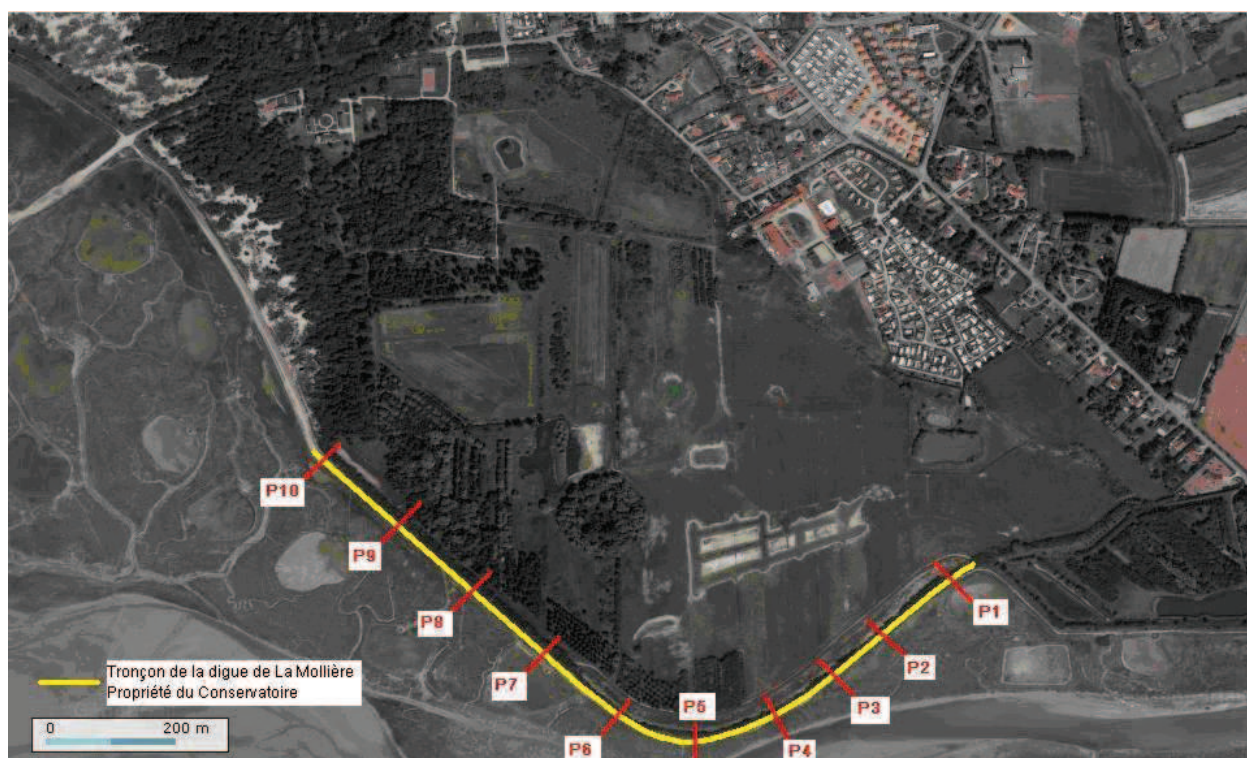




Conservatoire
du littoral



DIAGNOSTIC DES OUVRAGES DE PROTECTION DU
CONSERVATOIRE DANS LA BAIE D'AUTHIE

DOSSIER DES OUVRAGES
DIGUE DE LA MOLLIERE



SOCOTEC

SOCOTEC INTERNATIONAL

DEPARTEMENT TRAVAUX PUBLICS

14 Avenue Gustave EIFFEL - MONTIGNY-LE-BRETONNEUX
CS 20732 - 78182 SAINT QUENTIN EN YVELINES
Tél.: (33) 01 30 12 05 40/Fax: (33) 01 30 12 05 47

Rapport final
Juin 2012

SOMMAIRE

I.	OBJET DU RAPPORT	3
II.	DESCRIPTION DE L'OUVRAGE	3
III.	ENVIRONNEMENT HYDRODYNAMIQUE	5
3.1.	Niveaux d'eau	5
4.1.1.	La marée astronomique	5
4.1.2.	Surcotes	6
4.1.3.	Niveaux extrêmes.....	6
4.1.4.	Combinaisons marée surcotes	6
3.2.	Houles	7
3.3.	Corrélation houles - niveaux d'eau	8
IV.	ENVIRONNEMENT HYDROSEDIMENTAIRE.....	9
4.1	Présentation générale de l'estuaire	9
4.2	Sédimentologie de la Baie d'Authie	11
4.3	Mouvements généraux dans la Baie.....	11
4.3.1	Evolution historique	12
4.3.2	Synthèse.....	16
V.	DIAGNOSTIC DE L'OUVRAGE.....	18
5.1	Etat général de la digue de la Mollière.....	18
5.1	Les travaux topographiques.....	19
5.2	Comportement de l'ouvrage au franchissement en cas de niveaux d'eaux extrêmes	20
5.3	Diagnostic géotechnique.....	21
5.4	Critère de pente pour l'analyse de la stabilité	21
5.5	Analyse de la vulnérabilité de l'ouvrage.....	22
5.5.1	Indice d'Enjeux (IE) ou Indice de Sécurité Publique (ISP).....	22
5.5.2	Evaluation de l'Indice d'Etat (IE)	23
5.6	Hiérarchisation des risques.....	24
VI.	DISPOSITIONS A PRENDRE POUR LE CONFORTMENT DE L'OUVRAGE	25
6.1	ANALYSE DU PHENOMENE D'INSTABILITE	25
6.1.1	Scenarios analysés	27
6.1.2	Recommandations.....	28
VII.	RECOMMANDATIONS POUR LE MODE D'ORGANISATION ET DE SURVEILLANCE DES OUVRAGES	30
7.1	Mode d'organisation.....	30
7.2	Mode de surveillance des ouvrages	30
7.2.1	La surveillance continue	30
7.2.2	La visite annuelle.....	31
7.2.3	Les inspections techniques détaillées périodiques	31
7.2.4	Les inspections techniques détaillées exceptionnelles	31
7.2.5	Synthèse du programme de surveillance de l'ouvrage	32
	ANNEXE : CAHIER DES PROFILS DES OUVRAGES	33

I. OBJET DU RAPPORT

Le présent rapport constitue le dossier des ouvrages de la Digue de La Mollière dans la Baie d'Authie, dont le Conservatoire du Littoral est propriétaire. C'est un des trois documents requis dans le cadre des études de diagnostic confiées à SOCOTEC.

L'objectif de ces études est de se mettre en conformité avec le décret n°2007-1735 du 11 décembre relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques, instaurant de nouvelles règles de contrôle et de surveillance de ces ouvrages, notamment des digues de protection contre les inondations.

Les prestations, entrant dans le cadre de ces études, sont les suivantes :

- Réalisation d'un diagnostic de sûreté initial des digues prévu par l'article 16 du décret cité plus haut, dit diagnostic initial
- La réalisation de l'étude de danger (R214-115 du code de l'environnement)
- La constitution du dossier de l'ouvrage (R214-122 du code de l'environnement)

Le présent rapport intègre les données constituant le dossier d'ouvrage

II. DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

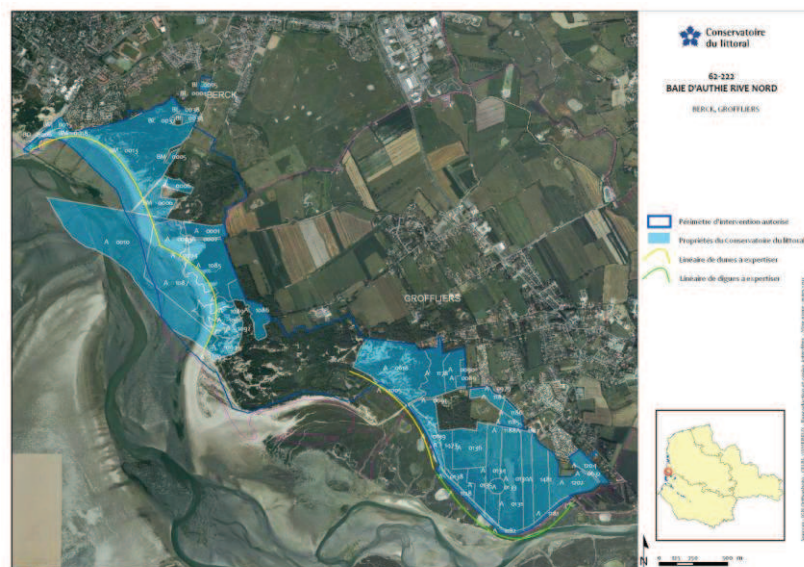


Figure 2.1 – Baie d'Authie – Rive Nord

Sur la commune de Groffliers (62), Rive Nord de la Baie d'Authie, le Conservatoire est propriétaire de 1250m d'une digue de protection (Digue de La Mollière, secteur Sud).

Edifiée dans les années 1850, la digue s'étale sur un linéaire de 1250m. Elle est composée d'un noyau en tout venant sablo-graveleux recouvert d'une fine couche de terre argileuse.

Sa hauteur varie de 2m à 3m (sauf au niveau du profil P1 où H=1.60m). La largeur en crête est de l'ordre de 6m (profils P1&P2), de l'ordre de 10m (profils P3 à P6), puis de l'ordre de 2m pour le reste

La digue est fortement boisée sur sa façade maritime exceptée sur une portion de 400 m qui a été confortée en 1992 (décrite en page 7) et nue de végétation. Elle protège un polder d'une superficie d'environ 67ha, anciennement agricole et jouxtant l'agglomération villageoise.

La cote d'arase est supérieure à +7.00m IGN69 sur la plus grande partie du linéaire. Elle est néanmoins susceptible de franchissements en cas de grandes marées (cf. Etude de danger), au niveau du profil 1 puis entre les profils 4 et 5 avec des cotes jusqu'à +6.71m.

Les pentes du talus amont (coté Baie) sont relativement douces entre les profils 1 et 4 (pentes entre 2/1 et 5/1). Mais elles se raidissent entre les profils 5 et 10 (pentes entre 0.9/1 à 2.9/2) sur des hauteurs de l'ordre de 2m et des largeurs en crête de l'ordre de 3m à 4m.

La végétation présente sur les talus montre que cette digue est de type sèche. C'est-à-dire qu'elle est que ponctuellement soumise à une mise en charge hydraulique. Si la digue était régulièrement sollicitée par de l'eau de mer salée, la végétation arbustive ne pourrait pas se développer.

Une étude récente réalisée par le CEMAGREF sous la direction de Paul Royet, intitulée « Colonisation par les arbres des petits barrages ou digues de canaux en terre : diagnostic et consignes d'entretien au travers d'étude de cas » (Colloque CFBR-AFEID, 9 Novembre 2010) a confirmé l'impact négatif de la végétation à court et long terme sur les ouvrages en terre.

A court terme le développement des racines crée un décompactage du sol en place, augmentant la perméabilité du milieu, facilitant l'écoulement de l'eau à travers le corps de la digue et finalement, conduisant à augmenter le risque d'érosion interne. A long terme, le pourrissement de la végétation morte conduit à laisser des galeries dans les digues constituées de matériaux fins cohésifs, créant des chemins préférentiels d'écoulement de l'eau au sein de la digue à des vitesses importantes menant à de l'érosion interne. Pour les matériaux sablo-graveleux, les galeries laissées par les racines pourries se colmatent progressivement par les matériaux sableux. Ce processus reste néanmoins néfaste car il conduit à un réarrangement de la structure interne de la digue et à diminuer la compacité du matériau en place. Par suite, la perméabilité étant plus élevée, le risque d'érosion interne augmente également.

A noter que la digue a été confortée en 1992 (source M. Debeaumont), sur une longueur d'environ 400m. Le rechargement a été fait avec un talus de 2/1, au moyen d'un matériau crayeux des carrières voisines du coté de l'Authie (voir figure 2.4.a).

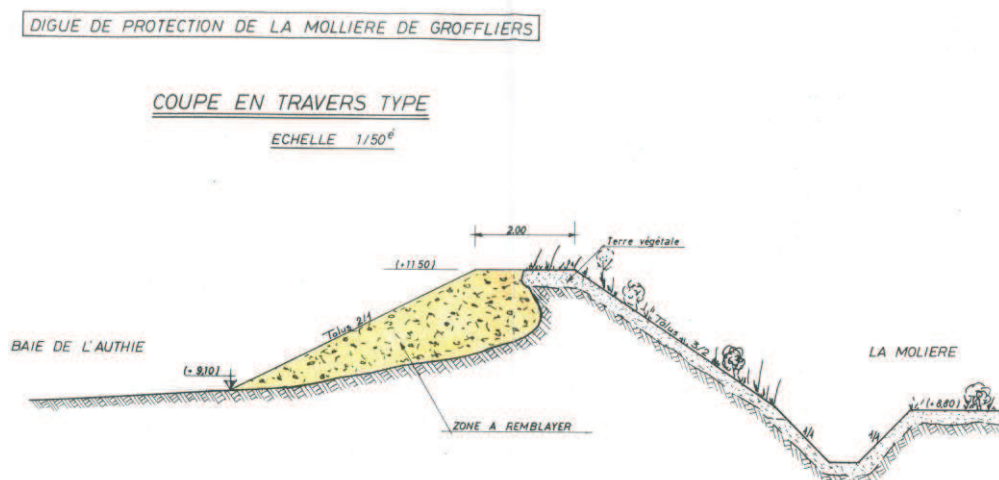


Figure 2.4.a – Rechargement de la digue de La Mollière en 1992 (source M. Debeaumont)

Depuis la réalisation de ce confortement en 1992, le matériau crayeux semble avoir complètement disparu.

La faible épaisseur de la digue s'ajoutant aux dégradations constatées rend en effet ce tronçon de digue particulièrement sensible au risque de brèche (cf. Etude de danger).



Figure 2.4 – Talus érodé de la digue de La Mollière

III. ENVIRONNEMENT HYDRODYNAMIQUE

3.1. Niveaux d'eau

4.1.1. La marée astronomique

Les valeurs relatives à la marée astronomique sont issues de l'exploitation des données générales bibliographiques reprises dans des études antérieures, la source principale restant le SHOM. La marée est de type semi-diurne. Elle se propage dans la Manche d'Ouest en Est. Le marnage en Pas-de-Calais décroît du Nord au Sud comme le montrent les chiffres du tableau reprenant les valeurs données pour Calais, Boulogne et Berck :

Coefficient de marée	Berck	Boulogne	Calais
45	5,03	4,62	3,97
70	7,07	5,84	5,22
95	8,51	7,02	6,37

Tableau3.1 - Variations du marnage pour différents coefficients dans le Pas-de-Calais

Les hauteurs de niveau de la mer correspondant à différents coefficients de marée sont données dans le tableau ci-dessous :

	Coefficient	Cote marine	Référentiel terrestre
		m CM	m NGF IGN69
Pleine mer de vive-eau exceptionnelle	120	10,50	5,55
Pleine mer de vive-eau moyenne	95	9,80	4,85
Pleines mer de morte-eau moyenne	45	7,95	3
Niveau moyen		5,47	0,52
Basse mer de morte-eau moyenne	45	2,95	-2
Basse mer de vive-eau moyenne	95	1,25	-3,7
Basse mer de vive-eau exceptionnelle	120	0,125	-4,825

Tableau3.2 - Niveaux caractéristiques de la marée à Berck (SHOM, 2001)

4.1.2. Surcotes

Les valeurs ici exploitées sont celles données par P.A. Pirazzoli dans le cadre du projet DISCOBOLE pour les sites de Boulogne et Dieppe. Nous avons en particulier repris ses ajustements statistiques. Ils sont précisés dans le rapport sur l'étude de danger (Socotec, 2012). Avec les paramètres retenus, les surcotes obtenues pour le site, pour différentes périodes de retour sont :

Surcote annuelle	: 125 cm
Surcote décennale	: 162 cm
Surcote centennale	: 199 cm

4.1.3. Niveaux extrêmes

Avec les hypothèses rappelées précédemment, les résultats des calculs réalisés sur les probabilités de niveaux d'eau sont comparés aux valeurs données par le SHOM dans le tableau ci-dessous en fonction des périodes de retour.

Cote IGN69	10ans	20ans	50ans	100ans	1000ans
SHOM	6,05	6,15	6,3	6,4	
SOCOTEC	6,08	6,19	6,34	6,45	6,82

Tableau3.3 – Comparaison de niveaux d'eau extrêmes

Les valeurs sont quasiment les mêmes à quelques centimètres près en dépit des simplifications que nous avons opérées. Nous avons rajouté également au tableau, la valeur calculée pour la période de retour millénaire.

4.1.4. Combinaisons marée surcotes

Nous avons défini par ailleurs les divers niveaux extrêmes qui s'attachent aux différentes périodes de retour. En fait, un niveau extrême peut être atteint pour une multitude de combinaisons entre le niveau de pleine mer induit par le marnage astronomique et une surcote. Ce niveau peut par exemple résulter d'une association entre un coefficient de marnage modéré et une surcote exceptionnelle ou contraire d'un coefficient de marnage exceptionnel et d'une surcote modérée. Comme la modélisation des accidents nécessite de simuler la variation du plan d'eau sur tout un laps de temps encadrant la pleine mer, il est nécessaire de faire un choix sur la combinaison marée-surcote à retenir. En effet, la variation du niveau de la mer en dépendra sensiblement.

Nous avons choisi d'examiner pour chaque niveau extrême trois combinaisons différentes :

- La première consiste à retenir une surcote de même période de retour que celle du niveau extrême mais en ne considérant que la phase de marée de pleine mer, c'est-

à-dire la surcote correspondant à une fréquence de $1/T$ (706T) où T est la période de retour. On modifie donc l'échelle précédente adoptée dans un rapport 10 puisque les statistiques précédentes avaient été réalisées avec 10 événements par marée.

- La seconde considère une surcote plus faible associée à une fréquence réduite une nouvelle fois d'un facteur 10.
- La troisième résulte de l'application de la méthode du maximum de vraisemblance. On retient la combinaison correspondant au maximum du produit des densités de probabilité d'occurrence simultanée des couples de valeurs de marnage et de surcotes conduisant au niveau considéré.

Les calculs ont donné pour les périodes de retour 10ans, 100 et 1000 ans, les valeurs suivantes.

			10 ans	100 ans	1000 ans
	Coef	marée	surcote		
pleine mer	94	4,83	1,25	1,63	1,99
marée	107	5,20	0,88	1,25	1,62
astronomique	112	5,34	0,74	1,11	1,48
			Niveaux extrêmes		
			6,08	6,45	6,82

Tableau3.4 – Valeurs retenues pour les niveaux d'eau extrêmes

3.2. Houles

Les études antérieures menées sur le site ne font pas état d'études de houle très détaillées sur notre secteur d'étude. Les données disponibles indiquent une prédominance des mers de vent. Il s'agit de houles courtes levées en Manche sur un fetch généralement court. Les houles plus longues en provenance de l'atlantique sont peu fréquentes. La direction préférentielle de provenance de l'agitation concerne en priorité les secteurs Ouest Sud-Ouest. Les mesures de houle dans la zone ne sont pas abondantes. Toutefois, nous avons exploité en particulier les données ANEMOC qui sont apparues plus significatives.

Il s'agit de valeurs de données de houle reconstituées sur une période d'environ 24 ans entre 1979 et 2002 et issues de résultats de simulations numériques obtenus à l'aide du logiciel TOMAWAC (LNHE / CETMEF) à partir de l'évolution historique des champs de vent mesuré sur les zones géographiques pertinentes.

Le fichier exploité concerne le point COAST 3013. Situé à une vingtaine de km de la côte, ce point présente une profondeur d'environ 24 m.

L'exploitation directe de ces statistiques par la méthode des fréquences cumulées et l'ajustement statistique réalisé sur ces données a permis de proposer les valeurs de hauteur de houle correspondant aux diverses périodes de retour suivantes :

T = 1 an Hs = 4,21 m

T = 10 ans Hs = 5,33 m

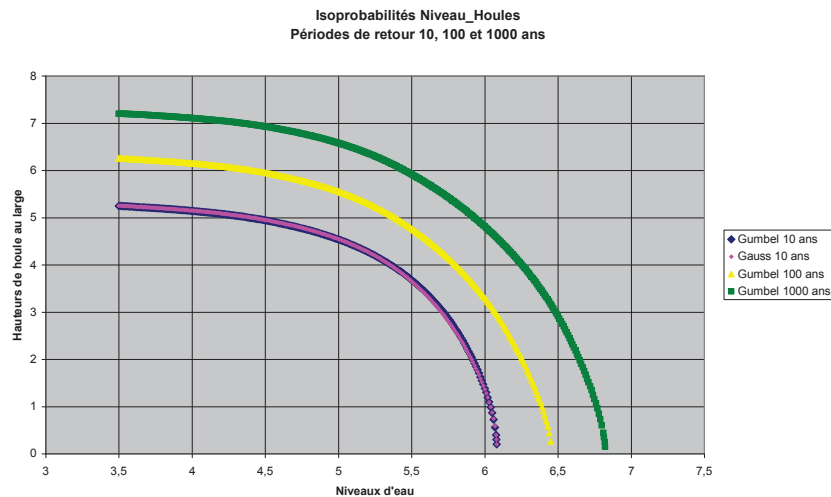
T = 100 ans Hs = 6,35 m

Il y a lieu de rappeler également, qu'il s'agit de valeurs concernant le large à une vingtaine de kilomètres devant notre site et non pas de hauteur de houle en pied de digue ou de cordon dunaire.

3.3. Corrélation houles - niveaux d'eau

Les niveaux d'eau atteints à pleine mer résultent de la composante déterministe de la marée astronomique et d'une surcote de grandeur aléatoire. On estime que les houles du large sont indépendantes des hauteurs de marée astronomique mais qu'il existe un certain degré de corrélation entre les hauteurs de houle au large et les surcotes.

Nous donnons ci-dessous les résultats obtenus pour les statistiques corrélées niveaux d'eau - houles au large et pour les périodes de retour de 10, 100 et 1000 ans. Il s'agit de courbes d'isoprobabilités de dépassement.



IV. ENVIRONNEMENT HYDROSEDIMENTAIRE

4.1 Présentation générale de l'estuaire

L'estuaire de l'Authie, dont la superficie est comprise entre 20 et 30 km² suivant la définition retenue, présente une géomorphologie typique des estuaires picards associant, au sud une flèche sableuse en progression et, au nord une rive en érosion. Cette dernière est principalement bordée par un massif dunaire occupant un espace voisin de 150 ha.

Nous proposons ici une présentation particulière de l'estuaire sous forme de découpage géométrique élémentaire destiné à faciliter la compréhension des phénomènes sédimentaires principaux régissant les évolutions les plus significatives. Les entités principales du littoral de la baie sont schématisées sur la figure 4.1.

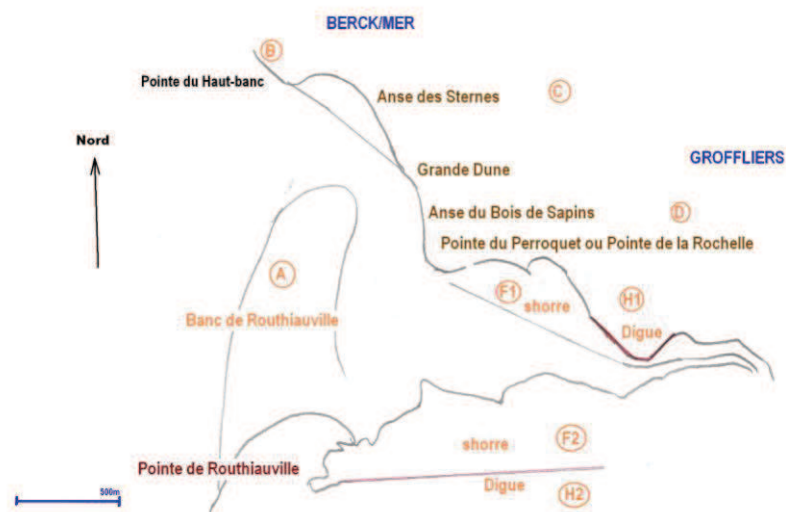


Figure 4.1

A une échelle plus petite, la rive droite est précisée sur la figure 4.2.

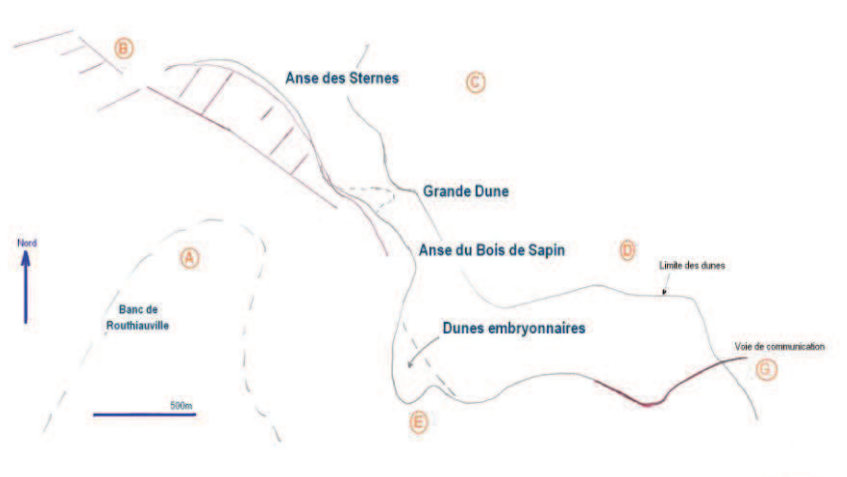


Figure 4.2

On distingue au sud dans la continuité de la pointe de Routhiauville, une flèche sableuse (A) se développant sur près de trois kilomètres suivant une direction Sud-Nord et s'incurvant de façon classique à l'extrémité vers l'intérieur de l'estuaire. Le vocabulaire régional évoque ce type de

développement sédimentaire sous le vocable de "poulier". C'est la géométrie de cette flèche sableuse qui conditionne le tracé des chenaux de remplissage et de vidange de l'estuaire, contrôlant, de ce fait, l'évolution progressive de son trait de côte.

La baie est délimitée au Nord, au niveau de la pointe du Haut-Banc (B), par la plage sableuse de Berck orientée à l'embouchure dans une direction sensiblement Sud-Est et défendue par des épis.

Sur cette même rive droite de l'Authie, en progressant vers l'amont, se situe au Nord, l'anse des Sternes (C). Il s'agit, sur environ un kilomètre et demi d'un retrait très prononcé pouvant excéder les 150 mètres, de l'alignement du littoral composé, à ce niveau, de dunes vives ou enherbées suivant leur degré d'érosion et leur position par rapport au trait de côte. La largeur d'implantation des dunes est faible au nord de l'anse, avec une valeur minimale d'une trentaine de mètres et conséquente ailleurs avec une moyenne d'environ 200 mètres pour fixer les ordres de grandeur. Cette anse résulte principalement de sa localisation défavorable située face à la flèche sableuse sud qui canalise l'Authie et génère sur la rive opposée une érosion classique dans une zone que le jargon technique local qualifie de "musoir". Ces mêmes mécanismes sédimentaires ayant trait aux "pouliers" et "musoirs" se retrouvent sous des formes similaires, par exemple, dans la baie de la Canche.

L'anse des Sternes est protégée par un réseau constitué d'un ouvrage submersible longitudinal et de six structures transversales, les épis. Cet ensemble, a été complété par des défenses longitudinales de haut de plage en enrochements.

Au sud de l'anse des Sternes, le littoral dessine sur une longueur voisine d'un kilomètre et derrière le prolongement de l'alignement du trait de côte sud de l'anse des Sternes, une nouvelle concavité, l'anse du Bois des Sapins (D). Le littoral borde, à ce niveau, des dunes boisées recouvrant des largeurs se réduisant progressivement par érosion et entrecoupées de multiples siffle-vents qui accentuent la fragilité du cordon dunaire et dont le plus étendu se situe au nord. Le versant maritime du cordon prend l'apparence d'une falaise d'érosion sur la majeure partie du développement linéaire avec, en pied, des troncs d'arbres arrachés par la mer au cordon littoral en fort recul.

Plus en amont, au pied d'un cordon dunaire ayant retrouvé un volume plus important, on note la formation d'un crochon sableux (E) sur lequel se développent de petites dunes embryonnaires jusqu'à son extrémité désignée par Bec du Perroquet ou pointe de La Rochelle.

A partir de ce point, la zone dunaire modifie brusquement son orientation et peut se développer devant de cordon, une zone de schorres (F1) appelé localement "mollières". Cette zone est parcourue, au nord par une voie de communication (G) interrompant également la continuité du cordon dunaire arrière et constituant de ce fait, un possible point d'entrée des eaux, lors des niveaux extrêmes de pleine mer. Ce schorre est également parsemé de multiples marigots.

Dernier élément considéré dans la description sur la rive droite, la digue (H1), construite en continuité du cordon dunaire, à des fins de poldérisation. Nous y reviendrons pour de plus amples développements.

L'estuaire est bordé, en rive gauche, par une très vaste zone de schorres (F1), sur environ un kilomètre de large devant la digue (H2), jusqu'à la pointe de Routhiauville. Comme pour l'autre rive, de nombreuses mares ont été creusées dans cette zone.

Entre les différentes formations sédimentaires mentionnées plus haut et bordant l'estuaire, s'étend une vaste zone de slikkes à travers laquelle divaguent les chenaux de remplissage et de vidange de l'Authie.

Le fleuve draine un bassin versant d'une superficie modeste légèrement inférieure à 1000 Km². Ses débits sont ainsi relativement faibles, ne dépassant pas les 20 m³/s par temps de crue. Ils restent limités en comparaison de ceux que génère la marée. C'est pourquoi, on considère que l'hydrologie du fleuve exerce peu d'influence sur la morphodynamique de l'estuaire, même si

les apports sédimentaires du fleuve sont estimés à un ordre de grandeur de 10 000 tonnes par an.

Comme les autres estuaires de la côte picarde, la baie de l'Authie est en phase de comblement.

4.2 Sédimentologie de la Baie d'Authie

Les travaux de thèse réalisés à l'Université du Littoral de la côte d'Opale, par Dobroniak (2000) et Marion (2007) comprennent notamment des analyses granulométriques dans l'ensemble de la baie et des mesures de teneur en vases des sédiments. Les résultats montrent que le diamètre moyen des sédiments s'établit autour de 0,20 mm, c'est celui d'un sable fin.

En fait, on note, comme c'est le cas pour tous les estuaires de façon générale, une décroissance de la taille de l'extérieur vers l'intérieur. La taille moyenne passe ainsi de 0,26 mm pour les matériaux du banc sableux de Routhiauville et ceux de la rive nord à 0,17 mm pour la slikke en fond d'estuaire.

Les sables les plus grossiers (>0,05 mm) se trouvent en partie haute du banc de Routhiauville ainsi qu'à la flèche du Bec du Perroquet. Les limons (0,05 à 0,2 mm) se sont déposés dans les chenaux et en fond de baie. La vase représente moins de 20% des sédiments. Elle occupe des zones abritées de la houle par la pointe de Routhiauville ou la flèche du Bec du Perroquet ainsi que sur la slikke. Elle peut également se retrouver en fond des chenaux.

4.3 Mouvements généraux dans la Baie

Les indications données dans le présent paragraphe sont principalement issues d'analyses effectuées par Bonnefille de Allen (1967). Elles ont été largement reprises depuis par d'autres auteurs.

Compte tenu de l'orientation des houles dans ce secteur géographique, le transit littoral est orienté sud nord. Cette dérive littorale est responsable du développement vers le nord de la flèche ou du banc sableux de Routhiauville.

Il convient de préciser que tout l'estran de la côte sud présente une pente particulièrement faible de l'ordre de 0,15%. Le transit littoral se produit donc sur une très grande largeur et que le transport en suspension doit y être prépondérant. Cette mise en suspension s'opère préférentiellement pour les niveaux de marée haute intéressant une vaste superficie. La dissymétrie de la contribution des courants de marée au bilan sédimentaire accentue les débits de la dérive littorale.

La rive nord de l'estuaire au niveau de la pointe du Haut-Banc présente, comme indiqué précédemment, une orientation sud-est. L'orientation des houles incidentes et la variation des directions de propagation induite par la réfraction conduisent à un transit littoral orienté vers l'intérieur.

L'évolution de la morphologie des rives intérieures de l'estuaire s'explique principalement par les caractéristiques de courants de marée.

D'un point de vue général, les ondes de marée, le long du littoral picard, longent la côte du sud vers le nord. A l'extérieur de l'estuaire de l'Authie, les courants sont maximaux à pleine mer. Lors du flot, les courants orientés vers le nord, contournent la flèche sableuse de Routhiauville en venant éroder la rive nord. L'ordre de grandeur évoqué par les auteurs pour les vitesses maximales serait de 2m/s. Vers l'intérieur de ce mouvement général de rotation des courants, les vitesses plus faibles favorisent un dépôt des sédiments que véhiculent les courants. Ce phénomène contribue à l'engraissement de la flèche sableuse de Routhiauville. De plus, à pleine mer, les courants sont maximaux à l'extérieur de l'estuaire, alors qu'ils tendent à s'annuler vers l'intérieur de l'estuaire désormais rempli. La transition entre ces deux extrêmes

d'intensité de vitesse se traduit par une allure de champ de vitesses présentant des similarités avec le précédent conduisant également aux mêmes conséquences en termes de sédimentologie avec une déflation de la rive nord et un engraissement de la flèche de Routhiauville.

Lors du jusant, les courants de vidange de l'estuaire sont déviés par la flèche sableuse vers la rive nord et également par les courants généraux à l'extérieur de la baie toujours vers cette rive nord. Les caractéristiques de ces courants tendent également à faire progresser vers le nord la flèche de Routhiauville. Avec l'abaissement du niveau des eaux et l'émergence des hauts fonds, la vidange de l'estuaire se poursuit dans les chenaux de l'Authie que le développement de la flèche continue à dévier toujours davantage vers la rive nord, accentuant de ce fait son érosion.

Une modélisation numérique a été réalisée par SOGREAH et LNH en 2003 lors d'un travail intitulé "étude hydro-sédimentaire de la baie d'Authie". Elle donne en particulier des champs de vitesses recoupant les considérations mentionnées plus haut.

Une campagne de mesures a été effectuée par Dobroniak en 1999 en divers points répartis sur l'ensemble de la baie et en particulier en arrière des enrochements à proximité de la dune blanche. Elle a relevé une valeur maximale de 1,15 m/s enregistrée une heure avant la pleine mer alors que celles relevées de jusant ne dépassaient pas 0,5 m/s. Le jusant s'accompagne de courants plus faibles que ceux du flot, même s'ils gardent leur intensité plus longtemps. D'une façon générale, les courants de remplissage de la baie sont plus intenses que ceux de vidange. Le flot contribuerait donc davantage à la dynamique sédimentaire que le jusant.

Ces ordres de grandeur recoupent les valeurs enregistrées par le LNH en 1966 et 1996 lors de campagnes de suivis de trajectoires par flotteurs dans la partie nord-est de la baie où des courants de surface allant jusqu'à 2,5 m/s avaient été mesurés dans le chenal lors du flot.

4.3.1 Evolution historique

Les mouvements et tendances évoquées plus haut s'inscrivent dans la continuité de l'évolution historique de la baie.

Nous donnons ci-dessous, une carte générale de l'évolution du trait de côte d'après Dobroniak (2000) depuis 1199.

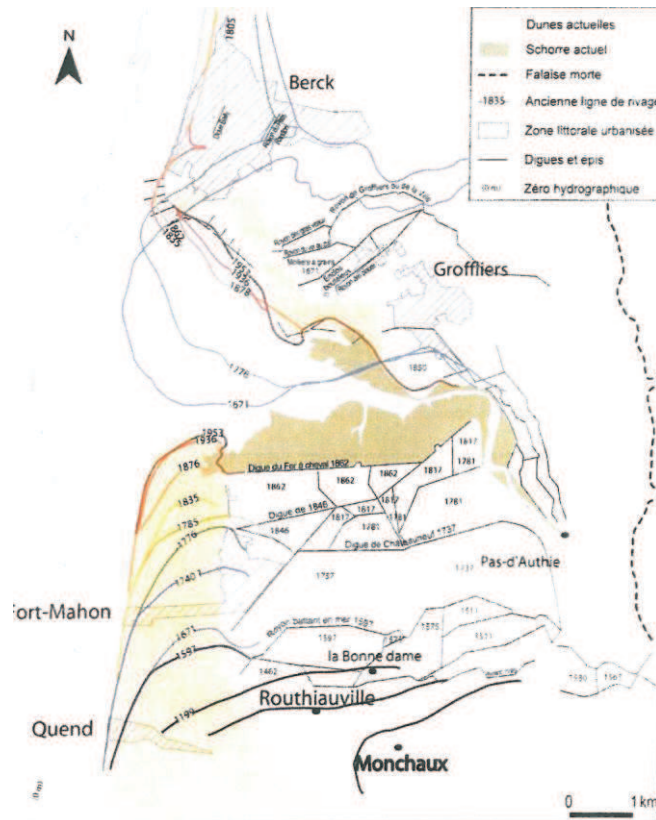


Figure 4.3

On note bien la progression continue de la pointe de Routhiauville vers le nord et le recul progressif de la pointe du Haut-Banc. Concernant l'évolution du chenal, le même auteur a établi une carte des positions successives de l'axe du chenal de l'Authie au cours du XXème siècle.

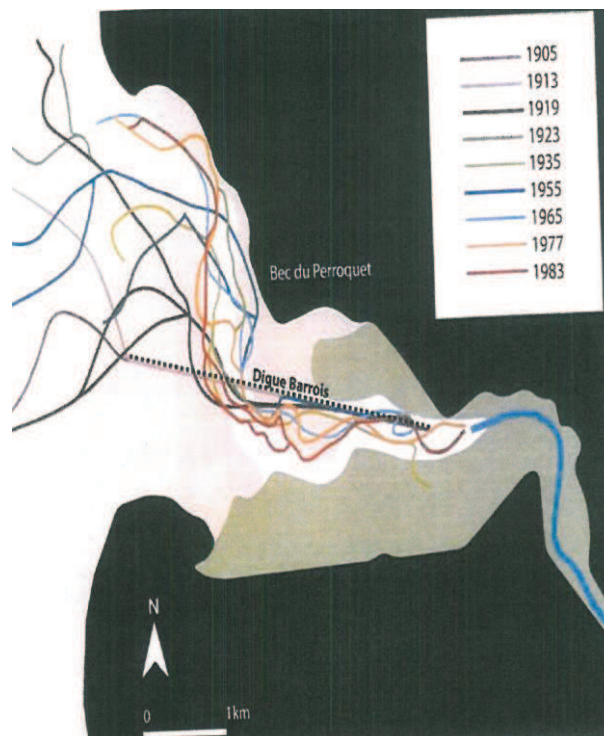


Figure 4.4

L'embouchure du fleuve s'est déplacée vers le nord, la pointe a progressé dans la même direction. Le développement de la flèche sableuse a constamment repoussé le cours de l'Authie dans l'estuaire vers la rive nord qui n'a cessé de reculer. Cette présentation masque toutefois le fait que le chenal n'est pas vraiment homogène mais qu'il se compose plutôt de plusieurs bras de diverses profondeurs qui constituent des passages privilégiés du débit avec des répartitions variables suivant la phase des marées.

La figure 4.4 illustre l'efficacité initiale de la digue Barrois qui, construite dans la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle, permettait de bien guider le chenal de l'Authie sur tout le linéaire de l'ouvrage. En raison, notamment de l'absence d'entretien du chenal pendant la première guerre mondiale, les apports sédimentaires ont conduit à un dépôt suffisamment épais à l'embouchure pour permettre au chenal de franchir la digue Barrois et de reprendre sa migration vers le nord et vers l'est.

On peut également noter que le tracé de 1955 longe le rivage à proximité du bec du Perroquet.

On observe aussi sur la figure, l'influence de la digue submersible de l'anse des sternes qui sert d'appui au chenal. On note également un tracé de 1977 très proche du rivage de l'anse des Sternes. Le relevé six années plus tard, montre que l'allongement de la digue a permis de redresser favorablement le cours de l'Authie.

Plus en amont, la comparaison des tracés semble indiquer une tendance à une migration vers la rive sud des méandres du chenal.

La tendance d'évolution à long terme est un comblement de l'estuaire. D'après Dobroniak (2000), ce comblement devrait se traduire par une diminution des volumes oscillants et partants, une atténuation de l'intensité des courants de marée entraînant une diminution générale des phénomènes d'érosion. Toutefois, le comblement de l'estuaire s'accompagne d'un encaissement du chenal par rapport aux fonds qui s'exhaussent et que la divagation des multiples chenaux ne s'en trouve pas freinée.

Enfin, il importe de mentionner la comparaison des traits de côte relevés entre 1997 et 2006 et réalisée par CREOCEAN sur la base des documents suivants :

- Levé photogrammétrique de TOPOPHOT en 1997,
- Photo-interprétation de l'ortholittorale 2000 de l'IGN,
- Levé topographique du SMBC 62,
- Levé LIDAR de EUROSENSE du 13 juillet 2006.

La figure ci-dessous présente la superposition des divers tracés :

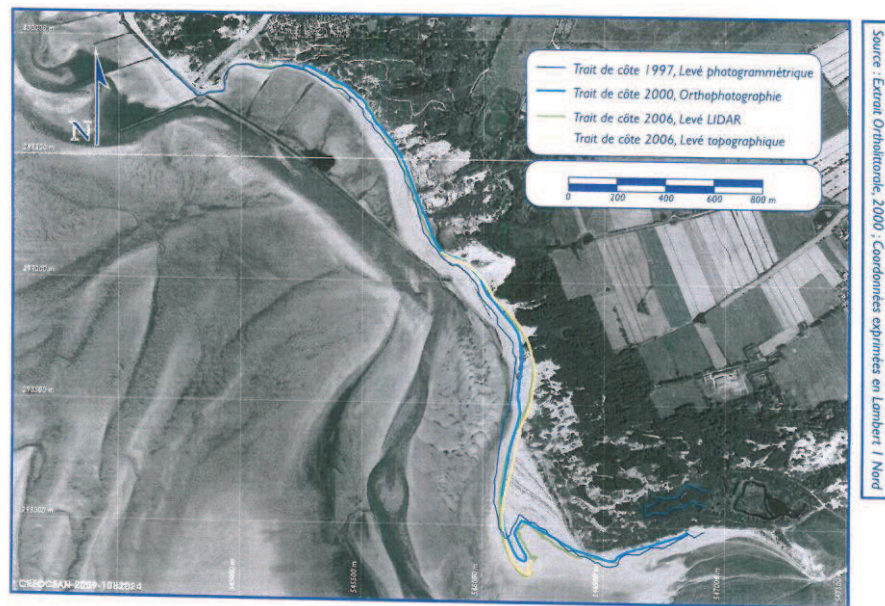


Figure 4.5

Nonobstant les difficultés qui s'attachent à la comparaison de tracés obtenus suivant des techniques très différentes, elle met en évidence une tendance générale à l'érosion sur quasiment tout le linéaire depuis l'anse des sternes jusqu'au Bec du Perroquet. Les exploitations plus précises par secteurs faites par la société seront rappelées dans les paragraphes suivants.

Logiquement, les évolutions du littoral concernant les secteurs Est et Sud, n'ont pas été examinés de façon aussi systématique que celles de la rive nord. Ce littoral représente en majorité des schorres sauf à l'abri du bec du Perroquet où le littoral garde jusqu'à l'extrémité de la voie de communication, son caractère sableux. L'évolution de ces schorres, depuis la fin du XIXème siècle est illustrée ci-dessous par une figure issue du travail de Dobroniak (2000) :

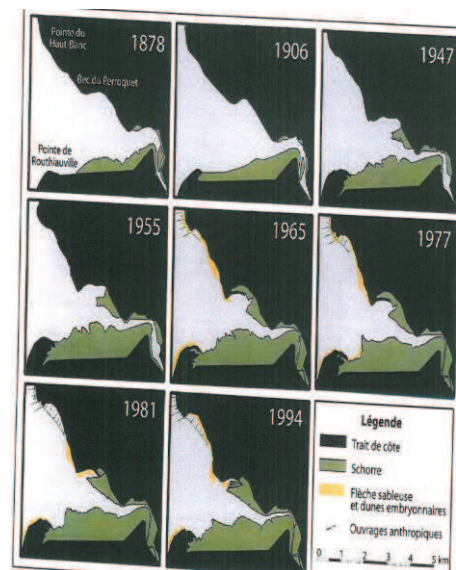


Figure 4.8

Cette progression constante illustre le comblement de la baie. Le développement sur la rive nord s'est opéré de façon plus restreinte, plus tardivement et plus lentement que sur la rive sud. Entre 1965 et 1997, le schorre sur la rive nord aurait progressé à une vitesse de l'ordre de 1ha/an doublant quasiment sa superficie.

Sur la figure, on distingue sur la rive nord, la pointe que fait le trait de côte en noir par rapport à l'enveloppe de l'extension du schorre. Il s'agit du coude que fait la digue d'enclôture. Cette configuration indique que cette zone d'ouvrage est particulièrement exposée aux courants à l'occasion de marées de forts coefficients. Toutefois, cette considération pourrait être à moduler en fonction de la position de ou des chenaux de l'Authie à ce niveau. L'examen de la figure 4.4 donnant l'évolution de la position de l'axe du chenal montre que la dernière position indiquée, celle de 1983, s'écarte favorablement du coude de la digue. En revanche, six années plus tôt, l'axe du chenal en était très proche. Il faut aussi faire observer que, à ce niveau également, les divagations du chenal sont à la fois amples dans l'espace et rapides. Il demeure que l'évolution du schorre constatée entre 1981 et 1994 laisse penser que le chenal ne s'est pas rapproché de la digue. En effet, son avancée a englobé le coude en 1994 alors qu'il reste en-deçà en 1983.

Le schorre rive sud occupe une vaste superficie de l'ordre de 550ha mais ne semble plus progresser. SOGREAH indique un recul général pour cette zone dans son étude de 2003. Les irrégularités de l'enveloppe de son extension sont liées aux méandres du chenal de l'Authie.

On pourrait penser à essayer de faire une exploitation des cartes (Dobroniak 2000 et Marion 2007) de taille de sédiments ou de la teneur en vase des sédiments pour en tirer des éléments indiquant une pondération des niveaux d'exposition à la houle du linéaire du littoral en fond de baie. Toutefois, cet exercice n'a pas été conduit pour plusieurs raisons. La maille de la grille des prélèvements n'a pas la taille adaptée à l'examen de la zone qui nous intéresse, à savoir celles situées au voisinage des ouvrages. La présence du réseau de chenaux de l'Authie rend plus délicate l'interprétation, dans la mesure où les fonds de chenaux sont également des zones de dépôts préférentielles de vase. La variation temporelle des paramètres retenus, la taille moyenne et la teneur en vase, en fonction des derniers événements survenus avant les prélèvements devraient aussi être prise en compte. En effet, ce sont surtout les événements extrêmes qui déterminent le degré d'exposition. Il est donc prudent de considérer qu'on ne peut tirer de ces cartes que des indications générales. Comme elles recoupent celles que fournissent les autres documents, ces cartes n'ont pas été reproduites ici.

Il est difficile de préciser dans quelles proportions la digue Barrois continue à jouer un rôle significatif dans l'évolution morpho sédimentaire de cette partie arrière de la baie. L'allure de l'enveloppe du schorre situé au nord montre que cette digue a eu longtemps un rôle bénéfique sur sa croissance.

4.3.2 Synthèse

Globalement, l'ensemble des considérations développées plus haut peuvent être synthétisées par une figure générale de la baie indiquant les mouvements sédimentaires les plus significatifs et donnée dans l'étude de SOGREAH en 2003 :

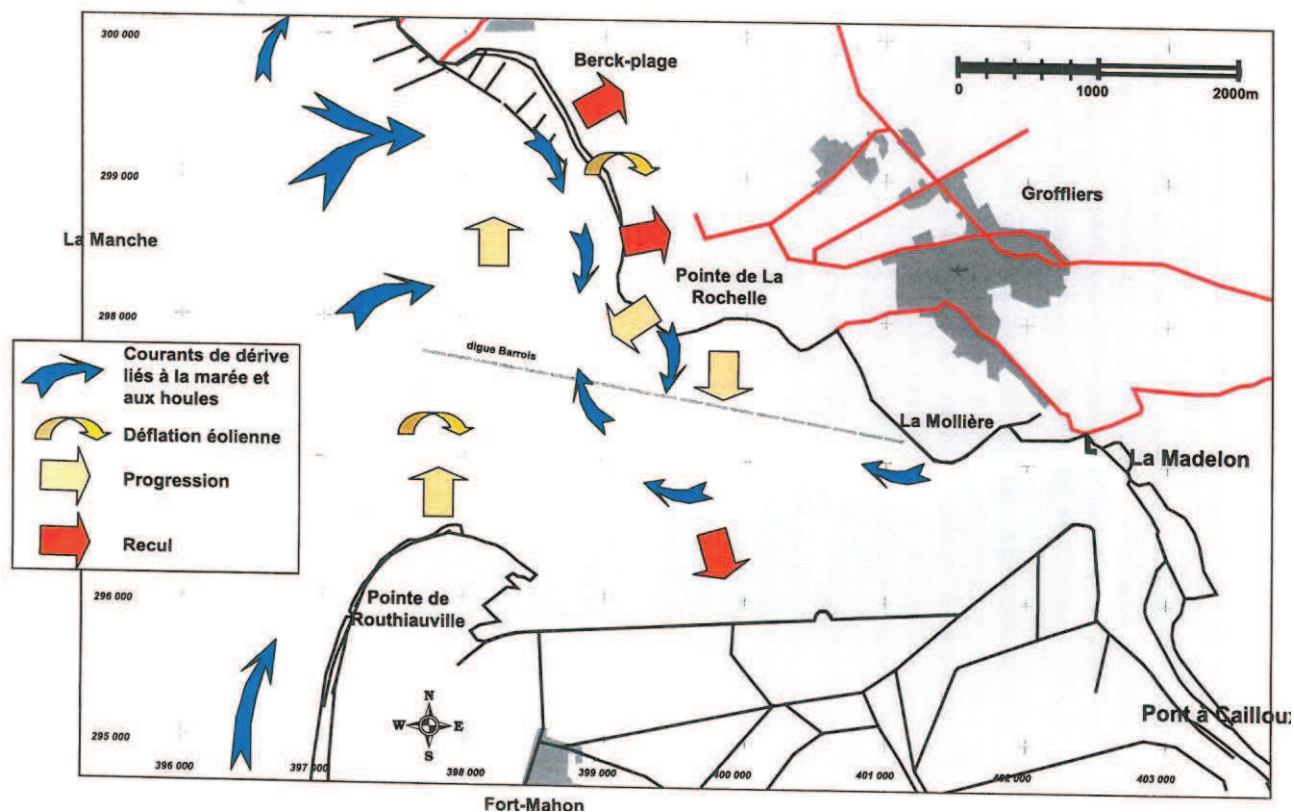


Figure 4.9

Concernant l'exploitation de ces différents éléments dans l'optique d'une meilleure estimation de l'exposition des ouvrages et des dunes à la rupture, on peut résumer les indications mentionnées plus haut, en rajoutant quelques points particuliers :

- L'ouvrage d'enclosure nord voit son environnement de schorre progresser. Cela indique que, de façon générale, l'exposition aux houles diminue progressivement. Les plans de vagues réalisés par Bonnefille et Allen (1967), mettent bien en évidence l'expansion des houles dans la baie. Toutefois, les tracés s'interrompent très tôt dans l'estuaire et ne peuvent être exploités pour les digues. Les calculs de propagation réalisés par DHI (2011) fournissent, en revanche, des indications qui pourront être mises à profit pour cerner les ordres de grandeur d'atténuation dans la baie. Des considérations sur la base des méthodes utilisant les fetchs pourront compléter ces indications.

- Le tracé de l'ouvrage fait toutefois un coude qui le rapproche du chenal de l'Authie. Dans cette zone, le chenal a subi des divagations assez marquées. La saillie que représente le coude dans le champ de courants lors des niveaux extrêmes pourrait se traduire par des intensités susceptibles d'engendrer des érosions. Un examen précis des résultats de l'étude EDF/SOGREAH devrait contribuer à l'estimation des ordres de grandeur de vitesses à considérer.

- L'ouvrage d'enclosure sud est davantage abrité des houles. Il se situe à l'arrière d'un schorre très développé dont la progression est désormais stoppée et qui subit même par endroits des reculs qui pourraient être associés à la divagation des chenaux de l'Authie. En ce qui concerne la section appartenant au conservatoire, la principale source d'exposition devrait être une érosion de son pied par l'action d'un des éléments du réseau de drainage que l'Authie développe sur le schorre adjacent.

V. DIAGNOSTIC DE L'OUVRAGE

Une inspection technique détaillée a été réalisée les 07 et 08 décembre 2011. Le principe général de la méthode a consisté à parcourir intégralement à pied le linéaire des ouvrages à diagnostiquer, en répertoriant les informations visuelles sur les caractéristiques morphologiques externes de l'ouvrage et sur les désordres ou les présomptions de désordre affectant l'une ou l'autre de ses composantes

Le présent document devra servir comme point de départ et de référence à une surveillance régulière des digues. Un cahier de fiches de relevé d'inspection montrant sur chacun des profils en travers levé, les différents types de désordres constatés ainsi que des photos référencées, est joint en annexe.

5.1 Etat général de la digue de la Mollière

Edifiée dans les années 1850, la digue s'étale sur un linéaire de 1250m. Elle est composée de terre argileuse et de tout venant sablo-graveleux.

La crête et le talus intérieur sont fortement boisés sur la majeure partie du linéaire sauf sur le dernier tronçon, en partie conforté par le remblai ajouté. Sur ce tronçon la végétation herbacée est prédominante. Sur le talus extérieur, il y a prédominance de la végétation herbacée.

La digue est aussi criblée de galeries et terriers d'animaux fouisseurs.

La cote d'arase est supérieure à +7.00m IGN69 sur la plus grande partie du linéaire. Les risques de franchissements en cas de grandes marées sont très faibles bien que lors de l'étude de danger, nous avons analysé les conséquences en cas de survenance.

Les pentes du talus amont (coté Baie) sont relativement douces entre les profils 1 et 4 (pentes entre 2/1 et 5/1).

Mais elles se raidissent entre les profils 5 et 10 (pentes entre 0.9/1 à 2.9/2) sur des hauteurs de l'ordre de 2m et des largeurs en crête de l'ordre de 3m à 4m. La faible épaisseur de la digue s'ajoutant aux dégradations constatées rend en effet cette digue particulièrement sensible au risque de brèche (cf. Etude de danger).



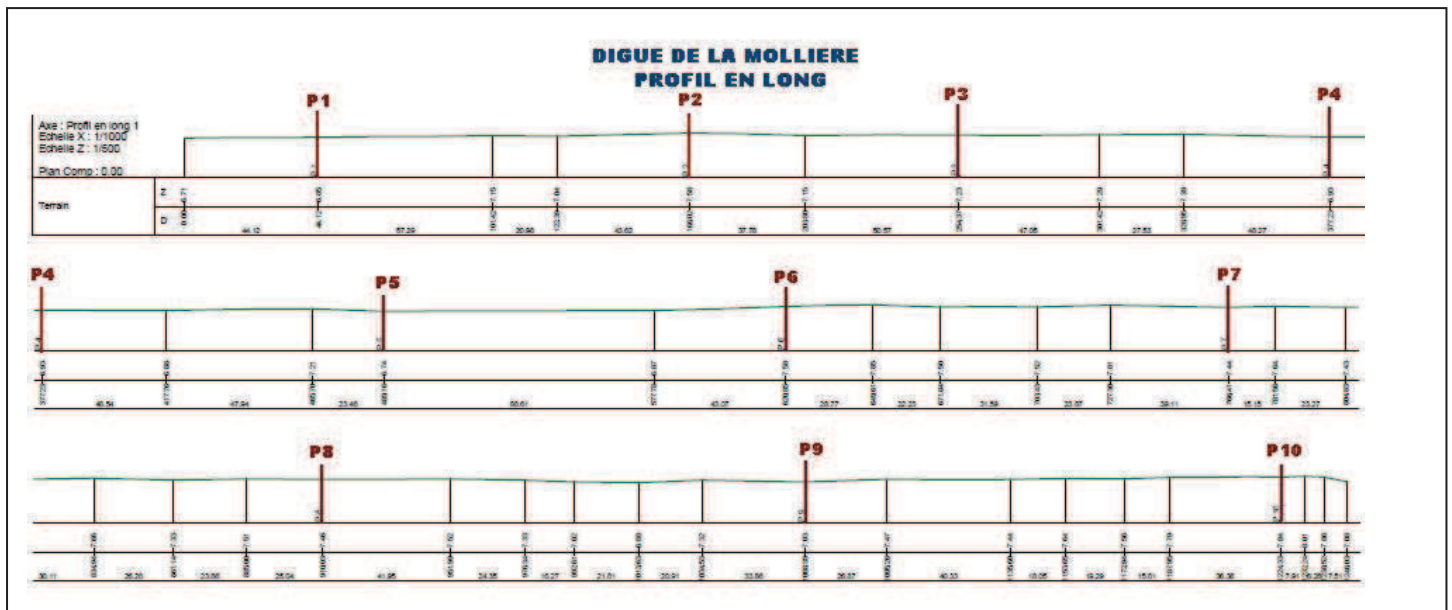
Figure 5.1 Profils levés de la digue de La Mollière

5.1 Les travaux topographiques

Une campagne de levés topographiques par voie terrestre été réalisée en décembre 2011 par le cabinet de géomètre GEO SOLUTIONS pour le compte du Conservatoire.

Cette campagne a permis la réalisation de :

- ▶ un profil en long de la ligne de crête du tronçon de digue de la Mollière appartenant au Conservatoire (cordon dunaire et digue de protection), sur un linéaire de 1246m avec une précision de +/-5cm en altimétrie.

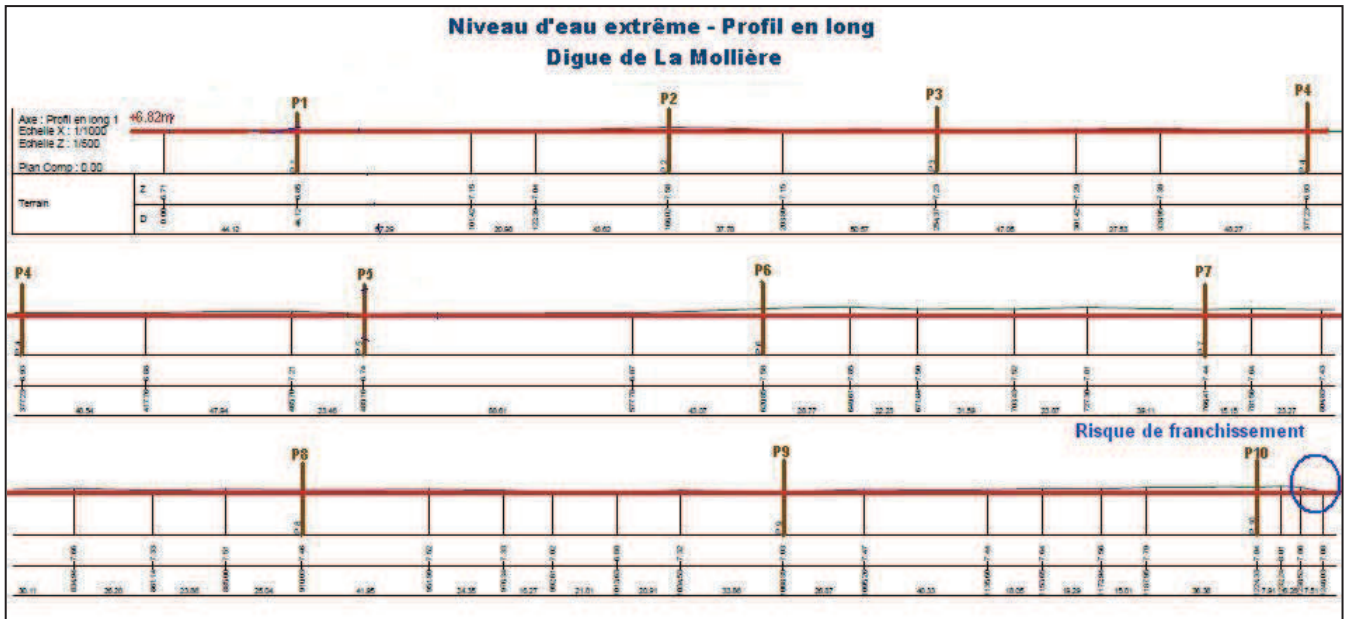


- ▶ 10 profils en travers de l'ouvrage ont été exécutés avec un espacement de l'ordre de 120m à 150m et une précision de +/-5cm en altimétrie et en planimétrie. Ces profils sont donnés en annexe jointe.

Le rattachement planimétrique est fait au système CC50 et le rattachement altimétrique au système IGN69.

5.2 Comportement de l'ouvrage au franchissement en cas de niveaux d'eaux extrêmes

L'application du niveau extrême (+6.82m) sur le profil en long de la digue de La Molière montre que ce niveau affleure sur la grande majorité du linéaire, avec un léger risque de franchissement de l'ouvrage après le profil P10.



5.3 Diagnostic géotechnique

La largeur en crête conjuguée avec la pente des talus nous renseignent sur la largeur en pied qui conditionne le gradient hydraulique moyen dans le remblai. Le critère $L/H > 8$, (L : largeur à la base, H : hauteur de la digue), nous donne ainsi une appréciation sur la sécurité géotechnique des digues en remblai (cf. *Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires, surveillance, entretien et diagnostic des digues ; P. Mériaux et al – CEMAGREF*). Il apparaît ainsi (cf. tableau ci dessous) que le tronçon compris entre les profils P7 et P10 présente un risque d'instabilité géotechnique.

N° de profil	Hauteur (m)	Largeur de base (m)	Rapport L/H
P1	1.60	15.20	9.50
P2	2.47	26.30	10.65
P3	1.86	23.40	12.58
P4	2.41	25.10	10.41
P5	2.58	23.80	9.22
P6	1.90	18.10	9.53
P7	1.97	8.10	4.11
P8	1.66	7.50	4.52
P9	1.36	8.40	6.18
P10	1.98	15.8	7.98

Tableau 5.1 – Risque d'instabilité pour les profils portés en rouge

5.4 Critère de pente pour l'analyse de la stabilité

La pente des talus de la digue constitue un autre élément important à prendre en compte pour l'analyse de la stabilité de l'ouvrage. Ainsi, des pentes de talus côté mer inférieures à 3 (horizontal)/1 (vertical) présentent des risques d'instabilité à la décrue du fait de la saturation du remblai amont. Idem côté aval pour la stabilité en crue lorsque la saturation se développe dans cette zone (cf. *Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires, surveillance, entretien et diagnostic des digues ; P. Mériaux et al – CEMAGREF*).

Même si la digue de La Mollière est un ouvrage de hauteur limitée et sa stabilité étant donc a priori moins critique que celle d'ouvrages de tailles plus importantes, on enregistre une érosion importante en pied de talus extérieur, avec pour conséquence un raidissement du talus.

Il y a donc risque d'instabilité sur la majorité du linéaire du talus extérieur (sauf entre les profils P2 et P3) et sur le linéaire coté intérieur entre les profils P7 et P9 (cf. tableau ci-dessous)

N° de profil	Talus extérieur	Talus intérieur
P1	2.1/1	3.6/1
P2	3.8/1	4.1/1
P3	4.2/1	4.3/1
P4	2.1/1	3.7/1
P5	1.7/1	3.2/1
P6	1.15/1	3.4/1
P7	1.47/1	2.2/1
P8	0.9/1	1.8/1
P9	1.54/1	1.8/1
P10	1.18/1	3.5/1

Tableau 5.3 - Pente des talus

5.5 Analyse de la vulnérabilité de l'ouvrage

En complément de l'analyse du diagnostic des digues, il convient de faire une évaluation sommaire des enjeux liés à d'éventuelles ruptures ou dysfonctionnement.

En effet, les consignes de la rupture d'une digue doivent être appréciées, de façon à hiérarchiser les tronçons d'étude et à adapter, le cas échéant les moyens de diagnostic ou de confortement à la vulnérabilité des zones à protégées.

La vulnérabilité est appréciée selon un indice appelé indice d'enjeux ou indice de sécurité publique.

5.5.1 Indice d'Enjeux (IE) ou Indice de Sécurité Publique (ISP)

L'indice d'enjeux ou indice de sécurité publique est quantifié en fonction de la densité des bâtiments dans la zone potentiellement inondable protégée par la section de digue.

Notre analyse est faite selon la figure suivante :

	Indice Enjeux / Sécurité Publique						
	Fort		Moyen		Faible		Nul
	1		2		3		4
Critères	Condition	Trad. chiffrée	Condition	Trad. chiffrée	Condition	Trad. chiffrée	Condition
Population	Concentré	Nb bât > 110	Peu concentré	50 à 110 bât	Eparse	Moins de 50 bât	aucune
Infrastructures ouvertes au public	Fort trafic	>2000 voy/j	Trafic moyen	500 à 2000 voy/j	Faible trafic	< 500 voy/j	Aucune
Install. Séc civi/ défense/ordre publ	Oui		Aucune		Aucune		Aucune
Installations classés sensibles	Oui		Aucune		Aucune		Aucune
Sites classés pour l'environnement	Oui		Aucune		Aucune		Aucune
Unités de production	Importante		Moyen		Petite		Aucune
Patrimoine historique ou culturel important	Oui		Non		Non		Non
Risque de pollution majeure	Oui		Non		Non		non

Tableau 5.6 - Détermination de l'indice d'Enjeux

Compte tenu de la situation de polder à vocation agricole et écologique de la zone protégée par le tronçon de digue de la Mollière, nous proposons l'indice de sécurité publique suivant.

Ouvrage	Longueur	ISP
Digue en terre de la Mollière ; Rive Nord de la Baie d'Authie	1250m	3

Tableau 5.7 - Evaluation de l'ISP (Indice de Sécurité Publique)

A noter néanmoins que le choix final de l'indice de sécurité publique est à confirmer par le gestionnaire de l'ouvrage.

5.5.2 Evaluation de l'Indice d'Etat (IE)

L'indice d'état est à caractère technique, fonction de l'état mécanique et de l'usage de l'ouvrage, que nous pouvons définir comme indiqué dans le tableau suivant :

Indice d'Etat : IE	Etat de l'ouvrage
1	L'ouvrage est en limite de rupture : la sécurité immédiate de l'ouvrage ou de l'utilisateur n'est plus assurée
2	L'ouvrage présente des désordres mécaniques graves ou des dégradations très importantes qui peuvent mettre en cause à court terme l'état de service actuel
3	L'ouvrage demande des travaux importants ou spécialisés nécessaires pour arrêter le processus de dégradation qui à moyen terme le conduirait à passer en deuxième catégorie
4	L'ouvrage nécessite un entretien courant non spécialisé

Tableau 5.8 - Détermination de l'Indice d'Etat

Les aléas de rupture de la protection s'apprécient par l'état mécanique de l'ouvrage mais aussi en fonction du risque de surverse en rapport avec le niveau de d'eau retenu liée à une période de retour de l'événement. C'est ainsi nous avons préféré retenir 2 critères pour évaluer l'indice d'état mécanique des tronçons :

- un critère lié aux désordres observés
- un critère lié au niveau de la côte d'arase du tronçon comparé au niveau de crue de référence

Compte tenu de l'état de la digue, nous proposons l'indice d'état suivant.

Désignation de l'ouvrage°	Indice d'Etat
Digue en terre de la Mollière ; Rive Nord de la Baie d'Authie ;secteur Sud	2

Tableau 5.9 - Indice d'Etat (IE)

5.6 Hiérarchisation des risques

L'évaluation du risque associé à un tronçon de digue est le croisement de l'aléa mécanique du tronçon et de la vulnérabilité des espaces à protéger.

Son estimation est faite au moyen d'une note donnant le niveau d'urgence prioritaire pour intervenir. Cette note est définie avec le code couleur suivant :

1	Urgence forte
2	Urgence moyenne
3	Urgence faible
4	Entretien courant

Tableau 5.10 - Ordre de la priorité

Indice d'état		Indice Enjeux / Sécurité Publique			
		Fort	Moyen	Faible	Nul
		1	2	3	4
Ouvrage en limite de rupture	1	1	1	1	3
Ouvrage présentant des désordres mécaniques graves	2	1	1	2	3
Ouvrage présentant des débuts de désordres pouvant devenir graves	3	2	2	3	3
Ouvrage nécessitant un entretien courant	4	4	4	4	4

Tableau 5.11 - Détermination de la note d'un ouvrage

En croisant les indices d'Etat et les indices de Sécurité Publique, le tableau suivant donne les ordres de priorité concernant la digue de la Mollière.

Désignation de l'ouvrage°	Note	Conclusion
Digue en terre de la Mollière ; Rive Nord de la Baie d'Authie ; secteur Sud	2	Urgence Moyenne

Tableau 5.12 – Détermination des ordres d'urgence

VI. DISPOSITIONS A PRENDRE POUR LE CONFORTEMENT DE L'OUVRAGE

6.1 ANALYSE DES PHENOMENES D'INSTABILITE

L'ouvrage est soumis à deux types de sollicitations, l'action de la houle et l'action des courants.

En ce qui concerne la houle, sa hauteur est limitée en raison de la position de l'ouvrage situé en fond de baie, lui permettant de bénéficier d'une part, d'une réduction classique d'intensité, du fait de la réfraction dans l'estuaire, comme l'avait déjà bien montré les anciens plans de vagues réalisés par Bonnefille et Allen au niveau de l'entrée de la baie, et, d'autre part, d'une atténuation complémentaire par diffraction autour de la flèche sableuse de Routhiauville qui, s'avancant largement au nord représente un abri au moins partiel pour la digue. Les exemples de calcul de propagation réalisés par DHI dans l'étude confirment ces considérations. En effet, si l'on veut mentionner des ordres de grandeur, les niveaux d'agitation résiduelle ressortant de l'examen des résultats présentés seraient de l'ordre de 5 à 20 % des valeurs régnant au large, suivant les configurations de houle, notamment la direction de provenance.

A titre d'exemple, si nous considérons un événement de fréquence combinée houle-niveau d'eau centennale, avec un niveau de mer de +6.00 et une houle au large de 3.30m, un coefficient d'atténuation de 20% conduit à une hauteur de houle en pied de 66cm. Mais, un autre phénomène réduit encore la hauteur de la houle, il s'agit du déferlement induit par les faibles profondeurs. Devant la digue, s'étend un schorre relativement plat. Son niveau au voisinage de la digue est voisin de +5.00, ce qui conduit à une profondeur de l'ordre du mètre. En termes de hauteur significative, cela signifie que la houle en pied d'ouvrage ne devrait guère dépasser 50 à 60cm (à condition que le niveau du sol reste à la cote sur une distance suffisante).

On peut refaire le même calcul avec un autre événement centennal, un niveau de mer de +6,25 et une houle de 2,03m. Dans ce cas, la limitation par le déferlement n'est pas aussi marquée, car avec une profondeur, cette fois de 1.25m, la hauteur déferlante pourrait atteindre environ 60 à 75cm. En revanche, la houle du large ne serait pas en mesure de générer cette hauteur en fond de baie, puisque cette dernière ne devrait pas dépasser les 40cm.

Ceci étant, les coefficients d'atténuation de la houle en fond de baie dépendent de multiples facteurs que sont notamment, la direction de provenance, la période, mais aussi le niveau du plan d'eau. Ainsi, plus le niveau s'élève et moins l'atténuation est importante. C'est particulièrement évident si l'on considère le rôle de protection que joue la flèche sableuse de Routhiauville. Pour des niveaux particulièrement élevés du plan d'eau, et vis-à-vis d'une houle de faible inclinaison par rapport au linéaire de la côte générale, la diffraction autour de la flèche sableuse de Routhiauville dont la cote varie entre +4.00 et +5.00 ne joue quasiment plus. De même, la réfraction est atténuée. C'est surtout le déferlement sur cette flèche qui représente le mécanisme d'atténuation principal. De plus, le niveau en pied de la digue se situe au voisinage de +5.00. Certes, le schorre est relativement plat, mais pas suffisamment large sur tout le linéaire de l'ouvrage pour que le déferlement s'opère totalement, notamment au voisinage du coude se trouvant proche du chenal de l'Authie (une trentaine de mètres).

En ce qui concerne les courants, les rendus cartographiques des champs de courants calculés par EDF/SOGREAH en 2003 et reproduits dans l'étude CREOCEAN de 2009, montrent des vitesses maximales de l'ordre de 0,6 à 0,8 m/s à proximité du coude. Il faut toutefois, noter que les conditions modélisées portent sur une marée de coefficient 103 et un débit de crue de l'Authie. Il n'est pas démontré que cette configuration représente les conditions les plus défavorables vis-à-vis des risques d'érosion de la digue.

Quoi qu'il en soit, Il est intéressant de tenter de comparer les intensités érosives de l'action des courants et celle des houles pour vérifier laquelle de ces deux formes d'agression représente le risque le plus important pour l'intégrité de l'ouvrage.

a) Action des courants

On peut examiner, le calibre minimal des matériaux qui seraient stables sous l'action des courants indiqués. La formulation de base d'Isbach permet de donner des ordres de grandeur, pour des éléments posés sur une pente faisant un angle α avec l'horizontale :

$$D = \frac{V^2}{2g} \times \frac{1}{0,7\Delta} \times \frac{1}{k} \quad \text{avec} \quad k = \cos\alpha \sqrt{1 - \frac{tg^2\alpha}{tg^2\phi}}$$

où V est la vitesse du courant, Δ la densité déjaugée du matériau, g l'accélération de la gravité et ϕ l'angle de frottement interne du matériau.

Pour une vitesse de 1.6m/s, une masse volumique de 2,6T/m³ et un angle de frottement interne de 45°, l'application de la formule conduit à un diamètre voisin 12cm pour des fonds plats et 20cm pour une pente de 3/2. Il s'agit donc d'enrochements de 5kg et 20kg respectivement.

b) Action de la houle

L'ordre de grandeur de la taille des enrochements pour assurer une stabilité vis-à-vis d'une houle de hauteur H peut être donné par la relation suivante déduite de la formule d'Hudson :

$$D = \sqrt[3]{\frac{tg\alpha}{K_D} \times \frac{H}{\Delta}}$$

avec K_D : Nombre de stabilité à prendre égal à 2 et $H = H_{1/10}$

Une houle de $H_s=40$ cm conduit à un diamètre de 23cm soit un enrochement de 32kg

c) Conclusions

Les ordres de grandeur pour l'action de la houle sont donc plus forts que ceux pour l'action des courants, d'autant qu'une hauteur de houle de 40cm représente un événement de période de retour sûrement moindre que celle d'un courant de 1,6m/s agissant en pied d'ouvrage.

Ces estimations montrent ainsi que c'est l'action de la houle qui représente le danger principal.

La partie de l'ouvrage la plus exposée correspond évidemment à la section nord de l'ouvrage jusqu'au coude. En effet, plus à l'est, le linéaire bénéficie de l'abri offert par le point de diffraction que représente l'avancée de la structure sur le schorre. Il faut aussi noter que les houles abordant la digue peuvent garder une certaine inclinaison par rapport au tracé et donc générer un certain transit des matériaux arrachés au corps d'ouvrage. Ce processus est de nature à accentuer l'exposition de la partie voisine de l'enracinement de la digue au nord. Toutefois, le fait que le schorre s'élargit lorsqu'on remonte le linéaire vers le nord, signifie un meilleur amortissement des houles par déferlement.

6.1.1 Scenarios analysés

a) Divagation du chenal de l'Authie au voisinage du coude

Le chenal se rapproche de l'ouvrage et sape progressivement le schorre en son pied. L'action érosive sur le talus et en pied à proximité immédiate de l'ouvrage conduit à une réduction continue de la largeur du corps de digue jusqu'à l'ouverture d'une brèche. Ce scénario ne paraît pas très probable (voir figure 6.1 photo montrant la grande marée de 1990, au port de la Madelon).

La largeur de la digue à ce niveau a bénéficié de confortements par remblai. La divagation représente des processus sédimentaires à long terme qui peuvent être repérés et anticipés. Le risque de rupture brutale est peu probable.



Figure 6.1 – Grande marée de 1990 -Port de la Madelon – WABEN

Source M. Debeaumont

b) Création d'une brèche dans le corps de digue

Les zones les plus exposées sont celles associant une crête basse et un corps de digue assez étroit. Le processus serait le suivant (arbre des défaillances) :

Lors d'un événement associant un niveau élevé du plan d'eau et une tempête, la mer commence par éroder le pied, les matériaux en surplomb s'effondrent progressivement. Ils sont évacués par les courants de houle dus à l'incidence de cette dernière par rapport à l'axe de la digue et aussi par les courants de marée. A mesure que le niveau progresse, l'entaille dans le talus s'élargit et s'approfondit dans le sens transversal à l'ouvrage. A partir d'un seuil du niveau, le run-up (ascension de la vague) sur le talus atteint l'angle extérieur que fait la crête avec le talus exposé, le processus d'érosion s'accélère (érosion de la crête). Le seuil suivant est l'atteinte de l'angle intérieur que fait la crête avec le talus côté terre. Il se produit alors des franchissements sollicitant le talus arrière. L'abaissement de la crête s'accélère. Le niveau de l'eau dépasse la crête et engendre ainsi une brusque surverse.

Le développement de la brèche s'accélère avec le déversement sur le talus arrière. Ce scénario de rupture de la digue par action de la houle érodant successivement le pied, le talus, la crête et le talus arrière avant l'ouverture puis l'élargissement de la brèche apparaît donc le plus probable.

A noter cependant que la présence d'une végétation herbacée est susceptible de retarder ces phénomènes.

6.1.2 Recommandations

Les études antérieures ne fournissent pas les éléments suffisants pour une quantification fine des niveaux d'exposition de la digue. Il manque en particulier, une étude complète de propagation de houle jusqu'au fond de la baie avec des simulations réalisées pour différents niveaux de plan d'eau. De même, les études courantologiques réalisées ne portaient pas précisément sur le secteur avoisinant l'ouvrage. Ainsi, les configurations testées ne représentaient pas les situations les plus défavorables du point de vue de l'exposition de la digue et en particulier du coude vis-à-vis de l'érosion. De même, nous ne disposons pas de données précisant l'ampleur des divagations du chenal de l'Authie dans ce secteur. Au vu des éléments disponibles, nous pouvons toutefois établir que c'est la houle qui représente le facteur de risque le plus probable.

En l'absence d'éléments précis, c'est le comportement historique de l'ouvrage qui peut renseigner sur l'adéquation de son dimensionnement et de sa composition. Les dommages antérieurs, leur corrélation avec les événements qui les ont provoqués, les réparations constituent des données permettant de bien caler les hypothèses concernant les réponses structurelles de l'ouvrage vis-à-vis des événements qui le sollicitent.

Du point de vue du franchissement, il semble que l'ouvrage n'ait pas connu d'accidents majeurs. La cote d'arase serait donc suffisante pour des événements ayant une occurrence à l'échelle humaine.

Il faut cependant, préciser que la géométrie initiale n'est pas connue et que les travaux de maintenance dont l'ouvrage aurait pu bénéficier ne sont pas répertoriés. Sauf pour le rechargement réalisé sur une longueur d'environ 400m, en 1992, sur une longueur d'environ 400m (source M. Debeaumont, résident à Groffliers ; cf. figure 2.4.a, page 8).

Le rechargement a été fait avec un talus de 2/1, au moyen d'un matériau crayeux des carrières voisines du côté de l'Authie (voir figure 2.4.a). Depuis la réalisation de ce rechargement, le matériau crayeux semble avoir complètement disparu. Cela est probablement dû à sa propriété de dissolution en présence d'eau au cours du temps et aussi probablement à cause de la raideur de la pente.

Or, l'ouvrage n'est véritablement soumis à des sollicitations importantes qu'à l'occasion de conjonction de forts niveaux de mer et de tempêtes. L'espacement dans le temps des éventuels dommages ne favorise donc pas la mémoire de leur occurrence. La comparaison des coupes en travers le long du linéaire montre des largeurs très disparates, nonobstant les confortements connus mis en œuvre sur le versant arrière dans le secteur voisin du coude du tracé. Ces écarts de profil, à moins que ces différences n'aient été conçues dès la construction, pourraient témoigner d'une érosion continue dans le temps des secteurs les plus exposés. L'examen détaillé de l'ouvrage montre effectivement des traces d'érosion.

Le levé topographique réalisé à l'occasion de la présente étude présente aussi l'avantage d'établir un point de référence de la géométrie extérieure de l'ouvrage et permettra à l'avenir de préciser les ordres de grandeur de vitesse d'érosion des profils en fonction de leur localisation. Les incertitudes mentionnées plus haut seront alors levées, dans une large mesure.

Les recommandations d'intervention à faire sur la digue sont les suivantes :

Compte tenu des conclusions issues du diagnostic des ouvrages et des critères développés, il apparaît que la digue nécessite un renforcement des tronçons suivants (cf. Figure suivante):

- Renforcement du talus extérieur, coté mer, entre les profils P4 à P10 et au droit du profil P1, sur 950m environ
- Renforcement du talus intérieur, coté terre, entre les profils P7 et P10, sur 400m environ

- Il serait opportun de procéder à la taille de la végétation ligneuse pour limiter les infiltrations d'eau risquant d'endommager le corps de la digue et faciliter les visites techniques périodiques sur l'ouvrage. De même, il faudrait procéder au comblement des terriers multiples et profonds creusés par les animaux fouisseurs



Figure 6.2 - Digue de La Mollière – Sections à conforter

Deux types de confortement peuvent être envisagés. Compte tenu des aspects relatifs à la facilité d'accès, ils portent sur des interventions concernant le versant côté baie.

a) Cordon d'enrochements

Le premier type de confortement peut être réalisé sur la base d'un cordon d'enrochements. Pour fixer les ordres de grandeur, il pourrait s'agir d'une protection depuis le pied aux environs de la cote +5.00 au niveau +7.00 réalisés avec des enrochements pouvant être mis directement sur un géotextile suivant une pente de 3/2. Une telle protection présenterait l'avantage d'un entretien très faible.

b) Rechargement en matériau sablo-graveleux

Une alternative à la disposition précédente peut être trouvée en retenant un rechargement en matériau du même type que celui constituant l'ouvrage ou un peu plus grossier sur le talus extérieur reprofilé suivant une pente de 3/1 et en assurant à l'ouvrage une largeur minimale du remblai à une cote de référence. Cette solution nécessiterait un suivi et un entretien plus conséquent que celui relatif au cordon précédent. Elle ne devrait présenter qu'un intérêt limité pour le secteur protégé par la digue.

VII. RECOMMANDATIONS POUR LE MODE D'ORGANISATION ET DE SURVEILLANCE DES OUVRAGES

7.1 Mode d'organisation

Le site de la Baie d'Authie est inclus dans la Zone Naturelle d'Intérêt Floristique et Faunistique (ZNIEFF) de type I N°55, Rive Nord de l'Authie, ainsi que dans la zone d'Intérêt pour la Conservation des Oiseaux : ZICO N°62PE10.

La gestion des ouvrages situés dans la rive Nord est confiée au Conseil Général du Pas de Calais, par l'intermédiaire d'une convention tripartite, regroupant le Conseil Général, le Conservatoire du Littoral et le Syndicat Mixte Eden 62, (convention de 2008 pour une durée de 10 ans).

Pour les ouvrages situés sur la rive sud (digue rive sud), la gestion est assurée par SMBS (convention de 2011).

A noter que lors de la réunion du 10/01/2011, organisée par la DDTM62, il a été décidé de considérer **les ouvrages hydrauliques de la Baie d'Authie en classe C**, selon les dispositions du décret N°2007-1735 du 11/12/2007.

7.2 Mode de surveillance des ouvrages

Les digues à talus sont des ouvrages dits "souples", conçues avec des matériaux du talus pouvant admettre des mouvements mineurs sans remettre en cause la stabilité générale. C'est ainsi qu'il est recommandé de prévoir une surveillance régulière de ce type d'ouvrage. La présente note est extraite du fascicule N°4 édité par le CETMEF en février 2002, relatif à la surveillance, l'auscultation et l'entretien des ouvrages maritimes.

Afin de permettre au gestionnaire de disposer à tout moment d'informations fiables sur l'état des ouvrages maritimes, il est recommandé d'envisager un programme pluriannuel comportant plusieurs niveaux de surveillance, à savoir:

- La surveillance continue
- La visite annuelle
- Les inspections techniques détaillées périodiques
- Les inspections techniques détaillées exceptionnelles

7.2.1 La surveillance continue

Il s'agit d'une observation visuelle. Le principe consiste à parcourir intégralement à pied le linéaire de la digue, par un agent du service gestionnaire de l'ouvrage et concerne l'état apparent de la partie émergée de l'ouvrage.

Elle constitue le premier niveau obligatoire du suivi de l'ouvrage et doit être faite avec une fréquence au moins mensuelle.

Son but est de détecter toute évolution manifeste de l'ouvrage et d'enclencher le cas échéant une inspection détaillée exceptionnelle. Elle concerne les points suivants :

- La géométrie de l'ouvrage : rupture d'alignements, mouvements de matériaux, déflexions importantes...
- Etat des matériaux : fissures apparentes, éclats, efflorescences...

- Evolution de l'environnement proche : venues d'eau, avancées ou recul de plages voisines...

Les anomalies constatées doivent être reportées, datées et classées dans le dossier d'ouvrage

7.2.2 La visite annuelle

Il s'agit d'un examen comprenant des moyens d'observations courantes tels que système de positionnement, distance mètre, fils à plomb.... Il est effectué par une équipe de deux agents dont au moins un est de niveau ingénieur, spécialisé dans ce type d'ouvrage.

L'examen et le relevé des mesures portent sur :

- La géométrie d'ensemble de l'ouvrage : tassements, déflexions, évolution des pentes des talus, cote d'arase...
- L'état des matériaux des superstructures : fissures, bris de blocs, usures des joints s'il y a lieu,
- L'environnement proche de l'ouvrage

7.2.3 Les inspections techniques détaillées périodiques

L'inspection détaillée périodique doit être plus complète que la visite annuelle. Elle est en quelque sorte un bilan de santé de l'ouvrage. La fréquence de sa programmation est de l'ordre de 3ans à 5ans.

Elle est conduite par un ingénieur qualifié, spécialisé dans les ouvrages maritimes, assisté au besoin par d'autres spécialistes. Elle comprend :

- Le relevé topographique sur des points et des profils définis
- Le relevé des désordres éventuels (affouillements, cavités, circulation d'eau...) agrémentés de schémas cotés, photos, indications de l'état des matériaux
- Le relevé de la crête, des talus intérieur et extérieur et de la butée de pied ; mesures des fissures, bris ou perte de blocs, ...
- L'environnement dans le voisinage de l'ouvrage

7.2.4 Les inspections techniques détaillées exceptionnelles

Il ne s'agit pas d'une opération entrant dans le cadre d'un programme pluriannuel. Elle est initiée par le gestionnaire de l'ouvrage et décidée à la suite de :

- La découverte lors d'une visite périodique de désordres importants pouvant entraînés la ruine totale ou partielle de l'ouvrage.
- Une tempête exceptionnelle ou un accident survenu sur l'ouvrage

Elle est réalisée par une équipe de spécialistes. Elle a pour but d'établir un diagnostic de l'état de l'ouvrage débouchant soit sur la mise en place d'une instrumentation appropriée ou la proposition d'entretien ou de réparation.

7.2.5 Synthèse du programme de surveillance de l'ouvrage

Le programme de surveillance est récapitulé dans le tableau ci-dessous.

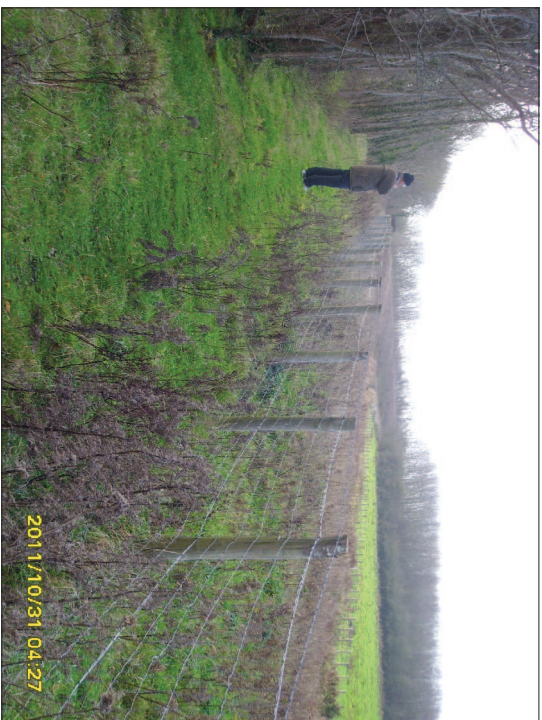
Niveau de surveillance	Moyens	Objectifs	Documents
Surveillance continue	Observations visuelles	Repérer des anomalies	Constat daté
Visite annuelle	Photos, mesures simples	Suivre l'évolution générale et les points particuliers définis dans le programme de surveillance	Rapport de visite
Inspection détaillée périodique	Photos, mesures plus détaillées, topographie, bathymétrie	Suivre et quantifier l'évolution de l'ouvrage	Rapport d'inspection
Inspection détaillée exceptionnelle	A adapter selon le cas	Etablir un diagnostic	Rapport d'inspection et de recommandations

ANNEXE : CAHIER DES PROFILS DES OUVRAGES

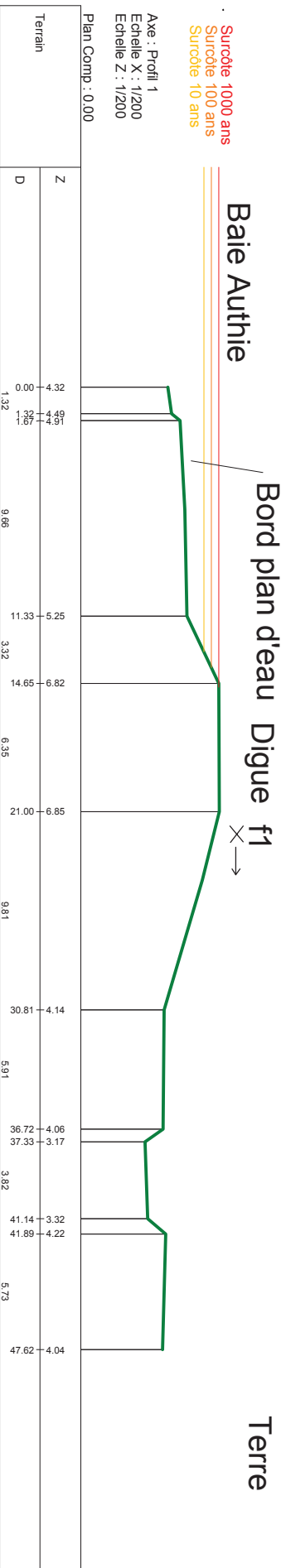


Observations:

- Talus amont de pente relativement faible
- Hauteur de crête faible
- Végétation arbustive sur le talus amont et la crête
- Herbe sur toute la digue
- Epaulement coté aval
- Fossé de drainage distant d'environ 7.5 m du pied aval



✕ → Position et orientation de la photo f1



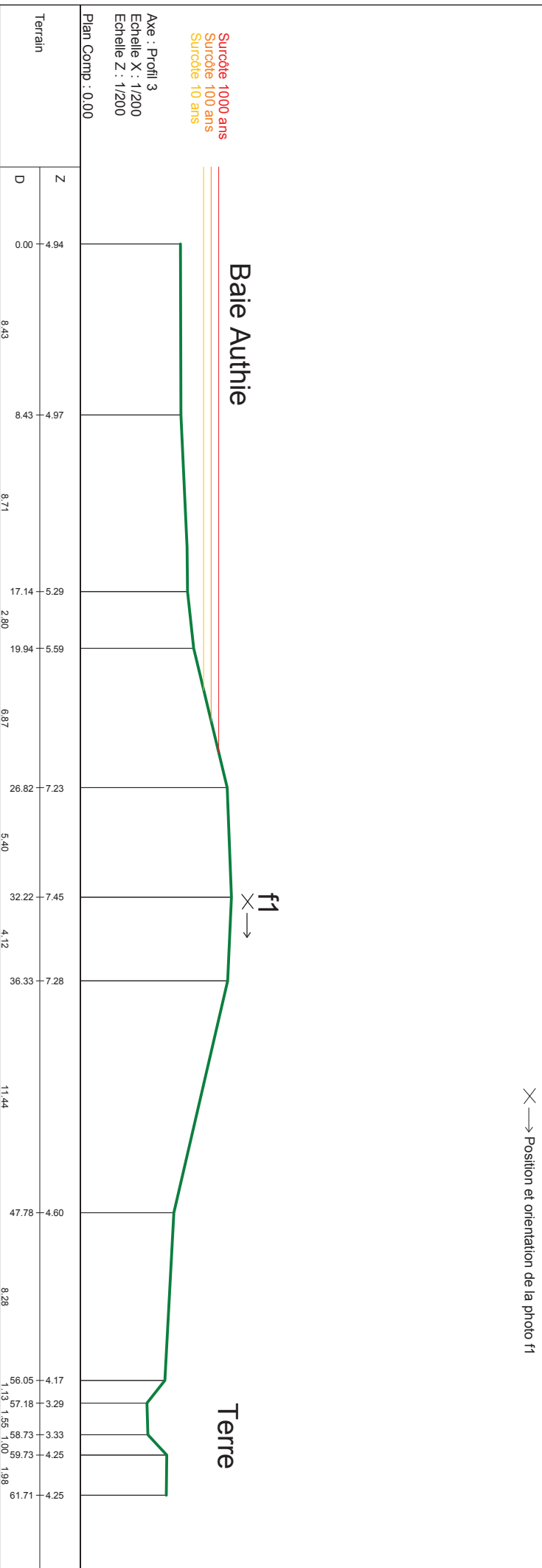


Observations:

Talus amont de pente relativement faible
Hauteur de crête faible
Végétation arbustive sur le talus amont et la crête
Herbe sur toute la digue
Epaulement coté aval
Fossé de drainage distant de 9 m du pied aval

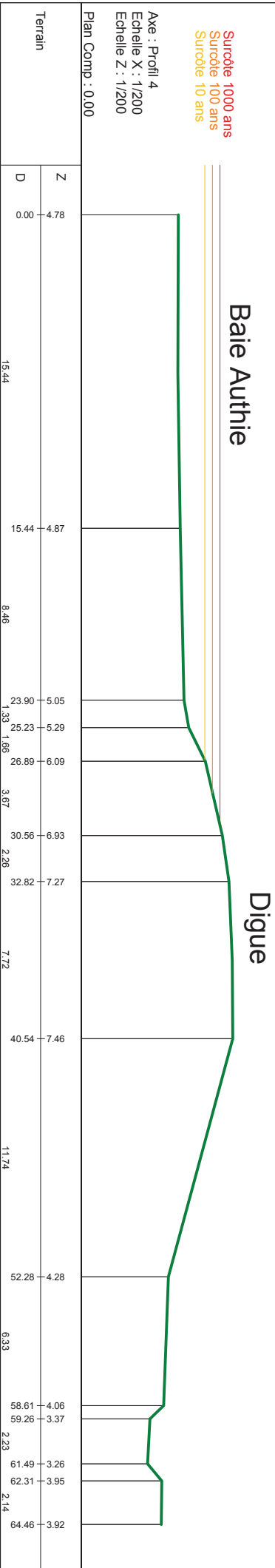


× → Position et orientation de la photo f1





Observations:
 Talus amont de pente relativement faible
 Hauteur de crête faible
 Végétation arbustive sur le talus amont et la crête
 Herbe sur toute la digue
 Epaulement coté aval
 Fossé de drainage distant d'environ 7.5 m du pied aval
 Caractéristiques similaires au Profil 3

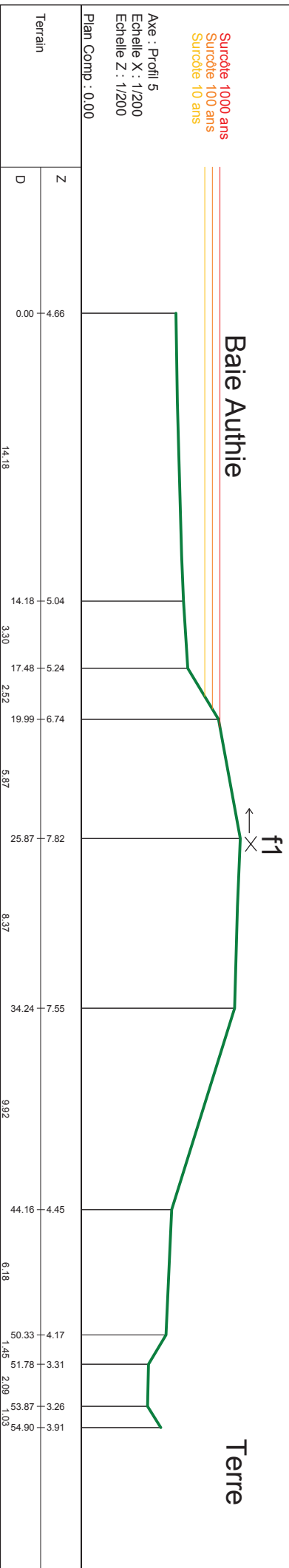




Observations:
 Talus amont de pente relativement faible
 Hauteur de crête faible
 Végétation arbustive sur le talus amont et la crête
 Herbe sur toute la digue
 Epaulement coté aval
 Fossé de drainage distant d'environ 7.5 m du pied aval
 Caractéristiques similaires au Profil 4



X → Position et orientation de la photo f1

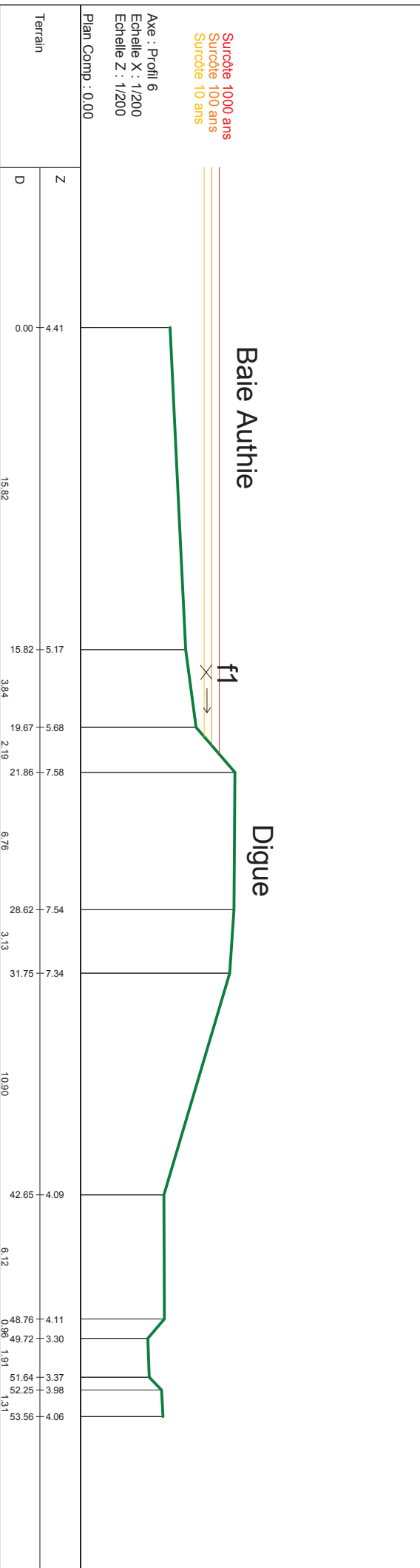




Observations:
 Talus amont de pente forte
 Hauteur de crête faible
 Végétation arbustive sur le talus amont et la crête
 Herbe sur toute la digue
 Zone d'érosion en pied de digue
 Epaulement coté aval
 Fossé de drainage distant d'environ 7.5 m du pied aval



✕ → Position et orientation de la photo f1





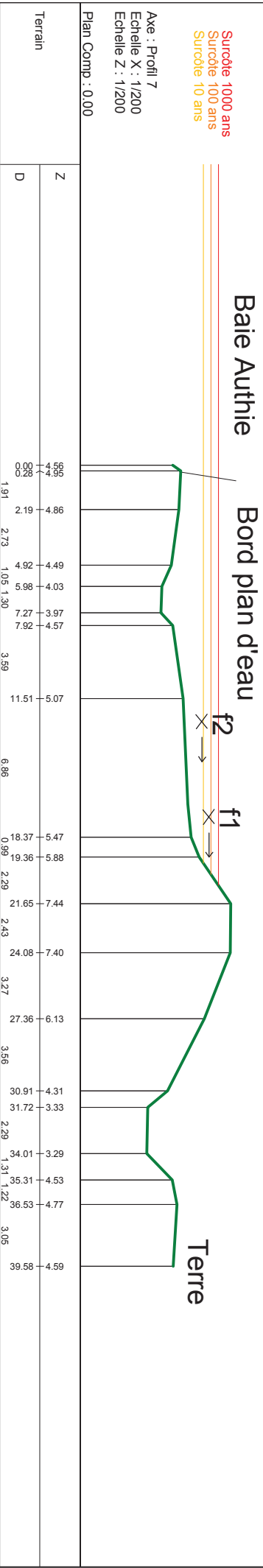
Observations:
Talus amont de pente forte et microfalaïse
Végétation buissonnière sur la crête
Herbe sur toute la digue
Zone d'érosion en pied de digue
Fossé de drainage en pied aval



✕ → Position et orientation de la photo f1

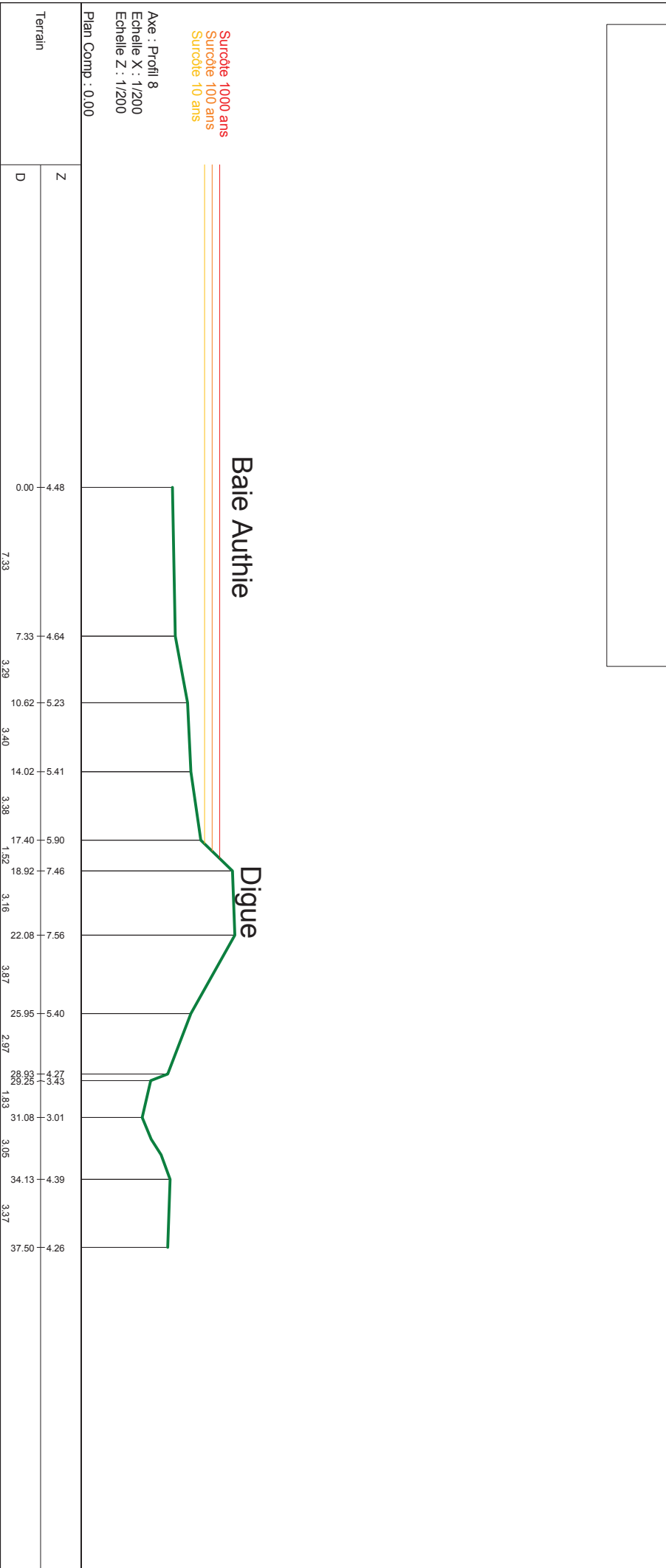


✕ → Position et orientation de la photo f2





Observations:
Végétation buissonnière sur la crête
Herbe sur toute la digue
Fossé de drainage en pied aval





Observations:
Végétation buissonnière sur la crête
Bloc calcaire en pied de digue coté amont provenant du
corps de la digue
Fossé de drainage en pied aval



X → Position et orientation de la photo f1

Surcote 1000 ans
Surcote 100 ans
Surcote 10 ans

Axe : Profil 9
Echelle X : 1/200
Echelle Z : 1/200

Plan Comp : 0.00

Baie Authie

Terre

f1





Observations:
Zone fortement érodée
Végétation buissonnière sur la crête et talus aval
Bloc calcaire en pied de digue coté amont provenant du corps de la digue
Mare d'eau permanente en pied aval
Nombreux terriers de fouisseurs



✕ → Position et orientation des photos f1et f2

Surcote 1000 ans
Surcote 100 ans
Surcote 10 ans

Axe : Profil 10
Echelle X : 1/200
Echelle Z : 1/200

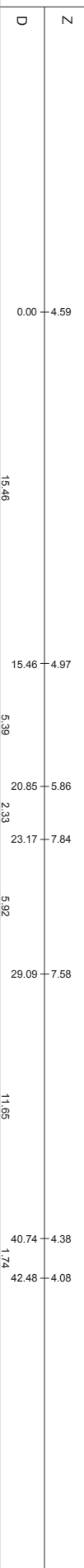
Plan Comp : 0.00

Baie Authie

f1 & f2

Digue

Bord plan d'eau



Terrain



Observations:

Zone fortement érodée
Végétation buissonnière sur la crête et talus aval
Bloc calcaire en pied de digue coté amont provenant du corps de la digue
Mare d'eau permanente en pied aval
Nombreux terriers de fouisseurs



✕ → Position et orientation de la photo f1

Baie Authie

Surcote 1000 ans
Surcote 100 ans
Surcote 10 ans
Axe : Profil 11
Echelle X : 1/250
Echelle Z : 1/250
Plan Comp : 0.00

