

Etude numérique de la courantologie aux abords des épis présents sur le littoral niçois

Rapport final



Immeuble Central Seine
CS 71230
42-52 quai de la Rapée
75583 PARIS CEDEX 12

Tél : 01.82.51.64.02
Fax : 01.82.51.41.39
hydra@hydra.setec.fr

Réf : 01629290_Rév. B
Date : 22 mai 2012

SOMMAIRE

1	OBJET	4
1.1	CONTEXTE GENERAL.....	4
1.2	OBJECTIFS.....	4
2	L'ENVIRONNEMENT NATUREL	6
2.1	LA BATHYMETRIE.....	6
2.2	LA HOULE AU LARGE.....	7
2.3	LE NIVEAU D'EAU	11
2.4	LA HOULE A L'APPROCHE DU LITTORAL DE LA BAIE DES ANGES	14
2.5	LA FLORE AQUATIQUE	16
3	LE FONCTIONNEMENT HYDRO-SEDIMENTAIRE DE LA BAIE DES ANGES	16
3.1	ANALYSE DES ETUDES ANTERIEURES	16
3.2	SYNTHESE DU FONCTIONNEMENT SEDIMENTAIRE GLOBAL	28
3.3	EFFICACITE DES EPIS	28
3.4	MESURES DES VARIATIONS DU TRAIT DE COTE	34
4	LA STABILITE DES EPIS EXISTANTS.....	36
4.1	SOLLICITATIONS HYDRODYNAMIQUES	36
4.2	STABILITE THEORIQUE DES ENROCHEMENTS	38
4.3	NIVEAUX D'AFFOUILLEMENTS POTENTIELS	40
4.3.1	<i>Les affouillements locaux</i>	<i>40</i>
4.3.2	<i>Les avancées et reculs du profil.....</i>	<i>41</i>
4.4	SYNTHESE SUR LA TENUE DES BLOCS EXISTANTS	42
5	FICHES DIAGNOSTICS.....	43
6	LES SOLUTIONS DE CONFORTEMENT	43
6.1	VARIANTES DE SOLUTIONS.....	43
6.2	ESTIMATIONS DES COUTS	48
6.2.1	<i>Estimation prévisionnelle des travaux pour un épi n°1 à n°6.....</i>	<i>48</i>
6.2.2	<i>Estimation prévisionnelle des travaux pour un épi n°7 à n°13.....</i>	<i>50</i>
6.3	IMPLANTATION SUR SITE	51
7	CONCLUSION	52
8	REFERENCES	53

1 OBJET

1.1 CONTEXTE GENERAL

Les épis construits entre la plage de Carras et la plage de Magnan dans la Baie des Anges ont pour vocation de ralentir l'érosion des plages de galets qui bordent le littoral niçois. Les pentes de plage, naturellement très abruptes, sont propices aux déferlements plongeants des plus grosses vagues, ce qui favorise le départ de matériaux vers le large. Par ailleurs, le transit naturel vers l'Est sur cette partie de la baie n'est plus compensé par les apports sédimentaires venant du Var depuis que la plateforme de l'aéroport a été construite. Il en résulte des besoins réguliers en matériaux de rechargement de plage.

Les épis retiennent une partie des matériaux dans la zone du rivage, mais on constate depuis plusieurs années de fréquentes déstabilisations des blocs d'enrochements qui les constituent. En 2011, de nombreux enrochements ont été recalés sur les épis les moins touchés, certains épis ont été reconstruits à partir des blocs disloqués, d'autres, comme l'épi du Paillon, ont nécessité une reprise des blocs entraînés vers le large.

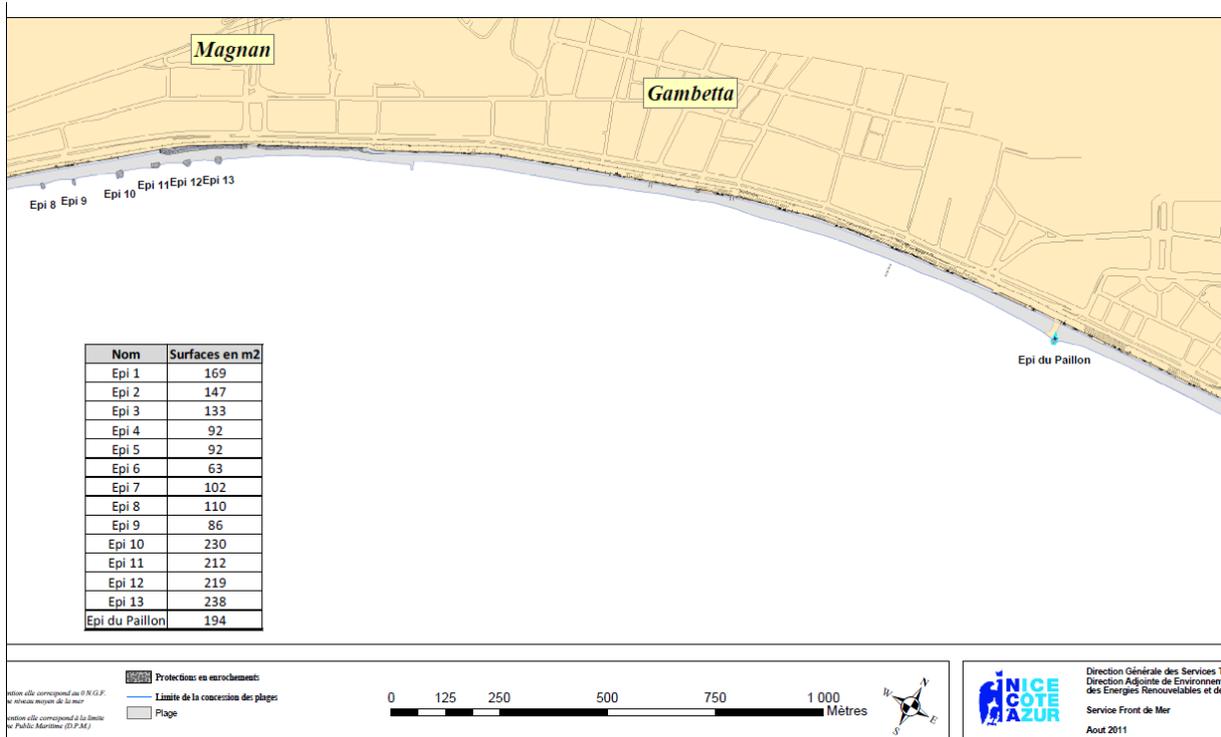
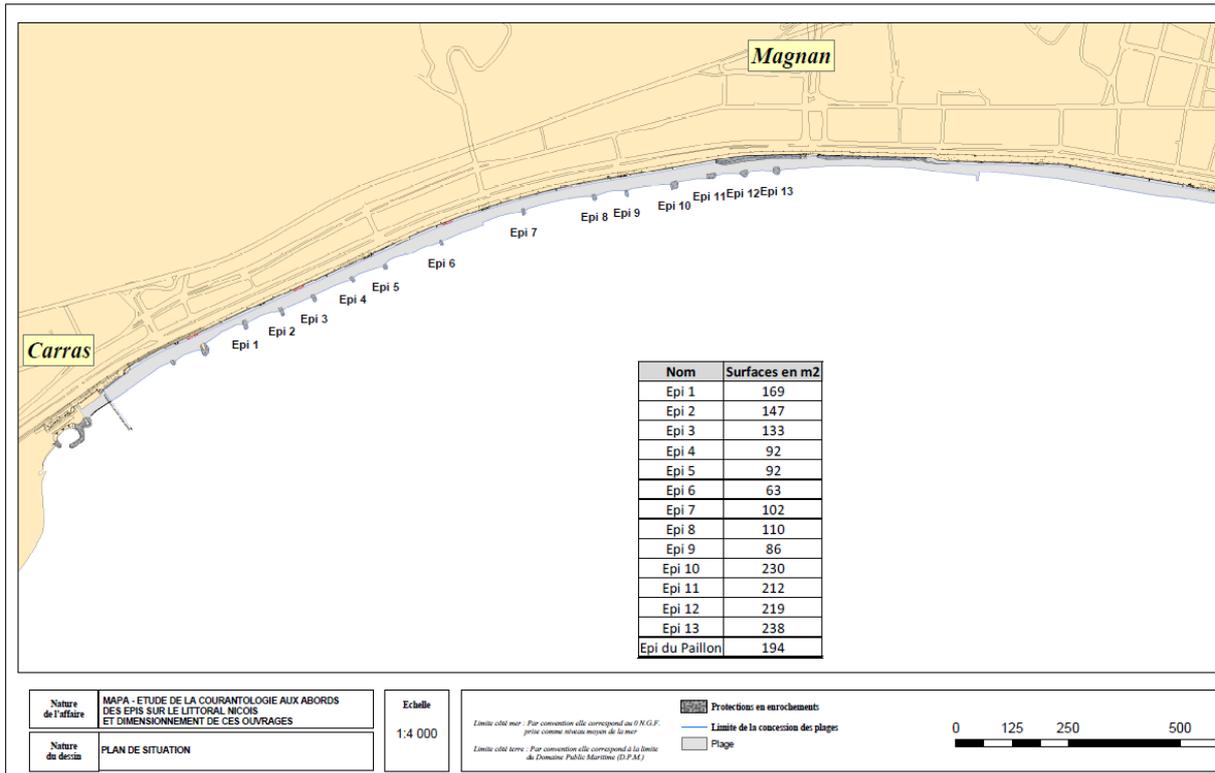
La direction adjointe de l'environnement, de l'énergie renouvelable et de la mer de la ville de Nice est en charge de l'entretien régulier de quatorze épis sur le littoral de la baie des Anges, entre l'aéroport et l'embouchure du Paillon. En plus de la sécurisation annuelle des épis disloqués, la ville de Nice engage d'importants travaux de renforcement. Depuis 2006, de nouveaux gros enrochements (8t à 12t) ont été apportés pour renforcer la carapace de cinq épis. Les récentes tempêtes ont malgré tout déstabilisé localement quelques carapaces consolidées.

Plutôt que de provisionner des budgets d'entretien très conséquents chaque année, avec une période de retour de réfection totale de chaque épi de seulement quelques années, la mairie de Nice souhaiterait consolider les ouvrages de façon plus pérenne. Le bureau d'étude **hydratec** a été retenu pour effectuer le diagnostic de la stabilité actuelle des ouvrages de manière à proposer des solutions de renforcements plus durables, limitant à terme le coût global de construction et de maintenance.

1.2 OBJECTIFS

L'étude menée par **hydratec** consiste à :

- opérer un diagnostic de la situation actuelle à partir de l'analyse des documents existants, de reconnaissances sur site, de mesures bathymétriques, et d'identification des sollicitations hydrodynamiques à l'aide de modèles numériques ;
- d'établir des fiches de réfection par épi, accompagnées de plans et coupes, des performances attendues et des estimations financières.

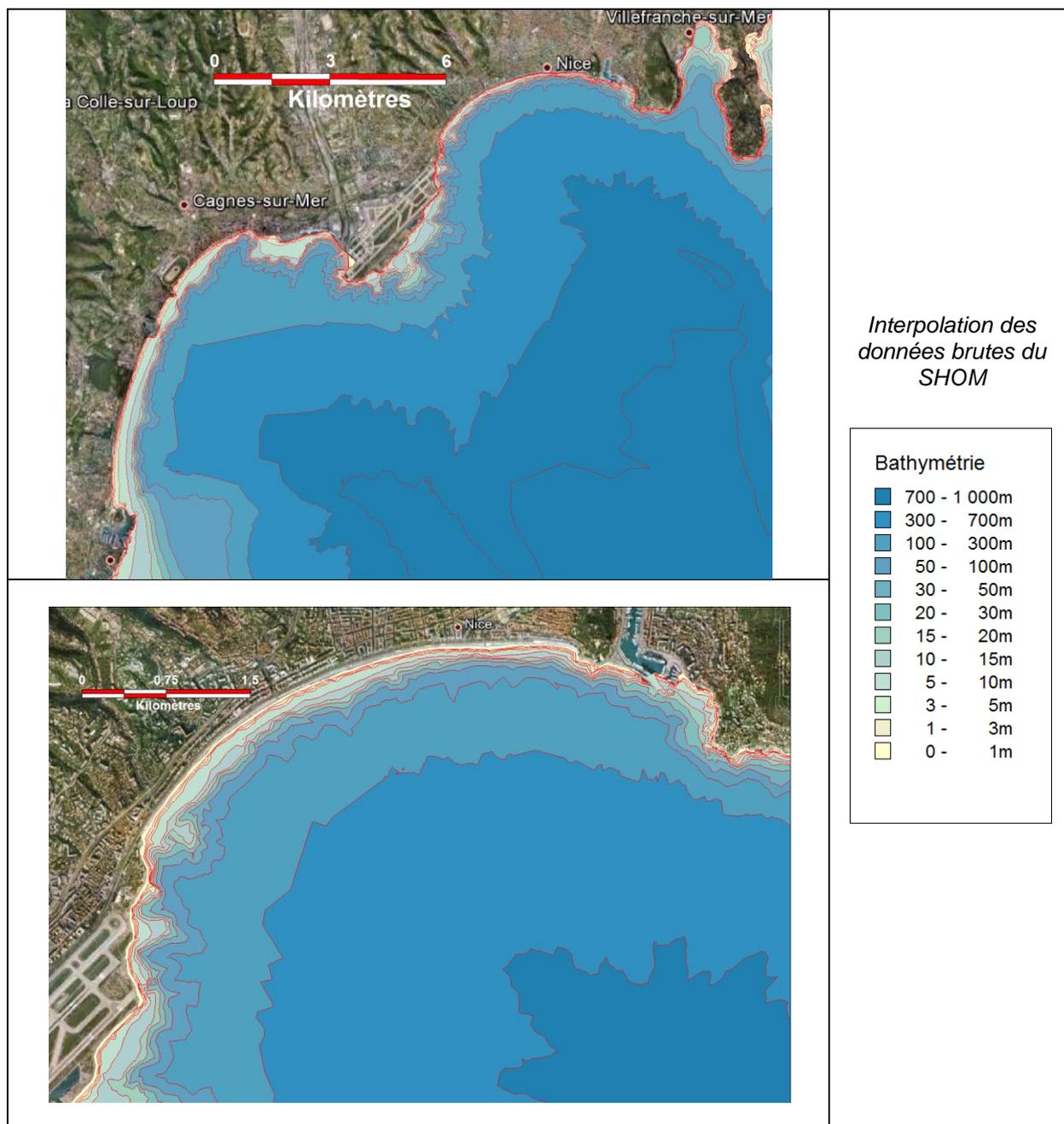


Position des quatorze épis entretenus par la Ville de Nice

2 L'ENVIRONNEMENT NATUREL

2.1 LA BATHYMETRIE

Les fonds de la Baie des Anges ont été interpolés numériquement à partir des fichiers de données brutes achetées auprès du SHOM (*). Les points de sonde sont distants d'environ 25m, ce qui permet d'obtenir une bathymétrie suffisamment précise à l'échelle des longueurs d'onde de houle.



(*) Avertissement : Aucun service hydrographique officiel n'a vérifié les informations contenues dans ce document et ne peut être tenu responsable de la fidélité de leur reproduction ou de toute modification ultérieure. La possession de ce document n'exonère pas de l'obligation d'utiliser les documents nautiques appropriés prévus par les règlements nationaux ou internationaux.

© Copyright 2011 SHOM. Réalisé avec l'autorisation du service hydrographique et océanographique de la marine - France - Contrat n° 110 278 BP

2.2 LA HOULE AU LARGE

La climatologie des houles au large de Nice est extraite des données de l'Atlas Numérique d'Etats de Mer Océaniques et Côtiers (ANEMOC), mis en œuvre par le laboratoire LNHE de l'EDF et le CETMEF. Il s'agit d'états de mer reconstitués à l'aide de modèles numériques avancés à l'échelle de la mer Méditerranée, alimentés en continu par les variations des vents et des dépressions atmosphériques. Les simulations de reconstitution des états de mer sont calées sur les mesures par bouée du réseau CANDHIS, couvrant une bonne partie des côtes françaises.

Les tableaux ci-dessous indiquent les statistiques d'état de mer au point 4651 du domaine de calcul, légèrement au large de Nice. Les statistiques sont établies sur une période de trente ans entre 1979 et 2008.



Position des points de calcul ANEMOC à proximité de Nice

ANEMOC
Atlas Numérique d'Etats de Mer Océaniques et Côtiers

Point du modèle : **MEDIT 4651**
 Coordonnées : 7° 16.050' E / 43° 39.780' N
 Hauteur d'eau dans le modèle : 607.80 mètres

Corrélogramme Hm0 / DirMoy - ANEMOC_MEDIT_4651 - annuel																											
Hm0 (m)	DirMoy (degrés)																										
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	Total	
0																											
0.5	3.35	2.03	1.45	1.76	7.93	53.99	75.08	37.68	19.44	19.09	21.92	53.00	82.72	146.77	37.86	0.62	0.49	0.54	0.63	1.33	3.03	4.99	6.10	5.20	586.99		
1	5.65	5.39	6.89	8.58	9.99	15.52	24.41	13.37	7.72	8.08	12.39	21.72	36.65	34.47	2.82	1.83	1.74	1.59	1.47	1.74	2.50	4.42	8.16	8.81	247.90		
1.5		0.01	0.06	0.21	3.36	10.95	12.58	7.18	4.84	4.76	7.74	12.14	16.64	10.29	2.43	0.61	0.06	0.01								93.85	
2					0.14	1.17	5.97	4.61	3.67	3.03	4.77	6.37	8.19	4.10	0.16											42.17	
2.5						0.05	1.14	2.39	2.08	2.31	2.82	2.73	3.93	0.86												18.31	
3							0.18	0.52	0.82	1.22	1.18	1.50	1.45	0.14												7.02	
3.5							0.11	0.11	0.22	0.41	0.51	0.56	0.45	0.01												2.38	
4							0.03	0.02	0.05	0.08	0.05	0.17	0.09	0.02												0.51	
4.5											0.04	0.04	0.04													0.12	
5												0.01														0.01	
Total	9.00	7.42	8.40	10.54	21.42	81.68	119.50	65.88	38.84	38.98	51.43	98.24	152.14	196.68	43.26	3.06	2.29	2.15	2.10	3.07	5.53	9.41	14.26	14.01			

Les valeurs du tableau sont exprimées en "pour mille (‰)" - Les valeurs 0.00 ‰ correspondent à des fréquences comprises entre 0 ‰ et 0.01 ‰ - Les cases vides correspondent à des fréquences nulles.

Code des couleurs		
>= 10 ‰	>= 30 ‰	>= 50 ‰

Statistiques des houles fréquentes au large immédiat de la Nice (domination du secteur SSO et ESE)



ANEMOC

Atlas Numérique d'Etats de Mer Océaniques et Côtiers

Point du modèle : **MEDIT 4651**

Coordonnées : 7° 16.050' E / 43° 39.780' N

Hauteur d'eau dans le modèle : 607.80 mètres

Corrélogramme Hm0 / Tpic - ANEMOC_MEDIT_4651 - annuel															
Hm0 (m)	Tpic (Secondes)														
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Total
0.5			78.44	167.94	193.23	82.80	24.39	15.38	14.78	8.93	1.10	0.17	0.10		587.27
1			7.75	57.01	59.91	73.36	30.41	12.86	5.61	1.36	0.04	0.01	0.05		248.38
1.5				0.04	5.68	34.51	31.58	14.23	6.52	1.26	0.03	0.00	0.01		93.85
2					0.00	4.57	19.89	12.31	4.26	1.06	0.04	0.00	0.01	0.00	42.17
2.5						0.01	4.52	10.36	2.64	0.66	0.09	0.00		0.03	18.31
3							0.02	4.05	2.59	0.31	0.02	0.01	0.01	0.01	7.02
3.5								0.14	1.91	0.30	0.03				2.38
4									0.22	0.28	0.01				0.51
4.5									0.01	0.11					0.12
5										0.01					0.01
Total			88.19	224.99	258.82	195.24	110.91	89.33	38.55	14.30	1.36	0.21	0.17	0.04	

Les valeurs du tableau sont exprimées en "pour mille (‰)" - Les valeurs 0.00 ‰ correspondent à des fréquences comprises entre 0 ‰ et 0.01 ‰ - Les cases vides correspondent à des fréquences nulles.

Code des couleurs		
>= 10 ‰	>= 30 ‰	>= 50 ‰

Tableau croisé H_{m0} / Période pic T_p



ANEMOC

Atlas Numérique d'Etats de Mer Océaniques et Côtiers

Point du modèle : **MEDIT 4651**

Coordonnées : 7° 16.050' E / 43° 39.780' N

Hauteur d'eau dans le modèle : 607.80 mètres

Corrélogramme Etal / DirMoy - ANEMOC_MEDIT_4651 - annuel																												
Etal (°)	DirMoy (degrés)																											
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	Total		
5													0.01														0.01	
10						0.02	0.18	0.14	0.89	0.06	0.04	0.08	3.29	1.11	2.08	3.45	0.01										0.00	11.36
15						1.49	24.16	24.61	4.57	0.72	0.56	0.42	15.10	15.49	62.88	14.42	0.00						0.02	0.00	0.02	0.03	164.50	
20	0.01				0.00	1.83	21.91	46.87	10.90	1.07	0.82	1.16	11.39	32.48	59.83	8.08	0.00						0.13	0.08	0.08	0.06	196.72	
25	0.09	0.03			0.11	1.78	11.32	21.28	20.65	2.94	1.19	3.27	12.80	39.08	28.43	5.51						0.02	0.46	2.11	2.90	1.70	155.03	
30	3.29	0.27	0.13	0.42	3.08	9.28	11.17	14.14	12.30	7.40	12.79	23.51	23.41	13.14	4.13	0.01	0.00	0.00				0.17	1.14	3.15	7.41	8.81	159.17	
35	3.69	2.70	1.07	2.27	6.59	6.97	6.93	5.95	10.70	13.31	16.64	15.82	12.34	9.84	2.89	0.23	0.03	0.01	0.07	0.37	1.10	1.61	1.90	1.89	1.89	126.92		
40	1.09	3.44	5.40	5.97	5.12	4.17	3.98	3.30	4.48	7.70	8.20	6.79	10.91	8.31	1.78	0.58	0.21	0.14	0.23	0.54	0.80	0.97	0.89	0.83	0.83	85.66		
45	0.43	0.63	1.30	1.26	1.00	0.94	2.19	1.86	2.43	3.32	3.59	3.53	9.50	6.44	1.19	0.70	0.50	0.30	0.33	0.52	0.66	0.52	0.42	0.33	0.33	43.88		
50	0.16	0.16	0.28	0.26	0.29	0.38	1.12	1.38	1.56	1.91	2.24	2.48	4.32	3.93	0.77	0.58	0.52	0.44	0.48	0.56	0.39	0.37	0.24	0.19	0.19	25.00		
55	0.07	0.08	0.09	0.07	0.09	0.17	0.76	1.04	1.06	1.07	1.29	1.81	2.22	1.26	0.48	0.40	0.47	0.51	0.40	0.36	0.31	0.28	0.12	0.13	0.13	14.51		
60	0.05	0.04	0.05	0.07	0.07	0.08	0.30	0.75	0.93	0.98	1.05	1.12	1.02	0.36	0.30	0.19	0.23	0.36	0.30	0.19	0.27	0.13	0.11	0.08	0.08	9.04		
65	0.03	0.02	0.04	0.04	0.06	0.04	0.08	0.35	0.50	0.56	0.59	0.47	0.18	0.11	0.16	0.21	0.17	0.20	0.18	0.15	0.14	0.09	0.05	0.09	0.09	4.50		
70	0.05	0.03	0.03	0.05	0.02	0.05	0.03	0.05	0.07	0.09	0.08	0.11	0.04	0.02	0.07	0.09	0.10	0.10	0.09	0.12	0.08	0.07	0.06	0.04	0.04	1.57		
75	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.07	0.05	0.04	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.56		
80	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02			0.02	0.02			0.01	0.01	0.02		0.02	0.02	0.00	0.23	
85											0.00										0.00	0.00					0.01	
Total	9.00	7.42	8.40	10.54	21.42	81.68	119.50	65.88	38.94	38.68	51.43	98.24	152.14	196.66	43.26	3.06	2.29	2.15	2.10	3.07	5.53	9.41	14.26	14.01				

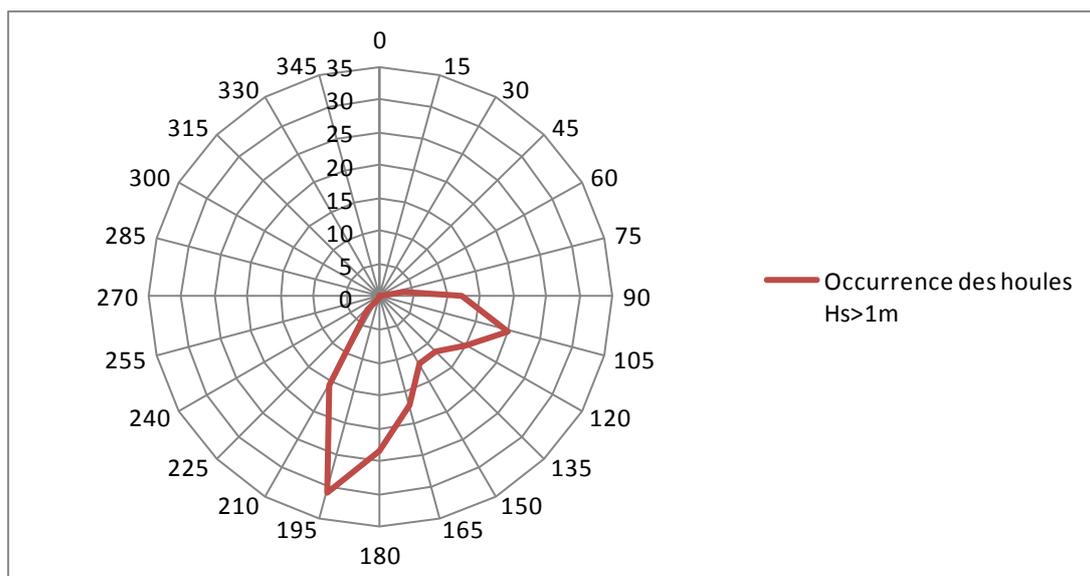
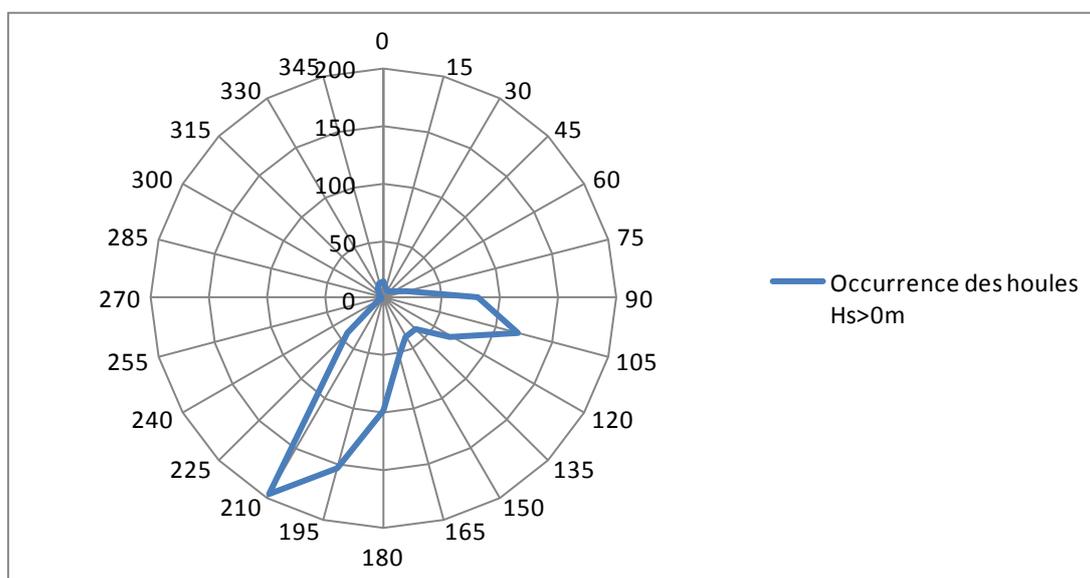
Les valeurs du tableau sont exprimées en "pour mille (‰)" - Les valeurs 0.00 ‰ correspondent à des fréquences comprises entre 0 ‰ et 0.01 ‰ - Les cases vides correspondent à des fréquences nulles.

Code des couleurs		
>= 10 ‰	>= 30 ‰	>= 50 ‰

Etalement directionnel par secteur de provenance

(*) H_{m0} correspond à la valeur 4√m₀, m₀ étant le niveau d'énergie. H_{m0} est théoriquement proche de la hauteur significative H_s ou H_{1/3}, égale à la moyenne du tiers des vagues les plus hautes.

Les deux roses ci-dessous offrent un aperçu des directions dominantes pour toutes hauteurs confondues, puis pour les coups de mer ou tempêtes tels que $H_s > 1\text{m}$.



*Rose des houles au large de Nice (Atlas ANEMOC point 4651).
Les occurrences sont exprimées en ‰*

De façon générale, on note deux régimes dominants au large de la Côte d'Azur :

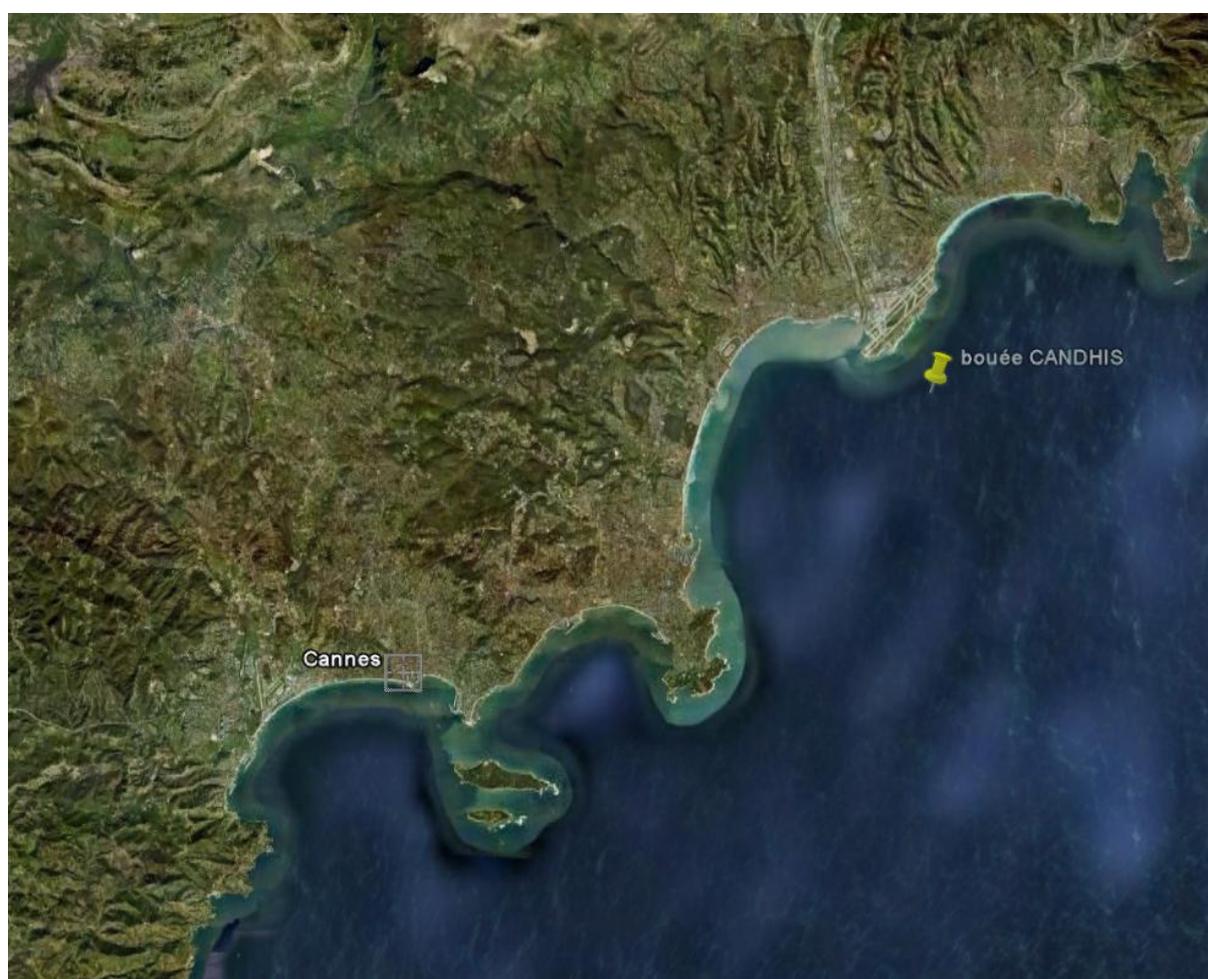
- le régime de sud-sud-ouest (env. 50% du temps) ;
- le régime d'est à est-sud-est (env. 25% du temps).

Le secteur sud-est est un secteur de transition entre ces deux régimes. Les houles y sont plus rares, mais on note qu'une partie des houles les plus fortes, provenant du sud, peut déborder vers le secteur N165. C'est d'ailleurs en provenance du secteur N165 que la plus forte hauteur significative aurait été notée au point 4651 de l'Atlas ANEMOC, avec H_s supérieur à 4.5m sur une période de trente ans.

L'extrapolation des caractéristiques de houles extrêmes a fait l'objet de diverses études selon le secteur concerné sur le littoral azuréen. La tendance est à une légère augmentation des hauteurs de projet au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'ouest du littoral azuréen.

Au large de la Baie des Anges, il est approprié de se reporter directement à l'analyse faite par le CETMEF à partir des données de mesure de la bouée CANDHIS au large de l'aéroport de Nice (Cf.[1]). L'analyse sur sept ans toutes directions confondues aboutit aux résultats suivants :

Hauteurs significatives H_S extrapolées		
	Période de retour	
	1 an	10 ans
Toutes directions confondues	$H_S = 2.9\text{m} (+/-0.2\text{m})$	$H_S = 4.0\text{m} (+/-0.3\text{m})$



Position de la bouée CANDHIS au large de l'aéroport de Nice

Les résultats toutes directions confondues s'apparentent à ceux du secteur Sud, le plus néfaste dans la zone considérée. Ces valeurs annuelles et décennales sont cohérentes avec les valeurs préconisées dans le cadre du projet d'urbanisation en mer de Monaco, rappelées ci-dessous :

Hauteurs significatives H_S retenues par la Principauté de Monaco (2007)			
	Période de retour		
	1 an	10 ans	100 ans
ESE étendu au N75°-N160°	$H_S = 2.5m$, $T_P=7.2s$	$H_S = 3.5m$, $T_P=8.4s$	$H_S = 4.2m$, $T_P=9.6s$
SSO étendu au N235°-N160°	$H_S = 3.0m$, $T_P=7.2s$	$H_S = 4.2m$, $T_P=9.6s$	$H_S = 5.2m$, $T_P=12s$

Les valeurs proposées à Monaco sont juste très légèrement supérieures à celles extraites de l'analyse du CETMEF. On précise que la bouée de l'aéroport est légèrement protégée par le Cap d'Antibes, lequel bloque une partie de l'énergie des houles de sud-sud-ouest, en particulier les composantes sud-ouest du spectre directionnel. La Baie des Anges étant très près de la bouée CANDHIS, on retiendra logiquement les valeurs proposées par le CETMEF. La hauteur centennale n'étant pas précisée (la période d'analyse est effectivement relativement courte), on retient la valeur $H_S=5.5m$, également adoptée au large de la baie de Cannes (Cf. [2]), en principe sujette à des agitations plus élevées. Cette valeur majore également la hauteur centennale proposée à Monaco depuis le secteur Sud.

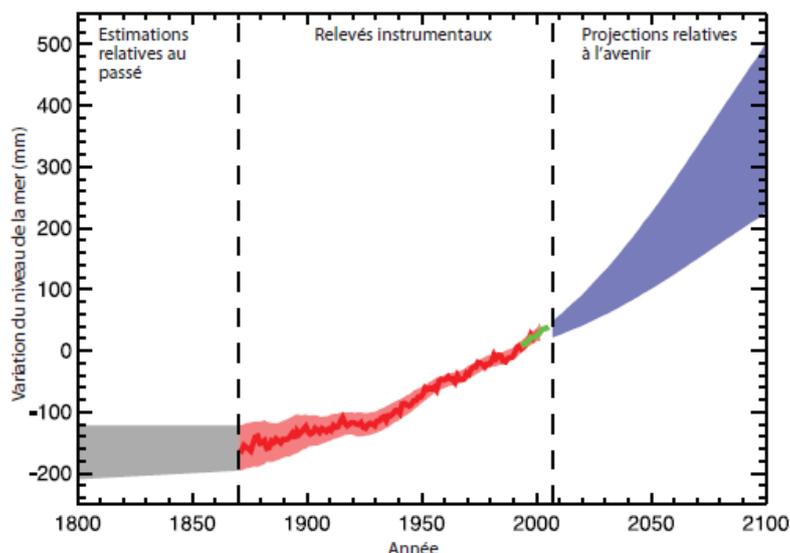
On associe à chaque valeur de H_S la période pic T_P la plus probable identifiée dans les tableaux ANEMOC.

Caractéristiques des houles de tempêtes retenues			
	Période de retour		
	1 an	10 ans	100 ans
ESE étendu au N75°-N120°	$H_S = 2.5m$, $T_P=7.2 s$	$H_S = 3.5m$, $T_P=8.4s$	$H_S = 4.2m$, $T_P=9.6s$
SSO étendu au N235°-N160°	$H_S = 2.9m$, $T_P=7.5 s$	$H_S = 4.0m$, $T_P=10s$	$H_S = 5.5m$, $T_P=12s$

2.3 LE NIVEAU D'EAU

Le phénomène de marée engendre un marnage semi-diurne et diurne de faible amplitude, 20cm à 40cm sur les côtes azuréennes. A ces fluctuations périodiques sur 12.5 à 25 heures, s'ajoutent les oscillations plus lentes qui accompagnent les variations de pression atmosphérique lors des périodes anticycloniques ou des tempêtes. Les vents de mer, qui repoussent les eaux vers le littoral, ou au fond des baies, créent également une surcote supplémentaire, de même que le déferlement des houles (effet de set-up).

A cela s'ajoute une éventuelle surélévation du niveau moyen des mers et des océans dans les décennies à venir, due aux changements climatiques. Les études du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (G.I.E.C.) font part d'une fourchette de valeurs de 18-59 cm sur le siècle à venir (2100) avec une valeur la plus probable vers 35-40cm.



*Exemple d'évolution du niveau moyen
(scénario A1B du changement climatique, Cf. [5])*

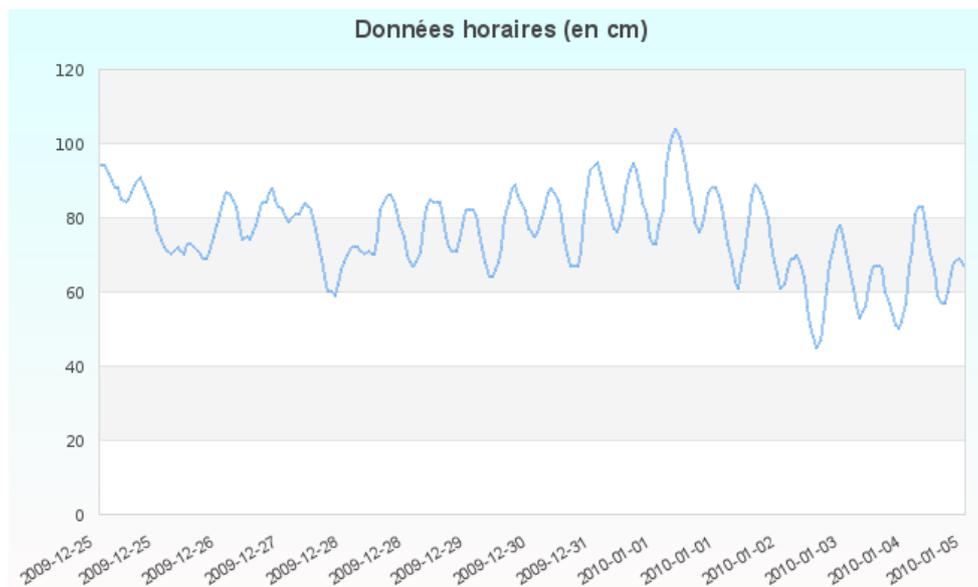
D'après la note de synthèse publiée par l'observatoire sur les effets du réchauffement climatique (ONERC), qui se base sur le 4^{ème} rapport du GIEC (2007), on distinguerait trois hypothèses de surélévation du niveau d'eau à l'horizon 2060 :

- hypothèse optimiste : 0.2m
- hypothèse pessimiste : 0.3m
- hypothèse extrême : 0.5m

Ces valeurs seraient respectivement 0.4m, 0.6m et 1.0m à l'horizon 2100.

L'analyse des données marégraphiques disponibles à Nice ou à Monaco (librairie en ligne SONEL) conduit aux remarques de synthèse suivantes :

- La cote +0.7m CM (soit 0.37m NGF) est dépassée régulièrement chaque année. On note environ dix périodes indépendantes dans l'année, chacune pouvant parfois durer plusieurs jours, où le niveau d'eau est supérieur à cette cote.
- La cote 0.8m CM à 0.9 CM est plus rare. Elle est en moyenne dépassée une fois par an.
- La surcote la plus élevée observée entre 1998 et 2010 est de 1.05m CM (0.72m NGF). Elle coïncide avec la grosse tempête du 1^{er} janvier 2010.

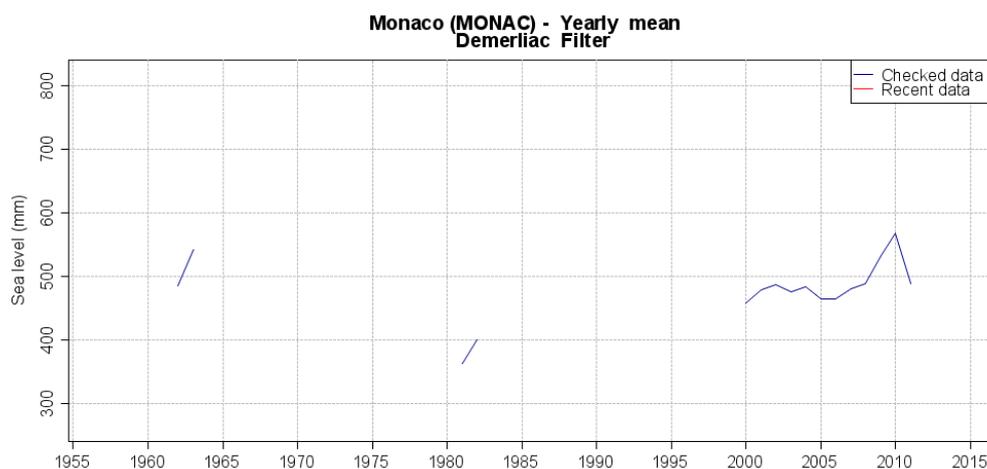


Mesures marégraphiques à Nice entre Noël 2009 et début 2010 (référence 0 CM)

Une analyse des données marégraphiques sur 28 ans entre 1956 et 1984 à Monaco effectuée dans le cadre de la maîtrise d'œuvre de la restructuration du port avait permis d'extrapoler les valeurs suivantes :

Occurrence	Annuelle	décennale	centennale
Surcote par rapport au niveau des plus basses mers CM	+0.9 CM	+1.0 CM	+1.1 CM
Surcote par rapport au niveau NGF	+0.57 NGF	+0.67 NGF	+0.77 NGF

Selon ces données, la surcote enregistrée le 1^{er} janvier 2010 aurait une période de retour d'environ 50 ans. Mais, on note depuis 2005 une montée significative de la moyenne du niveau d'eau annuel, comme l'indique le graphe ci-dessous (réchauffement climatique ?, pic sur une période de quelques années ?). Le niveau moyen est d'ailleurs redescendu de 4cm en 2011.



Moyenne annuelle du niveau d'eau à Monaco (données librairie SONEL)

Sans cette montée générale de l'ordre de 5cm par rapport à 2002 et 7cm par rapport à 2005, le même évènement de tempête rencontré le 1^{er} janvier 2010 aurait généré une surcote de moins d'un mètre, ramenant l'occurrence théorique à environ 10 ans.

Il apparaît aujourd'hui de plus en plus justifié d'anticiper une montée générale du niveau des océans dans le cadre des dimensionnements des nouveaux ouvrages maritimes.

Au final, on retiendrait 0.6m NGF et 0.7m NGF comme surcotes annuelle et décennale, et jusqu'à +1.0m NGF comme surcote cinquantennale à l'horizon 2060.

2.4 LA HOULE A L'APPROCHE DU LITTORAL DE LA BAIE DES ANGES

Le modèle de propagation de houle SWAN a été exploité pour bâtir les plans de vagues des houles de tempête dans toute la Baie des Anges. La modélisation est fondée sur trois niveaux de maillages emboîtés, couvrant d'abord le littoral entre le Cap d'Antibes et le Cap Ferrat (mailles de 300m), puis se resserrant sur la baie des Anges (mailles de 100m, puis 25m localement).

Les simulations intègrent les phénomènes suivants :

- la réfraction-diffraction des houles incidentes influencées par les fonds et les caps ;
- la répartition en fréquences et directions de l'énergie de la houle ;
- la dissipation par frottement sur le fond et déferlement.

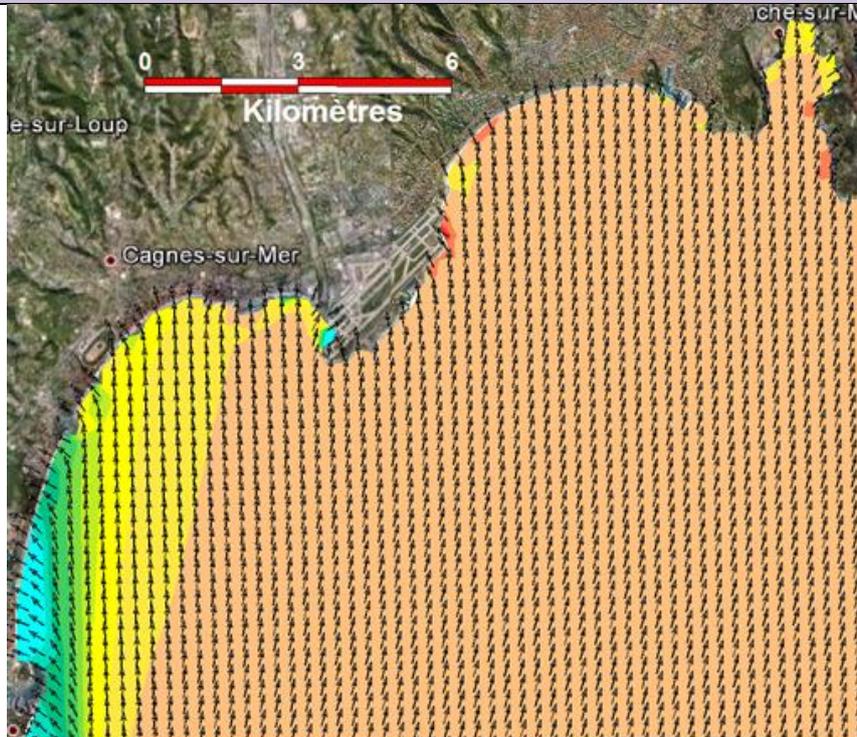
Les plans de vagues par occurrence et direction principale sont présentés en annexe B, jointe à ce document. L'énergie des houles de projet au large a été dispersée sur un secteur angulaire d'environ 14° de part et d'autre autour de la direction principale (loi de type $\cos^S \theta$, avec $S=15$), ce qui correspond à un spectre réaliste relativement étroit. Lorsque l'énergie de la houle se répartit dans une baie, cette hypothèse est légèrement conservatrice en termes de hauteurs résiduelles à l'approche de la côte.

L'examen des plans de vagues indique les tendances logiques suivantes :

- Le cap d'Antibes et l'aéroport protègent l'Ouest de la baie des fortes houles de Sud-Sud-Ouest, tandis que le Cap de Nice protège pratiquement toute la baie des houles d'Est.
- Les houles de Sud à Est-Sud-Est parviennent à la côte en étant peu atténuées par les effets de réfraction ou diffraction.
- Les musoirs des épis étant situés relativement proches du rivage, à quelques mètres de profondeur, les hauteurs des houles sollicitant directement les épis sont limitées par le déferlement. A faible profondeur, les hauteurs résiduelles des houles annuelles ou extrêmes seraient du même ordre de grandeur, si elles étaient associées à des niveaux d'eau équivalents. Le déferlement est étudié en détail dans le chapitre sur les sollicitations hydrodynamiques. Les hauteurs résiduelles statistiques sont évaluées à travers les abaques

issus de mesures en laboratoire, tenant compte des effets non linéaires de déformation des houles ainsi que de la pente des fonds.

Plans de vagues. $H_{S0}=2.9m$, $T_p=7.5s$, N200



Modèle large (maille de 300m)



Modèle intermédiaire emboîté (maille de 100m)

2.5 LA FLORE AQUATIQUE

S'il n'y a pas d'herbiers de posidonies au large immédiat du littoral de la baie des Anges, on note la présence de Cymodocées, espèce protégée, dont la limite haute se situe aux alentours de -4/-5m NGF. Les plages de Nice entre l'aéroport et le port, ne se situent pas dans une zone à contraintes environnementales caractérisées (ZNIEFF, NATURA 2000).

3 LE FONCTIONNEMENT HYDRO-SEDIMENTAIRE DE LA BAIE DES ANGES

3.1 ANALYSE DES ETUDES ANTERIEURES

Le littoral de la Baie des Anges forme une cellule sédimentaire complète entre l'aéroport et le Cap de Nice. Les plages sont majoritairement constituées de galets, la granulométrie ayant classiquement tendance à s'affiner lorsque l'on se dirige vers le large. Les galets en partie émergente de la plage reposent sur une sous-couche graveleuse à sableuse, qui se découvre près du rivage lors des tempêtes en hiver.

Les processus sédimentaires ont été étudiés à l'échelle sous-régionale par le BCEOM (Cf. [1]), ainsi qu'à l'échelle de chaque cellule sédimentaire par SOGREAH (Cf. [2] [3] [4]), cette dernière étude faisant l'objet de la rédaction de fascicules spécifiques à chaque commune intéressée par le contrat de baie. On reprend ci-après la synthèse sur quelques données ou résultats essentiels ayant trait au littoral bordant les épis étudiés.

Dans le tableau ci-dessous, on détaille les quatorze épis sur les vues prises par satellite en 2006. On associe à chaque groupe d'épis les plages et les tailles de sédiments prélevées près de la laisse des eaux en février 2008. Les triplets $D_{16\%}/D_{50\%}/D_{84\%}$ représentent les diamètres non dépassés respectivement par 16% / 50% / 84% de l'échantillon de sédiment.

Plages	Epis	$D_{16\%}/D_{50\%}/D_{84\%}$ (février 2008)
Plage Carras		Point 26 : 4.8mm / 9.3mm / 14.3mm (graviers) Point 27 : 14.6mm / 21.1mm / 22.2mm (graviers/galets)
Plage D'Aubry Lecomte	n°1 n°2 n°3	Point 29 : 24.5mm / - / -(galets)
		

Plages	Epis	$D_{16\%}/D_{50\%}/D_{84\%}$
Plage Sainte-Hélène	n°4 n°5 n°6	Point 30 : 1.6mm / 2.1mm / 19.7mm (graviers/galets)
Plage Fabron	n°7 n°8	Point 31 : 0.3mm / 0.4mm / 0.45mm (Sable au rivage, mais galets observés en haut de plage)

Plages	Epis	$D_{16\%}/D_{50\%}/D_{84\%}$
Plage Lenval	n°9 n°10 n°11	Point 32 : 20.8 mm / 23.8mm / 28.6mm (galets)
		
Plage Magnan – Plage Poincaré	n°12 n°13	Point 33 : 15.0 mm / 18.4mm / 23.5mm (galets)
		

Plages	Epis	$D_{16\%}/D_{50\%}/D_{84\%}$
Plage Voilier (à l'Est du vallon Poincaré)		Point 34 : 1.3 mm / 13.1mm / 16.3mm (galets/graviers/sables grossiers)
 <p style="text-align: center;">Vallon Poincaré</p>		
Plage Forum		Point 35 : 0.4 mm / 0.6mm / 28.3mm (galets/graviers/sables grossiers)
Plage du Centenaire	N°14 (Paillon)	Point 36 : 4.4 mm / 5.9mm / 9.0mm (graviers/sables grossiers)
 <p style="text-align: center;">Epi du Paillon</p>		

Les plages sont essentiellement constituées de galets ou de gravier. Les mélanges graviers / sables sont observés principalement dans la zone du vallon Poincaré, entre la plage du Voilier et la plage Forum.

Sogreah a analysé les mesures de largeur de plage effectuées sur 51 profils par la ville de Nice depuis 1991. Les données ont aussi été recoupées avec les photos aériennes du trait de côte entre 1983 et 2004. Il ressort de l'analyse que la plage de Nice est globalement en accrétion, d'environ 4400 m³/an, alors que la moyenne des rechargements par apports de matériaux extérieurs serait de 18875 m³/an. Cela signifie que la cellule hydro-sédimentaire du littoral niçois perd effectivement 14475 m³/an de matériaux sous les sollicitations des tempêtes qui agressent le littoral et emmènent une partie des matériaux vers le large, au-delà de la profondeur de fermeture, là où les petites houles ne ramènent plus les matériaux vers la plage.

La cellule n'est pratiquement plus alimentée par les apports naturels des rivières, le transit issu de la source principale, celle du Var, étant coupé par la plateforme de l'aéroport gagnée sur la mer. Sans les apports extérieurs réguliers, la plage de Nice perdrait annuellement environ 1.1% de sa quantité actuelle de matériaux. Sans entretien, il faudrait environ 90 ans pour que la plage disparaisse complètement.

La perte de matériaux sous les effets de la houle n'est pas uniformément répartie le long de la plage de Nice. Nous avons regroupé dans le tableau ci-dessous les débits observés sur trois grands secteurs :

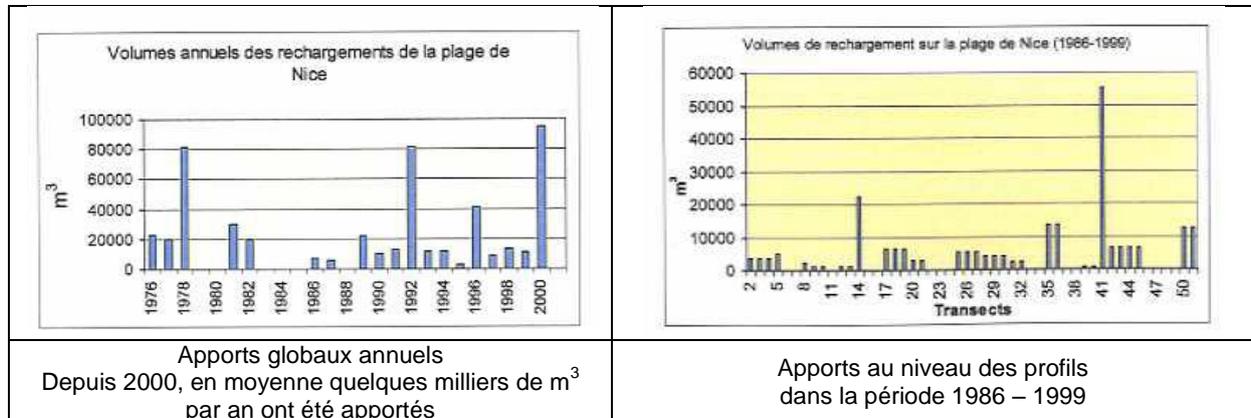
- le secteur Ouest, de la plage de Carras à Magnan où se trouvent les 13 premiers épis (env. 1500m) ;
- le secteur au centre de la plage, de Magnan à l'épi du Paillon (env. 2100m) ;
- le secteur Est, du Paillon à la plage de Castel (env. 875m).

Bilans sédimentaires sur la période 1991-2007			
	Apports extérieurs (moyenne sur 1977-1999)	Engraissement constaté	Perte effective de matériaux
Carras à Magnan	4715 m ³ /an soit 3.1 m ³ /ml/an	2100 m ³ /an soit 1.4 m ³ /ml/an	-2615 m ³ /an soit -1.7 m ³ /ml/an
Magnan à Paillon	10056 m ³ /an soit 4.8 m ³ /ml/an	1780 m ³ /an soit 0.8 m ³ /ml/an	-8276 m ³ /an (sur 2100m) soit -4.0 m ³ /ml/an
Paillon à Castel	4104 m ³ /an soit 4.7 m ³ /ml/an	520 m ³ /an soit 0.6 m ³ /ml/an	-3584 m ³ /an (sur 875m) soit -4.1 m ³ /ml/an
Total	18875 m³/an	4400 m³/an	14475 m³/an soit -3.2 m³ /ml/an

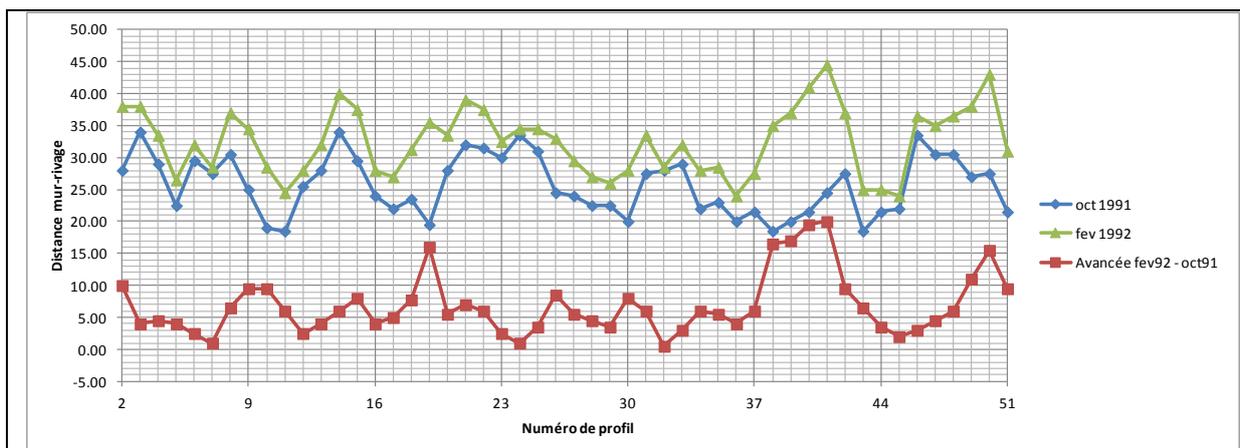


Pertes de matériaux constatés par secteur de plage par différence entre les apports extérieurs et l'engraissement global observé

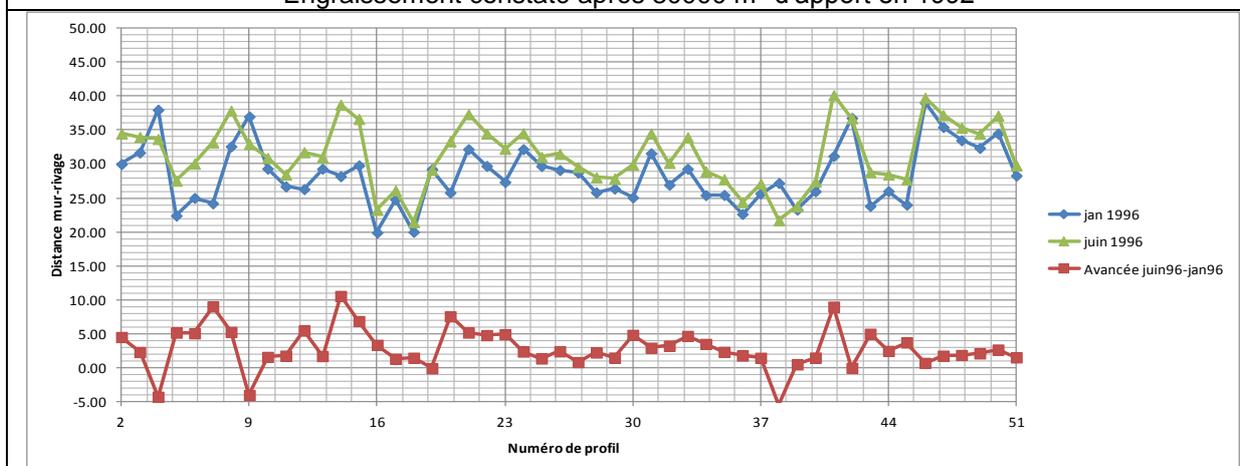
Les apports ont souvent été concentrés en deux emplacements : Lenval légèrement à l'ouest de l'embouchure du Magnan (profil 14) et vers le Paillon (profil 41). Ils ont ensuite été régalés, la mer favorisant également la dispersion le long de la page. D'autres apports ont néanmoins été faits sur d'autres profils (Cf. graphe ci-dessous, données ville de Nice, source Sogreah).



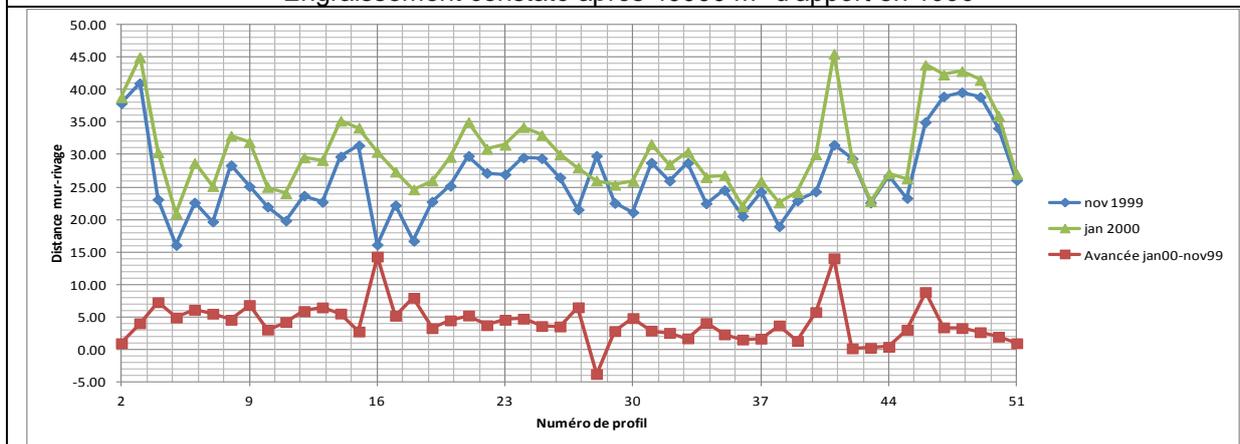
Même si la partie Ouest a été légèrement moins rechargée que le centre ou la partie Est de la cellule, le rechargement global est proche d'une répartition uniforme. Sur les graphes suivants, on a tracé la distance entre le mur et le trait de côte sur l'ensemble de la plage de Nice (profils 2 à 51). Les trois graphes font part de la position du trait de côte avant et après les rechargements massifs qui ont été opérés en 1992 (80000 m³), 1996 (40000 m³) et 2000 (95000 m³). L'avancée est relativement régulière, les zones de Magnan et du Paillon étant manifestement et logiquement localement parfois plus engraisées (en 1992 et 2000 notamment).



Engraissement constaté après 80000 m³ d'apport en 1992



Engraissement constaté après 40000 m³ d'apport en 1996



Engraissement constaté après 95000 m³ d'apport en 2000

Les pertes par mètre linéaire de plage observées sur la partie Ouest sont moins élevées que sur la partie centrale ou la partie Est : $-1.7 \text{ m}^3/\text{ml}/\text{an}$ entre Carras et Magnan, contre environ $-4 \text{ m}^3/\text{ml}/\text{an}$ entre Magnan et Castel.

Les mouvements sédimentaires sur un littoral se décomposent généralement en deux catégories :

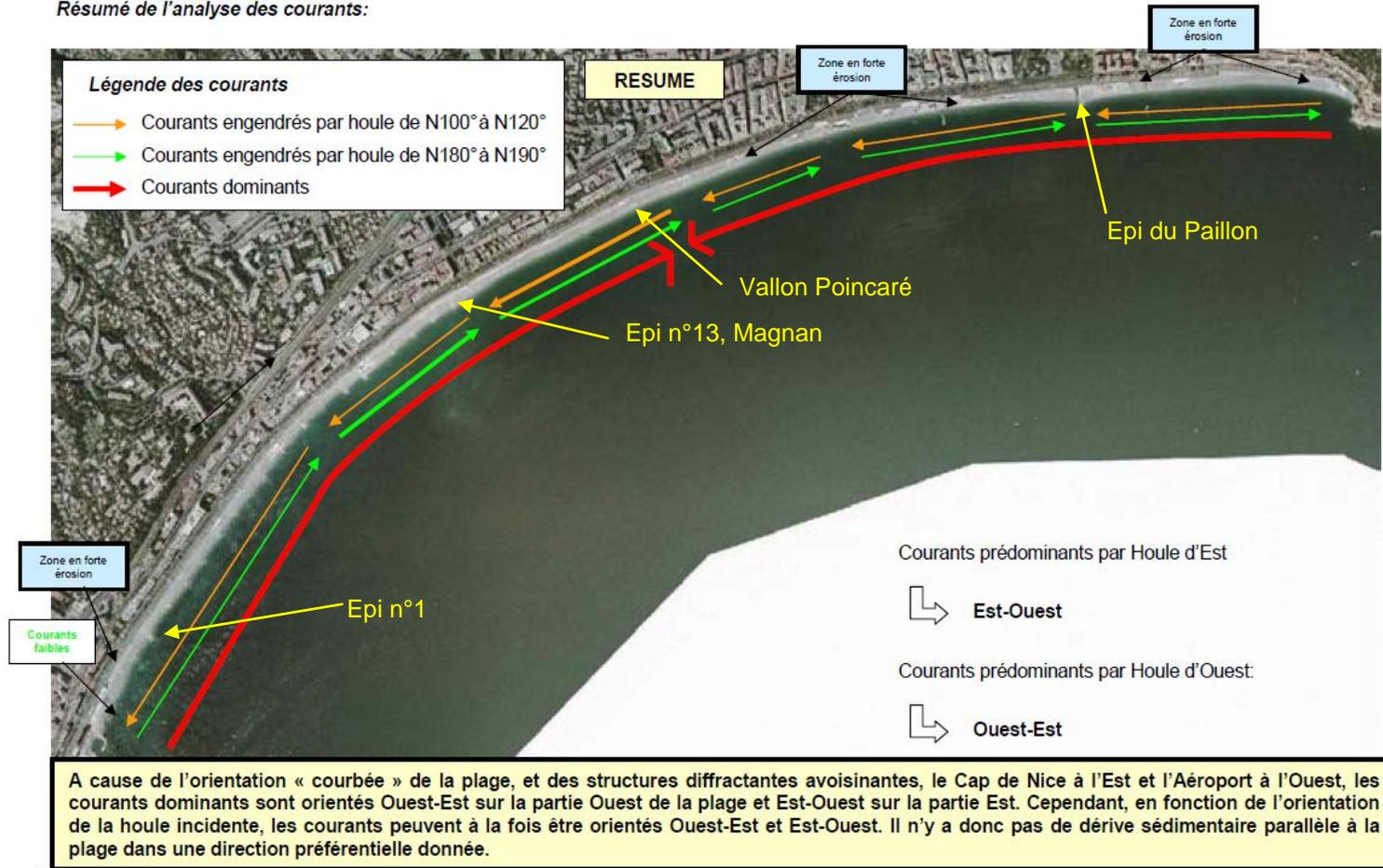
- les mouvements transversaux au trait de côte, dits dans le profil de la plage. Ce sont les remaniements à courts termes des profils de plage. Les tempêtes ont en général tendance à éroder les plages, entraînant des matériaux définitivement perdus vers le large, tandis que les houles de beau temps peuvent ré-engraisser les plages en remontant des matériaux depuis les petits fonds.
- les mouvements longitudinaux, parallèles au trait de côte, engendrés principalement par les courants littoraux des houles fréquentes déferlant avec une obliquité par rapport à la plage. Ce sont des mouvements s'accompagnant d'une déformation à long terme du trait de côte.

Les transits sédimentaires longitudinaux ont été évalués par Sogreah à partir d'évolutions historiques du trait de côte et de simulations numériques. Il est montré que les transits moyens partent des extrémités Ouest et Est de la cellule, et convergent vers la zone à l'Est du vallon Poincaré, entre les plages Voilier et Forum. Les ordres de grandeurs des débits longitudinaux transitant au sein de la cellule depuis les extrémités vers le centre sont d'environ $1000 \text{ m}^3/\text{an}$. Dans le tableau ci-dessous, on a synthétisé les tendances évaluées pour le transit littoral sur la partie Ouest de la plage, là où sont situés les épis.

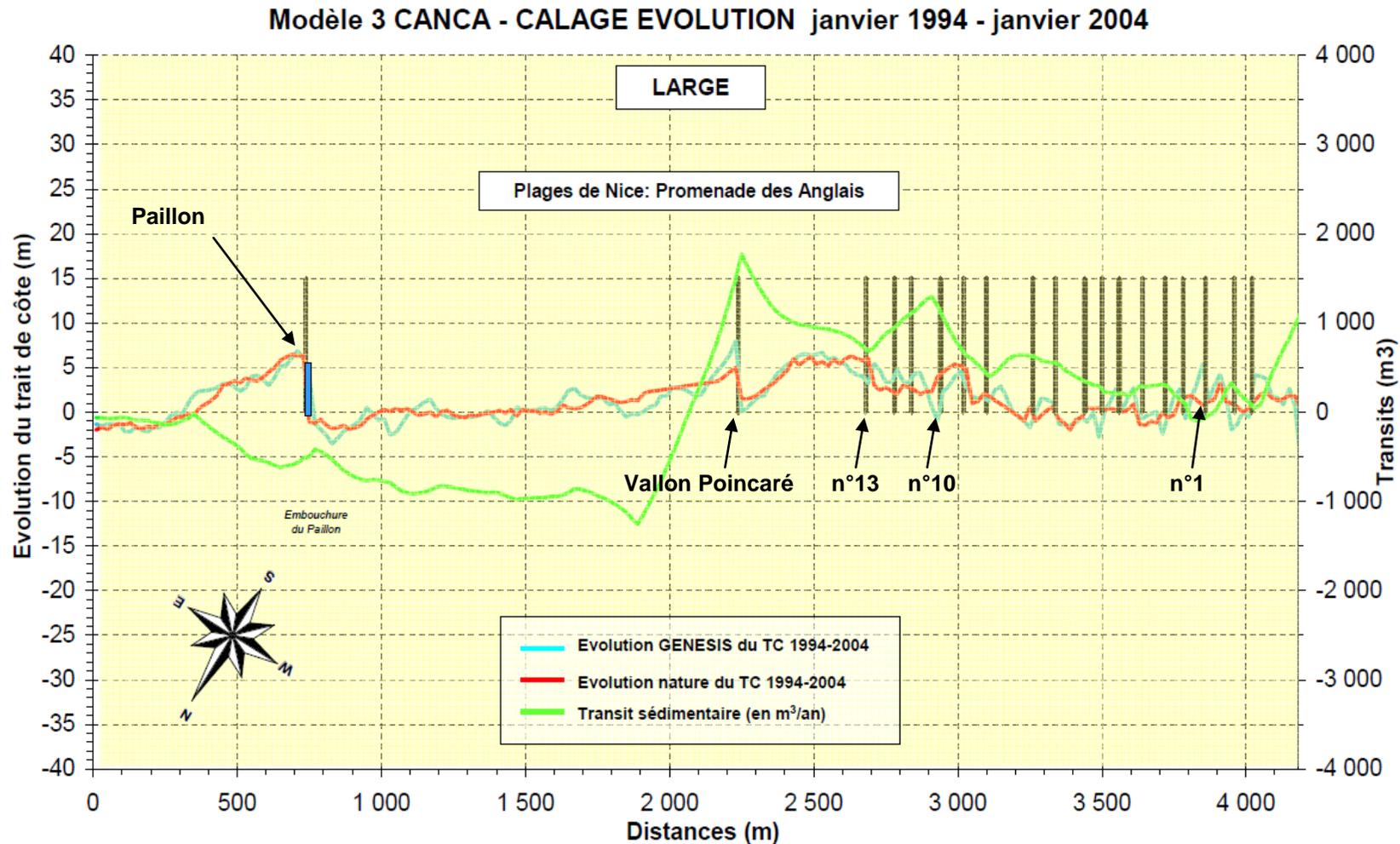
Bilans sédimentaires sur la période 1991-2007		
	Description du transit longitudinal	Tendance sous le seul effet du transit littoral longitudinal
Epis 1 à 10	Transit vers l'Est progressant de 0 à $1000 \text{ m}^3/\text{an}$ (épi 10)	Recul du trait de côte, freiné par les épis
Epis 10 à 13 (Magnan)	$1000 \text{ m}^3/\text{an}$ entrant par l'Ouest (épi 10), $500 \text{ m}^3/\text{an}$ sortant vers l'Est (épi 13)	Tendance à l'avancée locale du trait de côte
Epi 13 (Magnan) à vallon Poincaré	$500 \text{ m}^3/\text{an}$ entrant par l'Ouest (épi 13), $1500 \text{ m}^3/\text{an}$ sortant vers l'Est	Tendance au recul local du trait de côte
Est du vallon Poincaré	Zone de convergence des transits $1500 \text{ m}^3/\text{an}$ entrant par l'Ouest $1000 \text{ m}^3/\text{an}$ entrant par l'Est	Tendance à l'avancée locale du trait de côte

Les planches ci-après, extraites du rapport de Sogreah, illustrent les phénomènes précédemment décrits.

Résumé de l'analyse des courants:



Tendances des transits sédimentaires dans le sens parallèle à la plage



Débits de transits longitudinaux et évolution du trait de côte (intégrant les apports extérieurs de matériaux et les pertes dans le profil)

Les transits convergeant vers le milieu de la plage (Voilier et Forum) sont confirmés par les observations des zones d'accumulations de matériaux à l'enracinement des épis ou des ouvrages d'évacuation des eaux.

Si on analyse la taille des sédiments par secteur, on constate un tri des sédiments les plus fins vers la zone des plages Voilier et Forum, ce qui est une des caractéristiques des zones de convergence des transits littoraux.

Les déplacements longitudinaux, internes à la cellule, représenteraient environ 2000 à 2500 m³/an. C'est un ordre de grandeur de moins que les pertes globales vers le large, évaluées à 14500 m³/an.

Sur la partie Ouest de la plage, entre Carras et Magnan, la répartition entre les deux types de transit est plus équilibrée. Celle-ci peut être synthétisée comme suit :

Bilan sédimentaire sur la partie Ouest de la plage de Nice		
	Littoral entre Carras et l'épi n°10 (environ 1250m)	Littoral entre l'épi n°10 et l'épi n°13
Transit vers l'Est	≈ 0 m ³ /an à l'épi n°1 ≈ 1000 m ³ /an à l'épi n10	≈ 1000 m ³ /an à l'épi n°10 ≈ 500 m ³ /an à l'épi n°13
Bilan des transits	≈ -1000 m ³ /an	≈ +500 m ³ /an
Perte totale par transit vers l'Est entre n°1 à n°13	≈ -1000 + 500 = -500 m ³ /an	
Estimation de la perte dans le profil	≈ -2100 m ³ /an	
Perte totale	≈ -2600 m ³ /an	

Sur une année moyenne où transitent 1000 m³ de matériaux au niveau de l'épi n°10, une partie des matériaux (≈500 m³) s'accumule entre l'épi n°10 et le n°13, l'autre continue de transiter vers les plages Voilier et Forum. Dans le même temps, on constaterait une perte des matériaux vers le large d'environ 2100 m³/an, aboutissant aux 2600 m³/an observés à l'aide des mesures d'épaisseur de plages.

La partie Ouest de la plage, protégée des fortes houles de Sud-Ouest, est logiquement moins érodée que la partie centrale ou la partie Est. Les épis réduisent les pertes par transit. Ils favorisent également les déformations locales du trait de côte contre un déséquilibre plus global qui tenderait à éroder plus rapidement l'extrémité Ouest de la plage.

3.2 SYNTHÈSE DU FONCTIONNEMENT SEDIMENTAIRE GLOBAL

L'étude Sogreah permet de cerner le fonctionnement global de la cellule sédimentaire formée par la baie des Anges. Il y est démontré les points essentiels suivants :

- Une perte annuelle de matériau vers le large de l'ordre de 14500 m³/an, dont 2600 m³/an entre Carras et Magnan, dans la zone des épis n°1 à n°13, et le reste, soit 11900 m³/an, entre Magnan et Castel. Cette perte est due à l'agression par les plus fortes tempêtes d'Est ou de Sud-Ouest, qui ont tendance à étaler, voire remonter une partie des matériaux en haut de plage, mais aussi à transporter des matériaux suffisamment loin vers le large, sans que ceux-ci ne puissent revenir de façon naturelle vers la frange littorale.
- Un transit potentiel de matériaux interne à la cellule, par transit littoral longitudinal convergeant vers le centre de la Baie des Anges. D'après les approches numériques (GENESIS), le transport vers le centre serait de l'ordre de 2000 m³/an à 2500 m³/an venant aussi bien d'Est et d'Ouest. Les épis à l'Ouest freinent une partie de ce transit. Le modèle mis en œuvre par Sogreah ne spécifie cependant pas le taux d'efficacité adopté pour les épis.

3.3 EFFICACITÉ DES ÉPIS

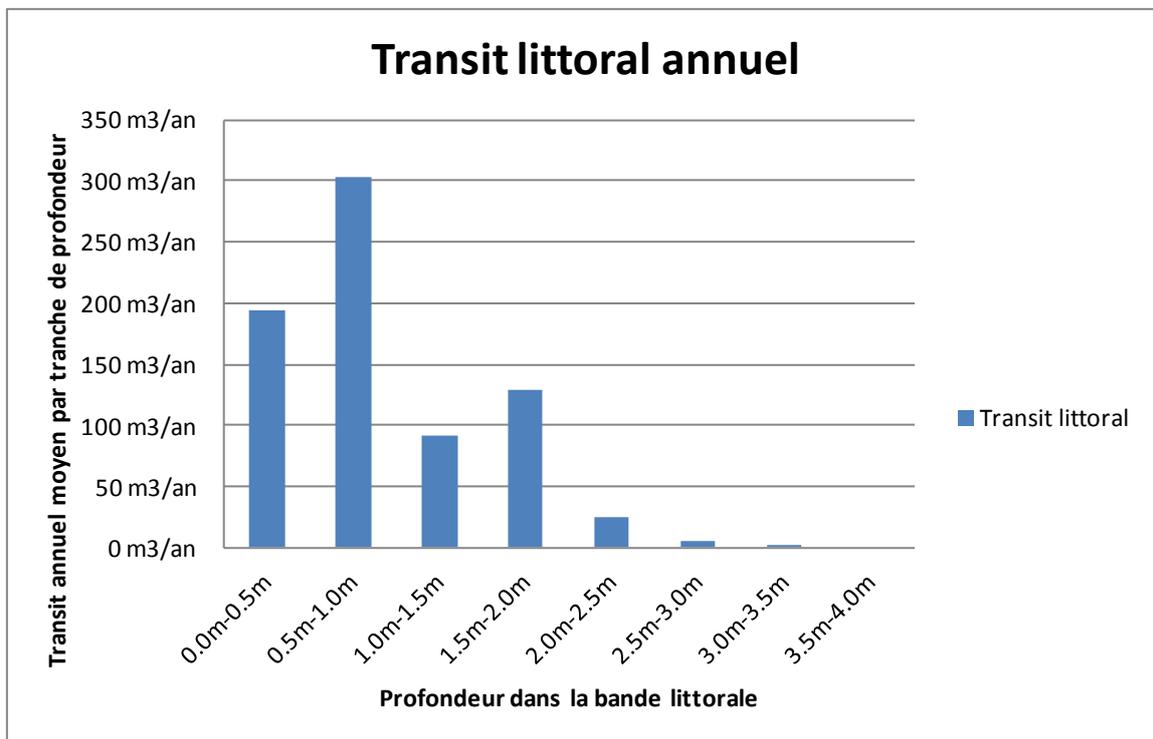
Nous tentons dans cette partie d'apporter quelques précisions supplémentaires sur le fonctionnement des épis. Nous avons repris les mêmes statistiques de houle à la côte estimées par Sogreah pour évaluer l'emprise du transit littoral au niveau de la zone des épis n°1 à n°6. La démarche suivante a été appliquée :

- distinction des classes de hauteurs de houles par provenance, associées chacune à un nombre d'heures d'apparition sur une année moyenne ;
- calcul des caractéristiques au déferlement de chaque classe de houle ;
- estimation du courant littoral et du transit sédimentaire associé à chaque classe de houle à l'aide de la formule de Bijker ;
- intégration du transit littoral moyen sur l'année, sans prendre en compte l'effet des épis.

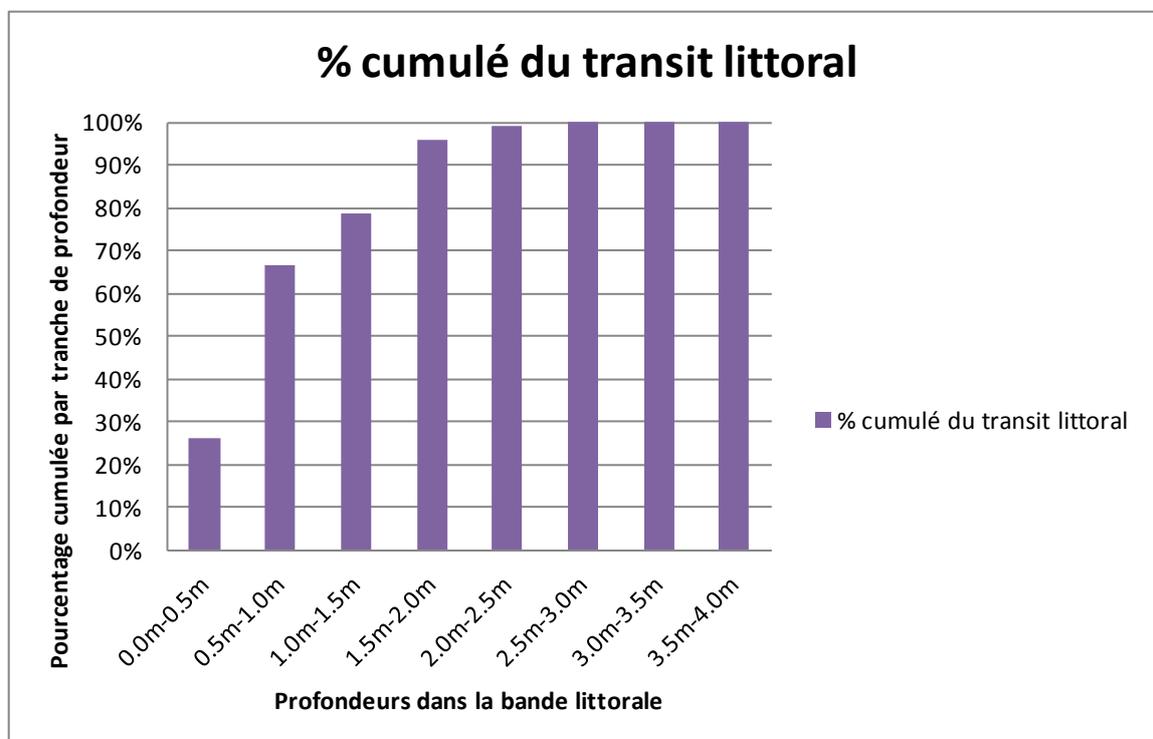
Cette estimation à l'aide de formules empiriques conduit aux résultats suivants :

- L'ordre de grandeur du transit littoral potentiel dans la zone des premiers épis est estimé entre 800 m³/an pour des galets ($D_{50}/D_{90}=20\text{mm}/40\text{mm}$) et 1500 m³/an pour des sables et graviers ($D_{50}/D_{90}=2\text{mm}/19\text{mm}$), en supposant que les épis n'arrêtent pas le transit. Le transport s'effectue dans une bande littorale de 0m à 3m de profondeur, 80% du transport de galets étant inclus entre 0m et 1.5m.
- Une houle d'Est, d'occurrence annuelle à décennale, agissant pendant 9 heures, déplacerait environ 200m³ de galets vers l'Ouest. Une houle similaire venant du Sud ou Sud-Sud-Est déplacerait un peu plus de matériaux, environ 400 à 600m³. Le transit serait essentiellement compris dans la bande 0m-3m (85%), 15% étant transportés entre 3m et 5m.

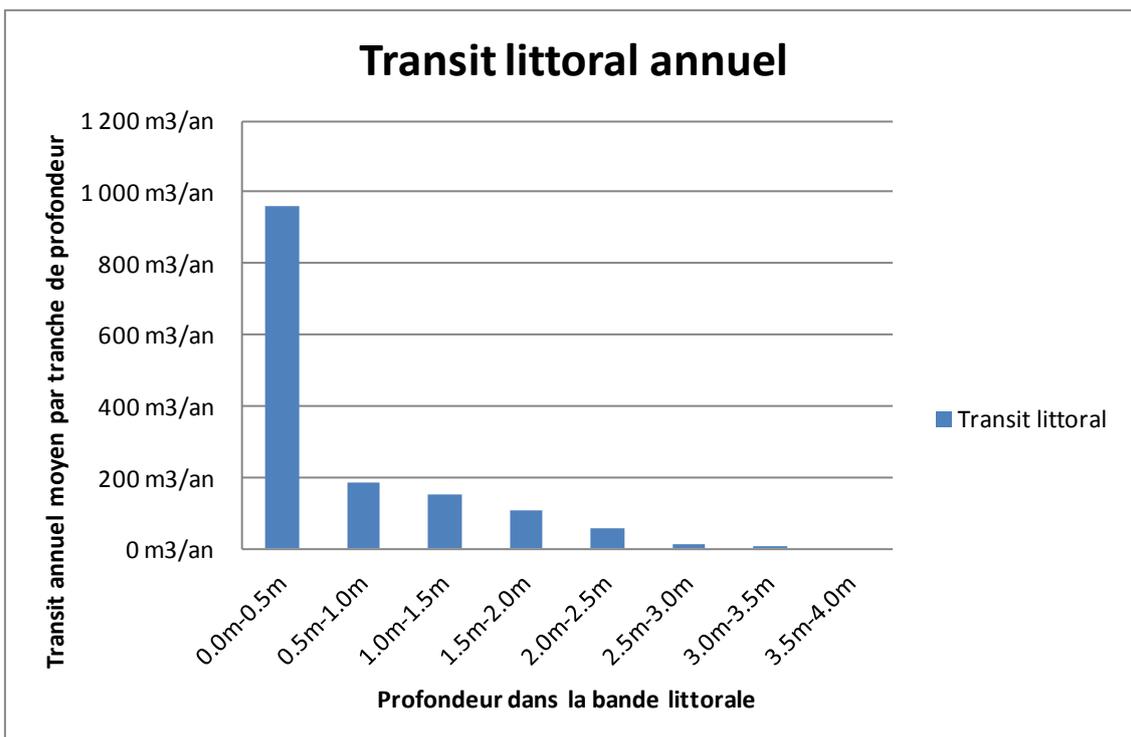
Sur les graphes ci-après, on a représenté la répartition du débit de transit sédimentaire sur la frange littorale entre 0m et 5m, d'abord pour des galets, puis pour des sédiments plus fins.



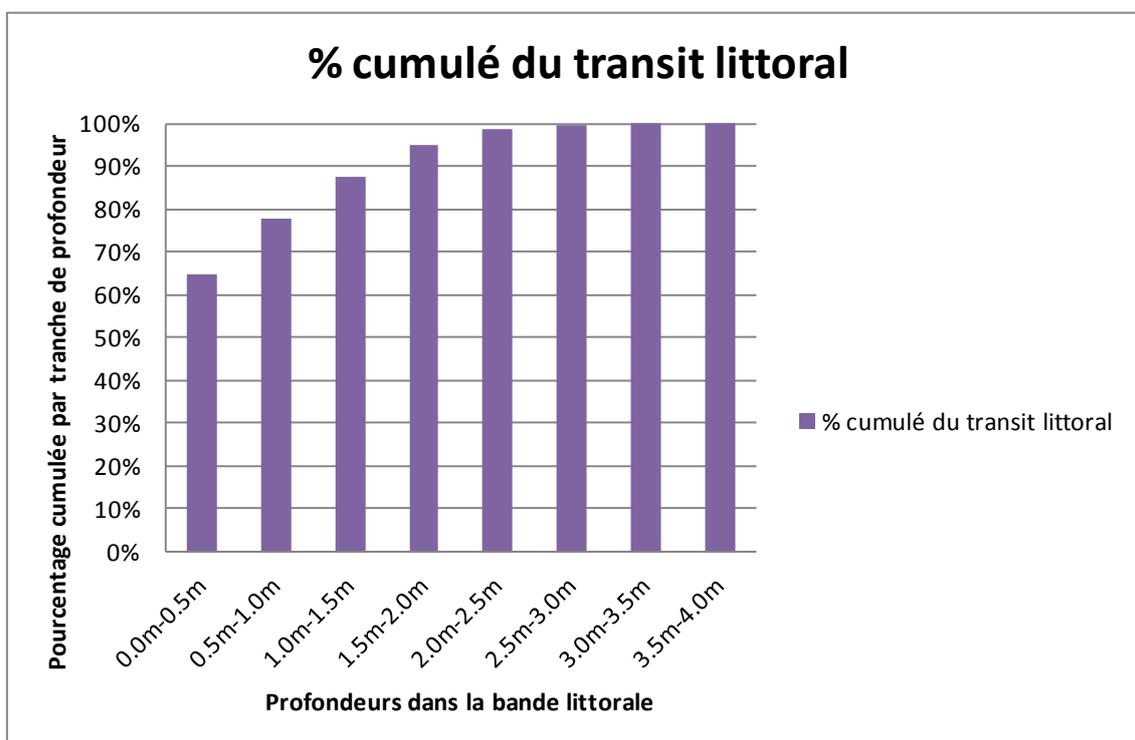
Répartition dans la bande littorale du transit de galets (estimation)



Pourcentage cumulé de la répartition dans la bande littorale du transit de galets (estimation)

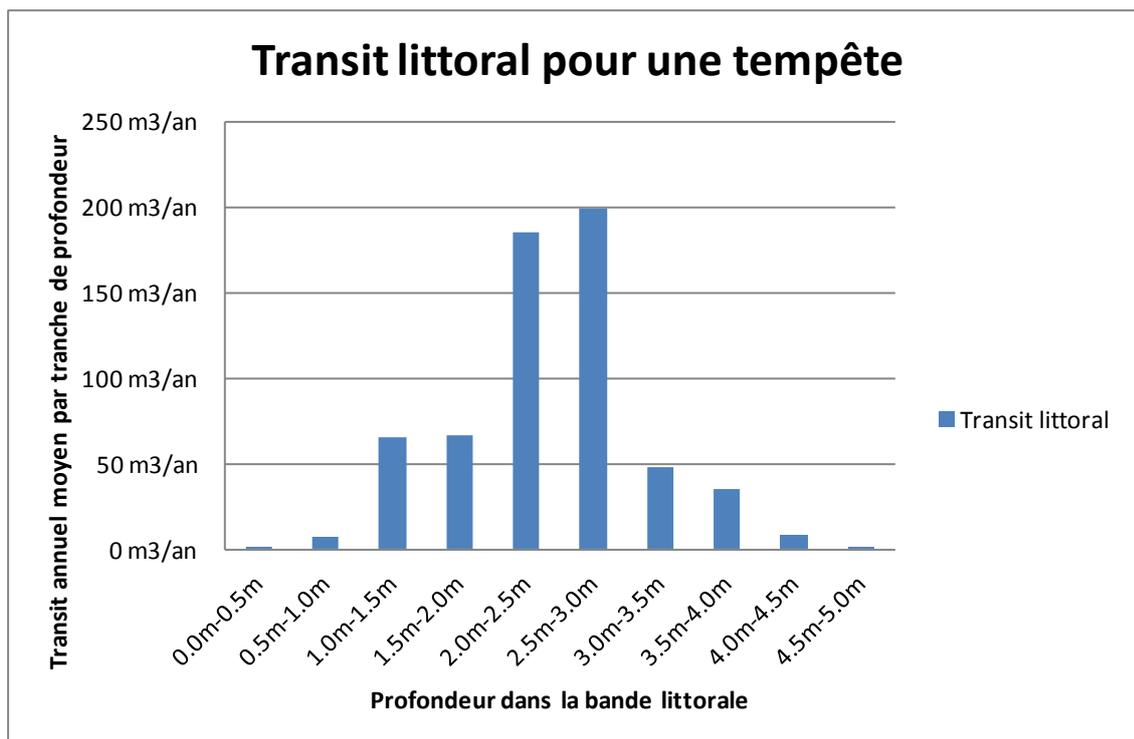


Répartition dans la bande littorale du transit de sable-gravier (estimation)

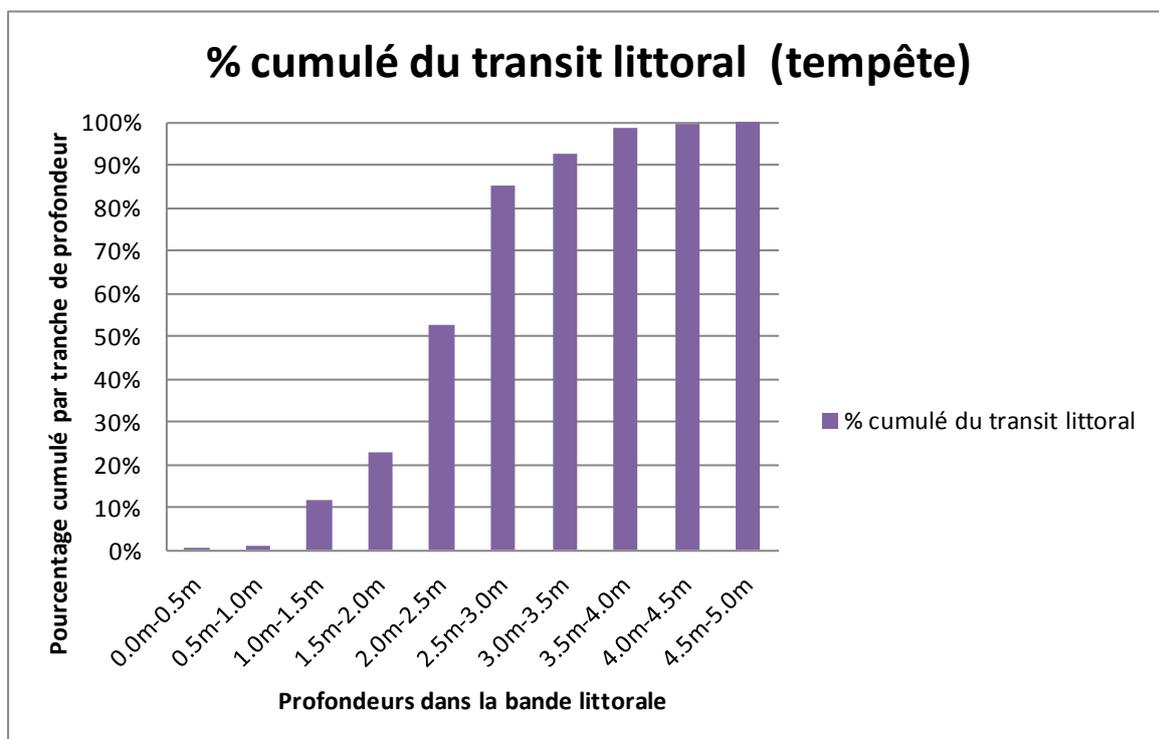


Pourcentage cumulé de la répartition dans la bande littorale du transit de sable-gravier (estimation)

Les graphes ci-dessous présentent les mêmes répartitions que les graphes précédents, mais pour une tempête de Sud.



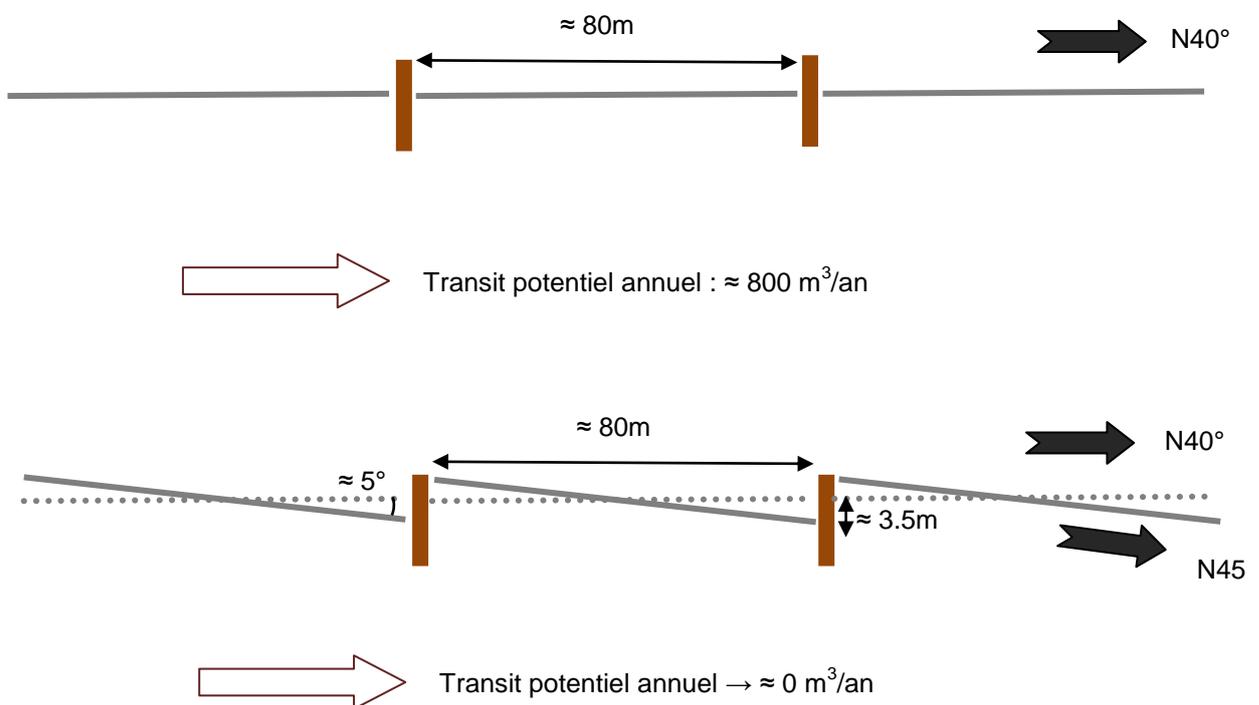
Répartition dans la bande littorale du transit de galets pour une tempête d'occurrence annuelle à décennale de Sud durant 9 heures



Pourcentage cumulé de la répartition dans la bande littorale du transit de galets pour une tempête d'occurrence annuelle à décennale de Sud durant 9 heures

La côte entre l'épi n°1 et l'épi n°6 est globalement orientée au N40°. On montre qu'à cet endroit, l'orientation neutre du trait de côte est proche du N45°. Ceci correspond à la direction pour laquelle le transit annuel moyen serait proche de zéro, les mouvements vers l'Est compensant les mouvements vers l'Ouest.

En barrant en grande partie le transit littoral, chaque épi favorise en moyenne sur l'année une accrétion sur son côté Ouest et une érosion sur son côté Est. Le transit annuel moyen se rapproche de zéro lorsque le trait de côte moyen est orienté vers le N45°. La longueur entre chaque épi est, suivant ce principe, un paramètre déterminant pour atteindre cet équilibre moyen, sans y associer des avancées ou reculs de plage démesurés. Le principe d'équilibre est esquissé ci-dessous :



Avec une distance de l'ordre de 80m entre chaque épi, le transit annuel moyen s'annule lorsque la plage s'avance côté Ouest, ou recule côté Est, d'environ 3.5m, atteignant une orientation moyenne au N45°. Cette distance moyenne d'érosion ou d'accrétion passerait à 7m avec une distance entre épis de 160m.

Dans le cas d'une tempête soutenue, qui engendrerait un transport de galets l'ordre de 500 m^3 , Le déplacement du trait de côte entre deux épis, en supposant que ceux-ci bloquent entièrement le transport littoral, serait estimé de la façon suivante :

—
—

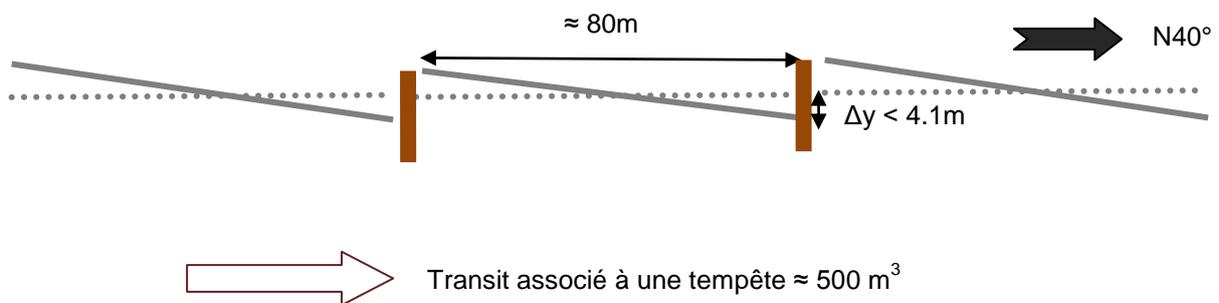
avec :

quantité de matériau déplacée dans le sens longitudinal ;

L : distance entre épis ;

h_f : hauteur depuis le fond jusqu'à la partie de plage intéressée par le transport de matériau.

Pour $Q=500\text{m}^3$ et $L=80\text{m}$, varie entre 4.1m et 2.5m selon que $h_f=3\text{m}$ (entre -1m et +2m) ou $h_f=5\text{m}$ (entre -3m et +2m).



Ces approches simplifiées ne prennent pas en compte le contournement des épis par les courants littoraux. Il est certain que les épis relativement courts de la plage de Nice (environ 10m à 15m en mer) sont en partie contournés par les courants littoraux, et qu'une partie du transit de matériau n'est pas stoppée. En revanche les considérations empiriques ci-dessus nous apportent les enseignements suivants :

- le transit littoral moyen est initié sur une frange littorale de faible profondeur (inférieure à 2m, voire 1m pour 70%), profondeurs à laquelle les épis sont présents.
- Le couple (distance entre épis=80m ; longueur de l'épi=10m à 15m) est approprié pour contenir des réorientations locales de la côte. Une réorientation d'environ 5° en moyenne sur l'année ($N45^\circ$ au lieu de $N40^\circ$) permet en principe de favoriser l'équilibre annuel des transits dans un sens ou dans l'autre. Il en résulte une efficacité du dispositif liée à l'adaptation du trait de côte relativement « réactive » entre deux épis.
- Les débits de transit engendrés par les tempêtes ponctuelles peuvent potentiellement restés confinés entre deux épis, associés à une avancée ou un recul de trait de côte inférieur à la longueur des épis.

Ces estimations tendent à démontrer la relative efficacité des épis, mêmes courts, à contenir les transits littoraux de matériaux. Celles-ci sont étayées par les observations à courts terme du trait de côte entre les épis. Il s'avère que les zones d'accrétion ou d'érosion sont tantôt à l'Est, tantôt à l'Ouest des épis, même si le transit moyen est orienté vers l'Est dans la zone entre Carras et Magnan.

Lors de notre reconnaissance sur site, l'écart Δy entre l'amont et l'aval des épis était de 5m à 10m, avec une accrétion à l'Est, soit dans le sens contraire au transit moyen. De tels écarts montrent la capacité des alvéoles à faire osciller plusieurs centaines de m^3 de matériaux, en les maintenant confinés entre deux épis. Cela prouve en partie que le contournement des épis par le courant littoral n'altère pas de façon significative leur efficacité.

Cette efficacité permet de retenir environ $1000 m^3$ /an qui, sans les épis, transiteraient vers le centre de la plage, puis seraient probablement transportés vers le large, la zone de convergence étant fortement sollicitée par les tempêtes. Les épis n'évitent pas les pertes dans le profil, de l'ordre de $2600 m^3$ /an entre Carras et Magnan, et d'environ $11900 m^3$ /an entre Magnan et Castel.

3.4 MESURES DES VARIATIONS DU TRAIT DE COTE

Les services de la ville de Nice mesurent régulièrement le trait de côte depuis la référence fixe du mur perré de la Promenade des Anglais. 51 profils ont été régulièrement relevés 66 fois chacun entre 1991 et 2011 (soit 3 à 4 mesures par an pour chaque profil). La zone des épis n°1 à n°13 entre Carras et Magnan est quadrillée par les profils n°2 à n°16. L'épi du Paillon est encadré par les profils n°40 à n°42.

Pour chaque profil positionné dans la zone d'intérêt, il a été reporté dans le tableau ci-après :

- la position moyenne du trait de côte par rapport au mur ;
- les positions les plus reculées et les plus avancées mesurées sur la période 1991-2011 par rapport à la position moyenne ;
- les dates correspondant aux positions les plus reculées ;
- les distances de recul et d'avancée les plus grandes constatées entre 2 mesures consécutives (le recul important est parfois consécutif à une avancée également très importante qui pourrait correspondre à un rechargement local).

Positions et évolutions extrêmes du trait de côte mesurées entre 1991 et 2011

Plage	Profil n°	Position moyenne depuis le mur	Avancée maximale par rapport à la position moyenne	Recul maximal par rapport à la position moyenne	Date du recul maximal par rapport à la position moyenne	Avancée maximale entre 2 mesures	Recul maximal entre 2 mesures
P.OUEST CARRAS	2	33.4m	9.7m	-11.5m	oct.-98	21.2m	-9.9m
P.EST CARRAS	3	38.0m	10.0m	-8.0m	oct.-92	13.6m	-10.0m
P. CARRAS N°267	4	30.6m	11.4m	-7.5m	nov.-99	11.0m	-13.2m
P.AUBRY LECOMTE N°225	5	23.1m	5.9m	-7.1m	nov.-99	9.0m	-9.0m
REGENCE OUEST	6	26.4m	5.6m	-7.0m	avr.-03	8.0m	-9.5m
REGENCE EST	7	25.9m	7.3m	-6.2m	nov.-99	9.0m	-11.5m
P.ST HELENE N°217	8	31.6m	6.2m	-6.0m	janv.-03	7.8m	-6.9m
MIAMI OUEST	9	30.1m	6.9m	-7.1m	janv.-03	9.5m	-8.1m
MIAMI EST	10	25.3m	5.6m	-6.3m	oct.-92	9.5m	-8.1m
P.FABRON N°183	11	23.4m	5.6m	-9.6m	janv.-03	8.0m	-6.8m
BAMBOU OUEST	12	29.6m	7.4m	-6.5m	oct.-96	7.0m	-8.6m
BAMBOU EST	13	30.9m	7.3m	-9.9m	oct.-00	8.6m	-9.0m
P.LENVAL N°133	14	32.8mm	7.2m	-12.8m	janv.-11	10.6m	-16.0m
P.MAGNAN PS	15	31.3m	10.7m	-12.3m	janv.-11	16.0m	-17.0m
P.MAGNAN N° 99	16	22.7m	10.8m	-7.7m	mars-10	14.3m	-17.4m
GALION EST	40	25.5m	15.5m	-6.5m	mars-10	6.2m	-10.5m
P.CENT PAILLON	41	33.5m	12.1m	-10.5m	mars-10	14.0m	-11.9m
B-RIVAGE OUEST	42	33.5m	12.5m	-9.3m	janv.-03	17.7m	-15.0m

Le recul maximal enregistré entre 2 mesures est de l'ordre de 10m (+/-3m), pouvant atteindre 15m à 17m vers Magnan. Les positions les plus reculées sont situées 6m à 10m en arrière de la position moyenne du trait de côte, atteignant 12m vers Magnan ou à l'extrémité Ouest de la baie des Anges. Les reculs maximaux sont logiquement constatés à l'occasion des mesures faites lors des mois d'hiver, entre octobre et mars.

4 LA STABILITE DES EPIS EXISTANTS

4.1 SOLLICITATIONS HYDRODYNAMIQUES

Les épis sont situés en pleine zone de déferlement, le long d'une pente raide favorisant les déferlements plongeants. Les houles de tempête générées au large parviennent jusqu'à la bande littorale en modifiant leurs caractéristiques sous l'influence des fonds et des caps, comme le montrent les plans de vagues reportés en annexe B. A l'approche de la côte, les vagues se cambrent fortement, gonflent puis déferlent parfois directement sur les épis, parfois plus au large où au bord du rivage suivant les différentes hauteurs des trains d'onde irréguliers. Les caractéristiques au déferlement dépendent de la cambrure de la houle, mais aussi de la pente de la plage.

Les estimations de stabilité de l'ouvrage nécessitent de connaître la hauteur significative H_S ^(*) de la houle dans la zone de surf. L'approche énergétique du modèle SWAN ne permet pas d'accéder directement à cette valeur. Il est préférable, pour être au plus prêt de la réalité physique, d'utiliser des caractéristiques au déferlement données par des abaques validés à l'aide de mesures en laboratoire. Nous avons par conséquent adopté la démarche suivante :

1. Evaluation de la hauteur résiduelle incidente vers 5m d'eau devant chaque épi à l'aide du modèle SWAN, en omettant volontairement l'effet de déferlement, mais en intégrant tous les effets de réfraction-diffraction.
2. Calcul de la hauteur au large équivalente H_{S0eq} qui, si elle se propageait dans un canal de laboratoire, conduirait à une houle résiduelle à -5m identique à celle déterminée précédemment.
3. Application des abaques récents de Battjes&Groenendijk [3] pour qualifier les paramètres statistiques de hauteur de houle (H_{m0} , H_S , $H_{1/10}$,...) en fonction de la cambrure, de la pente des fonds et de la profondeur locale. On tient compte de cette façon des caractères non linéaire et irrégulier de la houle abordant le rivage.

La valeur de la hauteur significative H_S a été estimée à l'approche de chaque épi pour des profondeurs décroissantes -4m, -3m, -2m et -1m NGF. On distingue trois occurrences de tempêtes, annuelle, décennale, cinquantennale, associées respectivement aux surcotes +0.6m, +0.7m, +1.0m NGF. La pente de la plage est considérée en moyenne sur une longueur d'onde, ce qui correspond à environ 6%-7% pour les épis n°1 à 6, et 9%-10% pour les épis n°7 à 13.

^(*) La hauteur significative H_S équivaut à $H_{1/3}$, la moyenne du 1/3 des vagues les plus hautes

Le détail des résultats par épi est reporté en annexe A à la fin de ce document. Dans les tableaux ci-après, on présente une synthèse des hauteurs résiduelles significatives en occurrences décennale et cinquantennale, pour deux cotes bathymétriques : -3m NGF et -2m NGF

Hauteur significative H_S résiduelle en pied d'épi après réfraction et déferlement		
Occurrence décennale, surcote +0.7m NGF		
	Cote au pied de l'épi	
	-2m NGF,	-3m NGF
Epi n°1	2.95m	3.50m
Epi n°2	2.80m	3.35m
Epi n°3	2.90m	3.45m
Epi n°4	2.95m	3.50m
Epi n°5	2.95m	3.50m
Epi n°6	2.80m	3.35m
Epi n°7	3.30m	4.10m
Epi n°8	3.35m	4.20m
Epi n°9	3.15m	3.90m
Epi n°10	3.15m	3.90m
Epi n°11	3.30m	4.15m
Epi n°12	3.20m	3.95m
Epi n°13	3.20m	4.00m
Epi n°14	3.15m	3.9m

On montre à l'aide des plans de vagues que les conditions les plus défavorables en termes de houles déferlantes devant les épis apparaissent en cas de tempêtes de Sud à Sud-Sud-Ouest.

A -3m NGF, la houle décennale est limitée à environ $H_S=3.5m$ jusqu'à l'épi n°6, puis à $H_S=4.0m-4.2m$ entre l'épi 7 et l'épi 13. La valeur H_S est réduite de 0.5m à 0.8m à -2m NGF.

Hauteur significative H_S résiduelle en pied d'épi après réfraction et déferlement		
Occurrence cinquantennale, surcote +1.0m NGF		
	Cote au pied de l'épi	
	-2m NGF,	-3m NGF
Epi n°1	3.30m	4.00m
Epi n°2	3.15m	3.75m
Epi n°3	3.30m	3.90m
Epi n°4	3.30m	4.00m
Epi n°5	3.30m	4.00m
Epi n°6	3.15m	3.70m
Epi n°7	3.70m	4.65m
Epi n°8	3.75m	4.70m
Epi n°9	3.55m	4.40m
Epi n°10	3.55m	4.40m
Epi n°11	3.70m	4.60m
Epi n°12	3.55m	4.40m
Epi n°13	3.60m	4.50m
Epi n°14	3.55m	4.40m

A -3m NGF, la houle cinquantennale est limitée à environ $H_S=4.0m$ jusqu'à l'épi n°6, puis à $H_S=4.5m-4.7m$ entre l'épi 7 et l'épi 13. La valeur H_S est réduite de 0.6m à 0.9m à -2m NGF.

4.2 STABILITE THEORIQUE DES ENROCHEMENTS

La stabilité théorique des enrochements est classiquement évaluée à l'aide de la formule éprouvée d'Hudson, qui s'exprime comme suit :

Avec :

: masse moyenne des blocs ;

: masse volumique des enrochements= 2650 kg/m^3 ;

H : hauteur de la houle = H_S au déferlement ;

ρ_E : masse volumique de l'eau de mer ;

— ;

: pente du talus (rapport H/V horizontale / verticale).

Le paramètre est le coefficient de stabilité à associer aux formes et aux taux d'enchevêtrement des blocs. Nous l'avons fixé à 2.8, ce qui correspond à des roches angulaires formant un musoir soumis à des houles déferlantes.

Les poids théoriques P des blocs sont donnés dans le tableau-ci-dessous en fonction de la hauteur de houle H_S déferlant au pied de l'ouvrage. Nous avons également identifié la profondeur en pied d'épi pour laquelle chaque valeur H_S est la valeur limite au déferlement dans les conditions de tempêtes décennales. On distingue 2 groupes d'épis, les épis n°1 à n°6, et les épis n°7 à n°13.

Formule d'Hudson, $\cot(\alpha)=3/2$, $K_D=2.8$			
Hauteur H_S au déferlement	Poids théorique des blocs d'enrochements	Cote bathymétrique où H_S est atteint en occurrence décennale (surcote+0.7m NGF, hauteur locale la plus défavorable)	
		Epis n°1 à 6	Epis n°7 à 13
$H_S=1.0m$	P=0.2t		
$H_S=1.5m$	P=0.5t		
$H_S=2.0m$	P=1.3t		
$H_S=2.5m$	P=2.5t	-1.5m NGF	-1.2m NGF
$H_S=3.0m$	P=4.4t	-2.0m NGF	-1.7m NGF
$H_S=3.3m$	P=5.8t	-2.6m NGF	-2.0m NGF
$H_S=3.5m$	P=7.0t	-3.0m NGF	-2.2m NGF
$H_S=4.0m$	P=10.4t	-4.0m NGF	-2.8m NGF
$H_S=4.2m$	P=12.0t		-3.0m NGF
$H_S=4.4m$	P=13.8t		
$H_S=4.6m$	P=15.8t		

L'analyse des valeurs regroupées dans ce tableau permet d'extraire les enseignements suivants :

- Des blocs 3/5 tonnes sont tout juste stables pour $H_S = 3.0m$, ce qui est proche des conditions annuelles vers la cote -3m NGF. Cette hauteur ne serait pas dépassée en condition décennale (en réalité limitée au déferlement), à condition que le pied de l'ouvrage se situe plus haut que la cote -2.0m NGF pour les épis n°1 à 6, et plus haut que la cote -1.7m NGF pour les épis n°7 à 13. Ce n'est pas le cas des épis qui ont été sécurisés avec leur propres blocs, lesquels ont un pied qui atteint parfois la cote -4m NGF et sont donc vulnérables face aux houles d'occurrence supérieures à 1 an.
- Des blocs 10/12 tonnes seraient stables pour $H_S=4.0m$. Cette hauteur n'est pas dépassée en occurrence décennale même en grande profondeur devant les épis n°1 à n°6. Le seuil $H_S=4m$ n'est pas dépassé en occurrence cinquantennale à la cote bathymétrique -3m NGF.
- Devant les épis n°7 à n°13, la valeur $H_S=4.0m$ est tout juste dépassée vers -3m NGF en occurrence décennale, ce qui autorise des blocs 10/12t face aux tempêtes de cette occurrence. En occurrence cinquantennale, vers -3m NGF, la valeur H_S atteindrait environ 4.6m devant les épis n°7 à n°13, ce qui exigerait de très gros blocs, supérieurs à 15 tonnes, pour maintenir un ouvrage sans dommage. Reconstituer les épis n°7 à n°13 avec des blocs 10/12t, dont la taille est réaliste au regard des approvisionnements possibles, n'entraînerait toutefois pas la ruine de l'ouvrage face à une tempête cinquantennale. L'application de la formule d'Hudson avec une valeur $K_D=3.9$ ($=2.8 \times 1.4$) au lieu de $K_D=2.8$ tendrait à démontrer

que les conditions cinquantennales ($H_S=4.6\text{m}$ pour un niveau d'eau 1.0m NGF) engendreraient environ 10% de dommages.

L'approche théorique indique que les petits blocs existants 3/5 tonnes ne sont pas stables face aux tempêtes de périodes de retour supérieures à un an. Cela est effectivement observé sur le terrain. Des blocs 10/12 tonnes à 3/2 devraient en principe convenir, à condition toutefois de respecter les deux conditions suivantes :

- ne pas dépasser la profondeur -3m NGF en pied d'ouvrage, surtout pour les épis n°7 à n°13 ;
- maîtriser la stabilité de l'ouvrage au pied, même lorsque le terrain est affouillé localement, c'est-à-dire réaliser un socle de fondation ensouillé dans le terrain naturel.

4.3 NIVEAUX D'AFFOUILLEMENTS POTENTIELS

On distingue deux types de changements significatifs de profondeurs dans la zone des épis :

1. Les affouillements potentiels locaux, à la suite de vagues plongeantes au pied par exemple.
2. Les reculs ou avancées du trait de côte dans l'alvéole, s'accompagnant de modifications des profils dans la zone littorale.

4.3.1 Les affouillements locaux

Le risque d'affouillement local à court terme existe en cas de tempête significative. Il existe de nombreux paramètres physiques qui régissent ce phénomène très complexe : caractéristiques des houles déferlantes, réflexion de l'ouvrage, profondeurs en pied, caractéristiques des matériaux. La littérature (Cf.[1]) fait part de formulations simplifiées ; applicables au pied de murs verticaux. La profondeur d'affouillement serait estimée par la formulation suivante :

$$\frac{h}{L} = \frac{1}{10} \left(\frac{H_S}{h} \right)^2$$

avec :

- h : hauteur d'eau au pied de l'ouvrage ;
- L : longueur d'onde au large correspondant à la période pic T_P .

Au pied d'un épi, cette formulation est en principe très pessimiste. On applique le principe reconnu selon lequel un affouillement au pied d'un mur réfléchissant serait environ 2 fois plus élevés qu'un affouillement à l'approche d'une plage absorbante. Pour tenir compte de la réflexion partielle de l'épi, on corrige la valeur au pied d'un mur de la façon suivante :

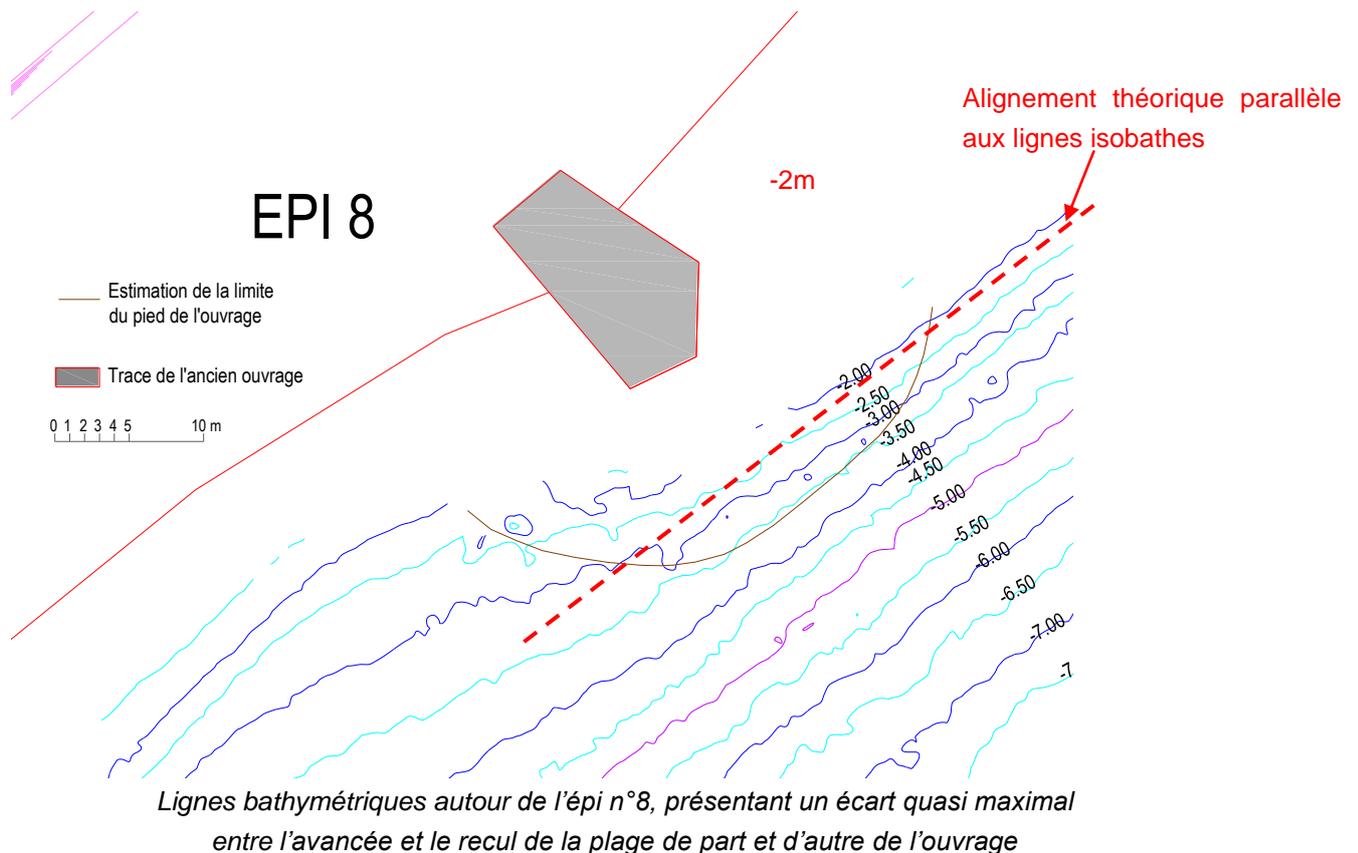
Estimation des affouillements tels que $(H_{m0})_0 = 4.0m$, $T_p=10.0s$		
Hauteur d'eau au pied	Estimation de la profondeur d'affouillement devant un mur	Estimation de la profondeur d'affouillement au pied de l'épi
$h=3.7m$		
$h=2.7m$		
$h=1.7m$		

4.3.2 Les avancées et reculs du profil

La pente moyenne entre -1m et -5m est de l'ordre de 13% à 15%. Un recul considéré élevé de 10m par rapport à la position moyenne entraînerait un creusement de $10 \times 0.15 = 1.5m$ si le profil de plage restait le même de part et d'autre de l'épi. Lors de notre visite sur site, nous avons eu la chance d'observer un linéaire de plage très déséquilibré au sein de plusieurs alvéoles, avec un engraissement atteignant pratiquement l'extrémité de l'épi côté Est, et l'érosion associée côté Ouest. Par exemple, l'écart entre le trait de côte de part et d'autres de l'épi n°8 dépassait 15m. Les mesures réalisées au mois de mars 2012 faisaient suite à un hiver agrémenté de nombreuses tempêtes. On remarque en analysant les positions des lignes bathymétriques au pied de cet épi que (Cf. figure ci-après) :

- les mouvements de fond au-delà de l'isobathe -3m à -3.5m sont très faibles, ce qui confirme les notions théoriques évoquées précédemment sur l'emprise de la zone de surf ;
- un pied d'ouvrage situé initialement entre -2m et -2.5m atteindrait -2m côté engraissement (à l'Est-ce jour-là), et -3m côté érosion ;

Un affouillement attendu de l'ordre de 1m dû au recul du trait de côte serait une valeur réaliste pour un pied d'ouvrage situé vers -2m NGF dans le profil moyen équilibré. L'affouillement serait en principe moins élevé pour un pied situé initialement à -3m NGF.



4.4 SYNTHÈSE SUR LA TENUE DES BLOCS EXISTANTS

Les considérations théoriques associées aux observations sur site conduisent aux conclusions suivantes :

- Les blocs 3/5t ne sont pas stables face aux houles de périodes de retour supérieures à 1 an.
- Pour les épis n°1 à n°6 :
Des blocs 10/12t conviennent pour résister aux houles de tempêtes décennales, voire cinquantennales, même si le pied des épis est fondé sous la cote -3m NGF. Cependant, même pour des blocs réputés très stables, il faut s'attendre à une perte de matériaux au niveau du pied de talus, qui provoque leur glissement. Le niveau d'affouillement attendu est de l'ordre de 2.3m vers la cote de terrain naturel -3m NGF en occurrence décennale.
- Pour les épis n°7 à n°13 :
Des blocs 10/12t conviennent pour résister aux houles de tempêtes décennales, avec moins de 10% de dommage en occurrence cinquantennale, à condition que le pied soit fondé au-dessus de -3m NGF. Des affouillements locaux de l'ordre de 2.3m sont possibles sous cette cote.
- Pour tous les épis, le glissement des blocs 10/12t est très probable s'ils ne sont pas eux-mêmes fondés sur une couche d'enrochements ensouillés.

5 FICHES DIAGNOSTICS

Les fiches diagnostics décrivant chaque épi sont regroupées en annexe C, jointe à ce document.

6 LES SOLUTIONS DE CONFORTEMENT

6.1 VARIANTES DE SOLUTIONS

Dans le cadre d'une réfection à base d'enrochements, seuls les enrochements 10/12t sont appropriés pour constituer la carapace capable de résister aux houles décennales, sans être entièrement mis en péril pour les houles d'occurrences plus rares, telles que la houle cinquantennale.

Dans la zone des épis n°7 à n°13, le pied de l'ouvrage doit être situé au-dessus de -3m NGF, de manière à limiter les hauteurs de houle décennales au déferlement. Nous préconisons de le placer à -2m NGF par rapport à la configuration moyenne de la bathymétrie pour tenir compte des variations de profil lors des tempêtes.

Dans la zone des épis n°1 à n°6, il n'y a pas de limite de profondeur pour résister aux houles d'occurrence décennale. La limite -3m NGF est recommandée pour limiter les hauteurs de houles cinquantennales. Le pied pourra être situé à la profondeur -3m NGF.

Ces profondeurs restent suffisantes pour permettre un fonctionnement efficace de l'épi face aux transits sédimentaires parallèles à la plage.

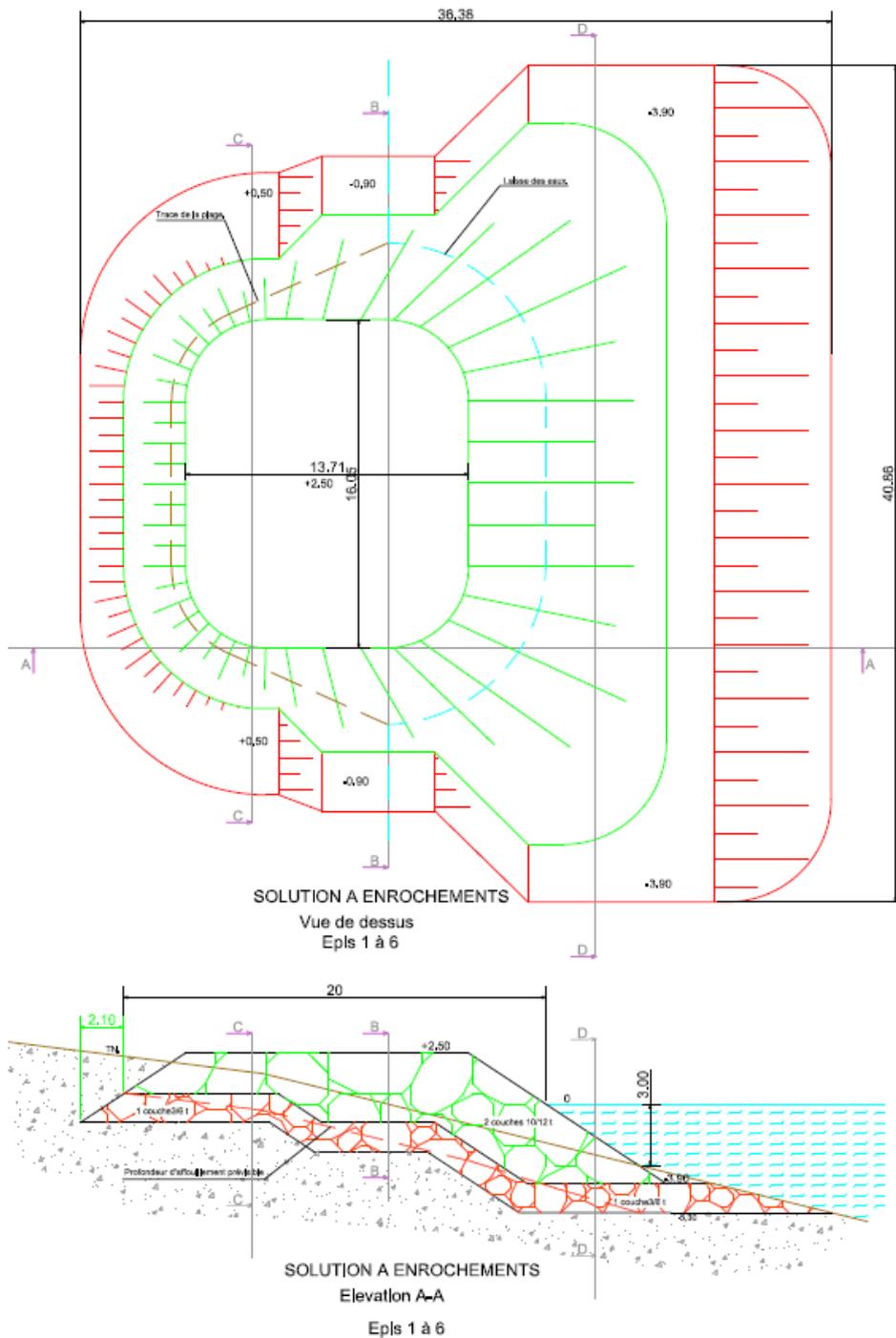
Dans tous les cas, une profondeur d'affouillement locale doit être anticipée au pied. Il importe d'éviter le glissement des enrochements à la suite d'un creusement du terrain naturel.

Deux solutions sont appropriées dans le contexte des épis de Nice :

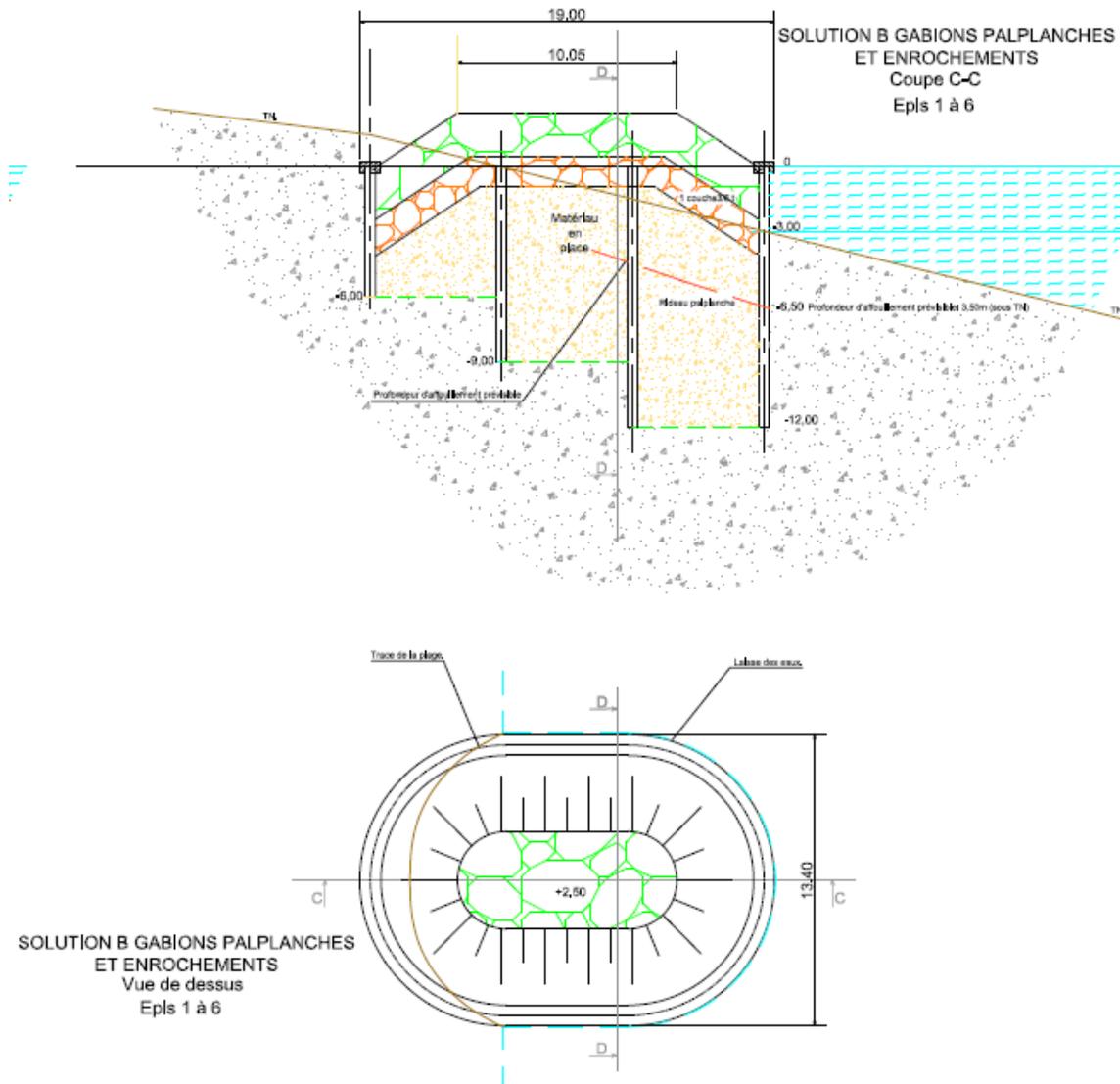
1. fonder le pied de l'ouvrage sur des enrochements après avoir creusé une bêche de l'ordre de 1.8m à 2.3m de profondeur sous le terrain naturel ;
2. ficher des palplanches dans le sol suffisamment profondément pour pallier les affouillements (de l'ordre de 3m à 3.5m dans ce cas) et former une enceinte autour de l'épi.

Sur ces bases, nous proposons trois variantes de réfection, dont les plans sont détaillés dans le cahier joint à ce document, en distinguant les configurations entre épis n°1 à n°6, ou entre épis n°7 à n°13 (cette dernière incluant aussi celle du Paillon). Les caractéristiques essentielles des variantes sont esquissées ci-après :

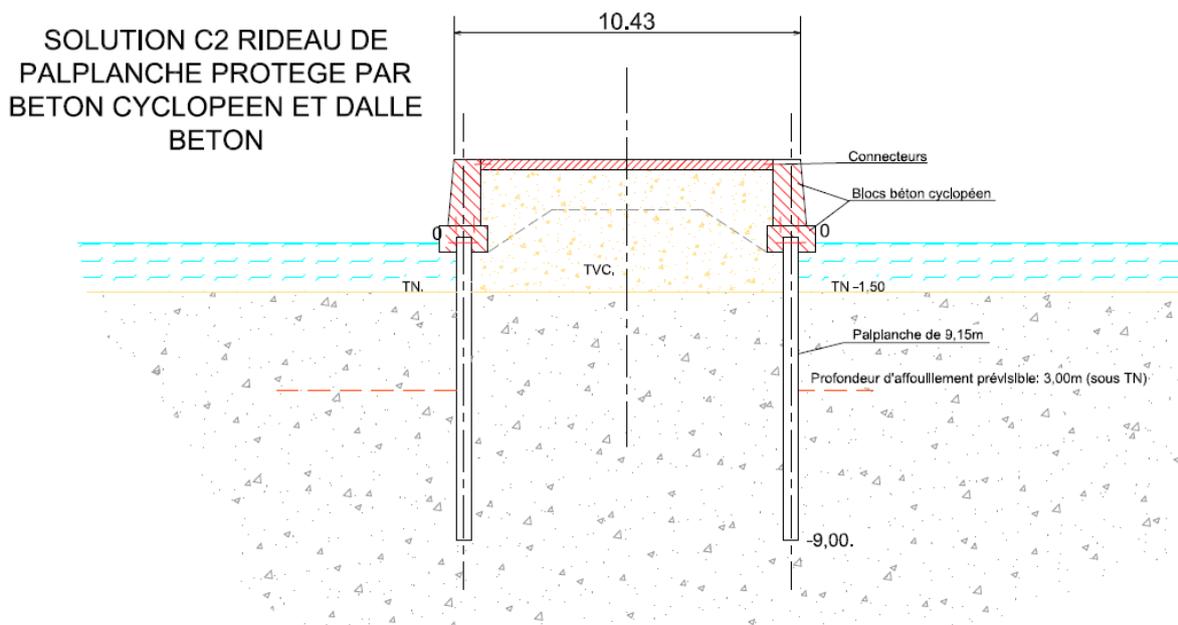
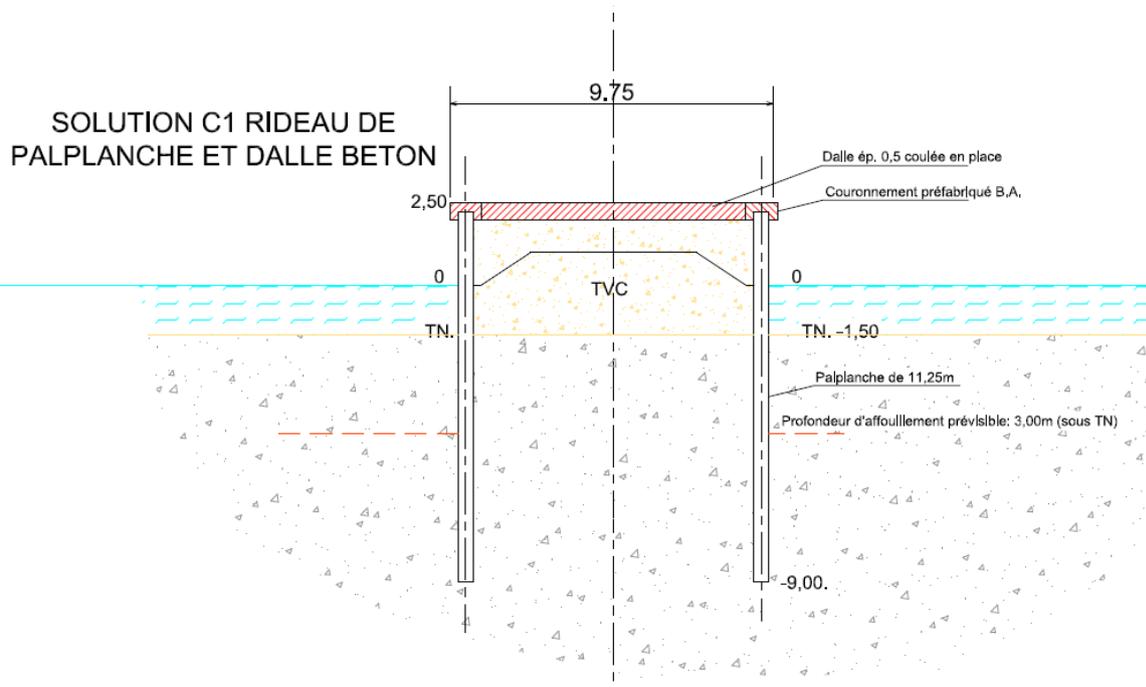
- A. Une reconstitution des épis avec uniquement des enrochements, associés à une bêche anti-affoulement au pied. Une option intégrant un solarium dans l'axe de l'épi est proposée (Cf. cahier de plans).



- B. Une enceinte en palplanches, arasée à la cote 0 CM, formant une série de gabions remplis d'enrochements. De gros enrochements 10/12t seraient visibles en partie supérieure. Cela permet de préserver l'esthétique de l'épi, tout en bénéficiant de la sécurité des palplanches en partie basse.



- C. Une enceinte en palplanches remplie de tout-venant, avec une dalle béton en partie supérieure (variante C-1). Une variante C-2, avec des palplanches arasées sous le niveau 0, coiffées de blocs béton sur les bords apporte une amélioration esthétique. Les blocs latéraux sont des blocs poids non armés, évitant une mise à nue des aciers par l'attaque des galets. Il peut s'agir de blocs de béton cyclopeen (avec mélange de petits enrochements). Une alternative est possible avec un relief dans le coffrage du béton pour représenter un motif à caractère esthétique, comme une succession de galets par exemple.



Structures-pierre et -rocher



2/121 Cheyenne 1-5



2/122 Yukon



2/156 Steinwald



2/157 Fichtelberg



2/166 Cilento



2/159 Lugano



2/123 Tennessee



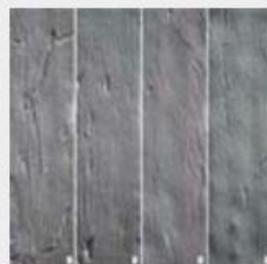
2/158 Bavaria



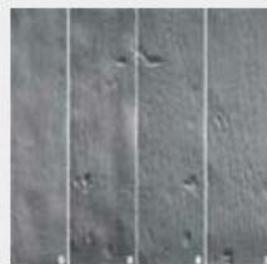
1/352 Embrun



2/136 Bretagne



2/145 Schiefer 1-4



2/145 Schiefer 5-8



2/142 Tessin



2/41 Mosel



2/170 Romanche



2/173 Santa Cruz

Exemples de matrices de coffrage

6.2 ESTIMATIONS DES COUTS

6.2.1 Estimation prévisionnelle des travaux pour un épi n°1 à n°6

ESTIMATION PREVISIONNELLE DES TRAVAUX POUR UN EPIN° 1 à 6				
SOLUTION A : EPIS EN ENROCHEMENTS				
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉ	PRIX UNITAIRE EN EUROS	MONTANT EN EUROS HT
Souille	m ³	2400	25.00	60 000.00
Mise en place d'enrochements 3 / 6 T de réemploi (y.c tri)	T	2850	30.00	85 500.00
Fourniture et mise en place d'enrochements 10 / 12 T	T	2650	80.00	212 000.00
Sous-total Solution A				357 500.00
Incidence Amené / repli du matériel et installation de chantier (5%)				18 000.00
Incidence Aléas techniques (10%)				36 000.00
MONTANT TOTAL Solution A HT				411 500.00 €
Plus value pour un solarium 10mx5m en béton				
				60 000.00 €
SOLUTION B : GABIONS PALPLANCHES ET ENROCHEMENTS				
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉ	PRIX UNITAIRE EN EUROS	MONTANT EN EUROS HT
Rideau de Palplanches pour gabions	T	117	3 000.00	351 000.00
Couronnement BA	m ³	31	1 500.00	46 500.00
Mise en place d'enrochements 3 / 6 T de réemploi (y.c tri)	T	685	30.00	20 550.00
Fourniture et mise en place d'enrochements 10 / 12 T	T	950	80.00	76 000.00
Souille	m ³	305	25.00	7 625.00
Sous-total Solution B				501 675.00
				ARRONDI A 502 000.00
Incidence Amené / repli du matériel et installation de chantier (5%)				25 000.00
Incidence Aléas techniques (10%)				50 000.00
MONTANT TOTAL Solution B HT				577 000.00 €

SOLUTION C1 : GABIONS PALPLANCHES ET DALLE BETON				
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉ	PRIX UNITAIRE EN EUROS	MONTANT EN EUROS HT
Rideau de Palplanches	T	91.00	3 000.00	273 000.00
Remplissage piste et TVC	T	930	35.00	32 550.00
Dalle BA	m ³	93	800.00	74 400.00
Sous-total Solution C1				379 950.00
				ARRONDI A 380 000.00
Incidence Amené / repli du matériel et installation de chantier (5%)				19 000.00
Incidence Aléas techniques (10%)				38 000.00
MONTANT TOTAL Solution C1 HT				437 000.00 €
SOLUTION C2 : GABIONS PALPLANCHES, DALLE BETON ET PROTECTION EN BETON CYCLOPEEN				
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉ	PRIX UNITAIRE EN EUROS	MONTANT EN EUROS HT
Rideau de Palplanches	T	74.00	3 000.00	222 000.00
Remplissage piste et TVC	T	930	35.00	32 550.00
Mur Cyclopéen	m ³	184	800.00	147 200.00
Dalle BA	m ³	42	800.00	33 600.00
Sous-total Solution C2				435 350.00
				ARRONDI A 436 000.00
Incidence Amené / repli du matériel et installation de chantier (5%)				22 000.00
Incidence Aléas techniques (10%)				43 500.00
MONTANT TOTAL Solution C2 HT				501 500.00 €

6.2.2 Estimation prévisionnelle des travaux pour un épi n°7 à n°13

ESTIMATION PREVISIONNELLE DES TRAVAUX POUR UN EPI N° 7 à 13				
SOLUTION A : EPIS EN ENROCHEMENTS				
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉ	PRIX UNITAIRE EN EUROS	MONTANT EN EUROS HT
Souille	m ³	2200	25.00	55 000.00
Mise en place d'enrochements 3 / 6 T de réemploi (y.c tri)	T	2520	30.00	75 600.00
Fourniture et mise en place d'enrochements 10 / 12 T	T	2275	80.00	182 000.00
Sous-total Solution A				312 600.00
				ARRONDI A 313 000.00
Incidence Amené / repli du matériel et installation de chantier				18 000.00
Incidence Aléas techniques (10%)				31 000.00
MONTANT TOTAL Solution A HT				362 000.00 €
SOLUTION B : GABIONS PALPLANCHES ET ENROCHEMENTS				
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉ	PRIX UNITAIRE EN EUROS	MONTANT EN EUROS HT
Rideau de Palplanches pour gabions	T	82	3 000.00	246 000.00
Couronnement BA	m ³	27	1 500.00	40 500.00
Mise en place d'enrochements 3 / 6 T de réemploi (y.c tri)	T	540	30.00	16 200.00
Fourniture et mise en place d'enrochements 10 / 12 T	T	750	80.00	60 000.00
Souille	m ³	265	25.00	6 625.00
Sous-total Solution B				369 325.00
				ARRONDI A 370 000.00
Incidence Amené / repli du matériel et installation de chantier				25 000.00
Incidence Aléas techniques (10%)				37 000.00
MONTANT TOTAL Solution B HT				432 000.00 €

SOLUTION C1 : GABIONS PALPLANCHES ET DALLE BETON				
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉ	PRIX UNITAIRE EN EUROS	MONTANT EN EUROS HT
Rideau de Palplanches	T	85.00	3 000.00	255 000.00
Remplissage piste et TVC	T	730	35.00	25 550.00
Dalle BA	m ³	73	800.00	58 400.00
Sous-total Solution C1				338 950.00
				ARRONDI A 339 000.00
Incidence Amené / repli du matériel et installation de chantier				19 000.00
Incidence Aléas techniques (10%)				34 000.00
MONTANT TOTAL Solution C1 HT				392 000.00 €
SOLUTION C2 : GABIONS PALPLANCHES, DALLE BETON ET PROTECTION EN BETON CYCLOPEEN				
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉ	PRIX UNITAIRE EN EUROS	MONTANT EN EUROS HT
Rideau de Palplanches	T	71.00	3 000.00	213 000.00
Remplissage piste et TVC	T	730	35.00	25 550.00
Mur Cyclopéen	m ³	160	800.00	128 000.00
Dalle BA	m ³	36	800.00	28 800.00
Sous-total Solution C2				395 350.00
				ARRONDI A 400 000.00
Incidence Amené / repli du matériel et installation de chantier				22 000.00
Incidence Aléas techniques (10%)				40 000.00
MONTANT TOTAL Solution C2 HT				462 000.00 €

6.3 IMPLANTATION SUR SITE

Les schémas d'implantation sur site accompagnent les fiches diagnostic en annexe C. Les solutions proposées sont fondées sur les variantes en enrochements qui sont les moins coûteuses en termes de travaux. Du point de vue strictement technique, si la variante en enrochements est appropriée pour les épis n°1 à n°6, les variantes en palplanches (B ou C) sont intéressantes pour les épis n°7 à n°13, car elles sont moins fragiles face à l'aléa de variations des fonds dans cette zone.

Cette remarque est valable également pour l'épi du paillon, pour lequel nous préconisons une variante en palplanches de type C1 compatible avec :

- le besoin de continuer le quai droit existant à l'embouchure du paillon ;
- le prolongement des dalles en béton existantes à l'enracinement de l'épi actuel, qui sont utilisées comme solarium par les usagers ;

La variante B avec palplanches, mais sans dalle béton serait également appropriée.

7 CONCLUSION

L'étude de faisabilité de réhabilitation des épis de la plage de Nice peut être synthétisée de la façon suivante.

Fonctionnement

Les épis n'empêchent pas la fuite de matériaux vers le large occasionnée par les tempêtes successives. La perte annuelle est de l'ordre de 14500 m³/an sur la globalité de la baie. Elle est moindre dans la zone des épis, de l'ordre de 2600 m³/an, essentiellement par effet de configuration de baie, protégée des houles de sud-ouest sur cette zone. On démontre par les approches théoriques et les observations, que même s'ils sont courts, les épis sont efficaces pour bloquer la majeure partie des transits de matériaux dans le sens parallèle à la plage. Cela permet de sauvegarder environ 1000 m³/an de matériaux et d'éviter des variations du trait de côte significatives d'un coup de mer à l'autre. L'espacement de 80m entre épis est approprié au regard du fonctionnement hydro-sédimentaire d'épis courts. Un écartement plus important serait envisageable, mais pour ne pas altérer fondamentalement le fonctionnement, il ne devrait pas excéder le double de l'écartement actuel. Un enlèvement temporaire de quelques épis est prévu. Cela ne met pas directement en danger la plage, même si cela occasionne une dégradation, que l'on pourra contrôler, notamment en vérifiant que les épis ne sont pas souvent contournés côté large ou mis à nu au niveau de leur enracinement.

Stabilité - pérennité

Il est démontré théoriquement que les blocs 3/5t d'origine ne sont pas stables face aux tempêtes de périodes de retour supérieures à un an. Les blocs 10/12t acheminés depuis les carrières environnantes ces dernières années pour reconstituer entièrement certains épis sont par contre appropriés pour résister aux tempêtes décennales, sans être mis en péril face aux conditions cinquantennales. Ils doivent être posés suivant une pente 3/2, avec une profondeur limitée à -3m NGF pour les épis N°1 à n°6 et -2m NGF pour les épis n°7 à n°13. Il est aussi impératif que ces blocs soient fondés sur une couche en enrochements ensouillée dans le terrain naturel, de manière à éviter leur effondrement en cas d'affouillements locaux très probables des fonds meubles. Le réemploi des blocs 3/5tonnes est approprié pour réaliser cette couche de fondation.

Des variantes à base de palplanches sont aussi appropriées. Elles sont techniquement recommandées pour les épis n°7 à n°13, car, même si on attend des affouillements locaux plus importants au pied de palplanches qu'au pied des enrochements, leur conception est moins fragile face aux variations de profils bathymétriques. Les palplanches sont aussi adéquates pour reformer l'épi du paillon dans la continuité de l'enracinement existant.

Coûts

Le coût d'un épi en enrochements est de l'ordre de 350k€ à 400k€ suivant son niveau de fondation. La variante en palplanches avec une simple dalle de couronnement est environ 30k€ plus chère. Les variantes en palplanches avec aménagement esthétique du couronnement atteignent 430k€ à 460k€ dans la zone des épis n°7 à n°13.

8 REFERENCES

[1] Guide enrochement. L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques. Version française du Rock Manual, CIRIA, CUR, CETMEF.

[2] Coastal Engineering Manual, Part VI, Fundamental of design, Hans F. Burcharth and Steven A. Hughes

[3] Battjes et Groenendijk, "Wave height distributions on shallow foreshores", coastal engineering Vol 40, n°3, pp 161-182

ANNEXE A

Caractéristiques des houles déferlantes au pied des épis

Epi n°1			
Période de retour	1 an	10 ans	50 ans
H _{m0} à 5m d'eau (sans déferlement)	2.7m	3.9m	5.1m
Période et provenance associées	7.5s, N160	10s, N160	11.4s, N160
Surcote	0.6m NGF	0.7m NGF	1.0m NGF
H _S à -4m NGF	-	3.95m	4.45m
H _S à -3m NGF	3.15m	3.50m	4.00m
H _S à -2m NGF	2.75m	2.95m	3.30m
H _S à -1m NGF	2.05m	2.10m	2.45m

Epi n°2			
Période de retour	1 an	10 ans	50 ans
H _{m0} à 5m d'eau (sans déferlement)	2.4m	3.4m	4.4m
Période et provenance associées	7.5s, N160	10s, N160	11.4s, N160
Surcote	0.6m NGF	0.7m NGF	1.0m NGF
H _S à -4m NGF	-	3.70m	4.15m
H _S à -3m NGF	-	3.35m	3.75m
H _S à -2m NGF	2.55m	2.80m	3.15m
H _S à -1m NGF	1.95m	2.00m	2.30m

Epi n°3			
Période de retour	1 an	10 ans	50 ans
H _{m0} à 5m d'eau (sans déferlement)	2.6m	3.7m	4.8m
Période et provenance associées	7.5s, N160	10s, N160	11.4s, N160
Surcote	0.6m NGF	0.7m NGF	1.0m NGF
H _S à -4m NGF	-	3.90m	4.35m
H _S à -3m NGF	3.05m	3.45m	3.90m
H _S à -2m NGF	2.65m	2.90m	3.30m
H _S à -1m NGF	2.00m	2.05m	2.40m

Epi n°4			
Période de retour	1 an	10 ans	50 ans
H_{m0} à 5m d'eau (sans déferlement)	2.7m	3.9m	5.1m
Période et provenance associées	7.5s, N160	10s, N160	11.4s, N160
Surcote	0.6m NGF	0.7m NGF	1.0m NGF
H_S à -4m NGF	-	3.95m	4.45m
H_S à -3m NGF	3.15m	3.50m	4.00m
H_S à -2m NGF	2.75m	2.95m	3.30m
H_S à -1m NGF	2.05m	2.10m	2.45m

Epi n°5			
Période de retour	1 an	10 ans	50 ans
H_{m0} à 5m d'eau (sans déferlement)	2.7m	3.9m	5.1m
Période et provenance associées	7.5s, N160	10s, N160	11.4s, N160
Surcote	0.6m NGF	0.7m NGF	1.0m NGF
H_S à -4m NGF	-	3.95m	4.45m
H_S à -3m NGF	3.15m	3.50m	4.00m
H_S à -2m NGF	2.75m	2.95m	3.30m
H_S à -1m NGF	2.05m	2.10m	2.45m

Epi n°6			
Période de retour	1 an	10 ans	50 ans
H_{m0} à 5m d'eau (sans déferlement)	2.5m	3.4m	4.3m
Période et provenance associées	7.5s, N160	10s, N160	11.4s, N160
Surcote	0.6m NGF	0.7m NGF	1.0m NGF
H_S à -4m NGF	-	3.70m	4.10m
H_S à -3m NGF	3.05m	3.35m	3.70m
H_S à -2m NGF	2.60m	2.80m	3.15m
H_S à -1m NGF	1.95m	2.00m	2.30m

Epi n°7			
Période de retour	1 an	10 ans	50 ans
H _{m0} à 5m d'eau (sans déferlement)	2.9m	4.4m	5.9m
Période et provenance associées	7.5s, N160	10s, N160	11.4s, N160
Surcote	0.6m NGF	0.7m NGF	1.0m NGF
H _S à -4m NGF	-	4.60m	5.30m
H _S à -3m NGF	3.50m	4.10m	4.65m
H _S à -2m NGF	3.05m	3.30m	3.70m
H _S à -1m NGF	2.10m	2.25m	2.60m

Epi n°8			
Période de retour	1 an	10 ans	50 ans
H _{m0} à 5m d'eau (sans déferlement)	3.1m	4.6m	6.1m
Période et provenance associées	7.5s, N160	10s, N160	11.4s, N160
Surcote	0.6m NGF	0.7m NGF	1.0m NGF
H _S à -4m NGF	-	4.70m	5.40m
H _S à -3m NGF	3.70m	4.20m	4.70m
H _S à -2m NGF	3.20m	3.35m	3.75m
H _S à -1m NGF	2.20m	2.30m	2.65m

Epi n°9			
Période de retour	1 an	10 ans	50 ans
H _{m0} à 5m d'eau (sans déferlement)	2.7m	3.9m	5.1m
Période et provenance associées	7.5s, N160	10s, N160	11.4s, N160
Surcote	0.6m NGF	0.7m NGF	1.0m NGF
H _S à -4m NGF	-	4.30m	5.00m
H _S à -3m NGF	3.25m	3.90m	4.40m
H _S à -2m NGF	3.00m	3.15m	3.55m
H _S à -1m NGF	2.05m	2.15m	2.50m

Epi n°10			
Période de retour	1 an	10 ans	50 ans
H _{m0} à 5m d'eau (sans déferlement)	2.7m	3.9m	5.1m
Période et provenance associées	7.5s, N160	10s, N160	11.4s, N160
Surcote	0.6m NGF	0.7m NGF	1.0m NGF
H _S à -4m NGF	-	4.30m	5.00m
H _S à -3m NGF	3.25m	3.90m	4.40m
H _S à -2m NGF	2.90m	3.15m	3.55m
H _S à -1m NGF	2.05m	2.15m	2.50m

Epi n°11			
Période de retour	1 an	10 ans	50 ans
H _{m0} à 5m d'eau (sans déferlement)	2.9m	4.5m	5.8m
Période et provenance associées	7.5s, N160	10s, N160	11.4s, N160
Surcote	0.6m NGF	0.7m NGF	1.0m NGF
H _S à -4m NGF	-	4.65m	5.30m
H _S à -3m NGF	3.50m	4.15m	4.60m
H _S à -2m NGF	3.05m	3.30m	3.70m
H _S à -1m NGF	2.10m	2.25m	2.60m

Epi n°12			
Période de retour	1 an	10 ans	50 ans
H _{m0} à 5m d'eau (sans déferlement)	2.7m	4.0m	5.1m
Période et provenance associées	7.5s, N160	10s, N160	11.4s, N160
Surcote	0.6m NGF	0.7m NGF	1.0m NGF
H _S à -4m NGF	-	4.40m	5.00m
H _S à -3m NGF	3.25m	3.95m	4.40m
H _S à -2m NGF	2.90m	3.20m	3.55m
H _S à -1m NGF	2.05m	2.15m	2.50m

Epi n°13			
Période de retour	1 an	10 ans	50 ans
H _{m0} à 5m d'eau (sans déferlement)	2.8m	4.1m	5.3m
Période et provenance associées	7.5s, N160	10s, N160	11.4s, N160
Surcote	0.6m NGF	0.7m NGF	1.0m NGF
H _S à -4m NGF	-	4.40m	5.05m
H _S à -3m NGF	3.40m	4.00m	4.50m
H _S à -2m NGF	2.95m	3.20m	3.60m
H _S à -1m NGF	2.10m	2.15m	2.50m

Epi n°14 (Paillon)			
Période de retour	1 an	10 ans	50 ans
H _{m0} à 5m d'eau (sans déferlement)	2.7m	3.9m	5.1m
Période et provenance associées	7.5s, N160	10s, N160	11.4s, N160
Surcote	0.6m NGF	0.7m NGF	1.0m NGF
H _S à -4m NGF	-	4.3m	5.00m
H _S à -3m NGF	3.25m	3.9m	4.40m
H _S à -2m NGF	2.90m	3.15m	3.55m
H _S à -1m NGF	2.05m	2.15m	2.50m