

# Peut-on sauver la plage de l'Almanarre, et pourquoi?

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

Van-Van Than (Water Resources University, Hanoi),

Minh Tuan Vu (University of Transport and Communication, Hanoi)

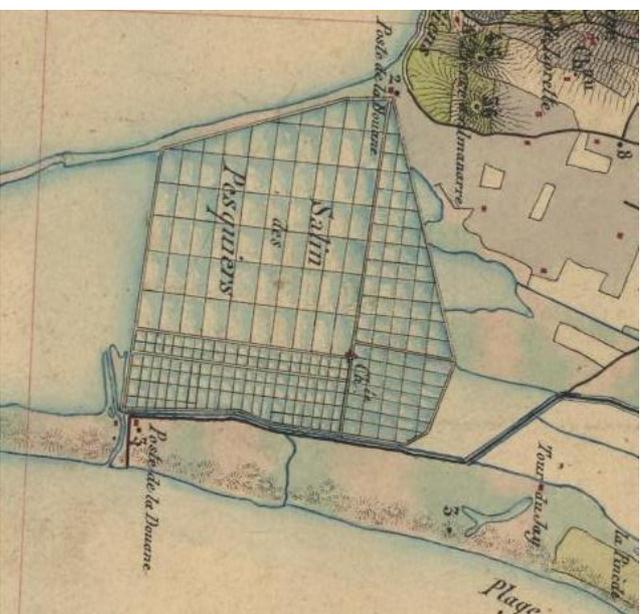
# Plan

- 1) état des lieux
- 2) peut-on réduire les conditions de mer à la côte
- 3) pourquoi?

# 1) État des lieux



18ième

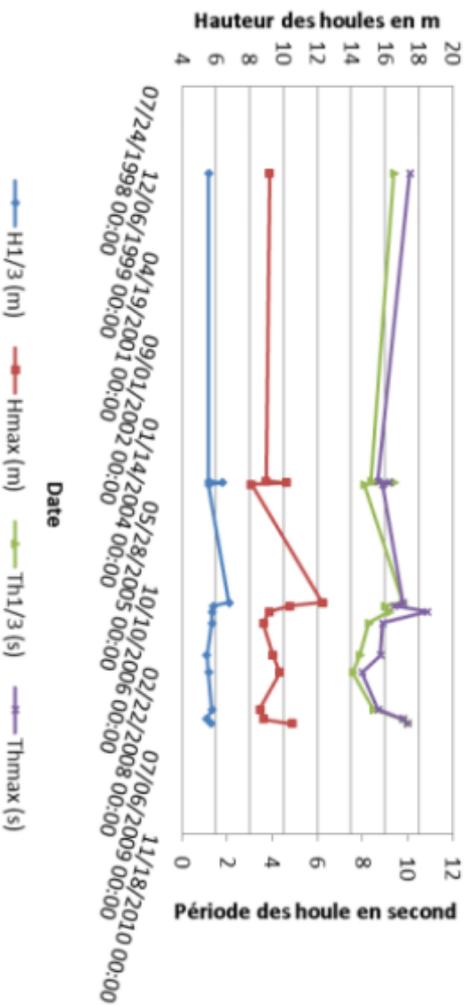


19ième

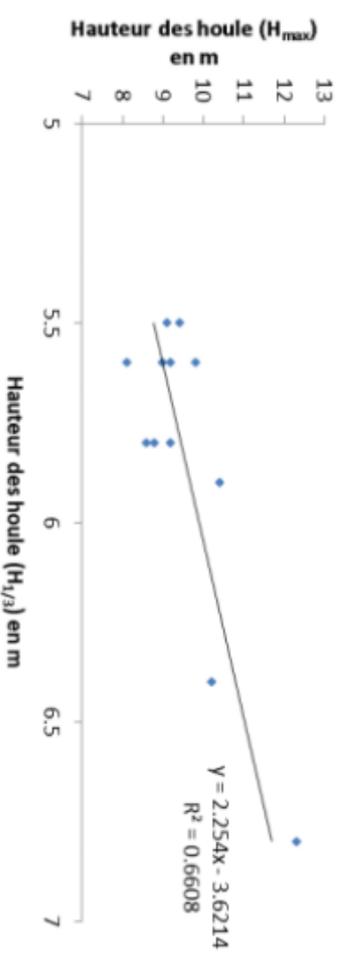


20ième

- Absence d'apports sédimentaires sauf résidus biologiques mal estimés
- Prélèvements jusqu'au 19<sup>ième</sup> de sable pour construction port de Toulon
- La côte est érodée lorsque le vent souffle fortement de Nord-Ouest (Mistral), Ouest (Ponant), Sud-Ouest (Libeccio). Le mistral génère les courants les plus forts, le Libeccio les vagues les plus fortes, le fetch étant important et le golfe exposé. Le Ponant peut être très nocif combinant les deux effets.
- La posidonie protège la côte en réduisant vagues et courants, en captant les sédiments, en développant la matte, et en protégeant le linéaire côtier par la création de banquettes de posidonies.



(A)



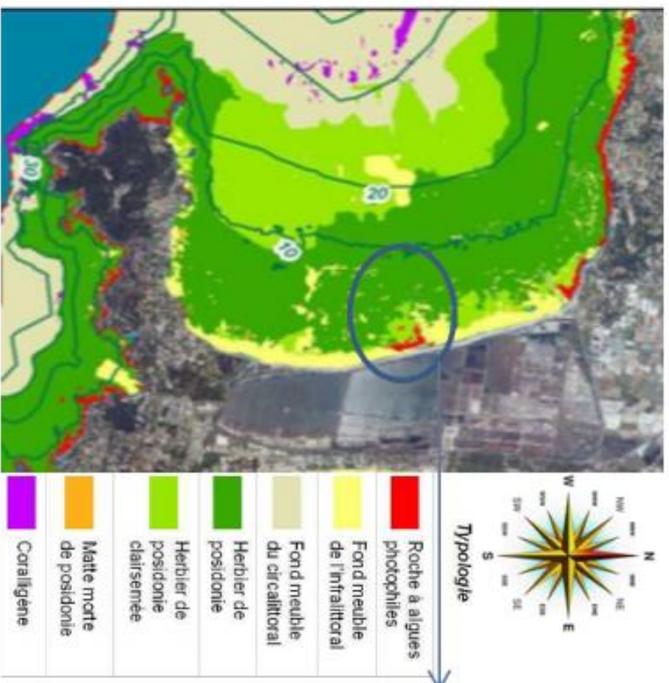
(B)

Figure 3-38 : (A) Graphique des tempêtes entre 1998 et 2012. (B) Dispersion des hauteurs

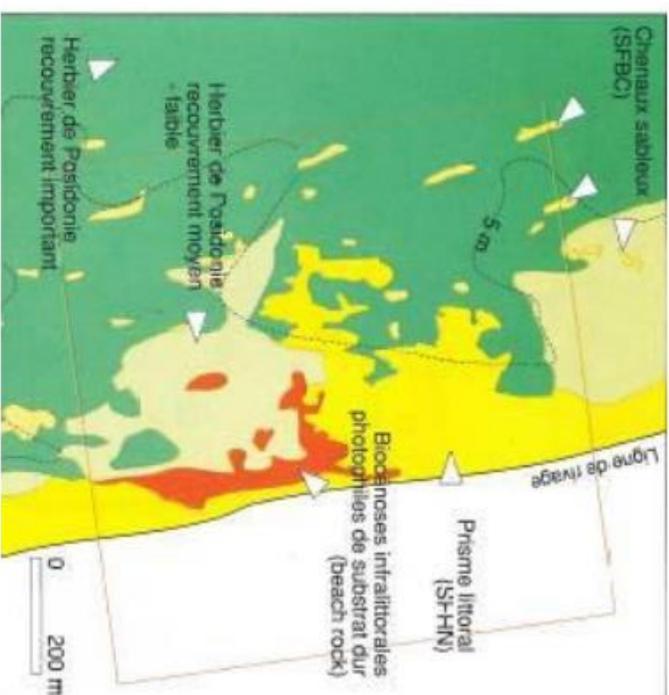
$H_{max}$  et  $H_{1/3}$  des houles pendant les tempêtes entre 1998 et 2012.

- Mesures bouée de Porquerolles. Les tempêtes de Sud Ouest conjuguées aux coups de mistral déterminent l'évolution du tombolo, qui se recharge faiblement en été (courants longitudinaux). (Lacroix, Than 2015).

- <http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>



(A)



(B)

Figure 3-41 : Répartition des posidonies : (A) Dans le golfe de Giens (Egis Eau et Andromède Océanologie, 2011). (B) Dans la partie centrale du tombolo occidental (Paillard et al., 1993).

- L'herbier de posidonie et la bathymétrie semblent stables au-delà des 10 mètres du linéaire côtier

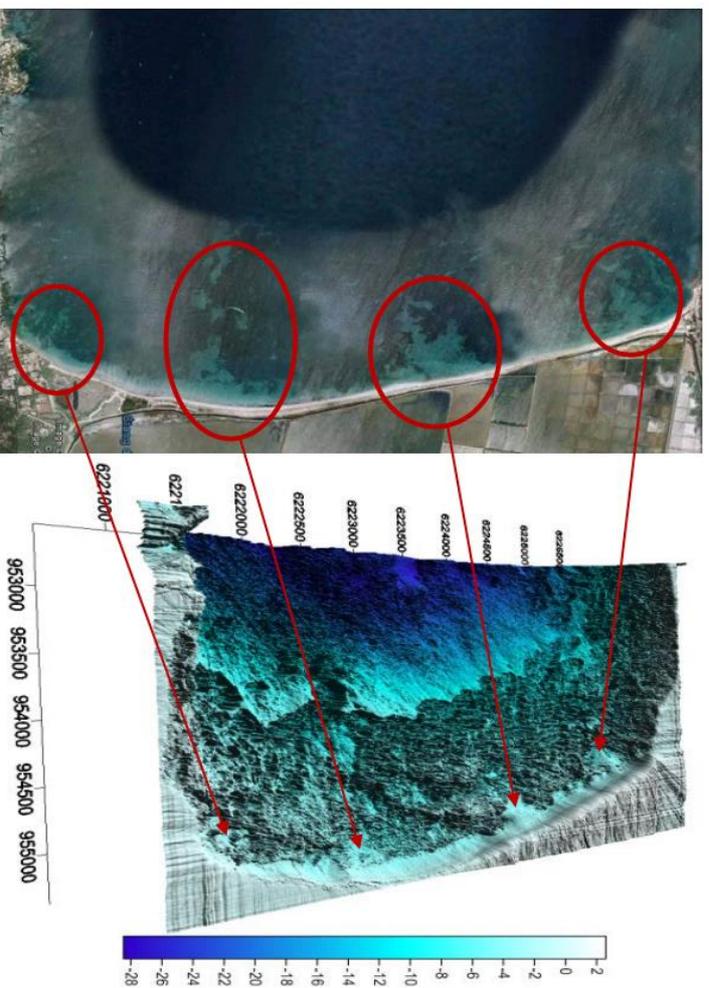


Figure 3-42 : Zones d'érosions du littoral aux zones de départ de courants sagittaux : les indentations dans l'herbier de posidonie (A) et les trous dans les bathymétries (B) du tomolo Ouest.

- L'herbier est dégradé par les courants sagittaux. Sa disparition engendrer une hausse des conditions de tempêtes de 100 à 300% (Vu, Lacroix 2018). Il joue un rôle essentiel. Il est sensible aux températures >26°C, courants forts, turbidité. Il met très longtemps à se reconstituer. Les tempêtes engendrent des surcotes allant jusqu'à plus de 1m. Il aime l'acidité.



Figure 3-8 : Courants de surface par vents d'Est et d'Ouest à proximité du tomolo (SOGREAH, 1988d; Paillard et al., 1993; Courtaud, 2000), modifié.

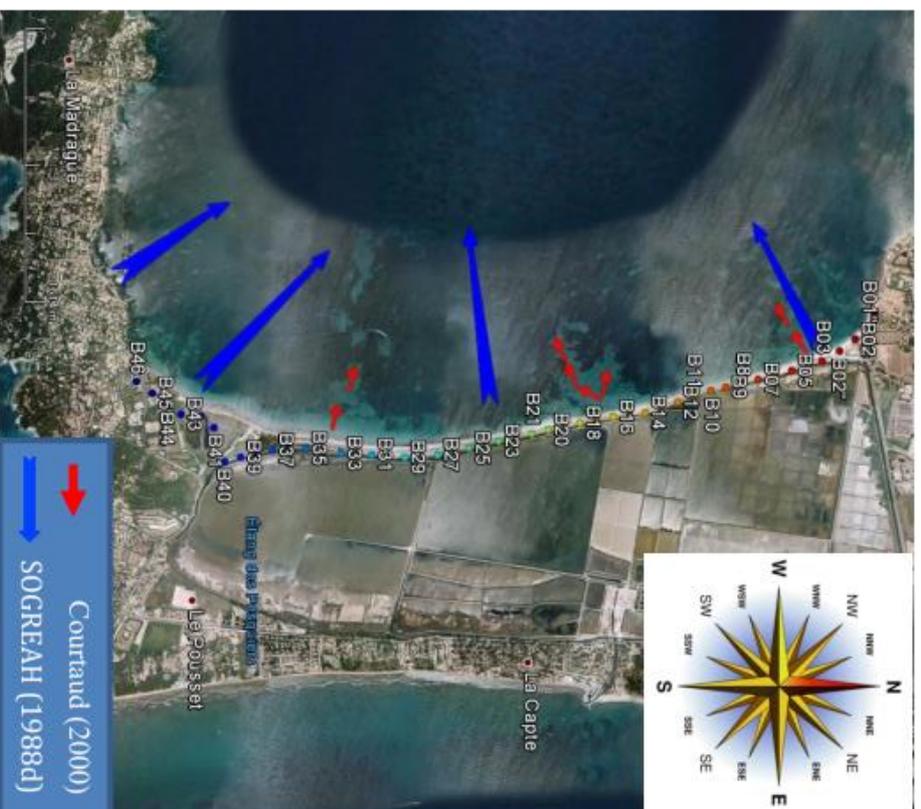


Figure 3-7 : Courants sagittaux dans le golfe de Giens (SOGREAH, 1988d; Courtaud, 2000), modifié.

- Les tempêtes occasionnant une destruction complète de la dune se produisent désormais pluri-annuellement. On se repère à l'aide des bornes EDF qui jalonnent le canal de ceinture. Les dégâts vont de B01 à B21. Elles attaquent désormais le revêtement de la route du sel ainsi que ses fondations. La répétition des tempêtes de force moyenne n'est pas négligeable. Voir thèse de Than pour une étude très détaillée des fréquences des conditions de mer.

Tableau 3-6 : Statistiques sur les variations des niveaux de la mer à Toulon.

WL (m)	Saison	P (%)	Niveaux marins (m)								
			max	min	P10	P20	P30	P50	P70	P80	P90
<math>\leq 0,553</math>	Printemps	26,72	0,55	0,02	0,26	0,28	0,32	0,38	0,43	0,46	0,5
	Été	26,7	0,55	0	0,27	0,33	0,37	0,42	0,46	0,49	0,52
	Automne	22,27	0,55	0,08	0,28	0,35	0,38	0,44	0,48	0,51	0,53
<math>\leq 0,653</math>	Hiver	24,31	0,55	0	0,23	0,27	0,3	0,37	0,43	0,46	0,5
	Printemps	15,02	0,65	0,55	0,56	0,56	0,57	0,58	0,6	0,61	0,63
	Été	16,76	0,65	0,55	0,56	0,56	0,57	0,57	0,59	0,6	0,62
<math>\leq 0,753</math>	Automne	45,14	0,65	0,55	0,56	0,57	0,57	0,59	0,61	0,63	0,64
	Hiver	23,08	0,65	0,55	0,56	0,57	0,57	0,59	0,61	0,63	0,64
	Printemps	8,33	0,75	0,65	0,66	0,66	0,67	0,68	0,69	0,7	0,72
<math>\leq 0,953</math>	Été	3,1	0,75	0,65	0,66	0,66	0,67	0,68	0,69	0,7	0,71
	Automne	51,54	0,75	0,65	0,66	0,67	0,67	0,69	0,7	0,72	0,73
	Hiver	37,04	0,75	0,65	0,66	0,67	0,67	0,69	0,7	0,72	0,73
>0,953	Printemps	2,83	0,86	0,75	0,76	0,76	0,76	0,77	0,79	0,8	0,83
	Été	0,33	0,8	0,76	0,76	0,76	0,76	0,78	0,79	0,8	0,8
	Automne	42,13	0,93	0,75	0,76	0,76	0,77	0,79	0,81	0,82	0,84
>0,953	Hiver	54,72	0,95	0,75	0,76	0,77	0,78	0,8	0,82	0,84	0,86
	Printemps	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Été	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
>0,953	Automne	7,69	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
	Hiver	92,31	0,99	0,95	0,96	0,96	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99

WL – les niveaux de la mer ; P – la fréquence ; max et min – les valeurs maximale et minimale des niveaux marins ; P10, P20, et P30, etc. ... - les percentiles des niveaux marins, par exemple, P10 où 90% des valeurs sont situées au-dessus de la courbe et 10% en dessous.

On manque de mesures marégraphiques au Nord de l'Almanarre  
 Les niveaux marins pouvant fortement varier de Toulon à l'Almanarre,  
 Et du Nord de l'Almanarre au Port Saint Pierre.

- Les surcotes permettent à des vagues plus fortes d'atteindre la côte.

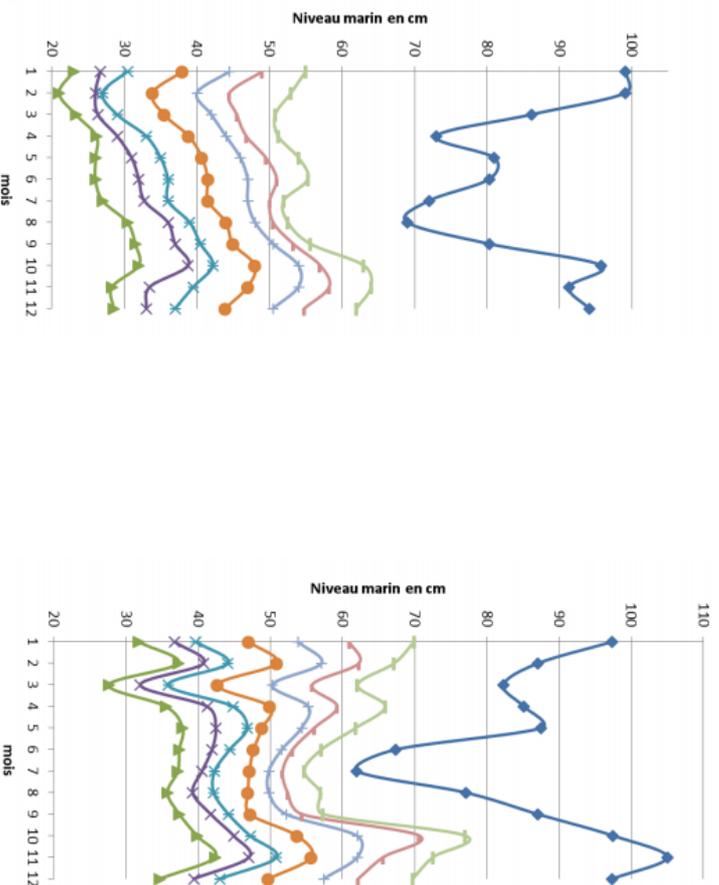


Figure 3-14 : Dispersion mensuelle des cotes marégraphiques : (A) à Toulon entre 1999 et 2014 ; (B) à la Capte pendant la période entre 1993 et 1995 [d'après Courtaud (2000), modifié].

- Nous avons également étudié la statistique prévisionnelle d'évolution de trait de côte. Elle révèle que sur le long terme toute la côte de B01 à B43 quasiment est menacée de retrait, le retrait au secteur Sud étant moins rapide. Nous démontrons aussi que les photos satellites gratuites suffisent à la prédiction. (Lacroix, Than, Vu 2015, 2018). Voir le site du CEREMA.

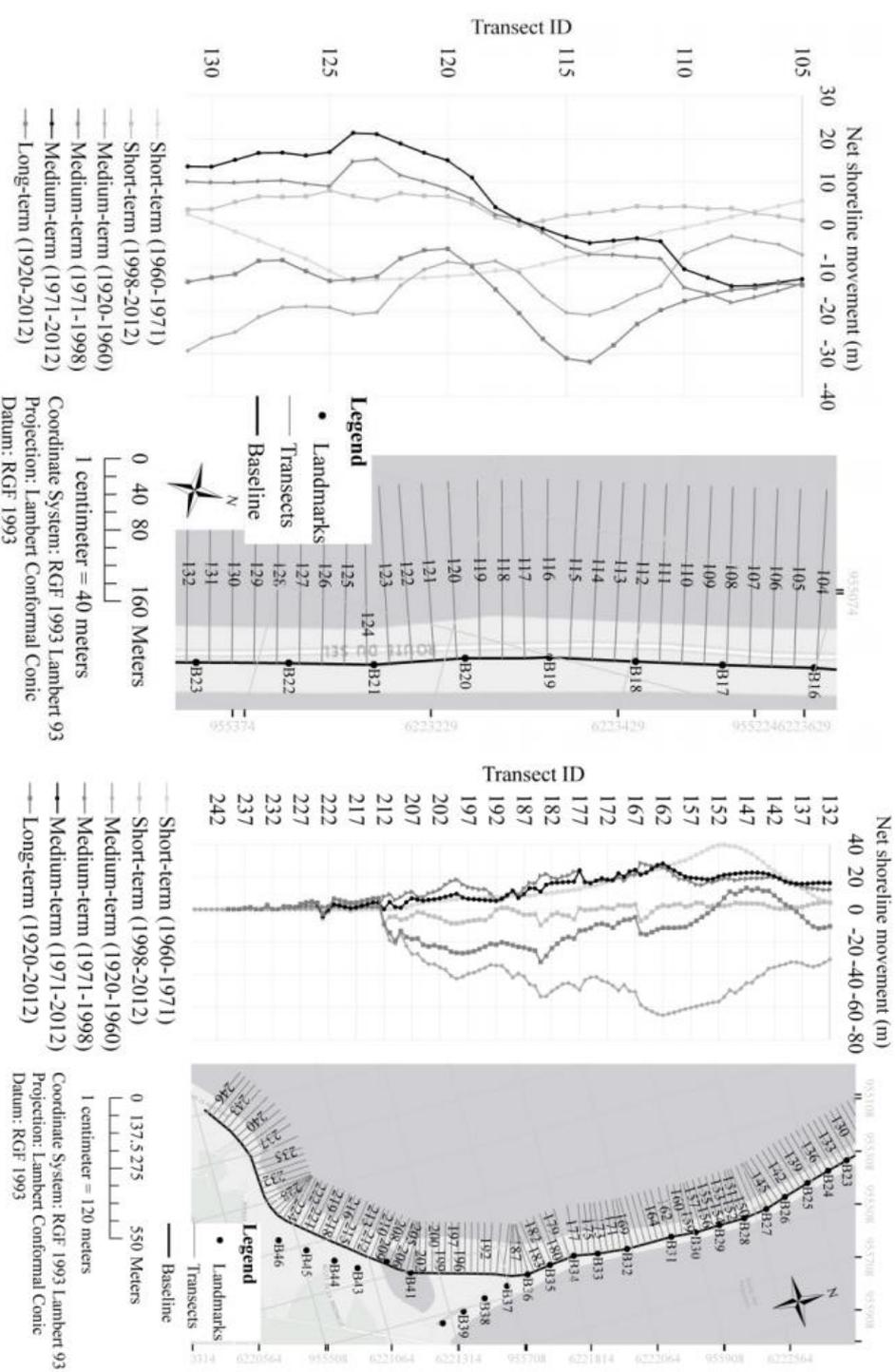


Figure 5-6 : Mouvement net du trait de côte à court, moyen, et long termes le long de transects dans les zones C (A) et D (B) au tombolo Ouest.

## 2) Peut-on réduire les conditions de mer à la côte ?

- Par des ouvrages. Si les ouvrages sont situés à la côte, alors ils fonctionnent en opposition à la force brute venue de la mer. Et donc ils doivent être durs. Les ouvrages partiels (mix de dur et sable) génèrent immanquablement des phénomènes d'affouillement, et sont de courte durée. Les rechargements ont une demi-durée de vie de 2 ans.
- Les ouvrages au large permettent de casser la houle en amont donc réduire courants et vagues à la côte qui sont les facteurs érosifs principaux en présence de sols meubles ou volatiles.
- Il faut préserver les posidonies et il faut préserver le paysage → pas de digues émergées.
- Il faut préserver les courants doux de dérive littorale → digues parallèles à la côte.
- La nature nous inspire : les barrières de corail fonctionnent très bien.

- **Mythe N°1, la brèche** : suite à l'étude ERAMM-Bougis 2001, on nous a fait croire que tout venait de la brèche sous-marine au regard de la borne B08, qui engendrerait des « concentrations de houle ». On le verra plus tard c'est FAUX (Lacroix-Vu 2017).
- **Mythe N° 2**, selon lequel (conservatoire du littoral) la présence de la route bloque le cordon et génère l'érosion : c'est FAUX (thèse Than).
- Comment s'y prendre : bassin à houle et modèle réduit? Pb d'échelle, 4km → 40m facteur 1/100. Si l'on réduit les grains de sable d'un facteur 1/100 ils deviennent trop volatiles. Et les facteurs d'échelle air/eau sont inégaux....
- Solution : simulation numérique, modèles physiques couplant courant, houle, vent, transport sédimentaire, intégrant la nature des fonds. Ex : MIKE (DHI logiciel pro), Telemac (Open source).
- Comment : numériser le fond marin et le linéaire côtier (bathymétrie), maillages. Régler le logiciel en fonction de certains jeux d'observations (calibration).

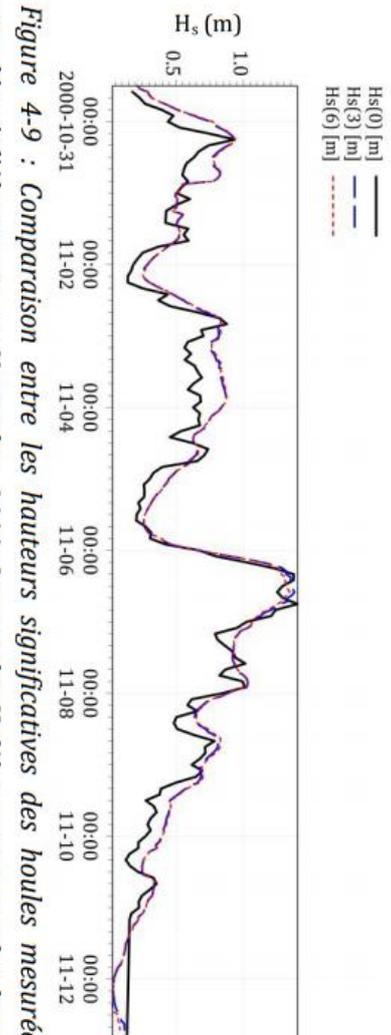


Figure 4-9 : Comparaison entre les hauteurs significatives des houles mesurées et simulées à l'Almanarre en Novembre 2000. La courbe  $Hs(0)$  se compose des hauteurs significatives mesurées. Les courbes  $Hs(3)$  et  $Hs(6)$  se composent des hauteurs significatives simulées en utilisant les maillages 3 et 6, respectivement.

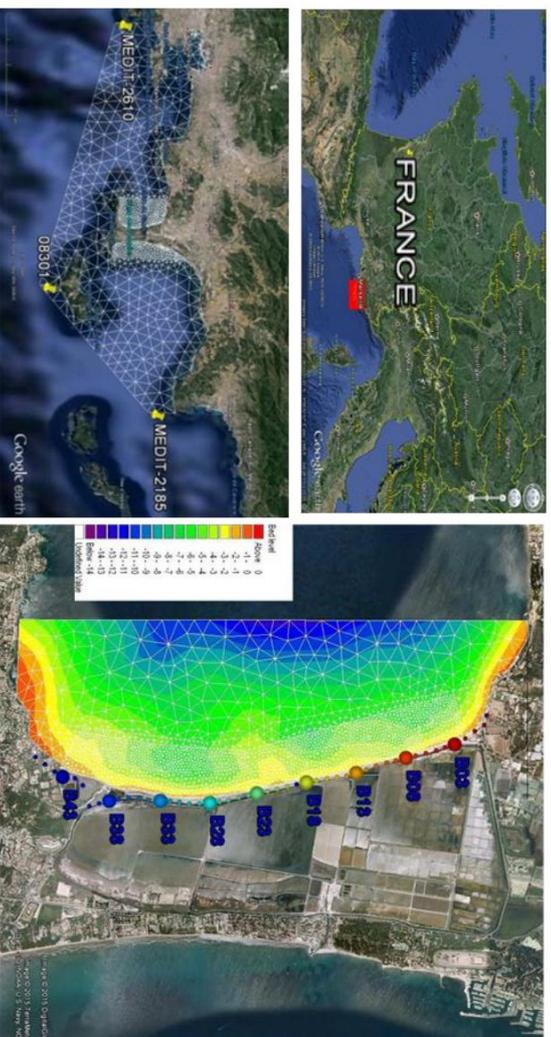


Figure 4-1 : Domaine de calcul à l'échelle régionale (A) et à l'échelle locale (B) (Lacroix et al., 2015a).

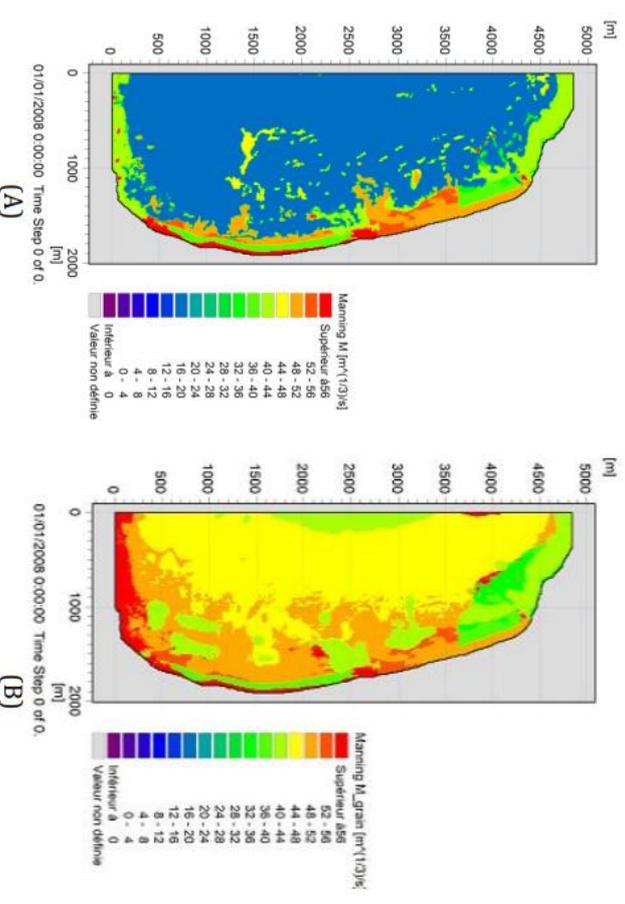
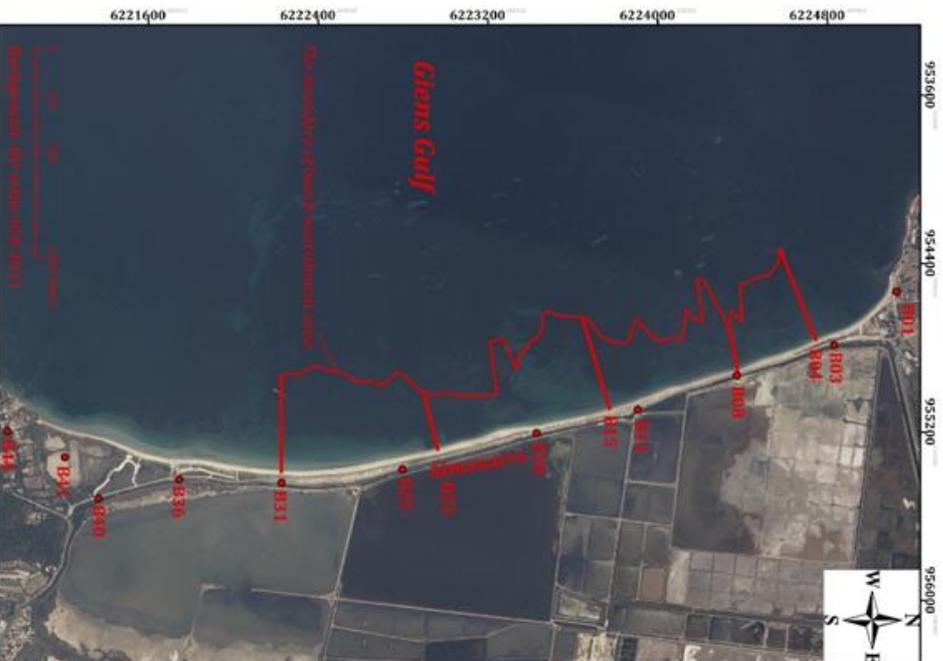


Figure 4-46 : Différentes zones de rugosité de Manning dans la zone de modélisation avec posidonie (A) et sans posidonie (B) (Lacroix et al., 2015a).

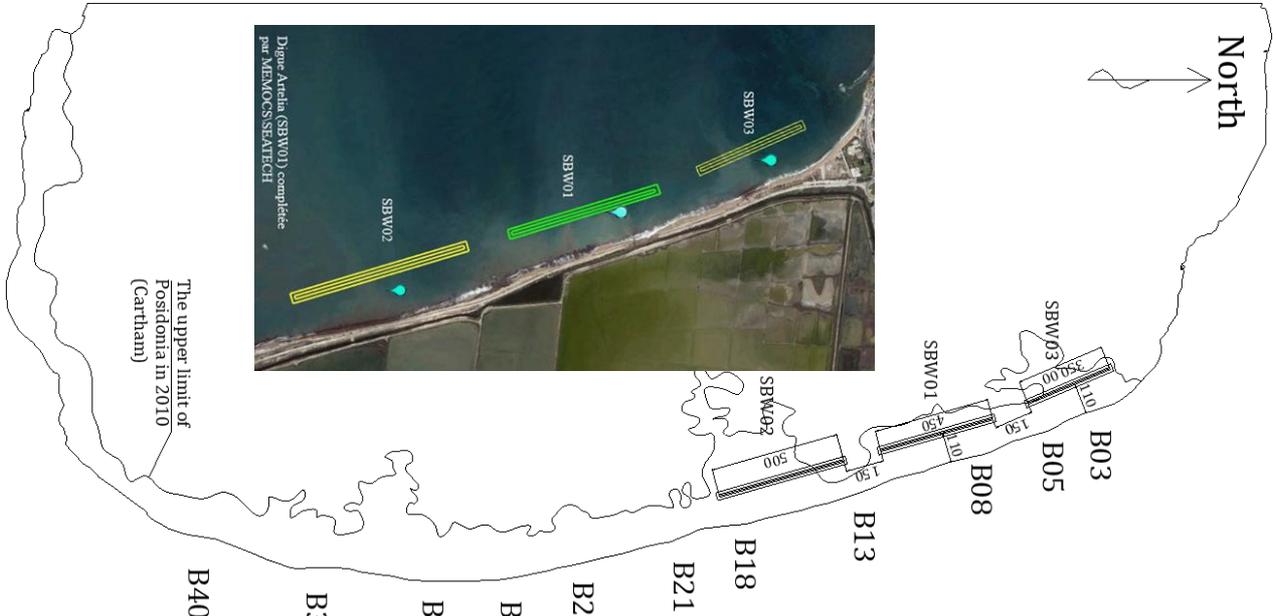
- Le travail sur le maillage (sa sensibilité) et la calibration sont essentiels pour apporter de la fiabilité aux simulations.

- Le logiciel propage la houle les courants et le vent en entrée de domaine. On fixe les conditions au bord. Une fois propagées en régime « stationnaire » on peut extraire des valeurs en des points de la carte ou alors des cartes globales donnant les valeurs moyennes. Les valeurs significatives sont  $H_s$ ,  $V_c$ ,  $Q$ , BLC. On s'intéresse aussi au stress radial en linéaire côtier qui quantifie bien l'agressivité des conditions à l'égard du littoral. Ainsi on définit un niveau tolérable de stress et conditions significatives à la côte, ce qui permet ensuite de tester l'efficacité de tel ou tel type d'ouvrage en relevant les conditions résultantes à la côte en fonction des événements climatiques, typicisés en annuel, estival, hivernal, mistral, largade, décennal, tricennal, cinquantiennal et centennal, plus des enregistrement significatifs.

- Nous avons calculé les profils d'équilibre optimaux en fonction des conditions climatiques statistiques sur différents transects à l'Almanarre, puis dessiné un rechargement et reprofilage. Nous avons soumis ce rechargement aux conditions typiques.

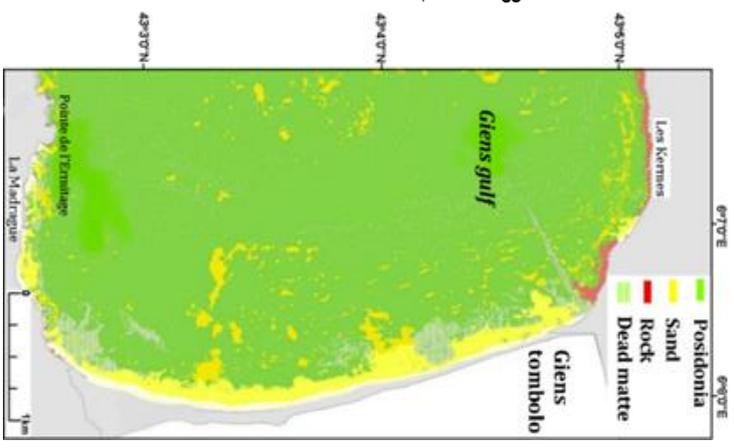


Parameter	B4		B8		B23		B31		
	HS	Vc	HS	Vc	HS	Vc	HS	Vc	
Annuelles	NW	0,544323	0,11905	0,525211	0,149975	0,471935	0,191847	0,5121	0,195225
	W	0,558859	0,104094	0,542949	0,126593	0,479207	0,161003	0,516037	0,148817
Hivernales	SW	0,577607	0,095925	0,558048	0,113842	0,479719	0,138684	0,528269	0,085526
	SW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

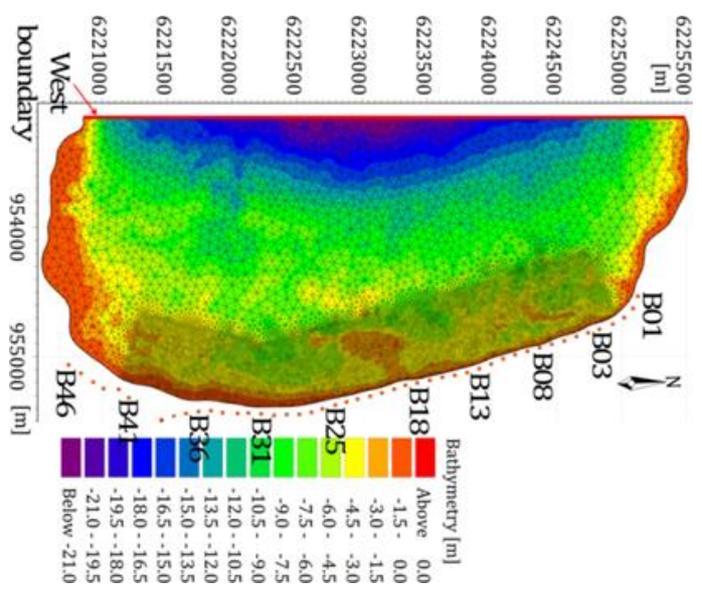


Nous avons pris la digue Artelia, simulé selon leurs conditions (Mistral et Largade), et évalué l'impact de la digue (Hs,Vc,BLC) (Q accessoirement). Nous avons tenté de compléter le dispositif qui présente des défauts importants. La digue ne protège que le secteur qui lui fait droit pourtant les secteurs Nord et Sud de la digue sont fortement impactés (cf. la dernière Tempête et les autres...).

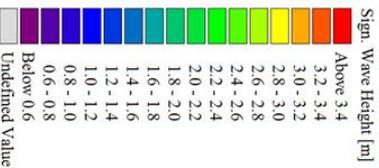
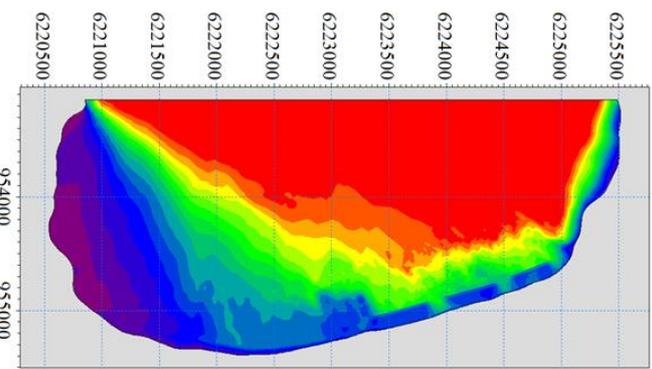
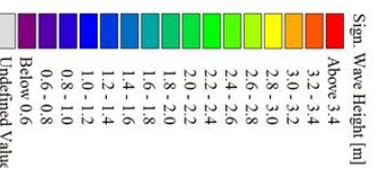
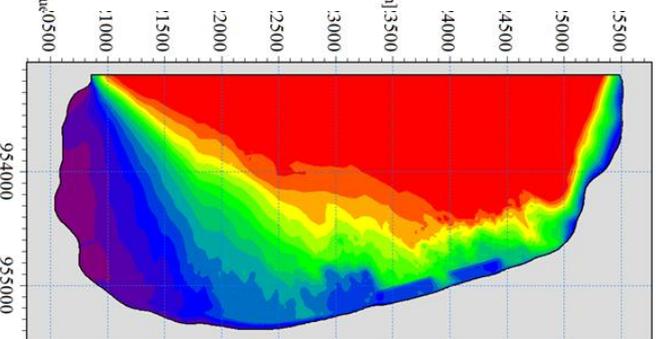
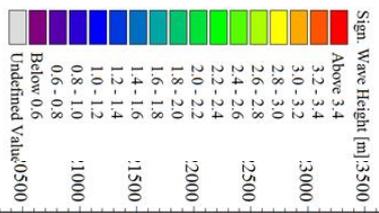
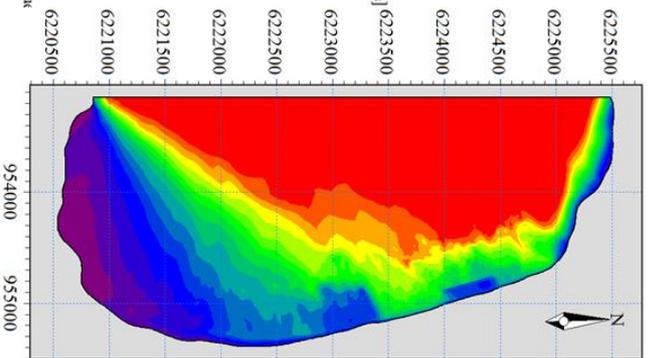
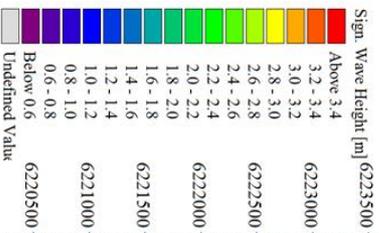
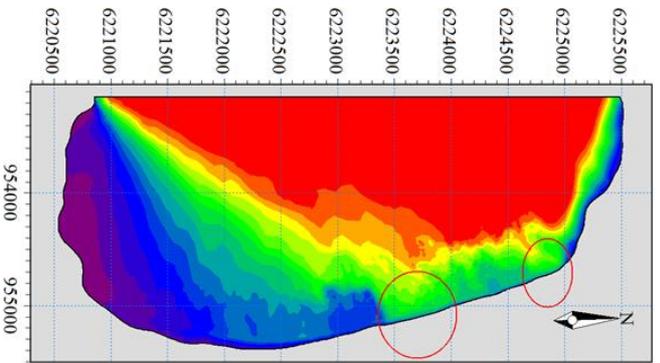
La complétion est complexe car la digue est trop longue : génère des tombolos perpendiculaires à la dérive littorale, et impose des espaces interstitiels tels que même complété le dispositif ne permet pas la protection du linéaire côtier qui fait droit aux espaces interstitiels. Par ailleurs, la longueur des digues engendre un transfert des masses d'eau vers le Nord où des phénomènes turbulents apparaissent.



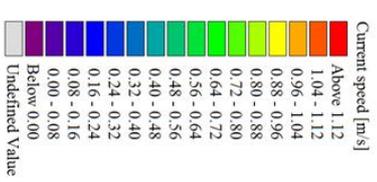
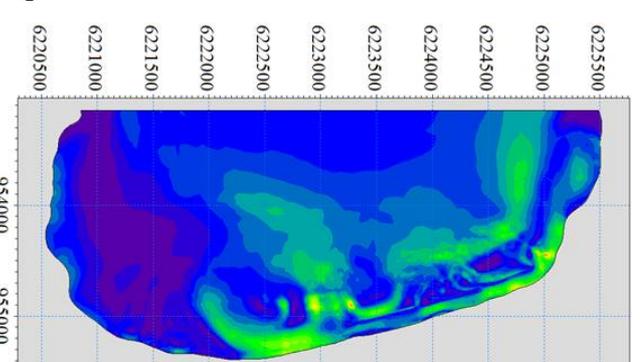
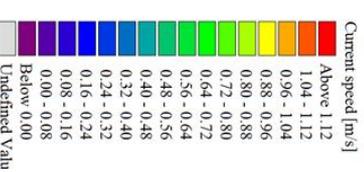
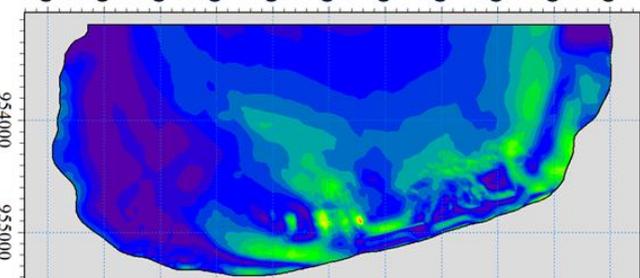
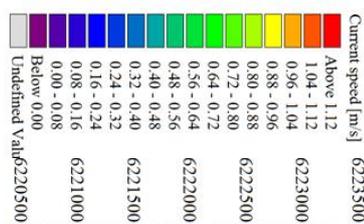
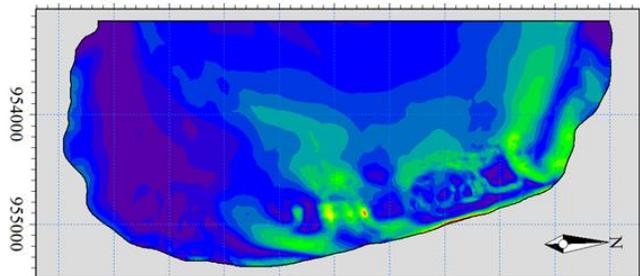
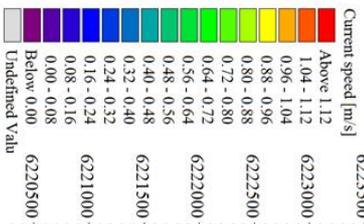
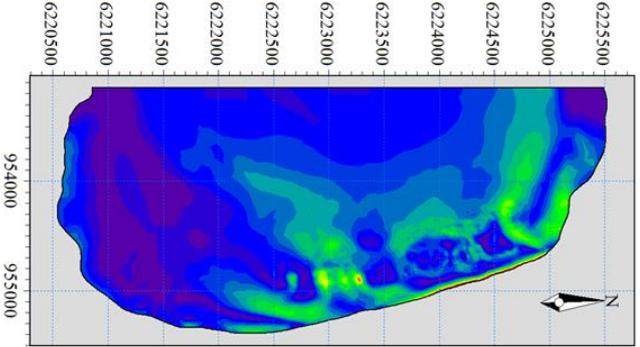
**Modélisation données bathymétriques et champ De posidonies Artelia**



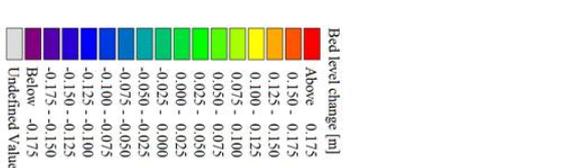
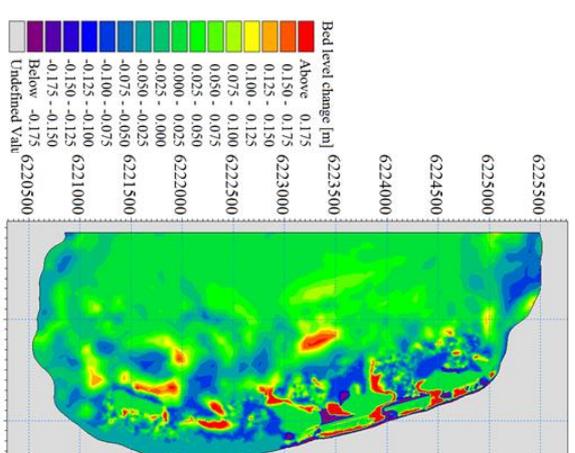
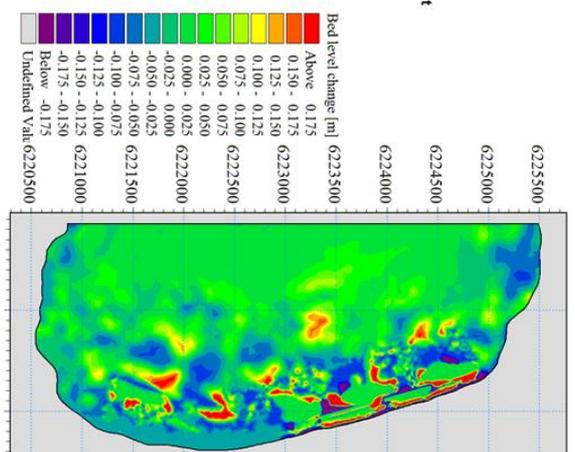
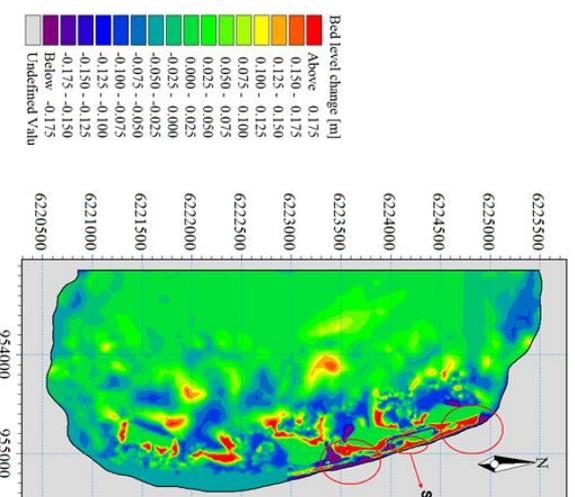
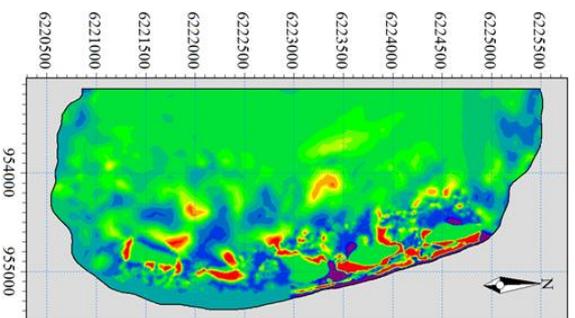
Régime Largade : on voit bien que les deux secteurs restants sont à protéger!  
 Idem en mistral.



Largade : avec deux digues type Artelia les courants diminuent bien mais ils remontent avec trois!



Mistral : tombolo apparaît avec une seule digue!



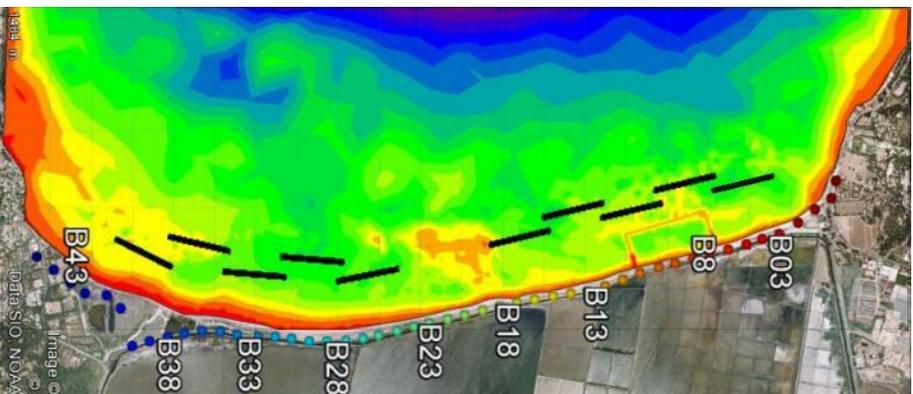
Nous pensons par ailleurs que les digues Artelia sont trop profondes (-1m LSL alors que la mairie réclame de remonter les Géotubes de La Capte à -0,5m LSL à la DREAL (programme 2019-2022)), trop étroites (plateau 10m capable en rade de Hyères mais trop faible en golfe de Giens où les conditions sont plus fortes).

Différentes proposition de digues (au large elles sont plus profondes que si proches de la côte bien entendu).

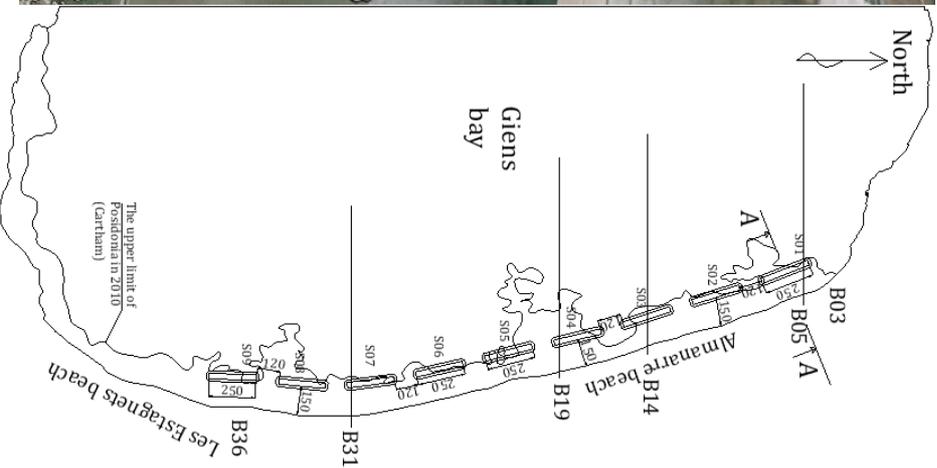
Blanc (1975)



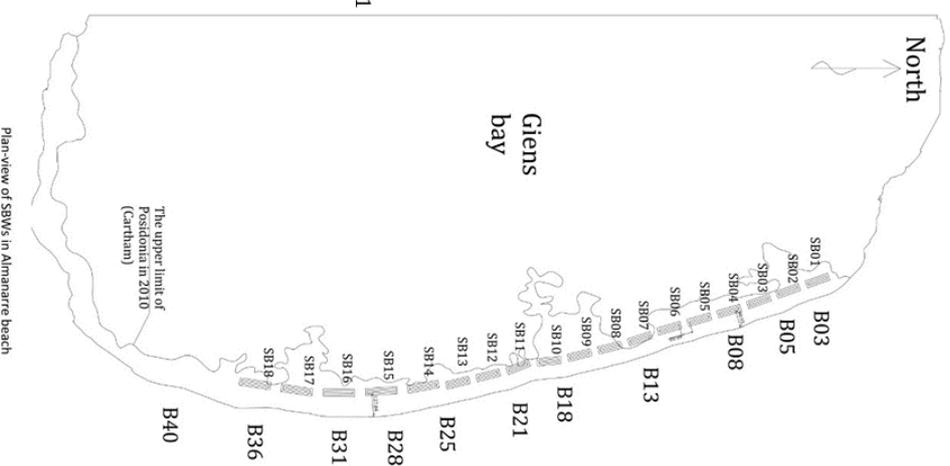
Lacroix-Than (2015)

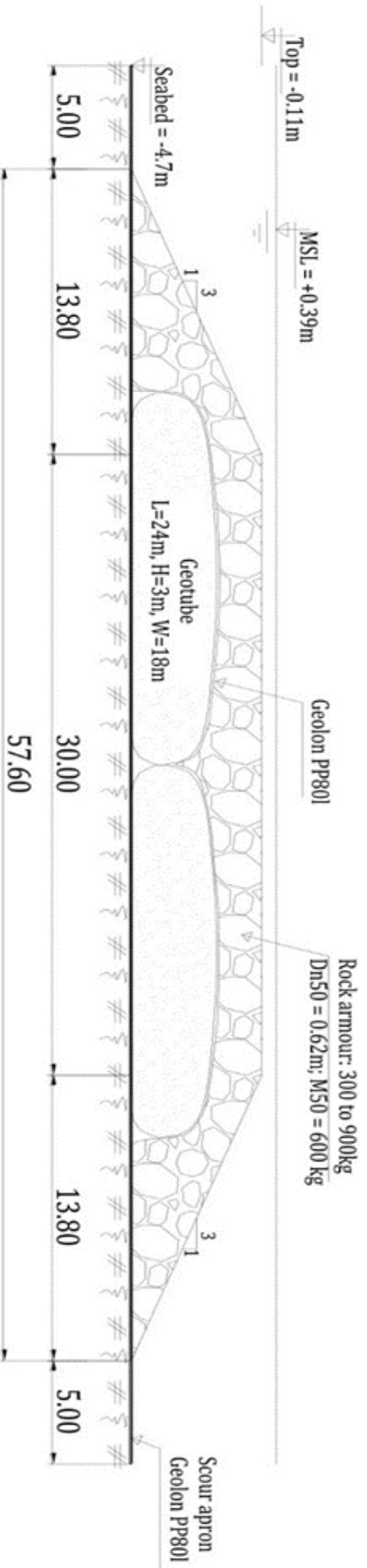


Lacroix-Vu (2016)



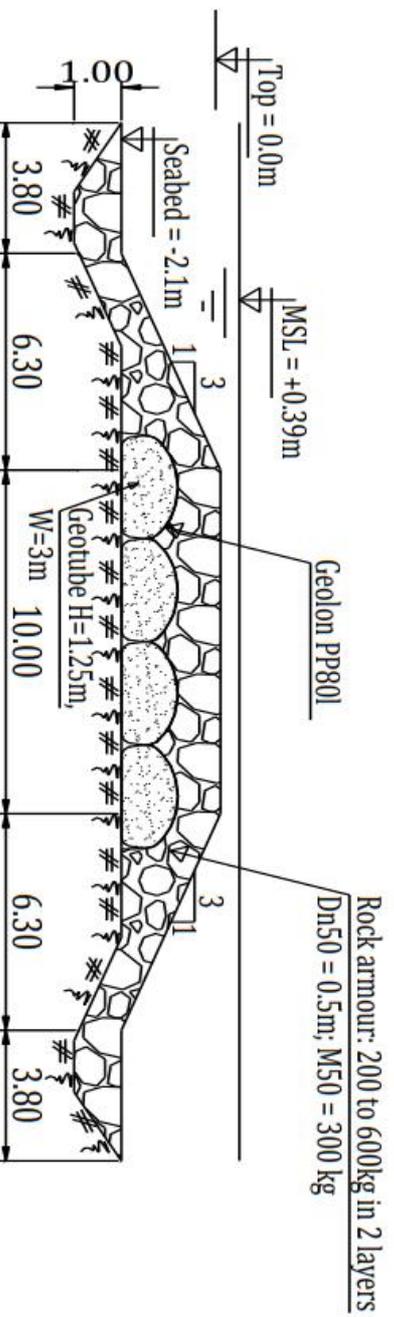
Lacroix-Vu (2017)

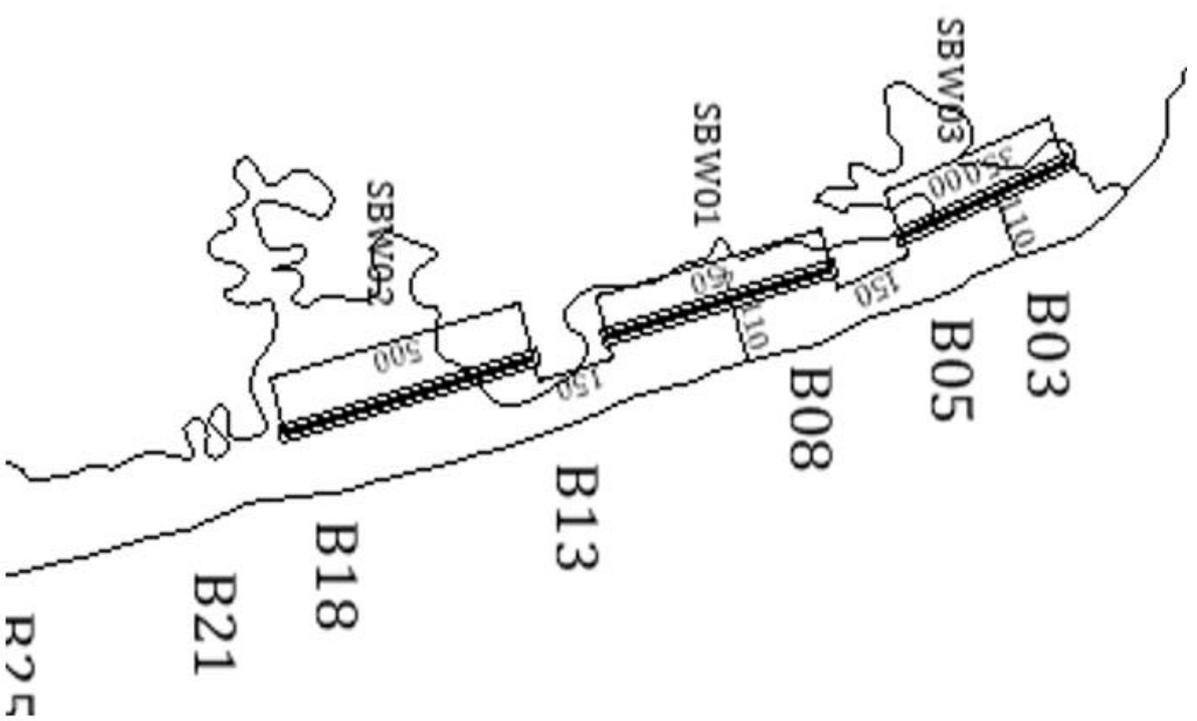
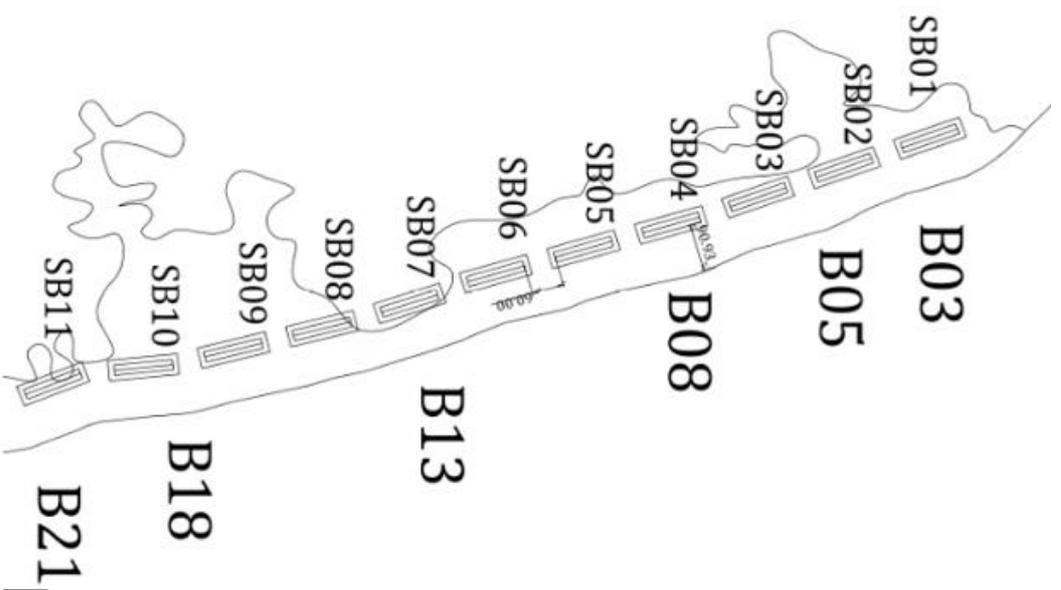




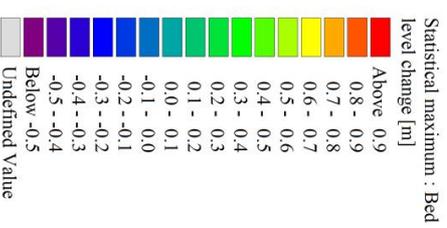
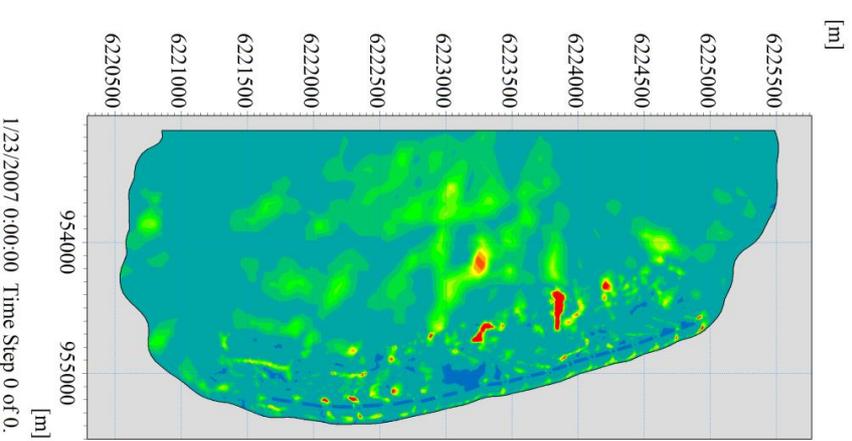
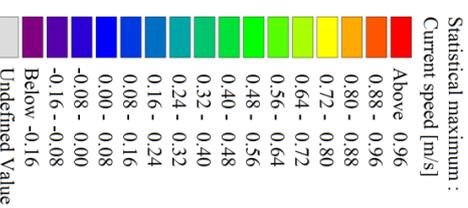
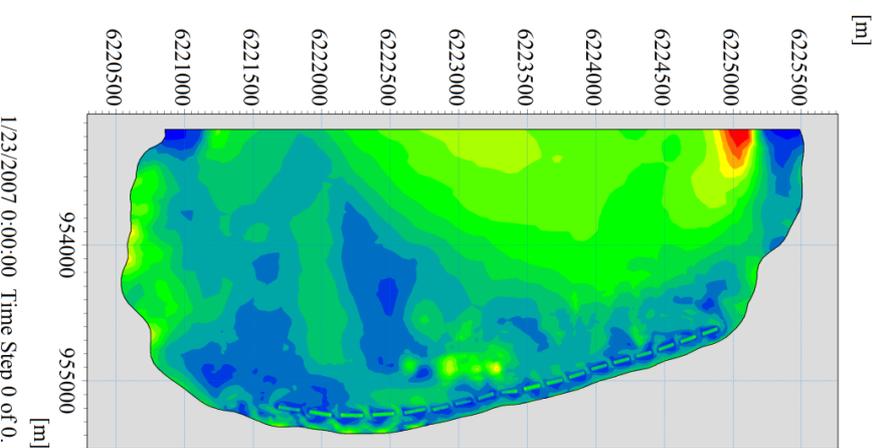
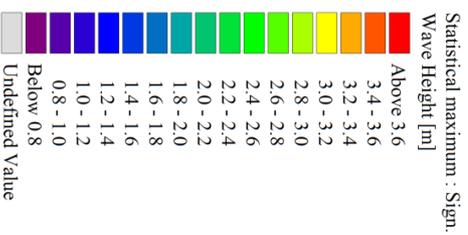
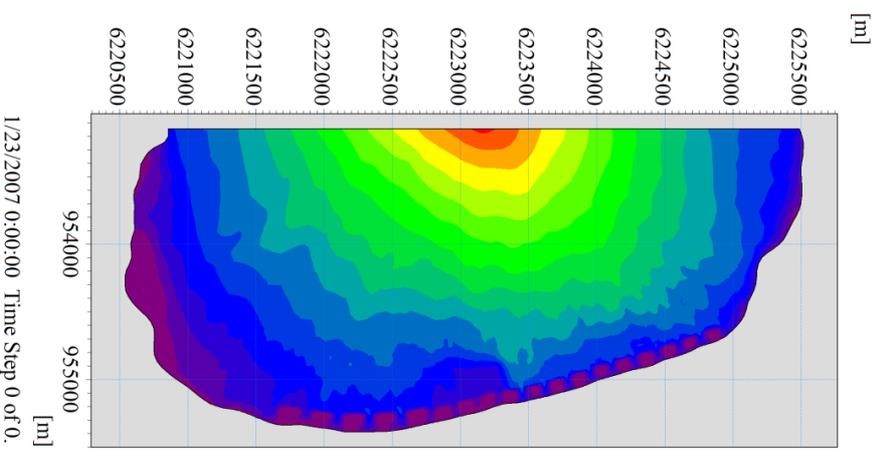
Cross-section of SBW in Almanarre beach

Au-dessus, section SBW Almanarre Nord, au-dessous, pour Bona, Ceinturon ou Pesquiers (Est)  
On a regardé une conception en reef balls voir <https://www.youtube.com/watch?v=YyrodRAiNc>





# Digues Lacroix-Vu 2017 tempête tricennale



# Tempête centennale digues Lacroix-Vu 2017

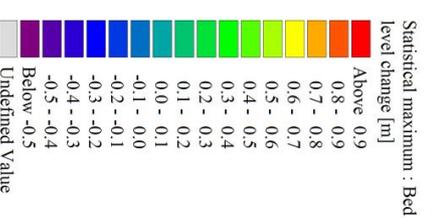
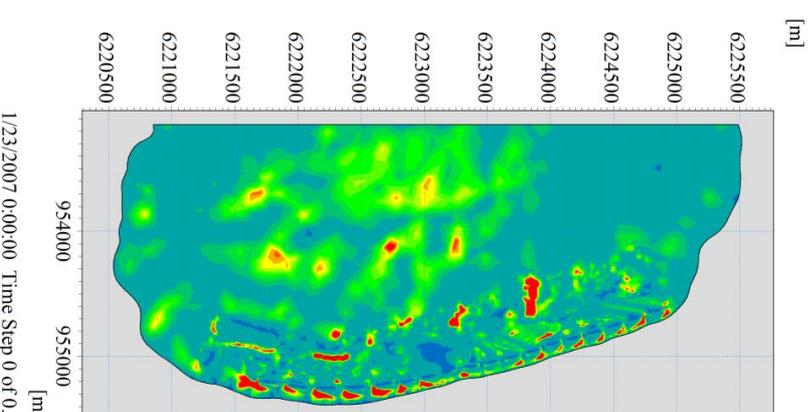
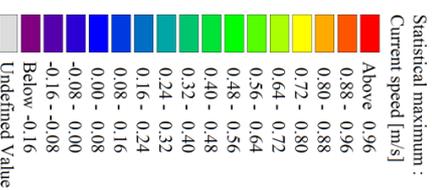
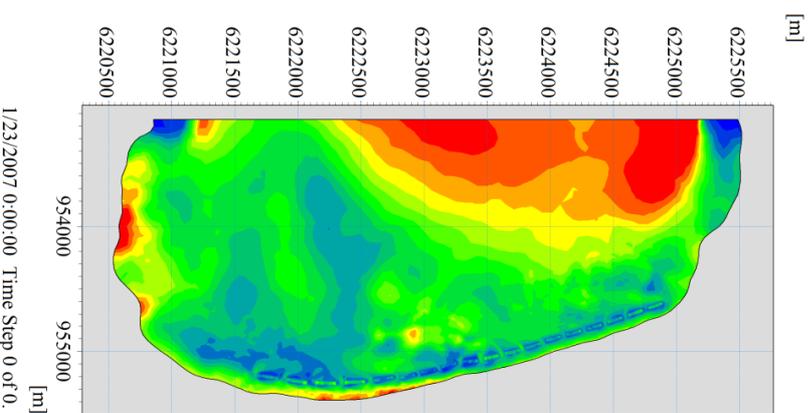
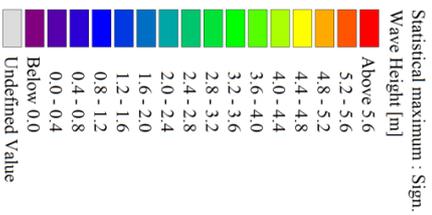
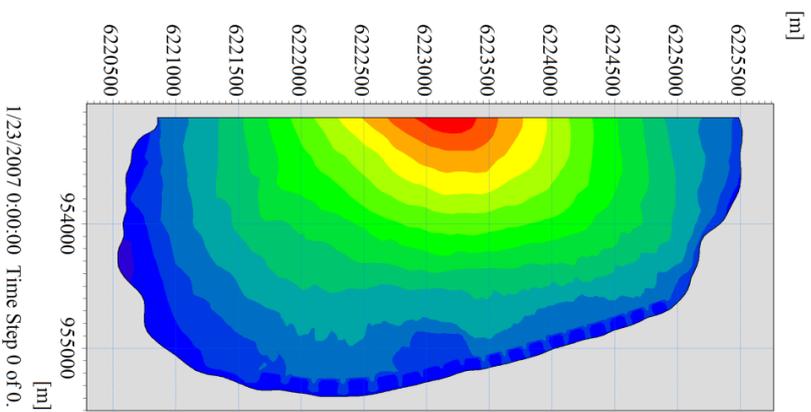


Tableau 4-2 : Tableau récapitulatif des scénarios statistique et réel.

Paramètres de états de mer retenus	Conditions d'agitation	Niveau d'eau (mCM)
Tempête annuelle - secteur Mistral	Hs = 3.0 m - Tp = 9.0s - Dir = 260°N	+0.80 mCM
Largade décennale	Hs = 3.9 m - Tp = 9.0s - Dir = 220°N	+0.98 mCM
Tempête du 04 Mars 2017	Hs = 3.0 m - Tp = 12.0s - Dir = 220°N	+0.65 mCM

Scénario	Condition	Type de scénario	Vent		Niveau marin (m)	Houle au large		
			Dir	V		H <sub>1/3</sub>	T <sub>p</sub>	MWD
1-0-1	Annuel	Statistique	45	0	Variation observée	1,84	5,95	265
1-0-2				5,06				
1-0-3				6,83				
1-0-4				5,57				
1-0-5	Estival	Statistique	228	5,57	Variation observée	1,73	5,26	226
1-0-6				4,05				
1-S				5,57				
2-0				8,09				
2-S				6,07				
3-0				7,34				
3-S	Hivernal	Statistique	275	7,34	Variation observée	1,90	6,45	266
4				5,06				
5	Une année moyenne (2008)	Réal	Variation observée des vents à 10 mètres à partir des données SYNOP	230	Variation observée	1,75	5,87	224
6								
7-0 et 7-S	Coups de mer	Statistique	275	12,65	1,45	6,48	10	270
8-0 et 8-S	Tempête annuelle							
9-0	Tempêtes décennales							
9-S	Tempête trentennale							
10-0	Tempête trentennale							
10-S	Tempête cinquantennale							
11-0	Tempête centennale							
11-S	Tempête centennale							
12-0	Tempête centennale							
12-S	Tempête centennale							

Dir – la direction du vent (°) ; V – la vitesse du vent (mètre par seconde) ; H<sub>1/3</sub> – la hauteur significative de la houle (mètre) ; T<sub>p</sub> – la période de la houle (s) ; MWD – la direction moyenne de la houle (°).

### 3) Pourquoi faire?

- Aller à la plage et en profiter
- Desservir/sécuriser la presqu'île
- Se balader en hiver
- Préserver ce site remarquable qui identifie Hyères autant que Porquerolles pour beaucoup sinon plus, et qui plus est, est fréquenté, populaire
- Les dignes sur le secteur Nord ne gêneraient pas la navigation côtière. Sur le secteur Sud un peu de réflexion permettrait de trouver une solution pour la sortie des kites.
- Références sur : <http://lacroix.univ-tln.fr/Almanarre.html>
- Michel Augias : <http://www.histoire-eau-hyeres.fr/>
- Alain Girard : <http://www.laroutedusel.net/>

# Questions

@ [yveslacroix83400@gmail.com](mailto:yveslacroix83400@gmail.com)

 06 26 18 84 63