

**Etude de faisabilité de la protection
de Port-Grimaud contre
l'agitation et l'ensablement**

Rapport d'étude

**Commune de Grimaud
Hôtel de Ville
83316 Grimaud Cedex**

**Tél. : +33.(0)4 94 56 29 88 – Fax. : +33.(0)4 94 56 29 88
Site internet : www.portdegrimaud.fr**

Dr Jean BOUGIS CONSULTANT SCIENTIFIQUE 32-34 Chemin du Moulin 06650 OPIO Tél. 04.93.77.74.22 et 06.07.30.70.38 Fax. 04.93.77.74.25	Auteur Date Affaire Document Fichier	J. Bougis 08-08-22 C.22.964 RET.22.964.02.02 Port-Grimaud_Ensablement_RET22964.02.02.doc
e-mail : jean.bougis@wanadoo.fr	Internet : sci-ingenierie.com – j.bougis@scs-ingenierie.com	

Classification	
Non Classifié	X
Diffusion Restreinte	
Confidentiel Défense	
Confidentiel Industrie	

Identification	
Numéro du Projet	C.22.964
Numéro du Document	RET.22.964.02.02 Erreur ! Aucun nom n'a été donné au signet.
Numéro du Marché	-
Date du Marché	-

Cabinet Conseil Jean Bougis, 32-34 Chemin du Moulin 06650 Opio – 04.93.77.74.22
Etude de faisabilité de la protection de Port-Grimaud contre l'agitation et l'ensablement Rapport d'étude

Client :	Régie de Port-Grimaud		
Représenté par :	Directeur		
Nom :		M. Michel Cavailles	
Tél. :	+33.(0) 4.94.56.29.88		
Fax :	+33.(0) 4.94.56.29.88		
GSM :		+33.(0) 6.03.15.73.93	
Courriel :		m.cavailles@portcamarque.com	

Préparé par	Jean Bougis	Diffusion Port-Grimaud : M. Michel Cavailles
	Vérifié par	
	Approuvé par	

Mises à jour			
Référence	Date	Nom	Objet
22.964.02.01	11-07-22	J. Bougis	Première émission
22.964.02.02	08-08-22	J. Bougis	Aspects liés à l'agitation

--	--	--	--

Sommaire

1. Contexte de l'étude	6
2. Consistance de l'étude	7
2.1. Situation géographique	7
2.2. Intervention du Cabinet Jean Bougis	7
2.3. Visite de reconnaissance du site	8
3. Hypothèses hydrodynamiques et sédimentaires	9
3.1. Données physiques	9
3.1.1. Constantes universelles	9
3.1.2. Eau de mer	9
3.1.3. Enrochements	9
3.2. Nivellements de référence	9
3.2.1. Nivellement terrestre	9
3.2.2. Réduction des sondes des cartes marine du SHOM	10
3.3. Bathymétrie	10
3.4. Niveaux de la mer	10
3.4.1. Niveau moyen de la mer	10
3.4.2. Evolution climatique du niveau moyen de la mer	10
3.4.3. Marées	12
3.5. Vent	13
3.6. Courant	13
3.7. Agitation dans le Golfe de Saint-Tropez	13
3.7.1. Etats de mer venus du large	13
3.7.2. Mers de vent levées sur le golfe de Saint-Tropez	14
3.8. Hydrologie	14
3.8.1. Apports liquides	14
3.8.2. Apports solides	15
3.9. Sédimentologie	17
3.9.1. Plage de Port-Grimaud	17
3.9.2. Avant port de Port-Grimaud	17
3.9.3. Transport sédimentaire	17
4. Dispositions constructives contre l'ensablement	18
4.1. Fonctionnement actuel de l'avant port	18
4.2. Objectif des modifications	19
4.3. Dispositions fonctionnelles	19
4.3.1. Amélioration de l'écoulement au Sud de la digue	19
4.3.2. Création d'un passage à l'enracinement de la digue Nord	22
4.3.3. Création d'un passage sous la digue Nord	24
4.4. Dispositions structurelles	25
4.4.1. Prolongement des ouvrages de la Giscle	25
4.4.2. Création d'un passage à l'enracinement de la digue Nord	25
4.4.3. Création d'un passage sous la digue Nord	26
4.5. Conclusions et recommandations	26
5. Dispositions constructives contre l'agitation	27
5.1. Fonctionnement actuel de l'avant port	27
5.2. Création d'un passage à l'enracinement de la digue Nord	28
5.3. Diminution de l'agitation transmise autour du musoir	28
5.3.1. Allongement de la digue vers le Sud	28
5.3.2. Création d'un tenon à l'intérieur du musoir	28
5.3.3. Allongement de la jetée Sud de l'entrée	29
5.3.4. Conclusion	29

6.	Evaluation des coûts des solutions envisageables	30
6.1.	Etudes, reconnaissances et préparations de chantier	30
6.2.	Déconstruction de la digue actuelle	30
6.3.	Création d'un musoir	31
6.4.	Création d'une digue en enrochement isolée	31
6.5.	Création d'un écran mince isolé	31
6.6.	Création d'un tenon verticalisé	32
6.7.	Synthèse des coûts	32
7.	Documents de référence	33
7.1.	Cartes	33
7.2.	Documents locaux	33
7.3.	Documents généraux	33
7.4.	Etudes antérieures	33
8.	Annexe A : Talus en enrochements	34
8.1.	Formule de Hudson	34
8.2.	Nombre de stabilité	35
8.3.	Epaisseur de la carapace	36
8.4.	Sous couche filtre	36
8.5.	Butée de pied	37
8.5.1.	Objet de la butée de pied	37
8.5.2.	Conception de la butée de pied	37
8.5.3.	Dimensionnement de la butée de pied	38
8.6.	Rip-rap d'assise	38
8.7.	Documents de référence	38
9.	Annexe B : Caractéristiques des enrochements	39
9.1.	Forme des enrochements	39
9.1.1.	Considérations générales	39
9.1.2.	Rapport dimensionnel	39
9.2.	Fuseau	39
9.3.	Documents de référence	40

1. Contexte de l'étude

Port-Grimaud, parfois appelée la « Venise provençale » est une cité lacustre implantée au fond du golfe de Saint-Tropez dans le département du Var. Port-Grimaud a été conçue et construite par François Spoerry en 1966.

D'abord géré en concession par le Conseil syndical des propriétaires, la gestion a été reprise en régie par la Commune depuis le 01 janvier 2022.

La régie de Port-Grimaud, agissant en qualité de Maître d'ouvrage, procède à une analyse des améliorations et des investissements à réaliser dans les années à venir.

La régie de Port-Grimaud a confié au Cabinet Jean Bougis une étude préliminaire de la protection de Port-Grimaud contre l'agitation et l'ensablement dû à l'embouchure de la Giscle qui se jette entre Port-Grimaud et la Marina de Cogolin.

Ce rapport, rédigé à la demande de la régie de Port-Grimaud, a pour objet d'analyser la faisabilité de la protection de Port-Grimaud contre l'agitation et l'ensablement. Et en particulier de :

- vérifier la cohérence des données hydrodynamiques et hydrosédimentaires de projet,
 - rédiger la note d'hypothèses hydrodynamiques et hydrosédimentaire,
 - proposer des dispositions constructives susceptibles de limiter l'agitation et l'ensablement de l'avant port,
 - évaluer les coûts de la mise en œuvre de ces solutions potentielles.
- et de manière générale, apporter à la demande de la régie de Port-Grimaud tout conseil relevant des compétences du Cabinet Jean Bougis.

2. Consistance de l'étude

2.1. Situation géographique

Port-Grimaud est situé au fond du golfe de Saint-Tropez, dans le département du Var (voir figure 2.1-a et 2.1-b).



Figure 2.1 : Plan de situation a) du golfe de Saint-Tropez – b) de Port-Grimaud (Google Earth)

Le fond du Golfe de Saint-Tropez est exposé aux agitations levées sur les fetchs de secteur Nord-Est à Est.

L'avant port ouvre à l'Est Nord-Est (voir figure 2.2-a). Le Port-Grimaud est séparé de la marina de Cogolin au Sud par le Giscle ; petit fleuve côtier dont les écoulements de crue sont chargés de sédiments.

La figure 2.2-b montre l'avant port de Port-Grimaud. L'embouchure de la Giscle qui ouvre au Nord Nord-Est engendre des dépôts de sable dans l'avant-port de Port-Grimaud (environ 5000 m³/an).



Figure 2.2 : Plan d'aménagement de l'avant port d'Ouistreham (DCE)

Les aménagements à envisager, au niveau d'une étude préliminaire de faisabilité) ont pour objectif de limiter l'agitation et l'ensablement de l'avant-port de Port-Grimaud, sans ensabler l'entrée de la marina de Cogolin et, dans la mesure du possible en repoussant le sable dans les petits fonds des plages situées au Nord.

2.2. Intervention du Cabinet Jean Bougis

L'intervention du Cabinet Jean Bougis consiste à :

- vérifier la cohérence des données hydrodynamiques et hydrosédimentaires de projet,
- rédiger la note d'hypothèses hydrodynamiques et hydrosédimentaire,
- proposer des dispositions constructives susceptibles de limiter l'agitation et l'ensablement de l'avant port,
- évaluer les coûts de la mise en œuvre de ces solutions potentielles.

et de manière générale, apporter à la demande de la régie de Port-Grimaud tout conseil relevant des compétences du Cabinet Jean Bougis.

2.3. Visite de reconnaissance du site

Une visite de reconnaissance du site a eu lieu le jeudi 17 mars 2022 après midi. Il n'est pas prévu d'autre visite du site.

3. Hypothèses hydrodynamiques et sédimentaires

Le présent chapitre est destiné à rassembler les données et les hypothèses qui serviront à l'étude. Les données sont issues du dossier du Client, de la documentation des organismes officiels et des études antérieures.

3.1. Données physiques

3.1.1. Constantes universelles

Toutes les grandeurs seront exprimées dans le système international rationalisé (S.I.).

➤ Accélération de la pesanteur : $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ [JB]

3.1.2. Eau de mer

Le tableau 3.1 rassemble les valeurs moyennes des principales grandeurs physico-chimiques de l'eau de mer en surface, sur les côtes de la région de Toulon, pour chacune des saisons. Elles sont issues des données des Instructions Nautiques du SHOM [SHO94].

Saison	Salinité	Température	Masse volumique
Hiver	38.0 à 38.5 g/kg	12.0 à 12.5 °C	1028.5 à 1029.0 kg/m ³
Printemps	37.0 à 37.5 g/kg	15.5 à 16.0 °C	1027.5 à 1028.0 kg/m ³
Été	37.5 à 38.0 g/kg	22.0 à 22.5 °C	1026.0 à 1026.5 kg/m ³
Automne	37.0 à 37.5 g/kg	15.5 à 16.0 °C	1027.5 à 1028.0 kg/m ³

Tableau 3.1 : Données physico-chimiques de l'eau de mer de surface sur les côtes de la Méditerranée à Saint-Tropez pour les différentes saisons [SHO94].

Pour les études d'hydrodynamique, nous retiendrons donc les valeurs moyennes suivantes :

- la salinité de l'eau de mer s_m : 37.6 k/kg ;
- la température de l'eau de mer θ_m : 16.5 °C ;
- la masse volumique de l'eau de mer ρ_m : 1027. kg/m³ ;

D'après les équations thermodynamiques, nous pouvons en déduire que la viscosité cinématique ν_m est comprise entre $0.97 \cdot 10^{-6}$ et $1.30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Dans le cadre de cette étude, nous retiendrons :

- la viscosité cinématique de l'eau de mer ν_m : $1.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [JB]

3.1.3. Enrochements

La masse volumique du matériau des enrochements $\rho_s = 2600 \text{ kg/m}^3$.

3.2. Nivellements de référence

3.2.1. Nivellement terrestre

Le référentiel fondamental des altitudes est le Nivellement Général de la France (IGN69).

3.2.2. Réduction des sondes des cartes marine du SHOM

Port-Grimaud est situé au fond du golfe de Saint-Tropez, à 3 km à l'Ouest du port de Saint-Tropez, qui est rattaché au port de référence de Toulon (Zone Méditerranée).

A Saint-Tropez (N043°16' – E006°38'), le zéro hydrographique, servant de réduction des cartes marines, est situé à 5.134 m au-dessous du repère fondamental n°M.A.E3-78 et coté +4.834 m IGN 69 (détermination 1983). Le zéro hydrographique est donc situé à 0.300 m au-dessous du zéro IGN69 [SHO17].

3.3. Bathymétrie

La bathymétrie est donnée par les cartes du SHOM n°7408 au 1:50000 [C1] (voir figure 3.1) et n°7267 au 1/20000 [C2]

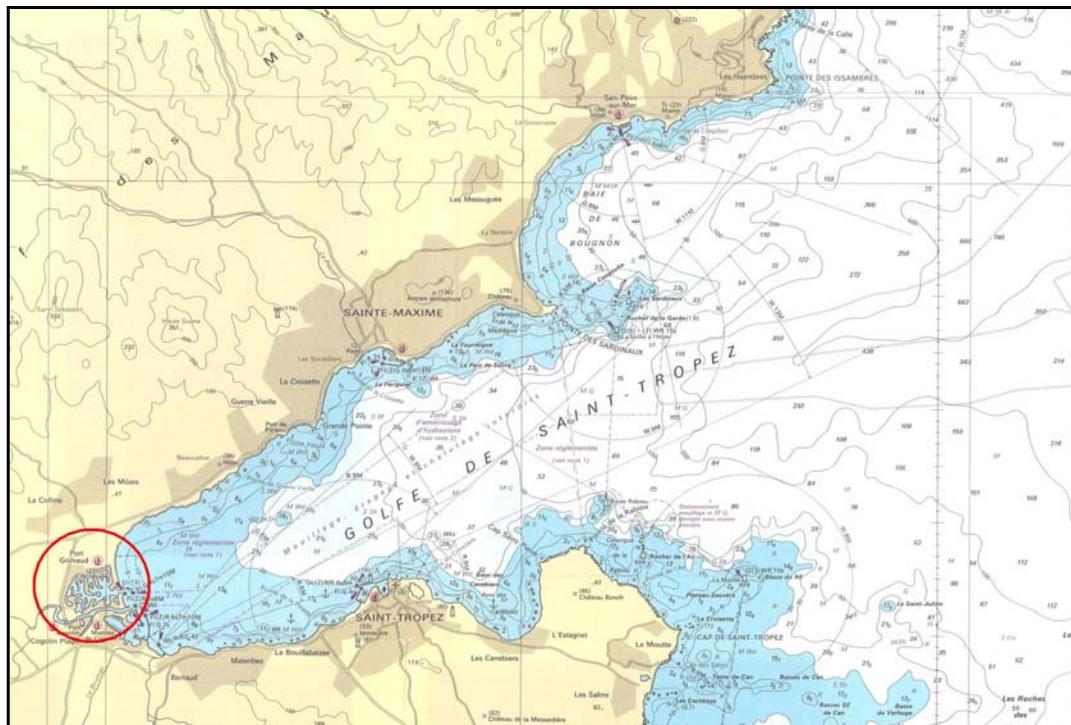


Figure 3.1 : Bathymétrie dans le Golfe de Saint-Tropez (carte SHOM n°7408S [C1])

3.4. Niveaux de la mer

3.4.1. Niveau moyen de la mer

A Saint-Tropez, le niveau moyen de la mer est égal à +0.47 m CM (0.17 m IGN69) [SHO17]. Il est de +0.42 m CM à Toulon.

3.4.2. Evolution climatique du niveau moyen de la mer

Le changement climatique dû à l'effet de serre est susceptible d'engendrer une élévation du niveau de la mer plus ou moins importante selon les zones géographiques.

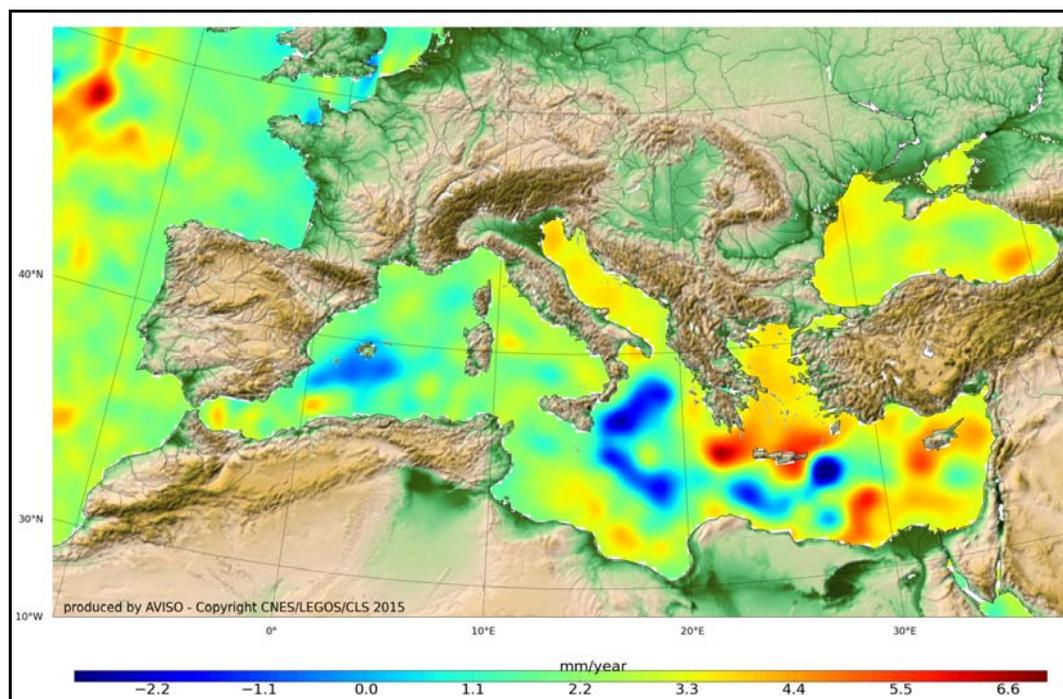


Figure 3.2 : Vitesse de variation du niveau de la mer de 1992 à 2013
(source : CNES/LEGOS/CLS d'après Topex/Poseidon et Jason-1)

Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) ou "International Panel on Climate Change" (IPCC), a estimé dans son cinquième rapport de 2013, que la surélévation du niveau des mers serait comprise entre 26 cm et 82 cm au cours du XXI^e siècle (horizon 2100).

Il s'agit là de valeurs moyennes qui recouvrent des réalités locales très différentes (baisse ou élévation) du niveau de la mer. La figure 3.2 montre la vitesse de variation du niveau de la Méditerranée entre 1992 et 2013 d'après le LEGOS (CNES).

Il apparaît que dans la zone de Saint-Tropez, l'élévation du niveau moyen de la mer a été de l'ordre de 2.0 ± 0.5 mm/an entre 1992 et 2013.

Compte tenu que le zéro hydrographique de Saint-Tropez ne semble guère avoir évolué en 34 ans (1983 à 2017), il n'est pas insensé d'évaluer au plus à 30 cm la surélévation du niveau de la mer d'ici la fin du siècle.

En France, pour la « prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles », l'ONERC [ONE15] a recommandé de retenir trois hypothèses de surélévation à l'horizon 2100 :

- hypothèse optimiste : 0.40 m,
- hypothèse pessimiste : 0.60 m,
- hypothèse extrême : 1.00 m.

Compte tenu de la situation géographique du site, nous retiendrons une surélévation de 0.50 m pour dans 100 ans.

3.4.3. Marées

La variation du niveau de la mer a deux origines :

- Les marées astronomiques,
- Les marées météorologiques : marée barométrique (pression atmosphérique), surcotes et décotes dues au vent.

3.4.3.1. Les marées astronomiques

Sur les côtes méditerranéennes de la France les marées astronomiques sont très faibles au point d'être masquées par les marées météorologiques.

A Saint-Tropez, les niveaux astronomiques caractéristiques sont donnés par le SHOM :

- Plus bas niveau astronomique : 0.25 m CM [SH017]
- Niveau moyen : 0.47 m CM [SH017]
- Plus haut niveau astronomique : 0.68 m CM [SH017]
- Marnage maximal : 0.43 m [SH017]

3.4.3.2. Les marées météorologiques

Les marées météorologiques sont dues aux actions combinées des hautes et basses pressions (marée barométrique) et du vent qui « pousse » l'eau vers la côte ou l'entraîne vers le large.

En dehors du cas particulier du port de Sète, la marée météorologique, due à l'effet des vents persistants, est souvent plus importante que la marée astronomique au point de la masquer en morte-eau.

Le long des côtes françaises de Méditerranée, les vents de Sud-Est engendrent, à la côte, une surélévation (surcote) au-dessus du niveau moyen qui peut dépasser 1.0 m et très exceptionnellement atteindre 2.0 m et noyer les quais des ports [SHO94].

Les vents de secteur Nord-Ouest à Nord-Est engendrent un abaissement du niveau moyen (décote) qui atteint au maximum 0.5 m [SHO94].

Le tableau 3.3 présente les évaluations des surcotes horaires à Toulon réalisées par le CETMEF [CET13].

Conformément aux recommandations du CETMEF nous retiendrons les valeurs correspondant à la borne supérieure de l'intervalle de confiance obtenue avec la loi exponentielle.

DR (ans)	5	10	20	50	100	1000
Loi exponentielle – seuil 24 cm						
Surcote	0.43	0.48	0.53	0.59	0.64	0.79
IC 70%	0.40 - 0.46	0.45 - 0.51	0.49 - 0.57	0.64 - 0.64	0.58 - 0.69	0.72 - 0.87
Loi GPD – seuil 26 cm						
Surcote	0.42	0.46	0.50	0.54	0.57	0.67
IC 70%	0.40 - 0.44	0.43 - 0.49	0.45 - 0.54	0.47 - 0.61	0.48 - 0.66	0.50 - 0.84

Tableau 3.3 : Marées météorologique à Toulon en fonction de la durée de retour [CET13].

3.4.3.3. Niveaux d'eau de projet

Les niveaux d'eau extrêmes à prendre en compte dans le cadre de ce projet sont :

- Plus basses mers 2022 : -0.25 m CM [JB]
- Plus hautes mers 2022 : +1.00 m CM [JB]

Et ces mêmes niveaux augmentés de 0.50 m dans 100 ans.

3.5. Vent

Les données de vent, enregistrées au Cap Camarat de 1955 à 1980, indique qu'il a trois provenances prédominantes des vents [SOG89] :

- les vents de secteur Nord-Ouest,
- les vents de secteur Sud-Ouest,
- les vents de secteur Nord-Est à Est.

Les vents de secteur Sud-Est sont relativement rares, de l'ordre de 20% du temps, et ne dépassent pas 17 m/s [MEQ88].

3.6. Courant

De manière générale, la zone est caractérisée par un très faible hydrodynamisme. Les courants de surface sont essentiellement générés par les vents.

De manière générale, les courants sont faibles sur la zone et restent inférieurs à 0.5 m/s. Ils ont une action négligeable dans la dynamique sédimentaire littorale [SOG89].

3.7. Agitation dans le Golfe de Saint-Tropez

3.7.1. Etats de mer venus du large

Le golfe de Saint-Tropez ouvre vers le secteur d'Est à Nord-Est. Il est donc protégé des états de mer de secteur Ouest à Sud. Seules les agitations de secteur Est Nord-Est à Sud-Est son susceptible de se propager jusqu'à Port-Grimaud.

Les agitations, qui pénètrent dans le Golfe de Saint-Tropez, ont été définies par ACRI-IN dans le cadre du Marché de maîtrise d'œuvre pour la réalisation de l'opération d'aménagement et de mise en valeur du littoral de Grimaud en 2013.

3.7.1.1. Etats de mer au large du golfe de Saint-Tropez

Les agitations au large du golfe de Saint-Tropez ont été définies, d'après une étude spécifique de GlobOcéan, au point de coordonnées géographiques N043°20' – E006°55' [ACR13]. Le tableau 3.4 présente les résultats correspondant aux agitations qui pénètrent dans le golfe de Saint-Tropez.

N043°20' E006.55'	Durée de retour									
	1 an			10 ans			100 ans			
	β N°	H_s (m)	T_p (s)	N (m CM)	H_s (m)	T_p (s)	N (m CM)	H_s (m)	T_p (s)	N (m CM)
65-95	2.8	7.5		3.7	9.5		4.7	9.5		
95-105	2.7	8.5	1.3	3.7	9.5	1.5	4.5	9.5		1.8
105-125	1.4	5.5		2.0	6.5		2.5	7.5		

Tableau 3.4 : Etats de mer en fonction de la durée de retour devant le golfe de Saint-Tropez

3.7.1.2. Etats de mer devant port Grimaud

Ces états de mer ont été propagés jusqu'au fond du golfe de Saint-Tropez. Le tableau 4.5 présente les états de mer, au point N043°16'20" – E006°35'40", à environ 500 m devant l'entrée de Port-Grimaud.

β N°	Durée de retour										
	1 an			10 ans				100 ans			
	H_s (m)	T_p (s)	N (m CM)	β N°	H_s (m)	T_p (s)	N (m CM)	β N°	H_s (m)	T_p (s)	N (m CM)
70	1.3	7.5		70	1.5	9.5		70	1.7	9.5	
60	0.7	8.5	1.3	60	0.8	9.5	1.5	60	0.9	9.5	1.8
50	0.2	5.5		50	0.2	6.5		50	0.2	7.5	

Tableau 3.5 : Etats de mer en fonction de la durée de retour devant Port-Grimaud.

Ce sont ces agitations incidentes qui doivent servir au dimensionnement des ouvrages de protection de Port-Grimaud.

3.7.2. **Mers de vent levées sur le golfe de Saint-Tropez**

Les vents de secteur Est lèvent sur le golfe des mers de vent de courte période (2 s à 4 s) et de faible hauteur (0.2 à 0.5 m) pouvant atteindre 1.0 à 1.5 m lors d'évènements tempétueux [SOG89]. Ces clapots sont très actifs dans les mouvements sédimentaires, dans les petits fonds, le long des plages.

3.8. **Hydrologie**

3.8.1. **Apports liquides**

Les cours d'eau qui se jettent dans le golfe de Saint-Tropez ont, la plupart du temps, un très faible débit. Lors des crues, liées aux fortes pluies méditerranéennes, ils présentent un caractère torrentiel [SOG89].

Le tableau 3.6 présente leurs principales caractéristiques. Outre la source [SOG89] en caractères noirs, incomplète, nous avons utilisé des plans de prévention des risques d'inondation (Communes de Sainte-Maxime, Grimaud, Cogolin et Gassin) en caractères rouges et le catalogue sédimentologique des côtes françaises [SOG84] en caractères bleus. certaines données ont été homogénéisées en termes de surfaces de bassin versant.

Les écarts importants sont dus au fait qu'en l'absence de stations de jaugeage sur ces cours d'eau, les débits ont été estimés, voire calculés par modèles numériques.

Nom	Bassin versant km ²	Embouchure	Crue décennale m ³ /s	Crue centennale m ³ /s
Le Préconil	59	Sainte-Maxime	135-153	300-367
La Giscle	234	Sud de Port Grimaud	419-550	792-1100
Le Bourrian	18	Plage de Cogolin	98-115	214
Le Bélieu	12			

Tableau 3.6 : Hydrologie du golfe de Saint-Tropez.

Lors de l'aménagement des Marines de Cogolin, l'embouchure du Bourrian a été détournée pour rejoindre celle du Bélieu.

3.8.2. Apports solides

3.8.2.1. Evaluation antérieure aux extractions

De 1909 à la création de Port-Grimaud en 1966, d'importantes extractions de matériaux ont été réalisées dans la plupart des cours d'eau. Les matériaux de la plaine alluviale, ainsi que ceux qui constituent le littoral et les petits fonds ont été apportés et déposés lentement au cours des temps géologiques. Les extractions ont été très supérieures aux apports et ont entraîné un appauvrissement du stock sédimentaire disponible [SOG89].

Avant que ces extractions n'aient lieu, les apports ses quatre rivières ont été estimés [SOG89] à environ 150 000 t/an :

- Le Préconil : 20 000 t/an à 25 000 t/an,
- La Giscle : 100 000 t/an à 120 000 t/an,
- Le Bourrian-Bélieu : 10 000 t/an à 15 000 t/an.

Les sédiments entraînés par les cours d'eau sont des vases et des sables peu compacts à granulométrie sans doute étalée. En considérant une masse volumique moyenne de l'ordre de 2.0 t/m³, le volume entraîné par la Giscle était compris entre 50 000 et 60 000 m³/an.

Bien qu'aujourd'hui, les extractions soient interdites sur le littoral, les apports restent faibles, en partie du fait des aménagements des plages, et les stocks ne se sont pas reconstitués. Le volume entraîné par la Giscle est donc bien plus faible

3.8.2.2. Dragages d'entretien de la passe d'entrée

Les dragages d'entretien de la passe d'entrée dans la cité lacustre de Port-Grimaud concernent la zone comprise entre les deux jetées d'entrée de Port-Grimaud et présentée sur la figure 3.3.

Les volumes dragués entre 2012 et 2019, pour entretenir la passe d'entrée, sont indiqués dans le tableau 3.7 [CIS20a]. On notera qu'entre février et mars 2017, la commune de Grimaud a réalisé le dragage de 16 000 m³ de sables à l'embouchure de la Giscle. Cette opération d'envergure a permis de ralentir le processus d'ensablement en évitant un dragage de la passe d'entrée en 2018. En 2019, seulement 610 m³ ont été dragués en urgence dans le chenal de navigation.

Année -	Cote de dragage m NGF	Volume m ³	Filière de gestion
2012		2000	Plage du port
2013		3000	Plage du port
2014	-3.00	4300	Plage du port
2015		3000	Plages de Grimaud
2016		2900	Derrière la digue
2017	-3.50	6700	Plage du port
2018		-	-
2019	-3.00	610	Plage Sud
Total		22510	
Moyenne		2814	
Moyenne 2012 à 2017		3650	

Tableau 3.7 : Volumes dragués de 2012 à 2019 [CIS20a].



Figure 3.3 : Zone de dragage de Port-Grimaud.

La moyenne des dragages d'entretien de la passe d'entrée, corrigée de l'effet du dragage de l'embouchure de la Giscle, est donc de 3 650 m³/an. La moyenne de l'ensemble des dragages de la Giscle est de 4 814 m³/an. Comme le temps d'accumulation des 16 000 m³ de sédiments n'est pas connu, nous pouvons conclure que le débit solide de la Giscle est supérieur à une fourchette comprise entre 3 650 m³/an et 4 814 m³/an.

Sur la base de ces constats, Port Grimaud 1 a déposé une demande d'autorisation de dragages d'entretien de la passe d'entrée, à hauteur de 4 500 m³/an et à une cote d'objectif à - 3,5 m NGF [CIS20a].

Naturellement, tous les sédiments véhiculés par la Giscle ne se déposent pas dans cette zone et une partie, sans doute la plus importante, de ceux-ci se disperse dans le golfe de Saint-Tropez.

3.9. Sédimentologie

3.9.1. Plage de Port-Grimaud

Dans le fond du golfe de Saint-Tropez, les fonds sont sableux. Sur l'estran, les sédiments ont un diamètre médian d_{50} compris entre 400 μm et 1.0 mm. Dans les petits fonds de moins de 10 m, les sables sont plus fins avec un diamètre médian d_{50} compris entre 100 μm et 400 μm [ACR13].

Au droit de la passe d'entrée, les fonds sont sableux. L'épaisseur de la couche sableuse est de l'ordre d'une quinzaine de mètres.

3.9.2. Avant port de Port-Grimaud

CISMA Environnement a réalisé deux diagnostics sédimentaires en 2018, et un diagnostic en 2019.

Les sédiments prélevés le long de la digue et dans le chenal de navigation sont majoritairement sableux ($63 \mu\text{m} < \emptyset < 2000 \mu\text{m}$) mais présentent des teneurs hétérogènes en éléments fins (argile, limon, $\emptyset < 63 \mu\text{m}$). La médiane des échantillons est comprise entre 222 et 415 μm . [CIS20a]

3.9.3. Transport sédimentaire

Le golfe de Saint-Tropez constitue une unité sédimentologique dans le sens où il piège les sédiments. L'intensité du transit sédimentaire est quasiment nulle au fond du golfe dans la zone d'étude. [CIS20b].

4. Dispositions constructives contre l'ensablement

4.1. Fonctionnement actuel de l'avant port

La figure 4.1 présente le plan de Port-Grimaud du cartouche au 1:10 000 de la carte marine du SHOM [C2].

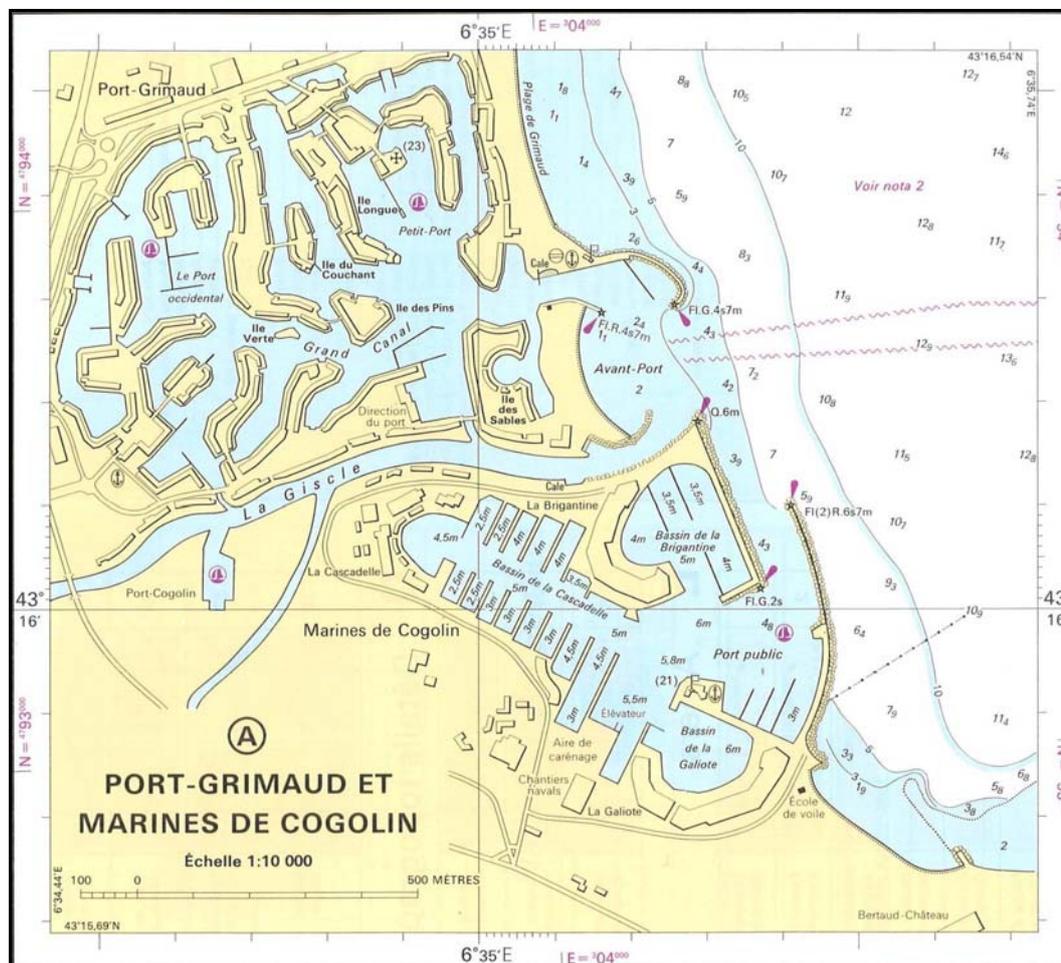


Figure 4.1 : Plan de Port-Grimaud [C2].

On y voit que la Gisèle coule d'Ouest en Est, canalisée entre Port-Grimaud et les Marines de Cogolin. Son embouchure forme un arc de cercle qui tend à dévier son écoulement vers le Nord-Est. L'écoulement de la Gisèle vient alors, en partie, buter sur la digue Nord, qui protège l'entrée des bateaux dans les canaux de la cité lacustre.

L'avant port, nécessaire pour protéger l'accès des canaux et bassin contre l'agitation, délimite une zone d'accalmie favorable à la décantation d'une partie des matériaux solides véhiculés par la Gisèle.

Les accumulations de sable, entre la contre-digue Sud de l'entrée du port et la digue Nord de la Gisèle, forment une plage au fond de l'avant-port, qui contribue à amortir l'agitation qui pénètre par la passe d'entrée. Cette zone n'est pas concernée par la demande d'autorisation de dragages d'entretien.

Enfin, la forme très incurvée de la digue Nord de l'avant-port contribue à piéger les sédiments dans l'avant-port.

4.2. Objectif des modifications

L'objectif des modifications envisagées est de limiter l'ensablement de la passe d'entrée de Port-Grimaud, sans dégrader sa protection contre l'agitation, ni impacter l'entrée des Marinas de Cogolin.

Il convient donc d'analyser les dispositions constructives à adopter en fonction des critères suivants :

- la préservation de l'écoulement de la Giscle,
- ne pas aggraver l'ensablement de l'entrée des Marinas de Cogolin,
- ne pas augmenter l'agitation de l'entrée des Marinas de Cogolin,
- les contraintes de dragage (volumes, fréquences, etc.) de l'avant port de Port-Grimaud,
- la récupération des sédiments pour le rechargement des petits fonds des plages environnantes,
- la minimisation des emprises des ouvrages à envisager, pour en limiter les coûts environnementaux et financiers.

4.3. Dispositions fonctionnelles

Les dispositions fonctionnelles, à prendre pour favoriser la dispersion, dans le golfe de Saint-Tropez, des sédiments entraînés par la Giscle et limiter le stockage des sédiments dans l'avant-port, peuvent consister à :

- améliorer le passage du courant de la Giscle au Sud de la digue Nord,
- créer un passage du courant de la Giscle à l'enracinement de la digue Nord,
- créer un passage du courant de la Giscle sous la digue Nord.

4.3.1. Amélioration de l'écoulement au Sud de la digue

L'amélioration du passage du courant de la Giscle, au Sud de la digue Nord de port-Grimaud, sans aggraver l'agitation de l'avant-port, ne peut se faire qu'en modifiant les ouvrages de l'embouchure de la Giscle.

Les modifications des ouvrages de l'embouchure de la Giscle peuvent viser à :

- accompagner le courant vers le golfe de Saint-Tropez,
- infléchir la direction du courant vers le golfe de Saint-Tropez.

4.3.1.1. Accompagnement du courant

4.3.1.1.1. Principe de l'accompagnement

L'accompagnement du courant de la Giscle ne peut se faire qu'en prolongeant son endiguement jusque, au minimum, la ligne bathymétrique de 5 m CM.

La figure 4.2 montre le tracé des ouvrages susceptibles de forcer la sortie du courant et de sa charge sédimentaire vers le golfe de Saint-Tropez.

Les prolongements des digues sont raccordés tangentiellement aux digues existantes et s'incurvent vers l'Est pour se terminer sensiblement perpendiculairement à la ligne bathymétrique des 5 m CM.

Elles s'écartent progressivement pour ralentir le courant et éviter les conflits de masses d'eau. Le demi-angle au sommet ne doit pas dépasser 5° pour éviter les décollements le long des digues, et en particulier le long de la digue Sud.

Le prolongement de la digue Nord ne doit pas empiéter sur le chenal de navigation d'entrée de Port-Grimaud et donc rester au Sud.

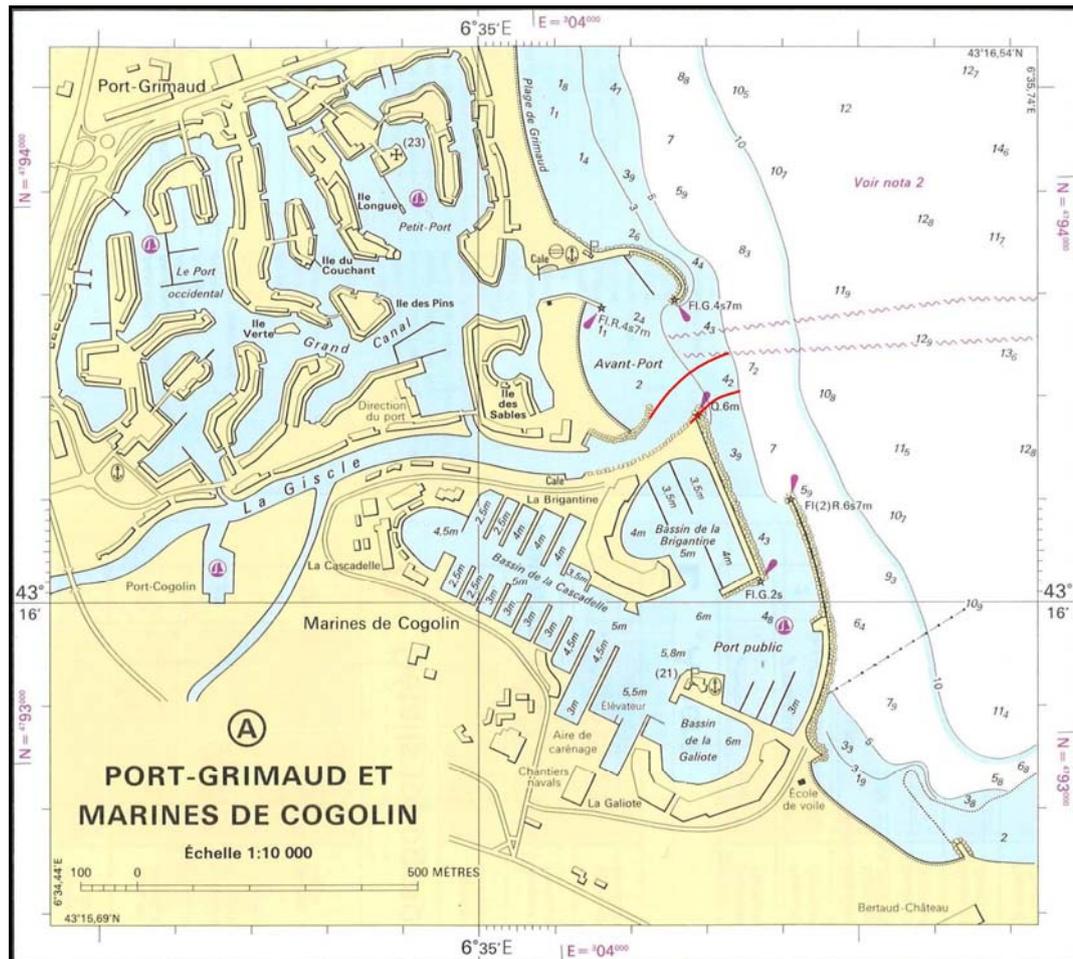


Figure 4.2 : Prolongement de l'endiguement de la Giscle.

4.3.1.1.2. Avantages de l'accompagnement

Le principal avantage de l'accompagnement du courant de la Giscle jusqu'à la ligne bathymétrique des 5 m CM est que le courant et sa charge sédimentaire sont injectés, en totalité, dans le golfe de Saint-Tropez selon la ligne de plus grande pente.

Ces sédiments ne pourront être que partiellement ramenés, par l'agitation vers l'avant-port de Port-Grimaud, mais c'est déjà le cas pour les sédiments qui sont mobilisable dans le golfe de Saint-Tropez.

4.3.1.1.3. Inconvénients de l'accompagnement

Un premier inconvénient de l'accompagnement du courant de la Giscle jusqu'à la ligne bathymétrique des 5 m CM concerne la navigation. En effet l'allongement des digues vient restreindre le plan d'eau navigable entre Port-Grimaud et les Marines de Cogolin.

Un deuxième inconvénient concerne l'augmentation du flux de sédiments devant le chenal d'entrée des Marines de Cogolin. Il en résulte bien évidemment un risque d'aggravation de l'ensablement de ce chenal.

Un troisième inconvénient concerne la perte du flux sédimentaire pour l'alimentation de la plage de l'avant port de Port-Grimaud.

4.3.1.2. Inflexion de la direction du courant

4.3.1.2.1. Principe de l'inflexion du courant

L'infection de la direction du courant vers l'Est nécessite de redessiner les extrémités des digues de canalisation de l'embouchure de la Giscle.

La figure 4.3 montre le tracé des ouvrages susceptibles d'infléchir la sortie du courant et de sa charge sédimentaire vers le golfe de Saint-Tropez.

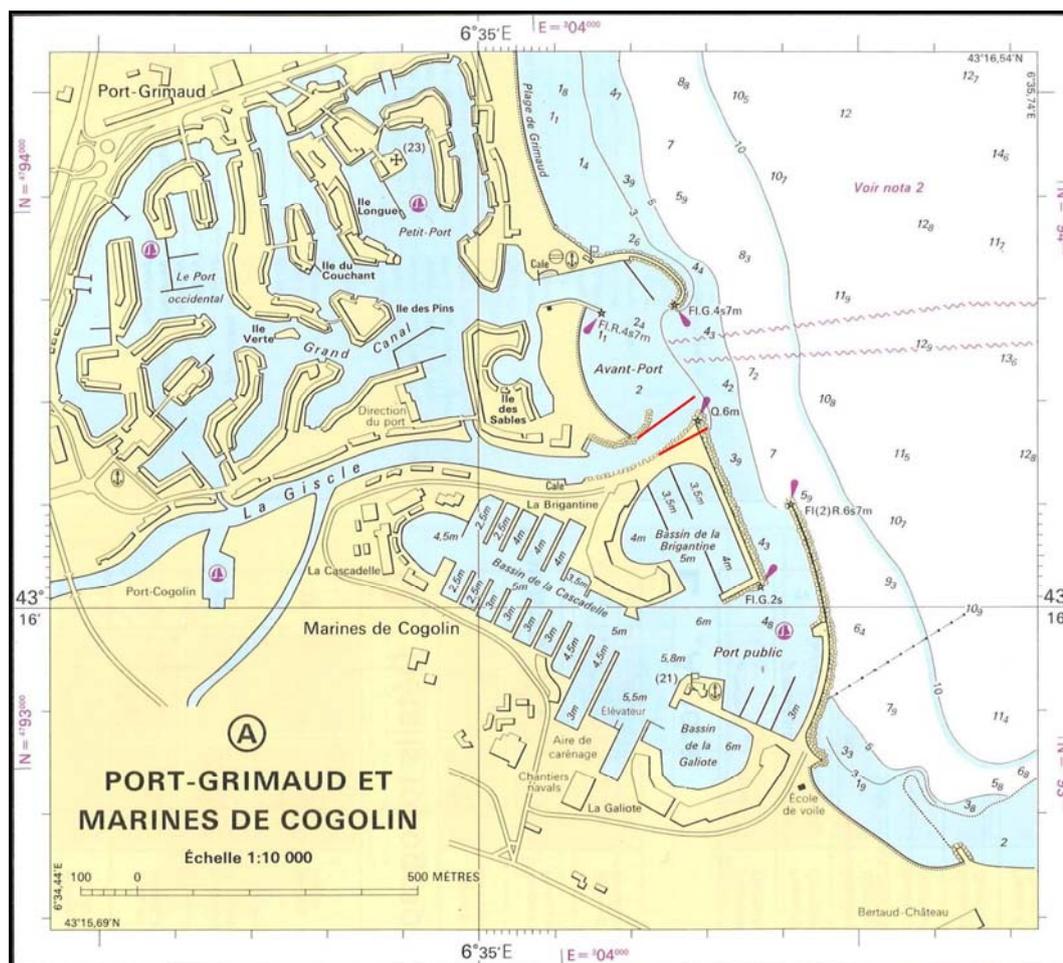


Figure 4.3 : Modification de l'endiguement de la Giscle.

Les prolongements des digues sont raccordés tangentiellement aux digues existantes et sont rectilignes vers l'Est pour se terminer sensible-

ment perpendiculairement à la ligne bathymétrique des 3 m CM, au niveau du talus en enrochements Ouest du chenal d'accès aux Marines de Cogolin.

Elles s'écartent progressivement pour ralentir le courant et éviter les conflits de masses d'eau. Le demi-angle au sommet ne doit pas dépasser 5° pour éviter les décollements le long des digues, et en particulier le long de la digue Sud.

4.3.1.2.2. Avantages de l'inflexion du courant

L'inflexion du courant de la Giscle présente, mais dans une moindre mesure, le même avantage que son accompagnement puisqu'une partie plus importante du flux sédimentaire sera susceptible d'être ramenée vers l'avant-port de Port Grimaud.

4.3.1.2.3. Inconvénients de l'inflexion du courant

Un premier inconvénient de l'inflexion du courant de la Giscle est de nécessiter la modification, avec destruction partielle, de la digue Sud qui est dans l'emprise des Marines de Cogolin.

Un deuxième inconvénient de l'inflexion du courant de la Giscle concerne la navigation. En effet l'allongement de la digue Nord vient restreindre le plan d'eau navigable entre Port-Grimaud et les Marines de Cogolin, même si c'est dans une moindre mesure que précédemment.

Un troisième inconvénient concerne l'augmentation du flux de sédiments devant le chenal d'entrée des Marines de Cogolin. Il en résulte bien évidemment un risque d'aggravation de l'ensablement de ce chenal, plus important que précédemment.

Un quatrième inconvénient concerne la perte du flux sédimentaire pour l'alimentation de la plage de l'avant port de Port-Grimaud, même si c'est dans une moindre mesure que précédemment.

4.3.2. Création d'un passage à l'enracinement de la digue Nord

La création d'un passage du courant de la Giscle, à l'enracinement de la digue Nord de port-Grimaud, sans aggraver l'agitation de l'avant-port, ne peut se faire qu'en modifiant la forme et l'implantation de la digue Nord.

La figure 4.4 montre le tracé des ouvrages susceptibles de créer un passage du courant de la Giscle et de sa charge sédimentaire, dans le golfe de Saint-Tropez, vers les plages de Grimaud.

La digue en enrochements actuelle est supprimée. Un musoir est formé à l'extrémité du terreplein, sensiblement au niveau de départ du ponton flottant de l'avant-port.

Une nouvelle digue, isolée, rectiligne est construite, entre la position actuelle du musoir de la digue Nord et un point situé devant la plage de Grimaud.

Cette digue doit être suffisamment longue pour recouvrir le musoir construit à l'extrémité du terreplein. Elle aura donc une longueur en tête de l'ordre de 120 m.

L'ouverture doit être d'au moins 50 m. La direction de la digue gagnera à être tangente aux lignes de courant des crues de la Giscle (calcul de courantologie en absence de digue).

Comme l'ouverture n'est pas, à priori, destinée au passage des navires, la continuité de circulation pourra être rétablie au moyen d'une passerelle portée par des pieux.

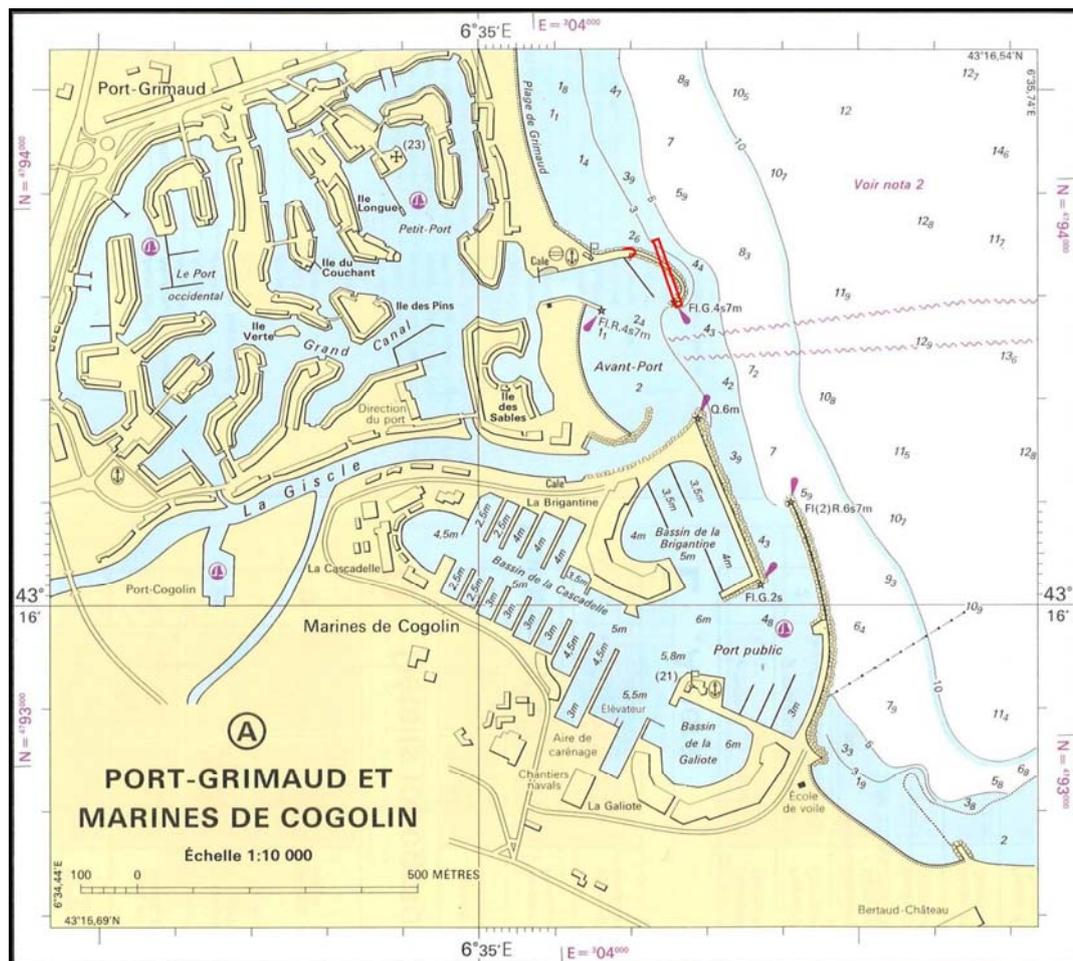


Figure 4.4 : Création d'un passage à l'enracinement de la digue Nord.

4.3.2.1.1. Avantages d'un passage à l'enracinement de la digue Nord

Un premier avantage de la création d'un passage à l'enracinement de la digue Nord est que la protection contre les états de mer venus du large ne sera pas modifiée.

Un deuxième avantage est qu'une partie de l'écoulement des crues de la Giscle entraînera directement les sédiments devant la plage de Grimaud, limitant ainsi les besoins de dragage de l'avant-port et ceux en rechargement de la plage de Grimaud.

Un troisième avantage est qu'il n'y aura pas d'impact sur les Marines de Cogolin.

4.3.2.1.2. Inconvénients d'un passage à l'enracinement de la digue Nord

Un premier inconvénient de cette solution est que la digue isolée sortira peut-être du domaine portuaire vers le Nord.

Un second inconvénient de cette solution est que l'emprise de la digue sera déplacée, mais pour l'essentiel en bordure du domaine portuaire.

4.3.3. Création d'un passage sous la digue Nord

La création d'un passage du courant de la Giscle, sous la digue Nord de port-Grimaud, ne peut se faire que dans le cadre de la reconstruction complète de la digue.

La figure 4.5 présente schématiquement le tracé de la digue actuelle qui serait traversée par des buses pour laisser passer une partie du courant de la Giscle et de sa charge sédimentaire, dans le golfe de Saint-Tropez. Naturellement, si la mise en place de buses nécessite le démontage complet de la digue, il serait préférable d'en profiter pour modifier son tracé. Nous verrons d'ailleurs, au chapitre suivant, qu'il serait plus judicieux de construire la digue avec une autre technologie.

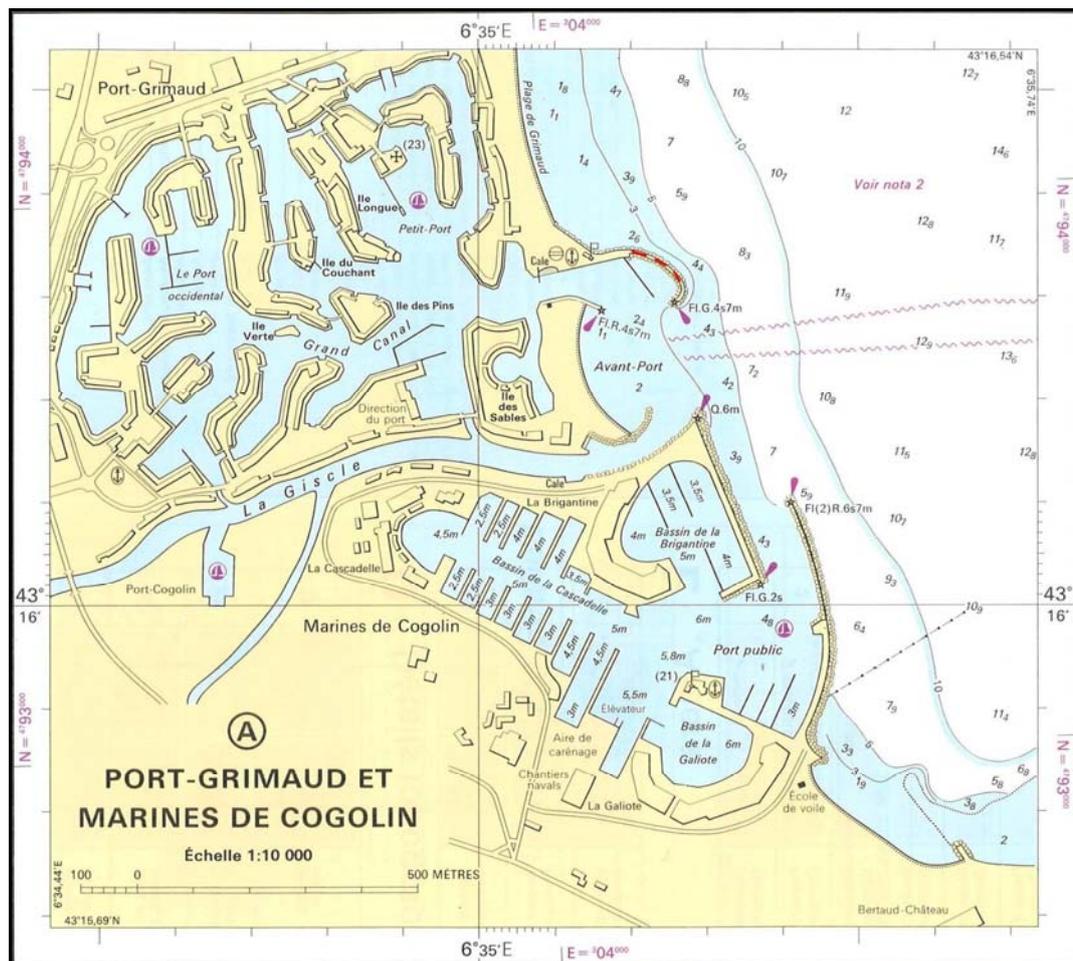


Figure 4.5 : Création d'un passage sous la digue Nord.

4.3.3.1.1. Avantages d'un passage sous la digue Nord

L'avantage d'un passage sous la digue Nord est qu'il permet à une partie de l'écoulement des crues de la Giscle de s'évacuer, avec une partie de leur charge sédimentaire vers le golfe de Saint-Tropez.

4.3.3.1.2. Inconvénients d'un passage sous la digue Nord

Le premier inconvénient d'un passage sous la digue Nord est qu'il diminue l'efficacité de la protection pour les états de mer de grandes périodes (supérieures à 4 s dans le cas présent).

4.4. Dispositions structurelles

4.4.1. **Prolongement des ouvrages de la Giscle**

Le prolongement des ouvrages de la Giscle ne peut guère se faire qu'à l'identique avec des enrochements.

Les enrochements des carapaces des digues de Port-Grimaud et des Marines de Cogolin sont des blocs de masse médiane M_{50} de l'ordre de 2.5 t, dont les dimensions caractéristiques sont de l'ordre de $L=2$ m, $G=1$ m et $E=0.5$ m (voir annexe B). Le critère B.1 de l'annexe B n'est donc pas satisfait.

Compte tenu que les digues ont des formes très arrondies, qu'elles se terminent par des musoirs, et que les enrochements sont relativement plats, on retiendra, comme c'est le cas actuellement, une seule blocométrie et on adoptera un coefficient de dommage $K_d = 2$ dans la formule de Hudson (voir Annexe A).

Moyennant quoi on retiendra un fuseau d'enrochements de 2-3 t.

Pour assurer une imperméabilité des digues suffisante, on disposera un noyau de 1 – 500 kg.

4.4.2. **Création d'un passage à l'enracinement de la digue Nord**

4.4.2.1. Création du musoir à l'extrémité du terreplein

Le musoir à l'extrémité du terreplein sera construit avec les matériaux récupérés lors du démontage de la digue.

4.4.2.2. Construction d'une nouvelle digue en enrochements

La digue en enrochements sera construite avec les matériaux récupérés lors du démontage de la digue.

Il devrait y avoir suffisamment d'enrochements récupérés lors du démontage de la carapace. Par contre complément de matériaux devra sans doute être apporté pour le noyau.

4.4.2.3. Construction d'un écran mince

La digue en enrochements pourra être remplacée par un écran mince portée par des portiques bi-pieux. Pour conserver le même niveau de protec-

tion contre l'agitation, l'écran devra descendre jusqu'au sol. Un tapis anti-affouillements sera alors disposé sous l'écran pour que l'agitation ne puisse pas se creuser un passage par-dessous.

4.4.3. Création d'un passage sous la digue Nord

4.4.3.1. Busage de la digue Nord actuelle

La mise en place de buses sous une digue en enrochements doit se faire lors de sa construction. Il paraît dès lors illusoire de penser à mettre en œuvre une telle solution.

Le démontage de la digue accompagné d'une reconstruction avec un passage à l'enracinement serait bien plus intéressant.

4.4.3.2. Construction d'un écran mince partiel

La création d'un passage sous la digue Nord a été envisagée par soucis d'exhaustivité, et ce, d'autant plus, que la construction d'un écran mince pourrait s'accompagner d'un passage à l'enracinement mais également d'un passage sous l'écran en laissant une ouverture entre le bas de l'écran et le tapi anti-affouillement.

Toutefois, pour des périodes de 5.5 s à 9.5 s, une ouverture de 10% de la hauteur d'eau engendrerait une transmission de l'ordre de 30%.

Dans ces conditions, ou bien l'écran n'est pas efficace pour protéger le port, ou bien le passage sous l'écran ne sert à rien.

4.5. Conclusions et recommandations

Parmi les différents aménagements, théoriquement envisageables, certains sont pratiquement irréalisables.

C'est le cas des aménagements, qui concernent les digues de la Giscle, en raison des impacts sur le Marines de Cogolin.

C'est également le cas de la création d'un passage sous la digue Nord, pour les raisons suivantes :

- les périodes, et donc les longueurs d'onde, des états de mer sont trop importante et un passage de 10% de la hauteur d'eau engendrerait une transmission de 30% ;
- le busage d'une digue, avec une section significative, doit se faire lors de sa construction. Dans le cas contraire il faut la démonter et la refaire entièrement.

La seule solution réaliste consiste donc à créer un passage à l'enracinement de la digue Nord. Nous envisagerons donc les deux cas suivants :

- démontage de la digue actuelle et remplacement par une digue isolée en enrochements,
- démontage de la digue actuelle et remplacement par un écran mince isolé en béton armé.

5. Dispositions constructives contre l'agitation

5.1. Fonctionnement actuel de l'avant port

La figure 5.1 reprend le plan de Port-Grimaud du cartouche au 1:10 000 de la carte marine du SHOM [C2].

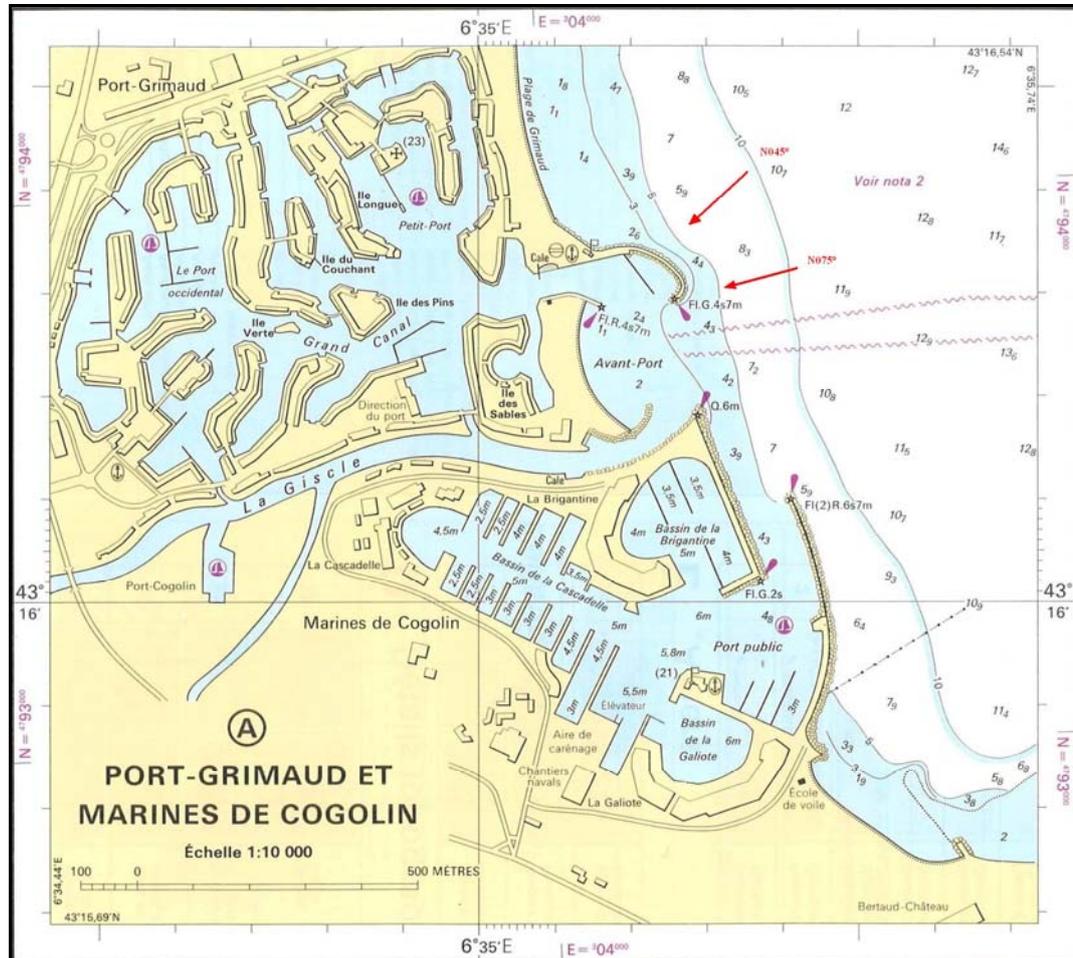


Figure 5.1 : Plan de Port-Grimaud [C2].

Les agitations, levées au large, qui se propagent jusqu'à Port-Grimaud, proviennent du secteur N045° à N075° (Nord-Est à Est Nord-Est).

Les états de mer de N045° à N060° ne peuvent guère pénétrer directement dans l'avant port. Tout au plus, peuvent-elles se réfléchir sur la partie Sud de la plage de l'avant port et se diriger, de manière résiduelle, vers la partie Nord de l'avant-port.

Par contre, les états de mer de N060° à N075° peuvent se diffracter autour du musoir de la digue Nord, qui protège l'avant port, et s'épanouir dans la partie Nord de l'avant-port. Une houle annuelle de $H_s=1.30$ m – $T_p=7.5$ s peut sans doute y provoquer une agitation résiduelle de l'ordre de 0.50 m.

Les vents de secteur Sud-Est, de vitesse maximale de 17 m/s, peuvent lever sur les fetchs de Port-Grimaud, au plus des clapots de faible hauteur

$H_s=0.4$ m à 0.7 m et de courte période $T_p=2$ s à 3 s. Ces clapots exceptionnels entrent directement dans la partie Nord de l'avant port.

L'avant port, nécessaire pour protéger l'accès des canaux et bassin contre l'agitation, délimite une zone d'accalmie favorable à la décantation d'une partie des matériaux solides véhiculés par la Giscle. Il y a donc une certaine contradiction entre la protection de l'avant-port contre l'agitation et sa protection contre l'ensablement.

5.2. Création d'un passage à l'enracinement de la digue Nord

La création d'une ouverture à l'enracinement de la digue Nord doit être étudiée pour ne pas laisser entrer les agitations levées au large, qui se propagent jusqu'à Port-Grimaud.

Pour cela, le recouvrement du musoir de la partie Ouest du passage, par la digue isolée, doit être suffisamment long. Au moins de l'ordre de grandeur de la passe.

Ce passage devra être étudié, au moyen d'un modèle numérique d'agitation, pour ne pas aggraver l'agitation dans l'avant port.

5.3. Diminution de l'agitation transmise autour du musoir

La diminution de la transmission de l'agitation par diffraction autour du musoir de la digue principale peut être envisagée par trois moyens :

- l'allongement de la digue vers le Sud,
- la création d'un tenon à l'intérieur du musoir,
- l'allongement de la jetée Sud de l'entrée.

Les trois approches pourraient être combinées entre-elles.

5.3.1. Allongement de la digue vers le Sud

L'allongement de la digue Nord de l'entrée de Port-Grimaud permettrait d'éloigner les ondes diffractées de la partie Nord de l'avant-port et de les orienter davantage vers la plage d'amortissement.

Naturellement, cette disposition serait également de nature à gêner le passage du courant de la Giscle et du flux de sédiments qui sortent par la passe d'entrée.

A noter que le coût de ce prolongement serait limité s'il se faisait dans le cadre de la reconstruction de la jetée Ouest.

5.3.2. Création d'un tenon à l'intérieur du musoir

La création d'un tenon à l'intérieur du musoir permettrait d'intercepter directement les ondes diffractées.

Naturellement, cette disposition serait également de nature à gêner le passage du courant de la Giscle et du flux de sédiments qui sortent par la passe Nord.

Pour limiter l'impact au sol et gêner, le moins possible, le passage des navires, mais aussi le transit des sédiments vers le passage ouvert au Nord, le tenon pourrait être verticalisé au moyen d'une cage en pieux remplie d'enrochements. Cette méthode a été utilisée avec succès à la Ciotat et aux Issambres.

La encore, le coût de ce prolongement serait limité s'il se faisait dans le cadre de la reconstruction de la jetée Ouest.

5.3.3. Allongement de la jetée Sud de l'entrée

L'allongement de la jetée Sud de l'entrée dans les canaux de port-Grimaud permettrait également de fermer la partie Nord-Est de l'avant port.

Le « rendement » de cette approche est limité du fait que, ce n'est sans doute pas par la partie Est que passe l'agitation la plus gênante.

Il pourrait alors être préférable de créer d'un brise-lames isolé dans le prolongement de la jetée Sud.

A noter que ce dispositif pourrait s'avérer gênant pour la navigation.

5.3.4. Conclusion

Pour améliorer l'agitation dans l'avant port et ne pas augmenter les risques d'ensablement, l'aménagement de son entrée devra être étudié, au moyen d'un modèle numérique d'agitation et de transport sédimentaire.

6. Evaluation des coûts des solutions envisageables

Les coûts des deux solutions envisageables sont évalués sur la base :

- de projets similaires étudiés et/ou réalisés,
- de quantités et coûts unitaires.

Ils sont à prendre en compte comme des ordres de grandeurs.

Ils seront susceptibles d'être modifiés en fonction de la méthodologie et du phasage adoptés par l'entreprise.

6.1. Etudes, reconnaissances et préparations de chantier

Ce paragraphe concerne les coûts fixes qui sont communs à toutes les options.

Désignation		Quantités	PU € HT	Prix € HT
Maîtrise d'œuvre 12% des travaux	U	12%	1 571 878 €	188 625 € 188 625 €
Chantier				
Amenée et repli du matériel maritime	U	1	100 000 €	100 000 €
Amenée et repli du matériel terrestre	U	1	25 000 €	25 000 €
Relevés topo-bathy et prises de cotes	U	1	10 000 €	10 000 €
Installation de chantier	U	1	10 000 €	10 000 €
Balisage chantier	U	1	10 000 €	10 000 €
Nettoyage et remise en état	U	1	10 000 €	10 000 €
Mesures de protection environnementale	U	1	10 000 €	10 000 €
Assurance (~2%)	U	1		0 €
Chantier				175 000 €
Etude d'exécution				
Méthodes, études d'exécution et récolement	U	1	25 000 €	25 000 €
Etude d'exécution				25 000 €
Total HT				388 625 €
Aléas	15%			58 294 €
Grand total HT				446 919 €

6.2. Déconstruction de la digue actuelle

La digue actuelle sera déconstruite, les matériaux seront triés et stockés. Dans la réalité, cette opération sera réalisée progressivement au fur et à mesure de la construction de la nouvelle digue.

Dans le cas de la construction d'une digue isolée en enrochements, les matériaux n'auront donc pas à être stockés simultanément.

Dans le cas de la construction d'un écran mince, les matériaux devront être évacués, si possible en les valorisant. Une telle valorisation n'est pas prise en compte ici.

La digue est déconstruite sur une longueur en tête de 150 m. Ses principales caractéristiques, prises en compte pour le chiffrage, sont les suivantes :

- cote de fondation : -4.0 m CM,
- cote d'arase : +8.0 m CM,
- largeur en tête : 7.0 m,

- pente du talus côté large : 2H/1V,
- pente du talus côté port : 4H/3V,
- largeur de la dalle béton : 4.0 m,
- hauteur de la dalle béton : 0.50 m,
- épaisseur de la carapace : 1.0 m¹
- carapace : 2 t – 3 t,
- noyau : 1 – 500 kg.

La section type de la digue contient 38 m³ de carapace et 163 m³ de noyau.

Désignation		Quantités	PU € HT	Prix € HT
Déconstruction de la digue				
Retrait de la carapace à la pince et stockage	t	6924	20 €	138 471 €
Retrait du noyau au godet et stockage	t	42411	10 €	424 105 €
Déconstruction de la digue				562 576 €
Total HT				562 576 €
Aléas	15%			84 386 €
Grand total HT				646 963 €

6.3. Création d'un musoir

Désignation		Quantités	PU € HT	Prix € HT
Construction du musoir				
Pose à la pince des enrochements de récupération	t	1190	30 €	35 708 €
Pose au godet du noyau de récupération	t	3584	20 €	71 675 €
Construction du musoir				107 383 €
Total HT				107 383 €
Aléas	15%			16 107 €
Grand total HT				123 491 €

6.4. Création d'une digue en enrochement isolée

Désignation		Quantités	PU € HT	Prix € HT
Construction de la digue				
Pose à la pince des enrochements de récupération	t	6967	30 €	209 015 €
Pose au godet du noyau de récupération	t	34645	20 €	692 903 €
Déconstruction de la digue				901 918 €
Total HT				901 918 €
Aléas	15%			135 288 €
Grand total HT				1 037 206 €

6.5. Création d'un écran mince isolé

L'écran mince aura une longueur de 130 m (120 m + l'équivalent des musoirs). Il sera tenu par des portiques bi-pieux tous les 10 m (14 portiques). Les pieux auront des diamètres de l'ordre de 800 mm et une longueur de 20 m (dont 12 m de fiche). Leur épaisseur sera de l'ordre de 15 mm.

Le prix ne prend pas en compte l'évacuation des matériaux de destruction de la digue, ni leur possible valorisation.

¹ Deux fois la plus petite dimension des blocs, qui sont très plats.

Désignation		Quantités	PU € HT	Prix € HT
Brise-lames				
Fourniture des pieux Ø 800 ep 15 mm x 20 m	U	28	11 838 €	331 451 €
Mise en fiche et battage des pieux	U	28	1 000 €	28 000 €
Fabrication et pose des chevêtres	U	14	1 000 €	14 000 €
Fabrication et pose des éléments en béton armé	t	1300	500 €	650 000 €
Tapis anti-affouillement	ml	140	500 €	70 000 €
Balisage du brise-lames	U	1	5 000 €	5 000 €
				1 098 451 €
Total HT				1 098 451 €
Aléas	15%			164 768 €
Grand total HT				1 263 218 €

6.6. Création d'un tenon verticalisé

D'après l'aménagement de l'entrée du port des Issambres, le coût d'un tenon verticalisé de quinze à vingt mètres de long dans une profondeur de 5 m CM, serait de l'ordre de 600 k€ à 900 k€.

6.7. Synthèse des coûts

	Digue en enrochements	Ecran mince
Général	446 919 €	446 919 €
Déconstruction de la digue	646 963 €	646 963 €
Construction du musoir	123 491 €	123 491 €
Construction de la digue	1 037 206 €	1 263 218 €
Total €	2 254 579 €	2 480 591 €

7. Documents de référence

7.1. Cartes

- [C1] SHOM (2000) *De Cavalaire sur Mer à la rade d'Agay*, Carte 7408S au 1:50000.
 [C2] SHOM (2009) *Abords de Saint-Tropez*, Carte 7267L au 1:20000.

7.2. Documents locaux

- [CET13] CETMEF (2013/04) *Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaine*, 131 p.
 [GIE13] GIEC (2013) *Changement climatique 2013, Les éléments scientifiques*, Résumé à l'intention des décideurs, Résumé technique et Foire aux questions, 222 p.
 [MEQ88] Ministère de l'Équipement (1988) *Éléments climatologiques concernant les côtes de la France métropolitaine*, fascicule VII ; de Porquerolles à Cap Ferrat.
 [ONE15] ONERC (2015/02/16) *Le climat de la France au XX^e siècle*, Volume 5, Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises, 70 p.
 [SHO94] SHOM (1994) *Instructions Nautiques n° D2.2, France, côte Sud, Du Cap Croisette à la Frontière Italienne*.
 [SHO17] SHOM (2017/09/20) *Références Altimétriques Maritimes – Ports de France métropolitaine et d'outre-mer – Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée, n°X17-HYC*, 118 p.
 [SHO20] SHOM (2020) *Annuaire des marées, tome 1 – Ports de France*.

7.3. Documents généraux

- [EDF87] Feuillet J., Coeffé Y., Bernier J. & Chaloin B. (1987) *Le dimensionnement des digues à talus*, Collection EDF-DER n°64, Paris : Eyrolles.
 [SOG84] SOGREAH (1984) *Catalogue sédimentologique des côtes françaises, côtes de la méditerranée*, Collection DER-EDF n°52, 290 p., Paris : Eyrolles.

7.4. Etudes antérieures

- [ACR13] ACRI-IN (2013/01/08) *Marché de maîtrise d'œuvre pour la réalisation de l'opération d'aménagement et de mise en valeur du littoral de Grimaud, Phase Avant Projet – Etude des conditions hydrodynamiques et sédimentaires*, Rapport n°872/1030-0, 57 p.
 [CIS20a] CISMA Environnement (2020/02/05) *Dragages d'entretien pluriannuels de la passe d'entrée de Port Grimaud 1*, Demande d'autorisation environnementale au titre du code de l'environnement, Rapport n° 2018S56, 190 p.
 [CIS20b] CISMA Environnement (2020/05/25) *Projet de restructuration des infrastructures du port des Marines de Cogolin, Demande d'autorisation environnementale, Pièce n°1 : Note de présentation non technique*, Rapport n°2018S28, 11 p.
 [MRA20] MRAE (2020) *Avis de la Mission Régionale d'Autorité environnementale Provence-Alpes-Côte d'Azur sur le projet de restructuration des infrastructures du port des Marines de Cogolin (83)*, Document n° 2680, 2020APPACA46, 11 p.
 [SOG89] SOGREAH (1989/10) *Aménagement du littoral de la commune de Grimaud*, Rapport n°51160, 68 p.

8. Annexe A : Talus en enrochements

8.1. Formule de Hudson

La première formule de stabilité des talus en enrochements soumis à a houle a été établie par Hudson dans les années 1950 (1953, 1959). C'est l'une des plus simples mais c'est cependant la formule la plus utilisée, ce qui lui confère l'un des meilleurs retours d'expérience.

Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$M_{50} = \frac{\rho_s H^3}{K_d \left(\frac{\rho_s}{\rho_e} - 1 \right)^3 \cotg \alpha} \quad (\text{A.1})$$

où encore :

$$\frac{H}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_e} - 1 \right) D_{n50}} = (K_d \cotg \alpha)^{1/3} \quad (\text{A.2})$$

Ce qui permet de définir la masse médiane M_{50} des enrochements de la carapace, en fonction de :

- H hauteur crête à creux de la houle incidente,
- $\rho_s=2650 \text{ kg/m}^3$ masse volumique du matériau des enrochements,
- $\rho_e=1027 \text{ kg/m}^3$ masse volumique de l'eau de mer,
- $\cotg \alpha$ pente du talus (horizontale sur verticale),
- K_d coefficient de dommage empirique (sans dimension),
- D_{n50} diamètre nominal médian (côté du cube de masse M_{50}).

Cette formule a été établie pour les talus émergeant avec une pente pas trop faible (4H/3V à 2H/1V) et pour un taux de dommage de 0 à 5%.

Le coefficient de dommage K_d dépend de la nature déferlante ou non des lames et du type de déferlement (plongeant, à effondrement ou frontal). Il est plus faible pour les lames déferlantes que pour les lames non déferlantes. A noter qu'on entend ici par lames déferlantes des lames dont le déferlement est provoqué par les conditions de l'écoulement en amont de l'ouvrage et non pas par la montée de la lame sur l'ouvrage lui-même.

Les essais sur modèles réduits qui ont permis d'obtenir le coefficient K_d , ont essentiellement été réalisés avec une houle régulière. Dans ces conditions, si dans le cas d'une houle régulière la hauteur de la houle à prendre en compte dans la formule de Hudson est évidente, il n'en va pas de même dans le cas d'une houle irrégulière.

Il a longtemps été d'usage de prendre la hauteur significative² H_s et de faire les essais en houle régulière avec la hauteur correspondante (R. Bonnefille [BON92]). Cependant des essais menés dans des conditions particulières ont montré que les dommages obtenus pour un état de mer de hauteur significative H_s pouvaient être sensiblement plus sévères que ceux obtenus avec une houle régulière de hauteur égale à H_s (K. Tanimoto *et al.* [TAN82]). Différents organismes préconisent donc d'utiliser la hauteur $\bar{H}_{1/10}$ qui est la moyenne des hauteurs du dixième des plus hautes vagues.

Pente du talus 3H/2V	Hauteur de la houle	Houle non déferlante		Houle déferlante	
		Corps	Coude - Musoir	Corps	Coude - Musoir
[USA77]	H_s	4.0	3.2	3.5	1.9
[USA84]	$H_{1/10}$	4.0	3.2	2.0	1.9
[BON92]	H_s	4.0	3.2	-	-
[USA06]	$H_{1/10}$	4.0	3.2	2.0	1.9
[CCC09]	$H_{1/10}$	4.0	-	2.0	-

Tableau A.1 : Coefficient de dommage de la formule de Hudson

Pour des blocs naturels disposés en vrac, sur deux couches soumis à des houles non déferlantes avant l'ouvrage, le Guide Enrochements [CCC09] retient des coefficients de dommage $K_d=4.0$ pour les sections courantes et $K_d=3.2$ pour les coudes et musoirs.

8.2. Nombre de stabilité

Le nombre de stabilité est défini par :

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \quad \text{avec :} \quad \Delta = \frac{\rho_s - \rho_e}{\rho_e} \quad (\text{A.3})$$

Dans le cas de la formule de Hudson, ce nombre s'écrit encore :

$$N_s = (K_d \cotg \alpha)^{1/3} \quad \text{pour la hauteur } H_s \quad (\text{A.4-1})$$

$$N_s = \frac{H_s}{H_{1/10}} (K_d \cotg \alpha)^{1/3} = \frac{(K_d \cotg \alpha)^{1/3}}{1.27} \quad \text{pour la hauteur } H_{1/10} \quad (\text{A.4-2})$$

Le nombre de stabilité dynamique est défini par :

$$N_{sd} = N_s T_m \sqrt{\frac{g}{D_{n50}}} \quad (\text{A.5})$$

où T_m est la période moyenne qui, sous l'hypothèse de la loi de Rayleigh, est relié à la période de pic par :

$$T_m = 0.71 T_p$$

² La hauteur significative $H_s = \bar{H}_{1/3}$ est la moyenne des hauteurs du tiers des plus hautes vagues.

Ouvrage	N_s	N_{sd}
Digue statistiquement stable	1 à 4	< 100
Digue dynamiquement stable	3 à 6	100 à 200
Talus en enrochements dynamiques	6 20	200 à 1 500
Plages de galets	15 à 500	1 000 à 200 000

Tableau A.2 : Nombre de stabilité statique et dynamique [CCC09].

8.3. Épaisseur de la carapace

La carapace est constituée de blocs d'enrochements naturels de masse médiane M_{50} . Leur diamètre médian nominal défini par :

$$D_{n50} = \left(\frac{M_{50}}{\rho_s} \right)^{1/3} \quad (\text{A.6})$$

L'épaisseur de la carapace sur n couches est égale à :

$$e = nk_{\Delta} D_{n50} \quad (\text{A.7})$$

où k_{Δ} est un coefficient empirique qui vaut 1.02 pour les enrochements naturels massifs anguleux.

8.4. Sous couche filtre

Lorsqu'une structure composée de couches successives d'enrochements de différentes granulométries plus ou moins étalées, avec ou sans noyau en tout-venant de carrière, les granulométries des couches successives doivent être assorties de manière à éviter l'érosion par les affouillements et la migration de la fraction fine des matériaux d'une couche donnée à travers les couches supérieures.

Les différentes règles de filtre sont fondées sur les travaux de Terzaghi (1922). Elles ont été établies de manière empirique et sont fondées sur des considérations géométriques, en négligeant les effets hydrodynamiques. Elles se traduisent par différentes relations entre les diamètres de tamis de la couche supérieure D_S et de la couche inférieure D_I .

Condition de rétention destinée à empêcher l'entraînement par l'eau les éléments de la couche inférieure à travers la couche supérieure, il convient d'adopter [LCP89] & [CCC09] :

➤ pour une granulométrie serrée :

$$D_{S50} < 5D_{I50} \quad (\text{A.8-1})$$

➤ pour une granulométrie étalée :

$$D_{S15} < 5D_{I85} \quad (\text{A.8-2})$$

$$5D_{I50} < D_{S50} < 20 D_{I85} \text{ à } 60 D_{I85}$$

Condition de perméabilité destinée à obtenir des couches de protection plus perméables que les couches à protéger [LCP89] :

$$5D_{I15} < D_{S15} \quad (\text{A.9})$$

Le Rock Manual propose la même relation entre les D_{20} .

Par ailleurs, Shore Protection Manual [USA06] recommande de conserver un ratio de 10 à 15 entre les masses médianes de la couche du dessus et celle du dessous ; ce qui ramené en terme de diamètre nominal médian conduit à l'expression (A.10) :

$$2.2D_{nI50} < D_{nS50} < 2.5D_{nI50} \quad (\text{A.10})$$

L'utilisation d'une sous couche en blocs assez gros présente deux avantages :

- la surface de la sous-couche est plus irrégulière et offre une meilleure accroche pour la carapace,
- la porosité de la sous-couche est plus grande, ce qui améliore la stabilité de la carapace et permet d'en diminuer la taille des blocs.

Notons enfin que la mise en place d'un géotextile permet d'éviter les migrations et les affouillements des sous-couches en s'éloignant quelque peu des règles mentionnées ci avant.

8.5. Butée de pied

8.5.1. Objet de la butée de pied

La butée de pied est destinée à prévenir les risques potentiels de glissement du talus sous l'effet d'affouillements du sol devant l'ouvrage.

L'érosion du fond devant l'ouvrage peut aussi conduire à une instabilité du talus si l'affouillement endommage ou sape la butée de pied du talus. Il faut alors prévoir un tapis anti-affouillement pour protéger la butée de pied.

La butée de pied peut-être posée directement sur le sol ou sur un tapis anti-affouillement composé d'une couche de petits enrochements (rip-rap).

8.5.2. Conception de la butée de pied

Si l'enrochement de la butée de pied a la même taille que l'enrochement de la carapace du talus côté mer, il est probable que la butée de pied sera stable [CCC09].

Dans la mesure où :

- le terrain est sensiblement plan et horizontal devant l'ouvrage,
- au-dessous de la couche superficielle, qui doit éventuellement être décapée, le sol est plutôt sableux ;

la butée de pied doit être partiellement ensouillée sur environ 50% de son épaisseur. Cette disposition permet non seulement de mobiliser de la butée dans le sol devant l'ouvrage, mais également de baisser le niveau supérieur de la butée de pied ce qui est favorable à sa stabilité.

8.5.3. Dimensionnement de la butée de pied

Les dimensions standard des butées de pied sont de l'ordre de 2 à 3 blocs dans l'épaisseur et de 3 à 5 blocs dans la longueur.

8.6. Rip-rap d'assise

Pour éviter, d'une part, d'avoir à purger la couche superficielle du sol en dehors des souilles de la butée de pied et, d'autre part, que les blocs du noyau poinçonnent le terrain naturel, il est préférable de recouvrir le sol naturel avec une couche d'assise en rip-rap avant de disposer les blocs du noyau.

Ce rip-rap sera constitué de petits enrochements de masse médiane $M_{50}=25$ kg et de fuseau peu étalé : 10 kg – 25 kg – 50 kg.

Son épaisseur sera au moins de 0.50 m. Elle pourra être plus importante en fonction des matériaux disponibles.

La séparation entre le noyau et les blocs du rip-rap par un géotextile évitera que, sous les sollicitations de la houle, les petites particules du noyau ne migrent vers le bas en laissant des cavités dans le noyau.

8.7. Documents de référence

[BON92] Bonnefille R. (1992³) *Cours d'hydraulique maritime*, Paris : Masson.

[CCC09] CIRIA, CUR, CETMEF (2009) *Guide Enrochement, l'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques, Version française du Rock Manual*, P09-01, CETMEF, Compiègne

[LCP89] Ministère de l'Équipement Français, LCPC (1989) *Les enrochements*.

[TAN82] Tanimoto K., Yagyu T. and Goda Y. (1982) Irregular wave tests for composite breakwater foundation, *Proceedings of 18th International Conference Coastal Engineering*, pp. 2144-2163, Cap Town, South Africa, November 14-19.

[USA84] U.S. Army Corps of Engineers – CERC (1973, 1984) *Shore Protection Manual* –

[USA06] U.S. Army Corps of Engineers – *Coastal Engineering Manual*, Washington D.C. (in 6 volumes).

9. Annexe B : Caractéristiques des enrochements

9.1. Forme des enrochements

9.1.1. Considérations générales

On doit préférer :

- les enrochements homogènes aux enrochements stratifiés,
- les enrochements massifs aux enrochements plats,
- les enrochements anguleux aux enrochements arrondis.

9.1.2. Rapport dimensionnel

En désignant par :

- L la longueur (la plus grande dimension) du bloc,
- G la plus grande dimension mesurable perpendiculaire à L ,
- E la plus grande dimension mesurable perpendiculaire au plan LG ,

La forme des enrochements doit respecter les conditions suivantes :

$$\frac{L+G}{2E} < 2 \quad (\text{B.1})$$

9.2. Fuseau

ρ_s (kg/m ³)	masse volumique des blocs.
M (kg)	masse d'un bloc donné.
M_x (m)	$x\%$ des blocs de l'échantillon a une masse inférieure à M_x .
D_N (m)	Diamètre nominal défini par : $D_N = (M / \rho_s)^{1/3}$.
D_{N50} (m)	Diamètre nominal médian défini par : $D_{N50} = (M_{50} / \rho_s)^{1/3}$.
D_{50} (m)	Diamètre médian de tamis : diamètre à travers lequel passent 50 % des éléments.

La norme européenne EN 13383 classe les enrochements en trois catégories (tableau B.1) issu du Guide Enrochements [CCC09].

Type de granulométrie et de gradation	D_{85}/D_{15}	M_{85}/M_{15}
Faible gradation ou blocométrie étroite	< 1.5	1.7 – 2.7
Gradation élevée ou blocométrie étalée	1.5 – 2.5	2.7 – 16
Gradation très élevée ou blocométrie très étalée (tout venant d'abattage)	2.5 – 5.0	16 – 125 +

Tableau B.1 : Classification des enrochements en fonction de leur gradation [CCC09].

Pour une carapace, on cherchera une blocométrie étroite (faible gradation) compatible avec les capacités de production de la carrière.

Les limites associées aux gros enrochements sont les suivantes :

- ELL (limite inférieure extrême) : masse en deçà de laquelle 5 % de passant maximum est autorisé ;
- NLL (limite inférieure nominale) : masse en deçà de laquelle 10 % de passant maximum est autorisé ;
- NUL (limite supérieure nominale) : masse en deçà de laquelle 70 % de passant minimum est autorisé ;
- EUL (limite supérieure extrême) : masse en deçà de laquelle 97 % de passant minimum est autorisé ;

- Mem : masse moyenne effective (moyenne arithmétique des masses des blocs plus gros qu'un fragment c'est-à-dire dont la masse est supérieure à ELL).

Pour les gros enrochements, ces limites sont rassemblées dans le tableau B.2 issu du Guide Enrochements [CCC09].

Masse de référence Passant associé (kg)	ELL	NLL	NUL	EUL	M_{em}		NUL/NLL
	< 5 % (kg)	< 10 % (kg)	> 70 % (kg)	> 97 % (kg)	limite inférieure (kg)	limite supérieure (kg)	(-)
10 000 – 15 000	6 500	10 000	15 000	22 500	12 000	13 000	1.50
6 000 – 10 000	4 000	6 000	10 000	15 000	7 500	8 500	1.67
3 000 – 6 000	2 000	3 000	6 000	9 000	4 200	4 800	2.00
2 000 – 3 000	1 300	2 000	3 000	4 500	2 400	2 600	1.50
1 000 – 3 000	700	1 000	3 000	4 500	1 700	2 100	3.00
300 – 1 000	200	300	1 000	1 500	540	690	3.33

Tableau B.2 : Masses limites pour les gris enrochements EN 13383 [CCC09].

Les différentes valeurs limites ont été évaluées de la manière suivante :

- 1) La limite inférieure extrême est de l'ordre des deux tiers de la limite inférieure nominale :

$$ELL \approx \frac{2}{3} \times NLL \quad (\text{B.2})$$

- 2) La limite supérieure extrême est de l'ordre d'une fois et demie la limite supérieure nominale :

$$EUL \approx 1.5 \times NUL \quad (\text{B.3})$$

- 3) La limite inférieure de M_{em} est de l'ordre de la racine carrée du produit des masses de référence :

$$M_{em} > \sqrt{NLL \times NUL} \quad (\text{B.4})$$

- 4) La limite supérieure de M_{em} est de l'ordre de :

$$M_{em} < NLL + NUL - \sqrt{NLL \times NUL} \quad (\text{B.5})$$

9.3. Documents de référence

[CCC09] CIRIA, CUR, CETMEF (2009) *Guide Enrochement, l'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques, Version française du Rock Manual, P09-01*, CETMEF, Compiègne