

**Etudes hydrodynamiques pour
l'entretien du Port Dauphin
à Lugrin sur le lac Léman**

Rapport d'étude

**Entreprise Pascal Martin
Port Martin
1428 Route Nationale
74500 Maxilly sur Léman
Tél. : 04.50.75.21.63 – Fax. : 04.50.70.75.96
Courriel : r.chaix@negri-france.com**

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 10-12-24 C.24.012 RET.24.012.01.01 MARTIN_PortDauphin_RET24012.01.01.doc
courriel : jean.bougis@wanadoo.fr		Internet : sci-ingenerie.com – j.bougis@scs-ingenerie.com

Classification	
Non Classifié	X
Diffusion Restreinte	
Confidentiel Défense	
Confidentiel Industrie	

Identification	
Numéro du Projet	C.24.012
Numéro du Document	RET.24.012.01.01
Numéro du Marché	-
Date du Marché	-

Cabinet Conseil Jean Bougis, 32-34 Chemin du Moulin 06650 Opio – 04.93.77.74.22

Etudes hydrodynamiques pour l'entretien du Port Dauphin à Lugrin sur le lac Léman
Rapport d'étude

Client :	Pascal Martin		
Représenté par :	Directeur		
Nom :	M ^r Robert Chaix		
Tél. :	+33.(0)4.50.75.21.63		
Fax :	+33.(0)4.50.70.75.96		
GSM :	+33.(0)6.79.52.48.47		
Courriel :	r.chaix@negri-france.com		

Préparé par	Jean Bougis
Vérifié par	
Approuvé par	

Diffusion
M ^r Robert Chaix

Mises à jour			
Référence	Date	Nom	Objet
24.012.01.01	10-12-24	J. Bougis	Création

Sommaire

1. Contexte de l'étude	4
2. Objet de l'étude	5
2.1. Situation géographique	5
2.2. Programme du Maître d'ouvrage	6
3. Note d'hypothèses	9
3.1. Critères d'agitation admissible	9
3.2. Niveaux de référence	10
3.2.1. Systèmes de nivellement	10
3.2.2. Niveau d'eau du lac	10
3.2.3. Basculement du plan d'eau	11
3.2.4. Seiches	12
3.3. Caractéristiques du vent	12
3.3.1. Vent réglementaire	12
3.3.2. Statistique des vents à Thonon-les-Bains	13
3.3.3. Durées de retour des vents extrêmes	14
3.4. Agitations du plan d'eau	19
3.4.1. Agitations levées sur les fetchs	19
3.4.2. Batillage des navires	20
3.5. Donnée sédimentaires	20
3.5.1. Caractéristiques géomorphologiques	20
3.5.2. Nature des sédiments	20
3.5.3. Apports sédimentaires	21
3.5.4. Caractéristiques des plages à galets	23
4. Dimensionnement fonctionnel des digues	25
4.1. Nécessité de la présence de digues vis-à-vis de l'agitation	25
4.2. Nécessité de la présence de digues vis-à-vis de l'engrèvement	25
4.3. Evolution du trait de côte	25
4.4. Mécanisme d'engrèvement du port Dauphin	26
4.5. Plan masse des digues	30
4.5.1. Etendue des digues vers le Nord	30
4.5.2. Direction des digues	30
4.5.3. Largeur de la passe d'entrée	30
4.6. Cote d'arase des digues	31
5. Dimensionnement structurel des digues	32
6. Documents de référence	33

1. Contexte de l'étude

Madame Carine Dauphin a fait l'acquisition d'une propriété, en bordure du lac Léman, sur la commune de Lugrin. Cette propriété comprend un petit port d'environ cinq cents mètres carrés qui est principalement utilisé l'été pour le stationnement d'un bateau de plaisance.

Pour pouvoir abriter son bateau, Madame Carine Dauphin a fait draguer l'entrée de son port par la société Pascal Martin. Cependant, le port s'est, à nouveau, rapidement engravé et, après quelques mois, l'accès du bateau n'est déjà plus possible.

A environ 120 m plus à l'Ouest, le petit port de Monsieur Eric Jacquier, sensiblement de même importance, mais dont les digues de protection n'ont pas les mêmes orientations, n'est pas sujet au même engravement.

L'analyse de photographies anciennes montre également que l'entrée du port Dauphin, dont les digues avait la même orientation que celles du port Jacquier, a été modifiée il y a quelques décennies (environ 40 ans à 50 ans).

Madame Carine Dauphin, agissant en qualité de Maître d'ouvrage, souhaite donc faire rétablir l'ouverture à l'identique. Toutefois, cette démarche est soumise à l'autorisation de la Direction Départementale des Territoires (DDT). Elle est également subordonnée à la présentation et à l'acceptation d'un dossier concernant un éventuel impact environnemental significatif.

Madame Carine Dauphin a donc demandé au Cabinet Jean Bougis d'analyser la pertinence, vis-à-vis des aspects hydrodynamiques et hydro-sédimentaires, de la remise de l'ouverture du port dans son état ancien.

Ce rapport, rédigé à la demande de Madame Carine Dauphin, a pour objet de :

- vérifier les données naturelles caractéristiques et établir une note d'hypothèse,
- analyser si la remise de l'ouverture dans son état ancien, permettrait de diminuer significativement la vitesse de son engravement,
- proposer d'autres options susceptibles de trouver une solution durable ; et, de manière générale, apporter à Madame Carine Dauphin tout conseil relevant des compétences du Cabinet Jean Bougis.

2. Objet de l'étude

2.1. Situation géographique

La commune de Lugrin est située dans le département de la Haute-Savoie (74), sur la côte sud du lac Léman entre Evian-les-Bains à l'Ouest et Saint-Gingolph à l'Est.



Figure 2.1 : Situation de port Dauphin (Google Earth)

Le lac Léman a une superficie de 580 km². Sa longueur, sensiblement Est-Ouest, est de 72.3 km entre Genève et Villeneuve, tandis que sa largeur maximale est de 13.8 km entre Ouchy et Evian. Sa profondeur moyenne est de 152.7 m et sa profondeur maximale est de 309.7 m entre Lausanne et Evian.

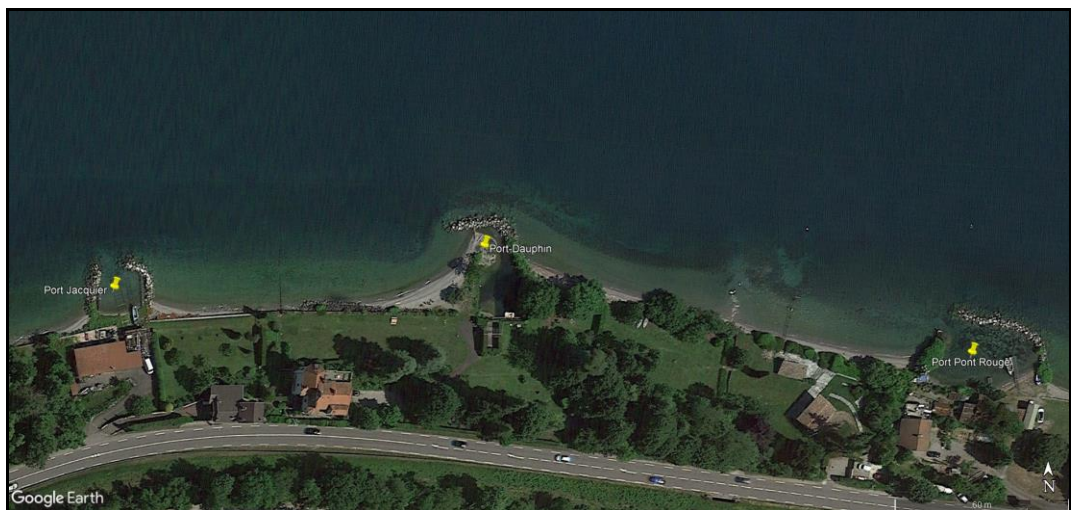


Figure 2.2 : Côte au voisinage du port Dauphin le 12-06-2021 (Google Earth)

La figure 2.2 montre la côte au voisinage du port Dauphin, entre le port Jacquier 125 m à l'Ouest et le port Pont Rouge 170 m à l'Est.

2.2. Programme du Maître d'ouvrage

Malgré son dragage récent, le port Dauphin s'est, à nouveau, rapidement engravé et, après quelques mois, l'accès du bateau n'est déjà plus possible.

A environ 120 m plus à l'Ouest, le petit port Jacquier, sensiblement de même importance, mais dont les digues de protection n'ont pas les mêmes orientations, n'est pas sujet au même engravement (voir figure 2.2).

Les photographies aériennes verticales, communiqués par le port Dauphin, présentent des vues de différentes époques : avant 1976, en 1976, 1983, 1994 et 2011.



Figure 2.3-1 : Vue du port Dauphin avant 1976 (Photo port Dauphin).



Figure 2.3-2 : Vue du port Dauphin en 1976 (Photo port Dauphin).

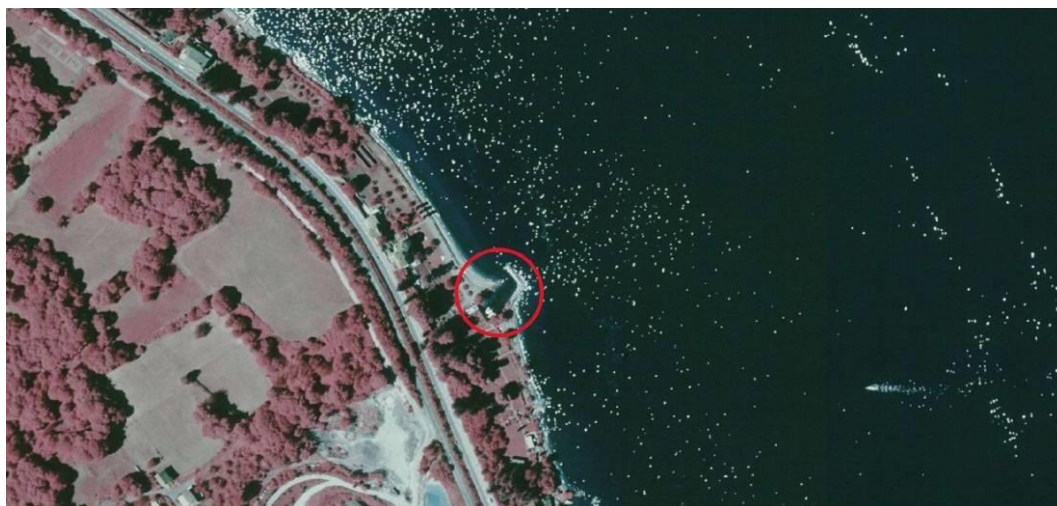


Figure 2.3-3 : Vue du port Dauphin en 1983 (Photo port Dauphin).



Figure 2.3-4 : Vue du port Dauphin en 1994 (Photo port Dauphin).



Figure 2.3-5 : Vue du port Dauphin en 2011 (Photo port Dauphin).

L'analyse de ces photographies anciennes montre que :

- le port Jacquier a été construit entre 1983 et 1994 ;
- jusqu'à une date comprise entre 1976 et 1983, les digues d'entrée du port Dauphin, avaient la même orientation que celles du port Jacquier actuel ;
- entre 1976 et 1983, les digues d'entrée du port Dauphin ont été modifiées, soit il y a environ 45 ans.

Le Maître d'ouvrage, envisage donc faire rétablir l'ouverture à l'identique. Toutefois, cette démarche est soumise à l'autorisation de la Direction Départementale des Territoires (DDT). Elle est également subordonnée à la présentation et à l'acceptation d'un dossier concernant un éventuel impact environnemental significatif.

Le Maître d'ouvrage a donc demandé au Cabinet Jean Bougis d'analyser la pertinence, vis-à-vis des aspects hydrodynamiques et hydrosédimentaires, de la remise de l'ouverture du port dans son état ancien.

Ce rapport, rédigé à la demande du Maître d'ouvrage, a pour objet de :

- vérifier les données naturelles caractéristiques et établir une note d'hypothèse,
- analyser si la remise de l'ouverture dans son état ancien, permettrait de diminuer significativement la vitesse de son engravement,
- proposer d'autres options susceptibles de trouver une solution durable ; et, de manière générale, apporter à Madame Carine Dauphin tout conseil relevant des compétences du Cabinet Jean Bougis.

3. Note d'hypothèses

3.1. Critères d'agitation admissible

Pour apprécier la sécurité et le confort procurés par un abri, il est d'usage de définir des critères d'agitation acceptables en fonction de la durée de retour des états de mer.

Le tableau 3.1 rassemble les hauteurs significatives maximales admissibles une à deux fois par an pour qu'un plan d'eau puisse être considéré comme satisfaisant en termes de confort d'après l'AIPCN (1995) [PIA95].

Longueur des bateaux (m)	Houles de travers pour les bateaux		Houles de face pour les bateaux	
	Période (s)	Hauteur HS	Période (s)	Hauteur HS
de 4 m à 10 m	< 2.0 s	20 cm <	2.5 s	20 cm
	2.0 s – 4.0 s	10 cm	2.5 s – 4.0 s	15 cm
	> 4.0 s	15 cm	> 4.0 s	20 cm
de 10 m à 16 m	< 3.0 s	25 cm	< 3.5 s	30 cm
	3.0 s – 4.0 s	15 cm	3.5 s – 4.5 s	20 cm
	> 5.0 s	20 cm	> 5.5 s	30 cm
20 m	< 4.0 s	30 cm	< 4.5 s	30 cm
	4.0 s – 6.0 s	15 cm	4.5 s – 7.0 s	25 cm
	> 6.0 s	25 cm	> 7.0 s	30 cm

Tableau 3.1 : Critères de confort pour un port de plaisance (AIPCN).

L'AIPCN (1981) [PIA81] fait également mention des limites considérées comme admissibles par différents organismes :

- 40 cm pour la CST (Commission Spécialisée de Terminologie) du Ministère de l'Équipement français,
- 30 à 45 cm à l'intérieur du port pour l'US Army Corps of Engineers, et conclut sur des agitations résiduelles acceptables en termes de confort de 20 à 30 cm, et jusqu'à 60 cm en termes de sécurité.

Le tableau 3.2 indique hauteurs significatives associées aux durées de retour qu'il est recommandé de ne pas dépasser par le standard Nord américain des ports de plaisance.

Durée de retour	Hauteur de vague significative - H_s
1 semaine	15 cm
1 an	30 cm
50 ans	60 cm

Tableau 3.2 : Critères d'agitation admissibles dans un port de plaisance (standard Nord américain)

Cette même hauteur significative inférieure à 30 cm pour une occurrence annuelle est préconisée par le secrétariat à la mer [SEM92].

D'après l'ensemble des normes proposées, pour des bateaux de type « plaisance », on retiendra la valeur de 30 cm comme applicable dans des conditions de houle annuelles.

Par tempête décennale, on admettra 40 cm à 50 cm d'agitation dans les zones de mouillage, offrant une certaine marge sur la sécurité des bateaux.

Le tableau 3.3 propose une synthèse de ces différents critères pour les projets de ports de plaisance.

Critère	Confort		Sécurité
Durée de retour	1 an	10 ans	100 ans
Agitation significative maximale dans les zones de mouillage	0.30 m	0.40 m	0.50 m
Agitation significative maximale dans les chenaux et accès	0.50 m	0.60 m	0.80 m

Tableau 3.3 : Critères d'agitation de confort et de sécurité pour les ports de plaisance

3.2. **Niveaux de référence**

3.2.1. **Systèmes de nivellement**

Les altitudes du nivellement général de la France (NGF/IGN69) sont définies par rapport au repère fondamental M.AC-0-VIII, implanté à l'intérieur du bâtiment du marégraphe de Marseille à partir des observations réalisées entre le 01-02-1885 et le 01-01-1897.

Les altitudes du système de nivellement fédéral de la Suisse (NF02) sont définies par rapport au repère de la Pierre de Niton (RPN), située dans la rade de Genève et coté à +372.60 m au-dessus du niveau moyen de la mer mesuré au marégraphe de Marseille. elles sont exprimées en mètres sur mer (m s.m.).

Le niveau IGN69 est égal au niveau NF02 + 0.32 m.

3.2.2. **Niveau d'eau du lac**

Le niveau d'eau dans le lac est imposé par le barrage de Seujet, à Genève, lequel est muni d'une écluse pour permettre la continuité de la navigation entre le Rhône et le lac.

Le niveau d'eau moyen du lac est maximal de juin à décembre où il s'établit entre les cotes 372.15 m s.m. et 372.30 m s.m. (372.47 m NGF et 372.62 m NGF) et minimal de mars à avril où il s'établit entre les cotes 371.60 m et 371.75 m (371.92 m NGF et 372.07 m NGF).

Chaque année bissextile, de mars à avril, le niveau bas est abaissé entre les cotes 371.45 m et 371.60 m (371.77 m NGF et 371.92 m NGF) pour permettre l'entretien des berges.

Le niveau du lac varie donc entre 371.77 m NGF et 372.62 m NGF.

3.2.3. Basculement du plan d'eau

Les écarts de pression atmosphérique sur l'étendue du lac et le vent persistants engendrent un basculement du plan d'eau dont la surface libre s'incline et qui génère une circulation d'eau de compensation mue par la pression hydrostatique (Archimède).

3.2.3.1. Surcote due au champ de pression atmosphérique

La pression atmosphérique normale est de 1013.25 hPa au niveau de la mer et de 969.36 hPa à 372 m d'altitude.

Un gradient horizontal de pression de 1 hPa/100 km engendre un vent dont la vitesse est de l'ordre de 20 km/h (5.56 m/s). Comme nous le verrons, ci-après, le vent moyen sur 10 mn maximal mesuré est de l'ordre de 16.50 m/s ; ce qui correspond à un gradient de pression de l'ordre de 3 hPa/100 km et à un maximum de 2 hPa sur la longueur du lac Léman de 70 km.

Cet écart de pression engendre une dénivelée de la surface libre de l'ordre de 2 cm entre les extrémités du lac. Les variations du champ de pression atmosphérique général ne sont donc pas susceptibles d'engendrer directement des surcotes significatives sur le lac Léman.

3.2.3.2. Surcote due au vent

Le gradient de pression engendre un vent qui souffle au-dessus de la surface libre. L'eau, entraînée en surface par le vent, s'accumule dans la partie du plan d'eau sous le vent en faisant ainsi monter le niveau de plusieurs dizaines de centimètres. Sous l'effet de la pression hydrostatique, un système de courants de retour prend alors naissance au fond et sur les côtés du plan d'eau. Les différences de niveau entre les extrémités du plan d'eau dépendent de son étendue et de sa profondeur. C'est le phénomène de basculement du plan d'eau.

Le gradient de la dénivelée η peut être évalué à partir de la formulation de Hsu (1988) :

$$\frac{d\eta}{dx} = \frac{1}{\rho_e g h} \tau_v \quad (3.1)$$

expression dans laquelle :

- $\rho_e = 1000 \text{ kg/m}^3$ est la masse volumique de l'eau,
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ est l'accélération de la pesanteur terrestre,
- $h = 152.7 \text{ m}$ est la profondeur moyenne du plan d'eau,
- τ_v est la contrainte de frottement du vent sur la surface libre qui s'écrit :

$$\tau_v = \frac{1}{2} \rho_a C_f U_{10}^2 \quad (3.2)$$

où :

- $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$ est la masse volumique de l'air,
- C_f est le coefficient de frottement du vent sur le plan d'eau,
- U_{10} est la vitesse moyenne du vent à 10 m d'altitude.

La dénivelée que peut atteindre le plan d'eau pour un fetch de longueur F s'écrit donc :

$$\eta = \frac{\rho_a C_f U_{10}^2}{2 \rho_e g h} F \quad (3.3)$$

Le coefficient de frottement étant de l'ordre de $C_f = 5 \cdot 10^{-3}$, pour une vitesse du vent de $U_{10} = 16.5 \text{ m/s}$, le basculement du plan d'eau peut atteindre une hauteur de l'ordre de 4 cm selon le grand axe du lac (72 km) et de l'ordre de 1 cm selon son petit axe.

Les basculements uniformes du plan d'eau ne sont donc pas susceptibles d'engendrer directement des surcotes significatives sur le lac Léman.

3.2.4. Seiches

Les seiches sont des ondes de ballonnement du lac qui correspondent à des oscillations des modes propres ; ce qui explique leurs périodes fixes (73 mn en longitudinal et 12 mn en transversal).

D'après la théorie initialisée par Vaucher¹ et amendée par Forel², ces modes propres sont excités par des variations locales de la pression et du vent sur le lac (variations d'ensoleillement, instabilités atmosphériques, turbulences de grande échelle du vent, etc.).

L'amplitude (crête à creux) de ces seiches atteint couramment 0.30 m, mais des valeurs historiques observées des seiches longitudinales sont bien plus importantes :

- 1.62 m le 16-09-1600 (Fatio du Duillier),
- 1.48 m le 03-08-1763 (H.B. de Saussure),
- 2.15 m les 02 et 03-10-1841 (Vénié).

3.3. Caractéristiques du vent

3.3.1. Vent réglementaire

Le département de la Haute-Savoie (74) est classé dans la zone 2 (nouvelle classification de 1999) du règlement Neige et Vent (Règles définis-

¹ Vaucher J. P. E. (1803 à 1804) Mémoire sur les seiches du lac de Genève, *Mémoire de la Société de Physique de Genève*, t. VI. p. 35.

² Forel F.A. (1875) Les seiches : vagues d'oscillation fixe des lacs, *Actes de la Société Helvétique des Sciences*, n°58.

sant les effets de la neige et du vent sur les constructions et annexes), applicables aux constructions terrestres [RNV02]³.

Ces règles indiquent que la vitesse du vent à prendre en compte en zone 2 est de :

- 31.3 m/s (112.7 km/h) en conditions normales,
- 41.4 m/s (149.1 km/h) en conditions extrêmes.

Le rapport entre ces vitesses est égal à 1.32, ce qui est conforme à l'idée que le vent « normal » est le vent moyen sur une heure tandis que le vent « extrême » correspond à une rafale de 3 s.

En zone 2, le coefficient de majoration pour sites exposés est de 1.30 sur les efforts, c'est-à-dire de 1.14 sur les vitesses. En site exposé, la vitesse du vent à prendre en compte est donc de :

- 35.7 m/s (128.5 km/h) en conditions normales,
- 47.2 m/s (169.9 km/h) en conditions extrêmes.

Cette vitesse de vent s'entend à 10 m d'altitude.

Le littoral est considéré comme site exposé sur une profondeur de 6 km.

3.3.2. Statistique des vents à Thonon-les-Bains

Pour évaluer les valeurs de vents à prendre en compte, des données statistiques ont été acquises auprès de Météo France. Elles concernent les enregistrements effectués à la station de Thonon-Inra⁴ pendant une période de 14 années du 01-01-1996 au 31-12-2009.

Les données fournies sont exprimées en nombre de cas observés, sans arrondi :

- les vitesses de vent horaire à 10 m d'altitude, moyenné sur 10 mn,
- les vitesses maximales de vent instantané dans l'heure à 10 m d'altitude.

Les secteurs angulaires vont de N10° à N360° par pas de 10°.

Les tableaux 3.4.1 et 3.4.2 présentent les valeurs fournies par Météo France. Les enregistrements sont effectués les heures synoptiques UTC : 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21.

Le nombre total de cas est égal à 40912 :

- les cas manquants pour le vent moyenné sur 10 mn sont au nombre de 4328 (10.58 %) ;
- les cas manquants pour le vent instantané sont au nombre de 6541 (15.99 %).

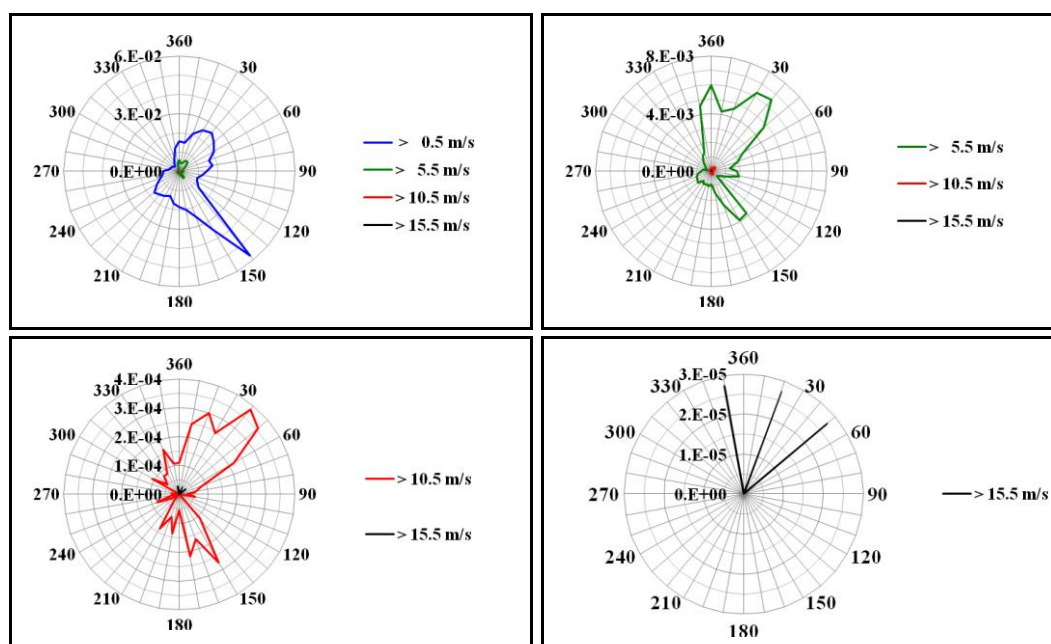
Les figures 3.1 présentent les courbes de fréquence des vents dépassant respectivement 0.5 m/s, 5.5 m/s, 10.5 m/s et 15.5 m/s.

³ Les Eurocodes ont supplanté l'usage des NV65 pour les constructions, mais cette référence reste pertinente pour les applications maritimes.

⁴ Indicatif : 74281001, alt : 376m, lat : 46°22'00"N, lon : 06°27'18"E

Les vents les plus fréquents viennent du Sud-Est, mais ceux-ci n'engendrent pas d'agitation sur la rive sud du Lac Léman. Les agitations les plus sévères sont soulevées par la « Bise » de Nord-Est, par la « Bise noire » de Nord et par le « Joran » de Nord-Ouest. Le secteur d'incidence de la Bise est d'ailleurs le plus fréquent en ce qui concerne les vents les plus intenses.

Globalement, la rive Sud du lac Léman n'est pas soumise à des vents très forts puisque la vitesse du vent à 10 m au-dessus du sol moyenné sur 10 mn n'a pas dépassé 16.5 m/s entre 1996 et 2009.



Figures 3.1 : Vitesse du vent à Thonon-INRA .

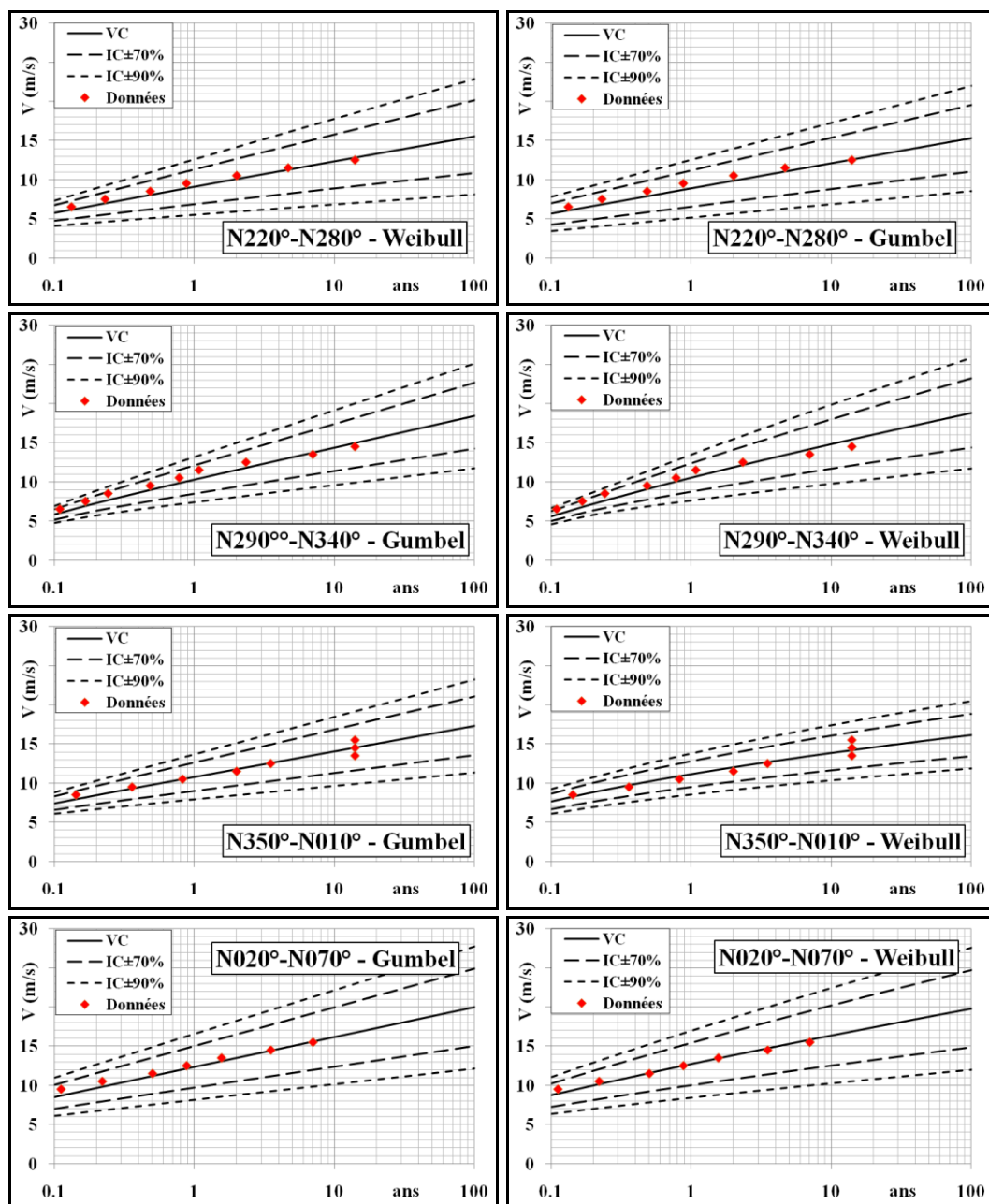
3.3.3. Durées de retour des vents extrêmes

Les données statistiques ont été traitées, pour déterminer les valeurs extrêmes correspondant à différentes durées de retour, d'une part, au moyen de l'asymptote de Gumbel et, d'autre part, au moyen de l'asymptote de Weibull.

Les incidences ont été regroupées par secteurs homogènes :

- le vent de Sud-Ouest à Ouest : N220° à N280°
- le Joran de Nord-Ouest : N290° à N340° ;
- le vent du Nord : N350° à N010° ;
- la Bise de Nord-Est : N020° à N070°.

Le tableau 3.5 présente les résultats de ces calculs qui sont matérialisés sur les figures 3.2.



Figures 3.2 : Durées de retour de la vitesse du vent par secteurs homogènes.

Tableau 3.4.1 : Vitesse du vent tri-horaire, moyenné sur 10 mn à 10 m au-dessus du sol

Tableau 3.4.2 : Vitesse maximale du vent instantané dans l'heure à 10 m au-dessus du sol

Durée de retour (an)	Gumbel					Weibull				
	IC 90%	IC 70%	Valeur centrale	IC 70%	IC 90%	IC 90%	IC 70%	Valeur centrale	IC 70%	IC 90%
Vent, Maurabia et Vent Blanc : N220° - N280°										
0.1	3.5	4.3	5.7	7.0	7.8	4.1	4.7	5.7	6.8	7.3
1	5.2	6.6	8.9	11.2	12.6	5.6	6.9	9.1	11.3	12.6
2	5.7	7.3	9.9	12.5	14.0	6.0	7.5	10.1	12.7	14.2
5	6.4	8.2	11.1	14.1	15.9	6.5	8.3	11.4	14.4	16.3
10	6.9	8.8	12.1	15.4	17.3	6.9	8.9	12.3	15.8	17.8
20	7.4	9.5	13.1	16.6	18.7	7.3	9.5	13.3	17.1	19.3
50	8.1	10.4	14.3	18.3	20.6	7.8	10.3	14.6	18.8	21.4
100	8.6	11.1	15.3	19.5	22.0	8.2	10.9	15.5	20.2	22.9
Joran : N290° - N340°										
0.1	4.8	5.2	5.8	6.5	6.9	4.6	5.0	5.6	6.3	6.7
1	7.4	8.5	10.3	12.1	13.2	7.6	8.7	10.6	12.4	13.5
2	8.1	9.4	11.5	13.7	15.0	8.3	9.6	11.9	14.1	15.5
5	8.9	10.5	13.2	15.8	17.4	9.2	10.8	13.6	16.4	18.0
10	9.6	11.4	14.4	17.4	19.2	9.8	11.7	14.8	18.0	19.9
20	10.2	12.2	15.6	19.0	21.0	10.4	12.5	16.1	19.6	21.7
50	11.1	13.4	17.2	21.1	23.4	11.2	13.6	17.6	21.7	24.1
100	11.7	14.2	18.5	22.7	25.2	11.7	14.4	18.8	23.3	25.9
Bise noire : N350° - N010°										
0.1	6.1	6.6	7.5	8.3	8.8	6.1	6.7	7.7	8.7	9.2
1	7.9	9.0	10.8	12.6	13.7	8.5	9.5	11.2	12.8	13.8
2	8.5	9.7	11.8	13.9	15.1	9.1	10.2	12.0	13.9	15.0
5	9.1	10.6	13.1	15.6	17.0	9.8	11.1	13.1	15.2	16.4
10	9.7	11.3	14.1	16.8	18.5	10.4	11.7	13.9	16.1	17.4
20	10.2	12.0	15.0	18.1	19.9	10.8	12.2	14.6	17.0	18.4
50	10.9	12.9	16.3	19.8	21.8	11.4	12.9	15.5	18.1	19.6
100	11.4	13.6	17.3	21.1	23.3	11.9	13.5	16.2	18.9	20.5
Bise : N020° - N070°										
0.1	6.1	7.0	8.5	10.1	11.0	6.4	7.2	8.7	10.2	11.1
1	8.2	9.7	12.4	15.0	16.6	8.4	10.0	12.7	15.4	17.0
2	8.8	10.5	13.5	16.5	18.3	9.0	10.8	13.8	16.9	18.7
5	9.6	11.6	15.0	18.5	20.5	9.7	11.8	15.3	18.8	20.9
10	10.2	12.4	16.2	20.0	22.2	10.3	12.5	16.4	20.2	22.5
20	10.8	13.2	17.3	21.4	23.9	10.8	13.2	17.4	21.6	24.0
50	11.6	14.3	18.8	23.4	26.1	11.5	14.2	18.8	23.4	26.1
100	12.2	15.1	20.0	24.9	27.8	12.0	14.9	19.8	24.7	27.6

Tableau 3.5 : Vitesse maximale du vent pour différentes durées de retour

3.4. Agitations du plan d'eau

3.4.1. Agitations levées sur les fetchs

Les agitations, directement levées par le vent sur les fetchs propres de Lu-grin, sont indiqués dans le tableau 3.6.

Les différentes grandeurs sont :

- l'incidence β ,
- le fetch F (longueur sur laquelle le vent lève l'agitation),
- la profondeur moyenne pour la génération des états de mer,
- la hauteur significative H_s ,
- la période de pic T_p ,
- la durée minimale de la tempête nécessaire pour lever cette agitation (D_m)

Les caractéristiques de leurs spectres sont déterminées d'après les formules de Bretschneider (1977), en fonction de la profondeur et de la vitesse du vent définie au paragraphe précédent. Les hauteurs supérieures à 0.35 m ont été arrondies au plus proche multiple de 0.05 m, les périodes ont été arrondies au multiple de 0.1 s supérieur, tandis que les durées ont été arrondies au multiple de 5 mn supérieur.

Incidence		Fetch		Mensuel			Annuel			Décennal			Centennal		
	β N°	F (km)	h (m)	H_s (m)	T_p (s)	D_m (mn)	H_s (m)	T_p (s)	D_m (mn)	H_s (m)	T_p (s)	D_m (mn)	H_s (m)	T_p (s)	D_m (mn)
Vent / Maurabia/Vent Blanc				V = 5.5 m/s			V = 9.0 m/s			V = 12.2 m/s			V = 15.4 m/s		
W	N270°	30.0	> 20	0.45	2.5	300	0.85	3.4	225	1.20	4.0	190	1.55	4.5	170
	N280°	26.5	> 20	0.45	2.5	270	0.80	3.3	205	1.15	3.9	175	1.50	4.4	155
Joran				V = 5.7 m/s			V = 10.5 m/s			V = 14.6 m/s			V = 18.7 m/s		
N-W	N290°	20.0	> 20	0.40	2.4	215	0.85	3.4	155	1.30	4.0	130	1.65	4.5	110
	N300°	18.0	> 20	0.40	2.3	195	0.85	3.3	140	1.20	3.9	120	1.60	4.4	105
	N310°	17.5	> 20	0.40	2.3	190	0.85	3.3	140	1.20	3.9	115	1.60	4.4	100
	N320°	14.3	> 20	0.35	2.2	165	0.75	3.1	120	1.10	3.7	100	1.50	4.2	85
	N330°	14.2	> 20	0.35	2.2	165	0.75	3.1	120	1.10	3.7	100	1.50	4.2	85
	N340°	11.5	> 20	0.35	2.1	140	0.70	3.0	100	1.05	3.6	85	1.40	4.0	75
Bise noire				V = 7.6 m/s			V = 11.0 m/s			V = 14.0 m/s			V = 16.8 m/s		
Nord	N350°	10.9	> 20	0.45	2.5	115	0.75	3.0	95	0.95	3.4	80	1.20	3.8	75
	N000°	10.5	> 20	0.45	2.4	110	0.70	3.0	90	0.95	3.4	75	1.15	3.7	70
	N010°	10.0	> 20	0.45	2.4	105	0.70	3.0	90	0.95	3.4	75	1.15	3.7	7°
Bise				V = 8.6 m/s			V = 12.6 m/s			V = 16.3 m/s			V = 19.9 m/s		
N-E	N020°	9.0	> 20	0.50	2.6	90	0.80	3.1	75	1.05	3.6	65	1.30	3.9	60
	N030°	10.0	> 20	0.50	2.6	100	0.80	3.2	80	1.10	3.6	70	1.35	4.0	65
	N040°	10.3	> 20	0.55	2.6	105	0.85	3.2	85	1.10	3.7	75	1.40	4.1	65
	N050°	11.2	> 20	0.55	2.7	110	0.85	3.3	90	1.15	3.7	75	1.45	4.2	70
	N060°	13.2	> 20	0.60	2.8	125	0.90	3.4	100	1.25	3.9	90	1.55	4.3	80
	N070°	14.1	> 20	0.60	2.8	130	0.95	3.4	105	1.25	3.9	90	1.60	4.3	85
Vent d'Est				V = 8.6 m/s			V = 12.6 m/s			V = 16.3 m/s			V = 19.9 m/s		
Est	N080°	17.5	> 20	0.65	2.9	155	1.00	3.6	125	1.35	4.1	110	1.70	4.5	100
	N090°	19.0	> 20	0.70	3.0	165	1.05	3.7	135	1.40	4.2	115	1.75	4.6	105
Maximum															
				0.70	3.0	-	1.05	3.7	-	1.40	4.2	-	1.75	4.6	-

Tableau 3.6 : Caractéristiques des fetchs du port Dauphin.

3.4.2. Batillage des navires

Les vagues d'accompagnement des navires présentent une hauteur qui ne dépasse pas $H=1$ m et une période de 4 s pour une vitesse de 12 nœuds. Ces agitations sont donc incluses dans le domaine des clapots levés par le vent.

3.5. Donnée sédimentaires

3.5.1. Caractéristiques géomorphologiques

Le port Dauphin est situé à l'extrémité d'une petite avancée côtière vers le Nord. La normale à la côte est orientée N014.5° du côté Est et N358.0° du côté Ouest. Cette différence de 16.5° engendre une dissymétrie des transits de part et d'autre du port, et ce dans les deux sens.



Figure 3.3 : Port Martin vue du ciel oblique.

La figure 3.3. montre une vue oblique du port Dauphin. Elle montre une avancée des sédiments à l'intérieur du port sous l'effet de la diffraction autour du musoir de la digue Est. La crête des sédiments se raccorde perpendiculairement à la digue. Une poutre a été placée en travers de chenal pour limiter l'entrée des sédiments. Le cordon sédimentaire présente une forte pente, ce qui témoigne de la nature grossière des sédiments.

La photographie montre également, qu'au Nord, un fin cordon de sédiments longe la face externe digue ; ce qui témoigne d'échanges alternatifs entre les deux côtés du port.

3.5.2. Nature des sédiments

Les photographies 3.3 montrent :

a) les sédiments sur la plage à l'Ouest de l'entrée du port,

b) les sédiments dans les petits fonds.



Figure 3.3 : Sédiments a) sur la plage Ouest – b) dans les petits fonds (Pascal Martin)

Il s'agit de sédiments graveleux composés d'un mélange de gros graviers et de petits galets, de l'ordre de 1 à 10 cm. On observe sur la plage la présence de bois flottés.

3.5.3. Apports sédimentaires

Les mouvements sédimentaires côtiers se font essentiellement sous l'effet de la houle et des courants. Ils peuvent se faire alternativement dans les deux sens, d'Est en Ouest et d'Ouest en Est selon les directions des houles, avec un transport sédimentaire résultant non nul.



Figure 3.4 : Carte terrestre IGN avec les cours d'eau.

En dehors des apports généraux en sédiments, dus au fonctionnement du lac Léman traversé par le Rhône, et qui circulent d'Est en Ouest, il existe des apports locaux du bassin versant.

Comme le montre la figure 3.4, le port Dauphin est situé entre deux ruisseaux qui se jettent dans le lac :

- le ruisseau de la Carrière, à environ 75 m à l'Est de l'enracinement de la digue Est (sensiblement au milieu entre le port Dauphin et le port Pont Rouge),
- le ruisseau de Rys, à environ 950 m à l'Ouest de l'entrée du port Dauphin, de l'autre côté du port Jacquier.

La figure 3.5 présente une photographie du ruisseau de la Carrière à la traversée de la route, à proximité de son embouchure. Il ne semble pas véhiculer une importante charge solide.



Figure 3.5 : Ruisseau de la Carrière à la traversée de la route.

Ces ruisseaux sont, sans doute, trop petits pour être documentés de manière suivie.

La vue aérienne de la figure 3.6 montre un cône de déjection à l'extrémité de l'embouchure du ruisseau de la Carrière ; ce qui corrobore l'existence d'un apport solide, mais sans doute de matériaux relativement fins.

Notons que, sur la vue du port Dauphin en 1976 (Photo port Dauphin de la figure 2.3-2), ce cône de déjection est beaucoup plus marqué. Cela semble indiquer que les apports sédimentaires du ruisseau de la Carrière ont été sensiblement réduits depuis les années 1980.



Figure 2.3-2 : Vue du port Dauphin en 1976 (Photo port Dauphin).

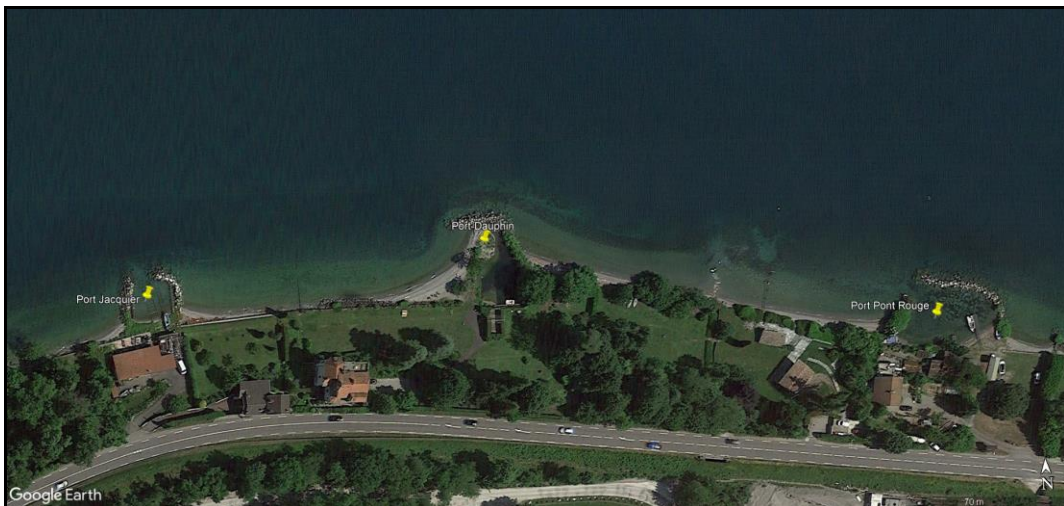


Figure 3.6 : Vue aérienne verticale du 12-06-2021 (Google Earth).

A environ 15 m à l'Est de l'exutoire du ruisseau de la Carrière, un ouvrage anthropique, d'une trentaine de mètres de long, semble avoir deux usages :

- une fonction d'embarcadère,
- une fonction d'émissaire de rejet d'un effluent, come en témoigne le panache accroché à son extrémité (voir figure 3.6).

3.5.4. Caractéristiques des plages à galets

Les estrans recouverts de galets sont essentiellement associés aux côtes à falaises et aux embouchures des cours d'eaux torrentiels.

Le transport littoral sur les plages à galets présente des caractéristiques très différentes de celui des plages de sable, et relève d'une étude spécifique.

3.5.4.1. Mouvements dans le profil

Les plages à galets naturelles sont de faible largeur. La granulométrie de leurs matériaux et les conditions hydrodynamiques auxquelles elles sont soumises leur permettent d'avoir des pentes généralement assez fortes, de l'ordre de 10% à 15%.

Pour l'essentiel, les mouvements des galets dans le profil ont lieu dans la partie supérieure de la plage, sur le moyen et surtout sur le haut estran. Dans les mers sans marées, le mouvement intéresse le bas estran et les petits fonds jusqu'à une profondeur d'une fois à une fois et demie la hauteur des vagues.

Un cordon de galets se forme généralement sur le haut estran. Sa hauteur au-dessus du niveau de l'eau est du même ordre de grandeur que la hauteur des lames au point de déferlement.

3.5.4.2. Transport littoral

Le transport littoral des galets se fait essentiellement par jet de rive au-dessus de la ligne de déferlement. Le transport par courant littoral est quasiment inexistant. Ce sont donc les clapots levés par les vents qui sont responsables du transit littoral des galets.

Le transport intéresse une couche de galets dont l'épaisseur est de l'ordre de 0.2 à 0.3 m et peut atteindre 0.5 à 1.0 m en cas de tempête.

Le transport des galets se fait à une vitesse moyenne qui est de l'ordre d'un kilomètre par an.

Les transits littoraux annuels de galets sont typiquement de quelques milliers de m³/an et restent généralement inférieurs à 30 000 m³/an, voire à 10 000 m³/an. Ils sont encore plus faibles pour les cordons qui bordent des petites anses dont la longueur est inférieure à quelques kilomètres.

4. Dimensionnement fonctionnel des digues

4.1. Nécessité de la présence de digues vis-à-vis de l'agitation

Les agitations du tableau 3.6 montrent que l'agitation significative de durée de retour mensuelle atteint 0.70 m, que l'annuelle dépasse 1.00 m et que les agitations significatives rares peuvent attendre 1.40 à 1.75 m.

La comparaison, entre ces hauteurs d'agitation et les niveaux d'agitation admissibles (voir § 3.1), montre que la présence d'ouvrages de protection est indispensable pour limiter les agitations à seuils admissibles et pour permettre l'usage de la zone de mouillage en toute sécurité.

4.2. Nécessité de la présence de digues vis-à-vis de l'engravement

La nécessité de protéger le port par des digues est démontrée par l'observation des engravements récurrents actuels et de l'impossibilité d'utiliser le port qui en résulte.

4.3. Evolution du trait de côte

Les photographies aériennes suivantes, issues des photographies aériennes communiquées par le Maître d'ouvrage et des archives de Google Earth, permet de visualiser l'évolution du trait de côte entre 1976 et 2021.

Sur les deux premières images, l'entrée du port est orientée vers le Nord, entre deux jetées normales à la côte, d'une longueur de l'ordre de 15 à 20 m. L'engravement à l'enracinement des jetées est de quelques mètres.

Entre 1976 et 1983 (sans doute peu avant 1983), la jetée Est a été prolongée vers le Nord de 5 à 10 m et munie d'un retour à 90° vers l'Ouest, de 15 à 20 m de long, qui vient en recouvrement de l'extrémité de la digue Ouest ; orientant désormais l'entrée vers l'Ouest.

Cette modification nous semble pouvoir avoir deux origines :

- soit vouloir protéger l'abri contre les états de mer de secteur Nord-Est à Nord-Ouest,
- soit vouloir protéger l'abri contre le transit littoral d'Est en Ouest ; voire les deux.

Sur la photographie de 1983 (figure 4.3), l'engravement à l'enracinement des jetées est sensiblement le même à l'Est de la jetée Est et à l'Ouest de la jetée Ouest.

Ce n'est entre 1983 et 1994 que le port Jacquier a été construit. La photographie de 1994 (figure 4.4) montre un engravement plus important à l'Est de l'enracinement de la jetée Est qu'à l'Ouest de l'enracinement de la jetée Ouest. Ce phénomène semble confirmé sur les photographies suivantes jusqu'en 2004 (figure 4.5).

Cette même photographie de 2004 met en évidence un phénomène similaire pour le port Jacquier et le port Pont Rouge. Si on en juge à la largeur apparente des langues sédimentaires qui contournent les ports, le port Dauphin semble toutefois être le siège d'un franchissement sédimentaire d'Est en Ouest plus important que les deux autres ports. Les photographies postérieures à 2004 montrent que ce phénomène perdure.

Par ailleurs la racine Ouest de la digue Ouest du port Dauphin est le siège d'un engraissement progressif entre 1976 et 2021.

4.4. Mécanisme d'engrèvement du port Dauphin

Avant la construction du port Jacquier, les sédiments provenant du franchissement du port Dauphin étaient entraînés dans le transit dominant d'Est en Ouest. Cette construction a isolé une cellule sédimentaire de 120 m de long dans laquelle les sédiments qui contournent le port Dauphin sont piégés. Dans les phases de transit d'Ouest en Est poussé par les vents et les clapots de secteur Ouest, les sédiments de la cellule isolée sont poussés vers l'entrée du port Dauphin et, ne peuvent plus être soumis au transit d'Est en Ouest poussé par les vents et les clapots de secteur Est,



Figure 4.1 : Port Dauphin avant 1976 (Port Dauphin).



Figure 4.2 : Port Dauphin en 1976 (Port Dauphin).

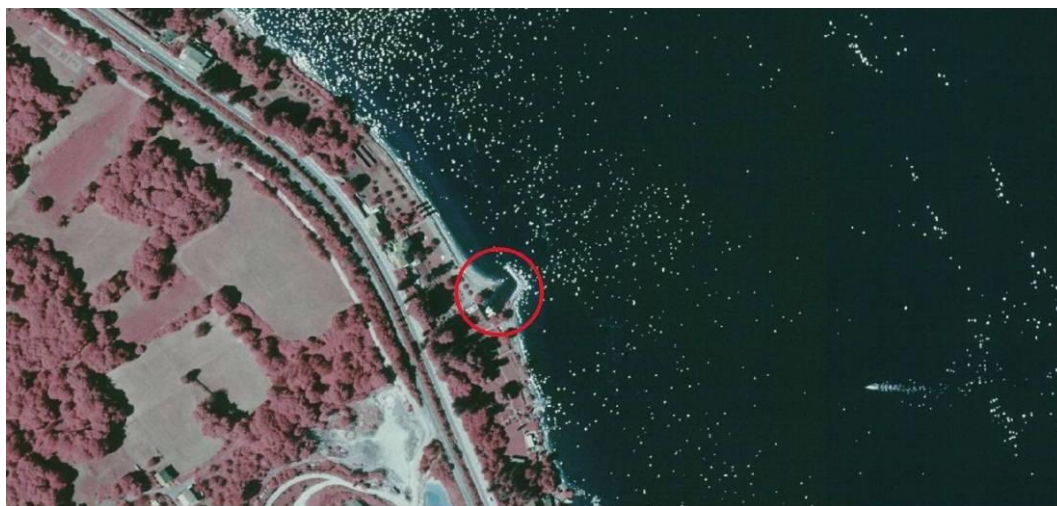


Figure 4.3 : Port Dauphin en 1983 (Port Dauphin).

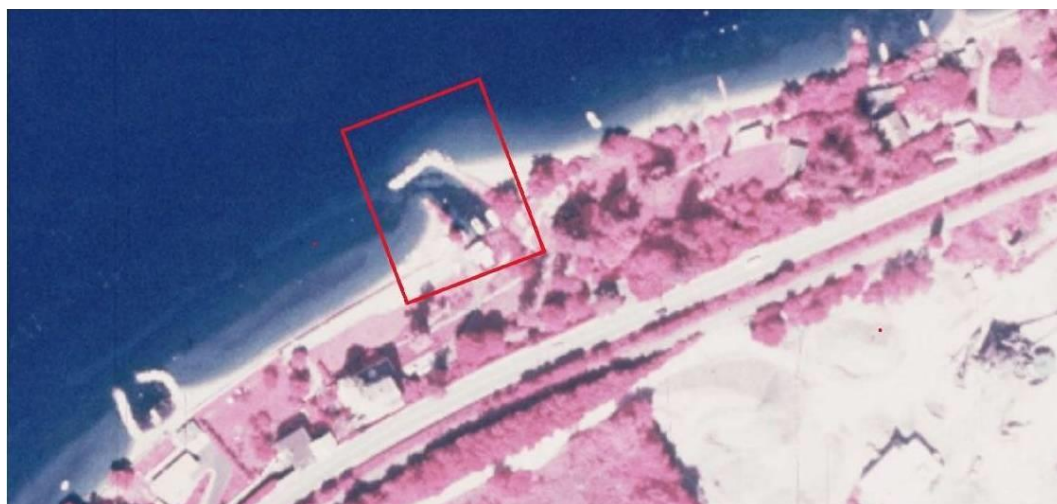


Figure 4.4 : Port Dauphin en 1994 (Port Dauphin).



Figure 4.5 : Port Dauphin le 31-12-2004 (Google Earth).



Figure 4.6 : Port Dauphin en 2011 (Port Dauphin).



Figure 4.7 : Port Dauphin le 01-08-2012 (Google Earth).

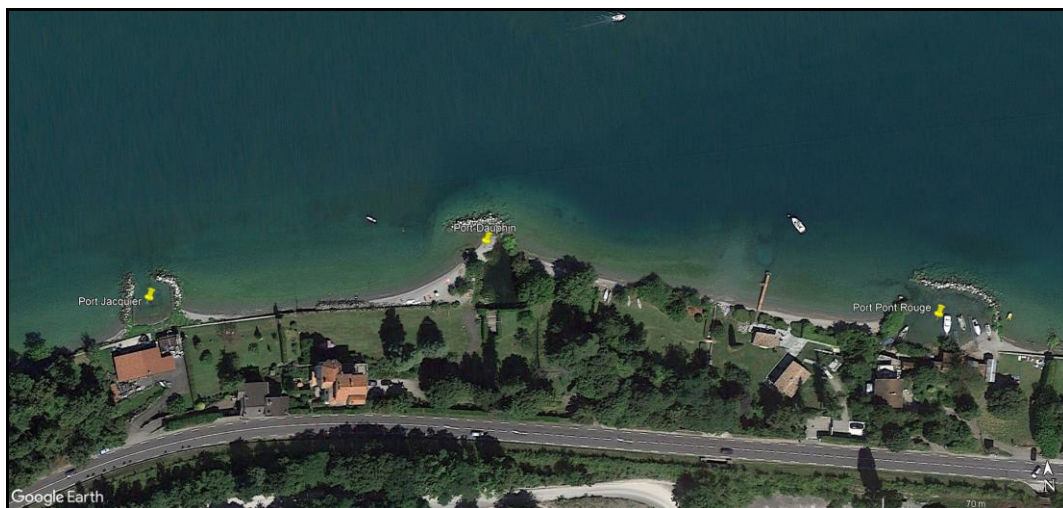


Figure 4.8 : Port Dauphin le 13-08-2016 (Google Earth).

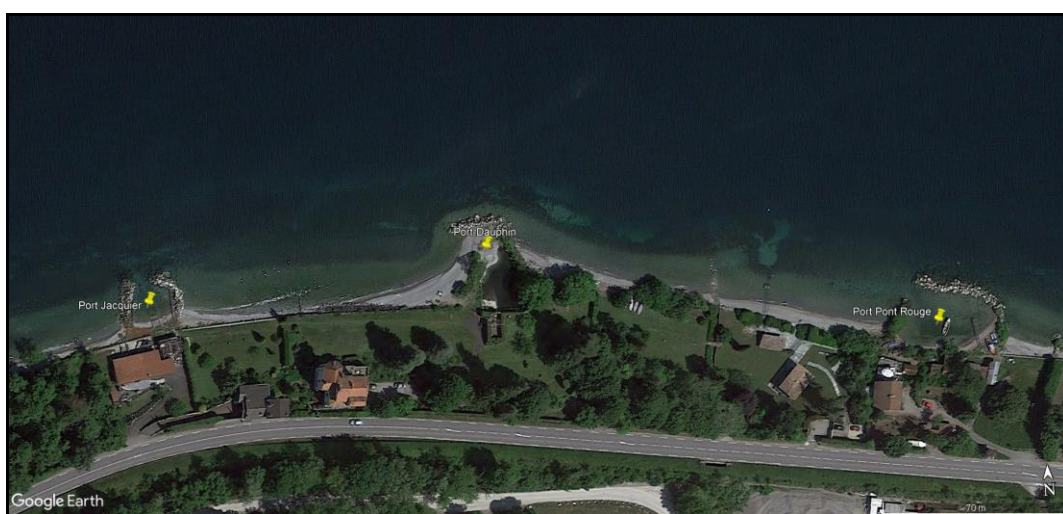


Figure 4.9 : Port Dauphin le 17-05-2020 (Google Earth).

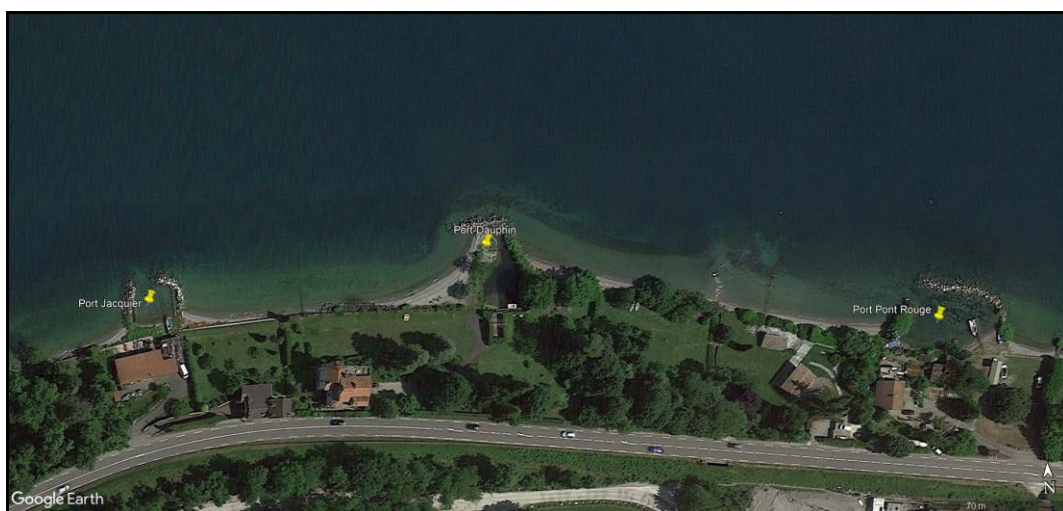


Figure 4.10 : Port Dauphin le 12-06-2021 (Google Earth).

4.5. Plan masse des digues

4.5.1. Etendue des digues vers le Nord

La construction de digues trop longues vers le Nord conduirait à bloquer le transit sédimentaire. Un stock de sédiments s'accumulerait à l'Est de la jetée Est de port Dauphin, jusqu'à ce qu'il soit assez avancé pour contourner les digues. La profondeur étant rapidement trop importante pour que le transit des graves et des galets puisse se poursuivre, ces matériaux seraient perdus pour le littoral. Il en résulterait une érosion progressive du littoral à l'Est de port Dauphin.

Il convient donc de ne pas dépasser significativement la distance vers le Nord de la digue actuelle ; soit de l'ordre de 35 m au Nord du quai au fond du port.

4.5.2. Direction des digues

Pour éviter que les sédiments s'engouffrent dans l'entrée du port, il convient qu'elles aient la même longueur et qu'elles soient tournées vers le Nord. Dans ces conditions, les sédiments qui contourneront la première d'entre elles contourneront également la seconde, et ce dans le deux sens.

La figure 4.11 présente un schéma de principe du plan masse des digues (longueur et orientations).



Figure 4.11 : Schéma de principe du plan des digues.

4.5.3. Largeur de la passe d'entrée

La largeur de la passe d'entrée doit être la moins large possible compatible avec les entrées et les sorties du bateau en toute sécurité. Dans ces conditions, le passage limitera l'énergie de la houle qui entrera dans le port.

Afin de permettre une certaine aisance des manœuvres, l'extrémité des digues permettra un élargissement rapide du passage. Cela aura deux effets :

- dégager de la place pour le bateau,
- permettre à l'énergie de la houle qui entre de s'épanouir dans l'abri et de s'amortir rapidement.

4.6. Cote d'arase des digues

La cote d'arase actuelle des digues étant, à priori, satisfaisante, il ne semble opportun de la modifier.

5. Dimensionnement structurel des digues

Comme les digues actuelles se semblent pas endommagées, leur dimensionnement structurel (blocométrie, pentes, largeur en tête, etc.) peut être reconduit.

Une attention particulière devra être apportée à la construction des murs.

6. Documents de référence

- [PIA81] Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC) (1981) Supplement to bulletin N°38, vol.1, 1981, 3rd International Commission for Sport and Pleasure Navigation.
- [PIA95] Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC) (1995) *Criteria for movements of moored ships in harbours*, Report of Working Group 24, Supplement to Bulletin 88.
- [RNV02] Commission des règles NV (2002¹³) *Règles NV65 modifiées 99 et N84 modifiées 2000*, Paris : Eyrolles.
- [SEM92] Secrétariat d'Etat à la Mer (Conseil Supérieur de la Navigation de Plaisance et des Sports Nautiques) (1992) *Les pontons de plaisance*, Guide de Conception.