



## UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement LGCgE Ecole polytechnique universitaire de Lille Discipline: Génie Civil

Année : 2011

N° d'ordre: 40592

Ecole Doctorale des Sciences pour l'Ingénieur EDSPI

# THESE DE DOCTORAT

# Apport potentiel des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) pour une meilleure gestion d'un littoral dans une optique de développement durable

Approches conceptuelles et méthodologiques appliquées dans le Nord de la France

# Présentée pour l'obtention du titre de **Docteur de l'Université Lille Sciences et Technologies**

Par

# Fadi CHAABAN

Soutenue publiquement le vendredi 21 octobre 2011 devant le jury composé de :

М	Lahcen ZOUHRI	Institut Polytechnique Lasalle-Beauvais	Président/ Rapporteur
Μ	Iyad ABBAS	Université Tichrine (Lattaquié, Syrie)	Rapporteur
Μ	Erick CARLIER	Université Lille1	Directeur de thèse
Mme	Barbara LOUCHE	Université d'Artois	Examinatrice
Μ	Eric MASSON	Université Lille1	Examinateur
Μ	Azzedine HANI	Université d'Annaba (Algérie)	Examinateur
Mme	Yvonne BATTIAU-QUENEY	Université Lille1	Membre invitée

#### RESUME

La préparation des données des modèles numériques est fastidieuse et prend beaucoup de temps. Les Systèmes d'information géographique (SIG) minimisent l'effort et améliorent l'efficacité des modèles numériques. De plus, les SIG présentent une plate forme de grande capacité de collecte, de gestion, de traitement, d'analyse, de modélisation et d'affichage de données géoréférencées. Ce travail de thèse propose une méthodologie basée sur deux approches conceptuelles qui ont été appliquées en matière d'aménagement littoral dans le cadre de développement durable dans le secteur d'Hardelot-Plage (Nord de France). Cette méthodologie associe à tous les niveaux les SIG.

La première approche est consacrée à la mesure de l'évolution du trait de côte des dunes d'Ecault (Nord d'Hardelot-Plage), des dunes du Chevalier Sansot (Sud d'Hardelot-Plage) et des dunes de Camiers (rive nord de la Canche) pour la période s'étendant de 1946 à 2005. 292 transects perpendiculaires au trait de côte sont utilisés pour estimer l'érosion côtière et en déduire le taux de recul. La marge d'erreurs générée par la méthodologie proposée est de ±10 m. L'estimation est affectée par des erreurs liées à la résolution du document de référence et aux images numérisées. D'une part les résultats obtenus montrent que le processus de recul de la ligne de rivage intéresse, d'une manière générale, l'ensemble du trait de côte des dunes d'Ecault et des dunes de Chevalier Sansot à des vitesses variant de 0,43 m/an pour atteindre 5,8 m/an sur la rive nord de l'estuaire de la Becque. Par contre la valeur moyenne d'avancée varie de 0,23 à 2,47 m/an. D'autre part, l'évolution du trait de côte des dunes de Camiers (estuaire de la Canche) était très importante avec une moyenne de recul de 8,45 m/an entre 1980 et 1983, alors que la moyenne d'avancée était de 14,36 m/an entre 1947 et 1955. La dernière observation, entre 2000 et 2005, a montré que la ligne de référence dans la zone d'étude a évolué positivement avec une moyenne allant de 1,1 à 4,66 m/an (86% des transects soit 250 transects). 13% des transects (soit 39 transects) n'ont pas changé en raison de l'enrochement construit le long de la plage. Cependant 1% des transects (soit 3 transects correspondant à la rive nord de l'estuaire de la Becque) ont présenté un recul de 1,06 m/an.

La deuxième approche concerne la modélisation hydrogéologique littorale. La mise en place d'un SIG a permis de générer le jeu de données géographiques nécessaires aux modèles numériques. La modélisation hydrodynamique de la plage d'Hardelot (Pas-de-Calais, France) pose le problème de la saturation en eau quasi constante du sable de la plage et de son érosion sur la partie sud. Ce cas singulier est analysé en couplant un SIG (ArcGIS 9.3) avec un système de modélisation hydrogéologique (GMS 6.0) afin de développer une modélisation adaptée. Les résultats obtenus et plus particulièrement ceux issus de la modélisation hydrodynamique et hydrodispersive ont permis de confirmer que la saturation en eau observée dans la partie sud d'Hardelot est bien liée à la proximité de la nappe superficielle. L'aquifère des sables est en continuité hydraulique avec la nappe de la craie sous-jacente. De plus, ce secteur est caractérisé par la présence de lentilles de tourbe dont le comportement hydrophile explique la rétention d'eau de mer en surface dans les formations sableuses ainsi que la répartition complexe de l'interface eau douce -eau salée sur le littoral d'Hardelot. Les diverses simulations entreprises, associées à la réalisation de forages captant l'aquifère des sables ont permis de démontrer que le rabattement de la nappe de 0.5 m, permettant un assèchement de la plage, nécessiterait un pompage continu à un débit de 5 m<sup>3</sup>/h.

**Mots clés :** SIG, ArcGIS, Modelbuilder, photographies aériennes, éléments linéaires, ligne de rivage, érosion des plages, GMS, modélisation hydrogéologique littorale, couplage SIG/GMS, aménagement littorale.

Ecole polytechnique universitaire de Lille 1

# Potential contribution of Geographic Information Systems (GIS) for better coastal management in the context of sustainable development

Conceptual and methodological approaches applied in the north of France

#### ABSTRACT

Management of input data modeling is tedious and takes a long time. The Geographic Information System (GIS) minimize the effort and improve the efficiency of numerical models. As well as the GIS provides a platform to high capacity of collection, management, data processing, analysis, modeling and display of spatial information. This thesis proposes a methodology based on two conceptual approaches applied to coastal management in the context of sustainable development in the area of Hardelot-Plage (Northern France). This methodology has been implemented thanks to GIS.

The first approach is dedicated to measuring shoreline change along Ecault dunes (North of Hardelot-Plage), Chevalier Sansot dunes (South of Hardelot-Plage) and Camiers dunes (Northern Canche estuary) over the course of 59 years (from 1946 to 2005). 292 transects perpendicular to the shoreline are used to estimate coastal erosion and to assess the retreat rate. The marginal error generated by our methodology is  $\pm 10m$ . It is resulting from the resolution of reference-document and scanned images. From one side, the results obtained show that the process of shoreline retreat has interested, in general, the entire coastline of Ecault and Chevalier Sansot dunes. The average of retreat varies from 0.43 m/yr to reach 5.8 m/yr on the north side of the Becque estuary, while the average value of advance ranges from 0.23 to 2.47 m/yr. For another side, the average shoreline evolution was very important along the Camiers dunes (Northern Canche estuary) with an average retreat reaching 8.45 m/yr between 1980 and 1983, while the average of advance reached 14.36 m/yr between 1947 and 1955. The last observations, between 2000 and 2005, showed that the shoreline in the study area was changing positively with an average ranging from 1.1 to 4.66 m/yr (86% of transects =250 transects); 13% of transects (39 transects) have not changed because of dike or rip-rap built along the beach. However 1% of transects (three transects corresponding to the Becque estuary) showed a retreat of 1.06 m/yr.

The second approach concerns a hydrogeological modelling of the coastal aquifer. The implementation of GIS was essential to generate the geographic data needed for the numerical models. In our case the beach-dune system of Hardelot-Plage suffers from the lack of well developed foredune. This problem is linked to the almost constant water saturation of sand beach which is the potential source of dune nourishment. South of Hardelot, the coastline is slowly but constantly retreating. To remedy this situation, a coupling between a GIS (ArcGIS 9.3) and a Groundwater Modelling System (GMS 6.0) was adopted in order to find possible scenarios which could lower the piezometric surface in the concerned area and allow dune nourishment again. Hydrodynamic and hydrodispersive models have confirmed that the observed water saturation in the southern part of Hardelot beach is quite related to the proximity of the piezometric surface. The sand aquifer in this sector, which is in hydraulic continuity with the subjacent chalk aquifer, is intersected by peat lenses. The presence of peat would induce seawater restrain and would make it possible to mainly explain the complex distribution of freshwater and saltwater interface in this sector. Various simulations undertaken for realization of drillings in the sand aquifer made it possible to show that the lowering of water table of 0.5 m, which is needed to dry the beach sand would require a continuous pumping with a flow of  $5 \text{ m}3.\text{h}^{-1}$ .

**Keywords**: GIS, ArcGIS, Modelbuilder, Aerial Photographs, linear features, shoreline, coastal erosion, GMS, hydrological modelling of coast, coupling GIS/GMS, coastal management.

Ecole polytechnique universitaire de Lille 1

Ce travail de thèse a été effectué au sein du laboratoire LGCgE Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement, Lille Nord de France, Polytech'Lille : Ecole polytechnique universitaire de Lille, Université Lille 1 - Sciences et Technologies

> Avenue Paul Langevin, 59655 Villeneuve d Ascq cedex France

#### **AVANT-PROPOS**

Ce travail de thèse a été effectué au sein du laboratoire LGCgE (Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement; Lille Nord de France), Ecole polytechnique universitaire de Lille, Université Lille 1 - Sciences et Technologies.

Mes premiers remerciements, et sans doute les plus vifs, sont adressés à mon directeur de thèse, Monsieur le Professeur Erick CARLIER. J'adresse ensuite mes plus grands remerciements à Mme. Barbara LOUCHE, M. Eric MASSON qui ont été un réel exemple pour moi. Ils ont su me communiquer la rigueur et la meilleure manière de travailler. Leur œil critique m'a été très précieux pour structurer le travail et pour améliorer la qualité des différentes sections. Ils m'ont beaucoup aidé et soutenu pendant ces années de thèse. J'exprime ma profonde reconnaissance à M. Jamal EL KHATTABI, pour ses conseils, son soutien et son encouragement. Je remercie également Madame le Professeur Yvonne BATTIAU-QUENEY pour les discussions que nous avons eues au sujet de ma thèse et pour ses conseils avisés.

Je tiens aussi à remercier les personnes qui ont accepté de participer à ce jury de thèse: Messieurs les Docteurs Lahcen ZOUHRI et Iyad ABBAS, pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse.

J'exprime tout mes remerciements à Monsieur Azzedine HANI pour m'avoir fait l'honneur d'être examinateur et de participer à ce jury de thèse.

J'adresse mes remerciements à Madame Danièle FABIS, responsable du service international au CROUS de Lille, qui a géré avec patience et indulgence, tout au long des années, mon dossier de bourse.

Je remercie l'ensemble de mes amis pour leur soutien et leur encouragement durant ce travail. J'adresse un grand merci à toute ma famille qui a toujours été présente lorsque j'en ai eu besoin.

Finalement je dédie ce travail à la mémoire de ma mère, à mon père, mes frères et sœurs, ainsi qu'à ma petite famille : Hanan, Fadi et Alayss; et à tous ceux qui le méritent.

Le chemin était long et sinueux mais c'était le bon......

# **TABLE DES MATIERES**

RESUME	2
ABSTRACT	4
AVANT-PROPOS	6
TABLE DES MATIERES	7
LISTE DES FIGURES	12
LISTE DES TABLEAUX	14
LISTE D'ACRONYMES ET D'ABREVIATIONS	15
INTRODUCTION GENERALE	16
CHAPITRE I : SYSTEMES D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES (SI	[G) 20
I.1. Introduction	
I.2. Définitions, historique et logiciels des SIG	
I.3. ArcGIS	
I.3.1. Géodatabase	
I.3.2. Géoréférencement en ArcGIS	
I.3.3. Géostatistiques sous ArcGIS	
I.3.4. Mosaïque sous ArcGIS	
I.3.5. Géotraitement (Geoprocessing) sous ArcGIS	
I.3.6. ModelBuilder	
I.4. Modèle Numérique de Terrain MNT	
I.5. Méthodes d'interpolation	
I.5.1. Krigeage	
I.5.2. Pondération par l'Inverse de la Distance IDW	
I.5.3. Triangulation TIN	
I.6. Conclusion	
CHAPITRE II : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE, GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIOUE DE LA ZONE D'ETUDE	
11.1. Introduction	
II.2. Situation géographique	

II.3. Situation géologique	. 38
II.3.1. Situation géologique dans la large zone	. 38
II.3.2. Situation géologique d'Hardelot Plage	. 41
A. Prospection électrique	. 41
B. Coupe géologique	. 46
II.4. Situation Géomorphologique	. 47
II.4.1. Géomorphologie à Hardelot-plage	. 48
II.4.2. L'évolution du trait de côte	. 49
II.4.3. Atelier EUCC-France dans la baie de Canche 2010	. 51
II.5. Description des paramètres climatiques	. 53
II.5.1. Précipitations	. 53
II.5.2. Températures	. 55
II.5.3. Évapotranspiration	. 56
A. Évapotranspiration potentielle E.T.P.	. 56
B. Évapotranspiration réelle E.T.R.	. 57
C. Estimation des excédents par la méthode de Thornthwaite	. 57
II.5.4. Bilan hydrique au Touquet de 1975 à 2005	. 58
II.5.5. Tempêtes	. 59
II.6. Contexte hydrogeologique	. 61
II.6.1. L'aquitère dunaire	. 61
II.6.2. L'aquifère de la craie	. 62
A. Analyse cartographique de la piezometrie	. 62
B. Caracteristiques hydrodynamiques	. 66
II.7. Conclusion	. 66
CHAPITRE III : APPLICATION DES SIG AU SUIVI DE L'EVOLUTION D'UN	
TRAIT DE COTE. EXEMPLE : HARDELOT-PLAGE, SAINT CECILE ET	
ESTUAIRE DE LA CANCHE (PAS-DE-CALAIS, FRANCE)	. 67
III.1. Introduction	. 68
III.2. Erosion côtière et SIG	. 68
III.2.1. Trait de côte	. 70
A. Définition	. 70
B. Détection	. 71
III.2.2. Evolution d'un trait de côte	. 72
III.2.3. Sources de données nécessaires pour l'étude de la cinématique d'un trait de côte.	. 73
III.2.4. Manipulation de données disponibles	
A. Méthodologie de travail typique dans la photogrammétrie	. 73
	. 73
B. Numérisation des données	. 73 . 73 . 74
<ul> <li>B. Numérisation des données</li> <li>C. Géoréférencement des données images</li> </ul>	. 73 . 73 . 74 . 76
<ul> <li>B. Numérisation des données</li> <li>C. Géoréférencement des données images</li> <li>D. Mosaïque</li> </ul>	. 73 . 73 . 74 . 76 . 79
<ul> <li>B. Numérisation des données</li> <li>C. Géoréférencement des données images</li> <li>D. Mosaïque</li> <li>III.2.5. Méthodes pour mesurer l'évolution d'un trait de côte</li> </ul>	. 73 . 73 . 74 . 76 . 79 . 79
<ul> <li>B. Numérisation des données</li> <li>C. Géoréférencement des données images</li> <li>D. Mosaïque</li> <li>III.2.5. Méthodes pour mesurer l'évolution d'un trait de côte</li> <li>A. Approche par la ligne de base:</li> </ul>	. 73 . 73 . 74 . 76 . 79 . 79 . 80
<ul> <li>B. Numérisation des données</li> <li>C. Géoréférencement des données images</li> <li>D. Mosaïque</li> <li>III.2.5. Méthodes pour mesurer l'évolution d'un trait de côte</li> <li>A. Approche par la ligne de base:</li> <li>B. Approche par la segmentation dynamique</li> </ul>	. 73 . 73 . 74 . 76 . 79 . 79 . 79 . 80 . 80

D. Approche par tampon et l'estimation des moindres carrés non-linéaires	
III.2.6. Estimation des erreurs associées à la délimitation d'un trait de côte	81
A. Erreurs liées à l'acquisation des GCP en utilisant un GPS	
B. Erreurs liées à la précsion du document de référence	
C. Erreur liée au repérage des points de contrôle sur les photographies	
D. Erreur liée au calcul d'un modèle polynômial RMS	
E. Erreur liée à la digitalisation du trait de côte	
F. Erreurs liées aux variations du niveau des pleines mers	
III.2.7. Méthodes statistiques pour évaluer l'évolution du trait de côte	
A. Méthode des points extrêmes (End-point rates)	
B. Méthode de la régression linéaire ( <i>linear regression</i> : LR)	
III.3. Application des SIG au suivi de l'évolution du trait de côte d'Hardelot-P	lage, Saint
Cécile-Plage et de l'estuaire de la Canche	
III.3.1. Sources de données du littoral	85
III.4. Approche méthodologique pour mesurer le recul ou l'avancée du trait de	e côte 86
A Numárisation des photographies	
A. Numerisation des photographies B. Géoréférencement des images périennes	
C. Mosaïque des photos géoréférencées	
III 4.2 Création des données	
A Digitalisation du trait de côte	93
III 4 3 Méthode de génération de transects	94
III 4 4 Géotraitement ( <i>Geoprocessing</i> )	96
III.4.5. Marge d'erreur	
	100
III.5. Resultats et discussion	
III.5.1. Analyse d'evolution de trait de côte entre 1947 et 2005	
III.5.2. Dynamique du trait de cote au cours des periodes entre 1946 et 2005	
A. Dunes du Chavalier Senset	
D. Dunes du Chevaner Sansol	
C. Dunes de Canners (Reserve naturene de la Bale de Canche)	105
III.6. Conclusion	
CHAPITRE IV APPLICATION DES SIG A L'ELABORATION D'UN MOD	ELE
HYDRODYNAMIQUE LITTORAL.	110
IV.1. Introduction	
IV.2. Couplage SIG - modélisation hydrodynamique	
IV.3. Interface eau douce-eau salée	
IV.4. Présentation du GMS	
IV.4.1. Modflow	115
IV.4.2. Femwater	
	-
IV.5. Description de la problématique	

IV.6. Source de données	
IV.6.1. Topographie	
IV.6.2. Géologie	
A. Données de BRGM	
B. Sondage	
IV.6.3. Paramètres de simulation	
IV.7. Couplage SIG et GMS	
IV.7.1. Méthodologie et modélisation conceptuelle du problème	
A. Modélisation géographique sous ArcGIS 9.3	
B. Traitements des données géographiques sous ArcGIS 9.3.	
IV.7.2. Modélisation hydrodynamique sous GMS	
A. Modèle conceptuel et modèle numérique	
IV & Décultots et discussions	129
IV 8.1. Comparaison de la carte niézométrique krigée et calculée	
IV.8.2. Distribution des agus saláes	
IV.8.2. Distribution des eaux salees	
IV 8.4. Influence de le tourbe	
IV.8.5. Distribution de la norma fabilité de l'aquifère anaverur	
IV.8.5. Distribution de la permeabilité de l'aquifére crayeux	
IV.9. Conclusion	
CONCLUSION GENERALE	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	148
ANNEXES	
Annexe A: Valeurs calculées d'évolution du trait de côte	166
Annexe B : Cartes d'évolution du trait de côte entre dunes d'Ecault et dun (échelle spatiale 1/2000)	es de Camier 173

#### LISTE DES FIGURES

Figure I-1. Schéma d'un ArcGIS <i>ModelBuilder</i> utilisé pour calculer l'évolution d'objets linéaires (évolution du	0
Itali de cole)	0
d'átudo	0
u cuuc	3
Figure II 1 Situation géographique de la zone d'étude	7
Figure II 2 Carte géologique de la zone d'étude	0
Figure II-2. Calle geologique de la zone d'etide	2 0
Figure II 4. Blog diagramma du toit de la graie : logalisation des failles (Desbrich 2006)	1
Figure II-5. Position des sondages électriques implantés sur la plage d'Hardelot ou dans ses environs	2
Figure II-6. Schéma d'ensemble de l'installation (Bakkali et Bouvalaoui, 2005: Pashrich, 2006)	3
Figure II-7. Lithologie des profils au Nord d'Hardelot-Plage (SE1 2 3 4) et au Sud (SE4 5 6 7 8 9 10 11 12) 4	5
Figure II-8. Coupe géologique Nord-Sud sur le cordon littoral d'Hardelot-plage d'après sondage électrique	5
SPRI 2006 (Chashan et al. 2010a $b \cdot 2011$ )	7
Figure II-9 Coupes topographiques au nord (dunes d'Ecault) et au sud d'Hardelot (Fauchois 1998)	.8
Figure II-10 Evolution du littoral de 1947 à 1977 · de la frontière belge à la baie de Somme 5	0
Figure II-11 Pohotographies de la rive droite de l'estuaire de la canche, prises le 08 octobre 2010 par	Ű
F.CHAABAN pendant l'atelier d'EUCC-France.	2
Figure II-12. Carte des isohvètes des précipitations movennes annuelles de 1956 à 1975 (Beckelvnck, 1981)5	4
Figure II-13. Evolution des précipitations au Touquet de 1975 à 2005 (mm)	5
Figure II-14. Comparaison entre pluie, évapotranspiration et pluies efficaces à la station météorologique du	-
Touquet de 1975 à 2006 (source de données : Météo-France).	9
Figure II-15. Nombre d'évènements tempétueux (vents trihoraires >= 16 m.s-1) et l'indice NAO hivernal à	
Boulogne-sur-Mer entre 1965 et 2001 (Chaverot, 2006)	0
Figure II-16. Schéma d'un profil type des dunes de morphologie picarde (Duval, 1973)6	1
Figure II-17. Carte piézométrique krigée de la nappe de la carie en période de hautes-eaux, avril-1995 (Louche	
1995)	3
Figure II-18. Carte piézométrique krigée de la nappe de la craie en période de basses-eaux (ocobres1995)6	5
Figure III-1. Profil schématique d'une côte sableuse et terminologie anglo-saxonne équivalente d'après Shepard	
(1973) <i>In</i> Faye (2010)7	0
Figure III-2. Marégraphe de Marseille (Paskoff, 2001)7	2
Figure III-3. Procédure typique de traitement photogramétrique (Linder, 2009)7	4
Figure III-4. Méthodologie générale pour mesurer la récession/accrétion du trait de côte dans la zone d'étude8	7
Figure III-5. Ggéoréférencement sous plate forme d'ArcGIS9.3.19	1
Figure III-6. Mosaïque sous la plate-forme d'ArcGIS 9.3.1. après le géoréférencement	2
Figure III-7. Les données créées dans ArcCatalog et ArcMap (ArcGIS 9.3.1) a; Géodatabase, jeu de classe	
d'entité et classes d'entité créés dans ArcCatalog b; échantillonnage des traits de côte digitalisés, ligne de	~
base et et transects créés dans ArcMap	3
Figure III-8. Cinq types caracterisent le littoral de la zone d'étude (photos prises par F.CHAABAN 14 et 16	4
Septembre 2010)	4
Figure III-9. Generation de transects en utilisant des outils d'ArcGIS et l'extension « <i>Hawin's Tools</i> »	2
Figure III-10. Simulation conceptuel pour calculer le changement entre deux objets intearies (deux traits de cole	
a l'alue d'Alcols <i>Modelbuilder</i>	1
Figure III-11. AlcOis <i>Modelbullaers</i> pour calculer i evolution d'objets intearies (evolution du trait de cole)	0
Figure III-12. Tronçons de la zone ciudice el evolution moyenne du dan de cole entre 1947 el 2005	1
Figure III-14. Evolution Movenne Par An (EMPA) du trait de côte dans les sections de zone d'étude	17
Figure III-15. Plage d'Hardelot, partie méridionale. Les vues sont prises vers le sud du même endroit	18
Figure IV-1 Interface eau douce-eau salée (Marsily 1981)	3
Figure IV-2. Cartes d'évolution du trait de côte au nord et au sud d'Hardelot-Plage de 1946 à 2005	8
Figure IV-3. Localisations des forages du BRGM dans la zone d'étude (Chaaban, 2011)	1
Figure IV-4. Localisation des forages à partir desquels sont extraits les paramètres d'entrée du modèle	-
hydrodynamique (Chaaban, 2011)	4
Figure IV-5 : Méthodologie utilisée pour la modélisation hydrogéologique spatialement distribuée (Chaaban et	
<i>al.</i> , 2010b)	5

Figure IV-6 : Les trois principales étapes pour mettre en place d'un SIG pour la modélisation hydrodynamique	•
(Chaaban <i>et al.</i> , 2010b)1	125
Figure IV-7. Modélisation des données géographiques (1/3):	127
Figure IV-8. Modélisation des données géographiques (2 et3 /3) (Chaaban et al., 2010b)	128
Figure IV-9 : Localisations des acquisitions géophysiques (Chaaban et al., 2010b)	130
Figure IV-10. a) MNT d'après les courbes de niveau IGN Scan 25 ; b) Modélisation du toit de la craie; c)	
Modélisation du mur de la craie ; d) Modélisation de la surface piézométrique initiale (1995) ; e)	
Distribution spatiale de la perméabilité initiale de l'aquifère crayeux (Chaaban et al., 2010b)	131
Figure IV-11. Etapes de la modélisation hydrodynamique sous GMS (Chaaban et al., 2010a ; 2011)1	132
Figure IV-12. Maillage du secteur d'étude, localisation des forages, sondages et conditions aux limites (Chaab	an
<i>et al.</i> , 2010a; 2011)1	133
Figure IV-13. Cartes piézométriques de la nappe de la craie après le calage (Chaaban et al., 2010a ; 2011)1	135
Figure IV-14. Carte piézométrique initiale de la nappe de la carie dans la zone d'étude1	136
Figure IV-15 : Concentrations en sel dans les aquifères sableux et crayeux (Chaaban et al., 2010a, b ; 2011)1	139
Figure IV-16 : Influence de la présence de tourbe sur la piézométrie littorale (Chaaban et al., 2010a, b ; 2011).	
1	141
Figure IV-17 : Influence de la présence de tourbe sur les concentrations en sel (Chaaban et al., 2010a, b ; 2011	).
1	142
Figure IV-18. Carte de perméabilité de l'aquifère crayeux obtenue après le calage (Chaaban et al., 2011)1	143

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-1. Exemple de résistivités de quelques roches (SPRL, 2006)	44
Tableau II-2. Coefficient correcteur β pour 50° de latitude Nord	57
Tableau II-3. Bilan hydrique (en mm) au Touquet de 1975 à 2006.	59
Tableau III-1. Les photos aériennes utilisées.	86
Tableau III-2. Erreurs RMS liées au géoréférencement des photos aériennes.	90
Tableau III-3. Estimation des erreurs inhérentes à la méthode de délimitation du trait de côte	99
Tableau III-4 Sections de zone d'étude	100
Tableau III-5. Sémiologie graphique des traits de côte digitalisés	101
Tableau III-6. Evolution moyenne et taux d'évolution du trait de côte (1947-2005)	103
Tableau III-7. Evolution Moyenne(EM) et Evolution Moyenne Par An (EMPA) du trait de côte dans les sect	ions
de la zone d'étude	105
Tableau IV-1. Forages de BRGM consultés pour avoir la lithologie de la zone d'étude	121
Tableau IV-2. : Tableau récapitulatif des forages et des paramètres de simulation.	123
Tableau IV-3. Type de donnés géographiques et attributaires (Chaaban et al., 2010b)	126
Tableau IV-4. Quatre types abstraits de données HBDS (Arab et al., 2005 ; Pirot et Saint Gerand, 2005)	127
Tableau IV-5. Bilan hydrodynamique (m3/j) de l'ensemble du domaine modélisé	134
Tableau IV-6. Pluies efficaces de 1995 à 2006.	137
Tableau IV-7. Concentrations en eau salée dans les douze sondages réalisés lors de la campagne géophysiqu	e
(SPRL, 2006)	138
Tableau IV-8 : changement de la concentration en sel pendant le pompage	140

### LISTE D'ACRONYMES ET D'ABREVIATIONS

ASAP	Automated Shoreline Analysis Program
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minière
BSS	Banque de données du Sous-Sol
CCD	Charge Coupled Device
CNIG	Conseil National de l'Information Géographique
DGPS	Differential Global Positioning System
Dpi	Dots per inch
DSAS	Digital Shoreline Analysis System
DTP	scanners à plat
ECGL	Engineering Computer Graphics Laboratory
EM	Evolution Moyenne
EMPA	Evolution Moyenne Par Année
EMRL	Environmental Modeling Research Laboratory
EQM	Erreur Quadripartite Moyenne
EPR	End Point Rate
ESRI	Environmental Systems Research Institute
ЕТР	Evapotranspiration Potentielle
ETR	Évapotranspiration Réelle
EUCC	European Union for Coastal Conservation
FICCDC	Federal Interagency Coordinating Committee on Digital Cartography
GCP	Ground Control Points
GIS	Geographical Information System
GMS	Groundwater Modeling System
GPS	Global Positioning System
HBDS	Hyper Graph Based Data Structure
HWL	High Water Line
IDW	Inverse Distance Weighting
IGN	Institut Géographique National
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
LIDAR	Light Detection And Ranging
	linear regression
LSF	least square fitting (reconstruction par moindres carres)
MCD	Modèle Conceptuel de Données
MDD	Modèle Dursique de Dennées
MT2D	Model Transport in 3 Dimensional
NCE	Nivellement Cánáral de la France
P	Perméabilité
PPICE	Plateforme Publique de l'Information GEographique pour la région Nord-Pas-de-Calais
Pnn	Points Par Pouce
REU	Réserve Facilement Utilisable
RMS	Root Mean Square
RMSE	Root Mean Square Frror
SGBDR	système de gestion de bases de données relationnelles
SIG	Système d'Information Géographique
T	Transmissivité
TIN	Triangulated Irregular Network
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
USGS	United States Geological Survey
	Oniversal Transverse Merculor

# **Introduction générale**

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont unanimement reconnus en tant qu'outils d'aide à l'analyse, à la compréhension, à la gestion du territoire ainsi qu'à la planification et à la décision. Ils sont devenus indispensables pour résoudre des problèmes complexes essentiellement liés à l'interprétation et l'analyse de systèmes de cordonnées géographiques. Les SIG, apparus dans les années 1970, ont été utilisés dans les années 2000 dans les études de l'évolution des zones côtières (Leatherman, 2003; Faye, 2010). Ils gèrent diverses données comme celles relatives aux photographies aériennes, aux images satellites, aux levés *Differential Global Positioning System* (DGPS). Ils permettent de créer, analyser, modéliser et cartographier des données (McBride *et al.*, 1992;. Byrnes et Hiland, 1995; McBride *et al.*, 1995; Gorman *et al.*, 1998; Moore, 2000; Armaroli *et al.*, 2006). Les SIG permettent ainsi de caractériser, de visualiser des objets naturels et anthropiques sous forme de cartes numériques pouvant ensuite être utilisées comme outils d'aide à la résolution de problèmes environnementaux.

L'érosion côtière est un phénomène naturel, mais le processus d'érosion ne peut pas toujours être considéré comme issus de causes naturelles, car les actions anthropiques ont pu induire un déséquilibre, notamment en limitant le volume de sable nécessaire à la stabilité des plages (Paskoff, 1998). L'homme intervient sur les côtes régionales depuis maintenant plusieurs siècles (Demangeon, 1905; Briquet, 1930). De plus les zones côtières sont naturellement dynamiques avec des changements pouvant se produire à l'échelle temporelle humaine et qu'il convient de quantifier. L'évolution du trait de côte est un excellent indicateur de ces changements. Ainsi, la connaissance de la dynamique littorale est un préalable indispensable à la gestion des rivages et, notamment, celle des plages sur lesquelles repose en grande partie l'économie locale. Pour mener à bien une telle investigation, il est souvent nécessaire d'effectuer une étude diachronique de la position du trait de côte (Grenier et Dubois, 1990; Paskoff, 1993). Il a été démontré que les SIG constituent un outil efficace pour étudier les changements à long terme du littoral (Liu, 1998; Hardaway *et al.*, 2001; Ali, 2003; Faye, 2010).

Les caractéristiques morphologiques et l'évolution historique de la côte nord de la France, appelée "Côte d'Opale" s'allongeant sur 140 km, de l'estuaire de l'Authie ,au sud, à la frontière belge au nord, ont fait l'objet, dans le premier tiers du siècle dernier, d'une étude scientifique pionnière, tout à fait remarquable pour l'époque (Briquet, 1930). Des travaux ont porté

également sur la mobilité du trait de côte à l'échelle du Quaternaire (Munaut et Gilot, 1977; Sommé *et al.*, 1999). Des recherches ont également porté sur la morphodynamique dunaire et la mobilité du trait de côte à échelle courte (Battiau-Queney *et al.*, 1995; Fauchois, 1998; Battiau-Queney *et al.*, 2003).

A propos d'évolution cartographique du trait de côte, il convient de faire une distinction entre les cartes réalisées à grande échelle spatiale et celles réalisées à petite échelle. Car ces dernières ne peuvent en aucun cas être le reflet des particularités locales, c'est-à-dire une tendance à la progradation ou au recul (Clique et Lepetit, 1986). Si l'on regarde dans le détail, certaines zones peuvent avoir localement une évolution contradictoire par rapport à une portion de linéaire côtier bien plus large, et qui évoluera dans le sens contraire. Les études locales seront donc nécessaires afin de bien prendre en compte les particularités à grande échelle. En outre pour mesurer le recul ou l'avancée du trait de côte dans les zones de Hardelot-plage et de Sainte Cécile-Plage (zones d'étude) situées dans le Nord de France, 292 transects perpendiculaires au trait de côte ont été utilisés pour estimer l'érosion côtière et en déduire le taux de récession. Associée à cette investigation géomorphologique, une recherche sur le fonctionnement de l'hydrosystème côtier a été réalisée, justifiée par l'influence pressentie de l'hydrodynamique de l'eau souterraine sur l'évolution locale du trait de côte.

Le site d'Hardelot-Plage est divisé en deux parties distinctes : Nord et Sud. La partie nord du site étudié est constituée de sable sec. Au sein de cette partie, le système plage-dune est fonctionnel (Tresca, 2006). Le long des dunes d'Ecault, l'évolution de trait de côte n'est uniforme ni dans le temps ni dans l'espace (Battiau-Queney et al., 2006). Par contre, dans la partie sud du site d'Hardelot-Plage, le recul est plus rapide sur la période 1989-1995 et peut dépasser localement 3 m/an. Les marques d'érosion sont présentes au contact de la plage et des sables dunaires. Dans cette partie il n'y a pas d'avant-dune mais une falaise sableuse exposant plusieurs niveaux de paléosols de type podzolique (Battiau-Queney et al., 2006). La végétation arbustive se développe jusqu'en bordure de la falaise où elle est souvent déchaussée par l'érosion. La dynamique éolienne paraît inactive ou très faible. Les dunes embryonnaires sont rares et très éphémères. Par contre, immédiatement au sud de l'enrochement, on observe depuis peu, au pied de la falaise, une banquette basse toujours humide qui porte une végétation de type schorre plutôt que dunaire (Battiau-Queney et al., 2006). Le haut de plage reste humide à marée basse et parcouru par des ruissellements d'eau douce colorée par des diatomées. Il existe donc une menace sur la ressource sédimentaire constituant la plage touristique. En effet, un abaissement potentiel de l'estran résultant d'une

érosion marquée implique un risque de perte de sédiments alimentant la plage touristique. Or dans ce secteur, la saturation en eau quasi constante du sable de la plage limite l'alimentation des dunes par déflation éolienne. Cette saturation est liée à l'affleurement de la nappe superficielle sur l'estran (Battiau-Queney *et al.*, 2006). Elle est donc contrôlée par le fonctionnement du système hydrogéologique littoral et pré-littoral (Louche, 1997). La problématique présentée ici se consiste donc à analyser les conséquences hydrogéologiques d'un abaissement du niveau de la nappe d'eau douce sur le fonctionnement sédimentaire du système plage-dune.

Les objectifs de la recherche présentée dans ce manuscrit sont de mettre au point des méthodes conceptuelles et méthodologiques dont le but est :

- Créer un outil d'aide à la décision en matière d'aménagement littoral en utilisant des approches logiques intégrant les SIG dans une optique de développement durable.
- Faire le point sur les évolutions du linéaire côtier de zone étendue entre dunes d'Ecault (Nord d'Hardelot-Plage) et dunes de Camiers (rive nord de l'estuaire de Canche) à une échelle mi-séculaire en s'appuyant sur des photographies aériennes de 1946, 1947, 1955, 1963, 1971, 1976 et 1980, 1983, 1987, 1989, 1995, 1997,2000, et 2005.
- Mieux comprendre le rôle de la nappe d'eau superficielle dans le phénomène global d'érosion à Hardelot-Plage.

Ce rapport est organisé comme suit :

Le premier chapitre présente les définitions et les principes fonctionnels des SIG, notamment le logiciel ArcGIS (logiciel de SIG développé par ESRI : *Environmental Systems Research Institute : Redlands, CA, USA*), utilisé dans ce travail.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des contextes géographique, géologique, géomorphologique, météorologique et hydrogéologique de la zone d'étude.

Dans un troisième chapitre sont présentés, d'une part sur la théorie de l'érosion côtière, et d'autre part le développement et la poursuite de l'analyse de l'évolution du trait de côte étendue des dunes d'Ecault (au Nord d'Hardelot-plage) aux dunes de Camiers (rive nord de l'estuaire de la Canche) pour la période 1946-2005 à l'aide de la plateforme ArcGIS 9.3.

Le quatrième et dernier chapitre présente l'approche conceptuelle du couplage du SIG (ArcGIS 9.3) avec un système de modélisation hydrogéologique (GMS 6.0) dans le cadre d'une modélisation hydrogéologique littorale (exemple du site d'Hardelot-Plage).

Enfin la conclusion sera l'occasion de faire le point sur les différentes approches conceptuelles et méthodologiques appliquées dans le Nord de la France en utilisant des SIG

dans le domaine de la gestion d'un littoral, et, à la lumière des résultats obtenus, et, de dégager quelques perspectives de recherche. Chapitre I : Systèmes d'Informations Géographiques (SIG)

# I.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter quelques notions liées aux SIG, avec en particulier la définition du SIG, l'historique, les logiciels des SIG et plus particulièrement le logiciel ArcGIS 9.3.1 utilisé dans cette étude.

### I.2. Définitions, historique et logiciels des SIG

Les SIG sont une technologie éprouvée (Longley *et al.*, 2005) dont les opérations de base du SIG offrent aujourd'hui des outils sûrs pour la mesure, la cartographie et l'analyse du monde réel.

De nombreuses définitions des SIG ont été suggérées au cours des années, et aucune d'entres elles n'est entièrement satisfaisante, mais la plupart suggère que le SIG est beaucoup plus qu'un simple développement technologique et informatique. En 1988, le comité fédéral américain de coordination inter-agences pour la cartographie numérique (FICCDC, Federal Interagency Coordinating Committee on Digital Cartography) a défini un SIG comme suit : un SIG est un «système informatique de matériels, de logiciels et de processus conçus pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à références spatiales afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion» (INERIS, 2006). D'un point de vue français, la définition d'un SIG présentés par l'économiste Michel Didier (1990) dans une étude réalisée à la demande du Conseil National de l'Information Géographique (CNIG) est la suivante: un SIG est un «ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision» (IGN, 2005). D'après ces deux définitions, on peut en tirer l'information qu'un SIG a pour but d'informer sur la géographie d'un espace donné. Il se construit donc à partir d'un certain nombre de bases de données géographiques, qu'il permet d'intégrer, de gérer, de traiter et de représenter sous forme de cartes. Tous les éléments utilisés dans un SIG ont en commun leur géoréférenciel et de nombreuses applications propres à un SIG sont basées sur ces coordonnées (Lemaire, 2001).

Les données géographiques, considérées comme les éléments les plus importants dans un SIG, incluent deux types de données, des données spatiales organisées en couches et des données alphanumériques organisées en tableaux. Ces données doivent être parfaites, certifiées et précisées afin d'obtenir des décisions adaptées et correctes. On différencie ainsi les données vectorielles et les données raster. Les données vectorielles sont la plupart du temps le résultat de la numérisation manuelle ou semi-automatique. De façon générale, dans les données vectorielles on distingue les points, les lignes et les surfaces. Cependant les données raster, où le pixel est l'élément fondamental du stockage de l'information (Robin, 2002a), proviennent soit d'une scannérisation d'un document analogique (carte papier, photographie argentique, plan...), soit d'une image acquise par un capteur numérique (imagerie aérienne ou satellitale).

Les SIG, apparus dans les années 1970, se sont développés dans les années 2000 dans les études de l'évolution des zones côtières (Leatherman, 2003). Ils intègrent diverses sources de données sur la position de la côte (des photographies aériennes, des images satellites, levés DGPS, cartes, etc.), permettant de créer, modéliser, analyser et cartographier les données (McBride *et al.*, 1992; Byrnes et Hiland, 1995; McBride *et al.*, 1995; Gorman *et al.*, 1998; Moore, 2000; Armaroli *et al.*, 2006).

L'intérêt des SIG réside dans la présentation de nombreux avantages par rapport à la cartographie automatique, la capacité d'intégrer des sources très variées (statistiques, cartes, images satellites...) et de travailler à des échelles diverses, de faciliter l'accès à de grandes quantités de données et de permettre de combiner par le traitement et l'analyse toutes les informations.

Les logiciels de SIG sont aujourd'hui très nombreux. Les sociétés commercialisant des logiciels de SIG les plus connus sont : ESRI qui commercialise différents produits de la gamme ArcGIS ; ACXIOM (ex Claritas) qui commercialise Mapinfo en France; Intergraph commercialise le logiciel Geo Media Pro; Geo Concept commercialise les produits du même nom et Clark Labs avec IDRISI.

Les produits ESRI qui constituent un système complet de création, de mise à disposition et d'exploitation de l'Information Géographique (ESRI, 2008), sont majoritairement utilisés dans le domaine de la recherche scientifique. Les références scientifiques sur l'application de cette solution SIG sont ainsi les plus nombreuses (Zhan et Huang, 2004 ; Finkl *et al.*, 2008; Chaaban *et al.*, 2010b ; Darwishe, 2010 ; Roberts *et al.*, 2010).

### I.3. ArcGIS

ArcGIS est une plateforme logicielle SIG développée par la société ESRI. Cette plateforme correspond à l'intégration de deux produits distincts plus anciens (ArcInfo et Arcview) et exploite, d'une part, le potentiel des nouvelles puissances de calcul disponibles

Ecole polytechnique universitaire de Lille 1

sur les PC de la fin des années 90 et répond, d'autre part, à de nouveaux besoins telles que la gestion des données SIG en réseau et sur internet. Ainsi, en 1999 ESRI a réalisé son premier produit d'ArcGIS (ArcGIS 8.x), ensuite ArcGIS 9.x en 2004 et la dernière version est ArcGIS 10.x en 2010. Ce système complet (ArcGIS) propose trois produits (1) produits bureautiques (ArcGIS *Desktop*); (2) produits serveurs (ArcGIS *Server*) et (3) produits nomades (ArcGIS Mobile, ArcPad). Il propose également une plateforme collaborative en ligne (ArcGIS *Online*).

De plus, il existe différents niveaux de fonctionnalités SIG pour ArcGIS Desktop:

- ArcReader : est un logiciel gratuit permettant de visualiser les contenus (des cartes et requêtes) créés avec ArcGIS. Le logiciel offre également quelques outils de base pour l'affichage de carte, l'impression et l'interrogation des données spatiales.
- ArcView : (version SIG de base) permet de créer des cartes, de faire des requêtes spatiales, de modéliser et analyser des données, de mettre à jour des entités, d'intégrer de données ou jeux de données prêts à l'emploi.
- ArcEditor : ArcView + fonctionnalité topologiques et d'édition, mise à jour multiutilisateurs.
- ArcInfo : ArcEditor + modules supplémentaires très puissants, analyses spatiales et modélisations avancées, une gestion complète de la base de données, cartographie haut-de-gamme.

Il existe un certain nombre d'extensions pour ArcGIS *Desktop* qui proposent des outils dédiés à des usages thématiques plus particuliers du SIG tels que *3D Analyst, Spatial Analyst, Network Analyst, Survey Analyst, Tracking Analyst, et Geostatistical Analyst.* 

ArcGIS *Desktop* se compose de quatre applications intégrées: ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox et ArcGlobe. ArcCatalog est l'application de gestion des données, qui permet de parcourir l'ensemble de données et des fichiers sur l'ordinateur, la base de données, ou autres sources. En plus de montrer les données disponibles, ArcCatalog permet aussi aux utilisateurs de prévisualiser les données sur une carte, offre aussi la possibilité de visualiser et gérer les métadonnées de l'aménagement de l'ensemble de données. ArcMap est l'application utilisée pour visualiser, éditer des données géospatiales, et créer des cartes. ArcToolbox contient des outils de géotraitement, la conversion et d'analyse des données, ainsi que la plupart des fonctionnalités dans ArcInfo. ArcGlobe permet d'afficher de grandes quantités de données SIG à la surface d'un globe (visualisation 3D)

#### I.3.1. Géodatabase

Une géodatabase est une base de données conçue pour stocker, interroger et manipuler les informations géographiques et les données spatiales. Elle correspond à une base de données spatiale optimisée pour la gestion des données raster, des distances euclidiennes en 2 ou 3 dimensions (Zeiler, 1999; Shih-Lung et X, 2003). Au sein d'une base de données spatiale, les données spatiales sont traitées comme tout autre type de données. Les données vectorielles peuvent être stockées sous forme de point, ligne ou polygone, et peuvent avoir un système de référence spatiale associée. L'enregistrement d'une géodatabase peut utiliser un type de données géométriques pour représenter la location d'un objet dans le monde physique et d'autres types de données plus classiques de base de données pour stocker les attributs associés de l'objet (Zeiler, 1999). Certaines géodatabase, tels que celles utilisées par ESRI dans leur logiciel ArcGIS, peuvent stocker des données raster.

#### I.3.2. Géoréférencement en ArcGIS

Les données des SIG, pour être utiles, doivent être géoréférencées ou enregistrées dans un système de coordonnées commun. Le géoréférencement sous ArcMap permet de géoréférencer directement une image raster. Il existe deux méthodes principales pour caler une image : soit en entrant directement les coordonnées des points de référence (connues à l'aide des croisillons des cartes topographiques ou de relevés GPS (*Global Positioning System*), soit en s'appuyant sur un fichier graphique déjà géoréférencé. ArcGIS utilise 3 méthodes pour la transformation d'un raster.

Dans un premier temps la transformation polynomiale : celle-ci utilise un polynôme qui est construit via des points de contrôle et de l'algorithme LSF *least square fitting* (reconstruction par moindres carrés). La transformation polynomiale est optimisée pour la précision globale, mais ne garantit pas l'exactitude locale. Cette transformation utilise deux formules: l'une pour le calcul de la coordonnée de sortie x pour une location d'entrée (x, y), et l'autre pour le calcul de sortie y pour une location d'entrée (x, y). L'objectif de l'ajustement par les moindres carrés est d'obtenir une formule générale qui peut être appliquée à tous les points. Le nombre de points de contrôle non corrélés requis pour cette méthode doit être de 3 pour une transformation d'ordre 1, 6 pour une transformation d'ordre 2, et de 10 pour une transformation d'ordre 3 (ESRI, 2009, Grosso, 2010).

Ensuite la transformation Spline, est une méthode optimisée pour la précision locale, mais pas la précision globale. Elle est basée sur la fonction de Spline, une fonction polynomiale morcelée qui maintient la continuité et la souplesse entre les polynômes adjacents (Unser *et al.*, 1995). Spline transforme les points de contrôle de source exactement aux points de contrôle de cible, les pixels, qui sont éloignés des points de contrôle, ne sont pas garantis comme étant exacts. Cette transformation est utile lorsque les points de contrôle sont très nombreux mais il est nécessaire qu'ils soient renseignés avec précision. L'ajout de points de contrôle peut augmenter la précision globale de la transformation spline. Spline exige un minimum de dix points de contrôle. (Unser *et al.*, 1995; ESRI, 2009, Grosso, 2010)

La troisième méthode utilisée dans ArcGIS pour la transformation d'un raster est la transformation d'ajustement. Cette méthode permet d'optimiser à la fois la LSF globale et la précision locale. Elle est construite sur un algorithme qui combine une transformation polynomiale et une technique d'interpolation TIN (*Triangulated Irregular Network*) (White et Griffin, 1985). La transformation d'ajustement effectue une transformation polynomiale en utilisant deux ensembles de points de contrôle, puis ajuste les points de contrôle au niveau local afin de mieux correspondre aux points de contrôle de la cible en utilisant une technique d'interpolation exige un minimum de trois points de contrôle (White et Griffin, 1985; ESRI, 2009).

#### I.3.3. Géostatistiques sous ArcGIS

Le but principal de la géostatistique est d'estimer ou de prédire la valeur d'un paramètre dans l'espace. Elle permet de le faire sans tendance et avec une erreur minimale (Webster et Oliver, 2007). Cette branche de la statistique appliquée met l'accent sur le contexte spatial et les relations spatiales entre les données. Elle fournit des outils pour la quantification et l'exploitation de l'autocorrélation spatiale, et des algorithmes pour l'interpolation des données et la quantification des incertitudes (Isaaks et Srivastava, 1989).

L'exploration des interactions spatiales des données est nécessaire pour mieux prendre des décisions lors de la création d'une surface numérique (modèle numérique). ArcGIS fournit une extension «*Geostatistical Analyst*» permettant le traitement géostatistique et l'interpolation des données. Deux méthodes d'interpolation existent dans cette extension, IDW (*Inverse Distance Weighting*) et krigeage. Elles sont basées sur la similarité des points proches mais également, pour la deuxième méthode, sur le principe d'autocorrélation (Krige, 1951).

#### I.3.4. Mosaïque sous ArcGIS

Dans ArcGIS, un raster peut être créé à partir de plusieurs autres couches raster (par exemple photos aériennes) en les regroupant ensembles. Cette fonction est appelée mosaïquage (Coorg *et al.*, 1998; Kasser et Egels, 2002; Linder, 2009). Dans de nombreux cas, on constate une superposition des bords des rasters en cours de mosaïquage (Zoghlami *et al.*, 1997; ESRI, 2010). Ces zones de superposition peuvent être traitées et gérées de différentes façons. Par exemple : choisir de conserver seulement les données raster de la première ou de la dernière image, combiner les valeurs des cellules superposées en utilisant un algorithme de pondération, prendre la valeur maximale ou minimale des cellules superposées ou calculer la moyenne des valeurs.

#### I.3.5. Géotraitement (Geoprocessing) sous ArcGIS

Le géotraitement est la différence entre les SIG et tous les autres systèmes de cartographie. Généralement le géotraitement est l'exécution méthodique d'une séquence d'opérations sur des données géographiques pour créer de nouvelles informations. Les processus que nous effectuons peuvent être routiniers, par exemple, pour nous aider à convertir un certain nombre de fichiers d'un format à un autre. Or, les opérations peuvent être assez complexes pour créer des cartes de haute qualité, créer un modèle sophistiqué d'analyse pour aider à comprendre et à résoudre des problèmes scientifiques importants, ou créer des modèles de géotraitement.

Le géotraitement est un traitement numérique utilisant le positionnement spatial des données pour produire un résultat. Presque toutes les utilisations du SIG impliquent la répétition de tâches. Il est donc nécessaire de créer des méthodes (des chaines de traitement numérique de l'information spatiale) permettant d'automatiser, de documenter et de partager des procédures comprenant plusieurs étapes, appelées workflows. Un workflow est donc une procédure dans laquelle les étapes se succèdent dans un ordre prédéfini pour garantir le résultat et la traçabilité du traitement. Ainsi les utilisateurs de SIG composent et exécutent des modèles analytiques et statistiques qui aident à résoudre des problèmes, à prédire ce qui pourrait arriver, et à mieux comprendre de nombreux scénarios et des situations. Un aspect clé du géotraitement est la capacité pour concevoir, construire, et exécuter de nombreux types de modèles analytiques qui prennent en charge ce travail.

Le cadre du géotraitement fournit la base pour l'analyse spatiale et la modélisation par de nombreux outils et des opérateurs qui travaillent sur des ensembles de données
géographiques. Ces outils utilisent la géographie comme une clé pour l'intégration des données, aidant les utilisateurs à découvrir et à travailler avec des relations spatiales et l'utilisation des opérateurs géographiques pour obtenir de nouvelles informations.

ArcGIS comprend plus de 600 outils de géotraitement (ESRI, 2009). L'outil typique prend l'ensemble de données ArcGIS comme intrants (tels que des couches, des rasters, des tableaux, etc.), applique une opération aux données et crée un ensemble de nouveaux résultats. L'environnement de géotraitement sous ArcGIS comprend plusieurs aspects dont *ArcToolbox* et *ModelBuilder*.

#### I.3.6. ModelBuilder

*ModelBuilder* est une application permettant de créer, modifier et gérer des modèles dans l'environnement d'ArcGIS. Ces modèles sont des workflows qui permettent de concaténer des séquences d'outils de géotraitement, en injectant la sortie d'un outil dans un autre outil. Il existe deux modes de base pour créer *ModelBuilder*. Le premier est une application permettant d'effectuer des travaux d'exploration du projet. L'autre est une application qui permet de construire des outils génériques, ces outils peuvent être réutilisés et partagés. Figure I-1 présente le schéma d'un ArcGIS *ModelBuilder* utilisé ultérieurement dans la chapitre III pour (1) exécuter l'intersection entre les traits de côte et ses les transects, (2) ajouter des champs à la table d'attribut de la couche concernée et calculer la géométrie des points d'intersection.



Figure I-1. Schéma d'un ArcGIS *ModelBuilder* utilisé pour calculer l'évolution d'objets linéaires (évolution du trait de côte).

# I.4. Modèle Numérique de Terrain MNT

La topographie influence de nombreux processus liés à la géographie de la terre, comme la température et les précipitations (Shamsi, 2005). L'application des SIG doit être capable de représenter la surface de la terre avec précision, les inexactitudes peuvent entraîner la prise de mauvaises décisions ayant d'un impact négatif sur l'environnement terrestre (Shamsi, 2005). L'élément de base dans les SIG est le MNT (El Morjani, 2003); ce dernier intervient dans la maîtrise des problèmes aussi divers que le remaniement parcellaire, l'aménagement du territoire, la gestion de l'eau (distribution, assainissement, délimitation de bassins versants et ruissellement). A partir du MNT, on peut extraire un certain nombre de produits comme la carte des pentes, la carte d'orientation des pentes, la carte du relief ombré et la carte du réseau hydrographique virtuel (Zhou *et al.*, 2008) (Figure I-2).



Figure I-2. Cartes des pentes, d'orientation des pentes, du relief ombré et du réseau hydrographique de la zone d'étude.

La construction d'un MNT se déroule en trois étapes : l'échantillonnage, l'interpolation et la représentation des données.

Avant l'avènement de la géomatique, les études ont été basées sur l'interprétation et la mesure réalisées sur les cartes topographiques et des images. Cependant, depuis la généralisation de l'usage des données de télédétection et des outils SIG, l'échantillonnage peut se faire par des mesures numériques de terrain (arpentage GPS par exemple) ou par des méthodes de télédétection (satellitale ou aéroportée). Les mesures de terrain présentent bien la topographie, mais ce type de méthode demande un travail fastidieux et coûteux en temps contrairement aux méthodes de télédétection qui permettent d'échantillonner une surface importante de manière instantanée et répétitive. L'acquisition de données nécessaires pour construire un MNT peut se faire de plusieurs manières : par numérisation des courbes de niveau d'une carte, par saisie directe des coordonnées (x, y, z) des points du terrain (levé topographique), par la corrélation d'un couple stéréoscopique d'images (aérienne ou satellitale), par l'interférométrie radar (Dupont et Berthod, 1994), ou par un système laser aéroporté de type LIDAR (*LIght Detection And Ranging*).

## I.5. Méthodes d'interpolation

Les méthodes les plus couramment utilisées en interpolation spatiale consistent à calculer un gradient de valeurs attributaires en utilisant des moyennes pondérées appliquées à un semi de points renseignés (Woodwark, 1988). Burrough et Mcdonnell (1998) ont classé les méthodes de l'interpolation en deux approches: l'approche globale et l'approche déterministe. La méthode globale de l'interpolation utilise toutes les données disponibles pour fournir la prédiction pour l'ensemble de la zone d'intérêt. Alors que la méthode locale est faite dans une petite zone autour des données interpolées, les estimations sont faites uniquement pour la zone contenant les données.

Il existe trois principales méthodes d'interpolation dans l'extension *spatial analyst* d'ArcGIS: (1) le krigeage, (2) la pondération par distance inverse IDW et (3) la triangulation.

### I.5.1. Krigeage

Lorsque les données sont abondantes, la plupart des techniques d'interpolation donnent des résultats similaires, mais quand il y a un manque de données, le choix de la méthode et de ses paramètres peuvent être crucial si l'on veut éviter de faux résultats (Burrough et Mcdonnell, 1998). Les méthodes géostatistiques du type krigeage, tentent d'optimiser l'interpolation en utilisant le variogramme pour calculer les poids des échantillons. Le krigeage est une méthode d'interpolation qui porte le nom de son précurseur, l'ingénieur minier d'Afrique du Sud DG Krige, qui a développé une série de méthodes statistiques empiriques afin de déterminer et de prédire avec plus de précision une réserve de minerais (Krige, 1951; Cressie, 1986 ; 1990). Au cours des dernières décennies, le krigeage est devenu un outil fondamental dans les domaines de la géoscience et de la géostatistique puisque il est la méthode optimale et la plus précise (Journel et Huijbregts, 1981; Matheron, 1963; Gratton, 2002). Cette méthode utilise le variogramme qui exprime la variation spatiale de la distribution d'une ou plusieurs valeurs attributaires tout en minimisant l'erreur de prédiction entre les valeurs en entrée et celles qui sont prévues.

Dans les statistiques classiques, les mesures sont supposées indépendantes. Par contre en géostatistique, les informations sur l'emplacement spatial permettent de calculer des distances entre les mesures et le modèle d'autocorrélation en fonction de la distance. En géostatistique le calcul des données s'exprime selon la formule mathématique suivante (Équation 1):

Équation 1

# $Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s)$

Où Z (s) est la variable d'intérêt, décomposée en une tendance déterministe  $\mu$  (s) et une composante aléatoire (erreur autocorrélée  $\epsilon$  (s)). Le symbole s indique simplement l'emplacement. Les variations sur ce formulaire forment la base pour tous les différents types de krigeage (ordinaire, simple et universel). La différence entre ces types d'estimations réside dans la connaissance de la statistique de la variable à interpoler.

- 1. Krigeage simple : variable stationnaire de moyenne connue et constante ( $\mu(s)$  est une constante connue) (Changjiang *et al.*, 2009).
- 2. Krigeage ordinaire : variable stationnaire de moyenne inconnue et constante, sans tendance ( $\mu(s)$  est une inconnue constante) (Abedini *et al.*, 2008).
- Krigeage universel : variable non-stationnaire (qui contient une tendance). La tendance μ(s) est une fonction déterministe, la moyenne n'est pas connue et n'est pas constante, elle est donc locale.(Brus et Heuvelink, 2007).

#### I.5.2. Pondération par l'Inverse de la Distance IDW

Lorsque la densité des points d'échantillonnage varie peu sur le secteur étudié (maillage régulier des échantillons), la méthode IDW est adaptée (Mueller *et al.*, 2004). Cette méthode consiste à calculer les valeurs des nœuds d'une grille en utilisant une moyenne pondérée des valeurs contenus dans le semi de points d'échantillonnage de la valeur à interpoler. Dans le calcul IDW, les pondérations sont inversement proportionnelles aux distances séparant le

nœud considéré et les différents points de données (Rousseaux, 2006). Pour l'exemple du calcul d'un MNT, les points particuliers du terrain (sommets, vallées) et les irrégularités du relief peuvent être insuffisamment renseignés; le modèle de terrain obtenu par IDW serait donc peu réaliste.

#### I.5.3. Triangulation TIN

Cette méthode consiste à définir un maillage triangulaire sur la surface concernée, ou l'échantillon de données sous forme de semis de points définit les sommets de triangles (Zhou *et al.*, 2008) (Figure I-3).



Figure I-3. Représentation TIN de la surface topographique de la zone d'étude.

À l'intérieur de chaque facette triangulaire, les interpolations linéaires peuvent ainsi être calculées. La triangulation de Delaunay est la méthode classique pour construire cette triangulation. Cette méthode (triangulation de Delaunay) s'appuie principalement sur le critère

suivant : Soit T un triangle du maillage, alors aucun point du semis (sauf ceux de T), n'est contenu dans le cercle circonscrit de T (Speckmann et Snoeyink, 2001). Un modèle numérique obtenu par la méthode TIN est assez proche de la réalité si le nombre de points d'échantillonnage est suffisant (Ali et Mehrabian, 2009).

### I.6. Conclusion

Ce chapitre a permis de rappeler quelques notions liées aux SIG, avec en particulier la définition du SIG, l'historique, les logiciels des SIG et plus particulièrement le logiciel ArcGIS 9.3.1 utilisé dans cette étude. L'accent a été mis sur les principaux concepts et fonctions du SIG utilisés dans le cadre de la présente recherche : la Géodatabase, le géoréférencement, la mosaïque, la géostatistique et les méthodes d'interpolations. Cette synthèse bibliographique montre que les SIG constituent un outil très puissant de la modélisation et de la gestion de l'information géographique. Un tel système est très utile dans un large éventail de situations et de problématiques : la planification, la gestion ou la prévision. La capacité du SIG d'organiser les information spatialisées dans des couches, puis de les combiner avec d'autres couches d'information est la raison pour laquelle le SIG présente un potentiel dans la recherche et un robuste outil décisionnel

**Chapitre II :** Contexte géographique, géologique et hydrogéologique de la zone d'étude

# **II.1. Introduction**

Dans ce chapitre, un examen des contextes géographique, géologique et géomorphologique de la zone d'étude est effectué afin de bien identifier les différentes caractéristiques du terrain.

## II.2. Situation géographique

La commune d'Hardelot est située dans le département du Pas-de-Calais (Figure II-1). Sa plage est localisée à l'aval d'un petit bassin versant littoral de l'un des fleuves côtiers de l'Artois. La zone d'étude s'étend sur 4km de la façade maritime. Elle s'intègre dans un secteur hydrogéologique plus large (300 km<sup>2</sup>) qui a fait l'objet d'une modélisation hydrodynamique (Figure II-1), et dont l'extension spatiale est bornée par la Canche au Sud et de la Manche à l'Ouest. Cette zone a fait l'objet d'une analyse de l'évolution du trait de côte, sur environ 14 km, des dunes d'Ecault (au nord d'Hardelot-plage) aux dunes de Camiers (rive nord de l'estuaire de la Canche).



Figure II-1. Situation géographique de la zone d'étude.

## II.3. Situation géologique

Dans le secteur d'étude, le contexte stratigraphique est connu d'après plusieurs sources géologiques : Bureau de Recherches Géologiques et Minière (BRGM ,2004; Banque de données du Sous-Sol BSS) et par les résultats obtenus lors de la réalisation d'une campagne de mesure géophysique (SPRL, 2006).

### II.3.1. Situation géologique dans la large zone

A partir de données disponibles, le cadre d'étude se divise principalement en deux unités (Figure II-2) :

- à l'ouest, les sables et les argiles quaternaires le long du front littoral s'étendent sur une largeur d'environ 2 km.
- à l'est, les terrains crétacés affleurent au-delà d'une falaise fossile parallèle au trait de côte.





Figure II-2. Carte géologique de la zone d'étude.

Les formations crétacées dans le secteur sont affectées par 2 familles d'accidents orientées N030° (transversales) et N110° (longitudinales) (Figure II-3).



Figure II-3. Localisation des failles sur carte (Louche, 1997).

Ces failles permettent de découper le site en différents compartiments :

- Au nord, une grande faille longitudinale passant non loin d'Hardelot, de direction NO/SE, traverse tout le secteur. Elle est entrecoupée par deux failles transversales d'orientation NE/SO. Une seconde faille parallèle à celle d'Hardelot, située à environ 1 km au sud, près du mont Saint-Frieux, traverse également le site. Elle est reliée à la première par une des failles transversales.
- Au sud, près de l'embouchure de la Canche, une faille longitudinale, appelée faille de Montreuil-Basurelle, fait remonter la partie méridionale de la Canche par rapport au sud. Cette faille est fractionnée par un réseau de petites failles transversales.
- Dans la zone intermédiaire, on observe un réseau de failles transversales et longitudinales qui découpent en plusieurs compartiments la zone située à l'est de Dannes et Camiers.

La craie étant sub-tabulaire (Louche et Hallet, 2001), la comparaison de l'altitude du toit de la craie en différents points permet de positionner approximativement les failles existantes sur la carte géologique et les superposer à celles décrites en 1997 (Figure II-4). Sur le bloc diagramme du toit de la craie, la présence d'un réseau de failles en régime compressif est peut être à l'origine de la formation du mont Saint-Frieux (coordonnée Lambert2 étendue : 551000m ; 2623000m).



Figure II-4. Bloc diagramme du toit de la craie : localisation des failles (Pasbrich, 2006).

### II.3.2. Situation géologique d'Hardelot Plage

### A. Prospection électrique

12 sondages électriques, implantés sur la plage ou dans ses environs (Figure II-5) ont été réalisés du 3 au 5 mai 2006 par SPRL (2006). L'objectif de cette mission était double : d'une part la reconnaissance lithologique des formations sur la plage d'Hardelot et d'autre part la détermination de l'étendue du biseau salé (SPRL, 2006).



Figure II-5. Position des sondages électriques implantés sur la plage d'Hardelot ou dans ses environs.

**Principes généraux** : Il s'agit de la première technique scientifique d'exploration du sous-sol, mise au point par les frères Schlumberger (Bowker, 1988). Le principe de la méthode est le suivant (SPRL, 2006) (

Figure **II-6**). On injecte un courant d'intensité connue I au moyen de deux électrodes A et B. Entre deux autres électrodes M et N, nous mesurons la différence de potentiel  $\Delta V$ . On a :

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} * \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)$$

D'où

Équation 2

AM = distance entre électrodes A et M

- AN = distance entre électrodes A et N
- BM = distance entre électrodes B et M
- BN = distance entre électrodes B et N
- $\Delta V = différence de potentiel$

 $\rho$  = résistivité mesuré (si le terrain est homogène); ou résistivité apparente (si le terrain est hétérogène)

#### I = intensité

Le dispositif utilisé est celui de Schlumberger, où l'écartement des électrodes M et N varie par rapport à A et B. Les deux électrodes extérieures sont reliées à l'ampèremètre, et les électrodes intérieures à un voltmètre.



Figure II-6. Schéma d'ensemble de l'installation (Bakkali et Bouyalaoui, 2005; Pasbrich, 2006).

**Méthodologie suivie** : Lors des mesures des profils, les électrodes A et B ont été placées à 250 m de l'émetteur et les électrodes M et N à 30 m (Figure II-6). Les écartements AB/2 utilisés sont successivement :

1,5; 2; 2,7; 3,6; 4,7; 6,3; 8,4; 11,2; 15; 20; 26,7; 35,6; 47,4; 63,3; 84,4 et 100 mètres. Au-delà de 100 m, la progression de l'écartement se fait de 25 en 25 m sur une distance de 200 m.

Suite à cette série de mesure, il faut déterminer la résistivité apparente en chaque point (SPRL, 2006).

Par définition, la résistivité apparente est la résistivité moyenne des terrains traversés par le courant. Si les terrains sont homogènes, la résistivité apparente reste constante quelque soit l'écartement des électrodes externes (SPRL, 2006). Par contre, si les terrains sont hétérogènes, chacune des couches intervient à mesure que l'écartement des électrodes externes atteint un multiple de la profondeur de la couche intéressée (Monjoie, 1995 ; Bakkali

et Bouyalaoui, 2005). Ici, elle nous est directement donnée par l'appareillage, sinon, il faut utiliser la formule.

**Résultats :** Une fois toutes les résistivités apparentes calculées, la représentation sur papier bi logarithmique permet de définir le nombre de couches traversées, leur épaisseur et leur résistivité (directement en rapport avec leur nature). En effet, les roches présentent des gammes de résistivité qui leur sont propres et qui peuvent varier dans un large domaine en fonction de différents paramètres. Cependant, la résistivité d'un sol est essentiellement fonction de sa teneur en eau et de sa minéralisation ainsi que de la présence d'argile ou de l'existence de vides ou cavités (Bakkali et Bouyalaoui, 2005 ; SPRL, 2006) (Tableau II-1).

Lithologie	Gamme de résistivité (ohm.m)
Schistes	10-250
Grès	500-10000
Calcaire	100-5000
Argiles	1-30
sables	30-10000
Marnes	3-70

Tableau II-1. Exemple de résistivités de quelques roches (SPRL, 2006).

Après avoir interprété les différentes courbes électriques, on obtient les différentes coupes lithologiques (Figure II-7).



Figure II-7. Lithologie des profils au Nord d'Hardelot-Plage (SE1,2,3,4) et au Sud (SE4,5,6,7,8,9,10,11,12)

L'interprétation des différentes courbes électriques (Pasbrich, 2006), a permis d'observer :

1. Les sables quaternaires sur 20 à 30 m d'épaisseur, avec à la surface une couche humide très salée, puis une alternance eau douce-eau salée.

- 2. La tourbe est présente en 3 endroits :
- Au point SE01, situé à l'extrême nord du site, d'une épaisseur de 1,50 m, elle se trouve à 2,80 m de profondeur.
- Au point SE03, situé à environ 500 m au sud du poste de secours, la tourbe se rencontre à partir de 2,70 m de profondeur. L'alternance sable/tourbe se poursuit sur 35m d'épaisseur.
- Au point SE10 et SE11, situé à l'extrême sud du site, d'épaisseur 1,4 m et 1,5 m, elle se trouve à 1,6 m et 2 m de profondeur.

La tourbe contient principalement de l'eau douce à l'exception du point SE10 où elle est saturée en eau saumâtre.

- La craie du Crétacé est présente sous trois formes, soit saturée en eau douce, soit saturée en eau saumâtre, soit sèche. Elle se trouve à des profondeurs variables, parfois même à l'affleurement, aux points SE04 et SE12.
- 4. Le calcaire jurassique ne se trouve qu'au nord, en SE01, à 70 m de profondeur. Il a également été décrit dans les sondages SE3, SE6, SE9 et SE10. Cependant compte tenu des valeurs de résistivité mesurées et des connaissances géologiques, il semblerait qu'au droit de ces sondages, on trouve plutôt la craie à ces profondeurs.

### **B.** Coupe géologique

À partir des sondages électriques (Figure II-7) une coupe géologique (Figure II-8) a été réalisée (Chaaban *et al.*, 2010a, b ; 2011). Pour la partie Ouest, les faciès sableux reposent sur les calcaires jurassiques au Nord alors qu'ils recouvrent directement la craie au Sud. Le site d'Hardelot-Plage peut donc être divisé en deux parties distinctes : zone Nord et zone Sud. Les épaisseurs des couches sableuses y sont variables et présentent des intercalations de tourbe. L'épaisseur globale de ce faciès à succession de tourbes et sables peut varier de 1,5 m à 35 m. L'épaisseur de la craie varie quant à elle entre 35 m et 75 m (Figure II-8).





Figure II-8. Coupe géologique Nord-Sud sur le cordon littoral d'Hardelot-plage d'après sondage électrique SPRL, 2006 (Chaaban *et al.*, 2010a, b ; 2011).

Cette coupe géologique réalisée montre l'irrégularité spatiale des intrusions de l'eau salée. D'une part l'eau salée est présente au dessus de l'eau douce en raison de la marée (Louche, 1997) et, d'autre part, la profondeur atteinte par l'eau salée est différente sur un axe nord-sud pour le littoral d'Hardelot-Plage. Cela démontre l'absence de biseau salé dans les conditions observées (Louche *et al.*, 1998). L'hydrogéologie qui en résulte est de ce fait singulière et relativement complexe car dépendante des successions stratigraphiques de différents faciès géologiques quaternaire, crétacé et jurassique qui constituent la géologie du littoral étudié.

## **II.4. Situation Géomorphologique**

La géomorphologie et la disposition topographique à Hardelot-plage sont différentes de celles rencontrées au Sud de la Canche. Au Sud de la Canche, on passe de la mer vers le plateau de craie, en traversant : un complexe dunaire externe, une plaine interdunaire, un complexe dunaire interne, un marais maritime poldérisé, une falaise morte et le plateau crayeux (Battiau-Queney *et al.*, 2006 ; 1995). Par contre au Nord de la Canche, il reste un seul complexe dunaire et le plateau crayeux se trouve à proximité de la côte.

### II.4.1. Géomorphologie à Hardelot-plage

La géomorphologie diffère de la partie nord à la partie sud d'Hardelot-Plage (Battiau-Queney *et al.*, 2006). En ce qui concerne la partie sud, une plaine humide riche en sources se trouve à l'est des dunes du Chevalier Sansot. De vieilles dunes sont présentes le long de la plage et au Nord du ruisseau de Borne, mais elles ne sont plus alimentées en sable et sont taillées en falaise par la mer (Figure II-9, b). Des dunes plaquées recouvrent le rebord du plateau de craie qui regarde vers la mer ou les buttes témoins situées en avant du plateau, comme le Mont Saint Frieux. L'élévation de ces dunes dépasse 100m sur le flanc sud et ouest du Mont Saint Frieux.

Pour la partie nord, les dunes d'Ecault recouvrent de la même façon les buttes de grès jurassiques de la fosse du Boulonnais, jusqu'à plus de 60 m d'altitude (Figure II-9, a). Les dunes littorales situées au nord d' Hardelot-plage, qui ont plus de 20 m d'altitude IGN69, sont plus élevées et mobiles que celles au sud qui portent une végétation dense et dépassent rarement 10m d'altitude IGN. Fauchois (1998) a réalisé deux coupes topographiques au Sud et au Nord d' Hardelot-Plage (Figure II-9). On constate qu'au sud il n'y a pas d'avant-dune mais une falaise sableuse, alors qu'au nord la mer atteint rarement le pied de la dune en dehors des très grandes marées de vive-eau (Battiau-Queney *et al.*, 2006).



Figure II-9. Coupes topographiques au nord (dunes d'Ecault) et au sud d'Hardelot (Fauchois, 1998).

#### II.4.2. L'évolution du trait de côte

Tout d'abord le travail de Briquet (1930) est le travail le plus ancien portant sur l'évolution du trait de côte dans la région. Il souligne que le recul est un mouvement déjà amorcé dès le 19ème siècle : des corps de garde avaient été établis. Ceux-ci ont pu servir, comme aujourd'hui les blockhaus, de points de repère fixes. Briquet affirme que le trait de côte dans la partie située au sud d'Hardelot-plage (Dannes Saint-Frieux) avait reculé 50 mètres entre 1835 et 1878.

Au nord d'Hardelot-Plage, la situation était également au recul de façon générale, même s'il s'agit d'avantage d'une remarque qualitative, sans réel point de repère. Les études suivantes sont plus récentes et concernent l'après-guerre.

Ensuite Clique et Lepetit (1986) ont établi un document de référence sur l'érosion côtière pour la région Nord-Pas-de-Calais (Figure II-10). La cartographie qui résulte de leur travail donne une idée de l'évolution du littoral régional dans son ensemble. L'objectif des auteurs était de donner un ordre de grandeur de l'érosion côtière, et non pas de calculer des taux d'érosion à des endroits précis. A partir de ce travail, l'évolution de la côte, dans notre zone d'étude serait caractérisée par un recul de 25 mètres en trente ans, de 1947 à 1977 (Figure II-10). Nous avons donc grâce à cette carte une tendance d'évolution pour l'ensemble de la zone d'étude, de 1947 à 1977.

Fauchois (1998) a réalisé un travail d'évolution du trait de côte pour la zone étendue d'Hardelot-Plage à la Canche entre 1971 - 1995. Les résultats ont montré un recul moyen de 30 m pour la partie nord des dunes d'Ecault avec une tendance à la progradation pour 1995. A propos de la partie nord des dunes du chevalier Sansot, Fauchois a calculé un recul moyen de 25 m (toujours pour la période 1971 – 1995) et la tendance en 1995 est à la stagnation. Pour la partie sud de ces dunes le recul moyen est de 20 m, avec une tendance en 1995 est à la progradation. La comparaison du travail de Clique et Lepetit à celui de Fauchois, permet de constater que les dunes au nord et au sud d'Hardelot sont en situation de recul entre 1947 et 1995, soit pendant 48 ans. Enfin les dunes de Camiers (rive nord de l'estuaire de la Canche) présentent une érosion moyenne de 50 à 115 m avec une tendance en 1995 à la stagnation.



Chapitre II : Contexte géographique, géologique et hydrogéologique de la zone d'étude

Figure II-10. Evolution du littoral de 1947 à 1977 : de la frontière belge à la baie de Somme (À partir de photos au 1/5000) (Clique et Lepetit, 1986).

Enfin le travail réalisé par Tresca (2006) concerne seulement le partie sud des dunes d'Ecault (1400 m) et la partie nord des dunes de Chevalier Sansot (1500 m), c'est-à-dire juste au nord et au sud de la station Hardelot-Plage .Ce travail montre un recul global du trait de côte, sur une période néanmoins plus longue (1929 – 2000). Il montre un recul régulier et continu au droit des dunes du chevalier Sansot. Il se démarque en revanche en mettant en évidence une période pendant laquelle les dunes d'Ecault ont progradé, entre 1929 et 1977. Il s'agit d'un mouvement parfois évoqué, mais rarement constaté en ce qui concerne le littoral régional.

Le long des dunes d'Ecault, le trait de côte s'est avancé de 1929 à 1963. L'évolution s'est renversée à partir de 1977. La partie la plus mobile est celle proche des bunkers, avec une forte progradation avant 1977, suivie d'un recul de 60 m entre 1977 et 2000 (2,5 m/an). Au final, sur l'ensemble de la période 1929-2000, l'évolution cumulée est proche de la stabilité au nord, mais marqué vers le sud par un recul qui s'accentue aux approches de la Becque. Le petit estuaire de la Becque a évolué selon le schéma classique décrit par Briquet (1930) : avancée de la rive sud (poulier) et recul de la rive nord (musoir). Cette côte a connu des phases d'avancée rapide, de 1 à 2 m/an entre 1963 et 1977 et des phases de recul rapide, de 0 à > 2 m/an entre 1977 et 1989 et localement entre 1995 et 2000. Par contre au long des dunes du chevalier Sansot, l'évolution du trait de côte est moins hésitante, le recul se situe dans une fourchette de 40 à 50 m (0,7 à 0,9 m/an). Le recul est plus rapide entre 1989 et 1995, où il peut dépasser localement 3 m/an.

#### II.4.3. Atelier EUCC-France dans la baie de Canche 2010

Cet atelier nous a conduits dans la baie de Canche (Figure II-11, a), les 7 et 8 octobre 2010, pour y étudier la gestion intégrée et le développement durable de l'estuaire. Parmi les principaux centres d'intérêt, signalons l'impact des ouvrages (digue submersible et épis), l'alternance de secteurs en érosion (falaise sableuse tronquant les dunes) et en accumulation (champs de dunes embryonnaires et progradation du trait de côte) (Figure II-11, b), la diversité de la végétation littorale, la présence d'exsurgences d'une nappe d'eau douce (Figure II-11, c) favorisant l'implantation de colonies de diatomées (algues unicellulaires microscopiques) colorant le sable en rouge, ocre ou brun. Les épis EC 1, 2 et 3 sont partiellement ou totalement recouverts de sable. Les deux grands épis « est » et « ouest » proches de Saint Gabriel, installés en 1993 et 1994 et un bunker allemand sont presque entièrement recouverts de sable (Figure II-11, d). Tout cela montre une nette tendance récente à l'accumulation de sable sur cette rive droite de la Canche. La présence d'enrochements lourds (Figure II-11, e) protégeant le camping de Saint Gabriel soulève la question de l'utilité de tels ouvrages. Ils furent établis à partir des débris provenant de la destruction de bunkers. Par contre, les enrochements qui protègent les habitations de Sainte Cécile semblent plus justifiés, bien que leur efficacité puisse être discutée (EUCC France, 2010).



Figure II-11. Pohotographies de la rive droite de l'estuaire de la canche, prises le 08 octobre 2010 par F.CHAABAN pendant l'atelier d'EUCC-France.

# **II.5.** Description des paramètres climatiques

### **II.5.1.** Précipitations

La connaissance de l'évolution pluviométrique est très importante pour la compréhension du comportement piézométrique aussi bien de la nappe de la Craie que des autres nappes présentes dans le secteur d'étude. En effet, l'alimentation des nappes, lorsqu'elles sont libres, dépend des précipitations mais également d'un certain nombre de paramètres qui régissent d'une part le ruissellement et d'autre part l'évapotranspiration. Après un bref exposé des différents paramètres climatiques dont nous disposons et qui influencent la recharge de la nappe, une discussion concernant l'évolution pluviométrique depuis quelques années sera abordée grâce aux données recueillies auprès de Météo - France.

En ce qui concerne les précipitations, l'analyse de données pluviométriques a permis de démontrer que leur répartition dépend de manière générale, d'une part de l'altitude et d'autre part de la distance de la station par rapport à la mer .La précipitation annuelle est plus importante de 100 à 200 mm sur le plateau qu'en bordure de mer et croît avec l'altitude.

La carte des isohyètes des précipitations moyennes annuelles sur 20 ans (Figure II-12), pour l'intervalle 1956-1975, réalisée par Beckelynck (1981) permet de constater que sur l'ensemble du secteur, la hauteur de pluie moyenne varie de 700 à 850 mm, avec une augmentation lorsqu'on se déplace vers le plateau crayeux. L'influence du relief sur la répartition des précipitations est bien visible dans la partie Nord de la Canche, où l'on remarque une lame d'eau précipitée supérieure à la proximité du plateau crayeux. De plus, la pluviosité en bordure de mer semble régulière et constante en raison de l'effet modérateur du climat océanique.



Figure II-12. Carte des isohyètes des précipitations moyennes annuelles de 1956 à 1975 (Beckelynck, 1981).

Si l'on compare la hauteur de précipitation annuelle de 1975 à 2005 à la station météorologique du Touquet (Figure II-13), on remarque une succession d'années sèches et humides réparties de la manière suivante : années humides (en ,1979, 1980, 1981, 1982, 1987 ,1988, 1992 ,1993,1994 ,1997,1998,1999,2000,2001et 2002) entrecoupées d'années sèches (en 1975, 1976, 1977, 1978, 1983, 1984, 1985,1986, 1989, 1990, 1991, 1995, 1996, 2003,2004 et 2005). On constate donc que les années de 1975 à 1986 sont représentées par une alternance périodique de 4 années sèches séparées par quatre années humides. À partir de 1986, ce graphique montre deux années humides(1987,1988) suivies par une augmentation constante par période de cinq années.

Les mois de février, juillet et août sont considérés comme les mois les plus secs, alors que les mois les plus humides sont septembre, octobre et novembre (Quenton ; 1992).



Figure II-13. Evolution des précipitations au Touquet de 1975 à 2005 (mm).

### II.5.2. Températures

Il n'existe que deux stations équipées d'un thermographe sur le secteur, à savoir Boulogne-sur-mer et le Touquet. Une étude effectuée par Mania et Philippart (1976) concernant la zone située entre la limite Sud de la Boutonnière du Boulonnais et l'Authie a permis de démontrer que pour la période allant de 1964 à 1974 :

• le mois d'août est le plus chaud avec 16,8°C à Boulogne et 16,75°C au Touquet,

• le mois le plus froid est janvier avec respectivement 4,19°C et 4,13°C à Boulogne et au Touquet,

 les moyennes interannuelles aux deux stations sont de 10° 10 à Boulogne et 10°25 au Touquet.

Les valeurs moyennes de température étant assez semblables, et bien qu'aucune corrélation détaillée n'ait été établie entre ces deux stations, les données du Touquet seront utilisées par la suite.

### II.5.3. Évapotranspiration

Une partie des pluies est reprise par évaporation physique (fonction du pouvoir évaporant de l'atmosphère agissant sur les surfaces d'eau libre et à la surface du sol) ou par évaporation physiologique (eau évaporée par la transpiration des végétaux (Marsily, 1981)). Ces deux phénomènes sont regroupés sous le nom d'évapotranspiration (Brochet et Gerbier, 1974 ; Marsily, 1981 ; Louche, 1997). On a distingué une évapotranspiration réelle (E.T.R.) qui existe dans les conditions naturelles d'humidité du sol, d'une évapotranspiration potentielle (E.T.P), qui représente la quantité d'eau qui serait évaporée et transpirée si les réserves en eau étaient suffisantes pour compenser les pertes maximales.

## A. Évapotranspiration potentielle E.T.P.

Disposant de données de température à la station météorologique du Touquet, E.T.P.peut être calculée grâce à la formule de Thornthwaite (Brochet et Gerbier, 1974; Marsily, 1981). (Équation 3).

Équation 3

$$ETP' = 1,6(10\frac{t}{I})^{a}$$

ETP' = ETP non corrigée en cm d'où :

t : température moyenne mensuelle

I : indice thermique annuel :  $I = \sum_{0}^{12} i$  (des 12 mois précédents, celui concerné étant exclu) i : indice thermique mensuel :  $i = (\frac{t}{5})^{1.514}$ 

 $a: 675.10^{-9} \ I^3 \text{ - } 771.10^{-7} \ I^2 + 1792.10^{-5} \ I + 0,49239$ 

Les calculs de i et de ETP' sont simplifiés par l'utilisation de tableaux et d'abaques. Les valeurs de ETP' sont ensuite corrigées par un coefficient ( $\beta$ ) (Équation 4), différent pour chaque mois et dépendant de la latitude (Tableau II-2). Équation 4

$$ETP = \beta.ETP'$$

Jan.	Fev.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
0,74	0,78	1,02	1,15	1,33	1,36	1,37	1,25	1,06	0,92	0,76	0,70

Tableau II-2. Coefficient correcteur  $\beta$  pour 50° de latitude Nord.

### **B.** Évapotranspiration réelle E.T.R

En ce qui concerne ETR, on peut la mesurer soit en calculant les volumes d'eau disponibles, soit au moyen de formules empiriques (Turc annuelle, Équation 5) (Brochet et Gerbier, 1974; Marsily, 1981) grâce à des cases lysimètriques : différence entre les précipitations et la quantité d'eau recueillie au fond du lysimètre. De telles installations n'existent guère que dans des stations de recherche agronomique. A défaut on se contente de formules empiriques telles que : formule de L. TURC annuelle :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + P^2 / L^2}}$$

P et ETR en mm/an  $L = 300 + 25 T + 0,05 T^{3}$ T : température moyenne annuelle

### C. Estimation des excédents par la méthode de Thornthwaite

Par extension si l'on peut estimer la répartition de ces excédents en "ruissellement" et en "Infiltration", on pourra avoir une idée de la réalimentation d'une nappe par les précipitations. Le principe de calcul est le suivant (Brochet et Gerbier, 1974 ; Marsily, 1981):

- on se fixe une valeur maximale de stock d'eau dans le sol (zone non saturée) ou "Réserve Facilement Utilisable" par les plantes (RFU), par exemple 100 mm. Aprés une longue période de précipitations en saison froide, ce stock est probablement reconstitué et l'on choisit alors le mois de départ dans cette période.
- au mois suivant on compare P et ETP, si P > ETP : ETR = ETP et l'excédent sera P-ETP. si au contraire P < ETP : ETR = P + un prélèvement sur la RFU à concurrence de la valeur disponible et du maximum ETR = ETP,

- au fur et à mesure que le temps se réchauffe l'ETP croît et le stock d'eau diminue pour satisfaire à l'ETR qui sera alors inférieure à l'ETP, sauf cas de pluie suffisante; un excédent sera généralement exceptionnel,
- les pluies d'été serviront essentiellement à reconstituer la RFU et rarement à engendrer un excédent (utilisable pour réalimenter la nappe par exemple), tandis qu'à la fin de l'automne, la RFU étant pleinement reconstituée par les pluies, celles-ci redeviendront efficaces ( = présence d'un excédent ). C'est pourquoi un hiver sec est plus néfaste pour une nappe d'eau souterraine qu'un été sec. L'infiltration s'effectue en hiver, lorsque l'évapotranspiration est très faible, voire même nulle.

#### II.5.4. Bilan hydrique au Touquet de 1975 à 2005

Cette station est la seule appartenant à Météo-France qui nous permet d'avoir à la fois les données pluviométriques et thermométriques. A partir des données de température et de pluie, le bilan relatif aux 30 dernières années a pu être effectué .Connaissant la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle, il ne reste plus qu'à calculer ETR pour évaluer la pluie efficace en admettant une RFU maximale de 100 mm au mois de janvier (Louche, 1997) où les terrains sont généralement les plus humides. Les résultats sont reportés dans le

Année	Р	ЕТР	ETR	Peff
1975	823	656	564	259
1976	720	671	446	274
1977	714	657	631	83
1978	732	647	628	104
1979	968	641	609	359
1980	931	642	780	151
1981	966	648	641	325
1982	872	668	552	321
1983	765	648	487	279
1984	777	644	545	233
1985	761	653	632	129
1986	831	653	466	365
1987	988	653	641	347
1988	875	661	581	294
1989	732	629	462	270
1990	743	679	483	260
1991	783	644	550	233
1992	916	675	628	288
1993	883	637	580	303
1994	895	737	638	256
1995	625	805	470	156
1996	522	628	503	20
1997	837	694	726	111
1998	903	681	661	242
1999	969	716	688	280

Tableau II-3 et sur la Figure II-14.

Chapitre II : Contexte géographique, géologique et hydrogéologique de la zone d'étude

Année	Р	ETP	ETR	Peff
2000	1106	694	615	490
2001	1096	692	687	409
2002	1006	694	715	291
2003	696	766	634	62
2004	872	694	731	141
2005	913	679	694	219
2006	987	731	756	230

Tableau II-3. Bilan hydrique (en mm) au Touquet de 1975 à 2006.



Figure II-14. Comparaison entre pluie, évapotranspiration et pluies efficaces à la station météorologique du Touquet de 1975 à 2006 (source de données : Météo-France).

Le graphe représentant l'évolution de la pluie efficace permet d'observer six années de recharge : 1976, 1979, 1981, 1986, 1983, 1993 et l'année 2000 où la hauteur des pluies efficace est plus importante et atteint 490 mm. Après 1993 et 2000 on assiste à une diminution non négligeable de la hauteur des pluies efficace. A partir de 2003 on assiste ensuite à une nouvelle croissance des pluies efficace pour connaître une nouvelle période de recharge.

### II.5.5. Tempêtes

Les données météorologiques (Figure II-15) sont exclusivement extraites de Chaverot (2006). Seulement, le sémaphore de Boulogne-sur mer ne présente pas d'enregistrements météorologiques antérieurs à 1965, et les lacunes sont nombreuses. La fréquence des tempêtes est forte pour la période 1972-2001. L'année 1990 marque le plus grand nombre

d'évènements à la station de Boulogne-sur-Mer. En outre, le nombre annuel de jours de vents supérieurs à 28 m.s<sup>-1</sup> augmente après 1977. Du milieu des années 1980 jusqu'au milieu des années 1990, les vents forts (supérieurs à 16 m.s<sup>-1</sup>) sont particulièrement récurrents.

Ensuite, Météo France enregistre dans les années 1970 une domination des tempêtes de secteur nord, par rapport à celle de secteur ouest – sud ouest. Les tempêtes de secteur nord ont des conséquences morphologiques moindres, car elles ne se traduisent pas des vents d'afflux sur la côte d'Opale.



Figure II-15. Nombre d'évènements tempétueux (vents trihoraires >= 16 m.s-1) et l'indice NAO hivernal à Boulogne-sur-Mer entre 1965 et 2001 (Chaverot, 2006).

Le vent est l'un des deux agents générant les surcotes. Celles-ci ne révèlent pas de tendance significative dans les enregistrements. L'année ayant enregistré le plus de surcotes est 1990 (Chaverot, 2006). C'est aussi l'année ayant eu le plus de tempêtes. Chaverot (2006) a évalué à 9,30 m (cote marine) la hauteur moyenne du pied de dune aux alentours de Boulogne-sur-Mer. Il a ensuite repéré les années à forte fréquence de niveaux marins supérieurs à cette hauteur. Il s'agit de 1979, 1981, 1983, 1988 et 1990. Il a ensuite calculé un indice d'érosion potentielle prenant en compte : l'intensité du haut niveau marin (hauteur de niveau d'eau au-dessus du pied de dune), la durée de l'évènement et la hauteur des vagues. 1988 et 1990 ressortent particulièrement en tant qu'années à potentiel érosif particulièrement élevé. Les années 1977, 1981 et 1983 le sont également, dans une moindre mesure.

Les grosses tempêtes jouent certainement un rôle dans l'accélération du rythme d'érosion. Il faut pourtant se garder d'affirmer que les conditions météorologiques sont la cause d'une situation d'érosion sur plusieurs années tant que l'on ne connaît pas la distribution de sable en provenance des bancs au large.

## II.6. Contexte hydrogéologique

Les dunes de sable quaternaire sont en continuité avec la craie (Louche, 1997). Afin de déterminer les différentes interactions possibles, il faut tout d'abord décrire les différents aquifères en présence.

#### II.6.1. L'aquifère dunaire

Le massif dunaire étendu entre la limite sud de Boutonnière de Boulonnais et la baie de Canche a une superficie de 3200 ha et bord 15 km de rivage (Duval, 1973), et il est de morphologie dite picarde (Figure II-16). Les dunes littorales anciennes et plus récentes sont séparées par une petite plaine dunaire humide.



Figure II-16. Schéma d'un profil type des dunes de morphologie picarde (Duval, 1973).

Le long du littoral, les dunes sont édifiées par le vent qui provoque le mouvement des matières sableuses situées sur l'estran. En général, la végétation, favorise la formation, l'évolution des dunes, et aide fortement à leur fixation. Cette végétation freine le vent en provoquant l'accumulation des particules. Son système racinaire permet la fixation des dunes. Dans le secteur d'étude les dunes littorales sont au contact, à l'Est, directement de la couche de craie limitée par une falaise morte. Le suivi piézométrique effectué en 1995 avec des mesures bimensuelles (Louche, 1997) a permis de démontrer que la nappe dunaire est alimentée par les précipitations efficaces. Dans le secteur situé entre la Canche et la limite Sud
de la Boutonnière du Boulonnais, la nappe de la craie et la nappe des dunes seraient en continuité hydraulique (Louche, 1997).

#### II.6.2. L'aquifère de la craie

La craie, d'âge crétacé supérieur, est un milieu à double porosité, avec une porosité de matrice et une porosité de fissure. Elle ne deviendra donc aquifère que si elle est affectée par un réseau suffisamment dense de fissures interconnectées, permettant une perméabilité de fissure relativement importante (Louche, 1997). Malgré l'hétérogénéité de la craie due à l'histoire tectonique de la région, elle est souvent considérée comme un aquifère homogène grâce à l'homogénéité de ses matériaux.

Dans le secteur d'étude, cette nappe est libre à l'est de la falaise fossile. A l'ouest, il n'existe, dans le secteur d'Hardelot, aucun suivi piézométrique. Cependant, compte tenu des données stratigraphiques, il existe des relations privilégiées entre la nappe de la dune et la nappe de la carie dans le secteur situé entre la canche et la limite sud de boutonnière du Boulonnais, puisque ces deux formations sont directement en contact.

#### A. Analyse cartographique de la piézométrie

La surface piézométrique peut être rabattue par un pompage. La carte piézométrique, véritable carte topographique de la surface des nappes, est crée par interpolation des mesures de niveaux piézométriques. En écoulement naturel, la topographie dirige la surface piézométrique d'une nappe libre en milieu poreux homogène dans ses grandes lignes (recharge dans les parties hautes, drainage vers les vallées) (Louche, 1997). Dés qu'une hétérogénéité (au sens d'élément présentant une conductivité hydraulique différente) s'interpose dans l'écoulement, celui-ci s'en trouve modifié. Cette perturbation ne peut être traduite par les cartes piézométriques que dans la mesure où le maillage est assez précis et que la densité des points d'observation permet de déceler l'anomalie.

Deux campagnes piézométriques (Louche, 1997) ont été réalisées, l'une en période de hautes-eaux (avril 1995) et l'autre en période de basses-eaux (octobre1995) :

• Carte piézométrique en période de hautes-eaux

La méthode du krigeage développé par Matheron (1965,1970) permet, grâce à une argumentation statistique solide de prendre en compte le structure spatiale de l'ensemble des données, chacun d'elles ayant été au préalable et si nécessaire modulée par une fourchette d'incertitude. Disposant d'un nombre de données piézométriques suffisant, cet outil est donc tout à fait adéquat pour obtenir une carte piézométrique plus précise. La campagne piézométrique réalisée les 20 et 21 avril 1995 sur une cinquantaine de points, répartis de manière relativement homogène, a permis d'élaborations d'une carte piézométrique de la nappe de la craie (Figure II-17) correspondant à la période de hautes-eaux.



Figure II-17. Carte piézométrique krigée de la nappe de la carie en période de hautes-eaux, avril-1995 (Louche 1995).

La cote piézométrique est comprise, dans l'ensemble du domaine, entre +2 m et +84 m. l'altitude maximale du toit de la nappe de la craie est rencontrée dans la zone NE. En ce qui concerne le sens d'écoulement de la nappe, il est dirigé globalement vers le Sud, c'est-à-dire vers la Canche. Sur cette carte piézométrique krigée, l'absence de forages à proximité de la côte ne permet pas d'avoir le tracé exact des isopièzes à cet endroit. Par contre la présence des isopièzes parallèles au trait de côte sur la carte de 1995 a été déduite par des études antérieures qui ont montré un écoulement global de la nappe vers le littoral (Mania et Phillipart, 1976).Toutefois, lors de leur campagne piézométrique, ces auteurs avaient utilisé une série de puits implantés uniquement dans les dépôts quaternaire, admettant alors l'identification d'un aquifère unique sue l'ensemble de cette zone.

L'écartement des isopièzes est directement lié, en régime d'écoulement permanent, à la transmissivité. Il semble que celle-ci diminue dans la zone située au sud de Frencq. Il existerait donc une zone beaucoup moins transmissive dans ce secteur. Cette remarque est tout à fait en accord avec les données de terrain relatives dans ce secteur (Louche, 1997).

Il n'y a pas relation entre la côte piézométrique et la position topographique de l'ouvrage (Louche, 1997). De plus l'évolution piézométrique peut différer d'un point à un autre sans relation avec l'altitude du point. L'analyse des registres piézométriques effectuée par Lopez Chicano (1992) est en accord avec ces constatations.

• Carte piézométrique en période de basses-eaux

Cette seconde campagne a été réalisée le 11 octobre 1995, sur les mêmes ouvrages que précédemment. La carte piézométrique caractérisant la nappe de la craie en période de basseseaux, Figure II-18, ne montre pas de différences notables par rapport à la précédente.



Figure II-18. Carte piézométrique krigée de la nappe de la craie en période de basses-eaux (ocobres1995)

#### (Louche, 1997)

On remarque une bonne concordance lors de la comparaison des deux cartes piézométriques avec les principaux éléments tectonique. Les analyses cartographiques faites par Louche (1997) impliquent encore que les failles exercent un rôle différent sur les écoulements souterrains, selon leur orientation. Aussi d'après ses observations, il existe un comportement hydrogéologique différent que l'on peut expliquer par la présence d'un accident séparant deux casiers hydrogéologiques selon la définition de Bracq *et al.* (1992). On aurait donc dans le cas présent un casier à plus forte perméabilité.

#### **B.** Caractéristiques hydrodynamiques

La fracturation de la craie influe directement sur les caractéristiques hydrodynamiques de la craie qui ne deviendra donc aquifère que si elle est affectée par un réseau suffisamment dense de fissures interconnectées, permettant une perméabilité de fissure relativement importante. Les valeurs de transmissivité sont non seulement liées à la structure mais également aux factures hydrographiques et géomorphologiques (Becklynck, 1981).

La craie va présenter des caractéristiques hydrogéologiques assez différentes selon la région considérée, mais aussi selon la situation topographique : plateau, thalweg actuels ou fossiles, vallées sèches ou humide, la profondeur et la disposition géologique : craie affleurant ou sous recouvrement tertiaire, zone tectonisée ou plus calme (Crampon *et al.*, 1993).

De plus, il est à noter que la transmissivité varie également avec la profondeur. Des mesures effectuées par Bertrand *et al.* (1989) ont montré que la conductivité hydraulique de la craie devient très faible à des profondeurs de l'ordre d'une cinquantaine de mètres. Le coefficient d'emmagasinement, en nappe libre, atteint 2 à 3% sous les plateaux et 6 à 9 % dans la vallée de la Canche. L'aquifère crayeux est un aquifère à double porosité, matricielle et fissurale, et à perméabilité multiples, dans lequel se juxtaposent ou se superposent un écoulement lent, mais généralisé et des écoulements rapides, très localisés (Crampon *et al.*, 1993). L'ensemble de ces considérations fait qu'il est possible de définir des zones à conductivité hydraulique différente selon la localisation géographique.

# **II.7.** Conclusion

Ce chapitre a présenté la situation géographique, géologique et géomorphologique de la zone d'étude. La coupe géologique réalisée à partir des sondages électriques (2006) a montré l'irrégularité spatiale des intrusions de l'eau salée. D'une part l'eau salée est présente au dessus de l'eau douce en raison de la marée et, d'autre part, la profondeur atteinte par l'eau salée est différente sur un axe nord-sud pour le littoral d'Hardelot-Plage. Les deux principaux aquifères dans cette zone sont l'aquifère sableux et l'aquifère crayeux. Les dunes de sable quaternaire sont en continuité avec la craie. La craie est fracturée, cette fracturation influe directement sur les caractéristiques hydrodynamiques de la craie qui ne deviendra donc aquifère que si elle est affectée par un réseau suffisamment dense de fissures interconnectées, permettant une perméabilité de fissure relativement importante.

# **Chapitre III : Application des SIG au suivi de l'évolution d'un trait de côte.** Exemple : Hardelot-plage, Saint Cécile et estuaire de la Canche (Pas-de-Calais, France).

# **III.1. Introduction**

L'objectif principal de ce chapitre s'articule, d'une part sur la théorie d'érosion côtière, et d'autre part sur le développement et la poursuite de l'analyse de l'évolution du trait de côte étendue des dunes d'Ecault (au nord d'Hardelot-plage) aux dunes de Camiers (rive nord de l'estuaire de la Canche) pour la période 1947-2005. A l'aide de la plateforme ArcGIS 9.3, nous avons calculé les changements du trait de côte à partir des photographies aériennes d'IGN. Entre 1946 et 2005, quatorze traits de côte (1946, 1947, 1955, 1963, 1971, 1976 et 1980, 1983, 1987, 1989, 1995, 1997,2000, et 2005) ont été numérisés et représentés sous forme de polylignes dans le SIG. 292 transects perpendiculaires au trait de côte ont été réalisés sous SIG pour estimer l'érosion côtière et en déduire le taux de récession.

Ce travail a été effectué en trois principales étapes ; (1) Préparation de données : Cette étape comprend la numérisation des photographies, le géoréférencement des photos ariennes et la mosaïque des images géoréférencées ; (2) Création de données constituant la digitalisation du trait de côte (14 traits de côte) et la génération de transects perpendiculaires aux traits de côte ; (3) Géotraitement (*Geoprocessing*) : dans cette étape, le géotraitement est réalisé pour mesurer les valeur de mouvement du trait de côte sur chaque transect. A l'issue de ce travail, la marge d'erreurs a pu être estimée, et les résultats sont analysés et exposés sous forme cartographique et de tables dans la plateforme ArcGIS9.3.

# III.2. Erosion côtière et SIG

L'érosion côtière constitue une préoccupation croissante dans le monde entier (Bartlett et Smith, 2005) qui est causée par des forces naturelles, telles que, courants, vagues, ondes de tempête, les vents ainsi que les développements anthropiques (Heo *et al.*, 2009). C'est un problème mondial ayant des implications économiques concernant le tourisme côtier et le développement durable. Les changements côtiers sont considérés comme un des indicateurs de l'environnement le plus important en raison de son impact direct sur le développement économique du littoral et la gestion des terres (Stokkom *et al.*, 1993). Les changements du trait de côte peuvent être utilisés comme un bon indicateur de présence de l'érosion côtière. Aussi le meilleur indicateur pour décrire l'érosion du littoral est-il le taux de récession du trait de côte (Heo *et al.*, 2009).

Le rivage est fortement dynamique et mobile dans le temps et dans l'espace en réponse aux variations des processus côtiers (Bird ,1993 ; Carter, 1988 ; 1994). La prévision de la position future du trait de côte peut être basée sur les changements côtiers qui se sont produits au cours des dernières décennies (Crowell, *et al.*, 1999). Dans le détail, selon Douglas *et al.*, (1998) et Galgano et Douglas (2000) des enregistrements de la position de rivage > 60 ans sont nécessaires pour en déduire une tendance fiable. Des photographies aériennes verticales, des images satellites sont des sources de données très utiles pour reconstruire le comportement du trait de côte à diverses échelles spatio-temporelles du long terme (>60 ans) au moyen terme (entre 10 et 60 ans) (Crowell *et al.*,1993). Les photographies aériennes verticales montrent également le type de distribution côtière et l'évolution des dunes (Dolan *et al.*,1980 ; Fisher et Overton, 1994 ; Forbes *et al.*, 2004). Pendant les deux dernières décennies, les levés aériens par laser LIDAR ont été considérablement développés et employés dans des études de morphologie côtière (Robertson *et al.*, 2007 ;Woolard et Colby, 2002). Cette technique de télédétection, habituellement effectuée par un petit avion, permet de réaliser des levés détaillés 3D, mais son application est limitée par des coûts plutôt élevés.

En outre, les photographies aériennes verticales, les images satellites(les données satellites récentes à très hautes résolution qui concurrence les photographies aérienne en termes de résolution spatiale) et les cartes fournissent une information convenable pour la cartographie et la classification environnementale, l'examen des effets tempêtes, les caractéristiques des vagues , l'occupation du sol, etc. (Anfuso et Martínez del Pozo, 2005; Crowell *et al.*, 1991). Des cartes de vulnérabilité ont été obtenues pour plusieurs secteurs côtiers dans le monde par l'utilisation des (SIG), de l'analyse multivariée assistée par ordinateur et des modèles numériques (Cooper et McLaughlin, 1998, McLaughlin *et al.*, 2002).

Peyrat *et al.* (2009) ont identifié la dynamique de la végétation dans Leba Bar (en Pologne) pendant 74 ans par une comparaison cartométrique en utilisant le SIG. Pour mesurer le taux de dynamique de végétation, deux photographies aériennes datant de 1932 et de 2006 ont été numérisées et analysées dans un SIG pour produire des cartes numériques de la végétation. Des informations sur la diminution, l'augmentation et la stabilité des types de végétation de ce secteur sont discutées.

Aussi une étude a-t-elle été faite par Aanfuso et Martinez Del Pozo (2009) pour évaluer l'érosion côtière le long d'un secteur de 90 kilomètres au sud de la Sicile (Italie) ; cette étude a inclus deux plages qui ont subi une érosion ou un engraissement et différents niveaux d'activités humaines. Deux photos aériennes ont été utilisées pour reconstruire l'évolution côtière entre 1977 et 1999. Les évaluations étaient divisées en quatre catégories s'étendant de la grande érosion à l'accrétion. Plusieurs sources ont été examinées pour évaluer les activités humaines et l'utilisation de la terre. Ce dernier aspect a été représenté en cartes et divisé en quatre catégories, s'étendant de l'utilisation de la terre la plus intensive à la prairie (Aanfuso et Martinez Del Pozo, 2009). Par la suite la vulnérabilité d'érosion côtière a été évaluée en combinant les catégories d'utilisation de la terre avec le comportement enregistré du trait de côte. Une concordance très bonne entre la vulnérabilité côtière prévue et la tendance côtière avait été observée depuis quelques années.

#### III.2.1. Trait de côte

#### A. Définition

La limite entre la mer et la terre représente généralement le trait de côte. Selon Guilcher (1951) ; et Roubertou et Bonneval (1965), le trait de côte correspond à la ligne des plus hautes mers par temps calme (Figure III-1). Par contre nous ne pouvons pas facilement localiser ou positionner le trait de côte, celui-ci se déplace avec l'état de la mer et avec la marée (Baulig, 1956). Le choix de la ligne de référence d'un littoral est une considération primordiale dans la cartographie du littoral (Parker, 2001). Cette référence du rivage (indicateur du littoral) doit être identifiée pour déterminer l'érosion côtière. Selon Leatherman (2003), il est important que les indicateurs soient facilement identifiables sur le terrain et sur la photographie aérienne. Par ailleurs, selon Crowell *et al.*, (2005), la ligne de référence de l'érosion est généralement le bord supérieur d'une falaise, le rebord de la dune côtière, la ligne de végétation, ou une crête de plage. Si aucune de ces lignes de référence n'est pas présente, la ligne des plus hautes eaux (HWL : *High Water Line*) est souvent utilisée.





Le pied d'avant-dunes, qui est aussi une ligne de référence dans l'étude de l'érosion du littoral, n'est pas tant une ligne au sens strict, qu'une bande étroite, de 2-3 m de largeur (Guillén *et al.*, 1999). En revanche, sur une photographie, il n'est pas facile de distinguer le pied de l'avant-dune lorsque des dunes embryonnaires sont présentes (Battiau-Queney *et al.*, 2003). L'interprétation doit être vérifiée sur le terrain, mais cela n'est possible que pour les photos les plus récentes ou à partir de l'examen stéréoscopique des photos aériennes verticales.

Robin (2002b) a donné quelques définitions des lignes de référence les plus utilisées matérialisant le trait de côte:

- Définition IFREMER (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer) du trait de côte : Cette ligne correspond à la ligne des plus hautes eaux, c'est à dire la limite supérieure des eaux marines pendant les hautes marées de vive eau. Cette limite est variable dans le temps en fonction des conditions météorologiques.
- Ligne de rivage instantanée : Cette ligne convient à la limite de surface maritime déformée par la pente de l'estran et la vague de marée à l'instant actuelle enregistrant. Celle-ci est principalement employée par comparaison de plusieurs lignes durant une période ne dépassant pas quelques semaines.
- Limite inférieure de la végétation sur l'estran : la limite entre le haut de plage et l'arrière plage correspond à la ligne de végétation. Cette ligne est très utilisée en géomorphologie du littoral.

#### **B.** Détection

L'interprétation visuelle, soit directement sur le terrain, soit indirectement sur les photographies aériennes, est la technique de détection la plus utilisée appliquée aux lignes de référence visibles (Faye, 2010; Boak et Turner, 2005). Les lignes de référence sont détectées par des variations de couleur ou de niveaux de gris donc un bon contraste sera nécessaire pour tracer les traits de côte. Par contre une vision stéréoscopique est indispensable pour détecter la ligne de référence concernant le pied de dune ou de falaise. L'extraction de la ligne de référence est possible soit avec un digitaliseur sur une table à digitaliser soit à l'écran avec une souris sur fond d'images grâce à des logiciels spécialisés (SIG, chaine de traitement d'image), ou par photo-interprétation assistée par ordinateur (Faye, 2010).

# III.2.2. Évolution d'un trait de côte

Les études de l'évolution côtière examinent et explorent les raisons pour lesquelles la position et la nature du trait de côte se modifient d'un moment à l'autre. En général, il a été constaté que de nombreux de littoraux mondiaux sont sous la menace de l'érosion (Williams *et al.*, 1990) et que le changement environnemental est la conséquence de l'occupation humaine des littoraux.

Il faut noter que le contexte dynamique intervient dans la position du trait de côte. Celui qui est levé ici, pour chaque photo, correspond à un instant t. Les agents (mer, vent, homme, etc.) ont vite fait de le modifier. L'érosion des plages est un processus physique complexe (Galgano et Douglas, 2000). La détermination de la tendance de fond est difficile parce que la largeur de la plage varie selon l'échelle de temps, instantanée, quotidienne, saisonnière, décennale ou géologique, selon les marées, l'énergie de vagues, l'élévation du niveau de la mer et des facteurs humains.

La surface des mers et des océans se modifie toujours en raison des mouvements des marées, des vagues, des courants, des variations de la température et de pression et de la salinité des eaux superficielles. En général, le niveau moyen de la mer est déterminé en calculant la moyenne altimétrique des hauteurs de la marée pendant une certaine période (Paskoff, 2001) et il est représenté par un repère référentiel ayant la valeur zéro. En France, par exemple, ce niveau était déterminé dans l'Anse Calvo, près de Marseille (Figure III-2) et correspond au 0 NGF (Nivellement Général de la France).



Figure III-2. Marégraphe de Marseille (Paskoff, 2001).

#### • Effet de la température

L'élévation de la température des eaux superficielles des océans provoque la variation du volume des eaux océaniques, donc le niveau marin. Par exemple, une augmentation du niveau marin de l'ordre de 20 cm serait provoquée par un réchauffement de 1° C d'une tranche d'eau superficielle de 200m d'épaisseur (Paskoff, 2001).

• Effet de l'instabilité des continents

Ces effets sont causés par des mouvements crustaux de nature différents. Un tremblement de terre de forte magnitude provoquerait un mouvement des plaques estimé d'une dizaine de millimètres par an à l'échelle de la centaine de milliers d'années. Par exemple, le grand séisme qui a affecté le sud-ouest de la Crète et a touché l'ensemble de la Méditerranée orientale le21 juillet de l'an 365 ap.J.-C aurait causé un soulèvement de 9 m de la côte (Pirazzoli, 1996).

# III.2.3. Sources de données nécessaires pour l'étude de la cinématique d'un trait de côte

Les principales sources de données servant à réaliser une étude pour mesurer l'évolution du trait de côte sont les suivantes (Elizabeth *et al.*, 2005 ; Faye, 2010):

- 1. Les cartes topographiques.
- 2. Les cartes marines.
- 3. Les plans cadastraux.
- 4. Les photographies aériennes.
- 5. Les images satellitaires.
- 6. Les mesures de terrain ;
- 7. Les levés GPS et DGPS.
- 8. Le suivi de repères fixes.

Ces données sont utilisées directement ou subissent des corrections géométriques avant leur exploitation (Dolan *et al.*, 1979 ; Anfuso et Martínez del Pozo, 2005; Faye e*t al.*, 2008).

# III.2.4. Manipulation de données disponibles

# A. Méthodologie de travail typique dans la photogrammétrie

Avant de commencer le travail pratique, l'illustration suivante (Figure III-3) va montrer la méthodologie de travail pour des applications photogrammétriques. Commençant par la capture des images, il faut alors calculer les paramètres d'orientation de toutes les images que nous voulons utiliser. Après cela, nous pouvons mesurer les coordonnées, créer plusieurs types de produits, comme des modèles numériques de surface, pour enfin utiliser les résultats dans un SIG.



Figure III-3. Procédure typique de traitement photogramétrique (Linder, 2009).

#### **B.** Numérisation des données

Un grand nombre de scanners existent sur le marché avec des différences dans la construction, la résolution géométrique et radiométrique, et la taille de format (Linder, 2009). Pour l'utilisation dans la photogrammétrie, certaines exigences de base doivent être respectées: Format A3, l'unité de transparence (pour matériau de film), une haute résolution géométrique et radiométrique, et la précision.

Le format A3 est nécessaire car les photographies doivent être scannées en totalité. La plupart des photos aériennes a aujourd'hui un format 23 \* 23 cm (9 \* 9 ") qui dépasse le format A4 (Linder, 2009). D'autre part, les informations contenues dans la bordure noire des films photographiques contiennent des informations supplémentaires comme l'altimétrie et l'heure d'acquisition, compteur de film qui ne doivent pas être numérisées pour épargner la capacité de stockage. Ces données sont pourtant très utiles pour les traitements en particulier pour la correction des effets liés à l'horaire d'acquisition des données (ombres portées...).

En photogrammétrie à faible coût, les scanners à plat (DTP) sont souvent utilisés avec une précision géométrique d'environ 50µm (Linder, 2009). Pour une meilleure compréhension, trois aspects importants de l'influence doivent être mentionnés:

- l'exactitude le long du tableau du capteur photographique Charge Coupled Device (CCD), sous le pont mobile sous la plaque de verre), la constance de la taille, la distance et la disposition linéaire des éléments de CCD.
- l'exactitude en travers du tableau de CCD (dans la direction mobile du pont): la constance de la largeur de pas et la linéarité du mouvement.
- 3. L'angle entre le pont et la direction mobile: déviations d'un rectangle (écarts par rapport à un rectangle).

#### - Résolution géométrique

La résolution géométrique d'un scanner est donnée dans les unités « points par pouce » [dpi, dots per inch] ou micromètres [ $\mu$ m] et reflète la précision maximum à atteindre. Pour les investigations sur des photogrammétries simples, une valeur du 300 ou 600 dpi peut être employée (Linder, 2009). Une résolution de scanner de 600 dpi (42 $\mu$ m) est à peu près l'exactitude géométrique de la plupart des modules de scanner à plat (environ 50 $\mu$ m). La conversion de [dpi] en [ $\mu$ m] est basée sur la formule :

Taille de Pixel en [µm]=25400/ résolution en [dpi]

Résolution en [dpi] =25400/ taille de Pixel en [ $\mu$ m]

Pour la résolution géométrique du scanner, l'idée est de suivre toujours la règle « Aussi haut selon les besoins, aussi bas que possible » (Linder, 2009). L'exactitude possible maximum dans z (altitude) dépend de la résolution de scanner et des autres facteurs. La précision de z peut atteindre une valeur de 0.1 ‰ de hauteur de vol au-dessus du terrain, utilisant un traceur analytique et des photos avec un recouvrement d'extrémité de 60%.

#### - Résolution radiométrique

Elle permet de restituer l'étalement de la variation de la réflectivité observée sur une image ; en d'autres termes la profondeur accessible en niveau de gris. Les résolutions radiométriques les plus fortes permettent une meilleure définition des contrastes mais elles ne permettent pas de compenser la qualité de contraste existant dans l'image originale. Un scanner photogramétrique doit avoir la possibilité de scanner des photos à niveau de gris (panchromatique) avec 8 bits ce qui signifie 2<sup>8</sup> classes disponibles pour l'échantillonnage soit 256 niveaux de gris. En cas de photos en couleur, normalement nous avons besoin d'une résolution radiométrique de 24 bits, ce qui signifie 8 bits ou 256 niveaux pour chacune des trois couleurs de base (rouge, vert, bleu). La plupart des outils de visualisation numériques

(écrans) sont calibrés pour afficher trois canaux de couleurs à 8bits de profondeur radiométrique ce qui rend inutile le recours à une meilleur résolution radiométrique pour la numérisation des documents couleurs. De plus, les 2<sup>24</sup> valeurs d'affichage disponibles (soit plus de 16,77 millions de possibilités) sont largement supérieures au nombre de couleurs identifiables et interprétables par l'œil humain.

Les images en couleur peuvent être donc être scannées en trois canaux de 8 bits de profondeur et stockées sous forme d'images grises, soit sous forme de composition colorée de 24 bits de profondeur pouvant par la suite être à nouveau séparées en trois canaux de 8 bits. Une autre possibilité est de scanner en 24 bits et de calculer une image mixte monochrome (dite panchromatique) en utilisant la formule suivante (Équation 6) (Linder, 2009) :

Équation 6

#### Valeur grise = 0.3 \* rouge + 0.11 \* vert + 0.59 \* bleu

#### C. Géoréférencement des données images

La correction des photographies aériennes est une étape préalable et nécessaire avant de commencer le repérage du trait de côte. Il s'agit de démarches effectuées sur des photos aériennes, des images satellites, des cartes, etc., avant le traitement (photo-interprétation, intégration dans un SIG, etc.). Ces prétraitements sont des corrections géométriques que l'on appelle redressement et géoréférencement.

Le redressement représente l'opération de rectification d'une image oblique afin d'obtenir une image verticale corrigée de toutes ou de la plupart des déformations inhérentes à la prise de vue (angle, mouvement de plateforme type roulis, etc.) et aux distorsions produites par l'environnement (variation d'altitude au sol, courbure de la Terre dans le cas des images à petites échelles, etc.) (Sanz *et al.*, 2008 ; Barge et Saligney, 2003 ; Casson *et al.*, 2003). Cependant le géoréférencement sert à appliquer un système de coordonnées à une image afin de la mettre à l'échelle spatiale réelle (Sanz *et al.*, 2008 ; Barge et Saligney, 2003 ; Topan et Kutoglu, 2009).

Les logiciels utilisés pour faire le redressement ou le géoréférencement sont nombreux, certains d'entre eux ne feront que le géoréférencement, par exemple : l'extension GéorefImage pour ArcView ou pour MapInfo, d'autres ne feront que le redressement, et les derniers feront les deux soit simultanément comme ArcGIS ou ER Mapper, soit en deux temps distincts comme AirPhoto. Pourtant les étapes suivies pour le redressement ou le géoréférencement sont identiques, la seule différence vient des modèles de déformation utilisés et intégrés dans les logiciels (Sanz *et al.*, 2008 ; Barge et Saligney, 2003).

#### - Géoréférencement des photographies aériennes :

Jusqu'à présent, les photographies aériennes ont été fournies sans aucune information concernant leur localisation (Massasati, 2002). La seule façon de connaître cette localisation est le numéro d'index. L'orthophotographie est le seul moyen d'obtenir des photographies aériennes géoréférencées en projection cartographique particulière comme l'UTM (*Universal Transverse Mercator*). Les orthophotographies sont planimétriques par leur conception, elles représentent les mesures vraies dans une échelle donnée standard. Historiquement, la production d'orthophotographies a nécessité un équipement spécial non accessible au public. Aujourd'hui, avec l'aide des technologies informatiques, les données numériques géoréférencées peuvent être transformées à partir des cartes numérisées de l'IGN (ou son équivalent dans d'autres pays que la France) ou en utilisant un positionnement GPS. Grâce au SIG et à la télédétection, le géoréférencement d'une photographie aérienne devient plus facile (Greve, 1996).

Les erreurs systématiques d'une photographie aérienne sont dues à cinq raisons principales: la défaillance de croisement des axes de repères au point principal, la distorsion de lentille, la distorsion atmosphérique, la courbure de la terre, et la contraction ou l'expansion des matériaux photographiques (Moffitt et Mikhail 1980; Wolf 1983). Le déplacement d'image que cause l'éloignement au-dessus des objets au centre de la photo n'est pas une erreur, mais il peut en causer une si elle n'est pas correctement interprétée (Greve, 1996). Lors d'une tentative pour géoréférencer une photo aérienne, les erreurs de pointage par les utilisateurs doivent également être considérées. En outre, les outils de mesure de localisation comme le GPS, avec ses propres limites, engendrent beaucoup plus d'erreurs possibles (Greve, 1996). Les procédures statistiques sont utilisées pour analyser la nature de ces erreurs et donner une meilleure solution. Des techniques comme l'analyse de régression ont été utilisées pour trouver la meilleure solution (Slama *et al.*, 1980). La compréhension de ces procédures essentielles exige une compréhension de la nature des techniques, de la photographie aérienne et de l'analyse statistique.

#### - Méthodes de Géoréférencement

Il ya deux méthodes communes pour effectuer le géoréférencement : la méthode de fonctions polynomiales et la méthode de la triangulation.

<u>Méthode de fonctions polynomiales</u>: Cette méthode est appelée aussi la méthode polynomiale par prise de points d'appui. Elle consiste à retrouver pour tout point d'une image sa nouvelle position dans un système de référence (Liu *et al.*, 2011). La

succession d'étapes pour faire le géoréférencement est (Masson, 2008 ;Sanz *et al.*, 2008 ; Barge et Saligney, 2003):

- Repérer les points de calage à l'image à géoréférencer et la source de référence. Cette dernière peut être une carte, un cadastre, des points GPS, ou une autre image déjà géoréférencée, etc. Ces points doivent être distribués régulièrement sur l'image à géoréférencer avec une densité suffisante pour pouvoir composer la non linéarité du relief pouvant influencer la fiabilité du positionnement final des pixels.
- 2. Calculer la relation entre les points d'amer, et appliquer le polynôme de transformation. Il existe trois ordres de ce polynôme : un polynôme du 1<sup>er</sup> ordre (simple et linaire), il concerne les translations et les rotations, et nécessite au moins 3 ou 4 points de calage. Un polynôme du 2<sup>ème</sup> ordre concerne les modifications géométriques (redressement d'images), et il nécessite au moins 6 ou 7 points de calage. Un polynôme du 3<sup>ème</sup> ordre concerne les modifications géométriques (Redressement d'images) avec dénivelé important. 10 ou 15points de calage sont nécessaires, et de plus un MNT est utilisé dans certains logiciels (Sanz *et al.*, 2008 ; Barge et Saligney, 2003).
- 3. Interpréter l'Erreur Quadratique Moyenne (EQM) : cette erreur, appelée aussi *Root Mean Square (RMS)*, est calculée par le logiciel lui-même et permet de juger de la qualité de la correction. L'écart moyen entre les coordonnées réelles ou souhaitées d'un point d'amer et ses coordonnées calculées par le polynôme de transformation représente la RMS totale (Sanz *et al.*, 2008 ; Barge et Saligney, 2003). Celle-ci est calculée à partir de différentes RMS (chaque point d'amer ayant sa propre RMS correspondante à la moyenne des erreurs résiduelles). La RMS s'exprime en unités de l'unité de RMS compatible avec l'unité de référence. La RMS totale décrit l'homogénéité de la transformation entre les points d'amer distribués sur l'image.

<u>Méthode de triangulation :</u> Cette méthode utilise le modèle de triangulation de Delaunay pour créer un maillage de triangles à partir des points de calage (Speckmann et Snoeyink, 2001 ; Ali et Mehrabian, 2009). Ensuite une équation linéaire ou polynomiale est appliquée pour chaque triangle. Il s'agit d'une transformation locale car l'image est divisée en une série de régions (triangles), chacune avec ses propres équations de transformation. Seules les zones délimitées par les points d'amer peuvent être corrigées (rectifiées) par la méthode de triangulation. Les régions qui ne relèvent pas du GCP (*Ground Control Points*) peuvent être rectifiées par la méthode des polynômes, si la rectification totale de l'image est nécessaire. Cette méthode a besoin de points d'amer beaucoup plus nombreux

#### **D.** Mosaïque

Les photographies aériennes sont largement utilisées dans l'arpentage, les SIG et d'autres applications (cadastres, orthophotoplans, cartographie...). L'analyse d'une grande surface nécessite la création d'une mosaïque d'images, qui est composée de plusieurs photographies aériennes (Kasser et Egels, 2002 ; Linder, 2009). Dans une situation idéale, une mosaïque parfaite peut être générée à l'aide d'une série de transformations rigides sur les images sources. Dans la pratique, une distorsion géométrique et des différences radiométriques interfèrent avec le processus de la mosaïque (Rollet, 2005). La mosaïque d'ensemble de photographies aériennes géoréférencées et disposées est indispensable pour avoir une image continue d'une partie de la surface terrestre et il faut aussi qu'elle présente une surface uniforme pour couvrir toute la zone d'intérêt géographique (Kasser et Egels, 2002).

Pour une mosaïque de deux images, la plupart des systèmes définit une ligne de couture. La ligne de couture traverse la zone de superposition entre les points d'attache, qui sont des points partagés et présentant les même caractéristiques dans les deux images à superposer et mosaïquer. Le long de cette ligne, les images sont adaptées au niveau local ainsi que par leur adéquation géométrique et radiométrique (Kasser et Egels, 2002) (égalisation d'histogramme des valeurs de pixels pour un contact progressif entre les deux images).

Les logiciels utilisés pour faire la mosaïque des photographies aériennes sont nombreux dont ArcGIS, ENVI, ERDAS, etc.

#### III.2.5. Méthodes pour mesurer l'évolution d'un trait de côte

Beaucoup de scientifiques ont étudié l'érosion côtière (Stafford et Langfelder, 1971; Dolan et Vincent, 1972; Dolan *et al.*, 1979; Zhang *et al.*, 2004). Aussi plusieurs méthodes ont-elles été déjà proposées afin de mesurer la récession côtière dont (i) l'approche par la ligne de base aussi appelée approche des transects (Dolan *et al*, 1978); (ii) l'approche par segmentation dynamique (Liu, 1998; Li *et al.*, 2001; Srivastava *et al.*, 2005); (iii) l'approche surfacique (Ali, 2003) et (iv) l'approche par tampon et l'estimation des moindres carrés non-linéaires (Heo *et al.*, 2009).

#### A. Approche par la ligne de base:

Selon Dolan *et al.* (1978), si la cartographie continue d'une côte à deux périodes différentes est possible, la mesure du recul peut être déterminée par la mesure des transects orthogonaux à partir d'une ligne de base vers la direction qui est choisie pour être pratiquement parallèle à la côte. Donc l'ampleur du recul du trait de côte est représentée par la valeur moyenne des écarts mesurés sur les lignes de transects. Cette méthode, également connue comme la méthode des transects, est la plus populaire et a été utilisée dans de nombreux études sur le recul du trait de côte (Hardaway *et al.*, 2001; Scarpace *et al.*, 2000 ; Stewart, 1994).

A partir des données géoréférencées, les traits de côtes sont numérisés et superposés, les évolutions sont évaluées suivant des transects établis à intervalles réguliers. La création des transects et les mesures d'évolution peuvent être effectuées soit automatiquement par des programmes spéciaux comme le DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*, Thieler et Danforth, 1994b); *BeachTools* (Hoeke *et al.*, 2001) ou l'ASAP (*Automated Shoreline Analysis Program*, Byrnes et Hiland, 1994), soit par la mise en œuvre d'une série de traitements issus des outils et des modules d'ArcGIS ou de tout autre SIG.

#### B. Approche par la segmentation dynamique

Li *et al.* (2001), Liu (1998) et ; Srivastava *et al.*, (2005) ont présenté des méthodes de la modélisation du changement littoral et de l'analyse dans le cadre d'un SIG en utilisant le concept de la segmentation dynamique. Ce concept était initialement fondé sur un modèle de données dans ArcInfo pour les éléments linéaires (trait de côte), où chaque tronçon le long du trait de côte pourrait être attribué précisément. De même, les points correspondants sur deux traits de côte peuvent être déterminés en fonction de la proportion de l'ensemble du littoral, et la mesure du recul littoral est donc représentée par la moyenne des distances mesurées entre les points correspondants sur les deux traits de côte.

#### C. Approche basée sur la zone d'érosion

Ali (2003) a suggéré une approche basée sur la zone d'érosion pour modéliser les changements littoraux. Cette méthode est très similaire à la méthode de segmentation dynamique, la différence entre les deux méthodes est que cette dernière calcule la zone d'érosion entre deux traits de côte qui est ensuite normalisée par la valeur moyenne des longueurs des deux traits de côte. Cette valeur peut être considérée comme l'une des solutions de mesure du recul du littoral.

# D. Approche par tampon et l'estimation des moindres carrés nonlinéaires

Cette méthode proposée par Heo *et al.* (2009) intègre deux valeurs physiquement significatives, l'ampleur et la variabilité du recul de la côte, en fonction de la moyenne et l'écart-type des transects orthogonaux au littoral, respectivement. La mesure des transects orthogonaux et l'estimation de la moyenne et l'écart-type de ces transects sont calculées en utilisant respectivement le tampon et l'estimation des moindres carrés non-linéaires.

# III.2.6. Estimation des erreurs associées à la délimitation d'un trait de côte

Le redressement des images aériennes et de l'automatisation des mesures engendrent un certain nombre d'erreurs liées à la qualité des données utilisées, au géoréférencement des images, au repérage du trait de côte et à la variation à court terme de la position de la ligne de référence. Dans le cadre de synthèses diachroniques, tous ces éléments engendrent des décalages supplémentaires sur les photographies redressées. En conséquence, ces erreurs doivent être évaluées avant de tirer des conclusions sur l'évolution du trait de côte (Faye *et al.*, 2008 ; Crowell *et al.*, 1991 ; Thieler et Danforth, 1994a ; Durand,1998; 2000 ; Gaillot et Chaverot, 2001 ; Robin, 2002b).

En fait, la rectification des photographies permet de réduire notamment les risques d'erreur, par contre elle ne les supprime pas totalement. C'est pourquoi l'estimation des erreurs liées au géoréférencement et à la délinéation du trait de côte est indispensable pour qu'elles soient prises en compte lors de l'interprétation des résultats et de leur représentation graphique.

Nous citons ici les erreurs possibles rencontrées dans l'étude de la cinématique d'un littoral. Ces erreurs sont liées à plusieurs sources dont le processus de correction des photographies, les mesures intervenues sur les images corrigées, la qualité des données (résolution des photos), etc.

# A. Erreurs liées à l'acquisation des GCP en utilisant un GPS

Le GPS permet de relever les coordonnées en latitude/longitude des amers choisis au préalable sur les photographies mais avec une incertitude qui est déterminée par la précision du GPS utilisé. L'erreur liée à la collecte de donnée à l'aide de GPS dépend tout d'abord des spécifications techniques de l'antenne de reception, c'est-à-dire la précision du GPS donnée

par le fabriquant . la précision de la localisation dépend aussi du nombre et de la position des satellites disponibles au moment de l'enregistrement, de l'acquisition du signal et de la présence d'obstacles (arbres, bâtiment, topographie...) aux alentours du capteur GPS susceptibles de perturber la trajectoire et ou la reception du signal (Janeau *et al.*, 2004 ; Arnold et Zandbergen, 2011).

La minimisation de cette erreur est possible en collectant des données à l'aide du GPS en présence d'au moins dix satellites et lorsque les GCP sélectionnés sont préférentiellement localisés dans des zones découvertes (Faye *et al.*, 2008).

#### B. Erreurs liées à la précsion du document de référence

Cette erreur est liée à l'imprécision du document de référence. L'utilisation d'une carte au 1/25000 dans le géoréférencement des photographies aériennes est une source d'erreur en raison de la difficulté de déterminer avec exactitude sur la carte la position réelle des GCP (Durand, 1998). Ce risque d'erreur a été jadis estimé à  $\pm 10$  mètres par rapport à la réalité (Dolan *et al.*, 1980; Crowell *et al.*, 1991). Par contre, l'utilisation d'orthophotographies pour redresser les images minimise l'erreur qui y est liée et celle-ci dépend donc de la résolution de l'orthophotographie.

# C. Erreur liée au repérage des points de contrôle sur les photographies

Il s'agit de la définition des objets contenus dans l'image c'est-à-dire la précision géométrique de délimitation de différentes surfaces au sol. Tout objet ayant une surface inférieur à la résolution spatiale de l'image sera fusionné avec son contexte environnemental (Kasser et Egels, 2002). Plus le nombre de dpi est élevé plus le contraste de l'image est claire et important. De ce fait la résolution des photos aériennes scannées affecte le repérage des points d'amer sur les photographies et participe de façon significative à la valeur de l'erreur. Une résolution image élevée aide à distinguer précisément la localisation d'un point d'amer. L'erreur générée dans ce cas concerne autant la résolution de l'image scannée que la résolution du document de référence.

# D. Erreur liée au calcul d'un modèle polynômial RMS

Le calcul des modèles polynomiaux est automatiquement exécuté par le logiciel utilisé dans la rectification des photographies, donc, les erreurs résiduelles pour chaque amer sont évaluées par le logiciel lui-même. Elle doit rester extrêmement faible et ne pas dépasser les 0,2 pixel (Durand, 1998) afin de garantir une bonne superposition (co-registration) des séries chronologiques. L'erreur RMS augmente en n'utilisant pas une résolution numérique équivalente à la résolution analogique du film photographique (Thieler et Hapke, 2005)

# E. Erreur liée à la digitalisation du trait de côte

Le trait de côte n'est pas toujours précisément identifiable sur certaines photographies ou dans certains emplacements sur les photos lorsqu'elles ne sont pas de très bonne qualité. Dans ce cas il y aura une hésitation pour repérer précisément le trait de côte. Cette hésitation dépend de la résolution spatiale initiale des photographies, de l'état de la végétation (plus repérable en été qu'à la fin de l'hiver), de la morphologie détaillée du haut de plage et du contraste de la photographie.

# F. Erreurs liées aux variations du niveau des pleines mers

Les études fondées sur la photo-interprétation de la ligne des pleines mers exigent d'utiliser des photos prises aux mêmes périodes et aussi sous les mêmes conditions météorologiques (Stafford et Langfelder, 1971), de façon à minimiser l'influence des fluctuations du niveau des pleines mers. Il est donc nécessaire d'évaluer l'écart entre les niveaux de pleines mers maximales et minimales (Faye *et al.*, 2008) à partir de la formule suivante (Équation 7, Thomas et Diaw, 1997):

Équation 7

$$\Delta d = h/tan(\theta)$$

Où  $(\theta)$  est la pente de la plage et h est la hauteur d'eau soit la différence entre les niveaux maximum et minimum de la mer.

# III.2.7. Méthodes statistiques pour évaluer l'évolution du trait de côte

Dolan *et al.* (1991) et Genz *et al.* (2007) ont présenté des méthodes statistiques pour analyser l'évolution du linéaire côtier. Deux méthodes sont utilisées :(1) la méthode des points extrêmes (EPR, *End point rates*); (2) la méthode de la régression linéaire simple. Celles-ci utilisent les moyennes ou les régressions pour indiquer au mieux les tendances évolutives d'un littoral.

# A. Méthode des points extrêmes (*End-point rates*)

La méthode des points extrêmes utilise la position la plus ancienne et la plus récente de chaque ligne de référence (Dolan *et al.*, 1991) pour évaluer l'évolution côtière. La distance entre ces deux positions, le long de chaque transect, est divisée par le temps écoulé (nombre

d'années) pour obtenir la vitesse d'évolution au niveau de ce point. Par ailleurs cet indice EPR est utilisé pour évaluer l'évolution entre l'emplacement de deux traits de côte successifs. Les avantages de cette technique incluent la simplicité d'application, et deux traits de côte suffisent pour obtenir le taux d'évolution. Un inconvénient majeur est que la position de l'un ou des deux des traits de côte peuvent être aberrants, et ainsi le taux de changement peut être trompeur si on l'utilise pour déterminer la position future du rivage. En outre, des données entre des points d'extrémité ne sont pas utilisées et donc des informations utiles sont potentiellement ignorées (Crowell *et al.*, 2005).

#### B. Méthode de la régression linéaire (linear regression : LR)

Cette méthode utilise toutes les données entre les deux traits de côte extrêmes sur l'ensemble de la période d'étude pour modéliser la tendance évolutive du littoral. En fait au niveau de chaque transect, les mesures de distances entre toutes les positions successives de la ligne de référence sont utilisées pour calculer la droite de régression ajustée aux différents emplacements de la ligne de référence par les moindres carrés, donc le taux d'évolution correspond à la pente de la droite de régression. La régression linéaire est la méthode la plus répandue et considérée comme la meilleure méthode pour estimer les tendances évolutives du littoral sur le long terme (Dolan *et al.*, 1991; Fenster *et al.*, 1993).

# III.3. Application des SIG au suivi de l'évolution du trait de côte d'Hardelot-Plage, Saint Cécile-Plage et de l'estuaire de la Canche

L'étude concerne les villes d'Hardelot-Plage et Sainte Cécile-Plage, situées dans la région Nord-Pas-de-Calais, au nord de la France. La longueur de côte considérée est d'environ 14 km.

#### III.3.1. Sources de données du littoral

Les principales sources de données utilisées dans la production des cartes mobilité du littoral sont les cartes topographiques, les photographies aériennes et les relevés GPS (Crowell *et al.*, 2005). Dans cette étude nous avons utilisé des photographies issues de plusieurs missions aériennes. La plus ancienne date de 1946 et la plus récente de 2005. Le travail a été effectué sur quatorze missions différentes: 1946, 1947, 1955, 1963, 1971, 1976 et 1980, 1983, 1987, 1989, 1995, 1997,2000, et 2005 (Tableau III-1). Les données proviennent exclusivement de l'IGN (Institut Géographique National) sauf celles de la mission 2005 qui viennent de PPIGE (Plateforme Publique de l'Information GEographique pour la région Nord–Pas-de-Calais).

Année	Référence	N°	prise-le	format	Echelle	Résolution
		Clichés		(mm x mm)		(dpi)
1946	1946_CDP 112_P_10000	2	1946-04-11	230x170	1/10000	800
1946	1946_CDP 112_P_10000	1	1946-04-11	230x170	1/10000	800
1947	1947-52 F 2104-2304/250 P	101	1947-10-05	170x120	1/25000	1500
1947	1947-52 F 2104-2304/250 P	2	1947-10-04	170x120	1/25000	1500
1947	1947 F 2105-2305/250 P	325	1947-10-04	170x120	1/25000	1500
1947	1947 F 2105-2305/250 P	223	1947-10-04	170x120	1/25000	1500
1955	1955 F 2104-2304/250 P	116	1955-04-25	180x180	1/25000	1500
1955	1955 F 2104-2304/250 P	41	1955-04-25	180x180	1/25000	1500
1955	1955 F 2104-2304/250 P	39	1955-04-25	180x180	1/25000	1500
1955	1955 F 2105-2305/250 P	176	1955-04-22	180x180	1/25000	1500
1955	1955 F 2105-2305/250 P	119	1955-04-22	180x180	1/25000	1500
1963	1963 F 2104-2204/250 P	76	1963-05-31	180x180	1/25000	1500
1963	1963 F 2104-2204/250 P	28	1963-05-31	180x180	1/25000	1500
1963	1963 F 2104-2204/250 P	25	1963-05-31	180x180	1/25000	1500
1963	1963 F 2105-2205/250 P	135	1963-03-01	180x180	1/25000	1500
1971	1971 FR 2113/250 P	1051	1971-07-30	230x230	1/25000	1500
1971	1971 FR 2113/250 P	1010	1971-07-30	230x230	1/25000	1500

Ecole polytechnique universitaire de Lille 1

Année	Référence	N°	prise-le	format	Echelle	Résolution
		Clichés		(mm x mm)		(dpi)
1971	1971 FR 2113/250 P	1008	1971-07-30	230x230	1/25000	1500
1976	1976 FR 2794/145 P	216	1976-05-24	230x230	1/14500	800
1976	1976 FR 2794/145 P	209	1976-05-24	230x230	1/14500	800
1976	1976 FR 2794/145 P	191	1976-05-24	230x230	1/14500	800
1976	1976 FR 2794/145 P	160	1976-05-24	230x230	1/14500	800
1976	1976 FR 2794/145 P	154	1976-05-24	230x230	1/14500	800
1976	1976 FR 2794/145 P	135	1976-05-24	230x230	1/14500	800
1980	1979-80 F 2104-2304/300 P	58	1980-05-12	230x230	1/30000	1500
1980	1979-80 F 2104-2304/300 P	54	1980-05-12	230x230	1/30000	1500
1980	1979-80 F 2105-2405/300 P	162	1980-09-03	230x230	1/30000	1500
1983	1983 IFN 59-62/200 P	628	1983-07-21	230x230	1/20000	1000
1983	1983 IFN 59-62/200 P	631	1983-07-21	230x230	1/20000	1000
1983	1983 IFN 59-62/200 P	762	1983-07-21	230x230	1/20000	1000
1983	1983 IFN 59-62/200 P	766	1983-07-21	230x230	1/20000	1000
1987	1987 F 2104/300 P	10	1987-04-23	230x230	1/30000	1500
1987	1987 F 2104/300 P	7	1987-04-23	230x230	1/30000	1500
1987	1987 F 2105/300 P	28	1987-04-23	230x230	1/30000	1500
1989	1989 FD 62/200 P+C	1802	1989-09-21	230x230	1/20000	1000
1989	1989 FD 62/200 P+C	1801	1989-09-21	230x230	1/20000	1000
1989	1989 FD 62/200 P+C	1674	1989-09-20	230x230	1/20000	1000
1989	1989 FD 62/200 P+C	1670	1989-09-20	230x230	1/20000	1000
1995	1994/95 FD 59-62/200 P+C	2418	1995-06-30	230x230	1/20000	1000
1995	1994/95 FD 59-62/200 P+C	1862	1995-06-29	230x230	1/20000	1000
1995	1994/95 FD 59-62/200 P+C	1726	1995-06-29	230x230	1/20000	1000
1995	1994/95 FD 59-62/200 P+C	1722	1995-06-29	230x230	1/20000	1000
1997	1997 F 2103-2104/300 P	134	1997-05-02	230x230	1/30000	1500
1997	1997 F 2103-2104/300 P	138	1997-05-02	230x230	1/30000	1500
1997	1997 F 2103-2104/300 P	80	1997-05-02	230x230	1/30000	1500
2000	2000FD 59-62/250 P+C	534	2000-06-17	230x230	1/25000	1500
2000	2000FD 59-62/250 P+C	530	2000-06-17	230x230	1/25000	1500
2000	2000FD 59-62/250 P+C	414	2000-06-17	230x230	1/25000	1500

# III.4. Approche méthodologique pour mesurer le recul ou l'avancée du trait de côte

L'objectif de cette recherche est de développer une méthodologie générale, qui est basée sur l'approche de la ligne de base (Dolan *et al.*, 1978), pour mesurer le recul ou l'avancée du trait de côte dans les zones d'Hardelot-plage et de Sainte Cécile-Plage, dans le nord de France. Grâce à cette méthodologie, le changement de quatorze traits de côtes au cours des 59 années (1946-2005) a été élaboré et représenté dans la plateforme ArcGIS9.3. Cette étude se

concentre sur les villes d'Hardelot-plage et de Sainte Cécile-Plage où de larges plages associées à des dunes bordières caractérisent le littoral.

La méthodologie utilisée est résumée dans la Figure III-4. L'approche comprend les étapes suivantes : (1) choix d'une ligne de référence ; (2) rectification géométrique des images aériennes disponibles ; (3) digitalisation du trait de côte et estimation des erreurs ; (4) étude de la cinématique du trait de côte. La réalisation de ces étapes se compose de trois principaux aspects (1) préparation des données ; (2) création des données ; (3) mesure de l'évolution du trait de côte.





Figure III-4. Méthodologie générale pour mesurer la récession/accrétion du trait de côte dans la zone d'étude.

#### III.4.1. Préparation de données

Le but de cette étape est d'obtenir des images géoréférencées sous la plate forme d'ArcGIS 9.3.1. La projection (système de coordonnées) Lambert II étendu a été choisie afin que toutes les données puissent correctement être coregistrées de façon à assurer la détermination la plus précise du déplacement de la ligne de rivage.

#### A. Numérisation des photographies

Les images utilisées ont des échelles spatiales différentes, car les photos aériennes ont été prises à des altitudes différentes. Donc la résolution de numérisation de chaque photo doit être différente pour avoir une résolution identique pour toutes les photos et pour correspondre à la résolution au sol de 0.5 m équivalente à celle de l'orthophotographie PPIGE qui constitue la référentielle image de notre étude. De ce fait, les photos à plus grande échelle spatiale (exemple : 1/10.000) ont été numérisées à une résolution moindre, par rapport à celles prises à plus haute altitude (exemple celles prévues pour une utilisation cartographique à 1/30.000). Après numérisation de toutes les archives photographiques, la résolution de chaque cliché scanné n'excède pas 0,5 m. Les données images sont donc coregistrables avec une marge d'erreur minimal pour une qualité d'interprétation équivalente à l'orthophotographie de 2005.

Les photographies aériennes ont été numérisées suivant trois groupes différents de résolution : 800 dpi ou Ppp (*Points Par Pouce*) (année: 1976), 1000 dpi (année: 1989, 1995) et 1500dpi (1946, 1947,1955, 1963,1971, 1979, 1983,1987, 1997, 2000) selon l'échelle de la photographie aérienne et la résolution de photographie déjà géoréférencée. Nous avons utilisé l'orthophotographie de PPIGE géoréférencée et ayant une résolution de 0,5 m. Plus la résolution est fine, plus les fichiers numérisés sont volumineux, c'est pourquoi nous devons utiliser un ordinateur bien configuré ayant une grand capacité et qui permette de faire fonctionner ArcGIS et de traiter les images dans de bonnes conditions (l'ordinateur utilisé dans ce travail est un PC Dell bureautique, Optiplex 755, Intel(R) Core2(TM) Duo CPU, 2.66 GHz, 3.25Go de Ram, 310 Go de disque dur, system :Microsoft Windows XP professionnel, version 2002, service pack 3).

#### B. Géoréférencement des images aériennes

La méthode polynomiale classiquement utilisée pour rectifier des images aériennes (Shoshany et Degani, 1992 ; Durand, 1998 ; 2000) a été retenue. La correction des photos aériennes permet de créer des photographies c'est-à-dire des données images superposables à l'orthophotographie de référence (ici c'est l'orthophoto PPIGE 2005 qui a la même valeur métrique). Il s'agit donc de passer de la perspective conique du cliché photographique à une projection de type cartographique (Durand, 1998), en l'occurrence la projection Lambert II étendue, ellipsoïde Clarke 1880.

Une série de points de contrôle au sol (GCP) ont été utilisés pour géoréférencer les photographies aériennes en système français Lambert II étendue, telles que les intersections de

routes, ponts, les coins de bâtiments, les digues portuaires, les bunkers allemands, etc. Ces amers(GCP) doivent être des points invariables et communs à chaque photographie et à l'orthophotographie de référence. La transformation du système de coordonnées d'une photo au système de cordonnées de référence (Lambert II étendu) est effectuée sous une loi polynomiale dont la précision dépend de trois facteurs (Durand, 1998) ; (1) la précision de détermination des points de contrôle ; (2) la distribution spatiale des amers ; (3) le nombre d'amers.

Concrètement, dans cette étude, au moins 10 points ont été identifiés sur chaque photo (Figure III-5). Près du rivage, les meilleurs points sont les bunkers allemands (Battiau-Queney *et al.*, 2003), mais ils sont peu nombreux et inégalement répartis. Les repères identifiables communs à deux ou plusieurs photos, mais pas contrôlés au sol, sont complémentaires et servent à géoréférencer les photos les unes aux autres (Coyne *et al.*, 1999). Le nombre d'amers ainsi déterminés a permis d'appliquer des polynômes de correction de degré 2. Ainsi, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) obtenue au cours du géoréférencement des photos aériennes varie-t-elle de 0,2 à 1m (Tableau III-2) avec une moyenne de 0,85m.

Année	Référence de mission IGN	N° de cliché rectifié	Nombre de points de calage	Erreur RMS (m)
1946	1946_CDP 112_P_10000	2	11	0,99
	1946_CDP 112_P_10000	1	9	0,5
1947	1947-52 F 2104-2304/250 P	101	11	0,94
	1947-52 F 2104-2304/250 P	2	9	0,98
	1947 F 2105-2305/250 P	325	7	0,67
	1947 F 2105-2305/250 P	223	7	0,72
1955	1955 F 2104-2304/250 P	116	9	0,97
	1955 F 2104-2304/250 P	41	7	0,2
	1955 F 2104-2304/250 P	39	10	0,95
	1955 F 2105-2305/250 P	176	10	0,91
	1955 F 2105-2305/250 P	119	11	0,98
1963	1963 F 2104-2204/250 P	76	11	0,98
	1963 F 2104-2204/250 P	28	10	0,97
	1963 F 2104-2204/250 P	25	9	0,79
	1963 F 2105-2205/250 P	135	9	0,86
1971	1971 FR 2113/250 P	1051	9	0,92
	1971 FR 2113/250 P	1010	9	0,87
	1971 FR 2113/250 P	1008	11	0,87
1976	1976 FR 2794/145 P	216	9	0,98
	1976 FR 2794/145 P	209	10	0,97
	1976 FR 2794/145 P	191	11	0,99
	1976 FR 2794/145 P	160	10	0,92
	1976 FR 2794/145 P	154	14	0,94
	1976 FR 2794/145 P	135	10	0,95
1979-80	1979-80 F 2104-2304/300 P	58	9	0,99
	1979-80 F 2104-2304/300 P	54	11	0,98
	1979-80 F 2105-2405/300 P	162	11	0,98
1983	1983 IFN 59-62/200 P	628	9	0,76
	1983 IFN 59-62/200 P	631	12	0,93
	1983 IFN 59-62/200 P	762	11	0,93
	1983 IFN 59-62/200 P	766	10	0,91

Année	Référence de mission IGN	N° de cliché rectifié	Nombre de points de calage	Erreur RMS (m)
1987	1987 F 2104/300 P	10	10	0,99
1987	1987 F 2104/300 P	7	14	0,97
1707	1987 F 2105/300 P	28	11	0,9
1989	1989 FD 62/200 P+C	1802	12	0,95
	1989 FD 62/200 P+C	1801	10	0,74
	1989 FD 62/200 P+C	1674	14	0,89
	1989 FD 62/200 P+C	1670	11	0,96
1994-95	1994/95 FD 59-62/200 P+C	2418	16	0,91
	1994/95 FD 59-62/200 P+C	1862	13	0,65
	1994/95 FD 59-62/200 P+C	1726	15	0,67
	1994/95 FD 59-62/200 P+C	1722	12	0,99
1997	1997 F 2103-2104/300 P	134	10	0,82
	1997 F 2103-2104/300 P	138	10	0,79
	1997 F 2103-2104/300 P	80	14	0,89
2000	2000FD 59-62/250 P+C	534	16	0,93
	2000FD 59-62/250 P+C	530	10	0,54
	2000FD 59-62/250 P+C	414	11	0,77
	0,85			

Tableau III-2. Erreurs RMS liées au géoréférencement des photos aériennes.



Figure III-5. Ggéoréférencement sous plate forme d'ArcGIS9.3.1

Exemple : cliché IGN N° 530, mission 2000 FD 59-62 250P+C, cet exemple montre la répartition spatiale de GCP, sur la photo aérienne, lors du géoréférencement et l'erreur quadratique moyenne (RMSE)

# C. Mosaïque des photos géoréférencées

Une fois les photos aériennes géoréférencées, la mosaïque des différentes images géoréférencées peut être construite sous ArcGIS9.3.1, pour chaque plan de vol. La réalisation de la mosaïque permet de vérifier la cohérence du redressement : les objets qui se situent dans

la zone commune entre deux photographies ne doivent être affectés par aucune déformation ou décalage (Figure III-6).



Figure III-6. Mosaïque sous la plate-forme d'ArcGIS 9.3.1. après le géoréférencement. Exemple :Mosaique des images géoréférencées de l'année 1995, Clichés IGN: N° 2418,1862,1726 et 1722, Mission: 1994/95 FD 59-62/200 P+C. cet exemple montre la préservation de la continuité spatiale d'objets entre deux images géoréférencées superposées et consécutives

# III.4.2. Création des données

ArcGIS 9.3.1 a été utilisé pour créer et traiter les données pour cette recherche. Toutes les données créées seront stockées dans une géodatabase dans laquelle un jeu de classe d'entité (*feature dataset*) a été créé. Il permet de regrouper toutes les classes d'entités (traits de côte) qui seront créées et qui auront le même système de coordonnées (Lambert II étendu) et le même type de géométrie (la ligne). La géodatabase, le jeu de classe d'entité et les classes d'entité sont créés dans ArcCatalog (Figure III-7, a), avec une classe d'entité pour chaque trait de côte. En plus, deux autres classes d'entité sont créées, une pour la ligne de base et l'autre pour les transects ayant aussi le même type géométrique (une ligne).



Figure III-7. Les données créées dans ArcCatalog et ArcMap (ArcGIS 9.3.1) a; Géodatabase, jeu de classe d'entité et classes d'entité créés dans ArcCatalog b; échantillonnage des traits de côte digitalisés, ligne de base et et transects créés dans ArcMap

# A. Digitalisation du trait de côte

Dans cette étude, la limite du pied de dune est définie comme la ligne de référence pour calculer l'évolution de trait de côte. Parce que toutes les photographies aériennes utilisées ne sont pas récentes, il n'est pas facile de distinguer la ligne des plus hautes eaux le HWL pour toutes les photos. De plus le système plage-dune au sud d'Hardelot-Plage est caractérisé par l'absence d'avant-dune pouvant servir de réserve de sable en cas de tempête, ce problème étant lié à l'humidité permanente du haut de plage (Malaterre, 2006 ; Tresca, 2006 ; Battiau-Queney *et al.*, 2006).

Le long de la plage étudiée, on a constaté 5 types de littoral (Figure III-8 a, b, c, d, e). (i) la digue d'Hardelot-Plage: 700m; (ii) l'enrochement: Hardelot-Plage, 1150m, construit après 1980 ; Saint Cécile-Plage: 600 m construit après 1980 et 800m construit après 1990; (iii) dunes embryonnaires ; (iv) avant-dune naissante et (v) dune taillée en falaise.



Figure III-8. Cinq types caractérisent le littoral de la zone d'étude (photos prises par F.CHAABAN 14 et 16 septembre 2010) a: plage d'Hardelot (vue vers le Nord) b: plage de Sainte Cécile (vue vers le Nord) c; e: plage de nord de Sainte Cécile (vue vers le Sud) d: plage de sud d'Hardelot-Plage (vue vers le Nord)

Une fois les données (photographies aériennes) géoréférencées, les traits de côte peuvent être tracés et superposés en utilisant les outils d'éditeur d'ArcGIS 9.3.1. (Figure III-7, b)

#### III.4.3. Méthode de génération de transects

Traditionnellement, les transects perpendiculaires aux traits de côte sont utilisées pour estimer l'érosion côtière et en déduire le taux de recul (ou d'avancée). Une fois les traits de côte élaborés et validés, une ligne de base, parallèle à la tendance générale du littoral est construite et divisée en sous-unités homogènes (50m) pour fournir le point de départ de l'opération de transects. Ces transects seront numérisés et numérotés du nord au sud.

La génération des transects perpendiculaires sur la ligne de base se réalise, soit manuellement lorsque le nombre de transects n'est pas important, soit en suivant une méthode basée sur les outils disponibles dans la plate-forme d'ArcGIS et l'extension *«Hawth's Tools»* téléchargeable du site (http://www.spatialecology.com/htools/download.php).

Cette méthode consiste à placer des points, séparés par la distance souhaitée entre les transects, le long de la ligne de base et sa parallèle (cette parallèle sert seulement à générer les transects). Ensuite, l'extension *«Hawth's Tools»* servira à générer des transects perpendiculaires au rivage, entre chaque paire de points (Figure III-9). Une fois les transects générés, on les vérifie et on élimine les transects aberrants. Dans notre travail nous avons 292 transects établis à intervalles réguliers de 50 m et numérotée du nord au sud.



Figure III-9. Génération de transects en utilisant des outils d'ArcGIS et l'extension «Hawth's Tools».
## III.4.4. Géotraitement (Geoprocessing)

Dans cette étape, le géotraitement est réalisé pour mesurer la distance entre la ligne de base (appelé ici Ref1) et les traits de côte pour chaque transect (Ref 2), puis pour calculer l'évolution du trait de côte. La Figure III-10 représente une simulation conceptuelle montrant la ligne de base (Ref1), les transects (Ref 2), deux éléments linéaires (deux traits de côte) et les tables d'attributs. L'utilisation d'ArcGIS *ModelBuilder* est utile et efficace pour la réalisation de l'intersection entre les trais de côte digitalisés et les transects perpendiculaires, puis pour le calcul de la géométrie de l'intersection (géométrie de point X, Y) et la mesure du recul ou l'avancée du littoral.



Figure III-10. Simulation conceptuel pour calculer le changement entre deux objets linéaires (deux traits de côte) à l'aide d'ArcGIS *ModelBuilder*.

Les deux ArcGIS *ModelBuilders* créés et utilisés pendant cette recherche sont des modèles génériques qui peuvent être réutilisés dans le géotraitement des éléments linéaires. Le premier modèle est utilisé pour (1) exécuter l'intersection entre les traits de côte et ses perpendiculaires (les transects), (2) ajouter des champs et calculer la géométrie des points d'intersection (Figure III-11 a, b). Le deuxième modèle est nécessaire pour ajouter des champs

et calculer la distance sur les lignes de transect entre Ref1 et chaque trait de côte (Figure III-11, c, d). Les résultats (Valeurs de calcule d'évolution du trait de côte) sont reportés dans l'annexe A.





a: la boîte de dialogue de ArcGIS *ModelBuilder1*; b: schéma de ArcGIS *ModelBuilder1* c: la boîte de dialogue de ArcGIS *ModelBuilder2*; d: schéma de ArcGIS *ModelBuilder2* 

## III.4.5. Marge d'erreur

L'utilisation de photographies aériennes verticales et du SIG dans l'étude d'analyse de l'évolution du trait de côte est utile mais, comme elle provoque quelques erreurs, la totalité de ces erreurs donne une marge d'erreur à prendre en compte dans la présentation et l'interprétation des résultats. En effet, sur les photographies corrigées, pour la nouvelle position des points autres que les amers, il subsiste une incertitude puisque celle-ci est obtenue d'après une interpolation des amers (Durand, 1998). Il ne saurait être question de chiffrer une telle incertitude, qui dépend du fonctionnement même du logiciel. Néanmoins, il est raisonnable de la tenir comme négligeable si les amers ont pu être définis au plus près du trait de côte. En prenant en compte cette considération et les erreurs possibles (paragraphe, III.2.6) citées précédemment, la marge d'erreur peut être considérée comme une valeur totale approchée.

En conséquence, la marge d'erreur globale sera définie avant le calcul des taux d'évolution. Compte tenu des incertitudes liées à la précision de l'orthophotographie PPIGE2005 (document de référence), à la résolution des photos aériennes scannées, au calage des images (erreurs liées au repérage des amers sur les photographies et erreur liée au calcul des modèles polynomiaux) et à la digitalisation du trait de côte, la marge d'erreur a été estimée à  $\pm 5m$  (Tableau III-3). En fait celle-ci est le résultat de la somme de l'ensemble des erreurs correspondant à chaque photo rectifiée. De plus, en comparant la position du trait de côte à deux dates différentes, ce qui est notre cas, la marge d'erreur doit être doublée (Durand, 1998; Aernouts et Héquette, 2006), donc celle-ci atteint un maximum possible de  $\pm 10$  m.

	Type d'erreur	Valeur estimée					
1	Erreur liée à la résolution de document de référence	±0,5m					
	(orthophotographie PPIGE 2005)						
2	Erreur liée au repérage des amers sur les photographies	±1m					
3	Erreur liée au calcul des modèles polynomiaux (erreur RMS)	±1 m					
4	Erreur liée à la digitalisation du trait de côte	±2,5 m					
	Marge d'erreur pour chaque photographie rectifiée±5m						
Marg	e d'erreur maximale en cas de comparaison deux images rectifiées	±10m					

Tableau III-3. Estimation des erreurs inhérentes à la méthode de délimitation du trait de côte

## **III.5.** Résultats et discussion

En raison des discontinuités naturelles et humaines dans le rivage comme les ruisseaux, les vallées fluviales, ou une digue, les valeurs d'évolution sur les transects le long du trait de côte sont interrompues par des grandes valeurs (positives ou négatives). C'est pourquoi la zone d'étude a été divisée en 7 sections (Tableau III-4, Figure III-12) et pour chacune, l'évolution du trait de côte et le taux d'érosion annuel ont été calculés individuellement.

N° section	Transects	Location géographique	Lieu dite	commune
1	1-53	Nord de Hardelot- Plage	Dunes d'Ecault	Saint-Etienne-au-Mont
2	54-56	Nord de Hardelot- Plage	Dunes d'Ecault	Saint-Etienne-au-Mont
3	57-75 (Digue)	Hardelot-Plage	Hardelot-Plage	Neufchatel-Hardelot
4	76-199	Sud de Hardelot- Plage	Dunes du Chevalier Sansot	Neufchatel-Hardelot, Dannes et Camiers
5	200-220	Sainte-Cécile-Plage	Sainte-Cécile-Plage	Camiers
6	221-289	Baie de la canche (rive nord)	Dunes de Camiers (Réserve naturelle de la Baie de Canche	Camiers
7	290-292	Baie de la canche (rive nord)	Dunes de Camiers (Réserve naturelle de la Baie de Canche)	Camiers

#### Tableau III-4 Sections de zone d'étude.

L'échelle spatiale doit être suffisamment grande pour permettre une lisibilité facile des graphiques des traits de côte sur les cartes. Concernant les cartographies d'évolution du trait de côte, il convient de faire une distinction entre les cartes réalisées à petite échelle, qui couvrent un plus grand territoire et ne peuvent en aucun cas être le reflet des particularités locales, et celles réalisées à grande échelle spatiale, qui représentent un petit espace. Cependant il y a des cas où les traits de côte de certaines zones côtières peuvent avoir globalement une tendance d'évolution contradictoire par rapport à des portions détaillées dans la même zone, c'est pourquoi les études locales sont nécessaires afin de bien prendre en compte les particularités à grande échelle (Clique et Lepetit, 1986).

Les résultats d'évolution littorale sont tout d'abord présentés sous forme de cartes à grande échelle spatiale (1/2000) (Annexe B), où ils sont numérisés en couleurs différentes selon les années (Tableau III-5). En raison de l'indisponibilité des photos aériennes en 1946, le trait de côte n'est représenté qu'entre l'estuaire de la Becque et le ruisseau des Chalets Saint-Frieux sur les deux clichés disponibles de l'IGN N°1 et 2 (Référence 1946\_CDP

112\_P\_10000), c'est-à-dire le long de la digue d'Hardelot-Plage et une partie des dunes du chevalier Sansot (longueur totale du trait de côte de 2,6 km).

Année	Couleur de trait de côte digitalisé	Année	Couleur de trait de côte digitalisé
1946	Bleu pointillé	1983	orange continué
1947	Bleu continué	1987	Rouge pointillé
1955	vert pointillé	1989	Rouge continué
1963	vert continué	1995	Marron pointillé
1971	Jaune pointillé	1997	Marron continué
1976	Jaune continué	2000	Noire pointillé
1980	Orange pointillé	2005	Noir continué

Tableau III-5. Sémiologie graphique des traits de côte digitalisés.

#### III.5.1. Analyse d'évolution de trait de côte entre 1947 et 2005

Comme le trait de côte de 1946 n'est pas connu tout le long du secteur d'étude, nous avons analysé le changement entre 1947 et 2005 pour avoir une idée générale de la tendance de l'évolution littorale. La Figure III-12 et la Figure III-13 représentent les changements du littoral le long des transects dont 6,85% seulement d'entre eux sont situés à l'intérieur de la marge d'erreur ( $\pm 10$ m).



Figure III-12. Tronçons de la zone étudiée et évolution moyenne du trait de côte entre 1947 et 2005.

L'évolution du trait de côte se caractérise globalement par un recul moyen de 31,95m et un écarte type de 41,82m en prenant en compte tous les transects dont 82,2% ont des valeurs négatives (c'est-à-dire traduisant un recul). De telles valeurs se traduisent par des vitesses de recul d'environ 0,55 m/an.

Par contre, l'analyse locale donne des valeurs différentes de sorte que les valeurs d'évolution peuvent être soit classées selon le type (recul ou avancée), soit regroupées avec un écart type diminuant (Tableau III-6).

N° section	Transects	Evolution moyenne (m)		Taux d'évoluti	ion (m/an)	Lieu dite
		Avec marge d'erreurs	Sans marge d'erreurs	Avec marge d'erreurs.	Sans marge d'erreurs.	
1	1-53	-26,43	-26,43	-0,46	-0,46	Dunes d'Ecault
2	54-56	-93,47	-93,47	-1,61	-1,61	Dunes d'Ecault
3	57-75 (Digue)	0	0	0	0	Hardelot-Plage
4	76-199	-23,66	-25,39	-0,41	-0,44	Dunes du Chevalier Sansot
5	200-220	34,81	40,52	0,60	0,7	Sainte-Cécile-Plage
6	221-289	-75,49	-85,4	-1,30	-1,47	Dunes de Camiers (Réserve naturelle de la Baie de Canche)
7	290-292	236,12	236,12	4,07	4,07	Dunes de Camiers (Réserve naturelle de la Baie de Canche)

Tableau III-6. Evolution moyenne et taux d'évolution du trait de côte (1947-2005).

Le trait de côte dans les sections S1, 2, 4, 6 est en total retrait avec un changement moyen de 26,43m (18,2 % de transects), 93,47m (1% de transects), 23,66m (42,5% de transects) et 75,49 m (23,6% de transects) respectivement (Figure III-12, Figure III-13,Tableau III-6). Mais d'une part le rivage dans les sections S5 et S7 s'est avancé avec un changement moyen de 34,81m (7,2 % de transects) et de 236,12m (1% de transects) respectivement. L'avance importante dans la section 7 peut être interprétée par la dynamique de l'estuaire de Canche. La Figure III-13 montre quatre petites crêtes qui correspondent aux ruisseaux de Becque, de Bronne, de Crevé et de Dannes. L'analyse des données (tous les transects) par l'histogramme de fréquence prouve qu'environ 80% (228 transects) des valeurs de transects tombent entre -50 et +50 m. Par conséquent le rivage du secteur d'étude a reculé avec un taux moyen d'environ 30,4 m entre 1947 et 2005 avec la marge d'erreurs, 32,84m sans marge d'erreurs.



Figure III-13. Diagramme d'évolution du trait de côte dans la zone d'étude (1947-2005).

# III.5.2. Dynamique du trait de côte au cours des périodes entre 1946 et 2005

L'analyse précédente de l'évolution du trait de côte entre 1947 et 2005 a donné la tendance générale, à savoir que la ligne de rivage est globalement en recul. Néanmoins, sur une échelle de temps plus longue de 1946 à 2005, l'évolution du trait de côte présente des phases successives d'avancées et de reculs (Tableau III-7).

## A. Dunes d'Ecault

Dans un premier temps, la ligne de rivage de la section S1 a connu :

- trois phases de recul : entre 1947 et 1971(de 0,64 à 1,58 m/an) ; entre1980 et 1987 (de 0,43 à 1,14 m/an); et un recul rapide et important (1,6 à 3,9 m/an) entre 1989 et 1997 ;
- trois phases d'avancée : entre 1971 et 1980 avancée (0,76 à > 0,94 m/an), entre 1987 et 1989(0,95 m/an) et enfin entre 1997 et 2005(0,86 à > 1,93 m/an) (Figure III-14, a).

En fait, l'évolution du littoral le long des dunes d'Ecault n'est pas uniforme ni dans le temps et ni dans l'espace, et un recul moyen en mètres par an n'a pas de signification réelle dans ce cas (Battiau-Queney *et al.*, 2006). D'autant que la photo aérienne de 1929 qui a été digitalisée par Tresca (2006) montre une avancée très importante entre 1929 et 1963 et une nouvelle avancée de 1963 à 1977, le long des dunes d'Ecault.

Dans un second temps, l'analyse de l'évolution de l'estuaire de Becque (section S2) montre que la rive nord de l'estuaire a reculé globalement de 0,5 à 3,5 m/an entre 1947 et 2005

avec un important recul (5,8 m/an) entre 1995 et 1997. Par contre, il a connu une légère avancée (0,23 m/an) entre 1971 et 1976 (Figure III-14, b).

		1947_ 1946	1955_ 1947	1963_ 1955	1971_ 1963	1976_ 1971	1980_ 1976	1983_ 1980	1987_ 1983	1989_ 1987	1995_ 1989	1997_ 1995	2000_ 1997	2005_ 2000
section	Transect	EM (m)												
1	153	no data	-5,11	-5,14	-11,84	3,82	3,74	-3,42	-2,13	1,90	-9,75	-7,79	2,58	9,64
2	54-56	no data	-4,40	-11,09	-15,25	1,14	-8,01	1,34	-17,34	-2,66	-7,43	-11,50	-3,95	-5,32
3	57-75	digue												
4	76-199	2,47	3,12	-10,92	-5,16	-0,25	5,30	-5,41	-8,03	3,46	-8,95	-2,17	-0,10	5,45
5	200-220	no data	49,66	48,90	-18,45	-18,92	-19,23	-10,64	3,54	0	0	0	0	0
6	221-289	no data	-15,02	-0,85	-32,23	-3,46	-7,69	-25,34	-7,26	-1,26	-11,24	0,14	5,43	23,28
7	290-292	no data	114,85	-8,51	19,94	19,52	36,51	11,03	9,31	25,66	2,53	-8,34	4,87	8,74
	Marge d'erreurs	±10m												
section	Transect	EMPA (m/an)												
1	153	no data	-0,64	-0,64	-1,48	0,76	0,94	-1,14	-0,43	0,95	-1,63	-3,90	0,86	1,93
2	54-56	no data	-0,55	-1,39	-1,91	0,23	-2,00	0,45	-3,47	-1,33	-1,24	-5,80	-1,32	-1,06
3	57-75	digue												
4	76-199	2,47	0,39	-1,37	-0,65	-0,05	1,33	-1,80	-1,61	1,73	-1,49	-1,09	-0,03	1,09
5	200-220	no data	6,21	6,11	-2,31	-3,78	-4,81	-3,55	0,71	0	0	0	0	0
6	221-289	no data	-1,88	-0,11	-4,03	-0,69	-1,92	-8,45	-1,45	-0,63	-1,87	0,07	1,81	4,66
7	290-292	no data	14,36	-1,06	2,49	3,90	9,13	3,68	1,86	12,83	0,42	-4,17	1,62	1,75
	Marge d'erreurs (m/an)	±10	±1,2	±1,2	±1,2	±2	±2,5	±3,3	±2,5	±5	±1,7	±5	±3,3	±2

Tableau III-7. Evolution Moyenne(EM) et Evolution Moyenne Par An (EMPA) du trait de côte dans les sections de la zone d'étude

#### **B.** Dunes du Chevalier Sansot

Il s'agit de la section S4 étendue d'Hardelot-plage à Sainte Cécile-Plage (6 km). le trait de côté a connu quatre phases d'avancée : 0,4, 1,3, 1,7 et 1,1 m/an entre les années 1947-1955, 1976 -1980, 1987-1989 et 2000-2005 respectivement, séparées par trois phases de recul : 1,6 à 1,8 et de 1,1 à 1,49 entre les années 1955-1971(de 0,65 à 1,37 m/an), 1980-1987(de 1,61 à 1,8 m/an) et 1989-1997 (1,09 à 1,49 m/an) (Figure III-14, c).

## C. Dunes de Camiers (Réserve naturelle de la Baie de Canche)

Le trait de côte, dans cette zone qui se trouve en rive nord de l'estuaire de Canche, a évolué de façon hétérogène dans le temps. Certaines phases présentent des variations très fortes, avec l'avancée la plus forte qui atteint 14,36 m/an entre 1947 et 1955 (section 7) (Figure III-14, f) ; et le recul le plus fort qui atteint 8,45 m/an entre 1980 et 1983 (section 6) (Figure III-14, e).

En ce qui concerne le taux annuel moyen du mouvement de littoral dans S5, qui correspond à la plage sud de Sainte Cécile-Plage (Figure III-14, d), nous remarquons que l'évolution est nulle à partir de 1987 en raison de l'enrochement construit durant les années 1980 le long de la plage. Entre 1947 et 1963, le rivage a bien avancé vers la mer avec une moyenne de 6 m/an. Au contraire il y eut un recul important (2,3 à 4,8 m/an) de 1963 à 1983.

Enfin, dans l'estuaire de la Canche, nous constatons, d'une part, que le trait de côte était en recul entre 1947 et 1995 dans la section S6 (Figure III-14, e). A partir de 1995, il s'avançait pour atteindre 4.66m/an entre 2000 et 2005. D'autre part, dans la section S7 (Figure III-14, f), le cas est différent : le trait de côte a bien progressé de façon générale avec les trois moyennes les plus importantes de 14,36 m/an (entre 1947 et 1955), de 9,13 m/an (entre 1976 et 1980) et de 12,83 m/an (entre 1987 et 1989). Par contre, il a reculé avec une moyenne de 1,06 m/an entre 1955 et 1963, et de 4,17 m/an entre 1995 et 1997.



Figure III-14. Evolution Moyenne Par An (EMPA) du trait de côte dans les sections de zone d'étude.

Le littoral dans la section S4 est en recul avec un taux moyen de 0.41 m/an. C'est, en général, en accord avec une analyse déjà exécutée par Tresca (2006) pour la partie nord (1.5 kilomètres) de cette section. En fait, dans le sud d'Hardelot, le littoral est en recul lent mais constant (Battiau-Queney *et al.*, 2006), car le système côtier d'Hardelot-Plage (partie méridionale) souffre du manque d'avant-dune bien développée (Figure III-15). Ce problème est lié à la saturation en eau quasi constante du sable de la plage qui est la source potentielle d'alimentation dunaire. L'aquifère sableux dans ce secteur, qui est en continuité hydraulique avec l'aquifère crétacé (Louche *et al.*, 1997), comprend des intercalations de lentilles de tourbe. Afin d'essayer de résoudre ce problème, des modèles hydrodynamiques et hydrodispersifs seront ultérieurement réalisés à l'aide des plateformes ArcGIS et GMS dans le chapitre IV.



Figure III-15. Plage d'Hardelot, partie méridionale. Les vues sont prises vers le sud du même endroit. a : prise par A.Tresca (le 10 juin 2005). b : prise par F.Chaaban (le 14 septembre 2010). a et b : saturation en eau quasi constante du sable de la plage et manque d'avant-dune.

# **III.6.** Conclusion

Au cours de ce chapitre, une méthodologie pour calculer l'évolution d'un trait de côte a été présentée à l'aide des systèmes d'information géographique (ArcGIS 9.3.1) et en utilisant des photographies aériennes, dans les secteurs d'Hardelot-Plage et de Sainte Cécile-Plage où se localisent les dunes d'Ecault, les dunes du Chevalier Sansot et les dunes de Camiers (Réserve naturelle de la Baie de Canche). La période d'étude s'est étendue de 1946 à 2005. A l'issue de ce chapitre nous avons révélé plusieurs points dont :

 L'utilisation de la plate-forme ArcGIS 9.3.1 assure le géoréférencement des photographies aériennes et la numérisation du trait de côte dans des coordonnées correctes.

- ArcGIS ModelBuilder fournit un ensemble d'outils pour la construction de divers types de modèles de géotraitement et contribue à résoudre des problèmes compliqués.
- La marge d'erreur générée par la méthodologie proposée est de ± 10 m, par suite des erreurs liées à la résolution du document de référence et des images numérisées.
- Deux cas distincts, à propos de l'évolution du littoral entre 1947 et 2005, ont été observés le long de rivage entre le nord d'Hardelot et l'estuaire de la Canche. D'une part, le processus de recul de la ligne de rivage intéresse, d'une manière générale, l'ensemble du trait de côte des dunes d'Ecault et des dunes de Chevalier Sansot à des vitesses variant de 0,43 m/an à 5,8 m/an dans l'estuaire de la Becque (uniquement sur la rive nord de cet estuaire, mais pas sur sa rive sud : la rive nord correspond au musoir et sur cette côte, en raison de la dérive littorale dirigée du sud vers le nord, le sable a tendance à s'accumuler au sud des estuaires et à s'éroder au nord. Le phénomène est beaucoup plus marqué de part et d'autre de la Canche, mais il est déjà sensible pour un tout petit estuaire comme celui de la Becque). Par contre la valeur moyenne de la fourchette d'avancée varie de 0,23 à 2,47 m/an. D'autre part, l'évolution du trait de côte des dunes de Camiers (estuaire de la Canche) était très importante avec une moyenne de recul de 8,45 m/an entre 1980 et 1983, alors que la moyenne de l'avancée atteinte est de 14,36 m/an entre 1947 et 1955.
- La dernière observation, entre 2000 et 2005, a montré que la ligne de référence dans la zone d'étude a évolué positivement avec une moyenne allant de 1,1 à 4,66 m/an dans 86% des transects (250 transects). Sur 13% des transects (39 transects), aucun changement n'a été constaté, en raison de l'enrochement construit le long de la plage. 1% des transects (3 transects correspondant à la rive nord de l'estuaire de la Becque) ont présenté un recul de 1,06 m/an.

Chapitre IV Application des SIG à l'élaboration d'un modèle hydrodynamique littoral.

# **IV.1. Introduction**

Dans le cadre d'une modélisation hydrogéologique littorale, l'utilisation d'un SIG est indispensable pour générer le jeu de données géographiques nécessaire aux modèles numériques spatialement distribués. La modélisation hydrodynamique de la plage d'Hardelot pose le problème de la saturation en eau quasi constante du sable de la plage et de son érosion sur la partie sud. Dans ce chapitre, ce cas singulier sera analysé en couplant un SIG (ArcGIS 9.3) avec un système de modélisation hydrogéologique (GMS 6.0) afin de développer une modélisation adaptée. La présente contribution porte donc sur le « workflow » utilisé pour la modélisation des données géographiques utilisées dans le modèle hydrogéologique.

## IV.2. Couplage SIG - modélisation hydrodynamique

La technologie de la modélisation numérique est devenue depuis plusieurs décennies une méthode de plus en plus utilisée par les chercheurs et les gestionnaires pour la gestion des ressources en eaux (Marsily, 1981; Konikow, 1996; Konikow et Reilly, 1998; Darwishe et al., 2009; 2010; Chaaban et al., 2010a; b; 2011). De nombreux logiciels de modélisation numérique simulant les écoulements des eaux souterraines ont été développés et utilisés largement, comme le code FEFLOW à base d'élément fini d'écoulement subsurface (Diersch, 2009), le code VISUALMODFLOW qui calcule un flux modulaire visuel en trois dimensions (Anon, 2000), le code PMWIN qui est un code Modflow pour Windows (Chiang, 2005), ou le code GMS, Groundwater Modeling System, pour la modélisation des nappes (Environmental Modeling Research Laboratory EMRL, 2005). Le SIG est de plus en plus utilisé en couplage avec des modèles numériques hydrodynamiques (Chaaban et al.; 2011; Darwishe et al., 2010). Par exemple Wang et al. (2008) ont utilisé un SIG (MapGIS) en combinaison avec le code MODFLOW version PMWIN dans un environnement d'internet. La base de données d'évaluation des ressources en eau d'une plaine du Nord de la chine a été créée dans un SIG pour la préparation des fichiers d'entrée du modèle numérique. Après calcul, les résultats présentés par le biais de la technologie SIG ont joué un rôle important dans l'évaluation et la gestion des eaux souterraines de cette région.

Par ailleurs, le développement d'interfaces a permis des utilisateurs des Modèles numériques une bonne visualisation des résultats. Knab *et al.* (1998) ont créé l'interface entre les codes MODFLOW, MODPATH et MT3D ; cette interface a été élaborée avec le logiciel

autoCAD. De même, Heinzer *et al.* (1996) ont développé une interface d'utilisateur dans le cadre de l'élaboration d'un modèle d'écoulement des eaux souterraines. Dans ce modèle, le maillage et les données d'entrée et de sortie peuvent être sauvegardées comme données raster séparées. Brodie (1999) a développé un modèle d'écoulement des eaux souterraines au sud-est de l'Australie en utilisant un système de gestion de bases de données relationnelles (SGBDR), créé pour gérer les forages, et un SIG a été utilisé comme environnement de travail pour effectuer l'analyse spatiale des données. Carrera-Hernandez et Gaskin (2006) ont créé un modèle avec le logiciel de SIG libre GRASS GIS, en intégrant le code des différences finies d'écoulement des eaux souterraines MODFLOW(en version PMWIN).

En général la modélisation numérique des eaux souterraines a été appliquée à de nombreux systèmes hydrogéologiques (aquifères fissurés, alluviales, karstiques, ou des aquifères complexes multicouches) pour résoudre plusieurs problèmes, soit pour la simulation de l'écoulement de l'eau souterraine (Strickland et Korleski, 2007), soit pour la modélisation des écoulements souterrains et les transferts de polluants, notamment l'intrusion des eaux marines.

## IV.3. Interface eau douce-eau salée

De manière générale, ce type de contact relève des écoulements de fluides miscibles mais le traitement de ce type d'interface est fait en prenant en compte les deux hypothèses suivantes, pour le contact des eaux douces des aquifères côtiers avec la mer: (1) l'eau salée est immobile et (2) l'eau douce s'écoule sur l'eau salée avec une interface abrupte sans mélange (Marsily, 1981). Cette approximation est à peu près valable si le régime d'écoulement est permanent, donc avec une interface immobile. En fait, il existe une zone de transition entre l'eau douce et l'eau salée ayant une épaisseur de l'ordre du mètre (Figure IV-1, a). Cette faible épaisseur peut être expliquée par le fait que l'eau douce s'écoule vers l'exutoire littoral et entraîne constamment les eaux salées qui diffusent. La zone de transition devient plus importante si l'interface se déplace. Ce déplacement est provoqué sous l'influence de la marée ou par des variations naturelles de la nappe ou dues aux prélèvements. Dans ce cas, le problème doit être traité en écoulements de fluides miscibles si l'on s'intéresse à ce qui se passe au voisinage du contact.



Figure IV-1. Interface eau douce-eau salée (Marsily, 1981).

- A) régime permanent avec une interface immobile, b) régime permanent avec interface abrupte
- c) régime permanent avec un biseau salé une droite, d) biseau salé et substratum de la nappe

Dans le cas du régime permanent avec interface abrupte (Figure IV-1, b), la surface libre et le biseau salé sont des lignes de courant de l'écoulement. Les équipotentielles leur sont donc

orthogonales (Marsily, 1981). Si on prend un point P du biseau salé, l'égalité des pressions et l'immobilité de l'eau de mer nous permettent d'écrire :

Équation 8

$$p2 = -\rho 2gz$$
  

$$p1 = -\rho 1gz + \rho 1gh1 \Rightarrow (\rho 2 - \rho 1)gz = \rho 1gh1$$

Avec :

 $\rho 1$ : masse volumique de l'eau douce,  $\rho 2$  masse volumique de l'eau salée. Z est la profondeur de l'interface eau douce-eau salée, H est la charge.

On a donc :

Équation 9

7 — _	$\rho l$	<i>b</i> 1
2, — —	$\rho 2 - \rho 1$	<i>m</i> 1

Or la profondeur z de l'interface est liée à la charge h dans l'eau douce et au contraste de densité. A 32 g/1 de sel, la masse volumique de l'eau de mer est voisine de 1,025 t/m<sup>3</sup>. Ceci donne:

Équation 10

 $z \approx -40h$ 

Cette relation (Équation 10) est connue sous le nom de "principe de Ghyben-Herzberg" (Bear, 1972). Si l'on admet de plus que les équipotentielles sont verticales, et une surface libre de pente constante, on obtient comme première approximation du biseau salé une droite (Figure IV-1, c). Donc en première approximation, la profondeur probable de l'interface eau douce-eau salée peut être estimée sur une nappe côtière. Par exemple, si on a une charge piézométrique de 2 m au-dessus du niveau de la mer à 200 m du rivage, la profondeur du biseau sera alors d'environ 80 m, à moins qu'il n'ait déjà été arrêté par le substratum de la nappe (c'est-à-dire si la nappe n'a pas 80 m d'épaisseur) (Figure IV-1, d).

D'après Plummer (1975), Sanford et Konikow (1989) il est noté que dans la zone de mélange eau douce-eau salée, le carbonate de calcium se dissout, provoquant la formation de conduits karstiques et donc de très bonnes perméabilités globales. Ces phénomènes karstiques sont fréquents sur le littoral de la Manche. De plus le comportement de l'interface eau douce-eau salée est contrôlé par les principaux accidents tectoniques qui sont des axes préférentiels de pénétration ou de stockage des eaux marines (Louche, 1997).

## **IV.4. Présentation du GMS**

La modélisation hydrodynamique sera effectuée à l'aide de la plateforme GMS. Ce logiciel a été développé par EMRL à l'université de Brigham Young (Provo, Utah, USA) (*EMRL*, 2005). GMS fournit un environnement graphique très performant de visualisation des données de terrains et des résultats issus des modèles numériques qu'il contient. Plusieurs types de codes numériques sont supportés par les GMS. La version actuelle (GMS 6.0) fournit une interface complète pour les codes MODFLOW (modélisation hydrodynamique), MT3D (un modèle de transport de contaminants), MODPATH (code de suivi de particules), SEAM3D (un modèle de transport réactif), SEEP2D (code pour les flux en section verticale), UTCHEM (code de flux multi-phase et de transport de polluants), et FEMWATER (code de transport de soluté à éléments finis).

Un des grands atouts de GMS est son aptitude à concrétiser le modèle conceptuel en utilisant des objets de SIG (points, lignes et polygones). Le modèle conceptuel définit les conditions aux limites, les sources et les puits, et les caractéristiques hydrodynamiques et hydrodispersives. Les données peuvent être automatiquement discrétisées et transférées dans un domaine maillé. Le code GMS permet ainsi de traiter de grands domaines complexes d'une manière simple et efficace.

Le module SIG disponible dans GMS facilite la création de modèles conceptuels de données SIG. Grace à une liaison directe avec ArcGIS, il est possible d'accéder à la géométrie et aux tables d'attributs (données attributaires) des objets. Le module SIG inclus dans la plateforme de GMS peut être utilisé pour afficher, importer ou exporter des données du SIG directement en GMS, et inversement, sans avoir besoin de convertir ces données au type de données GMS. Le module SIG peut également être utilisé pour sélectionner une partie des données SIG et les convertir en données GMS pour les utiliser dans la construction d'un modèle hydrodynamique. Actuellement le module SIG ne peut être utilisé que pour les données relatives à un régime d'écoulement permanent.

## IV.4.1. Modflow

GMS comprend une interface graphique puissante pour MODFLOW 2000 dans lequel les packages les plus utilisés par la communauté scientifique sont pris en charge. Les modèles peuvent y être construits à l'aide de la méthode du maillage direct ou la méthode du modèle conceptuel. De nombreuses options sont prévues pour visualiser les résultats de la simulation dans MODFLOW.(Harbaugh *et al.*, 2000) qui est l'outil de modélisation numérique le plus

couramment utilisé dans la communauté hydrogéologique (McDonald et Harbaugh, 2003). Il a été développé par USGS (*United States Geological Survey*) et contient une collection d'outils de simulation en matière d'hydrogéologie et d'hydraulique souterraine.

L'écoulement des eaux souterraines est en général difficile à résoudre analytiquement, soit parce que l'écoulement est décrit par des équations aux dérivées partielles qui sont complexes (non linéaires), soit les propriétés du milieu sont hétérogènes. Dans de tels cas, les techniques numériques peuvent être utilisées pour obtenir des solutions approximatives. La plus ancienne et la plus répandue est la méthode numérique à différences finies. L'idée de base de cette méthode est de remplacer les dérivées partielles de l'équation de débit par les différences finies qui sont le rapport d'une partie de la variable sur une petite distance finie, comme par exemple (Équation 11) :

Équation 11

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \lim (\Delta x \to 0) \frac{\Delta h}{\Delta x} \approx \frac{\Delta h}{\Delta x}$$

## IV.4.2. Femwater

FEMWATER est un logiciel 3-D, qui utilise la méthode des éléments finis pour modéliser les écoulements souterrains en zone saturée et non saturée et les transferts d'éléments. Il prend en compte la coexistence de fluides de densité différente. FEMWATER est une combinaison de deux anciens modèles, 3DFEMWATER (écoulement) (Yeh, 1987) et 3DLEWASTE (transport) (Yeh, 1990), et constitue un puissant modèle pour l'écoulement et le transport couplés. Il contient un environnement graphique d'utilisateur très opérationnel (*Engineering Computer Graphics Laboratory*; ECGL, 1996). Les algorithmes de l'écoulement et du transport de FEMWATER peuvent être couplés pour simuler des problèmes dépendant de la densité tels que l'intrusion de la salinité. De plus, l'algorithme des éléments finis utilisé par FEMWATER permet de caler des conditions aux limites naturelles, sans s'appuyer sur des nœuds régulièrement espacés. Enfin, parce que FEMWATER simule l'écoulement en zone non saturée, l'ensemble de l'aquifère peut être modélisée ; les sources et les puits peuvent être directement représentés dans le maillage. L'inconvénient principal de FEMWATER est qu'il est « gourmand » en mémoire. L'obtention des résultats peut prendre beaucoup de temps, et la convergence du modèle est plus difficile.

# IV.5. Description de la problématique

Le site d'Hardelot-Plage est divisé en deux parties distinctes : nord et sud. La partie nord du site étudié est constituée de sable sec, avec la présence d'une digue qui protège les habitations de la mer. Au sein de cette partie, le système plage-dune est fonctionnel, ce qui est confirmé par le suivi de l'évolution du trait de côte (chapitre III) et aussi par l'utilisation des photos aériennes de 1929 jusqu'à 2005 (Tresca, 2006). Le long des dunes d'Ecault, l'évolution de trait de côte n'est uniforme ni dans le temps ni dans l'espace (Battiau-Queney *et al.*, 2006). Un chiffre moyen de recul en mètres par an n'a donc pas ici de réelle signification. Les précédents travaux de recherche (Battiau-Queney *et al.*, 2006 ; Tresca, 2006) ont permis d'identifier des phases de progradation rapide du trait de côte (1 à 2 m/an) sur la période 1963-77 et des phases d'érosion rapide pouvant dépasser 2 m/an sur la période 1977-89 et également de manière plus localisée sur la période 1995-2000 (Figure IV-2 a). Ensuite notre travail présenté dans le chapitre III a montré une phase d'avance rapide (1,82 m/an) sur la période 2000-2005. Dans cette zone, les phases d'avancée et de recul sont donc fréquentes.

De plus, selon Battiau-Queney *et al.* (2006), le long des dunes d'Ecault le sable de la plage s'assèche très vite à marée basse et la mer atteint rarement le pied de la dune, en dehors des très grandes marées de vive-eau. La plage est adossée à une avant-dune colonisée par l'oyat et souvent précédée de dunes embryonnaires à végétation pionnière. Le front maritime de l'avant-dune présente un profil variable, contrôlé par une dynamique éolienne active.

Par contre, dans la partie sud du site étudié, où il n'y a pas d'habitation, le recul est plus rapide sur la période 1989-95 et peut dépasser localement 3 m/an, Les marques d'érosion sont présentes au contact de la plage et des sables dunaires (Figure IV-2 b). Dans cette partie il n'y a pas d'avant-dune mais une falaise sableuse exposant plusieurs niveaux de paléosols de type podzolique. La végétation arbustive se développe jusqu'en bordure de la falaise où elle est souvent déchaussée par l'érosion. La dynamique éolienne paraît inactive ou très faible. Les dunes embryonnaires sont rares et très éphémères. Par contre, immédiatement au sud de l'enrochement, on observe depuis peu, au pied de la falaise, une banquette basse toujours humide qui porte une végétation de type « schorre » plutôt que dunaire (Battiau-Queney *et al.*, 2006). Le haut de plage reste humide à marée basse, parcourue par des ruissellements plus ou moins riches en oxydes de fer.

Il existe donc une menace sur la ressource sédimentaire constituant la plage touristique. En effet, un abaissement potentiel de l'estran résultant d'une érosion marquée implique un risque de perte de sédiments alimentant la plage touristique. Or dans ce secteur, la saturation en eau quasi constante du sable de la plage limite l'alimentation des dunes par déflation éolienne. Cette saturation est liée à l'affleurement de la nappe superficielle sur l'estran (Battiau-Queney *et al.*, 2006). Elle est donc contrôlée par le fonctionnement du système hydrogéologique littoral et pré-littoral (Louche 1997). La modélisation entreprise dans ce travail de recherche vise à analyser les conséquences hydrogéologiques d'un abaissement du niveau de la nappe d'eau douce sur le fonctionnement sédimentaire du système plage-dune. Les objectifs de cette recherche sont donc de mieux comprendre d'une part, le rôle des nappes superficielles dans le phénomène d'humidité de surface des sédiments de la plage d'Hardelot et, d'autre part, de créer un outil d'aide à la décision pour l'aménagement d'un espace littoral à vocation touristique.



Figure IV-2. Cartes d'évolution du trait de côte au nord et au sud d'Hardelot-Plage de 1946 à 2005. *a : partie nord (dunes d'Ecault) b : partie sud (partie nord de dunes de chevalier Sansot)* 

Le système dunaire de la plage d'Hardelot présente un déficit d'alimentation lié à la saturation en eau quasi constante du sable de la plage (Battiau-Queney *et al.*, 2000 ; 2006, Tresca, 2006). L'humidité du sable diminue nettement la capacité de déflation (Bauer *et al.*,

2009; Davidson-Arnott et al., 2008; Wiggs et al., 2004; Namikas et Sherman, 1995; McKenna Neuman et Nickling, 1989) et prive donc le système dunaire de sa principale source d'alimentation sédimentaire. L'origine de cette saturation en eau de la plage résulte essentiellement de l'alimentation de la nappe des sables par résurgence de la nappe de la craie sous-jacente (Louche, 1997). Il semble donc que la dynamique hydrogéologique impacte la dynamique sédimentaire. Il s'agit de modéliser le fonctionnement de l'aquifère de la craie pour comprendre l'origine de son influence sur l'humidité des sables de la plage d'Hardelot. Cette modélisation hydrogéologique a été réalisée par couplage d'un SIG (ArcGIS9.3) avec un système de modélisation hydrogéologique (GMS 6.0). Ce travail de modélisation hydrodynamique s'appuie sur une géodatabase réalisée à partir de données issues de deux campagnes de mesures géophysiques (Louche 1997 et SPRL 2006) et d'un jeu de données topographiques IGN (Scan 25, 2001), géologique BRGM (carte géologique N°10-16, 2004 et données BSS), photographies aériennes PPIGE (orthophotographie NPDC, 2005). ArcGIS 9.3 a été utilisé comme plateforme SIG pour l'intégration des données et la représentation des résultats. GMS 6.0 a été alimenté par la géodatabase issue d'ArcGIS 9.3 puis les résultats de la modélisation ont ensuite été exportés pour être cartographiés sous ArcGIS 9.3. Compte tenu de la position littorale du secteur d'étude, une attention particulière a été portée sur l'interface eau douce-eau salée. Le modèle hydrodynamique calé et validé sous GMS 6.0 permet également d'envisager des scénarii d'aide à la décision pour l'élaboration d'une stratégie de gestion de la plage d'Hardelot.

## IV.6. Source de données

La zone retenue pour une représentation exacte du secteur retenu est limitée à l'Ouest par la mer de la Manche, au Sud par la rivière de la Canche. La source de données de cette zone a été extraite de la carte topographique(IGN), la carte géologique (BRGM, 2004), les forages (BRGM; Louche, 1997) et des résultats obtenus à l'issue de la campagne géophysique (SPRL, 2006).

## IV.6.1. Topographie

La réalisation d'une carte représentant la topographie de la surface est nécessaire pour la modélisation. Plus le MNT est précis, plus la modélisation hydrodynamique est liée à la réalité. Le MNT (Figure IV-10, a) utilisé dans cette étude est crée à partir de la carte topographique d'IGN.

## IV.6.2. Géologie

Celle-ci vient de l'interprétation de la carte géologique de BRGM et des forages consultés sur le site de BRGM (<u>http://infoterre.brgm.fr/viewer</u>)

## A. Données de BRGM

A partir des forages recensés sur le site du BRGM (Tableau IV-1), la distribution et l'épaisseur des formations géologiques rencontrées dans la zone d'étude ont pu être établies et permettre alors la construction des couches géologiques du modèle hydrodynamique. La localisation de ces forages est reportée en Figure IV-3.

Nome	Х	Y	Z	lithologie	Nome	Х	Y	Z	lithologie
	547751.0	2626349.0	30.0	sable		547844.0	2619730.0	5.0	marne
			27.0	craie	00162X0053P2			0.0	marne
00106X0022F1			17.0	marne		550368.0	2622211.0	121	sable
	548002.0	2625617.0	48.0	sable				120	craie
			45.0	craie				45	marne
00106X0041F1			5.0	marne	00106X0043PZ2			40	marne
	549520.0	2624325.0	82.0	sable		550558.0	2621740.0	141	sable
			81.0	craie				140	craie
00107X0211PZ4			12.5	marne				35	marne
	548766.0	2623135.0	59.5	sable	00106X0042PZ1			30	marne
			58.5	craie		551623.0	2614435.0	14	sable
00106X0001NEUF1			7.5	marne				7	craie
	548766.0	2618678.0	25.0	sable				-38	marne
			22.0	craie	00163X0032F2			-43	marne
00162X0054P3			17.0	marne		555256.0	2628626.0	67	sable
	546641.0	2619780.0	22.0	sable				66.0	craie
			21.0	craie				50.0	marne
			-5.0	marne	00107X0172PZ12			45.0	marne
00162X0052P1			-10	marne		554324.0	2629017.0	67.0	sable
	548615.0	2620627.0	31.0	sable				66.0	craie
			30.0	craie				50.0	marne
00162X0063S1			17.7	marne	00107X0180PZA7			45.0	marne
	549136.0	2621650.0	41.0	sable		553422.0	2629277.0	63.0	sable
			40.3	craie				62.0	craie
00107X0146F1			25.0	marne				50.0	marne
	549297.0	2619225.0	61.0	sable	00107X0174PZA1			45.0	marne
			60.3	craie	00164X0015/S	561192	2617245	34.4	sable
00163X0002P1			20.0	marne				33.4	craie
	548855.0	2620858.0	32.0	sable				12.4	marne
			31.3	craie				-112.6	marne
00106X0033F3			20.0	marne	00171X0001/F1	563145	2618588	40.1	alluvial
	550958.0	2625769.0	56.0	sable				36.7	craie
			55.0	craie				-12.9	marne
00107X0135F1			15.0	marne				-34.9	marne
	552851.0	2628666.0	59.0	sable	00171X0002/BEZI1	563784	52,6	52.6	alluvial
			58.0	craie	1			52,00	craie
00107X0173PZ14			40.0	marne	1			-50.4	marne

Chapitre IV : Application des SIG à l'élaboration d'un modèle hydrodynamique littoral

Nome	Х	Y	Z	lithologie	Nome	Х	Y	Z	lithologie
	551259.0	2624156.0	90.0	craie				-63	marne
00107X0210PZ3			25	marne	00115X0075/111111	567633	2624271	158	limon
-	551460.0	2623815.0	83.0	sable				136.7	craie
			82.0	craie				78.5	marne
			22.0	marne				68,00	marne
00107X0208PZ1			17.0	marne	00108X0029/F	561689	2626584	182.9	alluvial
	547844.0	2619730.0	24.0	sable				172.9	craie
00162X0053P2			23.0	craie				116.9	marne
				•				60.89	marne
					00108X0028/S	556898	2628290	18,00	argile
								12.5	marne
								-77,00	marne





Figure IV-3. Localisations des forages du BRGM dans la zone d'étude (Chaaban, 2011).

### **B.** Sondage

La reconnaissance lithologique précise des formations sur la plage d'Hardelot, la piézométrie et la détermination de l'étendue du biseau salée ont été extraites des résultats de la campagne géophysique (SPRL, 2006), déjà expliqué en détail dans le chapitre II.

## IV.6.3. Paramètres de simulation

Les valeurs piézométriques et de la transmissivité ont été obtenues à partir de la campagne de terrain (avril, 1995 – Louche, 1997). Elles sont récapitulées dans le tableau cidessous (Tableau IV-2) Pour la modélisation, il est nécessaire d'introduire des valeurs de perméabilité (m/j) et non pas de transmissivité. De plus, les débits prélevés dans les forages sont la forme de volume annuel. Ils ont ensuite été transformés en débit (m<sup>3</sup>/j) pour être conformes avec les paramètres du modèle. La Figure IV-4 montre la localisation des forages dans la zone d'étude.

Code BRGM	X	Y	cote piéz (m).	T *10 <sup>-4</sup>	Perméabilité	volume	dépit prélevé
	(L2E)	(L2E)	(NGF)	m2/s	m/j	prélevé m3	m3/j
00107X0125/P	54947	26254	48,42				
00107X0114	55138	26256		10	5,4	158369	433,89
00107X0203	55142	26256				221236	606,13
00107X0091	55323	26254	57,4				
00108X0117/P	55959	26259	76,55				
00107X0128	55001	26248	51,95				
00107X0132	55053	26248	52,09				
00107X0003/P	55431	26244	77,5				
00108X0005/GC1	55717	26248		100	72	1890006	5178,1
00108X0091/S1	55831	26243	69,15				
00108X0153	55853	26243		2	1,15		
00107X0210/PZ3	55125	26241		40	17,28		
00107X0208	55146	26238		170	73,44		
00107X0142	54895	26222	30,72				
00107X0139	54992	26225	45,78				
00108X0088/P	55581	26231	49				
00107X0146/F1	54913	26216	26,55			21635	59,27
00107X0212/PZH	55457	26219		120	34,56		
00107X0189/P2	54925	26211	26,2				
00108X0020/P	55689	26209	63,66				
00163X0002/P1	54929	26192		33	11,4	48695	133,41
00163X0097/PZH	55395	26193		40	15		
00163X0015/P	55500	26190		70	30,24		
00164X0075/PZH	55579	26201		33,7	14,55		
00164x0069/f1	55816	26200		10	4,32	48895	133,95
00163X0078/F2	54896	26176	14,989	136	39,17	234093	641,35

Chapitre I	V : Application	des SIG à l	l'élaboration d	'un modèle	hydrodynan	nique littoral
- · · · <b>r</b> · · · ·	· · <b>FF</b> · · · · · · · · ·					··· 1 ··· · · · · · · · · · · · · · · ·

Code BRGM	X	Y	cote piéz (m).	T *10 <sup>-4</sup>	Perméabilité	volume	dépit prélevé
	(L2E)	(L2E)	(NGF)	m2/s	m/j	prélevé m3	m3/j
00162X0005/S2	54879	26171	9,04				
00163X0001/P1	55134	26165		8	2,56	134851	368,45
00163X0032/F2	55162	26144	8,5	1000	508,2	2648554	7256,31
00163X0007/P	55312	26146	6,65				
00107X0006/P1	55347	26229	72,18				
00164X0009_P	56142	26199	83,92				
00164X0007_P	55965	26162	45,63				
00164X0030_P	55767	26155	30,25				
00164X0058_P1	55536	26140		150	16,2	217005	394,53
00164X0006_P	55958	26148	42,33				
00163X0045_F1	55217	26127	6,42			12986	35,57
00163X0006_TUB	55508	26136		250	27		
00164X0073/PZ1	55718	26136		440	76,03		
00164X0059_P1	56090	26126		300	51,84	142098	389,31
00164X0073/PZ1	55718	26136	4,2				

Tableau IV-2. : Tableau récapitulatif des forages et des paramètres de simulation.



Figure IV-4. Localisation des forages à partir desquels sont extraits les paramètres d'entrée du modèle hydrodynamique (Chaaban, 2011).

# **IV.7. Couplage SIG et GMS**

## IV.7.1. Méthodologie et modélisation conceptuelle du problème

La méthodologie mise en œuvre dans cette recherche s'appuie sur le couplage d'une modélisation géographique et d'une modélisation hydrodynamique (Figure IV-5). La première consiste à réaliser une géodatabase sous SIG (ArcGIS 9.3) et la seconde à traiter les données à références spatiales dans le système de modélisation hydrogéologique (GMS 6.0).



Figure IV-5 : Méthodologie utilisée pour la modélisation hydrogéologique spatialement distribuée (Chaaban *et al.*, 2010b).

## A. Modélisation géographique sous ArcGIS 9.3

La modélisation géographique consiste principalement en la réalisation d'une géodatabase permettant de structurer l'information à référence spatiale afin de pouvoir la traiter dans la phase de modélisation hydrodynamique sous GMS 6.0. Cette implémentation sous SIG est structurée en trois étapes qui consistent dans un premier temps à réaliser une modélisation conceptuelle du jeu de données à structurer, puis dans un deuxième temps à élaborer une modélisation physique et enfin dans un troisième temps à intégrer l'ensemble des données géographiques au sein d'une géodatabase (Figure IV-6).



Figure IV-6 : Les trois principales étapes pour mettre en place d'un SIG pour la modélisation hydrodynamique (Chaaban *et al.*, 2010b).

## A.I. Jeu de données géographiques compilées

Les données géographiques utilisées dans cette étude ont été compilées à partir de différentes sources (Tableau IV-3). La modélisation physique des données a été réalisée sous

ArcGIS 9.3 pour les données spatialisées et sous Access pour les données attributaires avant d'être compilées dans une géodatabase sous ArcGIS 9.3.

Type de données	Données géographiques ArcGIS 9.3	Données attributaires Access	Source
carte topographique	Raster	Non	IGN, carte à 1/25000, 2001
cartes géologiques	surfaciques	Non	BRGM, feuilles n°10 et 16 à 1/50 000, 2004
forages géologiques	ponctuelle	Oui	BRGM données BSS ( <u>http://infoterre.brgm.fr/viewer/</u> : accédé le 20-07- 2010)
orthophotographie	Raster	Non	PPIGE : orthophotographie NPDC, 2005
sondages électriques	ponctuelle	Oui	SPRL : sondages électriques, 2006
précipitations et températures	ponctuelle	Oui	Météo France, données climathèque, (1995 à 2006)
relevés piézométriques	ponctuelle	Oui	BRGM données BSS ( <u>http://infoterre.brgm.fr/viewer/</u> : accédé le 20-07- 2010) et Louche B., mission de terrain, 1997
mesures de transmissivité	ponctuelle	Oui	Louche B., mission de terrain, 1997

Tableau IV-3. Type de donnés géographiques et attributaires (Chaaban et al., 2010b).

# A.II. Modélisation conceptuelle des données à références spatiales utilisées

La modélisation géographique réalisée s'appuie sur la méthode HBDS (*Hypergraph Based Data Structure*) développée par François Bouillé (Bouillé, 1977) dans le cadre de sa thèse d'Etat pour créer « un modèle universel de banque de données, portable et simultanément partageable ». C'est une méthode de modélisation de la structure de données qui s'appuie sur la théorie des graphes et des hypergraphes (Berge, 1970). Le système HBDS s'articule autour de quatre types abstraits de données (Tableau IV-4) : classe, attribut, objet et lien (Bouillé, 1977, 1978). C'est donc un système de modélisation de base de données orienté objet (Demers, 2009). Le système de géodatabase développé sous ArcGIS (Zeiler, 1999) pour structurer et stocker les informations à références spatiales implémente le modèle HBDS ce qui le rend pertinent pour la modélisation conceptuelle préalable à la réalisation d'un MPD (Modélisation Physique des Données) sous ArcGIS 9.3 (Saint-Gérand, 2002, 2005).

De plus, le modèle HBDS permet de décrire avec précision la complexité d'un phénomène en autant d'informations thématiques et spatiales que nécessaires pour la structuration d'une base de données SIG (Saint-Gérand, 2002, 2005; Pirot *et al.*, 2002). Il permet également de clarifier le jeu de relations de l'ensemble des données (spatiales,

attributaires) à collecter (couches ou strates initiales) ou à créer sous SIG par géotraitement et/ou requête sur données attributaires.

Types abstrait de données HBDS (Bouillé, 1977)	Définitions
Objet	Il représente une entité du monde réel. C'est l'élément constituant de la classe
Attribut	Il est une « composantes d'un modèle conceptuel de données qui représente une caractéristique propre à une relation entre phénomènes » (A.A 2003, Vocabulaire de la Géomatique, )
Classe	Elle décrit un group d'entités (objets) ayant les mêmes propriétés (attributs) et une sémantique commune (ex ; on ne peux pas associer des routes et des rivières).
Lien	Il correspond à une relation qui associe des objets d'une même classe ou des classes distinctes, il est orienté et possède une sémantique et des attributs.

Tableau IV-4. Quatre types abstraits de données HBDS (Arab et al., 2005 ; Pirot et Saint Gerand, 2005).

Dans le cadre de cette recherche, un modèle conceptuel de données MCD a donc été créé selon la représentation hypergraphique de HBDS (Figure IV-7).



Figure IV-7. Modélisation des données géographiques (1/3):

MCD de la plage d'Hardelot selon la méthode HBDS (Chaaban et al., 2010b).

### A.III. Modélisation physique des données

Les données attributaires (Tableau IV-3) sont organisées sous forme de tables dans le logiciel Access. Elles regroupent les informations concernant les forages BRGM, les sondages électriques, les mesures de perméabilité, niveaux (toits et murs) des couches de craie, de sable et de tourbe et le MNT au format ascii (Figure IV-8, a). Les données spatialisées ont été directement intégrées dans ArcGIS 9.3 puis couplées à la base de données Access dans la géodatabase (Figure IV-8, b).





b) Sous ensemble du MPD des données géographiques dans ArcGIS 9.3.

### B. Traitements des données géographiques sous ArcGIS 9.3.

Plusieurs couches d'informations ont dû être réalisées pour compléter la géodatabase et alimenter le modèle hydrogéologique sous GMS. Elles ont été créées par interpolation spatiale à partir des données ponctuelles compilées dans la base de données Access (Figure IV-8, a) et de la digitalisation des courbes de niveaux du Scan 25 (

Figure IV-9). Cette étape de modélisation spatiale a été réalisée sous *Spatial Analyst* en utilisant le Krigeage ordinaire (Krige, 1951 ; Cressie, 1986 1990 ; Gratton, 2002) comme méthode d'interpolation en s'appuyant sur le variogramme de distribution pour définir le choix des paramètres et minimiser l'erreur de prédiction géostatistique. Cinq surfaces ont ainsi été calculées (Figure IV-10) :

- un MNT (d'après les données Scan 25), (Figure IV-10, a);
- la surface du toit de la craie (d'après les données BSS), (Figure IV-10, b) ;
- la surface du mur de la craie (d'après les données BSS), (Figure IV-10, c) ;
- la surface piézométrique initiale (d'après les cotes de 1995), (Figure IV-10, d) ;
- la variation spatiale de la perméabilité (d'après les données de transmissivité des forages BRGM (Tableau IV-2), (Figure IV-10, e).

L'ensemble de ces données permet de modéliser l'aquifère crayeux qui est subdivisé en une série de blocs à degré de fissuration variable séparés par des accidents tectoniques (Louche et Hallet, 2001). Cette structuration hydrogéologique de l'aquifère est clairement démontrée par la modélisation de la variation spatiale de la perméabilité (Figure IV-10, e).



Figure IV-9 : Localisations des acquisitions géophysiques (Chaaban et al., 2010b).


Figure IV-10. a) MNT d'après les courbes de niveau IGN Scan 25 ; b) Modélisation du toit de la craie; c) Modélisation du mur de la craie ; d) Modélisation de la surface piézométrique initiale (1995) ; e) Distribution spatiale de la perméabilité initiale de l'aquifère crayeux (Chaaban *et al.*, 2010b).

## IV.7.2. Modélisation hydrodynamique sous GMS

Après avoir mis en place la géodatabase sous ArcGIS 9.3, la modélisation des eaux souterraines a été effectuée sous GMS 6.0. Le modèle hydrodynamique a été réalisé avec le code de Modflow2000. Celui-ci a, tout d'abord, été calé en régime permanent pour l'année 1995. La modélisation en régime transitoire a été réalisée de 1995 à 2006 à l'aide des données du SIG et des données climatologiques permettant de calculer la pluie efficace. La simulation de l'évolution de l'interface eau douce / eau salée a ensuite été réalisée à l'aide du modèle hydrodispersif MT3d. La Figure IV-11 décrit le résumé des étapes de la modélisation en GMS.



Figure IV-11. Etapes de la modélisation hydrodynamique sous GMS (Chaaban et al., 2010a ; 2011).

# A. Modèle conceptuel et modèle numérique

Le domaine retenu (Figure IV-12) est repéré dans le système Lambert II étendu (qui est utilisé pour l'ensemble de la France métropolitaine) par son coin inférieur gauche (544740, 2612240) et supérieur droit (561740, 2629240). Les données relatives au domaine d'étude ont été incorporées au modèle : le nombre de couches, le type de couche, ainsi que les conditions aux limites. Dans ce travail, le modèle sera constitué de 3 couches : les sables, la tourbe et la craie.



Figure IV-12. Maillage du secteur d'étude, localisation des forages, sondages et conditions aux limites (Chaaban *et al.*, 2010a; 2011).

Pour la modélisation de l'ensemble de la zone, un maillage carré uniforme de 1 km de côté a été choisi (Figure IV-12). Par contre, un maillage beaucoup plus fin a été adopté dans la zone d'Hardelot-plage (maillage 100m\*100m). Les conditions aux limites de ce modèle concernent la mer avec une charge à potentiel imposé égale à 0, la rivière de la Canche étant assimilée à une rivière dont le niveau de l'eau varie entre 0 et 5 m NGF, les autres limites ont été considérées comme des limites à flux nul.

## A.I. Régime permanent

Après avoir introduit les données relatives au domaine d'étude, il faut instruire les paramètres de simulation. La première entrée dans le système est la surface de recharge. La pluie efficace a été calculée avec les précipitations journalières par la formule de Thornthwaite. La valeur obtenue est de  $4.27 \ 10^{-4} \text{ m/j}$ . Les valeurs de perméabilité de départ ont été fixées comme suit : pour le sable à $10^{-5}$  m/s, pour la tourbe à  $10^{-7}$  m/s dans tout le modèle, et pour la craie, elle varie de  $1.33 \ 10^{-5}$  à  $1.10^{-3}$  m/s. En fait l'aquifère crayeux est

subdivisé en une série de blocs à degré de fissuration variable séparés par des accidents tectoniques (Louche et Hallet, 2001) ; c'est pourquoi il y a une variation de la perméabilité.

## A.II. Calage du modèle

Le calage a consisté à modifier les paramètres hydrodynamiques du modèle afin d'obtenir une carte piézométrique calculée la plus proche possible de la carte initiale. Néanmoins les valeurs ajustées doivent rester conformes aux connaissances de terrain et bibliographiques. Comme l'aquifère de la craie est hétérogène (Louche *et al.*, 1997), la modification des valeurs de la perméabilité de celui-ci a joué un rôle important pour le calage du modèle.

En régime permanent, en admettant une stabilité du niveau piézométrique et des débits échangés avec l'extérieur, la variation du volume d'eau stocké dans le milieu poreux est nulle. Lorsque la piézométrie calculée semble correcte, il est nécessaire de vérifier cette loi de conservation de masse. Le code Modflow2000 permet d'accéder au bilan total en eau (Tableau IV-5).

	Flow In	Flow Out
Flux total	306605,89717579	-306605,8931524
Somme	Entrée - Sortie	% différence
Puits / sources	0,0040234057233	1,31224016e <sup>-6</sup>
Totale	0,00402341	1,31224016e <sup>-6</sup>

Tableau IV-5. Bilan hydrodynamique (m3/j) de l'ensemble du domaine modélisé.

La lecture de celui-ci permet l'acceptation du calage puisque le volume stocké est bien nul. On a vérifié point par point que la piézométrie calculée était peu différente de celle mesurée ponctuellement. Le report des écarts relatifs valeur mesurée - valeur calculée montre que ces derniers sont faibles. Dans l'ensemble, la piézométrie obtenue après calage (Figure IV-13) est tout à fait conforme à la piézométrie initiale (Figure IV-14, a).

Cette carte montre un écoulement global de la nappe vers le littoral et la vallée de la Canche. Les données piézométriques fournies par la compagne géophysique nous ont permis de déterminer les lignes piézométrique dans la zone littorale, en accord avec la carte piézométrique d'ensemble réalisée grâce à la compilation de différentes cartes réalisées notamment par Cottez et Dassonville (1965) et ; Beckelynck (1981) pour la région Nord-Pasde-Calais (Figure IV-14, b).



Figure IV-13. Cartes piézométriques de la nappe de la craie après le calage (Chaaban et al., 2010a ; 2011).



Figure IV-14. Carte piézométrique initiale de la nappe de la carie dans la zone d'étude.
a) carte piézométrique krigée de la nappe de la carie 1995 (Louche, 1997).
b) Allure générale de la surface piézométrique de la nappe de la craie (Becklynck, 1981 ; Cottez et Dassonville, 1965).

## A.III. Régime transitoire

Le modèle obtenu en 1995 a été considéré comme modèle de départ à partir duquel la modélisation en régime transitoire des années 1995 à 2006 a pu être réalisée. Les pluies efficaces (PEFF) ont été calculées avec les précipitations journalières par la formule de Thornthwaite (Tableau IV-6). Concernant les valeurs du coefficient d'emmagasinement introduite dans le modèle, elles varient de  $10^{-1}$  à  $10^{-2}$  lorsque la nappe de la craie est libre et de  $10^{-3}$  à  $10^{-5}$  en cas de captivité, le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère des sables est  $5.10^{-2}$ .

année	Précipitation moyenne (mm/an)	ETP(mm/an)	PEFF (mm/an)
1995	630,342	232,99	397,352
1996	535,3333	260,6166	274,7167
1997	697,3333	332,308	365,0253
1998	752,8333	330,26	422,5733
1999	807,166667	351,3	455,866667
2000	921,33333	340,15	581,18333
2001	913,3333	325,22	588,1133
2002	838,25	343,94	494,31
2003	579,8333	290,975	288,8583
2004	726,666	337,67	388,996
2005	684,5	332,275	352,225
2006	987	731	230

Tableau IV-6.	Pluies	efficaces	de	1995	à 2006	5.

FEMWATER est très adapté pour résoudre les problèmes d'intrusion d'eau salée (IV.4.2 Femwater) par contre il a besoin à minima de données relatives à deux compagnes de terrain ce qui n'est pas le cas dans cette étude. Afin de palier à ce manque de données, les calculs du transport et de la concentration en eau salée ont été réalisés à l'aide du code MT3D, utilisé de manière couplée avec le logiciel MODFLOW. Les données calculées par MODFLOW ont été introduites comme données initiales. Les concentrations en eau salée (Tableau IV-7) ont été considérées comme des paramètres initiaux de simulation dans MT3D. Dans ce modèle l'eau salée est transportée par convection-dispersion. La mer est la source de sel où la concentration est égale à 35 g /l (Dauvin, 2008) ; par contre cette concentration est de 0.025 g/l dans l'eau douce. Une valeur de dispersivité longitudinale variant de 10 à 20 m (pour le sable) et de 40 à 100 m (pour la craie) ; une porosité de 15% (pour le sable) et 5% (pour la craie) ont été appliquées à l'ensemble des mailles du modèle. La dispersivité transversale a été fixé entre 0,1 et 0,2 m.

Sondage	profondeur	Concentration	Sondage	profondeur	Concentration
		(g/l)			(g/l)
SE01	1.2	35.0	SE05	3.6	35.0
SE01	-1.6	0.025	SE05	-1.1	0.025
SE01	-3.1	35.0	SE05	-21.1	35.0
SE01	-5.3	0.025	SE06	5.8	35.0
SE01	-26.3	35.0	SE06	3.3	0.025
SE01	-76.3	35.0	SE06	1.3	35.0
SE02	1.0	35.0	SE06	-2.2	0.025
SE02	-1.2	0.025	SE06	-30.2	35.0
SE02	-21.2	0.025	SE07	0.0	35.0
SE03	2.7	35.0	SE07	-3.3	0.025
SE03	1.5	0.025	SE07	-20.3	35.0
SE03	-35.0	35.0	SE08	3.2	35.0
SE04	18.0	0.025	SE08	-1.1	0.025
SE04	-25.0	35.0	SE08	-21.1	35.0
SE09	5.6	35.0	SE11	2.4	35.0
SE09	3.6	0.025	SE11	0.4	0.025
SE09	-42.2	35.0	SE11	-1.1	35.0
SE10	1.0	35.0	SE11	-4.1	0.025
SE10	-0.6	0.025	SE11	-21.1	35.0
SE10	-2.0	35.0	SE12	6.7	0.025
SE10	-4.4	0.025	SE12	-53.3	35.0
SE10	-20.4	35.0			

Tableau IV-7. Concentrations en eau salée dans les douze sondages réalisés lors de la campagne géophysique (SPRL, 2006).

# IV.8. Résultats et discussions

#### IV.8.1. Comparaison de la carte piézométrique krigée et calculée

Dans l'ensemble, la piézométrie obtenue après calage (Figure IV-13) est tout à fait conforme à la piézométrie initiale (Figure IV-14), En effet, si l'on se réfère à des zones très caractéristiques comme par exemple Frencq, on retrouve bien sur la carte piézométrique calculée les forts gradients hydrauliques visibles sur la carte initiale. Il existe la même similitude dans toute la partie au Nord-Ouest de la Canche. Néanmoins quelques différences persistent. Tout d'abord dans la partie au Nord-Ouest de Lacres, la juxtaposition d'un dôme et d'une dépression piézométrique n'est pas représentée sur la carte calculée. Ceci est dû au trop faible nombre de mailles dans ce secteur. Une définition plus fine aurait permis une meilleure similitude avec la piézométrie de référence. Il en est de même pour la zone située à l'Ouest de Recques sur Course, où le fort gradient hydraulique n'a pu être retracé. Il est à noter que ces deux zones ne comprennent que très peu de points de mesure laissant aussi bien l'une ou l'autre des hypothèses acceptable. Au niveau de l'estuaire de la Canche, l'isopiézes 5 m est de plus faible extension calée que sur la carte krigée. Compte tenu des données de terrain, la meilleure représentation est celle obtenue par la carte piézométrique krigée. Pourtant, l'erreur sur la carte calculée étant de l'ordre de 1 m, elle peut être considérée comme acceptable. Par contre, dans l'ensemble, la carte piézométrique calculée semble beaucoup plus réaliste que la carte krigée.

#### IV.8.2. Distribution des eaux salées

Étant en milieu littoral à forte porosité (sédiments quaternaires et calcaires), il existe une intrusion d'eau salée dans les aquifères sableux et crayeux du littoral. La modélisation effectuée sous MT3d permet de spatialiser cette intrusion saline qui est affectée d'un gradient marqué vers l'est. Les variations spatiales des courbes iso-halines que l'on peut observer (Figure IV-15) correspondent aux variations de la concentration en sel dans l'eau (salée/douce), pour l'aquifère superficiel des sables et l'aquifère de la craie. Cette concentration diminue irrégulièrement de la côte vers l'intérieur des terres.



Figure IV-15 : Concentrations en sel dans les aquifères sableux et crayeux (Chaaban et al., 2010a, b ; 2011).

La lecture de ces cartes confirme que le biseau salé classique n'est pas systématiquement observé (Louche et Hallet, 2001). En fait les différents sondages de SPRL (2006) ont mis en évidence la présence d'eau salée, saumâtre ou douce à des profondeurs variées. A Hardelot-Plage, l'interface eau douce/eau salée ne répond pas donc au concept classique de biseau salé (Bear, 1972). Elle présente une allure plus complexe qui se rapproche fortement du concept de « doigt de gant » (Lebbe *et al.*, 1989).

## IV.8.3. Simulations et scénarii

Afin de tenter d'assécher la plage dans la partie Sud de Hardelot-Plage, 4 puits de pompage ont été implantés dans le modèle hydrodynamique. L'objectif est d'abaisser le niveau piézométrique de la nappe des sables qui est en l'état naturel à l'affleurement(SE09), par le pompage au sein de l'aquifère des sables. Pour vérifier si le pompage est une solution envisageable pour résoudre ce problème, plusieurs modèles de simulation ont été exécutés avec l'observation de l'évolution du rabattement mais également le suivi de l'intrusion marine liée au pompage. Un rabattement à 0,50 m semblant suffisant a été fixé. Les diverses simulations ont permis de faire varier le débit dans les quatre puits et de suivre l'influence sur le niveau piézométrique et sur la concentration de l'eau en sel. A un débit de 1 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>, les pompages ont impacté le niveau de la nappe. Cependant le rabattement est insuffisant. A un débit de 5m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>, l'allure des iso-pièzes au niveau de la zone de pompage a permis de visualiser un rabattement de la nappe variant de 0.4 m à 0.9 m. Ces valeurs de débit seraient donc suffisantes. Avec ces débits la concentration en sel a irrégulièrement diminué (Tableau IV-8). Ce tableau montre que l'eau pompée est de l'eau salée ou saumâtre.

Temps de pompage	Concentration en sel	Temps de pompage	Concentration en sel
0	23 g/l	3ans	8 g/l
30 jours	22 g/l	4ans	8 g/l
1an	15 g/l	5ans	8 g/l
2ans	10 g/l	10ans	4 g/l

Tableau IV-8 : changement de la concentration en sel pendant le pompage.

# IV.8.4. Influence de la tourbe

Afin de vérifier l'influence de la tourbe sur la piézométrie, la modélisation a été effectuée avec absence ou présence de tourbe (Figure IV-16, Figure IV-17). Lorsque la tourbe est absente, les pompages influencent peu la piézométrie. Par contre, en présence de tourbe, les cônes de rabattement sont bien visibles surtout au droit de ce puits où la présence de tourbe est importante (Figure IV-16). Il est évident alors que la présence de tourbe permet

d'individualiser une série de petits aquifères. Donc l'aquifère des sables est un aquifère hétérogène multicouche ayant une perméabilité complexe.

Par contre lorsque la tourbe est absente, on a un aquifère de grande extension. Pour qu'un pompage ait une influence notable sur la piézométrie, il faudrait des débits de pompage très importants.



Figure IV-16 : Influence de la présence de tourbe sur la piézométrie littorale (Chaaban et al., 2010a, b ; 2011).

De la même façon quand la tourbe est absente, les pompages influencent peu la concentration en sel, alors qu'en présence de tourbe, les cônes de concentration en sel sont visibles sur les cartes ci-dessous (Figure IV-17).



Figure IV-17 : Influence de la présence de tourbe sur les concentrations en sel (Chaaban et al., 2010a, b ; 2011).

Cette influence marquée de la tourbe tant sur la piézométrie que sur les concentrations en sel s'explique par les propriétés hydrophiles de ce matériau organique. En effet, les formations tourbeuses peuvent atteindre et dépasser 90 % de leur volume en eau (Porteret, 2005). Lorsque l'intensité des précipitations est forte (Cubizolle, 2007), une partie de l'eau ne peut s'infiltrer dans la tourbe du fait de sa faible conductivité hydraulique. En conséquence la tourbe joue un rôle important en raison de sa capacité de stockage et de son comportement hydrologique qui sont très différents de ceux des aquifères sableux et crayeux de son environnement. De plus, ce comportement présente une variabilité spatiale très aléatoire qui est fonction de la distribution spatiale et de l'épaisseur des lentilles de tourbes piégées dans les sables de la plage d'Hardelot. Ce comportement hydrologique particulier explique également le problème du sable mouillé de la plage.

En conséquence la tourbe joue un rôle important dû à l'eau douce ou salée qu'elle piège et qui engendre le problème du sable mouillé de la plage. Dans la partie sud d'Hardelot-Plage la tourbe est présente dans les sondages SE3, SE9 et SE10. Celle-ci (la tourbe) constitue une limite ayant une très faible perméabilité, son retrait ou son percement permettra donc d'accélérer l'infiltration de l'eau douce.

# IV.8.5. Distribution de la perméabilité de l'aquifère crayeux

Au départ, un essai de krigeage des transmissivité acquises par pompage d'essai a été effectué. Cependant, compte tenu de l'hétérogénéité des données, l'ajustement du variogramme expérimental aux modèles théoriques n'a pu être effectué. Aussi, afin d'avoir une valeur de perméabilité dans chacune des mailles, les valeurs initiales ont été pondérées. Néanmoins, pour obtenir une répartition des potentiels hydrauliques qui soit comparable à l'état initial, les transmissivités initiales ont dû être modifiées. Même si pour certaines valeurs la différence entre la donnée expérimentale et la valeur obtenue par maille après le calage est parfois très importante, cette divergence est expliquée par la différence d'échelle d'investigation. Le calage effectué, permet d'établir une carte de répartition des perméabilités (Figure IV-18).



Figure IV-18. Carte de perméabilité de l'aquifère crayeux obtenue après le calage (Chaaban et al., 2011).

Celles-ci varient de 1,1.10<sup>-5</sup> à 1.10<sup>-3</sup> m.s<sup>-1</sup>, Il y a donc juxtaposition de zones à très forte transmissivité et de zones très peu transmissives dans un secteur relativement petit puisque sa superficie est d'environ 300 km<sup>2</sup>. Les fortes valeurs de perméabilité correspondent d'après les différentes observations de terrain, à des zones à fracturation développée, voire à des secteurs où des indices de dissolution de la craie ont été constatés dans certains secteurs (Louche 1997). A contrario, les zones à très faible perméabilité sont tout à fait conformes aux gradients hydrauliques très forts ainsi qu'aux données de terrain. (Par exemple autour de Frencq, Figure IV-13). En fait, dans ce secteur, la craie est divisée en blocs tectoniques, les défauts agissent comme des failles constituant une limite semi étanche ou de flux nul.

# **IV.9.** Conclusion

La méthodologie utilisée dans ce chapitre a démontré l'importance des différentes phases de modélisation tout d'abord conceptuelle, puis physique sous ArcGIS 9.3, puis hydrodynamique sous GMS 6.0 et enfin physique avec la modélisation des concentrations en sels sous MT3D. Les résultats obtenus et plus particulièrement ceux issus de la modélisation hydrodynamique et hydrodispersive ont permis de confirmer que la saturation en eau observée dans la partie Sud de la plage d'Hardelot est bien liée à la proximité de la nappe superficielle. A cet endroit, l'aquifère des sables est en continuité hydraulique avec la nappe de la craie sous-jacente. De plus, dans ce secteur, l'aquifère superficiel est caractérisé par la présence de lentilles de tourbe dont le comportement hydrophile explique la rétention d'eau de mer en surface dans les formations sableuses ainsi que la répartition complexe de l'interface eau douce – eau salée sur le littoral d'Hardelot..

Les diverses simulations entreprises avec la réalisation de forages captant l'aquifère des sables ont permis de démontrer que le rabattement de la nappe de 0.5 m, permettant un assèchement de la plage, nécessiterait un pompage continu avec un débit de 5 m<sup>3</sup>/h. Ceci n'est valable que lorsque la tourbe est intercalée dans le sable. En l'absence de tourbe, les débits de pompages sont bien trop importants pour envisager cette solution.

# **Conclusion générale**

Ce travail a montré l'intérêt de l'utilisation des SIG pour l'élaboration de bases données spatialement distribuées utilisées dans une chaine de traitement numérique pour expliquer et modéliser des phénomènes environnementaux.

Cette recherche, portant sur l'apport potentiel des SIG pour la gestion de la mobilité et l'érosion du trait de côte dans le nord de France (dunes d'Ecault, dunes du Chevalier Sansot et dunes de Camiers), avait pour principal objectif de concevoir des modèles explicatifs et des méthodologies d'investigation en utilisant un SIG (ArcGIS 9.3, ESRI) pour créer un outil d'aide à la décision en matière d'aménagement littoral dans une optique de développement durable. Le travail consistait à mesurer les évolutions du linéaire côtier pour la zone comprise entre les dunes d'Ecault (nord d'Hardelot-Plage) et les dunes de Camiers (rive nord de l'estuaire de Canche) en s'appuyant sur des photographies aériennes de 1946, 1947, 1955, 1963, 1971, 1976 et 1980, 1983, 1987, 1989, 1995, 1997,2000, et 2005. Un des objectifs était de mieux cerner le rôle de la nappe d'eau superficielle dans le phénomène global d'érosion à Hardelot-Plage.

Le chapitre III a présenté une méthodologie pour la quantification des changements du trait de côte à l'aide des SIG (ArcGIS 9.3.1) en utilisant des photographies aériennes. Nous avons appliqué cette méthodologie dans les secteurs Hardelot-Plage et Sainte Cécile-Plage où se localisent les dunes d'Ecault, les dunes du Chevalier Sansot et les dunes de Camiers. La période d'étude s'est étendue de 1946 à 2005 où des photographies aériennes fournies par l'IGN ont été utilisées. L'orthophotographie PPIGE(2005), géoréférencée en projection Lambert II étendu avec une résolution de 0,5m, a été utilisée comme référenciel géographique. Cette méthodologie comprenait notamment la numérisation des clichés IGN dans trois groupes différents de résolution variant selon l'échelle de la photographie aérienne et la résolution de photographie déjà géoréférencée. Ensuite, le géoréférencée et le géotraitement de données ont été réalisés dans la plateforme d'ArcGIS. 292 transects perpendiculaires au trait de côte ont été utilisés pour estimer l'érosion côtière et en déduire le taux de recule.

Les points marquant de ce chapitre sont :

- L'utilisation de la plate-forme ArcGIS 9.3.1 assure le géoréférencement et le mosaïquage des photographies aériennes par plan de vol pour obtenir une digitalisation du trait de côte avec une résolution et un positionnement optimaux.
- L'emploi d'ArcGIS *ModelBuilder* fournit un ensemble d'outils pour la construction de divers types de modèles de géotraitement et contribue à résoudre des problèmes compliqués.
- La marge d'erreurs générée par la méthodologie proposée est de ± 10 m. Les erreurs sont liées à la résolution du document de référence et des images numérisées mais surtout à la difficulté de définir des invariants géographiques en très grand nombre sur l'espace littoral.
- Deux cas distincts, à propos de l'évolution littorale entre 1947 et 2005, ont été observés le long du rivage entre le nord d'Hardelot et l'estuaire de la Canche. D'une part, le processus de recul de la ligne de rivage intéresse, d'une manière générale, l'ensemble du trait de côte des dunes d'Ecault et des dunes de Chevalier Sansot à des vitesses varient de 0,43 m/an pour atteindre 5,8 m/an en rive nord de l'estuaire de la Becque. Par contre la valeur moyenne d'avancée a varié de 0,23 à 2,47 m/an. D'autre part, l'évolution du trait de côte des dunes de Camiers (estuaire de la Canche) était très importante avec une moyenne de recul atteignant 8,45 m/an entre 1980 et 1983, alors que la moyenne de l'avancée atteignait 14,36 m/an entre 1947 et 1955.
- La dernière observation, entre 2000 et 2005, a montré que la ligne de référence dans la zone d'étude a évolué positivement avec une moyenne allant de 1,1 à 4,66 m/an (86% des transects soit 250 transects). 13% des transects (soit 39 transects) n'ont pas évolué en raison de l'enrochement construit le long de la plage. Cependant 1% de transects (soit 3 transects correspondant à l'estuaire de la Becque) ont présenté un recul de 1,06 m/an.

Le chapitre IV conclu ce travail de recherche par une la modélisation hydrogéologique du secteur de la plage d'Hardelot qui est principalement basée sur la spatialisation d'un jeu de données environnementales mobilisant plusieurs sources d'information géographique. La méthodologie utilisée a démontré l'importance des différentes phases de modélisation tout d'abord conceptuelle, puis physique sous ArcGIS 9.3, puis hydrodynamique sous GMS 6.0 et enfin physique avec la modélisation des concentrations en sels sous MT3d. Les résultats obtenus et plus particulièrement ceux issus de la modélisation hydrodynamique et hydrodispersive ont permis de confirmer que la saturation en eau observée dans la partie sud d'Hardelot est bien liée à la proximité de la nappe d'eau douce superficielle. L'aquifère des sables est en continuité hydraulique avec la nappe de la craie sous-jacente. De plus, ce secteur est caractérisé par la présence de lentilles de tourbe dont le comportement hydrophile explique la rétention d'eau de mer en surface dans les formations sableuses ainsi que la répartition complexe de l'interface eau douce – eau salée sur le littoral d'Hardelot. Les diverses simulations entreprises avec la réalisation de forages captant l'aquifère des sables ont permis de démontrer que le rabattement de la nappe de 0.5 m, permettant un assèchement de la plage, nécessiterait un pompage continu avec un débit de 5 m<sup>3</sup>/h. Ceci n'est valable que lorsque la tourbe est intercalée dans le sable. En l'absence de tourbe, les débits de pompages sont bien trop importants pour envisager cette solution. La définition précise de la localisation de la tourbe dans le secteur sud de la plage d'Hardelot sera donc nécessaire à la prise de décision. Les résultats pourraient être nettement améliorés par l'intégration de données de meilleure résolution spatiale tant topographiques (DTM Nextmap) que géologiques (sondages et mesures géophysiques) afin d'améliorer la fiabilité de l'aide à la décision pour la gestion du massif dunaire d'Hardelot-Plage.

La méthodologie développée dans cette thèse présente un caractère générique qui la rend applicable à d'autres zones littorales. En effet, les travaux de modélisation, de géotraitements, d'analyse et de simulation sont facilement adaptables à d'autres secteurs géographiques pour peu que l'on dispose de données similaires. Le protocole de recherche utilisé dans ce travail de thèse a démontré sa pertinence en matière d'aide à la gestion des ressources hydrologiques et sédimentologiques d'une zone littorale complexe. Cet outil de recherche est donc aussi potentiellement une solution technique transposable dans les services SIG des collectivités territoriales désireuses de préserver leurs ressources environnementales sur le littoral.

**Références bibliographiques** 

- Anfuso, G., Martinez del Pozo, J.A. (2005). Towards management of coastal erosion problems and human structure impacts using GIS tools: case study in Ragusa Province, Southern Sicily, Italy. Environmental Geology. 48 (4-5), 646 659.
- Aanfuso, G., Marti'nez Del Pozo, J. A. (2009). Assessment of Coastal Vulnerability Through the Use of GIS Tools. Environmental Management, 43, 533-545.
- Abedini, M. J., Nasseri, M., Ansari, A. (2008). Cluster-based ordinary kriging of piezometric head in West Texas/New Mexico Testing of hypothesis. Journal of Hydrology, 351 (3-4), 360–36.
- Aernouts, D., Héquette, A. (2006). L'évolution du rivage et des petits-fonds en baie de Wissant pendant le XXe siècle (Pas-de-Calais, France)/Coastline and shoreface evolution in the Bay of Wissant (Pas-de-Calais, France). Géomorphologie : relief, processus, environnement, 2006, n° 1, p., 1, 49-64.
- Ali, T. A. (2003). New methods for positional quality assessment and change analysis of shoreline features. PhD thesis, The Ohio State University.
- Ali, T., Mehrabian, A. (2009). A novel computational paradigm for creating a Triangular Irregular Network (TIN) from LiDAR data. Nonlinear Analysis, 71 (12), e624-e629.
- Anfuso, G., Martínez del Pozo, J. A. (2005). Towards management of coastal erosion problems and human structure impacts using GIS tools: case study in Ragusa Province, Southern Sicily, Italy. Environmental Geology, 48, 646-659.
- Anon, (2000). SSG Software. The Scientific Software Group, Washington http://www.scisoftware.com.
- Arab, R., Minelli, F., Pirot, F. (2005). De la modélisation à l'implémentation : proposition d'une méthodologie pour le recensement des mares dans le Nord-Pas-de-Calais. Conférence Francophone ESRI ,5-6 Octobre 2005, Issy-les-Moulineaux,France .
- Armaroli, C., Ciavola, P., Balouin, Y., Gatti, M. (2006). An integrated study of shoreline variability using GIS and ARGUS techniques. Journal of Coastal Research. SI 39 (Proccedings of the 8th International Coastal Symposium), 473 477. Itajaí, SC, Brazil, ISSN0749-0208.
- Arnold, L. L., Zandbergen, P. (2011). Positional accuracy of the Wide Area Augmentation System in consumer-grade GPS units . Computers and Geosciences , 37 (7), 883–89.
- Bakkali, S., Bouyalaoui, G. (2005). Essai d'optimisation de la capacite de retenue d'eau d'un lac par caracterisation geophysique du recouvrement argileux. African Journal of Science and Technology (AJST), 6 (2), 12 2.

- Barge, O., Saligney, L. (2003, September 8-13). Redressement de photos obliques, géoréférencement. Atelier. Tours, France: Ecole thématique : Système à référence spatiale et Archéologie.
- Bartlett, D., Smith, J. (2005). GIS for Coastal Zone Management. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Battiau-Queney, Y., Billet, J. F., Chaverot, S., Lanoy-Ratel, P. (2003). Recent shoreline mobility and geomorphologic evolution of macrotidal sandy beaches in the north of France. Marine Geology, 194, 31-45.
- Battiau-Queney, Y., Fauchois, J., Lanoy-Ratel, P., Seguin, A. (1995). Un patrimoine paysager à protéger : les dunes littorales de Merlimont et de Berck (Pas-de-Calais). Hommes et Terres du Nord (1-2), 21-30.
- Battiau-Queney, Y., Malaterre, G., Tresca, A. (2006). Expertise géomorphologique de la plage de Neufchatel-Hardelot. Rapport de synthèse. Université des Sciences et Technologie de Lille.
- Bauer, B.O., Davidson-Arnott, R.G.D., Hesp, P.A., Namikas, S.L., Ollerhead, J., Walker, I.J. (2009). Aeolian sediment transport on a beach: Surface moisture, wind fetch, and mean transport. Geomorphology 105 (1-2), pp. 106-116.
- Baulig, H. (1956). Vocabulaire franco -anglo -allemand de géomorphologie. Paris, France: Les Belles Lettres.
- Bear, J. (1972). Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier Eds. 764p.
- Beckelynck, J. (1981). Traitement régionalisé des paramètres contribuant à la gestion des nappes. Application à la modélisation de la nappe de la craie dans bassin de l'Aa et de la moyenne Lys, thèse 3éme cycle. univ. Lille1.
- Berge, C. (1970). Théorie des graphes et des hypergraphes. Editeur : Dunod, Paris , 480.
- Bertrand, M., Margron, M., Piraud, M. (1989). Mesure et calcul de la perméabilité des craies cénomaniennes. Le Tunnel sous la Manche: géologie et géotechnique. actes des journées d'études organisées par l'Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris, 31 mailer juin 1989, Paris, 7p.
- Bird, E. C. (1993). Submerging coasts: the effects of a rising sea level on coastal environments. Wiley.
- Boak, E. H., Turner, I. L. (2005). Shoreline definition and detection: A review. Journal of Coastal Research , 21 (4), 688 703.
- Bouillé, F. (1978). Hypergraphes et structures de données cartographiques ; le système HBDS. 9th International Conference of the I.C.A., College Park, University of Maryland, USA, 26 July 2 August, 1978, 16.

- Bouillé, F. (1977). Un modèle universel de banque de données simultanément portable, répartie, Thèse d'Etat. Paris, Université Pierre et Marie Curie-Paris-vi,France.
- Bowker, G. (1988). Une réalité bien ordonnée : aspects du développement de Schlumberger, 1920-1939. (N.-s.-S. (. Centre de recherche sur la culture technique, Éd.)
- Bracq, P., Colbeaux, J. P., Maqsoud, A., Delay, F., Crampon, N. (1992). Vers une nouvelle définition du concept de bassin versant en pays crayeux fracturé à partir de l'étude hydrogéologique du système aquifère des sources de la Lys. 5ème Colloque Hydrologie en .Pays Calcaire Fissurés Proceed, Neuchâtel, Suisse, Ann. Sc. Univ. Besançon. 1, 77-87.
- BRGM. (2004). Cartes géologiques N°10 et 16 à 1/50 000 format "vecteurs", © BRGM, 2004 Bureau de recherches géologiques et minières, France.
- Briquet, A. (1930). Le littoral du Nord de la France et son évolution morphologique. Paris: Armand Colin, 439p.
- Brochet; P., Gerbier N. (1974). L'évapotranspiration. Aspects agrométéorologique. Evaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle. Monographie Météorologie Nationale, n°65, Paris, 65 p.
- Brodie, R. S. (1999). Integrating GIS and RDBMS technologies during construction of a regional groundwater model. Environ Model Softw , 14, 119-128.
- Brus, D. J., Heuvelink, G. B. (2007). Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables. Geoderma, 138 (1-2), 86-95.
- Burrough, P. A., Mcdonnell, R. A. (1998). Principles of Geographical Information Systems. New York: Oxford University Press, 356p.
- Byrnes M. R., Hiland M.W. (1994). Shoreline position and nearshore bathymetric change. In (Kraus N.C., Gorman L.T., Pope J., Eds) Kings Bay coastal and estuarine monitoring and evaluation program. Army Corps of Engineers Technical Report, CERC-94-9, p. 61 143.
- Byrnes, M. R., Hiland, M. W. (1995). Large-scale sediment transport patterns on the continental shelf and influence on shoreline response: St. Andrew Sound, Georgia to Nassau Sound, Florida, USA. Marine Geology, 126 (1-4), 19-43.
- Carrera-hernandez, JJ., Gaskin, SJ. (2006). The groundwater modeling tool for GRASS (GMTG): open source groundwater flow modeling. Computers and Geosciences, 32, 339–351
- Carter, R. (1988). Coastal environments : An introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines. Academic Press.
- Carter, R. W., Woodroffe, C. D. (1994). Coastal evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 517p.

- Casson, B., Delacourt, C., Baratoux, D., Allemand, P. (2003). Seventeen years of the "La Clapie`re" landslide evolution analysed from ortho-rectified aerial photographs. Engineering Geology , 68, 123–139.
- Chaaban, F., Darwishe, H., Louche, B., Battiau-Queney, Y., Masson, E., El Khattabi, J., Carlier, E. (2011). Geographical information system approach for environmental management in coastal area (Hardelot-Plage, France). Environmental Earth Sciences, DOI: 10.1007/s12665-011-1080-2, 11p.
- Chaaban, F., Louche, B., Masson, E., El Khattabi, J., Darwishe, H., Battiau-Quene, Y., Carlier, E. (2010a). Application of GIS and GMS for coastal management (North of France). American Water Resources Association (AWRA) 2010, Spring Specialty Conference « Geographic Information Systems (GIS) and Water Resources VI, (p. 6). Orlando, Florida.
- Chaaban, F., Masson, E., Darwishe, H., Louche, B., El Khattabi, J., Battiau-Queney, Y., Carlier. (2010b). SIG et modélisation hydrogéologique littorale : application à la plage d'Hardelot (Pas-de-Calais, France). Géomatique expert (76), 58-67.
- Changjiang, L., Zhiming, L., Tuhua, M., Xingsheng, Z. (2009). A simple kriging method incorporating multiscale measurements in geochemical surve. Journal of Geochemical Exploration, 101 (2), 147-15.
- Chaverot, S. (2006). Impact des variations récentes des conditions météo-marines sur les littoraux meubles du Nord-Pas-de-Calais, Thèse de doctorat, ULCO, 266 p.
- Chiang, W. H. (2005). 3D-Groundwater modeling with PMWIN: a simulation system for modeling groundwater flow and transport processes. Springer, Heidelberg doi: 10.1007/ 3-540-27592-4.
- Clique, P. M., Lepetit, J. P. (1986). Catalogue sédimentologique des côtes françaises: côtes de la mer du Nord et de la Manche,. Paris: Eyrolles.
- Cooper, J. A., McLaughlin, S. (1998). Contemporary multidisciplinary approaches to coastal classification and environmental risk analysis. Journal of Coastal Research , 14(2), 512-524.
- Coorg, S., Master, N., Teller, S. (1998). Acquisition of a Large Pose-Mosaic Dataset. In CVPR , 872–878.
- Cottez, C., Dassonville, G. (1965). Carte de la surface piézométrique de la nappe de la craie dans la région du Nord(1/200 000), BRGM, France.
- Coyne, M. A., Fletcher, C. H., Richmond, B. M. (1999). Mapping coastal erosion hazard areas in hawaii: observations and errors. Journal of Coastal Research , 28(Special Issue), 171-184.

- Crampon, N., Roux, J.C., Bracq, P. (1993). Hydrogeology of the chalk in France. In: Hydrogeology of the Chalk of North-West Europe, Oxford University Press, Oxford (1993), pp. 113–152.
- Crowell, M., Leatherman, S. P., Buckley, M. (1991). Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. Journal of coastal research, 7(3), 839-852.
- Crowell, M., Leatherman, S. P., Buckley, M. (1993). Shore-line change rate analysis: long term versus short term data. Shore and Beach , 61(2), 13-20.
- Crowell, M., Leatherman, S. P., Douglas, B. C. (2005). Erosion: Historical Analysis and Forecasting. Pg 428-432. In: Encyclopedia of Coastal Science (Ed Schwartz, M.L), Springer, Netherlands .
- Crowell, M., Leikin, H., Buckley, M. (1999). Evaluation of coastal erosion hazards study: an overview. Coastal Research , 1, 2-9.
- Cressie, N. (1986). Kriging nonstationary data. Journal of the American Statistical Association, 81(395), p. 625-634.
- Cressie, N. (1990). The origins of kriging. Mathematical Geology, 22(3), p. 239-252.
- Cubizolle, H. (éd.), 2007. Origine, fonctionnement et conservation des tourbières. Actes du colloque du château de Goutelas (42), octobre 2005. Publications de l'Université de Saint-Etienne, 381 p.
- Darwishe, H., Louche, B., Masson, E., El kattabi, J., Chaaban, F., Carlier, E. (2009). Système d'information géographique pour une meilleure compréhension et gestion des données de modélisation hydrogéologique. Conférences Francophones - ESRI France. versailles, France.
- Darwishe, H., Masson, E., Louche, B., El khattabi, J., Chaaban, F., Carlier, E. (2010). Coupling GIS with Hydrogeological Modeling, case study: Chalk aquifer of Northern France. American Water Resources Association (AWRA) 2010, Spring Specialty Conference « Geographic Information Systems (GIS) and Water Resources VI. Orlando, Florida.
- Davidson-Arnott, R.G.D., Yang, Y., Ollerhead, J., Hesp, P.A., Walker, I.J. (2008). The effects of surface moisture on aeolian sediment transport threshold and mass flux on a beach. Earth Surface Processes and Landforms 33 (1), pp. 55-74.
- Dauvin, J. C. (2008). The main characteristics, problems, and prospects for western European coastal areas,. Marine Pollution Bulletin, 57, 22-40.
- Demangeon, A. (1905). "La plaine picarde : Picardie, Artois, Cambrésis, Beauvaisi. Paris: Armand Colin, 496p.
- Demers, M. N. (2009). Fundamentals of Geographic information systems. 4 edition, Wiley, 444 p.

- Didier, M. (1990). Utilité et valeur de l'information géographique. Paris: Economica, 255 p.
- Diersch, H.-J.G., (2009). FEFLOW finite element subsurface flow and transport simulation system, users manual. WASY Institute for Water Resources Planning and Systems Research, Berlin, Germany, 202 p.
- Dolan, R., Vincent, C. L. (1972). Analysis of shoreline changes, cape hatteras, North carolina. Modern Geology, 3, 143-149.
- Dolan, R., Fenster, M. S., Holme, S. J. (1991). Temporal analysis of shoreline recession and accretion. J Coastal Research , 7, 723-744.
- Dolan, R., Hayden, B. P., May, P., May, S. (1980). The reliability of shoreline change measurements of aerial photographs. Shore and Beach , 48 (4), 22-29.
- Dolan, R., Hayden, B., Heywood, J. (1978). A new photogrammetric method for determining shoreline erosion. Coastal Engineering , 2, 21-39.
- Dolan, R., Hayden, B., May, P., Suzette, R. (1980). The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. Shore and Beach , 48, 22-29.
- Dolan, R., Hayden, B., Rea, C., Heywood, J. (1979). Shoreline erosion rates along the middle Atlantic coast of the United States. Geology , 7, 602-606.
- Douglas, B. C., Crowell, M., Leatherman, S. P. (1998). Considerations for shoreline position prediction. Coastal Research , 14(3), 10255-1033.
- Dupont, S., Berthod, M. (1994). Interferometrie radar et deroulement de phase. inria-00074333, version 1.
- Durand, P. (1998). Cinématique d'un littoral sableux à partir de photographies aériennes et de cartes topographiques. Exemple du littoral d'Argelès-Plage à Saint-Cyprien (Roussillon, France). /Kinematics of a sandy shoreline deduced from the analysis of aerial photographs and topographic maps. Example of the beach extending from Argelès-Plage to Saint-Cyprien (Roussillon, France). In: Géomorphologie : relief, processus, environnement. juillet , 4 (2), 155-166.
- Durand P. (2000) Approche méthodologique pour l'analyse de l'évolution des littoraux sableux par photo-interprétation. Photo-Interprétation, n°2000/1-2, p. 3 18.
- Duval, J. (1973). Productivité primaire en Baie de Canche. Thèse 3ém cucle, Université Lille 1, 90p.
- EL Morjani, Z. (2003). Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale : application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc). Thèse de doctorat, université de Genève. Terre et Environnement Vol. 42, 300p.

- Elizabeth, H., Boak, H., Turner, I. L. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. Journal of Coastal Research , 21 (4), 688 703.
- EMRL, (2005). Environmental Modeling Research Laboratory, GMS 6.0 Tutorials. v1 , 1-136. Brigham Young University-Utah-USA.
- ECGL, Engineering Computer Graphics Laboratory. (1996). The Department of Defense Groundwater Modeling System Reference Manual. Brigham Young University, Provo, UT.
- ESRI. (2010). ArcGIS Desktop 10.0 Help. Consulté le juin 21, 2010, sur ArcGIS Resources Center: http://help.arcgis.com/fr/arcgisdesktop/10.0/help/index.html
- ESRI. (2009, avril 25). ArcGIS Desktop 9.3 Help. Consulté le avril 13, 2011, sur ArcGIS Resource Center: http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3
- ESRI. (2008). ArcGIS: A Complete Integrated System. Récupéré sur Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands, California (2008) <a href="http://esri.com/arcgis">http://esri.com/arcgis</a>>.
- EUCC-France. (2010). Atelier de terrain en baie de Canche: Pour une gestion intégrée et un développement durable de l'estuaire. Compte-rendu de l'atelier EUCC-France des 7 et 8 octobre 2010, (p. 14). organisé par Yvonne Battiau-Queney, présidente d'EUCC-France, Valérie Chérigié, directrice du Syndicat mixte pour le SAGE de la Canche, Marie-Dominique Monbrun et Vincent Toison, de l'Agence pour les Aires marines protégées.
- Fauchois, J. (1998). L'intérêt de la cartographie à grande échelle dans l'étude géomorphologique des littoraux dunaires du Nord-Pas-de-Calais; Thèse de doctorat. Univ, LilleI.
- Faye, I. B. (2010). Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photointerprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes. Thèse, Université de Bretagne occidentale - Brest, volume1, 321p.
- Faye, I. B., Hénaff, A., Gourmelon, F., Diaw, A. T. (2008). Évolution du trait de côte à Nouakchott (Mauritanie) de 1954 à 2005 par photo-interprétation. Norois [En ligne], 208 | 2008/3, mis en ligne le : 01 novembre 2010, URL : http://norois.revues.org/index2146.html, 11-27.
- Fenster M. S., Dolan R., Elder J. F. (1993). A new method for predicting shoreline positions from historical data. Journal of Coastal Research, 9 (1), 147 171.
- Finkl, C. W., Becerra, J. E., Achatz, V., Andrews, J. L. (2008). Geomorphological Mapping along the Upper Southeast Florida Atlantic Continental Platform; I: Mapping Units, Symbolization and Geographic Information System Presentation of Interpreted Seafloor Topograph. Journal of Coastal Research, 6 (24), 1388–1417.

- Fisher, J., Overton, M. (1994). Interpretation of shoreline position from aerial photographs. Proc.24th Coastal Engineering Conference. (ASCE) 1998–2003.
- Forbes, D., Parkers, G., Manson, G., Ketch, L. (2004). Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. Marine Geology , 210, 169-204.
- Gaillot, S., Chaverot, S. (2001). Méthode d'étude des littoraux à faible évolution. Cas du delta du Golo (Corse) et du littoral du Touquet (Pas-de-Calais) en France. / Analysing the kinematics of low-mobility coastlines: methodology and results for the Golo delta (Corsica) and the Touquet coast (Pas-de-Calais) in France. In: Géomorphologie : relief, processus, environnement, Janvier-mars 7 (1), 47-54.
- Galgano, F. A., Douglas, B. C. (2000). Shoreline Position Prediction: Methods and Errors. Environmental Geosciences, 7(1), 23-31.
- Galgano, F., Douglas, B. C. (2000). Shoreline Position Prediction: Methods and Errors. Environmental. Geosciences, 7(1), 23-31.
- Genz, A. S., Fletcher, C. H., Dunn, R. A., Frazer, L. N., Rooney J, J. J. (2007). The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii. Journal of Coastal Research , 23 (1), 87-105.
- Gorman, L., Morang, A., Larson, R. (1998). onitoring the coastal environment. Part IV. Mapping, shoreline changes, and bathymetric analysis. Journal of Coastal Research , 14 (1), 61-92.
- Gratton Y (2002). Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale, Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique, www.iag.asso.
- Grenier, A., Dubois, J. N. (1990). Évolution littorale récente par télédétection : synthèse méthodologique. Photo-interprétATION (6), 3-16.
- Greve, C. (1996). Digital photogrammetry : an addendum to the Manual of photogrammetry. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church, Va.
- Grosso, E. (2010). Integration of historical geographic data into current georeferenced frameworks: A user-centred approach. e-Perimetron , 5 (3), 107-117.
- Guilcher, A. (1951). Essai de terminologie française des plages marines et autres accumulations littorales. Revue de Géomorphologie dynamique, 32 35.
- Guillén, J., Stive, M., Capobianco, M. (1999). Shoreline evolution of the Holland coast on a decadal scale. Earth Surf. Processes Landf , 24, 517-536.
- Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., McDonald, M. G. (2000). MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model, User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process, U. S. Geological Survey. Denver, Colorado, 121p.

- Hardaway, C. S., Milligan, D. A., Farnsworth, K., Dewing, S. (2001). Detailed Shore Change at Chesapeake Bay Dune Systems. (Gloucester Point, VA: Virginia Institute of Marine Science, College of William and Mary).
- Heinzer, T., Hansen, D. T., Greer, W., Sebhat, M. (1996). Development of a graphical user interface in GIS Raster Format for the finite difference groundwater model code, MODFLOW. American Society for Testing and Materials , 239-249.
- Heo, J., Kim, J. H., Kim, J. W. (2009). A new methodology for measuring coastline recession using buffering and non-linear least squares estimation. International Journal of Geographical Information Science, 23 (9), 1165 1177.
- Hoeke, R.; Zarillo G.A., and Synder M., 2001. A GIS based tool for extracting shoreline positions from aerial imagery (Beach Tools). US Army Corps of Engineers, ERDC/CHL CHETN-IV-37, 11 p.
- IGN. (2001). Carte topographique, 2001, 1 : 25 000e,© I.G.N Institut Géographique National, Scan 25®, F051-058, France.
- IGN. (2005). L'ABC du SIG , la géomatique appliquée. Consulté le février 14, 2011, sur http://www.ign.fr/DISPLAY/000/526/960/5269602/SIG.pdf
- INERIS. (2006). Pratiques en Évaluation des Risques Sanitaires liés à l'Environnement, industriel et aux services. Bulletin de veille scientifique conçu et réalisé par l'INERIS, N° 7 Septembre 2006, ministère de l'écologie et du développement durable.
- Isaaks, E. H., Srivastava, R. M. (1989). An Introduction to Applied Geostatistics. New York: Oxford Univ Press, 561 p.
- Janeau, G., Adrados, C., Joachim, J., Gendner, J. P., Pépin, D. (2004). Performance of differential GPS collars in temperate mountain forest. Comptes Rendus Biologies , 327 (12), 1143–114.
- Journel, A. G., Huijbregts, C. J. (1981). Mining Geostatistics. London: Academic Press, 600 p.
- Kasser, M., Egels, Y. (2002). Digital Photogrammetry. London: Taylor and Francis. 351 p.
- Knab, G., Rembe, M., Wenske, D., Boy, S., *et al.* (1998) A new autoCAD-based graphical interface to MODFLOW, MODPATH and MT3D including support for a new mass transport simulation algorithm (front limitation algorithm), MODFLOW'98 vol I Golden, Colorado October 4–8:175–182.
- Konikow, L. F. (1996). Numerical models of groundwater flow and transport. In: Manual on Mathematical Models in Isotope Hydrology. (IAEA-TEC-DOC-910) , 59-112. Vienna, Austria.

- Konikow, L. F., Reilly, T. E. (1998). Groundwater modeling. In: The handbook of groundwater engineering (Vol. 20). (J.W.Delleur, Éd.) Boca Raton: CRC Press.
- Krige, D. G. (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa. 52, 119-139.
- Leatherman, S. P. (2003). Shoreline Change Mapping and Management Along the U.S. East Coast. Journal of Coastal Research , 38, 5-13.
- Lebbe, L., Walraevens, K., Van burm, P., Breuck (de), W. (1989). L'évolution de la distribution des eaux douces et salées dans la nappe libre de la plaine maritime aux environs de la frontière belgo-française. Ann. Soc. Géol. Nord , 55-65.
- Lemaire, M. (2001). Le Système d'Information Géographique (SIG) : un outil d'aide à la planification. AQUADEV : Les Méthodes Participatives de diagnostic et de planification des actions de développement. Actes du séminaire international de Niamey (Niger).
- Li, R., Liu, J. K., Felus, Y. (2001). Spatial modeling and analysis for shoreline change detection and coastal erosion monitoring. Journal of Marine Geodesy, 24 (1), 1–12.
- Linder, W. (2009). Digital Photogrammetry: A Practical Course (Third Edition). Springer Berlin, Heidelberg, 235p.
- Liu, J. K. (1998). Developing Geographic Information System Applications in Analysis of Responses to Lake Erie Shoreline Changes. MSc thesis, The Ohio State University.
- Liu, S., Fraser, C. S., Zhang, C., Ravanbakhsh, M., Tong, X. (2011). Georeferencing Performance Of Theos Satellite Imagery. The Photogrammetric Record , 26 (134), 250–262.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., Rhind, D. W. (2005). Geographic Information Systems and Science (éd. Second Edition). New York: Wiley.
- Lopez-Chicano, M. (1992). Hidrogeologia del acuifero karstico de Sierra Gorda. Thèse doc. Univ. of Granada, 429p.
- Louche, B. (1997). Limites littorales de la nappe de la craie dans la région Nord Pas-de-Calais - Relations eaux souterraines-eaux superficielles-mer. Thèse. Publiction N 24. I.S.S.N. 0291 - 3062. Univ. Lille1. 277 P.
- Louche, B., Hallet, V. (2001). Determination of tectonic structure in the chalk aquifer along the nord-pas-de-calais coast by geophysical prospecting coupled to observations by drilling. consequences on the salted water distribution. Rev.Sci.Eau , 14/3, 265-280.
- Louche, B., Crampon, N., BracqC, P. (1998). Qualité et comportement de l'aquifère crayeux sur le littoral Nord-Pas-de-Calais(Quality and bebaviour of the chalk aquifer on the Nord-Pas-de-Calais shoreline). Académie des sciences, Paris, Sciences de la terre et des planètes / Earth and Planetary Sciences , 327, 463-470.

- Louche, B., Delay, F., Carlier, E. (1997). Comparaison des caractéristiques hydrodynamiques et structurales de l'aquifère crayeux du littoral Nord Pas-de-Calais. Soc. Géol , 168 (4), 451-461.
- Matheron, G. (1965). Les variables régionalisées et leur estimation. Paris: Masson, 305p.
- Matheron, G. (1970). Structures aléatoires et géologie mathématique. Rev. Internat. Statist. Inst, 38, 1-11.
- Malaterre, G. (2006). Evolution morphologique d'une côte sableuse anthropisée : l'exemple d'hardelot-Plage. Mémoire de Master Recherche, Université des Sciences et Technologies de Lille, 120 p. + annexes.
- Mania J., Phillipart A. (1976). Etude des ressources en eau de la zone littorale. Données géologiques et hydrogéologiques acquises à la date du 31/4/1975 sur le territoire des feuilles topographiques au 1/25000 de Boulogne (6-7)-Montreuil (1 à 8)-Rue (2 à 4).Rapport B.R.G.M.76 SGN 122 NPA, 47p.
- Marsily, G. D. (1981). hydrogéologie Quantitative. Paris: Masson.
- Massasati, A. S. (2002). Georeferencing aerial photography: Beginners approach. Surveying Engineering , 128 (4), 159-167.
- Masson, E. (2008). Support de cours ARCGIS 9.1. Université des Sciences et technologies de Lille, U.F.R. de Géographie et d'Aménagement.
- Matheron, G. (1963). Principles of Geostatistics. Economic Geology, 58, 1246-1266.
- McBride, R. A., Byrnes, M. R., Hiland, M. W. (1995). Geomorphic response-type model for barrier coastlines: a regional perspective. Marine Geology, 126 (1-4), 143-159.
- McBride, R. A., Penland, P. S., Hiland, M. W., Williams, S. J., Westphal, K. A., Jaffe, B., *et al.* (1992). Analysis of barrier shoreline change in Louisiana from 1853 to 1989. In: Atlas of Barrier Island Changes in Louisiana from 1853 to 1989S.J. Williams et al.Misc. Invest. Ser., I-2150-A, U.S. Geol. Surv , 36-97.
- McDonald, M. G., Harbaugh, A. W. (2003). The history of MODFLOW, GroundWater. Ground Water , 41 (2), 280-283.
- McKenna Neuman C., Nickling W.G. (1989). A theoretical and wind tunnel investigation of the effects of capillary water on the entrainment of sediment by wind, Can. J. Soil Sci. 69 (1989), pp. 79–96.
- McLaughlin, D. W., McKeena, J., Cooper, J. G. (2002). Socioeconomic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunitie. Journal of Coastal Research (36), 487-49.

- Moffitt, F. H., Mikhail, E. M. (1980). Photogrammetry. 3rd Ed. Harper and Row, New York.
- Monjoie, A. (1995). Expérimentation géophysique sur le littoral du Pas-de-Calais (région de Merlimont). laboratoire de géologie de l'ingénieur, d'hydrogéologie et de prospection géophysique.
- Moore, L. J. (2000). Shoreline mapping techniques. Journal of Coastal Research , 16 (1), 111-124.
- Mueller, T. G., Pusuluri, N. B., Mathias, K. K., Cornelius, P. L., Barnhisel, R. I., Shearer, S. A. (2004). Map Quality for Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighted Interpolation. Soil Science Society of America Journal, 68, 2042–2047.
- Munaut, A. V., Gilot, E. (1977). Recherches palynologiques et datations 14C dans les régions côtières du Nord de la France : phases transgressives et stabilisations dunaires flandriennes dans l'estuaire de la Canche (Pas de Calais). Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire , 14 (3), 17-25.
- Namikas, S.L., Sherman, D.J. (1995). A review of the effects of surface moisture content on Aeolian sand transport. In: Tchakerian, V.P. (Ed.), Desert Aeolian Processes. Chapman and Hall, New York, pp. 269–293.
- Parker, B. (2001). Where is the shoreline? The answer is not as simple as one might expect. Hydro International , 5 (5), 6-9.
- Pasbrich, A. (2006). Etude hydrogéologique d'Hardelot-plage. Master D'ingénierie HYDROSOL, Université d'Artois, Université des Sciences et Technologies de Béthune.
- Paskoff, R. (1993). Côtes en danger. Paris: Masson, 250 p.
- Paskoff, R. (2001). L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers. Paris: Institut océanographique, 192P.
- Paskoff, R. (1998). Les littoraux. Impact des aménagements sur leur évolution. Paris: 3 édition. Armand Colin.
- Peyrat, J., Braun, M., Dolnik, C., Isermann, M., Roweck, H. (2009). Vegetation dynamics on the Łeba Bar/Poland: a comparison of the vegetation in 1932 and 2006 with special regard to endangered habitats. J Coast Conserv, 13, 235-246.
- Pirazzoli, P. A. (1996). État de la mer et niveaux marins. In: problèmes de environnement planétaire. Buli Assoe Géogr Franc. Paris , 4, 283-290.
- Pirot, F., Saint Gerand, T. (2005). La Géodatabase sous ArcGIS, des fondements conceptuels à l'implémentation logicielle. Géomatique Expert (N° 41/42-Février-Mars 2005), 62-66.

- Pirot, F., Ernould, J. C., Fournet, F. (2002). Disparités spatiales de santé dans la ville de Ouagadougou (Burkina Faso), Une modélisation d'une genèse des espaces à risques sanitaires selon la méthode hypergraphique H.B.D.S. Colloque francophone ESRI 2002, Issy-les-Moulineaux, Octobre 2002.
- Plummer, L. N. (1975) Mixing of sea water with calcium carbonate ground water : Quantitative studies in the geological sciences. Geol.Soc. Am. Mem., 142, 219-238.
- Porteret, J. (2005). Etude du fonctionnement hydrologique d'une tourbière basse du nordest du Massif Central français : la Prenarde dans les Monts du Forez. Colloque. Château de Goutelas, Loire, 5-7 oct,France.
- PPIGE. (2005). Orthophotographie, lambert II étendue, Plateforme Publique de l'Information Géographique (Nord-Pas de Calais, France).
- Quenton, I. (1992). Fonctionnement hydrogéologique de la plaine littorale; réserve naturelle de la baie de la Canche. D.E.A, Univ. Paris VI.
- Roberts, J. J., Best, B. D., Dunn, D. C., Treml, E. A., Halpin, P. N. (2010). Marine Geospatial Ecology Tools: An integrated framework for ecological geoprocessing with ArcGIS, Python, R, MATLAB, and c++. Environmental Modelling and Softwar (25), 1197-1207.
- Robertson, W., Zhang, K., Whitman, D. (2007). Hurricane-induced beach change derived from airborne laser measurements near Panama City, Florida. Marine Geology , 237, 191-205.
- Robin M., (2002a). Télédétection, Des satellites au SIG. Une analyse complète du processus de création d'un type essentiel d'information géographique. Nathan Université. 318 p.
- Robin, M. (2002b). Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique. In Baron- Yelles N. *et al.* (Ed.) : Le littoral, regards, pratiques et savoirs. Presses de l'École normale supérieure, Paris , 95-115.
- Rollet, C. (2005). Les Orthophotographies littorales. Fiche outil Projet REBENT . IFREMER, Centre de Brest, DYNECO/VIGIES.
- Roubertou, A., Bonneval, H. (1965). La photographie aérienne en hydrographie marine. In (CHEVALIER R., Ed.) La photographie aérienne. Panorama intertechnique, Gauthier -Villars Editeur, Paris , 51 - 56.
- Rousseaux, F. (2006). B9 Caractérisation d'erreurs sur un modèle numérique de terrain en fonction de zones morphologiques. Bulletin d'information scientifique et technique de l'IGN n° 75 (2006/1).
- Saint-Gérand, T. (2002). SIG: Structures conceptuelles pour l'analyse spatiale. Thèse d'HDR, Univ. De Rouen, France , 187.

- Saint-Gérand, T. (2005). Comprendre pour mesurer... ou mesurer pour comprendre? HBDS : pour une approche conceptuelle de la modélisation géographique du model réel. in : GUERMOND Y. (Direction), Modélisations en géographie, Déterminisme et complexités, Paris : Lavosier, Hermes Science publications, pp. 261-298.
- Sanford, W.E., Konikow, L.F. (1989). Simulation of calcite dissolution and porosity changes in salt water mixing zones in coastal aquifers. Water Resources Research, 25, 655-667.
- Sanz, S., Régagnon, E., Barge, O. (2008, juin 9-13). Stage « techniques de relevé de terrain» GPS et photographies aériennes. Jalès, France: Maison de l'Orient et de la Méditerranée.
- Scarpace, F., Vonderohe, A., Heo, J. And Krumbach, T.(2000). Measurements of the Lake Michigan shoreline. In Proceeding of the ASPRS 2000 Annual Conference, May 2000, Washington, DC, USA
- Shamsi, U. M. (2005). GIS applications for water, wastewater, and stormwater systems. Boca Rato: CRC Press, pp. 413.
- Shih-Lung, S., X, X. (2003). Integrated land use and transportation interaction: a temporal GIS exploratory data analysis approach. Journal of Transport Geography, 11 (2), 103-115.
- Shoshany M., Degani A. (1992). Shoreline detection by digital image processing of aerial photography. Journal of Coastal Research, 8 (1), 29 34.
- Slama, C. C., Theurer, C., Henriksen, S. W. (1980). Manual of photogrammetry, 4th Ed. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church, Va.
- Sommé, J., Antoine, P., Cunat-Bogé, N., Lefèvre, D., Munaut, A. V. (1999). Le Pléistocène moyen marin de la mer du Nord en France : falaise de Sangatte et formation d'Herzeele [The marine middle pleistocene of the north ssa in France :Sangatte cliff and Herzeele formation]. Quaternaire, 10 (2-3), PP. 151-160.
- Speckmann, B., Snoeyink, J. (2001). Easy triangle strips for TIN terrain models. International Journal of Geographical Information Science, 15 (4), 379-386.
- SPRL. (2006). Ville d'Hardelot-Plage, Prospection géophysique, Sondages électriques 3-5 Mai 2006, Rapport. Bureau Conseil en Géologie SPRL, Dossier 05375 Mai 2006.
- Srivastava, A., Niu, X., Di, K., Li, R. (2005). Shoreline modeling and erosion prediction. In Proceeding of the ASPRS 2005 Annual Conference, March 2005, Baltimore, MD, USA.
- Stafford, D. B., Langfelder, J. (1971). Air photo survey of coastal erosion. Photogrammetric Engineering, 37 (6), 565-575.

- Stewart, C. J. (1994). United States Great Lakes Shoreline Recession Rate Data. (Washington, DC: US Army Corps of Engineers).
- Stokkom, H., Stokman, G., Hovenier, J. (1993). Quantitative use of passive optical remote sensing over coastal and inland water bodies. International Journal of Remote Sensing (14), 541-563.
- Strickland, T., Korleski, C. (2007). Ground Water Flow and Fate and Transport Modeling. State of Ohio, Environmental Protection Agency, Division of Drinking and Ground Waters: Technical Guidance Manual for Ground WaterInvestigation.
- Thieler, E. R., Danforth, W. W. (1994a). Historical shoreline mapping (I): Improving techniques and reducing positioning error. Journal of Coastal Research , 10 (3), 549-563.
- Thieler E.R., danforth W.W. (1994b), Historical shoreline mapping (II): application of the Digital Shoreline Mapping and Analysis Systems (DSMS/DSAS) to shoreline change mapping in Puerto Rico. Journal of Coastal Research, 10 (3), 600–620.
- Thieler, E. R., Hapke, C. J. (2005). Photogrammetry: Encyclopedia of Coastal Science, Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers. 764-769.
- Thomas, Y. F., Diaw, A. T. (1997). Suivi (1984-1993) de la rupture de la flèche de Sangomar, estuaire du fleuve Saloum, Sénégal. Photo-Interprétation, 35 (3-4), 199-208.
- Topan, H., Kutoglu, H. S. (2009). Georeferencing Accuracy Assessment of High-Resolution Satellite Images Using Figure Condition Method. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING , 47 (4), 1256-1261.
- Tresca, A. (2006). Évolution géomorphologique d'une côte sableuse anthropisée: l'exemple d'hardelot-plage, Mémoire de Master Recherche, Université des Sciences et Technologies de Lille, 149 p.
- Unser, M., ThCvenaz, P., Yaroslavsky, L. (1995). Convolution-B ased Interpolation for Fast, High-Quality Rotation of Images. IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, 4 (10), 1371-1381.
- Wang, S., Shao, J., Song, X., Zhang, Y., Huo, Z., Zhou, X. (2008). Application of MODFLOW and geographic information system to groundwater flow simulation in North China Plain, China. Environ Geol, 55, 1449-1462.
- Webster, R., Oliver, M. A. (2007). Geostatistics for Environmental Scientists (éd. Second Edition). Chichester, UK: Wiley, 330 p.
- White, M. S., Griffin, P. (1985). Piecewise linear rubber-sheet map transformations. The American Cartographer , 12 (3), 123-131.
- Wiggs, G.F.S., Baird, A.J., Atherton, R.J. (2004). The dynamic effects of moisture on the entrainment and transport of sand by wind, Geomorphology, 59 (1-4), pp. 13-30.

- Williams, S. F., Dodd, K., Gohn, K. K. (1990). Coasts in crisis. U.S. Geological Survey Circular, 32p.
- Wolf, P. R. (1983). Elements of photogrammetry, with air photo interpretation and remote sensing. McGraw-Hill, New York.
- Woodwark, J. (1988). Calcul de formes par ordinateur. Paris, Milan, Barcelone, Mexico: MASSON, 167p.
- Woolard, J., Colby, J. (2002). Spatial characterization, resolution, and volumetric change of coastal dunes using airborne LIDAR: Cape Hatteras, North Carolina. Geomorphology. 48, 269-287.
- Yeh, G. T. (1987). 3DFEMWATER: A three-dimensional finite element model of water flow through saturated-unsaturated media. Oak Ridge, Tennessee: ORNL-6368, Oak Ridge National Laboratory.
- Yeh, G. T. (1990). 3DLEWASTE: A hybrid Lagrangian-Eulerian finite element model of waste transport through saturated-unsaturated media. Pennsylvania: PSU Technical Report, Department of Civil Engineering, The Pennsylvania State University, University Park.
- Zeiler, M. (1999). Modeling our world: the ESRI guide to geodatabase design. ESRI Press, Redlands, CA. 200p.
- Zhan, X., Huang, M. L. (2004). ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps. Environmental Modelling and Software (19), 875–879.
- Zhang, K., Douglas, B. C., Leatherman, S. P. (2004). Global warming and coastal erosion. Climatic Change , 64, 41–58.
- Zhou, Q., Lees, B., Tang, G. (2008). Advances in Digital Terrain Analysis. Springer, 462p.
- Zoghlami, I., Faugeras, O., Deriche, R. (1997). Using geometric corners to build a 2D mosaic from a set of images. Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognitio, 421-42.
## Annexes

## Annex A : Valeurs calculées d'évolution du trait de côte (en mètre)

Période Id Ref2	D_2005_1946	D_2005_1947	D_2005_1955	D_2005_1963	D_2005_1971	D_2005_1976	D_2005_1980
1		-20,87	-8,39		22,99	11,37	0,63
2		-32,68	-19,85		10,28	26,44	-7,06
3		-45,12	-27,56		11,03	10,68	-2,34
4		-49,92	-33,01		3,11	-8,44	-12,09
5		-44,34 -40,53	-27,59		3,05	-12,31	-13,20
7		-39,60	-25,49		7,16	-11,02	-9,67
8		-33,30	-19,80		12,73	-4,45	-3,95
9		-37,50	-22,38		3,64	-11,39	-12,76
10		-37,18	-22,77		4,85	-7,00	-7,86
11		-21,87	-10,13		16,86	5 35	3,08
13		-22,91	-11,74		10,94	0,73	-0,65
14		-19,00	-10,89		12,62	2,59	0,01
15		-15,22	-8,39		14,54	4,68	3,12
16		-16,40	-8,94		13,42	5,82	3,65
17		-16,04	-8,72		8.43	6,94	7,18
19		-18.69	-14.13		11.71	4.47	2,44
20		-23,27	-21,19		5,85	-2,04	-6,63
21		-18,63	-18,21	-10,16	7,60	-2,33	-5,30
22		-13,19	-12,85	-5,91	11,45	2,81	-1,26
23		-22,03	-21,42	-15,//	-0,73	-5,99	-11,57
25		-26.19	-23.65	-17,02	-6,72	-5.39	-12.74
26		-31,86	-28,01	-19,39	-10,41	-9,51	-11,88
27		-26,45	-27,08	-13,41	-4,70	-1,30	-9,57
28		-24,76	-23,87	-10,87	-0,28	0,17	-15,50
29		-26,20	-25,10	-14,22	-1,88	-1,89	-15,85
30		-23,43	-20,80	-11.50	-1.76	-1.16	-11,25
32		-29,55	-20,58	-14,93	-1,57	-0,26	-11,22
33		-30,39	-20,30	-19,70	-4,48	-1,38	-10,04
34		-29,52	-20,46	-20,05	-5,51	-0,73	-7,20
35		-34,17	-25,58	-24,56	-10,76	-4,97	-9,76
37		-31,61	-27,13	-25,72	-13,05	-6,76	-7,97
38		-31,20	-29,19	-27,16	-14,03	-9,33	-9,90
39		-25,79	-27,01	-22,44	-10,45	-6,48	-7,26
40		-24,65	-27,16	-21,89	-9,20	-5,95	-6,94
41		-24,63	-27,32	-22,21	-9,64	-5,57	-7,30
43		-23.73	-28,19	-23.67	-14.66	-14.67	-11.70
44		-22,18	-25,14	-21,89	-12,57	-14,71	-11,65
45		-24,42	-25,74	-26,01	-14,26	-18,44	-15,59
46		-23,65	-24,50	-24,00	-13,30	-18,13	-16,92
47		-16,72	-19,79	-10,00	-8,19	-13,27	-12.37
49		-21,50	-22,91	-22,54	-9,07	-14,22	-16,54
50		-22,06	-23,02	-17,07	-8,66	-12,56	-13,79
51		-19,00	-18,44	-9,63	-5,21	-6,13	-6,72
52		-18,72	-18,91	-12,83	-1,67	-3,87	-4,12
54		-92.92	-20,78	-74.65	-67.95	-77.41	-66,56
55		-81,72	-80,40	-68,43	-57,94	-62,46	-49,81
56		-105,78	-99,71	-90,86	-62,30	-51,74	-51,21
57		-12,52	-5,44	-12,96	0,73	0,00	0,00
58		-8,75	-0,85	-9,68	1,04	-0.91	-0.91
60	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
61	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
62	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
63	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
65	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
66	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
67	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
68	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
69 70	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
71	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
72	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
73	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
74	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
75	-15 41	-16 34	-6 19	-8 56	0.27	-0 24	-0 08
77	-14,13	-11,17	-0,40	-4,88	-4,18	-0,38	-0,06
78	-12,12	-12,58	-3,88	-5,10	-13,58	0,28	0,43
79	-13,09	-13,64	-2,13	-5,52	-6,02	0,38	0,25
80	-10,07	-13,34	-0,04	-4,02	9,76	-0,09	-0,44

## • Valeures calculées de 2005 à 1946, à1947, à1955, à1963, à1971, à1976 et à1980

Période Id Ref2	D_2005_1946	D_2005_1947	D_2005_1955	D_2005_1963	D_2005_1971	D_2005_1976	D_2005_1980
81	-7,52	-11,45	4,43	-1,30	8,88	0,55	0,42
82	-7,20	-14,31	1,91	1,42	7,37	0,87	1,99
83	-10,65	-17,28	-0,82	6,02	6,68	16,95	0,01
84	-11,11	-16,77	0,25	4,45	8,29	16,91	-0,24
85	-8,88	-18,09	-0,37	3,49	9.19	17,49	-1,02
87	-8,82	-17,50	2,44	5,81	8,80	17,27	-0,33
88	-5,34	-14,66	5,72	7,54	12,98	19,22	-0,12
89	-15,07	-22,17	-2,58	-6,20	4,18	9,71	0,32
90	-19,60	-25,69	-6,94	-11,31	-2,40	4,06	-0,41
91	-16,/3	-19,05	-5,62	-11,93	-2,93	2,88	0,03
93	-22.64	-25,79	-8.96	-14,88	-4,85	0,34	0.00
94	-29,62	-34,12	-19,46	-23,05	-13,56	-8,43	0,56
95	-40,81	-41,83	-30,64	-34,22	-25,07	-18,21	-18,62
96	-46,97	-51,33	-35,00	-37,37	-28,99	-21,09	-24,21
97	-51,85	-49,36	-35,35	-34,76	-27,72	-20,44	-21,22
99	-31,48	-47,89	-35.25	-32,30	-27,34	-19.67	-23,07
100	-48,26	-45,10	-38,69	-35,40	-27,10	-20,93	-24,39
101	-46,93	-44,42	-38,23	-34,87	-25,16	-21,33	-22,74
102	-46,23	-46,21	-37,73	-36,04	-22,83	-21,17	-21,77
103	-51,09	-48,90	-42,13	-37,18	-25,73	-25,84	-25,06
104	-50,98	-49,54	-43,05	-35,31	-25,39	-28,34	-27,59
106	-44,12	-43,84	-42,53	-30,63	-24,60	-24,80	-22,93
107	-50,47	-53,44	-46,65	-34,96	-30,56	-26,54	-22,77
108	-47,38	-49,31	-43,54	-33,71	-29,49	-24,07	-20,44
109	-32,38	-36,47	-36,82	-24,42	-20,24	-15,33	-12,83
110	-14,42	-15,35	-16,57	-3,02	-17 15	9,82	-11 93
111		-39,32	-42,36	-23,23	-14,75	-16,16	-14,32
113		-43,53	-41,76	-28,58	-10,48	-17,71	-12,89
114		-36,30	-34,46	-21,24	-7,38	-13,95	-12,49
115		-34,56	-19,91	-15,12	-8,93	-15,17	-13,29
116		-12,72	-11,60	-18,87	-11,07	-22,47	-18,55
117		-37.82	-37,49	-13,20	-13.12	-16.86	-17.39
119		-31,78	-37,44	-24,53	-14,27	-15,60	-17,53
120		-26,78	-35,73	-21,24	-8,02	-11,52	-15,09
121		-43,02	-53,83	-18,35	-20,01	-28,52	-31,37
122		-26,14	-37,77	-17,06	-10,41	-11,79	-18,67
123		-30,24	-41,52	-25,99	-17,56	-20,02	-24,89
125		-20,52	-41,38	-24,69	-14,46	-14,86	-18,35
126		-22,18	-38,67	-22,67	-12,80	-12,96	-19,73
127		-21,21	-37,07	-21,62	-12,60	-12,79	-19,84
128		-23,22	-39,54	-24,63	-11,66	-12,06	-19,84
129		-28,88	-53,48	-28,64	-16,39	-18,85	-21,12
131		26,11	9,69	10,98	10,31	8,04	-1,30
132		-11,97	-16,61	-13,50	-19,62	-19,50	-22,98
133		-25,52	-29,72	-25,70	-19,26	-17,44	-23,55
134		-23,26	-34,20	-21,03	-12,80	-10,22	-20,22
135		-12,15	-28,01	-6,79	-4,75	-3,72	-14,24
137		-8,42	-28,95	-9,50	-7,72	-5,10	-15,31
138		1,58	-28,83	-10,67	-7,60	-6,35	-15,61
139		-17,37	-30,58	-10,15	-6,90	-12,24	-25,29
140		-13,08	-36,47	-10,30	-11,64	-7,37	-19,75
141		-9,96	-34,73	-0,32	-7,97	-5,83	-15,23
143		-6,73	-32,80	-9,28	-11,85	-9,21	-17,38
144		2,65	-32,81	-8,95	-13,62	-10,44	-17,77
145		1,63	-29,85	-5,58	-10,12	-7,16	-15,21
146		-0,35	-29,27	-7,44	-10,78	-8,56	-17,56
147		-4 03	-29,70	-7,48	-9,70	-0,/4	-10,70
149		-11,28	-34,43	-10,77	-7,23	-7,47	-18,19
150		-8,41	-30,35	-9,43	-9,36	-8,59	-19,64
151		10,81	-15,57	3,75	-2,27	-0,07	-16,55
152		16,32	1,30	24,56	8,13	10,43	-5,89
153		-9,/1	-25,97	-15,55	-10,79	-10,61	-21,64
155		-21,71	-36,16	-16,59	-21,71	-17,08	-21,86
156		-22,69	-39,84	-22,51	-21,02	-22,86	-28,41
157		-25,18	-37,71	-20,94	-23,07	-23,51	-30,14
158		-25,07	-42,28	-17,14	-21,96	-20,84	-31,41
159		-22,84	-33,54	-10,19	-18,54	-14,33	-25,87
161		-20,19	-37,05	-18,29	-22,20	-19,19	-26,97
162		-30,49	-39,94	-28,11	-24,46	-25,00	-29,76
163		-23,69	-34,42	-26,23	-20,96	-22,59	-25,26
164		-21,57	-31,66	-21,95	-20,28	-19,13	-22,77
165		-22,97	-34,97	-23,74	-21,01	-17,28	-23,66
167		-20,19	-39,04	-19,90	-21,11	-20,55	-21,44
107		20,20	-33.10	-23,34	-21,25	-10,10	-20.02

Période	D_2005_1946	D_2005_1947	D_2005_1955	D_2005_1963	D_2005_1971	D_2005_1976	D_2005_1980
168		-25.82	-38.97	-25.99	-21.82	-17.44	-22.79
169		-24,97	-35,11	-20,86	-18,54	-14,69	-16,55
170		-28,38	-34,79	-23,62	-19,55	-17,51	-22,31
171		-32,50	-36,87	-27,57	-22,75	-21,98	-25,84
172		-33,39	-37,34	-29,58	-26,62	-22,19	-24,64
174		-53,40	-51,99	-40,98	-27,67	-32,45	-22,81
175		-78,56	-74,75	-47,20	-15,07	-33,55	-27,36
176		-99,45	-95,53	-42,03	-16,46	-44,55	-35,50
178		27,36	25,32	-13,70	-6,28	-10,80	-15,57
179		-16,26	-25,14	-27,46	-13,74	-18,14	-24,78
180		-33,64	-38,84	-26,79	-17,31	-21,80	-26,81
181		-35,89	-36,62	-18,80	-14,05	-17,01	-18,11
183		-31,36	-30,53	-13,24	-8,21	-8,54	-16,45
184		-34,27	-30,93	-16,53	-9,19	-9,66	-19,66
185		-27,32	-23,30	-12,42	-2,05	-3,86	-11,88
187		-40,63	-40,07	-27,20	-11,25	-17,31	-19,04
188		-65,68	-59,59	23,33	7,35	20,38	14,43
189		-13,30	-7,02	-4,62	17,42	-5,29	7,55
190		-31,13	-23,25	-1,32	-0,26	-9,43	-24,22
192		-20,88	-4,18	7,28	5,77	-2,68	-19,08
193		-17,43	4,41	7,46	6,26	0,45	-20,45
194		-16,30	-5,66	7,30 9,19	10,84	11,42	-13,65
196		-5,13	2,38	8,08	13,13	14,91	1,56
197		-4,90	0,92	8,27	6,70	5,59	1,10
198		-35,43	-35,10	-33,43	-17,09	0,00	-0,42
200		28,64	9,88	0,35	-0,12	-0,12	-0,12
201		35,83	8,06	0,43	-3,68	-2,13	0,00
202		36,70	1,71	-11,02	-20,20	-11,69	0,01
203		41,49	-0,24	-21,44	-36,74	-18,45	-1,61
205		57,75	2,07	-35,69	-56,23	-24,98	-4,26
206		58,70	-4,71	-50,32	-66,47	-31,28	-5,88
207		51,26	-9,80	-60,03	-69,59	-36,57	-7,64
208		54,82	-7,59	-71,31	-66,40	-28,44	-5,76
210		62,73	-5,36	-68,14	-61,88	-20,52	0,46
211		67,37	8,33	12,98	-4,31	-12,22	-7,63
212		30,90	-17,26	-106,82	-80,04	-28,14	-15,90
214		25,71	-31,00	-113,69	-54,90	-38,82	-14,25
215		25,61	-31,55	-106,87	-42,84	-33,37	-8,88
216		18,49	-33,17	-101,64	-38,25	-29,04	-6,58
218		3,69	-40,86	-91,98	-33,97	-29,60	-4,41
219		-0,53	-47,56	-105,39	-48,97	-44,32	-13,67
220		-1,48	-40,30	-98,08	-45,72	-44,35	-16,50
221		1,31	-22,32	-53,38	-27,49	-34,90	-17,26
223		0,00	-41,85	-50,97	-31,01	-39,18	-31,33
224		-12,09	-67,80	-63,69	-50,58	-61,75	-58,83
225		-24,81 -71.07	-/6,53	-67,15	-52,79 -86,85	-60,36	-64,48
227		-88,27	-148,97	-110,95	-96,87	-101,57	-107,36
228		-119,14	-152,68	-112,17	-97,33	-98,85	-106,56
229		-131,35	-149,98	-112,88	-101,34	-97,65	-104,02
230		-120,01	-123,41	-93,60	-89,01	-74,86	-72,54
232		-117,79	-132,49	-98,32	-89,68	-73,50	-69,65
233		-125,66	-123,53	-101,57	-87,79	-72,12	-64,35
234		-122,95	-120,84 -117,48	-109,25	-83,90	-70,48	-68,14
236		-116,92	-116,61	-109,13	-82,85	-69,83	-59,72
237		-114,87	-111,42	-100,60	-81,24	-70,70	-61,50
238		-100,85 -81.04	-91,85	-79,39	-60,53	-54,82	-45,13
240		-64,26	-65,92	-41,48	-31,76	-24,61	-1,37
241		-58,65	-63,17	-36,43	-27,61	-14,26	12,96
242		-46,99	-62,39	-19,64	-9,30	10,37	41,55
245		-7,31	-20,60	32,50	43,42	70,09	100,32
245		-8,54	-13,99	41,16	62,06	87,48	117,30
246		-13,80	-10,29	51,63	70,06	100,30	120,40
247		-22,43	-8,80	48,61	60.84	94,97	117,62
249		-44,46	-19,63	27,31	52,47	68,93	93,60
250		-49,11	-22,86	16,31	45,23	57,39	79,32
251		-49,81	-26,56	-4,47	37,88	39,89	60,86
252		-59,64	-59,80	-23,34	-4,98	-18,95	1,06
254		-66,34	-76,21	-90,10	-30,67	-48,35	-34,80

Période Id_Ref2	D_2005_1946	D_2005_1947	D_2005_1955	D_2005_1963	D_2005_1971	D_2005_1976	D_2005_1980
255		-65,99	-77,13	-108,73	-45,83	-68,71	-53,90
256		-66,58	-75,00	-123,68	-63,69	-90,31	-74,11
257		-66,79	-65,63	-128,76	-72,08	-101,26	-83,92
258		-69,52	-62,22	-131,72	-75,41	-106,38	-89,20
259		-74,40	-59,83	-129,63	-79,24	-108,41	-89,71
260		-77,20	-58,25	-124,25	-84,29	-110,87	-93,67
261		-85,34	-47,84	-109,23	-85,36	-105,41	-91,48
262		-80,20	-21,00	-79,04	-74,06	-86,38	-80,97
263		-70,13	3,62	-42,87	-60,21	-68,95	-68,74
264		-55,39	31,31	-1,12	-38,81	-48,07	-53,36
265		-36,01	45,19	37,09	-8,38	-21,56	-31,17
266		-24,76	41,47	45,05	12,70	-0,04	-17,44
267		-7,97	34,39	49,67	54,69	29,15	4,18
268		-2,84	23,54	45,83	88,14	56,75	19,22
269		-1,30	18,10	36,77	109,95	82,55	34,89
270		3,13	20,34	31,38	114,49	104,88	56,02
271		1,38	21,67	35,98	113,65	111,65	73,34
272		-1,30	20,92	39,25	112,45	113,22	90,94
273		-8,94	16,16	38,98	103,92	110,60	108,84
274		-19,74	9,24	28,67	93,65	103,05	110,35
275		-34,87	0,83	12,19	77,97	89,70	98,81
276		-53,73	-8,30	-6,61	60,62	74,44	85,22
277		-106,49	-50,90	-58,82	8,45	26,04	37,68
278		-149,10	-107,11	-99,93	-41,65	-15,87	5,01
279		-200,00	-169,85	-151,82	-101,14	-71,72	-36,74
280		-215,07	-187,55	-167,71	-122,33	-94,89	-43,37
281		-203,80	-175,06	-160,72	-115,65	-84,37	-29,60
282		-156,44	-123,78	-125,57	-72,78	-40,37	4,78
283		-174,02	-132,86	-151,47	-92,37	-62,31	-31,96
284		-179,51	-127,76	-164,78	-99,13	-73,86	-57,26
285		-170,52	-114,14	-169,49	-98,68	-81,12	-76,61
286		-161,96	-99,91	-170,77	-99,68	-86,05	-97,69
287		-144,80	-82,81	-167,41	-100,13	-89,94	-112,68
288		-139,78	-77,85	-166,30	-110,71	-102,33	-125,56
289		-112,26	-49,24	-46,43	-93,05	-89,06	-119,81
290		105,42	15,77	44,86	-15,98	-38,21	-71,23
291		242,62	118,75	131,54	112,47	89,12	50,33
292		360,32	229,30	212,94	233,02	220,04	182,33

• Valeures calculées de 2005 à 1983, à 1987, à 1989, à 1995, à 1997 et à2000.

Id 0.39 1 0.39   2 2,62 2,62   3 8,99 2   4 1,41 2   5 9,53 2   6 6,84 2   7 3,53 2   8 12,80 2   9 -8,29 2   10 4,84 2   11 13,87 2   13 10,66 2   14 17,08 2   15 19,77 2   16 17,73 2   17 17,63 2   18 15,10 11,72   19 13,394 15,13   20 8,54 7,55   21 5,26 8,03   22 9,74 13,76   23 -2,00 9,07   24 -3,76 7,46   25 -7,20 8,26   26 -9,87 -8,66 9,52   27 0,39 -0,70 -4,76 18,	Période	D_2005_1983	D_2005_1987	D_2005_1989	D_2005_1995	D_2005_1997	D_2005_2000
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Id_Ref2						
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	1		0,39				
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	2		2,62				
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	3		8,99				
5   9,53   <	4		1,41				
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	5		9,53				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	6		6,84				
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	7		3,53				
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	8		12,80				
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	9		-8,29				
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	10		4,84				
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	11		13,87				
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	12		13,41				
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	13		10,66				
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	14		17,08				
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	15		19,77				
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	16		17,35				
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	17		17,63				
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	18		15,10			11,72	
20   8,54   7,55     21   5,26   8,03     22   9,74   13,76     23   -2,00   9,07     24   -3,76   7,46     25   -7,20   8,26     26   -9,87   -8,66   9,52     27   0,39   -0,70   -4,76   18,94   23,55     28   0,17   0,17   -0,18   -0,18   -0,12     29   -3,03   -0,94   -7,34   10,79   12,00	19		13,94			15,13	
21   5,26   8,03     22   9,74   13,76     23   -2,00   9,07     24   -3,76   7,46     25   -7,20   8,26     26   -9,87   -8,66   9,52     27   0,39   -0,70   -4,76   18,94   23,56     28   0,17   0,17   -0,18   -0,18   -0,12     29   -3,03   -0,94   -7,34   10,79   12,00	20		8,54			7,55	
22   9,74   13,76     23   -2,00   9,07     24   -3,76   7,46     25   -7,20   8,26     26   -9,87   -8,66   9,52     27   0,39   -0,70   -4,76   18,94   23,56     28   0,17   0,17   -0,18   -0,18   -0,18     29   -3,03   -0,94   -7,34   10,79   12,00	21		5,26			8,03	
23   -2,00   9,07     24   -3,76   7,46     25   -7,20   8,26     26   -9,87   -8,66   9,52     27   0,39   -0,70   -4,76   18,94   23,55     28   0,17   0,17   -0,18   -0,18   -0,18     29   -3,03   -0,94   -7,34   10,79   12,00	22		9,74			13,76	
24   -3,76   7,46     25   -7,20   8,26     26   -9,87   -8,66   9,52     27   0,39   -0,70   -4,76   18,94   23,56     28   0,17   0,17   -0,18   -0,18   -0,18     29   -3,03   -0,94   -7,34   10,79   12,00	23		-2,00			9,07	
25   -7,20   8,26     26   -9,87   -8,66   9,52     27   0,39   -0,70   -4,76   18,94   23,50     28   0,17   0,17   -0,18   -0,18   -0,18   -0,12     29   -3,03   -0,94   -7,34   10,79   12,00	24		-3,76			7,46	
26   -9,87   -8,66   9,52     27   0,39   -0,70   -4,76   18,94   23,50     28   0,17   0,17   -0,18   -0,18   -0,18     29   -3,03   -0,94   -7,34   10,79   12,00	25		-7,20			8,26	
27   0,39   -0,70   -4,76   18,94   23,55     28   0,17   0,17   -0,18   -0,18   -0,18     29   -3,03   -0,94   -7,34   10,79   12,00	26		-9,87	-8,66		9,52	
28   0,17   0,17   -0,18   -0,18   -0,18     29   -3,03   -0,94   -7,34   10,79   12,00	27	0,39	-0,70	-4,76		18,94	23,56
29 -3,03 -0,94 -7,34 10,79 12,0	28	0,17	0,17	-0,18		-0,18	-0,18
	29	-3,03	-0,94	-7,34		10,79	12,01
30 -1,26 -0,33 -7,12 21,63 18,89	30	-1,26	-0,33	-7,12		21,63	18,89
31 -4,15 -3,07 -4,31 5,76 8,44	31	-4,15	-3,07	-4,31		5,76	8,44
32 -3,37 -2,09 -7,97 8,51 5,60	32	-3,37	-2,09	-7,97		8,51	5,60
33 -4.12 -2.69 -6.49 9.14 7.02	33	-4,12	-2,69	-6,49		9,14	7,02

Période Id Ref2	D_2005_1983	D_2005_1987	D_2005_1989	D_2005_1995	D_2005_1997	D_2005_2000
34	-3,10	0,69	-3,36		11,56	8,76
35	-6,22	-5,17	-10,07		9,20	7,07
36	-4,12	-4,56	-5,53		16,96	12,74
37	-6,71	-6,21	-6,93		17,39	11,06
38	-9,60	-8,12	-9,18		14,92	11,58
40	-11 37	-3.46	-7,27		14,52	12 71
41	-10,32	-1,98	-7,74	-1,59	10,89	10,41
42	-10,01	-4,58	-8,94	-1,81	9,40	8,15
43	-12,04	-6,69	-9,39	0,88	13,17	9,27
44	-11,38	-7,06	-7,63	5,51	16,59	12,06
45	-14,56	-11,71	-10,73	0,68	13,50	7,83
46	-14,31	-14,08	-11,75	-3,30	10,40	5,41
47	-9,52	-8,27	-7,78	2,67	14,51	10,62
40	-11,59	-0,00	-10,21	1,99	14,04	8 26
49 50	-0,50	-12,72	-5,50	5.00	13 59	6.10
51	-12.24	-4.93	-5.81	4,73	16.92	12.55
52	-0,91	1,20	-2,00	2,10	6,22	7,13
53	-5,98	-6,84	-8,13	-2,64	2,99	0,93
54	-60,42	-50,34	-48,97	-42,82	-6,10	-5,18
55	-51,22	-31,60	-29,67	-21,41	-6,92	0,69
56	-59,97	-37,64	-32,96	-25,09	-14,80	-11,48
57	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
58	-0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
59	-0,61	-0,91	-0,91	-0,90	-0,91	-0,91
61	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
62	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
63	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
64	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
65	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
66	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
67	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
68	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
69	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
70	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
71	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
72	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
74	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
75	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue
76	-0,16	0,26	0,06	0,27	0,01	0,19
77	-0,22	-0,16	0,12	0,06	-0,03	-0,03
78	0,39	0,08	0,61	0,57	0,07	0,02
79	0,40	0,35	0,52	0,51	0,22	0,35
80	0,13	-0,10	0,00	0,00	-0,30	-0,30
82	0,60	-0,39	-0,39	-0,03	0,07	0,06
83	0.01	0.01	-0.22	0.01	0.01	0.01
84	0.32	-0.05	0.34	-0.14	0.58	0.05
85	-0,19	-0,23	-0,20	-0,09	0,06	0,06
86	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	0,08	-0,03
87	-0,38	-0,06	-0,01	-0,07	-0,44	-0,21
88	0,31	0,28	0,00	0,11	0,24	0,28
89	0,00	0,00	-0,13	0,00	0,00	0,00
90	0,32	0,17	0,59	0,49	0,36	0,33
92	0,11	0,11	0,54	0,11	-0.03	0,06
93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
94	0,56	0,35	0,56	0,56	0,56	0,56
95	-14,04	-6,24	-12,50	6,48	5,02	8,10
96	-15,73	-10,75	-16,01	2,34	2,61	6,09
97	-16,45	-10,03	-13,14	5,26	3,28	7,09
98	-8,62	-8,12	-12,19	5,44	6,17	7,97
99	-13,20	-7,34	-11,65	5,81	4,56	7,79
100	-13,25	-10,28	-11,11	2,97	1,71	3,93
101	-14,09	-10,72	-12,59	3,48	3,82	6,30
102	-13,40	-0,97	-10,18	0,07	4,42	5,/3
103	-17,29	-10,18	-12,13	2,00	2 16	2 80
105	-15.43	-7.47	-9.51	4.18	3.35	4.21
106	-13,17	-0,75	-4,05	11,28	9,81	7,00
107	-14,49	-5,81	-8,62	4,29	3,21	1,98
108	-12,81	-3,95	-7,80	1,06	1,17	2,79
109	-4,42	-5,90	-11,89	0,00	0,00	0,00
110	17,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
111	-6,74	-3,45	-11,00	5,07	8,20	7,35
112	-4,41	-0,39	-1,20	7,66	10,80	10,73
113	-6,79	-0,33	-1,98	4,48	9,42	9,93
114	-3,94	5,08	0,54	9,59	10,12	8,92
115	-7,08	-7 95	-1,48	-0.63	-3 31	-2,48
117	-2.18	7.47	1.31	10.74	13.97	12.90
118	-11.23	-4.10	-7.45	4.23	5.33	3.23
119	-10,89	-2,32	-5,45	6,59	7,16	8,58
120	-7.61	1 41	1.09	0.26	10.07	12.22

Période	D_2005_1983	D_2005_1987	D_2005_1989	D_2005_1995	D_2005_1997	D_2005_2000
121	-24,66	-11,57	-14,98	-0,92	1,24	-0,05
122	-10,73	0,69	-1,39	10,12	8,80	9,29
123	-17,26	-6,92	-10,29	2,16	2,68	3,40
124	-12,41	-1,52	-5,83	5,19	5,71	7,16
125	-13,04	-0.11	-3.94	5.25	6.34	6.05
127	-13,79	-2,08	-5,52	4,88	5,65	5,70
128	-15,42	-2,82	-5,98	1,44	4,22	6,38
129	-15,93	-3,31	-11,86	0,31	1,57	-1,43
130	-9,05	20.23	-3,30	-1.84	0.64	-0.94
132	-11,38	21,33	-0,96	3,43	2,34	0,24
133	-17,08	-2,75	-7,32	6,17	3,59	2,76
134	-15,77	-3,40	-9,27	5,24	3,15	2,95
135	-12,03	2,51	-5,45	4,62	2,30	5,54
130	-13,73	1,86	-2,97	5,46	4,24	6,12
138	-11,72	1,21	-5,27	3,53	2,00	6,29
139	-23,19	-10,10	-18,38	-11,58	1,10	-6,98
140	-14,98	0,17	-7,29	3,34	2,84	4,90
141	-12,45	1,94	-1,04	7,02	5,85	8,50
143	-12,25	0,70	-4,58	5,35	2,41	5,34
144	-13,25	0,29	-5,48	3,98	3,38	6,97
145	-12,68	5,79	-0,22	8,10	8,56	9,92
146	-13,15	1,67	-3,64	8,15	8,15	7,85
147	-14,27	1.22	-2,05	8.80	7,72	7.50
149	-11,08	2,80	-4,22	9,35	7,56	11,43
150	-16,42	2,72	-2,42	10,53	8,96	8,80
151	-14,70	7,53	0,22	10,83	11,09	4,16
152	-8,06	-0.11	-2,49	5,72	5,66	2,01
155	-24,00	-4,59	-10,29	5,20	3,80	2,22
155	-21,71	-21,71	-21,71	-5,04	0,15	0,05
156	-24,98	-9,78	-15,24	3,08	1,17	3,63
157	-24,90	-7,48	-15,84	-2,00	0,82	3,11
159	-23,28	-6.90	-10.65	6.62	6.06	8.02
160	-24,61	-10,43	-12,48	4,78	4,30	3,80
161	-20,12	-7,19	-9,92	9,30	9,33	12,17
162	-23,57	-9,27	-12,97	4,91	7,21	10,56
163	-19,38	-5,56	-10,09	8,52	9,15	9,76
165	-18,81	-2,65	-5,84	9,32	11,47	11,06
166	-19,00	-3,45	-9,38	2,88	5,23	9,57
167	-16,97	-4,65	-11,18	1,10	9,41	8,17
168	-16,43	-2,37	-9,57	3,12	10,48	10,46
109	-14,95	-9.74	-10.47	1.56	7.46	6.62
171	-15,35	-8,22	-14,05	1,21	7,45	6,91
172	-16,16	-8,15	-13,66	6,36	8,83	8,15
173	-21,34	-11,82	-7,20	6,98	13,14	10,51
1/4	-12,65	0,33	9,65	15,64	18,77	14,46
175	-16,39	-5,41	-4,19	-21,93	3,48	4,35
177	3,92	7,24	-0,52	24,36	28,72	29,41
178	-3,51	1,32	-0,82	14,74	13,70	21,19
179	-11,45	-5,84	-6,18	7,42	7,79	9,42
181	-12,72	-3,74	-0,55	3.34	7.02	2,08
182	-7,89	-6,54	-6,54	5,63	12,50	13,45
183	-7,20	-2,55	-4,12	6,39	7,13	17,72
184	-6,97	-8,23	-4,95	3,95	5,43	2,87
185	-3,/9	-2,47	-1,50	-9.62	3 14	-0.79
187	-16,22	-27,89	-10,00	-20,05	5,58	4,98
188	-7,67	5,82	11,12	11,34	15,32	3,21
189	18,55	5,57	-10,60	-1,02	8,22	15,57
190	-13,70	-14,20	-8,43	-6,00	4,09	4,57
191	-18.23	3.10	-13,80	-7,88	6.69	7.55
193	-19,70	-9,34	-8,06	-1,87	5,66	7,46
194	-14,51	-4,55	-13,29	-6,06	4,14	5,33
195	11,47	8,71	-6,07	-3,42	9,23	7,24
196	11,67	-3,21	-0,98	-8,35	8.78	2,15
198	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
199	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
200	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,02
201	-0,01	-0,02	0,00	0,01	0,01	0,00
202	-0,02	-0,12	0,00	-0.10	0,03	-0,01
204	0,08	0,03	0,19	0,01	0,19	0,22
205	0,76	0,25	0,03	0,03	0,03	0,03
206	-0,26	-0,47	0,26	0,26	0,26	0,21
207	-0.01	-0.14	0.00	0.00	0.00	0.00

Période	D_2005_1983	D_2005_1987	D_2005_1989	D_2005_1995	D_2005_1997	D_2005_2000
208	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
209	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
210	0.21	0.41	0.34	0.00	0.48	0.26
211	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
212	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
213	8,99	-0,04	-0,04	-0,06	0,16	-0,04
214	10,95	-0,14	-0,14	-0,79	-0,14	-0,14
215	15,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
216	14,26	0,00	0,00	-0,40	0,00	0,00
217	12,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
218	8,22	-0,09	-0,09	0,37	-0,09	-0,09
219	3,10	-0,04	0,00	-0,20	0,00	0,00
220	-0,12	-0,08	-0,12	-0,09	0,16	0,00
221	-0,01	0,01	-0,10	0,00	0,00	0,00
222	2,63	6,59	0,36	0,18	0,29	0,00
223	1,03	-1,98	0,17	0,17	0,00	0,07
224	-30,30	-31,80	-30,26	0,17	0,17	0,17
225	-30,83	-39,79	-31,78	0,51	0,51	0,51
220	-74,04	-/0,/3	-03,33	-27,70	-25,00	-5,50
227	-60,24	-07,55	-70,13	-55,15	-20,99	-1,20
228	-82.86	-84.31	-00,03	-32,40	-10,41	1.00
229	-62,80	-04,51	-03,39	-26,55	-14,92	1,00
230	-52.09	-51.79	-35 37	6.13	18.06	30.31
232	-45,42	-44.46	-27.27	10.82	24.04	34.53
233	-37,17	-33.67	-19.08	18.38	26.89	37.48
234	-34,96	-33.27	-16.25	17.88	21.86	32.19
235	-32,15	-32.90	-13.50	17.18	18.33	27.51
236	-26,65	-30,19	-12,44	18,09	18,31	22,95
237	-31,07	-32,23	-12,85	13,62	10,13	11,50
238	-18,33	-17,12	0,03	28,09	24,35	16,13
239	-10,40	2,56	7,23	39,47	27,32	22,17
240	-5,45	15,65	16,83	47,46	34,51	29,27
241	-1,28	22,04	10,71	46,26	32,83	31,31
242	24,92	43,38	27,59	46,04	37,99	30,57
243	62,75	69,45	59,19	58,54	46,53	41,86
244	95,42	99,34	89,91	76,44	61,28	54,59
245	115,44	115,76	110,80	88,77	61,61	58,39
246	123,24	122,01	119,63	95,69	59,46	52,70
247	121,82	118,65	128,40	99,53	56,23	49,78
248	114,03	110,22	115,08	92,29	47,57	40,05
249	101,99	94,44	104,56	77,07	39,19	27,71
250	86,10	80,39	88,/3	66,42	34,54	26,44
251	73,02	66,55	/3,5/	56,40	30,73	26,94
252	25,02	21.84	37,23	45,47	20,10	25,70
233	-7.06	13.06	1.36	20,49 0.24	5.04	15.24
255	-7,00	0.15	-15.44	9,24	2 44	10.09
255	-39.86	-13.27	-27.18	-2 50	-2.06	-1.04
257	-47.75	-25.11	-34.61	-6.40	-8.20	2.23
258	-55.13	-33.28	-37.99	-10.88	-11.62	6.23
259	-66,35	-41,12	-45,86	-18,06	-17,16	5,10
260	-78,02	-48,75	-52,36	-24,07	-22,78	-2,31
261	-86,23	-47,93	-55,22	-24,06	-19,34	-16,16
262	-84,50	-39,25	-49,80	-9,58	-7,95	-10,23
263	-62,63	-32,27	-38,52	2,96	4,54	-9,96
264	-41,58	-22,67	-18,98	16,25	21,82	-7,64
265	-14,13	-6,45	14,76	32,10	43,82	1,99
266	11,02	20,37	36,89	43,64	57,56	12,44
267	54,96	61,15	66,98	65,36	77,52	32,86
268	85,71	90,15	95,67	82,22	90,05	46,03
269	107,32	110,80	113,36	90,36	100,42	56,99
2/0	120,19	128,72	118,26	99,84	113,21	70,15
2/1	130,57	137,84	121,/1	100,30	124,44	81,18
2/2	138,98	145,55	125,90	99,42	145.00	92,03
2/3	137,05	149,69	128,08	97,10	145,57	96,77
274	126.19	130 12	111 96	104,75	137.62	112 20
273	118 /19	121 2/	06.72	125 /0	135,00	102 57
270	78.28	101,04 89 52	18 74	113.40	95.09	60.13
278	48,83	64.73	18 46	78.81	58 77	29 58
279	5.59	29.66	-14.19	26.86	15.19	-9.04
280	-2,91	12,38	-7.30	7,23	3,98	-12.85
281	11,68	13,31	14.91	11.12	9,04	-0.16
282	46,33	39,39	55,45	42,00	44,65	36,53
283	2,40	3,76	28,14	9,29	17,89	8,59
284	-23,52	-23,84	6,64	-12,55	-7,73	-0,48
285	-38,69	-37,74	-8,62	-27,63	-21,72	-6,94
286	-54,66	-54,21	-28,57	-44,48	-34,38	-24,90
287	-69,87	-74,83	-46,58	-48,40	-41,36	-22,45
288	-90,61	-96,81	-71,85	-61,10	-49,53	-6,71
289	-97,96	-100,19	-83,86	-63,15	-47,65	-14,65
290	-70,28	-67,34	-68,25	-43,77	-31,84	-19,01
291	34,85	18,36	0,47	4,86	8,13	10,50
292	163.78	149.39	91.20	54.73	64.55	34.73

**Annex B.** Cartes d'évolution du trait de côte entre dunes d'Ecault et dunes de Camier (échelle spatiallle 1/2000)







• Cartes d'évolution du trait de côte : dunes du chevalier Sansot (carte 9-16, du Nord vers le Sud)







• Cartes d'évolution du trait de côte : dunes de Camier (carte17-28, du Nord vers le Sud)



