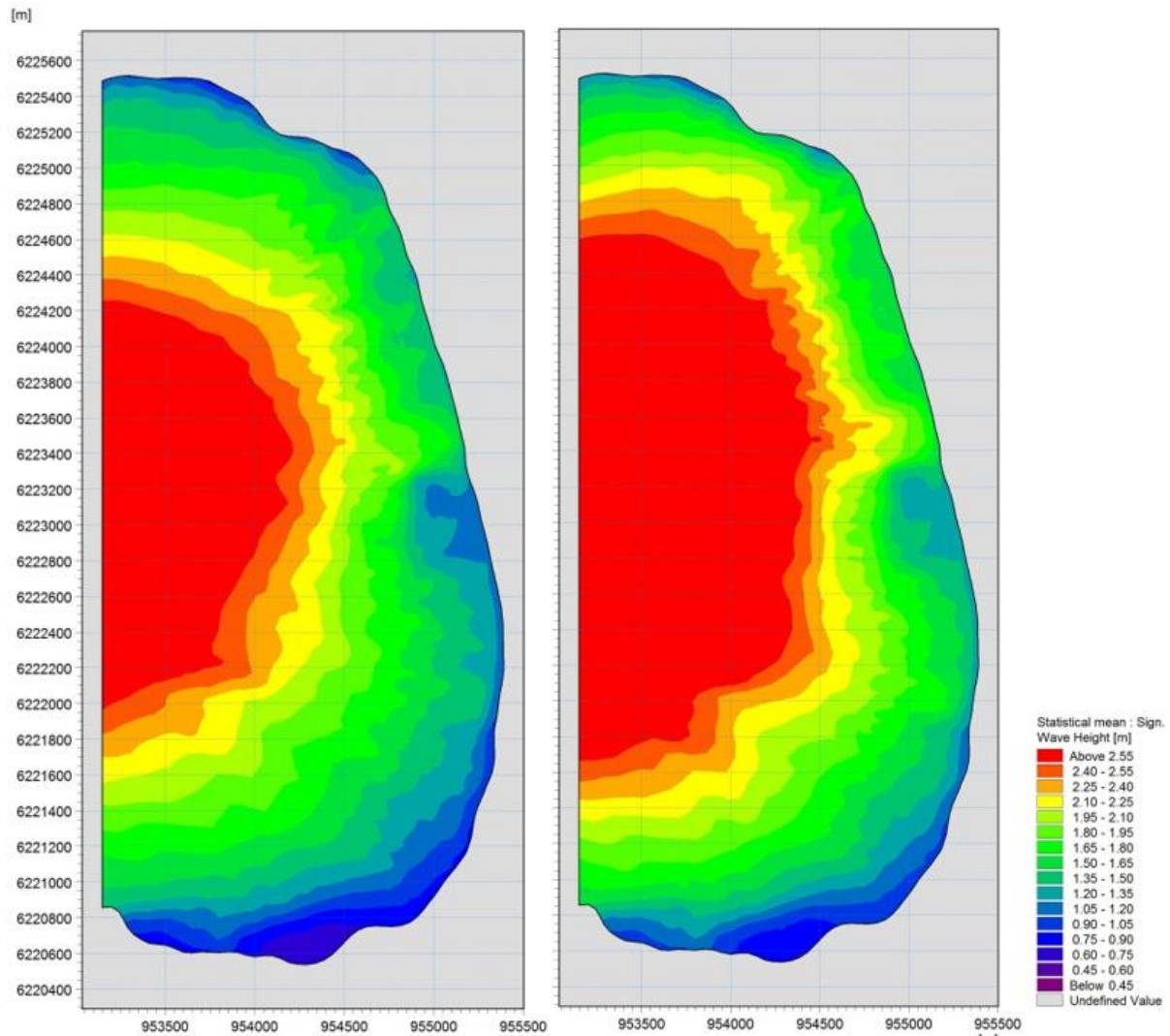
Page suivante nous présentons les conditions décennales, trentennales, cinquantennales et centennales. L'échelle des couleurs n'est bien entendu pas la même, le rouge ci-dessus correspond au bleu foncé qui suit.



Conditions décennales

Conditions trentennales

Ici observe en décennale 1.3m à la côte, en trentennale 1.5m. Page suivante, même topo, avec les conditions cinquanteennes et centennes.



Conditions cinquantennales

Conditions centennales

On observe ici parfois jusqu'à 2m à la côte, avec notamment une extension du champ de hautes vagues et une atteinte plus marquée du littoral de secteur Sud, qui restait relativement protégé pour les conditions jusqu'à décennales.

8. BIBLIOGRAPHIE COMMENTEE NON EXHAUSTIVE

Voici un document de la DDTM Var :

- [HYDRO M 1993](#) Commande DDTM Var protection tombolo. Rechargements et reprofilage, différents cas de profils.

Voici des documents de la ville de Hyères (qui ne veut pas les rendre libres d'accès) :

- IARE 1996 Proposition solution protection tombolo occidental commande ville d'Hyères : soit laisser faire, soit boucher les brèches, recharger, et introduire des brises lames et des épis....
- Serantonni 1997, 2000-2010, 2006 Rapports de campagne de mesures bathymétrie, herbiers de posidonie commandés par la mairie de Hyères.
- SOGREAH 1988a Défense littoral occidental commande ville d'Hyères : rechargements, épis, renforcement posidonie.
- SOGREAH 1988b Défense littoral occidental : études en canal de profils de rechargement...
- SOGREAH 1988c Études sédimentologiques littoral oriental commande ville d'Hyères.
- SOGREAH 1988d Protection tombolo Ouest commande ville d'Hyères.
- Oceanide 2011, Phase 3 : protection Ceinturon, Commande ville de Hyères
- Oceanide 2011, Phase 2 : protection Ceinturon, Commande ville de Hyères
- Oceanide 2011, Phase 1 : synthèse connaissances Ceinturon Nord Port Saint Pierre, Commande ville de Hyères
- Océanide 2010, Climatologie états de Mer, Hyères, Commande ville d'Hyères
- Océanide 2009, plans bathymétrie Ceinturon Nord Saint Pierre, Commande ville d'Hyères
- Océanide 1995, Extension port de l'Aiguade, Commande Ville d'Hyères
- Océanide 1990, Commande ville d'Hyères, ensablement Aiguade
- Meulé 2010 Commande ville d'Hères implantation géotubes La Capte.
- ERAMM-Bougis 2001-1, Protection partie Nord tombolo Ouest phase I, Commande ville d'Hyères. L'accentuation de l'érosion entre B8 et B10 serait due à la nature des fonds, dont la brèche.
- ERAMM-Bougis 2001-2, Protection partie Nord tombolo Ouest phase II, Commande ville d'Hyères. Solutions de protection préconisées : reprofilage et rechargement, avec en plus butée de pieds en enrochements, palplanche, ou géotextile.
- ERAMM-Bougis 2001-3, Protection partie Nord tombolo Ouest phase III, Commande ville d'Hyères. Le rechargement avec butée de peid stabilisera la plage...
- EGIS 2012 atténuateur de houle à La Capte. Analyse effets atténuateurs de houle La Capte.
- [Plan triennal rechargement La Capte](#) : prévoit l'ajout d'un géotextile et un rehaussement (on passe de -1m LSL à -0.5m LSL...).
- Campagnes de mesure EOL 2001-2010 : relevés bathymétriques, courantologiques, biologiques, profils de plage.

Voici des documents libres d'accès :

- [Blanc 1973](#) Recherches sédimentologiques sur la protection du littoral à la presqu'île de Giens.
- [Judy de Grissac 1975](#) Thèse sédimentologie dynamique rade d'Hyères et Golfe de Giens.
- [Courtaud 2000](#) Dynamiques géomorphologiques et solutions douces de protection thèse CEREGE.
- [Meulé & all 2010](#), résultat études géotubes La Capte.
- [Capanni 2011](#) Débits sédimentaires Gapeau et Pansard Maravanne thèse AMU.
- [CARTHAM](#) relevé topographiques et biocénoses 2013.

Thèse de V.-V. Than et travaux associés :

- [Than 2015](#) : c'est la thèse de Than, elle inclut un modèle numérique qui permet de dimensionner tout type de structure de protection. Financement gouvernement Vietnamien. Ici on conclut de façon argumentée à l'efficacité des digues sous-marines.

- [Than-Lacroix 2016](#) Étude de retrait de trait de côte incluant hausse du niveau de mer Almanarre. Plus fine que l'étude macroscopique CEREMA (cf. infra).
- [Lacroix-Than 2015](#) Étude de la dynamique hydro-sédimentaire golfe de Giens. Identification de cellules hydro-sédimentaires, confirmation numérique des études antérieures.
- [Lacroix-Than 2015](#) Illustration de la capacité du modèle numérique à évaluer l'efficacité de différents types de dispositifs de protection du littoral plage de l'Almanarre. Évaluation des coûts.
- [Lacroix-Vu-Than-Nguyen 2015](#) Évaluation numérique de l'efficacité des géo tubes de La Capte, selon mesures Meulé 2010. Ils sont trop bas.

Thèse de M.-T. Vu et travaux associés :

- [M.-T. Vu 2018](#) : sa thèse propose une étude complète de la protection du littoral sur les secteurs Ceinturon, Bona et Pesquiers en rade de Hyères. Notamment il met en avant le fait que le rechargement de plage est, bien que les conditions en rade de Hyères soient moins sévères que dans le golfe de Giens, une solution de demi-durée de vie égale à deux ans. Il inclut dans son étude une étude d'évolution de trait de côte avec les ouvrages de protection type digues sous-marines. Il démontre numériquement le rôle essentiel des posidonies, ce qui confirme les hypothèses formulées depuis longtemps par les spécialistes.
- M.T. Vu, Y. Lacroix, V.T. Nguyen, «[Investigating the impacts of the regression of Posidonia oceanica on hydrodynamics and sediment transport in Giens gulf](#)», Ocean Engineering, Vol. 146 (2017), p. 70-86. Ici on démontre que l'absence des posidonies a des effets amplificateurs sur les événements climatiques responsables de l'érosion à l'Almanarre. Les facteurs peuvent être de 200% à 300% !
- Minh Tuan Vu, Yves Lacroix, Van Van Than, Viet Thanh Nguyen, «[Application of geospatial technics for prediction of coastline changes in Almanarre beach, France](#)», Indian Journal of Geo Marine Sciences, 9pp., 2018. Ici on démontre que l'utilisation des images satellites est aussi efficace pour prévoir l'évolution des traits de côtes que les campagnes photographiques, et par ailleurs, il faut savoir qu'elles sont disponibles gratuitement. Les secteurs érodés et accrétés sont confirmés.
- Lacroix, Minh Tuan Vu, Viet Thanh Nguyen, «[Empirical Equilibrium Beach Profiles Along The Eastern Tombolo of Giens](#)», J. Marine Science and Applications, 2018, 9 pp. Ici on évalue la typicité des profils d'équilibre pour la rade de Hyères, mais l'étude était en fait étendue au golfe de Giens. L'étude des profils met en évidence une incapacité du littoral à se stabiliser.
- M.T. Vu, Y. Lacroix, «[Investigating the effects of sea-level rise on morphodynamics in the western Giens tombolo, France](#)», accepted ICESE Barcelona 2018. Ici on s'intéresse à l'impact de l'élévation du niveau marin dû au réchauffement climatique sur les événements climatiques dégradant le littoral de l'Almanarre. Cette élévation a peu d'effet sur les événements climatiques les moins puissants, mais son impact s'accroît avec la puissance des tempêtes. Il faut donc non seulement compter sur une hausse du niveau marin, mais l'accompagnant, une hausse de la puissance des événements climatiques générant l'érosion. Les surcotes seront donc plus hautes et tout à la fois les tempêtes plus fortes à la côte...

Les thèses contiennent tous les liens vers les documents, sources numériques et autres, utilisés dans ces études. Elles incluent également des approches historiques des interventions, ainsi qu'une description exhaustive du type d'intervention qui sont classiquement envisagées en protection littorale.

Rajoutons un lien vers les cartes de tendances érosives du littoral français récemment éditées par le [CEREMA 2016](#).