



THONON-LES-BAINS

MARCHE DE MOE RELATIF AUX AMENAGEMENTS
LACUSTRES DE LA BASE NAUTIQUE DES CLERGES

RAPPORT D'AVANT-PROJET



36 avenue de Sénévulaz
74 200 Thonon-les-Bains
FRANCE

Tél +33 4 50 84 57 58
contact@canel-ingenierie.com



setec
international

5 Chemin des gorges de Cabriès
13127 VITROLLES - FRANCE

Tél +33 4 86 15 60 00
Fax +33 4 86 15 61 23
setecinter-vit@setec.fr

DOCUMENT

ZONE	DOMAINE	PHASE	NATURE DOCUMENT	NUMERO
FR	PORT	AVANT-PROJET	NOTE	46647

REVISIONS

VERSION	DATE	AUTEURS / VERIFICATEUR	DESCRIPTION
A00	30/07/2020	ART/JGE	Première émission

R:\1_AFFAIRES\46000_A_46999\46647(012)_MOE_BASE_NAUTIQUE_DES_CLERGES\MISSION\MISSION\RAPPORT\46647-MOE BASE NAUTIQUE DES CLERGES_HYDRAULIQUE_RAPPORT AVP_IND A.DOCX

COORDONNEES

Adresse de l'établissement	Directeur de projet
setec international 5, chemin des gorges de Cabriès 13127 VITROLLES France Tél +33 (0)4 86 15 60 00 Fax +33 (0)4 86 15 61 23 inter.portuaire.fluvial@setec.com www.inter.setec.fr	Pierre-Yves VANZO Directeur de projets portuaires 5, chemin des gorges de Cabriès 13127 VITROLLES France Tél. +33 (0)4 86 15 61 10 Mob. +33 (0)7 62 38 51 66 Fax +33 (0)4 86 15 61 23 pierre-yves.vanzo@inter.setec.fr

TABLE DES MATIERES

1. OBJET DE LA NOTE.....	5
2. LES CONDITIONS NATURELLES	6
2.1 LES VENTS A THONON-LES-BAINS	6
1.1 NIVEAU D'EAU	11
1.2 SURCOTE.....	11
3. LES CLAPOTS SOULEVES VERS LA BASE NAUTIQUE DES CLERGES	11
3.1 VALEURS PROJETS	11
3.2 APPLICATION DES FORMULES	12
3.3 CARACTERISTIQUES DES CLAPOTS AU PIED DE L'OUVRAGE	13
3.3.1 Caractéristiques de la plage devant l'ouvrage.....	13
3.3.2 Houles incidentes au pied de l'ouvrage	14
4. STABILITE DES ENROCHEMENTS	17
4.1 EPAISSEUR DE COUCHE ET QUALITE DES ENROCHEMENTS	17
4.2 STABILITE DE LA CARAPACE DE LA DIGUE NORD – SECTION NON IMMERGEE.....	17
4.2.1 Talus avant.....	17
4.2.1.1 Formules utilisées	17
4.2.1.2 Résultats	19
4.2.2 Crête.....	21
4.2.3 Talus arrière	21
4.2.3.1 Formule exploitée	21
4.2.3.2 Résultats	21
4.3 STABILITE DE LA CARAPACE DE LA DIGUE NORD - SECTION SEMI-IMMERGEE	22
4.3.1 Formule utilisée.....	22
4.3.2 Résultats	23
4.4 STABILITE DU TALUS SUD	26
4.4.1 Formules utilisées	26
4.4.2 Résultats	26
4.5 SOUS-COUCHES.....	28
4.5.1 Formules utilisées	28
4.5.1.1 Critère de rétention.....	28
4.5.1.2 Critère de perméabilité.....	28

4.5.1.3 Critère de rétention interne des matériaux granulaires	28
4.5.2 Résultats Digue Nord.....	29
4.5.3 Résultats Talus Sud.....	29
4.6 COUCHE FILTRE.....	30
4.7 NOYAU	30
4.8 PIED DE DIGUE.....	31
4.8.1 Digue Nord	32
4.8.2 Talus Sud	32
4.9 SYNTHÈSE DES BLOCOMÉTRIE CALCULÉES	33
4.9.1 Blocométrie de la digue Nord (section émergée)	33
4.9.2 Blocométrie de la digue Nord (section semi immergée)	34
4.9.3 Blocométrie du talus Sud	34
5. TRANSMISSION DE LA HOULE AU DROIT DE LA DIGUE SEMI-IMMERGÉE.....	35
5.1 FORMULES UTILISÉES	35
5.2 RESULTATS.....	35
6. QUALITÉ DES EAUX ET SEDIMENTOLOGIE.....	36

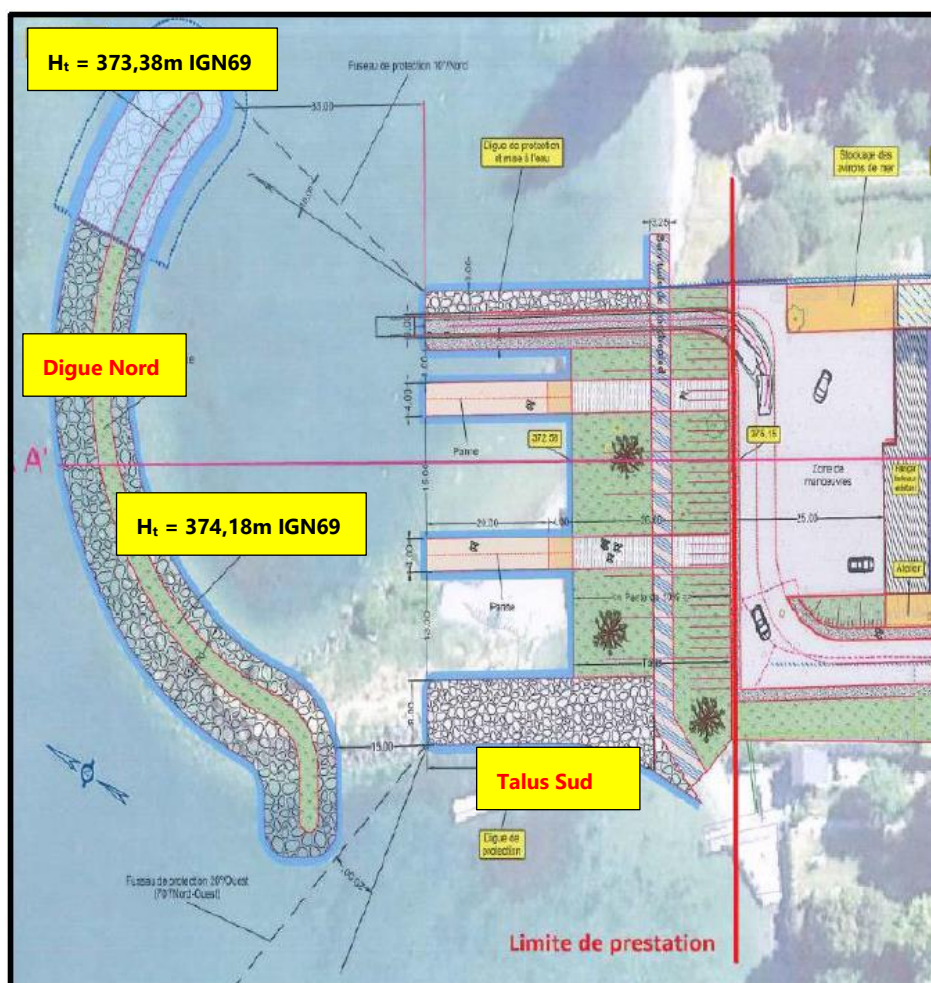
1. OBJET DE LA NOTE

La présente note concerne les études hydrauliques dans le cadre de l'avant-projet du projet d'aménagement des infrastructures lacustres de la base nautique de Clerges à Thonon-les-Bains.

Elle a pour objectif de :

- Etablir les conditions de houle au droit de la future digue ;
- Dimensionner les enrochements nécessaires à la stabilité du talus ;
- Vérifier l'agitation résultante liée à la présence d'une digue semi-immersée ;
- Vérifier la qualité de l'eau et le transport sédimentaire résultant.

Le projet sur lequel est basé cette étude est le suivant :

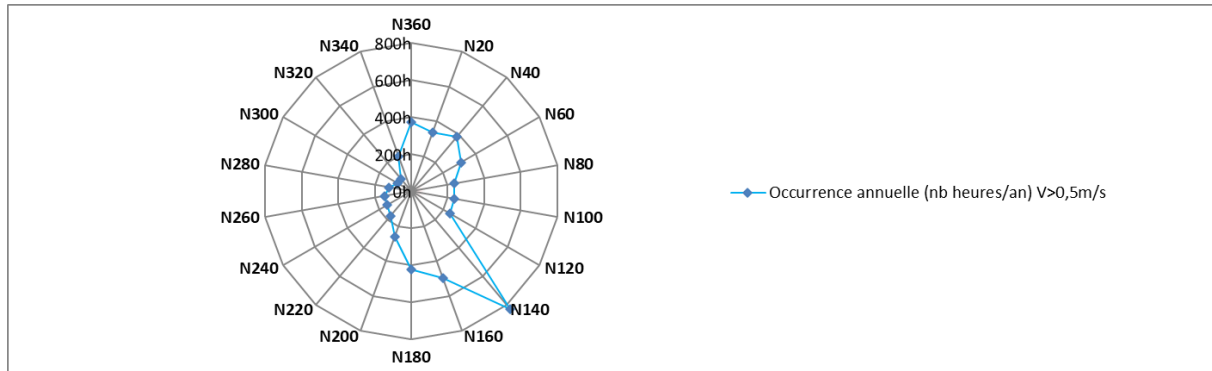


Vue en plan du projet

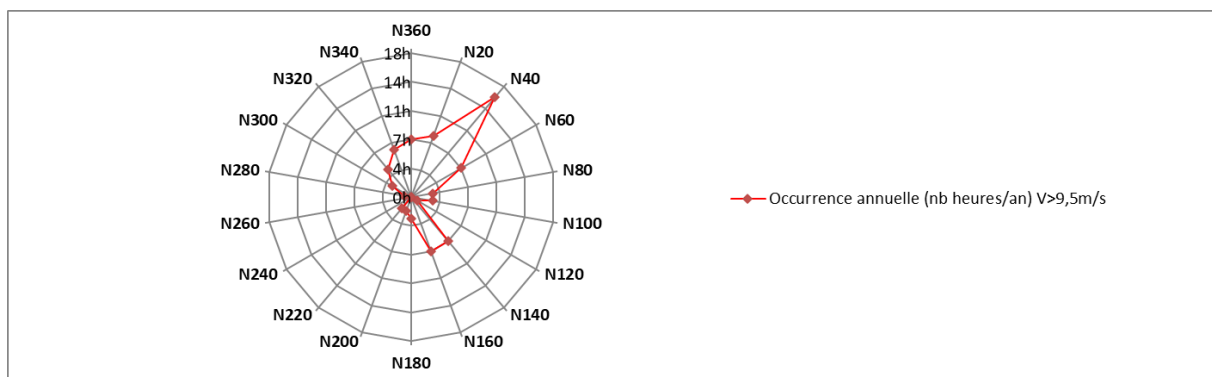
2. LES CONDITIONS NATURELLES

2.1 LES VENTS A THONON-LES-BAINS

Les statistiques de vent à la station météorologiques de Thonon-les-Bains ont été recueillies auprès de Météo-France. Les roses et les tableaux établis ci-dessous reflètent les mesures effectuées sur 10 ans entre 2001 et 2010.



Occurrence annuelle des vents tels que V10min > 0,5m/s



Occurrence annuelle des vents forts tels que V10min > 10m/s

Les vents les plus fréquents viennent du Sud-Est, mais ceux-ci n'engendrent pas de clapot sur la côte Sud du Lac Léman. Les clapots les plus à craindre sont soulevés par la « bise » de Nord-Est et le « Joran » de Nord-Ouest. Le secteur de la bise est d'ailleurs le plus fréquent en ce qui concerne les vents les plus intenses.

Globalement, la région de Thonon-les-Bains n'est pas soumise à des vents très forts, la vitesse maximale V10min (prise à 10m au-dessus du sol en moyenne sur 10minutes) n'ayant pas dépassé 16 m/s entre 2001 et 2010.

Le lac ayant des niveaux différents selon les saisons sous l'influence de la fonte des neiges et des barrages, nous avons approfondi nos statistiques afin de déterminer les valeurs de vent susceptibles de se produire sur la zone de Thonon-les-Bains par saison. A partir des données quotidiennes de la vitesse maximale V10min du vent et de sa direction relevées par Météo-France à la station de Thonon-Les-Bains sur la période s'étalant du 1er janvier 1997 au 31 décembre 2007 (période pour laquelle les données sont disponibles), nous avons retenu les principales tempêtes, puis extrapolé les données afin d'extraire les valeurs extrêmes suivant les occurrences décennales, cinquantennales et centennales.

Nous obtenons les courbes d'extrapolation de Weibull présentées en annexe A. Ces courbes nous permettent de déterminer les occurrences décennales, cinquantennales et centennales des vents en fonction des saisons. Ces valeurs sont classées dans le tableau suivant :

Vents de projet en été et au printemps				
Directions	Saison	Vents décennaux	Vents cinquantennaux	Vents centennaux
N280-N360	Printemps	11.5m/s	14.5m/s	16.0m/s
N280-N360	Eté	10.5m/s	14.0m/s	15.0m/s
N280-N360	Automne	12.0m/s	15.5m/s	17.0m/s
N280-N360	Hiver	12.5m/s	17.0m/s	19.5m/s
N20-N70	Printemps	12.5m/s	15.0m/s	16.0m/s
N20-N70	Eté	10.5m/s	13.0m/s	14.0m/s
N20-N70	Automne	12.5m/s	16.0m/s	17.5m/s
N20-N70	Hiver	14.5m/s	18.5m/s	20.5m/s

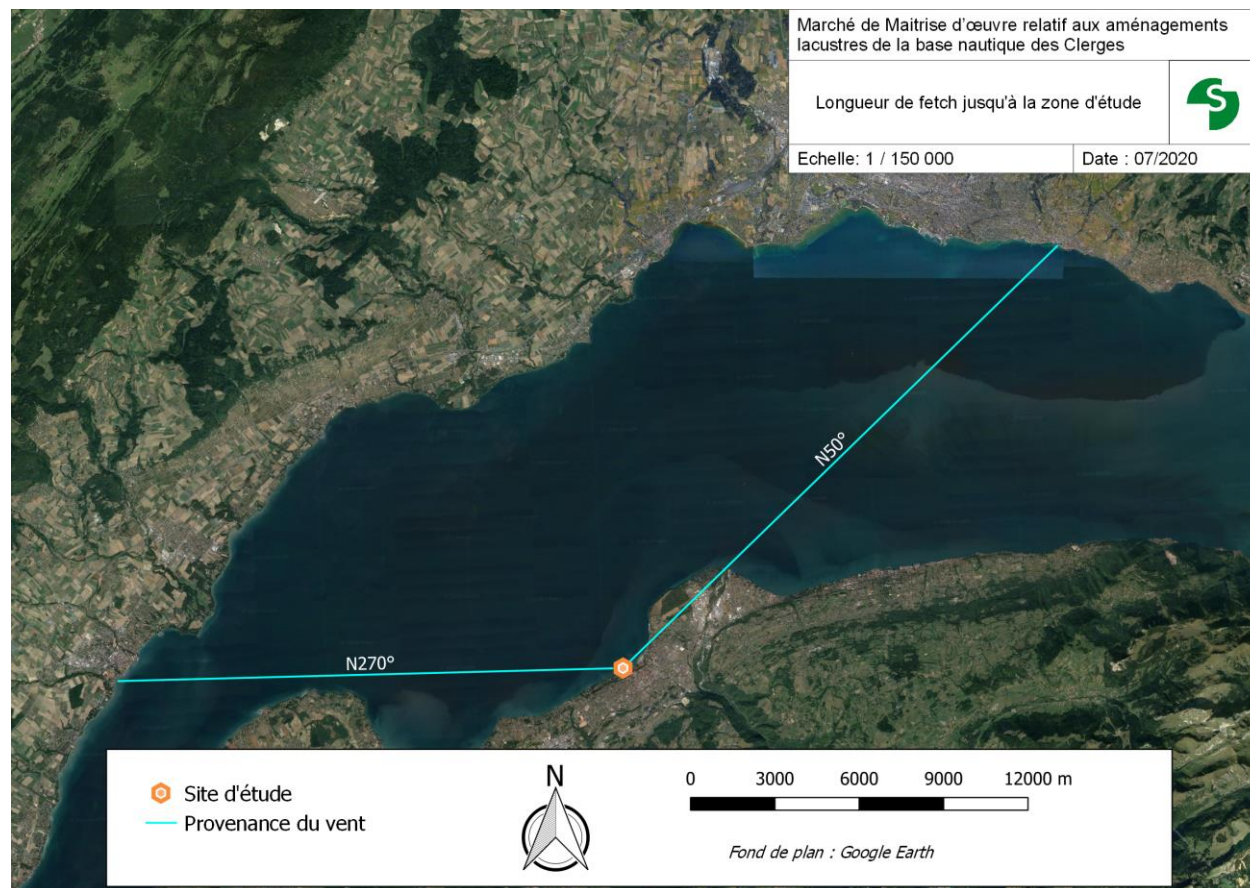
Les vents extrapolés sont associés aux fetchs (distance sur laquelle est levée un clapot ou une houle) les plus longs. Ces fetchs sont présentés page suivante, après la climatologie des vents à la station de Thonon.

Occurrence (nombre d'heures par an) des vents suivant leur vitesse (V10min) et provenance

Vitesses	N360	N20	N40	N60	N80	N100	N120	N140	N160	N180	N200	N220	N240	N260	N280	N300	N320	N340
[16,5 ; 17,5]	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h
[15,5 ; 16,5]	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h
[14,5 ; 15,5]	0h	0h	1h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h
[13,5 ; 14,5]	0h	0h	1h	1h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h
[12,5 ; 13,5]	0h	1h	1h	1h	0h	0h	0h	1h	1h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	1h	0h
[11,5 ; 12,5]	1h	2h	2h	1h	0h	0h	0h	1h	1h	1h	0h	0h	0h	0h	0h	1h	1h	1h
[10,5 ; 11,5]	2h	3h	4h	2h	1h	1h	0h	2h	2h	1h	1h	1h	0h	0h	0h	1h	1h	2h
[9,5 ; 10,5]	4h	3h	7h	3h	2h	2h	1h	4h	4h	1h	1h	1h	0h	0h	1h	1h	2h	4h
[8,5 ; 9,5]	13h	7h	6h	5h	4h	6h	1h	10h	6h	3h	3h	2h	1h	1h	1h	2h	3h	8h
[7,5 ; 8,5]	31h	11h	10h	8h	7h	7h	4h	10h	9h	4h	2h	2h	2h	2h	1h	2h	4h	13h
[6,5 ; 7,5]	41h	20h	12h	11h	8h	12h	5h	16h	11h	4h	5h	4h	4h	2h	3h	3h	4h	15h
[5,5 ; 6,5]	49h	25h	20h	16h	13h	14h	7h	20h	16h	10h	10h	8h	4h	4h	4h	4h	5h	18h
[4,5 ; 5,5]	38h	32h	26h	22h	17h	13h	9h	24h	25h	18h	18h	12h	10h	10h	10h	8h	6h	18h
[3,5 ; 4,5]	30h	31h	31h	22h	18h	16h	12h	34h	39h	43h	28h	17h	16h	20h	17h	10h	5h	15h
[2,5 ; 3,5]	32h	36h	45h	31h	21h	23h	17h	44h	51h	61h	38h	24h	20h	30h	24h	12h	8h	18h
[1,5 ; 2,5]	50h	59h	75h	63h	45h	48h	39h	100h	75h	85h	51h	33h	35h	33h	28h	15h	13h	30h
[0,5 ; 1,5]	81h	110h	140h	125h	99h	95h	146h	564h	260h	189h	106h	70h	59h	46h	35h	30h	32h	59h

Vtotal > 0,5m/s	371h	339h	381h	310h	235h	237h	240h	828h	498h	420h	261h	173h	150h	147h	123h	88h	84h	199h
-----------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-----	-----	------

Vtotal > 9,5m/s	7h	8h	16h	7h	3h	3h	1h	7h	7h	3h	2h	2h	0h	0h	1h	3h	4h	6h
-----------------	----	----	-----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----



Provenance des vents associés aux fetchs les plus longs

Le fetch provenant de Nord-Est est volontairement pris égal à N50° malgré la présence de terres. Cette présence de terre peut effectivement être contournée par réfraction et impacter le site d'étude. La provenance N50° est donc prise afin de conserver une approche sécuritaire.



Thonon-les-Bains

Marché de Maitrise d'œuvre relatif aux aménagements lacustres de la base nautique
des Clerges

1.1 NIVEAU D'EAU

La cote altimétrique du niveau d'eau moyen du lac est de 371.98m NGF. Le niveau moyen est un peu plus élevé en été avec 372.58m NGF, le niveau haut pouvant atteindre 373m NGF. Le niveau est abaissé par le biais des barrages à 371.78m NGF toutes les années bissextiles.

1.2 SURCOTE

La surcote est provoquée par plusieurs types de phénomènes :

- le vent
- une différence de pression atmosphérique
- le déferlement

Pour le cas du vent, la formule suivante a été utilisée :

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{\rho_w g d} \tau_w$$

où :

$$\tau_w = \rho_{air} C_D U_{10}^2$$

avec :

ρ_w : la masse volumique de l'eau ;

g : la gravité ;

d : la hauteur d'eau dans le bassin ;

τ_w : la contrainte de cisaillement due au vent

ρ_{air} : la masse volumique de l'air

U_{10} : la vitesse du vent 10 mètres au-dessus de la surface libre

Après avoir appliqué les calculs au cas du Lac Léman, on obtient des valeurs de l'ordre du centimètre pour les vents les plus forts ($U_{10} = 20 \text{ m/s}$), ce qui est négligeable par rapport aux hauteurs de houles observées dans ces conditions. Nous ne prenons donc pas en compte la surélévation provoquée par le vent dans la suite de nos calculs.

La surcote provoquée par une différence de pression atmosphérique ne sera pas exploitée dans la suite de nos calculs. Etant donné que le diamètre moyen du centre d'une dépression varie entre 150 et 800 km, cette surcote ne s'applique qu'à des plans d'eau ouverts ou suffisamment grands. Le Lac Léman ne dépassant pas les 70 km de longueur, il ne peut pas y avoir une différence de pression atmosphérique suffisamment importante susceptible de provoquer une surcote significative.

De même que pour les deux surcotes précédentes, celle provoquée par le déferlement ne sera pas observée à Thonon. Les digues étant situées à une profondeur d'à peu près 5 mètres, le déferlement n'aura pas lieu.

Aucune surcote ne sera donc retenue dans les calculs qui vont suivre.

3. LES CLAPOTS SOULEVES VERS LA BASE NAUTIQUE DES CLERGES

3.1 VALEURS PROJETS

Une analyse statistique des données sur 11 ans a permis d'estimer des valeurs de projet des vents soufflant depuis les secteurs capables de soulever des clapots vers le site d'étude. On distingue le secteur Nord-Est N20-

N60, et le secteur Nord-Ouest N310 à N360, étendu de façon conservatrice jusqu'au N270. Nous avons effectué une extrapolation en retenant un échantillonnage total des périodes d'une heure des vents les plus intenses sur 11 ans.

Les intensités de vent de projet selon le niveau d'eau du lac et les fetchs associés sont regroupés dans les tableaux ci-après :

Vents de projet pour un niveau du lac élevé (printemps/été) et les fetchs associés					
Directions	Vents annuels	Vents décennaux	Vents cinquantennaux	Vents centennaux	Fetchs associés
N270°	9.0m/s	11.5m/s	14.5m/s	16.0m/s	≈ 18.0 km
N50°	10.0m/s	12.5m/s	15.0m/s	16.0m/s	≈ 21.5 km

Vents de projet pour un niveau du lac bas (automne/hiver) et les fetchs associés					
Directions	Vents annuels	Vents décennaux	Vents cinquantennaux	Vents centennaux	Fetchs associés
N270°	12.0m/s	15.0m/s	18.0m/s	21.0m/s	≈ 18.0 km
N50°	14.0m/s	16.5m/s	18.0m/s	21.0m/s	≈ 21.5 km

Les clapots soulevés par le vent sont ensuite déterminés par l'intermédiaire de formules empiriques dans la partie suivante.

3.2 APPLICATION DES FORMULES

Les clapots levés par le Mistral sont déterminés à l'aide des formules de Sverdrup-Munk-Bretschneider (SMB), extraite du Guide des Enrochements [3]. Ces formules s'expriment comme suit :

$$\frac{g H_s}{U_{10}^2} = 0.283 \tanh \left(0.0125 \left(\frac{g F}{U_{10}^2} \right)^{0.42} \right)$$

$$\frac{g T_s}{U_{10}} = 7.54 \tanh \left(0.077 \left(\frac{g F}{U_{10}^2} \right)^{0.25} \right)$$

$$\frac{g t_{min}}{U_{10}} = 0.00183 \exp[(0.0161 x^2 - 0.3692 x + 2.2024)^{1/2} + 0.8798 x]$$

La période significative étant reliée à la période de pic du spectre par la relation :

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{4}{5}} T_p$$

avec :

- $x = \ln(gF/U_{10}^2)$
- g : pesanteur ;
- U_{10} : vitesse du vent moyen à 10 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer ;
- F : fetch ;

- H_S : hauteur significative du clapot levé par le vent ;
- T_S et T_P : période significative et période de pic du clapot levé par le vent ;
- t_{min} : temps minimal en heure pour former le clapot.

Après avoir appliqué la formule SMB, nous obtenons les clapots de projet présentés dans le tableau ci-après. De même que pour la houle du large, chaque clapot est associé à une surcote correspondant à l'occurrence du clapot.

Clapots levés pour un niveau du lac élevé (printemps/été) – 372,58m IGN69						
Direction du vent	Caractéristiques du clapot	Vents annuels	Vents décennaux	Vents cinquanteennaux	Vents centennaux	
N270°	H_S	0.71m	0.96m	1.26m	1.42m	
	T_S	3.3s	3.8s	4.4s	4.6s	
	T_P	3.5s	4.0s	4.7s	4.9s	
	t_{min}	2.5h	2.2h	2.0h	1.9h	
N50°	H_S	0.87m	1.14m	1.41m	1.53m	
	T_S	3.7s	4.2s	4.6s	4.8s	
	T_P	3.9s	4.4s	4.9s	5.1s	
	t_{min}	2.8h	2.4h	2.2h	2.1h	

Clapots levés pour un niveau du lac bas (automne/hiver) – 371,98m IGN69						
Direction du vent	Caractéristiques du clapot	Vents annuels	Vents décennaux	Vents cinquanteennaux	Vents centennaux	
N270°	H_S	1.01m	1.32m	1.63m	1.95m	
	T_S	3.9s	4.4s	4.9s	5.3s	
	T_P	4.1s	4.7s	5.2s	5.6s	
	t_{min}	2.2h	1.9h	1.8h	1.6h	
N50°	H_S	1.30m	1.58m	1.75m	2.10m	
	T_S	4.4s	4.9s	5.1s	5.5s	
	T_P	4.7s	5.2s	5.4s	5.8s	
	t_{min}	2.3h	2.1h	2.0h	1.9h	

3.3 CARACTERISTIQUES DES CLAPOTS AU PIED DE L'OUVRAGE

3.3.1 Caractéristiques de la plage devant l'ouvrage

Les houles et clapots de projets définis ci-dessus sont caractéristiques de ce qui peut survenir au large de la zone d'étude. La houle résiduelle parvenant au pied du talus, après déferlement, est fonction de paramètres supplémentaires :

- la pente de la plage devant l'ouvrage ;
- la hauteur d'eau au pied de l'ouvrage.

La pente de la plage devant l'ouvrage est déterminée à partir du levé bathymétrique effectué en mai 2020. Ainsi en faisant l'hypothèse d'une houle arrivant frontalement à la digue Nord, les côtes sont environ égales à 361,5m IGN69 à 100 mètres du futur ouvrage et de 367,5m IGN69 au pied du futur ouvrage, soit une pente approximativement égale à 6%. Dans l'hypothèse plus probable d'un clapot arrivant de manière oblique au talus (provenance Nord), cette pente atteint 10% (12m sur 115m). Le plan bathymétrique local permet également de déterminer la profondeur en pied d'ouvrage. Celle-ci est estimée à 367,5m IGN69. Cette hypothèse de profondeur d'eau est appliquée sur tout le linéaire de la digue en différents points du pied du talus.

La profondeur est plus faible au droit du talus Sud, avec une cote environ égale à 371,5m IGN69, la pente est du même ordre de grandeur, soit 5% (côte comprise entre 367m IGN69 et 372m IGN69 sur un linéaire de 100 mètres).

Le tableau suivant résume les hauteurs d'eau exploitées pour le dimensionnement des ouvrages :

Ouvrage	Cote au pied de l'ouvrage (IGN69)	Niveau hivernal 371,98m IGN69 (arrondi à 372,0m IGN69)	Niveau estival 372,58m IGN69 (arrondi à 372,6m IGN69)	Années bissextilles 373m IGN69
Talus Nord	367,5m IGN69	4,5m	5,1m	5,5m
Talus Sud	371,5m IGN69	0,5m	1,1m	1,5m

3.3.2 Houles incidentes au pied de l'ouvrage

Les caractéristiques de la houle au pied de l'ouvrage sont déterminées avec les formules et tables de Battjes et Groenendijk (2000) et les abaques de Van der Meer.

Après avoir déterminé les hauteurs H_{m0} de la houle à l'aide des abaques de Van der Meer en fonction des caractéristiques de la houle au large (H_{S0} , T_{p0}), de la pente de la plage et de la hauteur d'eau, nous utilisons les formules de Battjes et Groenendijk pour déterminer la hauteur intermédiaire de la houle, H_{tr} , et la hauteur quadratique moyenne de la houle H_{rms} :

$$H_{tr} = (0.35 + 5.8 \tan \alpha)h$$

$$H_{rms} = (0.6725 + 0.2025(H_{m0}/h))H_{m0}$$

avec :

- $\tan \alpha$: la pente du fond ;
- h : la hauteur d'eau locale ;
- H_{m0} : hauteur significative de la houle calculée à partir du spectre.

On en déduit ensuite la hauteur intermédiaire adimensionnelle :

$$\bar{H}_{tr} = \frac{H_{tr}}{H_{rms}}$$

La hauteur adimensionnelle est utilisée comme donnée d'entrée du tableau de Battjes et Groenendijk permettant d'évaluer les hauteurs caractéristiques adimensionnelles telles que \bar{H}_{m0} , \bar{H}_S et $\bar{H}_{2\%}$ en fonction de \bar{H}_{tr} . Il est ensuite simple d'en déduire les valeurs de H_{m0} , H_S et $H_{2\%}$ en connaissant H_{rms} :

$$H = \bar{H} \times H_{rms}$$

Ce procédé a été appliqué à tous les clapots de projet pour les 3 hauteurs d'eau au pied de l'ouvrage. Les houles du large sont supposées atténuées uniquement par effet de déferlement. Les effets d'atténuation par réfraction-diffraction sur les fonds avant d'aborder la zone de surf sont négligés, ce qui constitue une hypothèse conservatrice. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-après :

Tableau 1 : Clapots en pied d'ouvrage selon différentes occurrences, provenance de vent et e fonction des saisons (rouge : printemps-été ; bleu : automne-hiver)

H _{1/3} et H _{2%} au pied de la digue Nord obtenues avec la formule de BATTJES avec une pente de 10%										
Cote IGN69 au pied de l'ouvrage	Niveau d'eau	Provenance du vent	Annuelle		Décennale		Cinquantennale		Centennale	
			H _{1/3}	H _{2%}	H _{1/3}	H _{2%}	H _{1/3}	H _{2%}	H _{1/3}	H _{2%}
367,5m IGN69	372,0m IGN69	N50°	1,23m	1,71m	1,53m	2,14m	1,73m	2,41m	2,15m	3,00m
	372,6m IGN69		0,80m	1,12m	1,05m	1,47m	1,32m	1,85m	1,45m	2,02m
	373,0m IGN69		0,80m	1,12m	1,05m	1,47m	1,31m	1,83m	1,44m	2,01m

H _{1/3} et H _{2%} au pied du talus Sud obtenues avec la formule de BATTJES avec une pente de 5%										
Cote IGN69 au pied de l'ouvrage	Niveau d'eau	Provenance du vent	Annuelle		Décennale		Cinquantennale		Centennale	
			H _{1/3}	H _{2%}	H _{1/3}	H _{2%}	H _{1/3}	H _{2%}	H _{1/3}	H _{2%}
371,5m IGN69	372,0m IGN69	N270°	0,61m	0,73m	0,64m	0,78m	0,65m	0,79m	0,62m	0,75m
	372,6m IGN69		0,79m	0,95m	0,94m	1,14m	1,05m	1,27m	1,11m	1,34m
	373,0m IGN69		0,73m	1,00m	1,06m	1,28m	1,25m	1,51m	1,32m	1,60m

4. STABILITE DES ENROCHEMENTS

4.1 EPAISSEUR DE COUCHE ET QUALITE DES ENROCHEMENTS

Aux enrochements dimensionnés dans les paragraphes suivants, sont associées des épaisseurs de couche. Ces épaisseurs sont déterminées sur la base des paramètres suivants :

- Élanement LT : rapport de la longueur maximale, l , à l'épaisseur minimale, d . Pour un cube :
 $LT \text{ moyen} = 2,0$
- Blockiness : Rapport du volume d'un bloc au volume du plus petit parallélépipède qui peut le contenir.
 $BLc \text{ moyen} = 65\%$

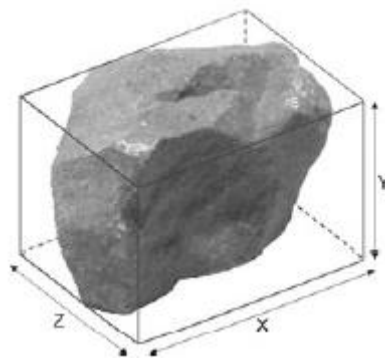


Figure 1 : Type d'enrochement pour lequel le blockiness est égal à 65%

Ces valeurs moyennes couramment rencontrées aboutissent à un coefficient d'épaisseur de couche égal à 0,91 d'après les recherches de Stewart en 2003.

Les épaisseurs orthogonales théoriques sont calculées à partir de ces éléments via la formule suivante :

$$t = nk_t D_{n50}$$

Avec :

n : nombre de couche de blocs ;

k_t : coefficient d'épaisseur de couche ;

D_{n50} : diamètre médian des enrochements.

Cette formule est exploitée dans la suite de ce document.

4.2 STABILITE DE LA CARAPACE DE LA DIGUE NORD – SECTION NON IMMERGEE

4.2.1 Talus avant

4.2.1.1 Formules utilisées

La taille minimale requise pour les blocs d'enrochement de manière à assurer la stabilité des talus est évaluée à partir des formulations classiques de la littérature et des hauteurs H_5 ou $H_{2\%}$ en pied d'ouvrage.

La formule classique de Van der Meer est utilisée pour calculer la taille des enrochements stables devant une houle centennale telle que $H_{1/3} = 2,15\text{m}$ et $H_{2\%} = 3,00\text{m}$ sur la digue Nord et $H_{1/3} = 1,32\text{m}$ et $H_{2\%} = 1,60\text{m}$ sur le talus Sud.

Les formules de Van Der Meer s'expriment de la manière suivante en fonction du critère eau profonde ou eau peu profonde :

En eau profonde (hauteur d'eau $h_{en\ pied} > 3H_{s-en\ pied}$)

Pour le déferlement plongeant ($\xi_m < \xi_{cr}$)

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = c_{pl} P^{0.18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \xi_m^{-0.5}$$

Pour le déferlement gonflant ($\xi_m \geq \xi_{cr}$)

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = c_s P^{-0.13} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} \xi_m^P$$

Avec :

- S_d : niveau de dommage adimensionnel respectant les valeurs suivantes :

Tableau 2 : Niveau de dommage S_d

Talus (cot α)	Niveau de dommage S_d		
	Début de dommage (aucune réparation)	Dommage intermédiaire (nécessite des réparations)	Rupture (noyau à nu)
1.5	2	3 – 5	8
2	2	4 – 6	8

- c_{pl} : coefficient plongeant de valeur moyenne = 6.2 en eau profonde
- c_s : coefficient gonflant de valeur moyenne = 1 en eau profonde
- N : nombre de vagues incidentes, qui dépend de la durée de l'état de mer ;
- P : paramètre de perméabilité nominale de l'ouvrage, compris entre 0,1 (imperméable) et 0,6 (très perméable) ;
- ξ_m : paramètre de déferlement calculé à partir de la période moyenne de la houle T_m :

$$\xi_m = \tan \alpha / \sqrt{(2\pi H_s) / (g T_m^2)}$$

- ξ_{cr} : valeur critique du paramètre de déferlement :

$$\xi_{cr} = \left[\frac{c_{pl}}{c_s} P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha} \right]^{\frac{1}{P+0.5}}$$

En eau peu profonde (hauteur d'eau $h_{en\ pied} \leq 3H_{s-en\ pied}$)

Pour le déferlement plongeant ($\xi_{s-1,0} < \xi_{cr}$)

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = c_{pl} P^{0.18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \left(\frac{H_s}{H_{2\%}} \right) \xi_{s-1,0}^{-0.5}$$

Pour le déferlement gonflant ($\xi_{s-1,0} \geq \xi_{cr}$)

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = c_s P^{-0.13} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \left(\frac{H_s}{H_{2\%}} \right) \sqrt{\cot \alpha} \xi_{s-1,0}^P$$

Avec :

- c_{pl} : coefficient plongeant de valeur moyenne = 8.4 en eau peu profonde

- c_s : coefficient gonflant de valeur moyenne = 1.3 en eau peu profonde
- $H_{2\%}$: hauteur dépassée par 2% des vagues incidentes au pied de l'ouvrage
- $\xi_{s-1,0}$: paramètre de déferlement calculé à partir de la période énergétique de la houle $T_{m-1,0}$:

$$\xi_{s-1,0} = \tan \alpha \sqrt{(2\pi H_s)/(g T_{m-1,0}^2)}$$

4.2.1.2 Résultats

Les critères du talus pris en compte sont les suivants :

- Pente du talus : 3/2 ;
- Masse volumique de la roche : 2 650kg/m³ ;
- Masse volumique de l'eau de mer : 1 000kg/m³.

Les paramètres propres à la formule sont les suivants :

- Niveau de dommage S_d est pris égal à 2 et à 4, correspondant respectivement à un début de dommage et à un dommage intermédiaire ;
- Paramètre de perméabilité nominale de l'ouvrage pris égal à 0,4, correspondant à une carapace posée sur une couche filtre perméable.

Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau 3 : Résultats au droit de la digue Nord

Houle au large de la digue Nord $H_{1/3} = 2,15\text{m}$, $T_P = 5,8\text{s}$			
Paramètre			Résultats
Conditions spécifiques au pied de l'ouvrage			
Hauteur significative de la houle	$H_{1/3}$	[m]	2,15
Hauteur dépassée par 2% des vagues	$H_{2\%}$	[m]	3,00
Période pic de la houle	T_P	[s]	5,8
Hauteur d'eau au pied de l'ouvrage	h	[m]	4,5
Durée de la tempête	D	[h]	9
Paramètres de structure			
Coefficient de perméabilité nominal	P	[-]	0,4
Angle du talus	α	[°]	$\arctan(2/3)$
Formule de Van der Meer en eau peu profonde			
Résultats $S_d = 2$ (début de dommage)			
Minimum diamètre médian	D_{n50}	[m]	0.93m
Minimum masse médiane	M_{50}	[kg]	2123
Blocométrie standard associée (EN 13383)		[kg]	1000 - 3000 (1870 < M_{50} < 2310)
Résultats $S_d = 4$ (dommage intermédiaire)			
Minimum diamètre médian	D_{n50}	[m]	0.81
Minimum masse médiane	M_{50}	[kg]	1401
Blocométrie standard associée (EN 13383)		[kg]	1000 - 3000 (1870 < M_{50} < 2310)
Blocométrie retenue : 1-3t			
Masse médiane	M_{50}	[kg]	2090
Diamètre médian associé	D_{n50}	[m]	0,92
Épaisseur de deux couches	t_d	[m]	1,68

4.2.2 Crête

Selon les recommandations du Guide enrochement, le matériau utilisé sur la crête des ouvrages est normalement le même que celui qui sert à la carapace du talus côté mer (blocométrie en 1-3t dans le cas présent). La largeur de la crête est habituellement déterminée par les méthodes de construction employées (accès des camions ou des grues au-dessus du noyau) ou par les exigences d'exploitation (route ou mur de couronnement au sommet). S'il est possible que la crête soit de largeur réduite, il est néanmoins nécessaire de garantir une largeur minimale égale à (3 à 4) Dn50(m), soit 2,7 à 3,7m.

4.2.3 Talus arrière

La stabilité du talus arrière dépend des franchissements susceptibles de se produire au-delà de la crête. Selon les formules du manuel Eurotop, les franchissements maximums seront observés lors des plus forts coups de vents hivernaux malgré le niveau d'eau bas du lac avec des valeurs calculées de 2,75l/m/s pour une houle centennale. Il convient donc de s'assurer de la stabilité de l'arrière de la digue face à ces franchissements.

4.2.3.1 Formule exploitée

La formule de Van Gent et Pozueta (2005) est exploitée pour la détermination de la blocométrie du talus arrière. La formule est la suivante :

$$D_{n50} = 0.008 \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{-1/6} \left(\frac{u_{1\%} T_{m-1,0}}{\sqrt{\Delta}} \right) (\cot \alpha_{\text{arrière}})^{-2.5/6} \left(1 + 10 \exp \left(\frac{R_{c,\text{arrière}}}{H_s} \right) \right)^{1/6}$$

Avec :

- S_d : niveau de dommage adimensionnel respectant les valeurs suivantes :

Tableau 4 : Niveau de dommage S_d

Talus (cot α)	Niveau de dommage S_d		
	Début de dommage (aucune réparation)	Dommage intermédiaire (nécessite des réparations)	Rupture (noyau à nu)
1.5	2	3 – 5	8
2	2	4 – 6	8

- N : nombre de vagues incidentes, qui dépend de la durée de l'état de mer ;
- Δ : densité relative déjaugée ;
- $u_{1\%}$: vitesse maximum (moyennée sur la profondeur) à l'arrière de la crête (m/s) au cours d'un franchissement dépassé par 1 % des vagues incidentes déterminé par l'équation de Van Gent (2003) ;
- $T_{m-1,0}$: Période énergétique du clapot ;
- $\alpha_{\text{arrière}}$: pente du talus arrière ;
- H_s : hauteur significative de la houle (soit $H_{1/3}$) incidente en pied d'ouvrage (m) ;
- $R_{c,\text{arrière}}$: revanche de la crête par rapport au niveau de l'eau à l'arrière de la crête (m)

4.2.3.2 Résultats

Les résultats suivants sont obtenus pour une largeur de crête égale à 2,7m, soit le minimum préconisé pour la largeur de crête.

Tableau 5 : Résultats au droit de la digue Nord – talus arrière

Houle au large de la digue Nord $H_{1/3} = 2,15\text{m}$, $T_P = 5,8\text{s}$			
Paramètre			Résultats
Conditions spécifiques au pied de l'ouvrage			
Hauteur significative de la houle	$H_{1/3}$	[m]	2,15
Période pic de la houle	T_P	[s]	5,8
Durée de la tempête	D	[h]	5
Paramètres de structure			
Revanche de la crête côté arrière	$R_{C,\text{arrière}}$	[m]	2,18
Angle du talus arrière	$\alpha_{\text{arrière}}$	[°]	$\arctan(2/3)$
Formule de Van der Meer en eau peu profonde			
Résultats $S_d = 2$ (début de dommage)			
Minimum diamètre médian	D_{n50}	[m]	0.41m
Minimum masse médiane	M_{50}	[kg]	189
Blocométrie standard associée (EN 13383)		[kg]	60 - 300 (149 < M_{50} < 236)
Blocométrie retenue : 1-3t			
Masse médiane	M_{50}	[kg]	193
Diamètre médian associé	D_{n50}	[m]	0,42
Épaisseur de deux couches	t_d	[m]	0,76

Le talus arrière de la digue sur sa portion non immergée est très peu soumis aux efforts de la houle. Une blocométrie en 60-300kg de sa carapace peut donc suffire à assurer sa stabilité. Certains critères de validité de la formule ne sont néanmoins pas respectés (cambrure nominale de la houle, pente du talus arrière), des réserves sont donc émises sur ces résultats. De plus la durée d'une tempête, limitée à 5h, pour respecter le critère du nombre de vague pour laquelle la formule est établie, est faible compte tenu des tempêtes plus longues observées sur le lac.

4.3 STABILITE DE LA CARAPACE DE LA DIGUE NORD - SECTION SEMI-IMMERGEE

4.3.1 Formule utilisée

Pour le calcul de la masse des enrochements de la digue semi-immergée, différents critères sont à prendre en compte, tels que la profondeur de l'ouvrage ainsi que sa hauteur pour voir l'influence de la houle. Deux configurations de niveau d'eau, une hivernale, et l'autre estivale seront testées afin d'observer quelle situation est la plus susceptible d'endommager la digue, et d'en déduire la masse des enrochements. Pour cela, nous utilisons la formule de Vidal et al. (2000) qui fournit des résultats intermédiaires en comparaison avec les formules de Burger (1995) et de Kramer et Burchard (2004). Les formules présentent des domaines de validité restreints, des essais en canal à houle sont donc préconisés afin de valider les résultats issus des formules.

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = A + B \frac{R_c}{D_{n50}} + C \left(\frac{R_c}{D_{n50}} \right)^2$$

Les coefficients A, B et C dépendent du segment de la digue concerné et du niveau de dommage. Le Tableau suivant présente les coefficients correspondant au début du dommage selon les essais de Vidal et al. (2000) :

Tableau 6 : Coefficients A, B et C selon les essais de Vidal et al. (Extrait du Guide enrochements)

Segment	A	B	C
Talus avant	1.831	-0.2450	0.0119
Crête	1.652	0.0182	0.1590
Talus arrière	2.575	-0.5400	0.1150
Section totale	1.544	-0.230	0.053

4.3.2 Résultats

Les critères du talus pris en compte sont les suivants :

- Pente du talus : 3/2 ;
- Masse volumique de la roche : 2 650kg/m³ ;
- Masse volumique de l'eau de mer : 1 000kg/m³.

Les résultats de la formule sont valides pour une largeur de crête égale à 6 blocs.

Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau 7 : Résultats au droit de la digue Nord – section semi-immersée

Houle au large de la digue Nord $H_{1/3} = 2,15\text{m}$, $T_P = 5,8\text{s}$ - Niveau d'eau = 372,0m IGN69			
Paramètre			Résultats
Conditions spécifiques au pied de l'ouvrage			
Hauteur significative de la houle	$H_{1/3}$	[m]	2,15
Période pic de la houle	T_P	[s]	5,8
Hauteur d'eau au pied de l'ouvrage	h	[m]	4,5
Durée de la tempête	D	[h]	3,5
Paramètres de structure			
Hauteur de la crête par rapport au niveau d'eau	R_c	[-]	1,4
Angle du talus	α	[°]	$\arctan(2/3)$
Formule de Vidal et al.			
Résultats Talus avant (début de dommage)			
Minimum diamètre médian	D_{n50}	[m]	0.90
Minimum masse médiane	M_{50}	[kg]	1943
Blocométrie standard associée (EN 13383)		[kg]	1000 - 3000 (1870 < M_{50} < 2310)
Résultats crête (début de dommage)			
Minimum diamètre médian	D_{n50}	[m]	0
Minimum masse médiane	M_{50}	[kg]	0
Blocométrie standard associée (EN 13383)		[kg]	0
Résultats talus arrière (début de dommage)			
Minimum diamètre médian	D_{n50}	[m]	0.68
Minimum masse médiane	M_{50}	[kg]	847
Blocométrie standard associée (EN 13383)		[kg]	1000 - 3000 (1870 < M_{50} < 2310)

Tableau 8 : Résultats au droit de la digue Nord – section semi-immergée

Houle au large de la digue Nord $H_{1/3} = 1,44\text{m}$, $T_P = 5,1\text{s}$ - Niveau d'eau = 373,0m IGN69			
Paramètre			Résultats
Conditions spécifiques au pied de l'ouvrage			
Hauteur significative de la houle	$H_{1/3}$	[m]	1,44
Période pic de la houle	T_P	[s]	5,1
Hauteur d'eau au pied de l'ouvrage	h	[m]	5,5
Durée de la tempête	D	[h]	3,5
Paramètres de structure			
Hauteur de la crête par rapport au niveau d'eau	R_c	[-]	0,4
Angle du talus	α	[°]	$\arctan(2/3)$
Formule de Vidal et al.			
Résultats Talus avant (début de dommage)			
Minimum diamètre médian	D_{n50}	[m]	0.53
Minimum masse médiane	M_{50}	[kg]	391
Blocométrie standard associée (EN 13383)		[kg]	300 - 1000 (628 < M_{50} < 802)
Résultats crête (début de dommage)			
Minimum diamètre médian	D_{n50}	[m]	0.48
Minimum masse médiane	M_{50}	[kg]	288
Blocométrie standard associée (EN 13383)		[kg]	300 - 1000 (628 < M_{50} < 802)
Résultats talus arrière (début de dommage)			
Minimum diamètre médian	D_{n50}	[m]	0.40
Minimum masse médiane	M_{50}	[kg]	164
Blocométrie standard associée (EN 13383)		[kg]	60 - 300 (149 < M_{50} < 236)

Les résultats indiquent que le talus avant reste le plus vulnérable face aux clapots. La crête semble la moins exposée.

Les conditions de clapot centennales associées à des niveaux d'eau bas (configuration hivernale) aboutissent à un dimensionnement de la carapace de la digue en 1-3t, tant pour le talus avant que pour le talus arrière.

4.4 STABILITE DU TALUS SUD

4.4.1 Formules utilisées

Les formules exploitées pour le dimensionnement du talus Sud sont les mêmes que celles exploitées pour la section émergée de la digue Nord. Elles sont rappelées ci-après :

En eau profonde (hauteur d'eau $h_{en\ pied} > 3H_{s-en\ pied}$)

Pour le déferlement plongeant ($\xi_m < \xi_{cr}$)

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = c_{pl} P^{0.18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \xi_m^{-0.5}$$

Pour le déferlement gonflant ($\xi_m \geq \xi_{cr}$)

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = c_s P^{-0.13} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} \xi_m^p$$

En eau peu profonde (hauteur d'eau $h_{en\ pied} \leq 3H_{s-en\ pied}$)

Pour le déferlement plongeant ($\xi_{s-1,0} < \xi_{cr}$)

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = c_{pl} P^{0.18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \left(\frac{H_s}{H_{2\%}} \right) \xi_{s-1,0}^{-0.5}$$

Pour le déferlement gonflant ($\xi_{s-1,0} \geq \xi_{cr}$)

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = c_s P^{-0.13} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \left(\frac{H_s}{H_{2\%}} \right) \sqrt{\cot \alpha} \xi_{s-1,0}^p$$

4.4.2 Résultats

Les critères du talus pris en compte sont les suivants :

- Pente du talus : 3/2 ;
- Masse volumique de la roche : 2 650kg/m³ ;
- Masse volumique de l'eau de mer : 1 000kg/m³.

Les paramètres propres à la formule sont les suivants :

- Niveau de dommage S_d est pris égal à 2 et à 4, correspondant respectivement à un début de dommage et à un dommage intermédiaire ;
- Paramètre de perméabilité nominale de l'ouvrage pris égal à 0,4, correspondant à une carapace posée sur une couche filtre perméable.

Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau 9 : Résultats au droit du talus Sud

Houle au large du talus Sud $H_{1/3} = 1,42\text{m}$, $T_p = 4,9\text{s}$			
Paramètre			Résultats
Conditions spécifiques au pied de l'ouvrage			
Hauteur significative de la houle	$H_{1/3}$	[m]	1,32
Hauteur dépassée par 2% des vagues	$H_{2\%}$	[m]	1,60
Période pic de la houle	T_p	[s]	4,9
Hauteur d'eau au pied de l'ouvrage	h	[m]	1,5
Durée de la tempête	D	[h]	9
Paramètres de structure			
Coefficient de perméabilité nominal	P	[-]	0,4
Angle du talus	α	[°]	$\arctan(2/3)$
Formule de Van der Meer en eau peu profonde			
Résultats $S_d = 2$ (début de dommage)			
Minimum diamètre médian	D_{n50}	[m]	0.52m
Minimum masse médiane	M_{50}	[kg]	381
Blocométrie standard associée (EN 13383)		[kg]	300 - 1000 (628 < M_{50} < 802)
Résultats $S_d = 4$ (dommage intermédiaire)			
Minimum diamètre médian	D_{n50}	[m]	0.46
Minimum masse médiane	M_{50}	[kg]	251
Blocométrie standard associée (EN 13383)		[kg]	300 - 1000 (628 < M_{50} < 802)
Blocométrie retenue : 0,3-1t			
Masse médiane	M_{50}	[kg]	715
Diamètre médian associé	D_{n50}	[m]	0,65
Épaisseur de deux couches	t_d	[m]	1,18

4.5 SOUS-COUCHES

4.5.1 Formules utilisées

4.5.1.1 Critère de rétention

Les matériaux fins de la sous-couche ne doivent pas pénétrer la carapace. Le rapport entre le diamètre $D_{15(f)}$ des petits grains de la carapace et le diamètre $D_{85(b)}$ des gros grains du filtre doit être tel que (formule de Terzaghi) :

$$\frac{D_{15f}}{D_{85b}} < 5$$

Les indices 'b' et 'f' indiquent respectivement la sous-couche (plus fine) et la carapace (plus grossière).

4.5.1.2 Critère de perméabilité

Un critère de perméabilité doit être respecté pour que la résistance à l'écoulement soit suffisamment réduite pour empêcher la formation de pressions interstitielles à l'origine de l'instabilité de l'ouvrage.

Dans le cas de matériaux respectant la norme EN 13383, Le guide enrochement propose le critère suivant pour le respect de la perméabilité :

$$\frac{D_{15f}}{D_{15b}} > 1$$

4.5.1.3 Critère de rétention interne des matériaux granulaires

Le critère de Pilarczyk (1998) doit être respecté pour s'assurer que les petits grains d'une couche de matériaux ne doivent pas pouvoir migrer à travers les vides de cette même couche, on dit que la couche doit être géométriquement fermée :

$$\frac{D_{60}}{D_{10}} < 10$$

Ce qui est le cas pour des granulométries standards respectant la norme EN 13383.

4.5.2 Résultats Digue Nord

Les calculs sont réalisés à partir de la blocométrie de la carapace en 1000-3000kg, fournie dans la norme EN 13383 :

Tableau 10 : Calcul des différents critères à respecter par une sous-couche pour la digue Nord

Calcul de la sous-couche de la digue Nord		
Carapace - Blocométrie (1-3t)		
D_{15f}	[m]	0.77
Sous-couche		
Critère de rétention (Terzaghi)		
$D_{85b} > D_{15f}/5$	[m]	>0.15
Blocométrie	[-]	60-300kg $D_{85}=0.53$
Critère de perméabilité		
$D_{15b} < D_{15f}$	[m]	<0.77
Blocométrie	[-]	60-300kg $D_{15}=0.31$
Critère de rétention interne (Pilarczyk(1998))		
Sous-couche - Blocométrie (10-60kg)		
D_{60}	[m]	0.46
D_{10}	[m]	0.28
$D_{60}/D_{10} < 10$	[-]	1.6

La blocométrie standard 60-300kg (norme EN 13383) respecte tous les critères mentionnés ci-avant. Elle répond donc parfaitement aux conditions exigées pour la sous-couche de la digue Nord.

4.5.3 Résultats Talus Sud

Les calculs sont réalisés à partir de la blocométrie de la carapace en 300-1000kg, fournie dans la norme EN 13383 :

Tableau 11 : Calcul des différents critères à respecter par une sous-couche pour le talus Sud

Calcul de la sous-couche du talus Sud		
Carapace - Blocométrie (0,3-1t)		
D_{15f}	[m]	0.52
Sous-couche		
Critère de rétention (Terzaghi)		
$D_{85b} > D_{15f}/5$	[m]	>0.10
Blocométrie	[-]	60-300kg $D_{85}=0.53$
Critère de perméabilité		
$D_{15b} < D_{15f}$	[m]	<0.52
Blocométrie	[-]	60-300kg $D_{15}=0.31$
Critère de rétention interne (Pilarczyk(1998))		
Sous-couche - Blocométrie (10-60kg)		
D_{60}	[m]	0.46
D_{10}	[m]	0.28
$D_{60}/D_{10} < 10$	[-]	1.6

La blocométrie standard 60-300kg (norme EN 13383), appliquée à la sous-couche de la digue Nord respecte tous les critères mentionnés ci-avant et convient également au talus Sud.

4.6 COUCHE FILTRE

La couche filtre située entre le noyau et la sous-couche devra respecter les mêmes critères de filtre que la sous-couche :

Tableau 12 : Critères à respecter par la couche filtre placée sous la sous-couche

Calcul de la couche filtre		
Sous-couche - Blocométrie (60-300kg)		
D_{15f}	[m]	0.31
Couche filtre		
Critère de rétention (Terzaghi)		
$D_{85b} > D_{15f}/5$	[m]	>0.06
Blocométrie	[-]	5-40kg $D_{85}=0.28$
Critère de perméabilité		
$D_{15b} < D_{15f}$	[m]	<0.31
Blocométrie	[-]	5-40kg $D_{15}=0.14$
Critère de rétention interne (Pilarczyk(1998))		
Sous-couche - Blocométrie (10-60kg)		
D_{60}	[m]	0.23
D_{10}	[m]	0.12
$D_{60}/D_{10} < 10$	[-]	1.9

La couche 5-40kg remplit tous les critères de la couche filtre. Une autre alternative est le placement d'un géotextile entre le noyau et la sous-couche en lieu et place de la couche filtre afin d'éviter toute fuite de matériaux à travers la sous-couche. L'application d'un géotextile diminuera la porosité de la digue et du talus et engendrera une baisse de la stabilité de la carapace.

4.7 NOYAU

La couche filtre en 5-40kg sera directement posée sur le noyau. Le noyau devra respecter les mêmes critères de filtre que la sous-couche et la couche filtre. En absence de granulométrie du noyau, nous pouvons préconiser les valeurs suivantes :

Tableau 13 : Critères à respecter par le noyau placé sous la carapace

Calcul de la granulométrie du noyau		
Carapace - Blocométrie (5-40kg)		
D_{15f}	[m]	0.14
Sous-couche		
Critère de rétention (Terzaghi)		
$D_{85b} > D_{15f}/5$	[m]	>0.028
Critère de perméabilité		
$D_{15b} < D_{15f}$	[m]	<0.14
Critère de rétention interne (Pilarczyk(1998))		
$D_{60}/D_{10} < 10$		

4.8 PIED DE DIGUE

La formule de Van der Meer et al. (1995) est utilisée pour étudier la stabilité des blocs de la butée de pied :

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = \left(2 + 6.2 \left(\frac{h_t}{h} \right)^{2.7} \right) N_{od}^{0.15}$$

Avec :

- h_t : la profondeur d'eau au-dessus du pied de digue ;
- h : la profondeur d'eau devant le pied de digue.
- N_{od} : le coefficient de dommage :
 - $N_{od} = 0.5$ représente le début de dommage ;
 - $N_{od} = 2.0$ signifie qu'il se produit un léger aplatissement ;
 - $N_{od} = 4.0$ signifie que le pied s'est complètement aplani.

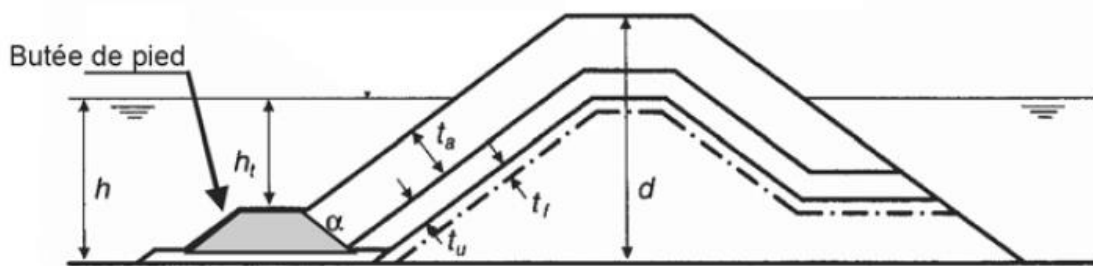


Figure 2 : Coupe classique de digue à talus avec une butée de pied (image Guide Enrochement)

Les paramètres M_{50} , ρ_s , H_s et Δ sont les mêmes que ceux utilisés dans la formule de la carapace.

Nous avons choisi de faire les calculs dans la configuration extrême de hauteur d'eau, celle des années bissextiles, où la côte est située à 371,78 mètres IGN69 (qui se rapproche de la hauteur d'eau en hiver dont les valeurs de la houle seront conservées) pour la digue Nord et le talus Sud.

Nous considérons dans un premier temps des enrochements en pieds de talus identiques à ceux situés en sous-couche (60-300kg) pour déterminer la hauteur d'eau au-dessus du pied du talus, soit des épaisseurs d'enrochements égales à 0,8m pour la digue Nord et le talus Sud.

Pour le calcul de la masse moyenne des enrochements, le critère de dommage a été choisi égal à 0.5, correspondant à un début de dommage, ainsi qu'à 2, équivalent à un dommage acceptable.

Nous obtenons les tableaux résultats suivants.

4.8.1 Digue Nord

Tableau 14 : Résultats au droit de la digue Nord

Clapot au large de la digue Nord $H_{1/3} = 2,10\text{m}$, $T_p = 5,8\text{s}$ – hauteur d'eau = 371,78m IGN69			
Paramètre			Résultats
Conditions spécifiques au pied de l'ouvrage			
Hauteur significative de la houle	$H_{1/3}$	[m]	2,15
Hauteur d'eau au pied de l'ouvrage	h	[m]	4,3
Hauteur d'eau au-dessus du pied	h_t	[m]	3,5
Formule de Van der Meer			
Résultats $N_{od} = 0,5$ (début de dommage)			
Minimum diamètre médian	D_{n50}	[m]	0.26m
Minimum masse médiane	M_{50}	[kg]	46
Blocométrie standard associée (EN 13383)		[kg]	60 - 300 (149 < M_{50} < 236)
Résultats $N_{od} = 2,0$ (dommages acceptables)			
Minimum diamètre médian	D_{n50}	[m]	0.21
Minimum masse médiane	M_{50}	[kg]	25
Blocométrie standard associée (EN 13383)		[kg]	10 - 60 (27 < M_{50} < 47)
Blocométrie retenue : 60-300kg			
Masse médiane	M_{50}	[kg]	193
Diamètre médian associé	D_{n50}	[m]	0,42
Épaisseur de deux couches	t_d	[m]	0,76

La classe 10-60kg pourrait convenir pour la composition du pied de digue selon les hypothèses retenues. Cette classe blocométrique se trouve néanmoins en limite de stabilité au regard des masses médianes associées à cette classe ($27\text{kg} < M_{50} < 47\text{kg}$) et à celle obtenue par les calculs (46kg). Compte-tenu des quelques incertitudes sur la profondeur d'eau devant la butée de pied pouvant faire varier les résultats obtenus, la classe 60-300kg est retenue. Elle correspond ainsi au prolongement de la sous couche pour la formation du pied de digue.

4.8.2 Talus Sud

Le pied de digue du talus Sud serait émergeant par niveau hivernal (environ 30cm d'eau devant le pied de l'ouvrage).

En faibles profondeurs, l'ouvrage est presque toujours en zone de déferlement et la formule de Van der Meer *et al.* ne peut pas s'appliquer.

Une butée de pied n'est pas recommandée car elle risquerait de jouer le rôle de berme et de provoquer le déferlement du clapot sur la carapace.

Dans la situation d'un talus classique comme celui dimensionné, une souille est alors préconisée afin de positionner la semelle, cf. image suivante :

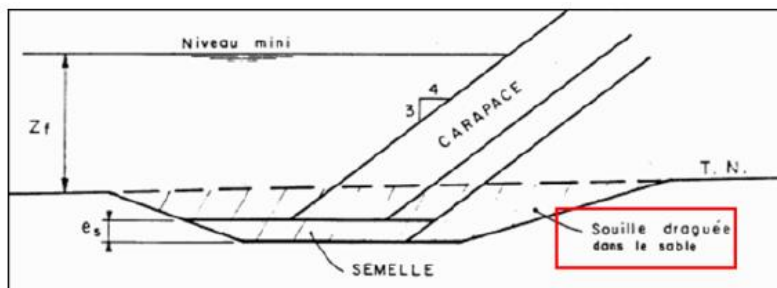


Figure 3 : exemple de souille

La blocométrie exploitée pour la couche filtre en 5-40kg pourra être réexploitée pour la semelle, celle-ci visant à limiter la fuite de matériaux provenant du sol. La profondeur de la semelle dépendra du risque d'affouillement en pied de talus.

4.9 SYNTHÈSE DES BLOCOMÉTRIE CALCULÉES

Pour une meilleure lisibilité, les résultats des blocométries pour les différents ouvrages sont synthétisés dans les tableaux suivants. Tous les profils ont été calculés selon l'hypothèse d'une pente de talus de 3/2.

4.9.1 Blocométrie de la digue Nord (section émergée)

Tableau 15 : Synthèse des résultats pour le dimensionnement de la digue Nord (section émergée) – talus avant

Blocométrie de la digue Nord (section émergée) – talus avant			
Zones	Blocométrie	Nombre de blocs sur l'épaisseur	Epaisseur
Carapace	1000-3000kg	2	1,68m
Sous-couche	60-300kg	2	0,76m
Couche filtre	5-40kg	2	0,36m
Noyau	Suivant les valeurs préconisées		
Butée de pied	60-300kg	3	1,14m
Largeur de la butée de pied sur l'horizontale (4 blocs)			1,5m

Tableau 16 : Synthèse des résultats pour le dimensionnement de la digue Nord (section émergée) - crête

Blocométrie de la digue Nord (section émergée) – crête			
Largeur de crête	Minimum 2,7 à 3,7m pour des enrochements en 1-3t		
Zones	Blocométrie	Nombre de blocs sur l'épaisseur	Epaisseur
Carapace	1000-3000kg	2	1,68m
Sous-couche	60-300kg	2	0,76m
Couche filtre	5-40kg	2	0,36m
Noyau	Suivant les valeurs préconisées		

Tableau 17 : Synthèse des résultats pour le dimensionnement de la digue Nord (section émergée) – talus arrière

Blocométrie de la digue Nord (section émergée) – crête			
Zones	Blocométrie	Nombre de blocs sur l'épaisseur	Epaisseur
Carapace	60-300kg	2	0,76m
Sous-couche	5-40kg	2	0,36m
Noyau	Suivant les valeurs préconisées		

4.9.2 Blocométrie de la digue Nord (section semi immergée)

Les valeurs synthétisées dans le tableau suivant s'appliquent au talus avant, à la crête ainsi qu'au talus arrière.

Tableau 18 : Synthèse des résultats pour le dimensionnement de la digue Nord (section semi-immergée)

Blocométrie de la digue Nord (section semi-immergée)			
Largeur de crête	6 x D _{n50} (validité de la formule), soit 5,5m minimum		
Zones	Blocométrie	Nombre de blocs sur l'épaisseur	Epaisseur
Carapace	1000-3000kg	2	1,68m
Sous-couche	60-300kg	2	0,76m
Couche filtre	5-40kg	2	0,36m
Noyau	Suivant les valeurs préconisées		
Butée de pied	60-300kg	2	0,76m
Largeur de la butée de pied sur l'horizontale (4 blocs)			1,5m

4.9.3 Blocométrie du talus Sud

Tableau 19 : Synthèse des résultats pour le dimensionnement du talus Sud

Blocométrie du talus Sud			
Zones	Blocométrie	Nombre de blocs sur l'épaisseur	Epaisseur
Carapace	300-1000kg	2	1,18m
Sous-couche	60-300kg	2	0,76m
Couche filtre	5-40kg	2	0,36m
Noyau	Suivant les valeurs préconisées		
Semelle	5-40kg	2	0,36m

5. TRANSMISSION DE LA HOULE AU DROIT DE LA DIGUE SEMI-IMMERGEE

5.1 FORMULES UTILISEES

La section semi-immersée de la digue amène des interrogations vis-à-vis de l'agitation résiduelle résultante dans la zone située à l'arrière de la digue.

Une approche relativement simpliste (CUR/CIRIA, 1991), permet une première estimation des coefficients de transmission de la houle vis-à-vis des différentes occurrences :

$$\begin{aligned} -2.00 < R_C/H_S < -1.13 & \quad C_T = 0.80 \\ -1.13 < R_C/H_S < 1.2 & \quad C_T = 0.46 - 0.3 R_C/H_S \\ 1.2 < R_C/H_S < 2.0 & \quad C_T = 0.10 \end{aligned}$$

L'exploitation des formules plus précises nécessiterait une meilleure connaissance du comportement des clapots via une modélisation numérique des différentes occurrences (provenance au droit de la digue sous l'influence de la réfraction, ...).

Les résultats présentés sont donc une première estimation.

5.2 RESULTATS

Les résultats sont calculés pour une côte de crête de l'ouvrage égale à 373,38m IGN69. Ils sont présentés dans les tableaux suivants pour les différentes occurrences de clapots calculées au début du présent document :

Tableau 20 : Coefficients de transmission et hauteur significatives résultantes au droit de la digue semi-immersée

Niveau d'eau (m IGN69)	Rc (m)	Ct			
		annuelle	décennale	cinquantennale	centennale
372.0	1.38	0.12	0.19	0.22	0.27
372.6	0.78	0.17	0.24	0.28	0.30
373.0	0.38	0.32	0.35	0.37	0.38

Niveau d'eau (m IGN69)	Rc (m)	Hs transmis (m)			
		annuelle	décennale	cinquantennale	centennale
372.0	1.38	0.15	0.29	0.38	0.58
372.6	0.78	0.13	0.25	0.37	0.43
373.0	0.38	0.25	0.37	0.49	0.55

Les coefficients de transmission sont compris entre 0,12 et 0,38, respectivement pour un niveau d'eau bas associé à une houle annuelle et un niveau d'eau haut associé à une houle centennale. Les agitations résiduelles résultantes sont relativement faibles, mais existantes pour les clapots annuels. Ces agitations sont plus élevées pour des occurrences plus rares et pourront être pénalisantes en termes d'agitations au droit de la cale de mise à l'eau.

Une digue semi-immersée pourra donc conduire à des journées d'impossibilité d'exploiter la cale de mise à l'eau.

6. QUALITE DES EAUX ET SEDIMENTOLOGIE

Compte tenu des conditions de vent décrite plus haut, il faut s'attendre à des régimes de courant contrasté entre les vents les plus fréquents de Sud-Est ou lors des épisodes de « bise » de Nord-Est ou de « Joran » de Nord-Ouest.

Le plus fréquemment donc, il faut s'attendre à ce que les courants soient orientés vers le nord (du sud vers le nord), tandis que pour les épisodes de « bises » ou de « Joran » les courants soient orientés vers le sud. (nord vers le sud)

En ce sens, le projet prévoit des ouvertures au nord et au sud de la base nautique qui permettront d'assurer un renouvellement des masses d'eau, ce qui est positif du point de vue de la qualité des eaux et de la sédimentologie. En effet, les eaux ne risquent pas d'être confinées dans un coin d'une darse fermée qui favoriserait la sédimentation.

Tel qu'est présenté le projet d'aménagement de la base nautique, du fait des ouvertures au nord et au sud, les conditions de sédimentation et de qualité des eaux seront améliorées par rapport aux conditions actuelles.



setec
international

www.setec.fr

setec international

Siège social à Vitrolles

5 Chemin des gorges de Cabriès
13127 VITROLLES
FRANCE

Tél +33 4 86 15 60 00
Fax +33 4 86 15 61 23
setecinter-vit@setec.fr

Etablissement de Paris

Immeuble Central Seine
42-52 quai de la Rapée
75583 PARIS Cedex 12
FRANCE

Tél +33 1 82 51 69 01
Fax +33 1 82 51 46 35
setecinter@setec.fr

Etablissement de Lyon

Immeuble Le Crystallin
191-193 cours Lafayette
69458 LYON Cedex 06
FRANCE

Tél +33 4 27 85 48 10
Fax +33 4 27 85 48 11
setecinter@setec.fr

Etablissement de Bordeaux

42-44 rue Général de Larminat
33000 BORDEAUX
FRANCE

Tél +33 (0)5 24 54 00
Fax +33 (0)5 24 54 55 46
secretaires.bordeaux@inter.setec.fr

