

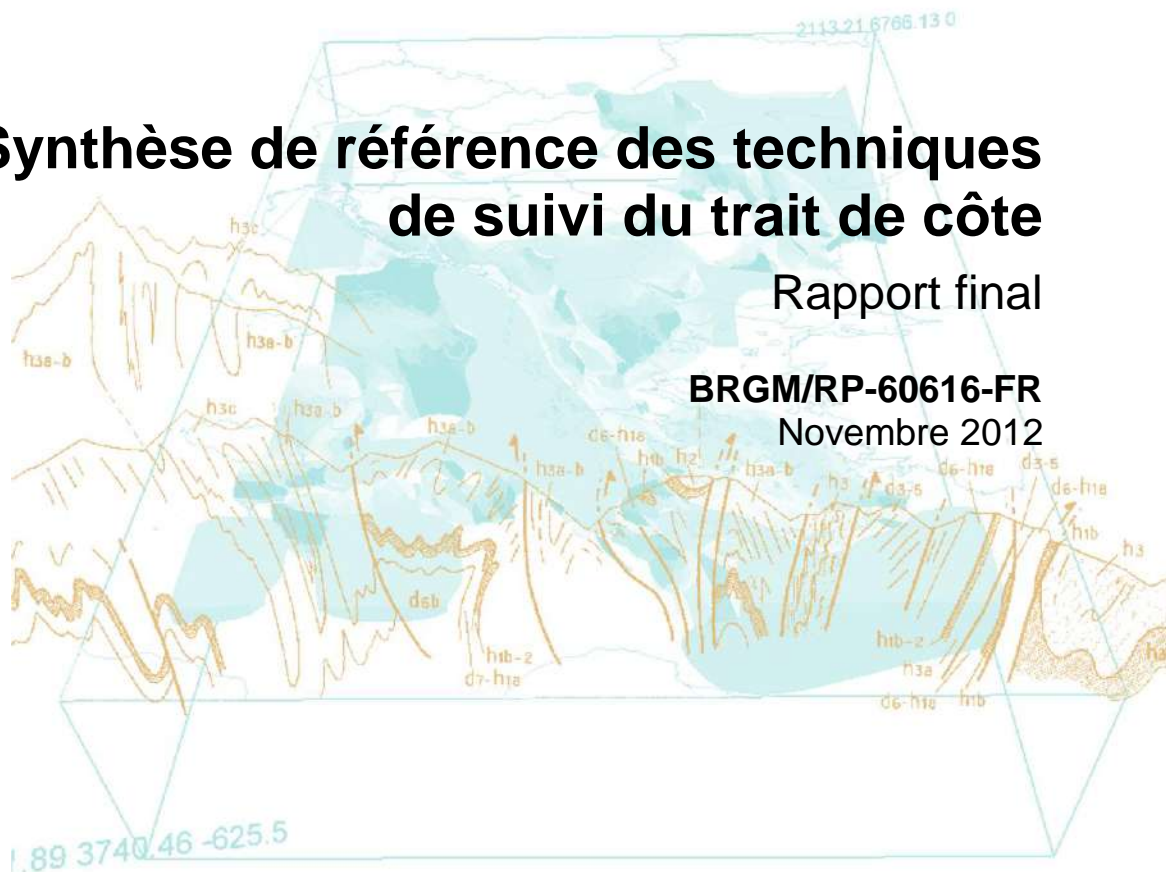


Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte

Rapport final

BRGM/RP-60616-FR

Novembre 2012



Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte

Rapport final

BRGM/RP-60616-FR

Novembre 2012

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Service public du BRGM PSP11AQI27

C. Mallet, A. Michot

avec la collaboration de

Y. De La Torre, V. Lafon, M. Robin, B. Prevoteaux

Vérificateur :

C. OLIVEROS

Approbateur :

N. LENOTRE

En l'absence de signature, et pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

AVERTISSEMENTS

Le présent document s'adresse à des gestionnaires, opérateurs techniques et scientifiques ayant pour mission de réaliser des suivis de l'évolution géomorphologique du littoral. Par conséquent, les concepts méthodologiques et les terminologies employées dans ce document sont supposés connus (morphologie littoral et hydrodynamique) et conservent un niveau de connaissances techniques minimum. Les nombreuses références bibliographiques citées permettent aux lecteurs d'accéder à des connaissances plus élémentaires ou au contraire d'approfondir les informations de ce document.

Afin de faciliter la lecture, les termes techniques figurant en gras dans le corps du texte et apparaissant tout le long du texte sont définis dans un glossaire en fin de rapport.

Ce rapport de référence sur les méthodes de suivi du trait de côte pourra faire l'objet de versions ultérieures adaptées en fonction de l'évolution des connaissances, des pratiques, des outils et des méthodes destinés à suivre le trait de côte.

Mots clés : suivi du trait de côte, guide méthodologique, érosion, indicateurs, outils de levés, outils de traitement, littoral, observatoires, système d'information géographique, télédétection, base de données, tableurs.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Mallet C., Michot A. avec la collaboration de **De La Torre Y., Lafon V., Robin M. et B. Prevotiaux** (2012) - Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte - Rapport BRGM/RP-60616-FR, 162 p., 100 fig., 7 ann.

Synthèse

Le présent rapport de référence des méthodes de suivi du trait de côte fut commandité en 2011 par le MEDDTL au BRGM dans le cadre de ses missions de Service Public (convention MEDDTL/DEB-BRGM 2011, n°2100485270, projet PSP11AQI27). Il s'inscrit dans la continuité du guide de gestion du trait de côte proposé par le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM, 2010). Par ailleurs, le présent document contribue à la constitution d'un socle national commun de connaissances relatives au littoral actuellement porté par l'Etat à la fois dans le cadre de l'Axe A de la Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte et également dans l'actualisation en cours des catalogues sédimentologiques des côtes françaises.

A destination des gestionnaires, techniciens et scientifiques du littoral, cette référence méthodologique de suivi du trait de côte est un outil d'aide à la décision avec deux principaux objectifs :

- proposer un guide des bonnes pratiques,
- présenter différentes méthodes de suivi, d'acquisition et de traitement des données afin d'extraire le trait de côte et de représenter son évolution.

Ce présent rapport comporte sept parties principales.

La première partie présente le contexte général, les objectifs et la méthode de travail, notamment l'enquête et les collaborations mises en œuvre pour la réalisation du document.

Un guide des bonnes pratiques pour le suivi du trait de côte et des indicateurs est proposé en deuxième partie. Présenté sous forme d'organigramme, il explique la démarche à suivre dans le cas du suivi de la frange côtière.

La troisième partie traite de la définition du trait de côte et présente les différents types de milieux rencontrés sur le littoral : les côtes sableuses (tous types de plage y compris les plages coralliennes), les côtes rocheuses, les zones humides (marais maritimes et **mangroves**) et les côtes artificialisées. Les indicateurs de « trait de côte » sont décrits pour chacun de ces milieux littoraux.

La quatrième partie du document présente les méthodes d'acquisition et de suivi du trait de côte principalement utilisées en France métropolitaine et outremer. Elle décrit les techniques d'acquisition terrestre (GPS, DGPS, scanner 3D, repères, etc.), aériennes et satellitaires (télédétection : photographies aériennes, imagerie multispectrale SPOT, etc.), ainsi que les méthodes d'acquisition en mer (levés bathymétriques).

La cinquième partie expose les principaux outils (SIG, base de données et tableurs) et les méthodes de traitement du trait de côte. Un bilan des méthodes de suivi est proposé en sixième partie.

Enfin, des études de cas, présentées en chapitre 7, permettent d'illustrer différents modes de représentations cartographiques de l'évolution du trait de côte.

Sommaire

1. Introduction.....	15
1.1. CONTEXTE	15
1.2. OBJECTIFS	16
1.2.1. Généralités et informations pratiques	16
1.2.2. Comment utiliser ce guide ?	17
1.3. MÉTHODE DE TRAVAIL	17
1.3.1. Collaborations et principales sources bibliographiques.....	17
1.3.2. Réalisation de l'enquête	18
2. Guide des bonnes pratiques pour le suivi du trait de côte.....	19
3. Indicateurs de trait de côte et géomorphologie côtière	23
3.1. DÉFINITION DU TRAIT DE CÔTE.....	23
3.2. DESCRIPTION GÉOMORPHOLOGIQUE DES GRANDS TYPES DE LITTORAUX.....	28
3.2.1. Les systèmes plages-dunes et plages-récifs coralliens.....	28
3.2.2. Les côtes à falaise rocheuse	33
3.2.3. Les marais maritimes.....	35
3.2.4. Les marais à mangrove	36
3.2.5. Les côtes artificialisées.....	38
3.3. FRÉQUENCE ET DURÉE DES SUIVIS.....	39
4. Les outils de levés pour le suivi du trait de côte.....	41
4.1. LEVÉS TERRESTRES	42
4.1.1. Les repères de terrain.....	42
4.1.2. Le GPS (Global Positioning system)	45
4.1.3. Le DGPS (ou GPS Différentiel).....	47
4.1.4. Le théodolite.....	56
4.1.5. Le scanner 3D ou LiDAR terrestre	59
4.1.6. Les suivis photographiques au sol	61
4.1.7. L'imagerie vidéo	64
4.2. LEVÉS AÉRIENS ET IMAGERIE SATELLITE	68
4.2.1. La télédétection aéroportée	69
4.2.2. La télédétection spatiale	82

4.2.3. Comment extraire le trait de côte ?	93
4.3. AUTRES TYPES DE LEVÉS : LES LEVÉS EN MER	95
4.3.1. L'échosondeur monofaisceau et multifaisceaux	95
4.3.2. L'échosondeur sismique réflexion	98
4.3.3. Le sonar à balayage latéral	101
4.4. SYNTHÈSE DES OUTILS DE LEVÉ ET DES MÉTHODES DE TRAITEMENT ...	104
4.4.1. Recommandations générales.....	104
4.4.2. Tableaux synthétiques des outils de levé et des méthodes de traitement pour le suivi du trait de côte.....	105
5. Les outils et les méthodes de traitement du trait de côte	115
5.1. GÉNÉRALITÉS	115
5.2. LES MÉTHODES DE TRAITEMENT DU TRAIT DE CÔTE SOUS SIG	116
5.2.1. Exemple de traitement du trait de côte issu d'un MNT.....	116
5.2.2. La méthode d'utilisation des tampons pour représenter l'évolution de l'indicateur du trait de côte sous Arcmap d'ESRI©	117
5.2.3. Le traitement de l'indicateur du trait de côte sous DSAS	118
5.2.4. Le traitement de l'indicateur du trait de côte sous MobiTC	121
5.3. QUE FAIRE DES DONNÉES APRÈS TRAITEMENT ?	122
6. Le bilan : ultime étape avant de définir une stratégie de levé du trait de côte.....	123
7. Les études de cas	125
7.1. LA MÉTHODE DE TRAITEMENT DU TRAIT DE CÔTE SOUS SIG SUR LA CÔTE SABLEUSE EN AQUITAINE.....	125
7.2. APPORT DE LA SISMIQUE TRÈS HAUTE RÉOLUTION ET DU LIDAR DANS LE SUIVI DU TRAIT DE CÔTE DU LITTORAL SABLEUX AU LANGUEDOC-ROUSSILLON	130
7.3. EXPLOITATION D'UNE COLLECTION DE TRAITS DE CÔTE EN RÉGION PAYS DE LA LOIRE : STATISTIQUES PAR TRANSECT.....	134
7.4. EXTRACTION DES TRAITS DE CÔTE PAR L'UTILISATION DU LIDAR EN RÉGION PAYS DE LA LOIRE (ZONE DE LA TRESSON, NOIRMOUTIER).....	136
7.5. LE SUIVI DU TRAIT DE CÔTE DES RIVAGES À MANGROVE EN GUYANE FRANÇAISE.....	139
8. Conclusion.....	143
9. Remerciements.....	145

10.	Bibliographie	147
11.	Liste des abréviations	155
12.	Glossaire	157
13.	Annexes.....	163

Liste des illustrations

Figure 1 : Organigramme permettant de définir une méthode de suivi du trait de côte.....	20
Figure 2 : Représentation schématique de différents indicateurs de trait de côte (Boak and Turner, 2005, adapté et traduit par le BRGM)	24
Figure 3 : Tableau des principaux indicateurs de trait de côte recommandés et classés par type et par milieu	25
Figure 4 : Diagramme espace-temps des indicateurs de trait de côte fréquemment utilisés sur tous les types de plage.....	26
Figure 5 : Diagramme espace-temps des indicateurs de trait de côte fréquemment utilisés sur la côte rocheuse	27
Figure 6 : Diagramme espace-temps des indicateurs de trait de côte fréquemment utilisés sur les zones humides	27
Figure 7 : Profil type d'une plage sableuse atlantique et de la dune (© Observatoire Côte Aquitaine).....	28
Figure 8 : Eléments de géomorphologie récifale du récif frangeant de Saint-Gilles (d'après Montaggioni et Faure, 1980 ; modifié par Cordier, 2007)	29
Figure 9 : Interprétation de traits de côte d'un système dunaire, limites de la végétation (© Costa, 2011, communication écrite)	30
Figure 10 : Relevé de la position du trait de côte, limite du jet-de-rive (© Sabatier, 2001).....	31
Figure 11: Schéma type d'un profil de plage sableuse méditerranéenne (littoral français ; Stepanian et al., 2010).....	32
Figure 12 : Terminologie pour le système sableux côtier microtidal adapté au Languedoc-Roussillon (Certain et al., 2011 d'après Komar, 1997)	32
Figure 13 : Exemple d'indicateurs de traits de côte d'une falaise crayeuse (© Costa, 2011).....	34
Figure 14 : Autre exemple d'indicateurs de traits de côte d'une falaise rocheuse (© Observatoire Côte Aquitaine).....	35
Figure 15 : Morphologie d'un marais maritime en région de climat tempéré (Paskoff, 1998).....	36
Figure 16 : Exemple d'indicateur de trait de côte d'une zone humide en pointillés rouges : limite supérieure du schorre (Claouey, © Observatoire Côte Aquitaine).....	36
Figure 17 : a : Représentation schématique d'un banc de vase ; b : photographie du banc de Kaw (Guyane) avec les grandes limites du milieu (Baghdadi et al., 2004)	37
Figure 18 : Exemple de structure de mangrove en Nouvelle-Calédonie (Lebigre, 2004). A : mangrove-tanne. B : mangrove-prairie-marécageuse	38
Figure 19 : Modèle type d'une fiche synthétique.....	42
Figure 20 : Repère de terrain (borne jaune) en complément du DGPS.....	43
Figure 21 : Fiche synthétique concernant les repères de terrain	44

Figure 22 : GPS pour la cartographie (© Magellan)	45
Figure 23 : Fiche synthétique concernant le GPS	47
Figure 24 : Système complet du DGPS avec une borne, Aquitaine, Contis Sud, 2010 (© Observatoire Côte Aquitaine)	48
Figure 25 : Les deux types de levé DGPS (voir explications et acronymes dans le texte ; © BRGM).....	49
Figure 26 : Principe du levé en RTK (DGPS : station de base permanente ou temporaire + mobile, voir explications dans le texte)	50
Figure 27 : Méthode base fixe (borne dont les coordonnées sont connues)	50
Figure 28 : Méthode base libre avec repère.....	51
Figure 29 : Principe du levé DGPS en PPK (voir explications et acronymes dans le texte).....	52
Figure 30 : Système du DGPS (mobile Trimble R6®) positionné au pied de dune, Aquitaine, Amélie Sud, 2011 (© Observatoire Côte Aquitaine)	53
Figure 31 : Technique utilisée pour le levé du trait de côte par DGPS sur une plage sableuse méditerranéenne (Stepanian et al., 2010)	53
Figure 32 : Méthodes de relevé de la position du trait de côte (Stepanian et al., 2011) : les levés longitudinaux du trait de côte sont effectués à l'aide d'un DGPS installé sur un quad ou transporté par un opérateur.	54
Figure 33 : Exemple de levé topographique immergé dans une DAR peu profonde (De la Torre, 2006).....	54
Figure 34 : Fiche synthétique concernant le DGPS	56
Figure 35 : Théodolite (Leica Geosystems®).....	56
Figure 36 : Fiche synthétique concernant le théodolite	58
Figure 37 : Scanner 3D ou LiDAR terrestre (Riegl LMS-Z 420i ; © ATM 3D)	60
Figure 38 : Fiche synthétique concernant le scanner 3D ou TLS	61
Figure 39 : Erosion du rocher de Basta à Biarritz entre 1907 et 2004 (Aubié S. et al., 2005)	63
Figure 40 : Fiche synthétique concernant les suivis photos au sol	64
Figure 41 : Système de suivi vidéo (VM ₄ GIS / CASAGEC ; Rihouey, 2011)	65
Figure 42 : Fiche synthétique concernant l'imagerie vidéo	68
Figure 43 : Etude diachronique d'orthophotographies datant de 1954 (©BRGM, IGN et Observatoire de la Côte Aquitaine) et de 2009 (©BRGM, IGN, Observatoire de la Côte Aquitaine, Convention n°0137/GIP ATGeRI) révélant de fortes instabilités au niveau du château de la Reine de Serbie sur la plage du Pavillon Royal à Bidart.....	72
Figure 44 : Etude diachronique de photographies aériennes obliques datant de 2008 (à gauche) et 2010 (à droite), révélant un mouvement de terrain, au niveau de la plage de Maiarko à Saint-Jean-de-Luz (© Observatoire de la Côte Aquitaine)	73
Figure 45 : Fiche synthétique concernant les photographies aériennes verticales	74
Figure 46 : Fiche synthétique concernant les photographies aériennes obliques	75
Figure 47 : Moyens de mesures des données (site de l'IGN, c ; programme Litto3D®, 2010) : 1.laser bathymétrique ; 2.laser topographique et 3.sondeur multifaisceaux.	79
Figure 48 : Fiche synthétique concernant le LiDAR aéroporté.....	79
Figure 49 : Exemple de classification par l'imagerie hyperspectrale aéroportée en milieu corallien. Les limites entre sable humide et sec et la végétation de haut de plage sont clairement identifiables (Despinoy et Naim, 1998)	81

Figure 50 : Fiche synthétique concernant l'imagerie hyperspectrale (CASI)	82
Figure 51 : Image SPOT-5, résolution 2,5 m - Fécamp, France (©CNES/ Spot Image 2005)	85
Figure 52 : Image FORMOSAT-2, résolution 2 m, couleurs - Baie d'Algeciras- Espagne (© NSPO/ Distribution Spot Image 2006)	85
Figure 53 : Fiche synthétique concernant l'imagerie satellitale multispectrale (l'exemple de SPOT-5 et de FORMOSAT-2)	86
Figure 54 : Image Pléiades, le Mont Saint-Michel, France (© CNES 2012)	88
Figure 55 : Fiche synthétique concernant l'imagerie Pléiades	89
Figure 56 : Evolution du trait de côte (contact terre-mer) en Guyane par imagerie radar (Baghdadi et al., 2004)	90
Figure 57 : Fiche synthétique concernant l'imagerie radar SAR	92
Figure 58 : Limite du front de mangrove pour le suivi du trait de côte à Mayotte à partir de photographie aérienne (De la Torre et al., 2006)	94
Figure 59 : Suivi du trait de côte : application du filtre SOBEL (Morichon et al., 2008)	95
Figure 60 : Principe d'acquisition du profil sous-marin par sondeur bathymétrique monofaisceau (Stepanian et al., 2010)	96
Figure 61 : Fiche synthétique concernant les échosondeurs mono- et multifaisceaux	98
Figure 62 : Principe de la sismique réflexion (© Ifremer)	99
Figure 63 : Fiche synthétique concernant l'échosondeur sismique réflexion	100
Figure 64 : Mise en oeuvre d'un sonar latéral. A : poisson ; B : surface insonifiée et C : surface fauchée (© Ifremer)	101
Figure 65 : Fiche synthétique concernant le sonar à balayage latéral	104
Figure 66 : Recommandations des levés par type de milieu	105
Figure 67 : Tableau synthétique des outils de levés pour le suivi du trait de côte	113
Figure 68 : Exemples de traitements adaptés aux données issues des outils de levé	114
Figure 69 : Evolution du profil plage-dune entre 2003 et 2008 au niveau de Soulac-sur-Mer (Mugica et al., 2008)	116
Figure 70 : Réalisation d'un MNT : modèle de l'interpolation utilisé	117
Figure 71 : Méthode d'utilisation des tampons pour représenter l'évolution du trait de côte girondin en Aquitaine à partir d'un SIG (Mugica et al., 2008)	118
Figure 72 : Illustration du calcul de DSAS (Arcgis, ® ESRI). La ligne de base « offshore » est une ligne imaginaire de référence permettant de fournir une origine aux transects perpendiculaires aux différents traits de côte (par ex. ici : 1966, 1985, 2009 ; Aubié et al., 2011)	119
Figure 73 : Taux d'évolution du trait de côte par secteur géomorphologique du littoral des Pyrénées Atlantiques pour 2020 (Aubié et al., 2011)	120
Figure 74 : Cartographie de l'aléa mouvements de terrain et érosion du littoral des Pyrénées Atlantiques à échéance 2020 (Aubié et al., 2011)	120
Figure 75 : Représentation de l'évolution du trait de côte par l'outil MobiTC (plage de Taravo, Corse du sud ; © CETE Méditerranée)	121
Figure 76 : Interprétation graphique de l'évolution du trait de côte, sur une trace de la plage de Taravo, Corse du sud (© CETE Méditerranée)	122
Figure 77 : Evolution du trait de côte girondin entre 2006 et 2007 (Mugica et al., 2008)	128
Figure 78 : Représentation de l'évolution de l'érosion littorale sur la période 2002-2011 (© ONF) ..	129

Figure 79 : Apport d'un nouvel outil, le LiDAR aéroporté bathymétrique LADS Mk II (Certain et al., 2011).....	131
Figure 80 : Couplage des informations sismiques et d'autres technologies : le LiDAR (Certain et al., 2011).....	132
Figure 81 : Bilans sédimentaires séculaires à partir de cartes bathymétriques anciennes (SHOM) et du LiDAR (Certain et al., 2011)	133
Figure 82 : Segmentation et évolution pluri-décennale du trait de côte entre 1920 et 2009 (Juigner, 2012).....	136
Figure 83 : Traits de côte extraits du LiDAR 2008 et 2010 (Robin, 2012)	138
Figure 84 : Représentation schématique du suivi du trait de côte guyanais par imagerie satellite et photographies aériennes (Walcker et al., 2011).....	140
Figure 85 : Représentation du trait de côte, limite de front de mangrove (rivage à mangrove ; Walcker et al., 2011).....	141
Figure 86 : Représentation des profils côtier et temporel de la ligne de rivage en Guyane (Walcker et al., 2011).....	141
Figure 87 : Représentation des valeurs de position (Walcker et al., 2011) : a. évolution du trait de côte en fonction du temps et b. position des traits de côte historiques (localisation des traits de côte par année)	142
Figure 88 : Représentation graphique du signal périodique. En rouge : les phases d'accrétion. En bleu : les phases d'érosion (Walcker et al., 2011).....	142
Figure 89 : Liste des organismes sollicités pour l'enquête	185
Figure 90 : Réponses à la question 1: Sur quel type de littoral travaillez-vous ?.....	188
Figure 91 : Réponse à la question 3 : Lors de vos missions, sur quelle échelle d'espace travaillez-vous ?	188
Figure 92 : Réponses à la question 4 : Lors de vos missions, quel type de capteur utilisez-vous ?	189
Figure 93 : Réponses à la question 8 : Lors de vos missions, quelle méthode d'acquisition utilisez-vous ?	190
Figure 94 : Réponses à la question 12 : Quel type de porteur aérien utilisez-vous ?.....	190
Figure 95 : Réponses à la question 15 : Lors de vos missions, quelle méthode d'acquisition utilisez-vous ?	191
Figure 96 : Réponses à la question 19 : Lors de vos missions, quelle méthode d'acquisition utilisez-vous?	192
Figure 97 : Réponses à la question 24 : Quel outil employez-vous pour traiter les données récoltées ?	193
Figure 98 : Réponses à la question 26 : Quelle méthode employez-vous pour traiter les données récoltées ?	193
Figure 99 : Tableau présentant la description des données FORMOSAT-2 (d'après le site ASTRIUM, a).....	201
Figure 100 : Tableau présentant la description des données Pléiades (d'après le site Astrium, c).....	201

Liste des annexes

Annexe 1 : Présentation du projet INFOLITTORAL-1	165
Annexe 2 : Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte.....	167
Annexe 3 : Liste des organismes sollicités pour l'enquête	183
Annexe 4 : Analyse des résultats de l'enquête	187
Annexe 5 : Les porteurs aériens.....	197
Annexe 6 : Paramètres et caractéristiques du levé LiDAR.....	199
Annexe 7 : Descriptions complémentaires de l'imagerie satellitaire FORMOSAT-2 et Pléiades	201

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

À l'interface entre terre et mer, le **littoral** est un milieu fragile, très convoité, qu'il est important de connaître afin de le gérer au mieux. Éminemment mobile, le **littoral** est soumis à des processus naturels (courants, vagues, tempêtes, ...) ou anthropiques (impact des ouvrages, opération de rechargement, ...) qui le conduisent à des évolutions rapides, caractérisées notamment par les notions d'aléas de **submersion et d'érosion**. Le suivi et l'analyse des **indicateurs** de l'évolution côtière sont des préalables indispensables à la gestion du **littoral**. Ils amènent souvent à utiliser la notion de « trait de côte ».

Celle-ci peut être considérée comme étant réductrice face à la diversité qu'offre la frange côtière parmi les environnements de côtes sableuses, rocheuses, **baies**, estuaires, **mangroves**, plages coralliennes, etc. Il convient alors d'aborder la notion plus générale de bande côtière qui s'étend du domaine marin au domaine continental. Il est cependant nécessaire de conserver cette notion de trait de côte afin de disposer d'un **indicateur** commun aux différents gestionnaires permettant de suivre l'évolution du **littoral**, de partager cette connaissance et d'harmoniser les méthodes de suivi. À titre d'exemple, le SHOM définit le trait de côte comme étant « la laisse des plus hautes mers dans le cas d'une marée astronomique de coefficient 120 et dans des conditions météorologiques normales (pas de vent du large, pas de dépression atmosphérique susceptible d'élever le niveau de la mer) » (SHOM, 2011). Cette définition permet de cartographier cet **indicateur** de trait de côte à l'échelle de la France quels que soient les littoraux, en particulier à des fins liées à la sécurité de la navigation maritime et côtière. Cependant, ce trait de côte qui présente l'avantage d'être établi à l'échelle nationale, est difficilement repérable sur le terrain d'un point de vue géomorphologique. Il est donc intéressant d'envisager d'autres types d'**indicateurs** reconnus afin de suivre l'évolution du trait de côte.

C'est à la suite de ce constat qu'il a été proposé de réaliser un guide pour le suivi du trait de côte.

Devant le besoin de prévenir les risques côtiers dans un contexte du changement climatique, l'État a décidé fin février 2012 de mettre en œuvre une « Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, vers la relocalisation des activités et des biens », suivant ainsi l'une des propositions du Grenelle de la mer et d'un rapport de recommandations présenté en 2011, par Monsieur Alain Cousin, député de la Manche.

Dans ce contexte, le MEDDTL/DEB a confié au BRGM en 2010 la réalisation d'un état des lieux des observatoires et réseaux d'observation de suivi de l'évolution des côtes existants à une échelle régionale et infrarégionale en France métropolitaine et outremer (« Synthèse des travaux menés sur l'observation de l'évolution du trait de côte », Bulteau *et al.*, 2011).

Le BRGM opérateur de plusieurs observatoires de suivi du trait de côte (Aquitaine, Corse, Pays de Monts, etc.) dans le cadre de ses missions de Service Public a proposé en 2011 au MEDDTL de produire un guide méthodologique de suivi du trait de côte (convention MEDDTL/DEB-BRGM 2011, n°2100485270, projet PSP11AQI27). Ce guide, qui fait l'objet du présent rapport, a vocation à mettre à disposition des méthodologies pour l'acquisition et le traitement des données afin d'analyser l'évolution du trait de côte. Il est à l'usage des gestionnaires, des techniciens et des scientifiques opérant sur la gestion du « trait de côte ».

Ces actions, qui visent à la constitution du socle commun de connaissances relatives au littoral, constituent ainsi les premiers éléments de la stratégie nationale de gestion du trait de côte portée par le MEDDE.

Ce présent guide s'inscrit dans la continuité du guide de gestion du trait de côte proposé par le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM, 2010) et s'insère dans la mise à jour des catalogues sédimentologiques initiée en 2011 par l'État.

Ce guide méthodologique de suivi du trait de côte pourra faire l'objet de versions ultérieures adaptées en fonction de l'évolution des connaissances, des pratiques, des outils et des méthodes destinés à suivre le trait de côte.

1.2. OBJECTIFS

1.2.1. Généralités et informations pratiques

Le guide méthodologique de suivi du trait de côte a deux principaux objectifs :

- proposer un guide opérationnel des bonnes pratiques selon les types de côtes,
- présenter différents outils et méthodes de suivi.

Le document s'adresse à des gestionnaires, opérateurs techniques et scientifiques ayant pour mission de réaliser des suivis de l'évolution géomorphologique du **littoral**. Les concepts méthodologiques et les terminologies employés dans ce guide requièrent au préalable des bases de connaissances techniques. Les nombreuses références bibliographiques citées permettent aux lecteurs non spécialisés d'accéder à des connaissances plus élémentaires ou au contraire d'approfondir les informations de ce guide.

Le guide est organisé en deux parties :

- **Partie 1 (chapitre 2)** : présentation du guide des bonnes pratiques de suivi et de traitement de l'évolution du trait de côte, avec un organigramme permettant d'identifier les outils et traitements pour le suivi du trait de côte en fonction des types de **littoraux** et des besoins.
- **Partie 2 (chapitres 3 à 7)** : présentation des principaux types de **littoraux** français (métropole et outre-mer, chap. 3), des outils de levés et des méthodes de traitement de l'évolution du trait de côte couramment utilisées (chap. 4 et 5). Ces chapitres s'appuient sur une synthèse bibliographique issue de rapports, de publications scientifiques et d'ouvrages généraux. Cette analyse est complétée par une enquête réalisée auprès des principaux producteurs de données « de trait de côte » en France afin de compléter la synthèse bibliographique. Deux tableaux présentant les outils de levés (caractéristiques, avantages, inconvénients), et les méthodes de traitement utilisées pour les données issues des outils de levés, figurent à la fin du chapitre 4. Le bilan de ces différentes méthodes permet à l'utilisateur de choisir la méthode la plus adaptée à ses besoins et à ses moyens, et de définir une stratégie de levé du trait de côte (chap. 6) en fonction des milieux **littoraux** et des objectifs souhaités (emprise, fréquence, aléas et enjeux). Des études de cas font figure d'exemples à la fin de ce guide (chap. 7).

Les levés aériens et satellites (chap. 4.2) font l'objet d'une attention particulière dans ce rapport. En effet, la **télédétection**, au sens large du terme, est de nos jours une

méthode de plus en plus utilisée dans le suivi de la frange côtière et le sera d'autant plus dans les années à venir. La première partie est consacrée aux techniques basées sur le principe de la **télédétection** aéroportée (photos aériennes, LiDAR, etc.) et satellitaire (imagerie optique – exemple : SPOT, FORMOSAT, etc. - et imagerie radar). Elle est suivie des différentes méthodes d'extraction du trait de côte.

1.2.2. Comment utiliser ce guide ?

Ce guide peut être utilisé de deux manières différentes.

Tout d'abord, un organigramme présenté au début de ce rapport (chap. 2), permet d'apporter au lecteur une vision générale des différentes étapes à entreprendre dans le choix d'une méthode de suivi. Il permet ensuite à l'utilisateur d'affiner ses connaissances pour chacune des étapes développées en se reportant aux références citées tout au long de la deuxième partie (chap. 3 à 7).

Cependant, le lecteur peut, s'il le souhaite, consulter directement les différents chapitres de ce rapport (indicateurs de trait de côte, méthodes de suivi, etc.) en fonction de ses besoins d'information (les chapitres restent indépendants dans ce guide).

1.3. MÉTHODE DE TRAVAIL

Les différents chapitres (notions de géomorphologie côtière, outils de levé, méthodes de traitement, etc.) s'appuient sur une synthèse bibliographique issue de rapports, de publications scientifiques et d'ouvrages généraux (toutes les références bibliographiques sont citées dans le texte et figurent à la fin du document). Certaines parties du texte ainsi que les études de cas sont souvent issues de communications écrites des collaborateurs.

1.3.1. Collaborations et principales sources bibliographiques

Le comité de pilotage de ce guide se compose du MEDDE, du BRGM et du CETMEF. Le guide a été réalisé par le BRGM avec la collaboration des partenaires suivants :

- les groupes de travail respectivement en charge de l'actualisation des catalogues sédimentologiques et de la révision des guides méthodologiques des PPRL pour la définition du trait de côte (chap. 3.1) ;
- le CETE Sud-Ouest pour la méthode d'acquisition du trait de côte par photo-interprétation rédigée dans le cadre de l'actualisation des catalogues sédimentologiques (chap. 4.2.3.1) ;
- GEO-Transfert, cellule de transfert de technologie du laboratoire EPOC de l'université Bordeaux 1, pour les méthodes de suivi du trait de côte par **télédétection** spatiale rédigées dans le cadre du projet INFOLITTORAL (chap. 4.2.2 et annexe 1) ;
- L'université de Nantes, UMR 6554 LETG Géolittomer, pour les études de cas concernant les méthodes de traitement du trait de côte (chap. 7.3 et 7.4) ;
- les nombreux contributeurs qui ont bien voulu répondre à l'enquête réalisée pour cette étude et dont les références sont utilisées pour la rédaction.

Ce guide s'appuie notamment sur les ouvrages de références suivants :

- le guide de gestion du trait de côte (MEEDDM, 2010) ;
- les recommandations pour une stratégie nationale de gestion du trait de côte, du recul stratégique et de la défense contre la mer (MEEDDM, 2012) ;
- le rapport sur l'état des lieux des observatoires et réseaux d'observation de suivi de l'évolution des côtes existants à une échelle régionale et infrarégionale en France, y compris dans le DOM (« Synthèse des travaux menés sur l'observation de l'évolution du trait de côte », Bulteau *et al.*, 2011).

1.3.2. Réalisation de l'enquête

Une enquête a été menée auprès des principaux producteurs de données « de trait de côte » en France métropolitaine et outremer afin de compléter la synthèse bibliographique. Le questionnaire a été validé par le Comité de Pilotage. La liste des personnes consultées a été définie par le Comité de Pilotage de manière à représenter les principaux acteurs impliqués techniquement dans les suivis du trait de côte (établissements publics, universités, services de l'État, des collectivités, etc.). L'objectif principal de cette enquête est d'apporter des précisions quant aux pratiques de suivi et de traitement couramment utilisées en France, ainsi qu'au contexte de réalisation (recherche, aménagement, etc.).

Cette enquête complète celle qui fut précédemment réalisée dans le cadre de l'actualisation des catalogues sédimentologiques des côtes françaises. Elle confirme d'une part les besoins exprimés des organismes concernés (majoritairement les producteurs de données), et précise surtout les méthodes de suivi couramment employées en France.

Le questionnaire a été mis en ligne du 30/11/11 au 31/01/12. Il comprend 36 questions et nécessite environ 15 à 20 minutes pour être complété (annexe 2).

Lors de cette enquête, 81 personnes ont été sondées et 27 ont répondu, soit 33% environ (annexe 3 ; Figure 89).

Les résultats de l'enquête sont directement utilisés pour la rédaction du guide et sont analysés en annexe 4.

2. Guide des bonnes pratiques pour le suivi du trait de côte

L'**érosion** du littoral, ainsi que les risques de **submersion** des côtes, constituent un sujet de préoccupation de plus en plus prégnant pour les communes littorales, compte-tenu de l'augmentation des enjeux notamment économiques dans des zones soumises à des aléas naturels récurrents. Il convient de suivre l'évolution de la frange côtière afin de prévoir ces phénomènes à différentes échelles de temps et d'espace dans l'objectif d'aider dans les choix de gestion et d'aménagement.

Le choix des méthodes de suivi du trait de côte doit s'inscrire dans une logique de progression, d'étapes à entreprendre, afin de garantir au mieux la pertinence et l'efficacité de ces méthodes. L'organigramme ci-après (

Figure 1) présente de manière synthétique les différentes étapes à suivre dans le choix des méthodes. Il doit être utilisé à titre informatif en tant qu'outil d'aide à la décision. L'organigramme renvoie à différents chapitres développés dans ce document. Ainsi, l'utilisateur pourra affiner sa lecture pour chacune des étapes développées en se reportant aux références citées.

Attention : Le guide apporte une aide à l'expression des besoins exprimés. Les étapes permettent à l'utilisateur de se poser les bonnes questions et ainsi pouvoir trouver dans le document des réponses adaptées.

ETAPE 1 : LE MILIEU

La première étape consiste à analyser le type de milieu littoral correspondant au cadre de l'étude (chap. 3.2). Elle vise à caractériser le contexte géographique et géologique de la zone, de manière à décrire la connaissance globale du secteur étudié, analyser les différents mécanismes présents (érosion, submersion) et détecter les zones présentant de fortes vulnérabilités. Elle permet d'autre part d'identifier les enjeux exposés, les préoccupations et les attentes des gestionnaires.

Même à une échelle locale, l'analyse de l'évolution du littoral doit se situer dans un premier temps dans un contexte géomorphologique régional (dynamique du secteur). La synthèse des données peut porter sur les processus (ex. : agents d'érosion marins et continentaux), les caractéristiques sédimentaires, la morphodynamique sédimentaire ou encore sur les différents aménagements réalisés à proximité du secteur. L'ensemble de ces données apporte un aperçu du contexte géodynamique.

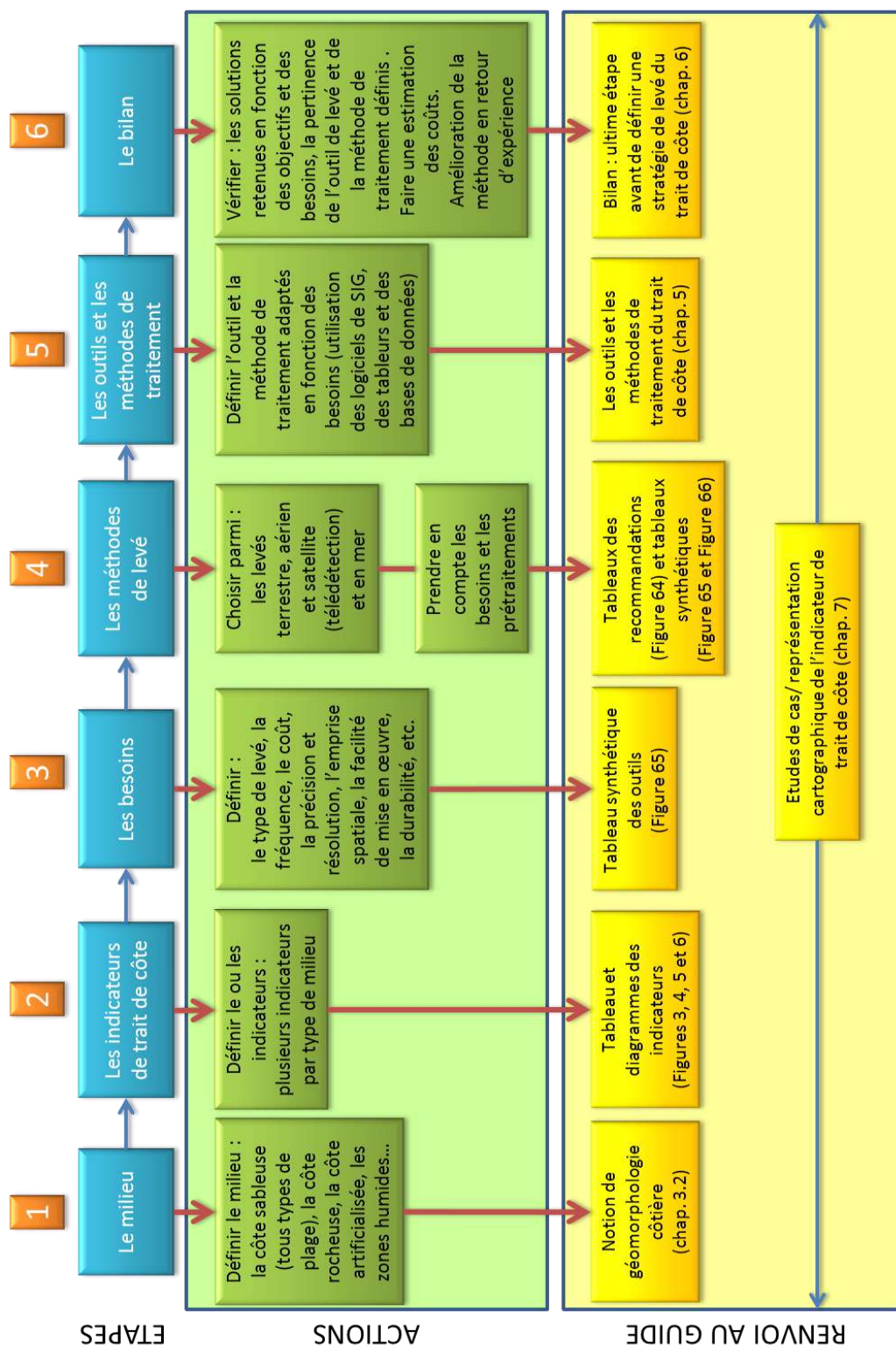


Figure 1 : Organigramme permettant de définir une méthode de suivi du trait de côte

ETAPE 2 : LES INDICATEURS DE TRAIT DE CÔTE

Le choix des **indicateurs** de trait de côte constitue la deuxième étape de l'organigramme (chap. 3.1 et 3.2). Il est important de bien les définir en fonction du type de milieu rencontré. Cette étape permet de s'orienter ensuite vers des outils de levé (en fonction du milieu). Les **indicateurs** permettent de localiser le trait de côte qui sera choisi. Ils doivent être caractéristiques de l'évolution du site en fonction des contextes géomorphologique et dynamique de la côte. Il existe différents types d'**indicateurs** : altimétriques, hydrodynamiques, géomorphologiques et botaniques.

ETAPE 3 : LES BESOINS

La troisième étape consiste à recueillir les besoins des gestionnaires du **littoral** et des moyens mobilisables (financiers, ressources humaines propres) à partir du milieu et des **indicateurs** de trait de côte préalablement choisis. Ces besoins sont :

- le type de levé : télédétection, levés terrestres, levés en mer ;
- les modes d'utilisation : MNT, transects, levés d'indicateurs de trait de côte ;
- la fréquence de levé des données : sur les sites à évolution rapide (effets de tempêtes, etc.), la fréquence doit être élevée (plusieurs fois par an) ;
- la précision et la résolution des données : elles permettent des comparaisons fiables. Elles doivent être adaptées aux ordres de grandeur des évolutions ;
- les coûts financiers (matériels, maintenance, logiciels, etc.), bien qu'ils soient difficiles à estimer ;
- l'emprise spatiale (quelques m/km ou km² à plusieurs km ou km²) ;
- la facilité de mise en œuvre des méthodes et des outils de levé avec leurs avantages et inconvénients.

Ce recueil de besoins permet avant tout d'établir une première sélection des méthodes de suivi et d'analyse du trait de côte. Concernant les notions de coûts, il faut préciser qu'il reste difficile de les estimer en raison des nombreux facteurs à prendre en compte (contexte du terrain, accès aux sites, etc.).

ETAPE 4 : LES METHODES DE LEVE

À partir des précédentes étapes, le lecteur peut sélectionner les méthodes/outils de levé qui correspondent à ses besoins et contraintes (milieu, **indicateurs**, fréquence d'acquisition, précision, coûts, etc.).

Toutes les techniques sélectionnées peuvent ensuite être classées par préférence notamment grâce au tableau synthétique des outils de levés (Figure 68).

Les données issues des outils de levé doivent être traitées selon des méthodes précises pour une exploitation sous SIG. Elles sont destinées à l'interprétation cartographique et graphique et doivent être lisibles et facilement exploitables. Un tableau synthétique récapitule les divers traitements à employer par outil (Figure 68).

ETAPE 5 : LES OUTILS ET LES METHODES DE TRAITEMENT

Après avoir effectué les premiers traitements des données par l'intermédiaire de logiciels spécifiques, il advient de :

- représenter / identifier le trait de côte (cartographie à l'aide du SIG ; chap. 5) ;
- capitaliser les données : ces dernières sont exploitées et archivées dans une base de données et renseignées par des **métadonnées**. Dans la majeure partie des cas, elles sont destinées à être diffusées vers des acteurs à diverses fins : mutualisation des données anciennes et récentes, partage des connaissances, etc. Aussi, il est recommandé d'améliorer et de garantir *in fine* l'interopérabilité des données (combinaisons de données diverses brutes et traitées) et leur mise à disposition ;
- effectuer une **analyse diachronique** : étude de l'évolution du trait de côte pendant une période précise (voir pour exemple : chap. 7.1 ; utilisation du SIG).

Différentes méthodes de traitement et d'analyse du trait de côte sont présentées dans cette étape afin d'orienter les utilisateurs de ce guide, notamment sous SIG : la méthode d'utilisation des tampons (« buffer »), les traitements sous DSAS® et sous MobiTC, etc. (chap. 5.2).

ETAPE 6 : LE BILAN

L'étape n°6 doit permettre à l'utilisateur de vérifier que les méthodes de suivi choisies répondent au mieux à ses objectifs et besoins initiaux sur le secteur étudié. Il peut ainsi vérifier la pertinence des levés en se posant les bonnes questions pour chacune des étapes précédentes. Cette dernière étape permet également d'apporter les correctifs et compléments aux dispositifs de suivi à la suite d'un retour d'expérience (exemple : modification de l'outil de levé sélectionné, de la fréquence du levé, etc. - chap. 6).

LES ÉTUDES DE CAS

Des études de cas illustrent le déroulement de l'ensemble des étapes de l'organigramme précédent avec des exemples concrets. Elles figurent à la fin du document, au chapitre 7.

3. Indicateurs de trait de côte et géomorphologie côtière

Ce chapitre correspond aux étapes 1 (le milieu) et 2 (les indicateurs de trait de côte) de l'organigramme (figure 1).

3.1. DÉFINITION DU TRAIT DE CÔTE

Le trait de côte est par définition la ligne d'intersection de la surface topographique avec le niveau des plus hautes mers astronomiques (définition du SHOM) et par extension, la limite entre la mer et la terre (MEEDDM, 2010).

Dans un objectif de gestion du littoral, il est nécessaire de connaître l'évolution du trait de côte (avancées, reculs ou stabilité) en fonction des échelles temporelles associées (saisonnière, annuelles, etc.). Pour analyser ces changements, une définition du « trait de côte » doit être donnée de manière à prendre en compte les différentes configurations géomorphologiques des littoraux ainsi que les notions d'évolution temporelle relatives.

Il convient d'aborder la notion plus générale de frange ou de bande côtière qui s'étend du domaine marin au domaine continental, au sein de laquelle un ou plusieurs indicateurs géomorphologiques sont définis selon les types de côtes.

Le trait de côte et son évolution (**érosion, accrétion**), quelle que soit la définition utilisée, est un **indicateur** représentatif d'une limite terre-mer. Il doit avoir la qualité de représenter schématiquement mais correctement l'état global du **littoral** du point de vue de son évolution sédimentaire (Oliveros, 2011 ; communication écrite).

Ce n'est pas une définition théorique du trait côte, généralisable à tous les environnements qu'il convient de se donner, mais une définition « fonctionnelle » de la frange côtière en fonction du type de **littoral** et des objectifs de suivi.

Les **indicateurs** de trait de côte répondent à des critères géomorphologiques permettant de faciliter la cartographie des limites **estran-dune**, **estran-falaise**, etc. à partir d'observations et de mesures de terrain, de l'analyse et de l'interprétation d'images aériennes ou spatiales (Aubié *et al.*, 2011).

Boak et Turner (2005) ont ainsi répertorié 45 **indicateurs** de traits côte, utilisés à travers le monde à des fins d'étude d'évolution du **littoral**, définis depuis les années 1950 dans la littérature scientifique. Certaines s'appuient sur des éléments géomorphologiques, ou sur des considérations altimétriques (niveaux de référence de la mer), d'autres sur la présence de végétation ou bien encore de débris (laisses de mer), ou enfin sur une ligne de déferlement (**indicateurs** hydrodynamiques instantanés ou non) (Figure 2).

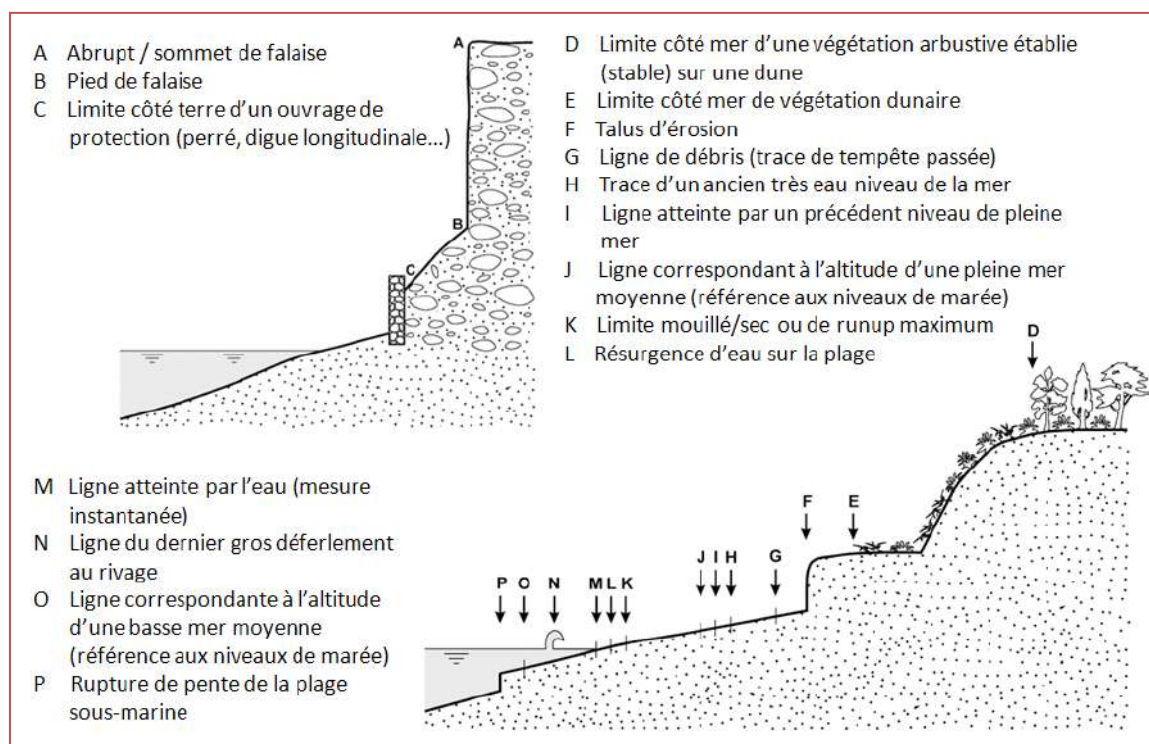


Figure 2 : Représentation schématique de différents indicateurs de trait de côte (Boak and Turner, 2005, adapté et traduit par le BRGM)

La principale difficulté réside dans le choix d'un **indicateur** qui soit à la fois le mieux adapté au contexte morphologique (le trait de côte « représentatif »), facilement déterminé sur le terrain ou sur d'autres supports (photographies, MNT...), et aussi qui puisse être « extrait » de supports anciens afin d'élargir l'intervalle « passé-présent ».

Le tableau ci-après reprend les divers **indicateurs** recommandés¹ pour l'étude et les répertorie par type de milieu et par classe (Figure 3).

¹ Un travail de caractérisation des indicateurs de trait de côte à l'échelle nationale est actuellement en cours dans le cadre de l'actualisation des catalogues sédimentologiques menée par le MEDDE et le CETMEF.

Milieu	Indicateurs de trait de côte fréquemment utilisés	Classe/type
Tous types de plages et dunes (côte sableuse, galets, plage corallienne...)	ligne correspondant à l'altitude d'une basse mer moyenne	altimétrique
	ligne correspondant à l'altitude d'une pleine mer moyenne	altimétrique
	ligne de débris (trace de tempête passée)	hydrodynamique
	résurgence d'eau sur la plage	hydrodynamique
	laisse de mer	hydrodynamique
	limite sable mouillé/sec	hydrodynamique
	limite de jet-de-rive	hydrodynamique (instantané ou non)
	ligne d'eau instantanée	hydrodynamique (instantané)
	première barre d'avant-côte	géomorphologique
	berme	géomorphologique
	talus de collision (côte microtidale)	géomorphologique
	pied de dune	géomorphologique
	crête de dune	géomorphologique
	abrupt	géomorphologique
	limite de végétation pionnière	botanique
	limite côté mer de végétation pérenne dunaire	botanique
Côte à falaise rocheuse	ligne correspondant à l'altitude d'une basse mer moyenne	altimétrique
	ligne correspondant à l'altitude d'une pleine mer moyenne	altimétrique
	ligne de débris (trace de tempête passée)	hydrodynamique
	laisse de mer	hydrodynamique
	limite sable mouillé/sec	hydrodynamique
	encoche basale	géomorphologique
	pied de falaise	géomorphologique
	sommet de falaise	géomorphologique
	rupture de pente topographique	géomorphologique
	limite supérieure du cône d'éboulis	géomorphologique
	limite inférieure de végétation terrestre	botanique
	partie supérieure de la ceinture grise à cyanobactéries	botanique
	limite supérieure du lichen marin noir	botanique
Marais maritime	laisse de mer	hydrodynamique
	ligne de débris (trace de tempête passée)	hydrodynamique
	limite supérieure du schorre	géomorphologique et botanique
	limite supérieure de la slikke	géomorphologique et botanique
Marais à mangrove	limite de front de mangrove	géomorphologique et botanique
	limite d'arrière-mangrove	géomorphologique et botanique
Côte artificialisée (ouvrages en l'absence de plages)	limite côté mer de l'aménagement	géomorphologique
	limite côté terre de l'aménagement	géomorphologique
	sommet des ouvrages	géomorphologique

Figure 3 : Tableau des principaux indicateurs de trait de côte recommandés et classés par type et par milieu

Les **indicateurs** de trait de côte sont pertinents ou non en fonction du **marnage** (contexte de côte **macrotidale** et **microtidale**) et de l'agitation des **littoraux**.

Pour les côtes basses (côte sableuse, marais, platier rocheux) microtidales, les **indicateurs** de type instantané (**indicateurs** hydrodynamiques) peuvent généralement être utilisés. Les **indicateurs** liés à la végétation (**indicateur** botanique) et de type morphologique sont utilisés pour les côtes en contexte méso- ou **macrotidal**.

Les **indicateurs** retenus dans ce rapport peuvent être classés selon une échelle de temps : les **indicateurs** à court terme (pouvant varier dans la seconde, dans l'heure ou dans la journée), à moyen terme (pouvant varier dans la journée, la saison ou l'année) et à long terme (pouvant varier dans l'année, la décennie ou le siècle). Ils peuvent également se répartir selon l'échelle spatiale (variation en fonction du secteur et des besoins de suivi ou d'étude). Les diagrammes espace-temps ci-après (Figure 4 ; Figure 5 ; Figure 6) présentent ces différents indicateurs.

Dans les chapitres suivants, des descriptions géomorphologiques des différents types de littoraux sont faites avec pour chacun d'entre eux les **indicateurs** de trait de côte qu'il est préconisé de suivre en fonction de différents critères relatifs aux méthodes de suivi (coûts, facilité de reconnaissance sur le terrain, données anciennes, etc.).

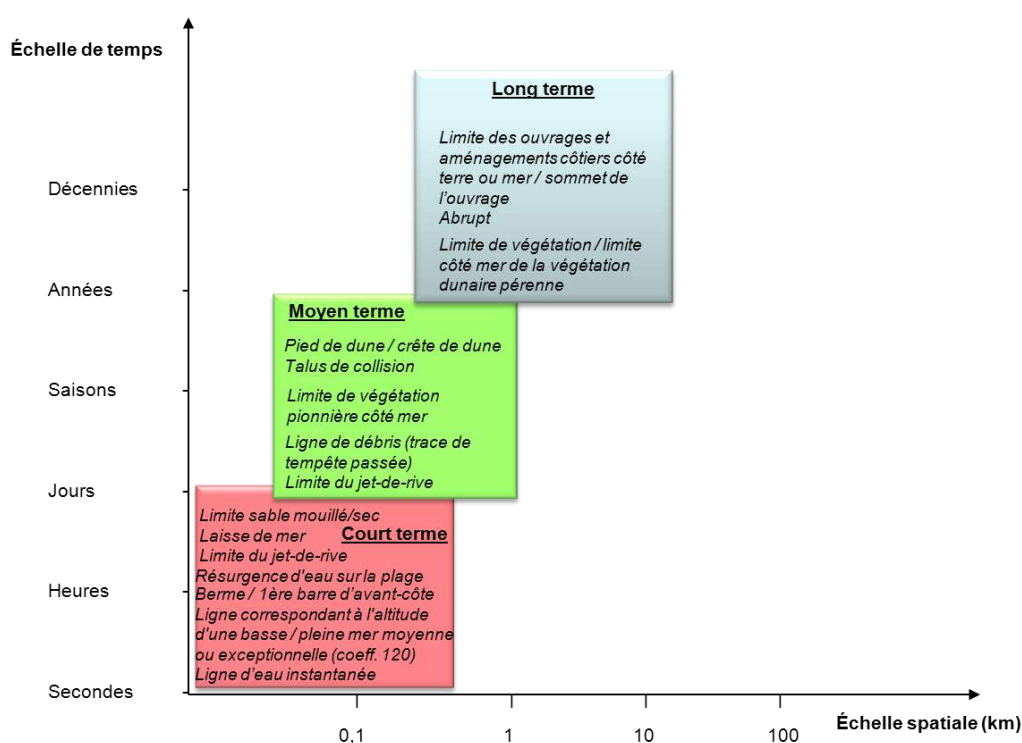


Figure 4 : Diagramme espace-temps des indicateurs de trait de côte fréquemment utilisés sur tous les types de plage

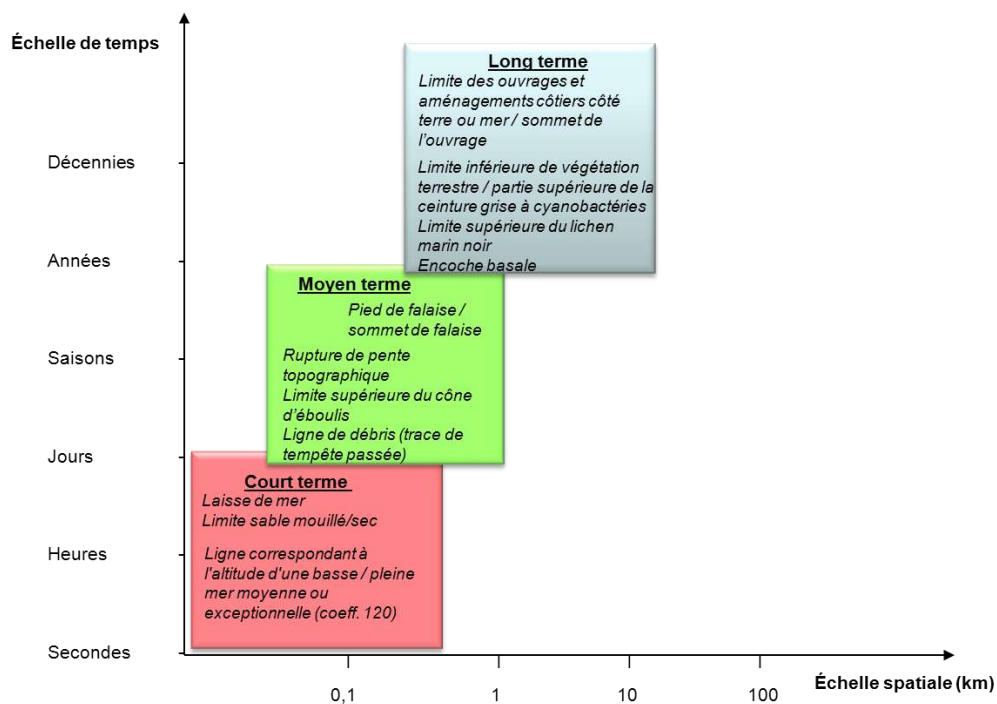


Figure 5 : Diagramme espace-temps des indicateurs de trait de côte fréquemment utilisés sur la côte rocheuse

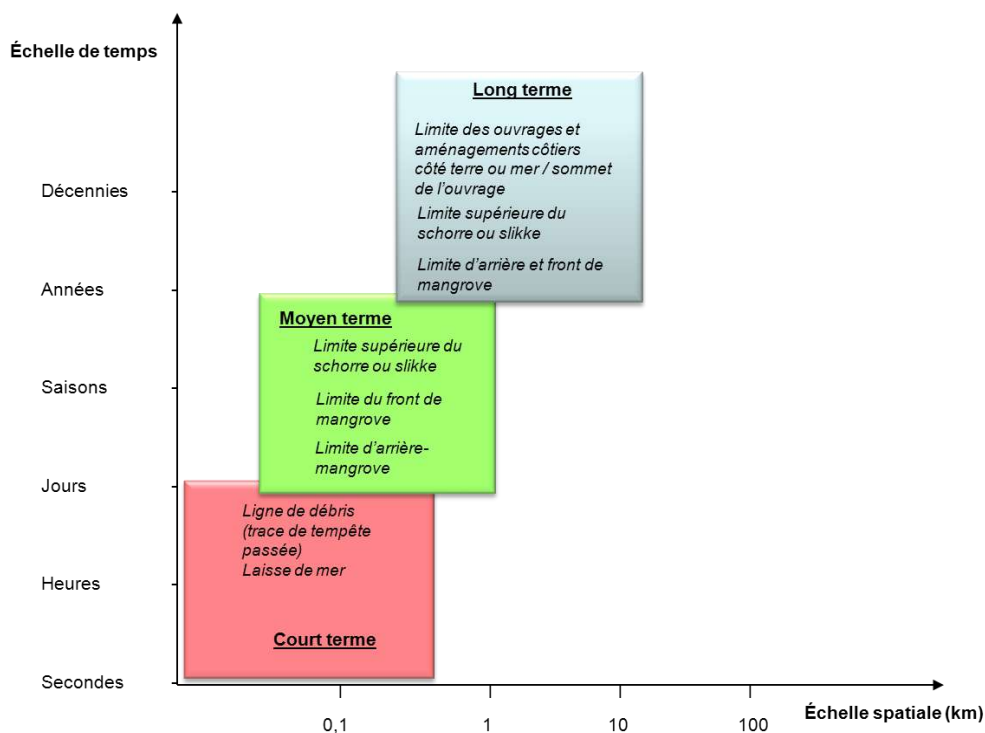


Figure 6 : Diagramme espace-temps des indicateurs de trait de côte fréquemment utilisés sur les zones humides

3.2. DESCRIPTION GÉOMORPHOLOGIQUE DES GRANDS TYPES DE LITTORAUX

Ce chapitre vise à décrire de manière synthétique les grands types de **littoraux**² français (métropole et outremer) et à définir pour chacun d'eux les principaux **indicateurs** permettant de suivre le trait de côte. Quels que soient les **indicateurs** retenus pour suivre l'évolution du trait de côte, il est recommandé de conserver une cohérence des suivis relatifs au cours du temps et d'utiliser autant que possible des indicateurs qui puissent être cartographiés à partir de données anciennes (cartes, photos, etc.).

3.2.1. Les systèmes plages-dunes et plages-récifs coralliens

a) Géomorphologie des systèmes plages-dunes

Les plages sont des zones d'accumulation littorale de sédiments (des sables fins aux galets). La morphologie des plages évolue continuellement dans le temps (Figure 7). On distingue les plages dites « ouvertes », occupant un grand linéaire côtier sableux et le plus souvent associées à des dunes, des plages « de poche » qui sont frangeantes à des falaises rocheuses ou situées en fond de **baie**.

Le plus souvent, les dunes nécessitent une dynamique éolienne suffisante, une source de sédiments disponibles et une végétation spécifique pour exister (Figure 7). Cependant, la végétation peut jouer un rôle mineur. La dune **littorale** constitue une réserve de sable qui permet à la plage d'être réalimentée si cette dernière est érodée par les vagues.

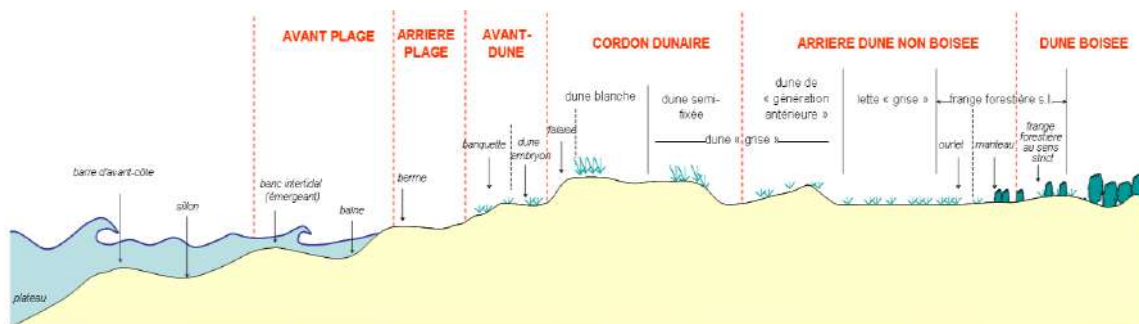


Figure 7 : Profil type d'une plage sableuse atlantique et de la dune (© Observatoire Côte Aquitaine)

b) Géomorphologie des systèmes plages-récifs coralliens

Les récifs coralliens sont constitués de squelettes calcaires et de leurs débris, sécrétés et cimentés par des organismes marins vivants en colonie. Les algues ont une grande importance parce qu'elles fournissent l'oxygène nécessaire aux coraux ou parce que des espèces encroûtantes participent à la protection et à l'édification du récif. Du point de vue de la morphologie, le récif corallien se compose de plusieurs parties et de modèles correspondants à l'implantation préférentielle de divers organismes vivants, dépendants des processus hydrodynamiques (MEEDDM, 2010).

² Pour plus d'informations, se référer au guide de gestion du trait de côte (MEEDDM, 2010).

Les plages coralliennes se développent dans deux types de contextes principaux. Sur les îles hautes, elles sont généralement bordées par un **récif frangeant** (Figure 8), tandis que sur les îles basses (atolls, cayes, motus, etc.), elles s'accumulent à même le **récif barrière**.

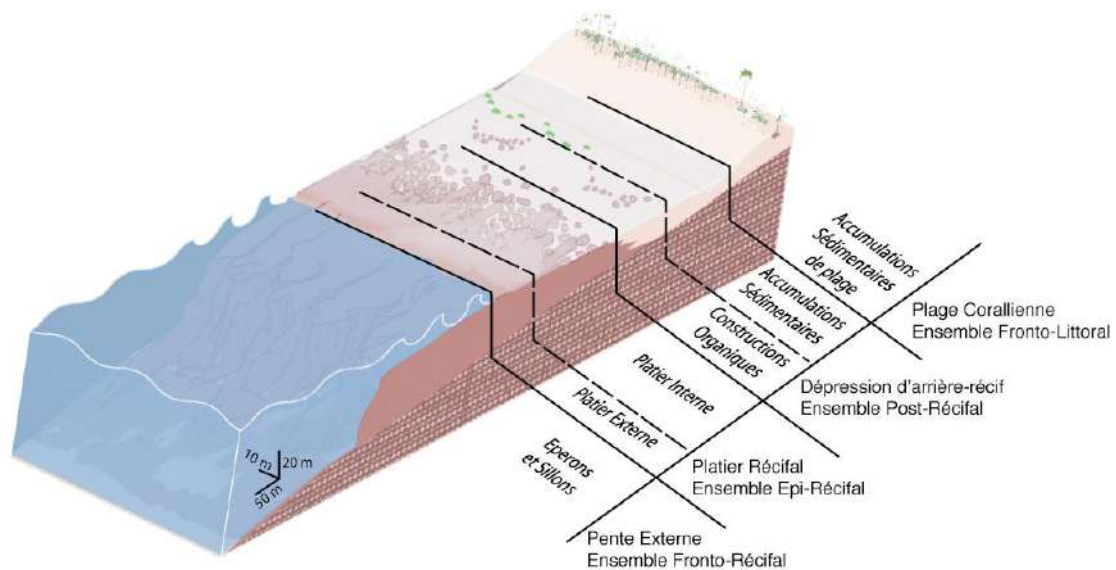


Figure 8 : Eléments de géomorphologie récifale du récif frangeant de Saint-Gilles (d'après Montaggioni et Faure, 1980 ; modifié par Cordier, 2007)

c) Indicateurs de trait de côte préconisés sur les côtes « mésotidales » et « macrotidales »

Ces types de côtes se trouvent en métropole (Atlantique, Manche, Mer du Nord) et outremer (Guyane, Mayotte).

Pour ces côtes, il est préconisé de définir le trait de côte comme la limite entre la dune et la plage, qui correspond selon la configuration géomorphologique à l'un et/ou l'autre des **indicateurs** suivants (Aubié *et al.*, 2011) :

- le pied de falaise dunaire (rupture de pente topographique) ;
- la crête de dune (ou abrupt de la dune) ;
- l'abrupt (rupture de pente en cas d'érosion pour les cordons de galets) ;
- la ligne de débris (trace de tempête passée) et laisse de mer ;
- la limite de la **berme** (zone d'accumulation de sédiments en haut de plage, liée au déferlement) ;
- la première barre d'avant-côte (due au déferlement des vagues) ;
- la limite de végétation dunaire : le contact haut de plage/ dune bordière est plus difficile à identifier dans le cas de secteurs côtiers en accumulation. Il faut distinguer la végétation pionnière, colonisant les **laisses des plus hautes mers** (dunes embryonnaires) et la végétation pérenne (type chiendent des sables) établie et

prospérant au-delà de la limite des plus hauts niveaux d'eau (Figure 9). À la fin de la période estivale, le trait de côte relevé correspond à la limite de la végétation pionnière. Un suivi durant la période printanière permet d'obtenir un trait de côte correspondant à la limite de la végétation pérenne ou de la végétation pionnière si cette dernière est toujours présente (Ruz, 2011, communication écrite).



Figure 9 : Interprétation de traits de côte d'un système dunaire, limites de la végétation (© Costa, 2011, communication écrite)

Il est préconisé dans les zones d'**accrétion** ou d'équilibre de tenir compte de la limite de la végétation dunaire. Dans les secteurs en **érosion**, c'est le bas de la falaise sableuse qui est recommandé comme indicateur de trait de côte. En effet, ces deux limites peuvent être relevées à partir de différents supports (GPS, photos aériennes, etc.), quelle que soit la configuration géomorphologique de la dune (érosion, équilibre, accrétion).

Lorsque la cartographie du trait de côte est réalisée à partir de photographies aériennes, la limite de cette végétation est assez claire. Des risques de confusion peuvent apparaître s'il y a une forte présence de végétation annuelle de haut de plage.

Dans le cas des plages coralliennes, lorsque le **marnage** et l'agitation sont plus importants, l'**indicateur** de trait de côte recommandé est la limite de haut de plage (limite de végétation ou à défaut de l'aménagement qui empiète le haut de plage).

d) Indicateurs de trait de côte préconisés sur les côtes microtidales

Les **indicateurs** de type hydrodynamique instantané peuvent être utilisés sur les rivages en contexte microtidal (Méditerranée, La Réunion, Antilles).

Le trait de côte peut être défini comme la limite instantanée du **jet-de-rive** (pouvant correspondre à la laisse de mer) dans des conditions de beau temps. C'est la ligne moyenne entre le maximum et la partie centrale du **swash** (Figure 10 ; Sabatier, 2011 ; communication écrite). Dans le cas des plages coralliennes, elle peut être considérée comme comparable dans les environnements à faible hydrodynamisme (hors épisode exceptionnel de type cyclonique), c'est-à-dire pour un régime **microtidal** et une agitation très faible du fait du déferlement de la houle sur le récif et non directement sur la plage.



Figure 10 : Relevé de la position du trait de côte, limite du jet-de-rive (© Sabatier, 2001)

Deux **indicateurs** morphologiques peuvent également être préconisés :

- le pied de dune (rupture morphologique entre la dune et la plage) correspondant au plus haut niveau atteint par les eaux lors des plus fortes tempêtes ;
- **la berme de basse plage lorsqu'elle existe (zone d'accumulation de sédiments** liée au déferlement) ou, en l'absence de **berme**, la ligne d'eau instantanée (jet-de-rive). Ces objets correspondent au niveau moyen de l'eau atteint en période de calme.

L'illustration ci-dessous (Figure 11) présente le profil type d'une plage sableuse méditerranéenne et les deux traits morphologiques, pied de dune et **berme** (Stepanian *et al.*, 2010). Ces deux lignes délimitent la zone active de la plage aérienne qui correspond dans un environnement microtidal (Méditerranée, La Réunion, Antilles) à la zone de « battement » des houles par temps calme et lors des tempêtes.

Sur le **littoral** du Languedoc-Roussillon par exemple, il existe une limite physiographique entre la plage émergée et la plage immergée. Il s'agit d'une rupture de pente appelée « talus de collision » (Certain *et al.*, 2011) située juste en dessous de la surface de l'eau (Figure 12). Cette limite peut être considérée comme un **indicateur** du trait de côte à suivre sur le terrain.

En Corse, la limite supérieure des posidonies³ peut être préconisée comme **indicateur** de trait de côte. Ces dernières initialement présentes dans les fonds marins sont ramenées sur la plage par les vagues. Elles jouent un rôle protecteur important des sites car elles favorisent l'**accrétion** et/ou la stabilité des côtes (le sable reste piégé). L'évolution du trait de côte en Corse est souvent étroitement liée aux accumulations de posidonies sur la plage (Stépanian *et al.*, 2009).

³ Plantes aquatiques. Herbiers.

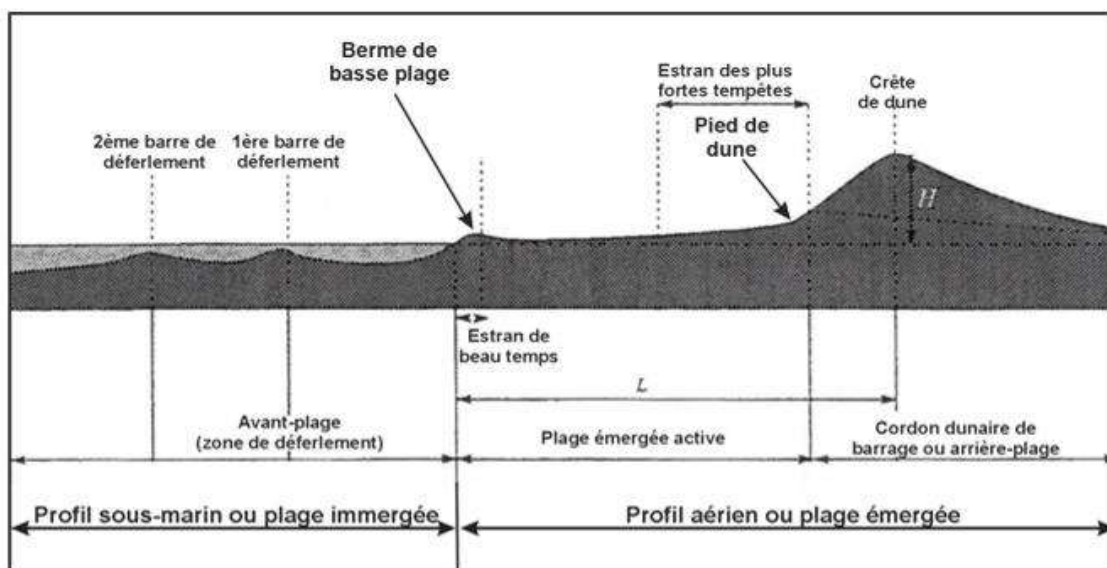


Figure 11: Schéma type d'un profil de plage sableuse méditerranéenne (littoral français ; Stepanian et al., 2010)

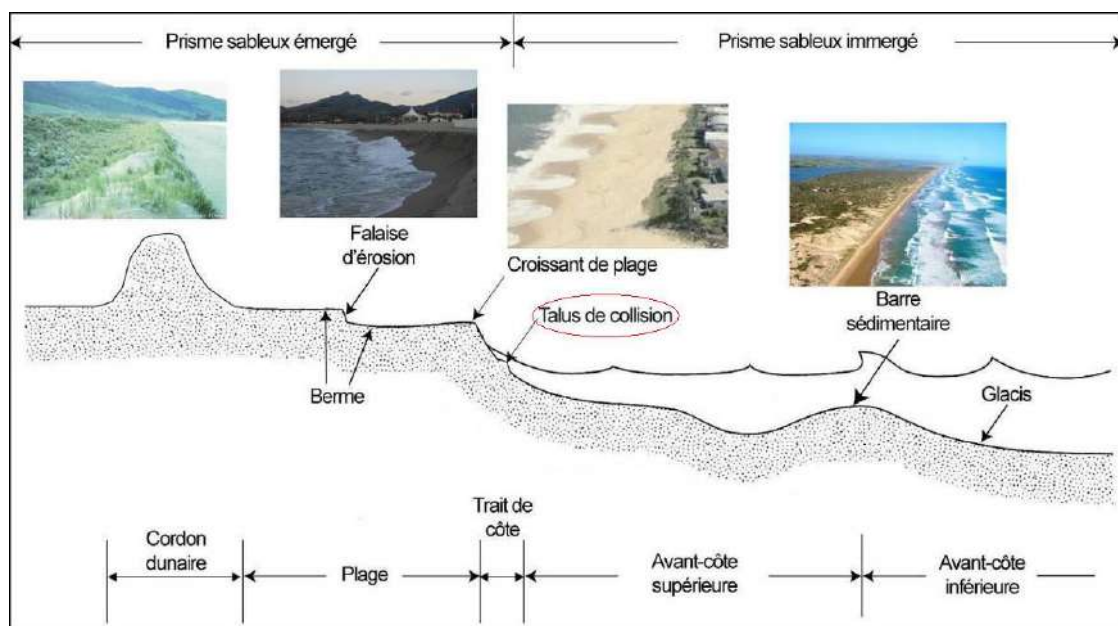


Figure 12 : Terminologie pour le système sableux côtier microtidal adapté au Languedoc-Roussillon (Certain et al., 2011 d'après Komar, 1997)

3.2.2. Les côtes à falaise rocheuse

a) Une grande diversité de falaises

Ce paragraphe concerne les falaises rocheuses et non les falaises dunaires.

Les falaises constituent un cas particulier de versant qui recule en général et sur le long terme parallèlement à lui-même laissant devant lui une plate-forme rocheuse doucement inclinée vers la mer. Il existe trois grands types de falaise : les falaises vives, les falaises stabilisées et les falaises mortes.

Les falaises se distinguent par leur forme, leur structure et leur vitesse d'évolution. Les falaises se rencontrent sur de nombreux contextes géologiques (calcaires, marneux, granitiques, etc.), offrant une grande richesse écologique des milieux et des paysages variés.

La nature des roches (résistance et disposition des roches) joue un rôle primordial dans la forme des falaises : les formations peuvent être meubles et donc fragiles (sables, limons, argiles, marnes, craie), laissant des formes « adoucies » ou les formations peuvent être dures (calcaires, grès, roches volcaniques, granitiques, métamorphiques), donc moins érodables, donnant généralement des formes plus proches de la verticale. Dans les formations meubles, on retrouve généralement des **glissements** (ou coulées boueuses) alors que dans les formations dures, les éboulements et chutes de blocs sont majoritaires.

Les falaises sont aussi instables en raison des impacts anthropiques (piétinement en sommet de falaise, exploitation de galets, aménagements de routes, etc.) et de l'interaction de nombreux facteurs, qui sont :

- d'une part, les processus marins en pied de falaise par l'action des vagues qui entraîne une **érosion** sous-marine (estran) et aérienne (impact de la houle sur la falaise). À cela s'ajoute l'impact sur ces processus de la hausse du niveau marin. Cette dynamique marine peut engendrer des sous-cavages. L'océan (houle et courants côtiers) aggrave ce phénomène d'instabilité, en déblayant les matériaux éboulés et en empêchant l'arrangement d'une butée stabilisatrice de pied ;
- d'autre part, les processus subaériens (vent, précipitations, infiltrations, météorisation des roches, présence ou absence de végétation, etc.) qui agissent sur la face de l'escarpement et au sommet de falaise. Ces processus peuvent provoquer par actions chimiques, physiques et mécaniques, des glissements de terrain, éboulements, effondrements, ravinements etc. Ces processus ont lieu en raison de la nature des roches et/ou de leur structure.

En fonction de ces facteurs, les taux d'**érosion** ainsi que les vitesses de recul des falaises sont très variables. Les falaises à recul rapide (de l'ordre du centimètre ou du décimètre par an) sont des falaises de type crayeuses (ex : Normandie). Alors que les falaises à recul lent (moins de un centimètre par an) sont des falaises de types magmatiques ou métamorphiques (ex : Bretagne).

b) Indicateurs de trait de côte préconisés

De manière générale, on définit le trait de côte sur les falaises comme étant la séparation entre la falaise et l'**estran**, ce qui correspond selon la configuration géomorphologique à l'un et/ou l'autre des **indicateurs** suivants (Aubié *et al.*, 2011) :

- le sommet de falaise rocheuse : zone de départ des effondrements, ou lorsqu'il y a des formations superficielles sus-jacentes, il s'agit de la zone de départ dans les matériaux meubles (Figure 13). Cette définition convient à l'étude des zones à risques (point le plus proche des enjeux, situés à l'arrière). Lorsque la végétation est peu présente, c'est l'objet géomorphologique qui se voit le mieux sur les photographies aériennes ;
- le pied de falaise rocheuse (souvent préconisé) ou encore la limite supérieure du cône d'éboulis (Figure 14) ;
- la rupture de pente ;
- l'encoche basale (limite côté terre de l'encoche, provoquée par les chocs des vagues en pied de falaise) ;
- la limite inférieure de végétation terrestre ;
- la partie supérieure de la ceinture grise à cyanobactéries ou limite supérieure du lichen marin noir (Bonnot-Courtois et Levasseur, 2002).

Partout où il y a des plages en pied de falaise, les **indicateurs** répertoriés, sont les mêmes que pour la côte sableuse en contexte mésotidal et macrotidal (pied de falaise, rupture de pente topographique, limite de végétation, etc.) mais aussi en contexte microtidal (jet-de-rive, talus de collision, etc.).



Figure 13 : Exemple d'indicateurs de traits de côte d'une falaise crayeuse (© Costa, 2011)



Figure 14 : Autre exemple d'indicateurs de traits de côte d'une falaise rocheuse (© Observatoire Côte Aquitaine)

3.2.3. Les marais maritimes

Les marais maritimes sont des zones humides (Figure 15) sous forte influence marine. Ils naissent de la confrontation des eaux douces et salées dans des secteurs relativement protégés des houles. Les vagues de vent et les tempêtes peuvent affecter et éroder les marais maritimes. Bien que situés sous le niveau des pleines mers de vives eaux, ces espaces sont rarement submergés par l'eau salée, car l'homme est largement intervenu pour annexer ces terres au continent, en les endiguant notamment. Cependant, il demeure important de mettre en place des suivis afin d'anticiper le plus possible les risques d'**érosion** / **accrétion**.

Les **estran**s des marais sont des zones basses faites d'alluvions récentes, correspondant à des zones de transfert entre milieu marin et terrestre, soit entre le **schorre** et le **wadden**. Les marais sont très fortement dépendants des courants que génère la marée.

Les parties végétalisées, atteintes uniquement lors des grandes marées sont appelées le **schorre**. Cette zone est riche en végétation, notamment en plantes **halophiles** (« herbu ») qui amortissent les courants, piègent les particules fines en suspension et les fixent avec leurs racines.

Dans la zone **intertidale**, les **waddens** (Verger, 1968) sont des étendues à forte sédimentation, composées de sédiments fins : vases (zones appelées **slikkes**), tangles (sédiment calcaire à forte proportion de débris coquilliers) ou sables.

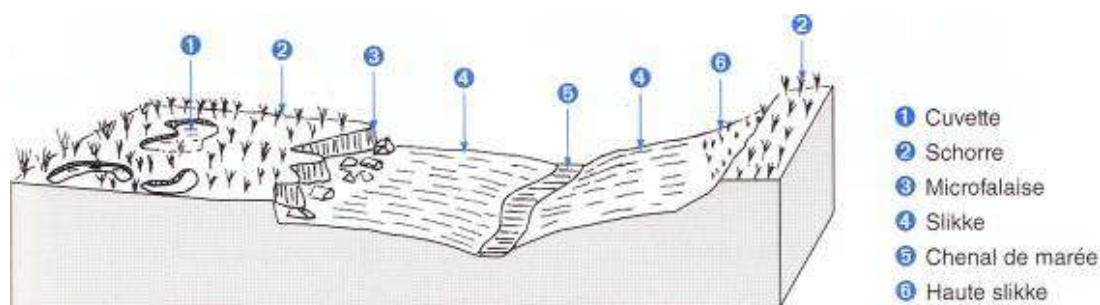


Figure 15 : Morphologie d'un marais maritime en région de climat tempéré (Paskoff, 1998)

Dans les marais maritimes, les **indicateurs** de trait de côte préconisés correspondent à :

- la limite supérieure du **schorre** (Figure 16) : partie supérieure d'un marais maritime, recouverte à chaque pleine mer et constituée de vasières colonisées par des espèces halophiles spécifiques ;
- la limite supérieure de la **slikke** : partie inférieure d'un marais maritime, recouverte à marée haute et constituée de vasières nues découvertes à marée basse ;
- la **laisse de mer** ou encore à la ligne de débris correspondant à la trace de tempête passée.



Figure 16 : Exemple d'indicateur de trait de côte d'une zone humide en pointillés rouges : limite supérieure du schorre (Claouey, © Observatoire Côte Aquitaine)

3.2.4. Les marais à mangrove

Les marais à **mangrove** sont des marais maritimes tropicaux ou équatoriaux. On les trouve aux Antilles, Guyane, Mayotte, Réunion.

La mangrove est l'écosystème littoral le plus caractéristique des milieux tropicaux. Elle se compose principalement de **palétuviers** et se développe au niveau de l'**estran**. La végétation présente permet d'amortir les vagues et de réduire les courants et de piéger les sédiments.

On trouve les marais à mangroves en général en fond de **baies**, protégés permettant le dépôt de vases (Antilles, Mayotte, Réunion) ou associés aux bancs de vase (Figure 17) du littoral guyanais.

Dans tous les cas, la mangrove colonise rapidement ces vasières (Figure 17) qui, à la différence de la végétation des vasières métropolitaines, s'étendent sur l'espace **intertidal** (slikke).

En termes de suivi du trait de côte, deux **indicateurs** sont préconisés (Figure 18) :

- le contact terre-mer à marée haute, soit la limite d'arrière-mangrove ou la **laisse de mer** ;
- la limite du front de mangrove qui est marquée par la limite entre le bosquet et l'eau.

La limite de front de mangrove est plus souvent utilisée car elle est plus aisément identifiable et s'affranchit des problèmes de marées. Cette limite constitue un **indicateur** indirect puisque que c'est la mangrove, en tant que formation végétale, qui est délimitée et non le marais (substrat).

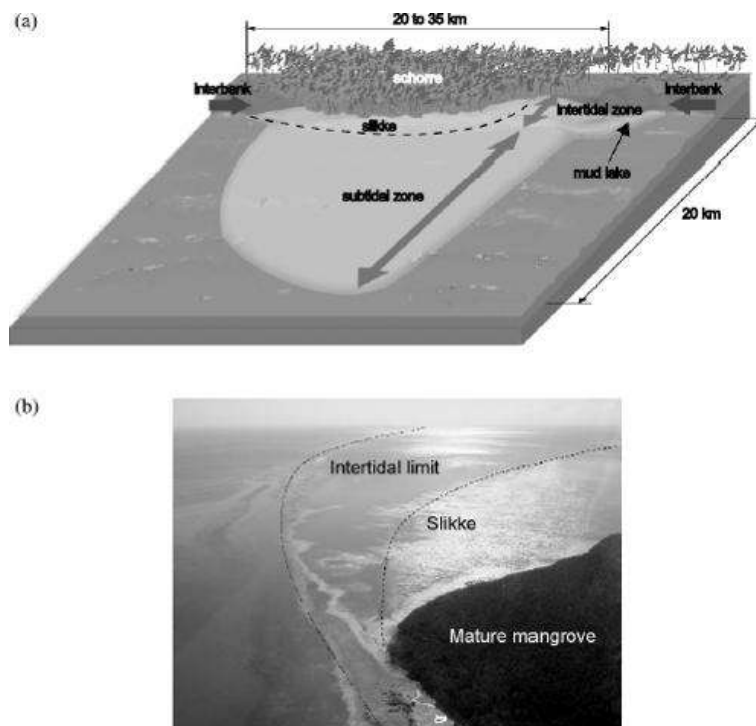


Figure 17 : a : Représentation schématique d'un banc de vase ; b : photographie du banc de Kaw (Guyane) avec les grandes limites du milieu (Baghdadi et al., 2004)

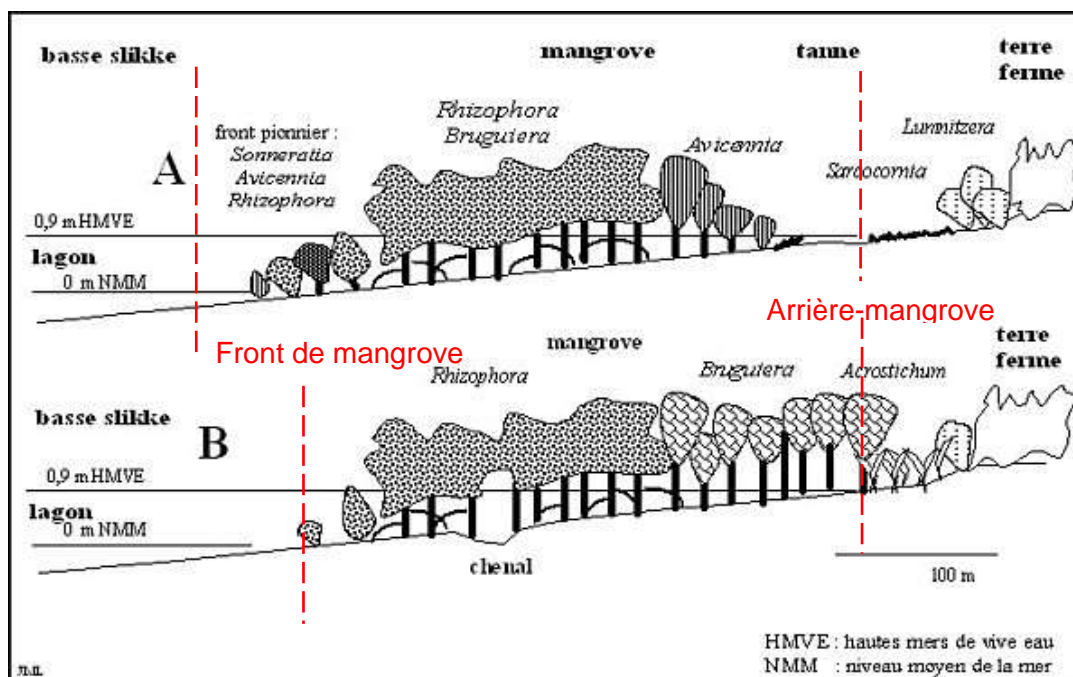


Figure 18 : Exemple de structure de mangrove en Nouvelle-Calédonie (Lebigre, 2004). A : mangrove-tanne. B : mangrove-prairie-marécageuse

3.2.5. Les côtes artificialisées

Une côte est dite artificialisée lorsque des ouvrages⁴ longitudinaux et/ou transversaux sont présents, en mer, sur l'estran ou en haut de plage, en vue de stabiliser le trait de côte et/ou de gagner du terrain sur la mer.

Dans le cas des falaises rocheuses, les ouvrages permettent également de prévenir contre les instabilités (**mouvements de terrain**).

Pour les zones humides, les ouvrages ont généralement un rôle de défense contre les **submersions marines**.

Les **indicateurs** du trait de côte recommandés sont :

- la limite en mer des aménagements et des ouvrages côtiers (installations portuaires, perrés, digues, etc.) ;
- la limite côté terre d'un ouvrage de protection ;
- ou encore le sommet des ouvrages de protection.

Les suivis (profils, trait de côte) de la côte naturelle sont mis en place s'il y a lieu au droit des ouvrages (chap. 3.2.1 à 3.2.5) afin d'analyser les avancés et reculs.

⁴ Pour plus d'informations, se référer au guide de gestion du trait de côte (MEEDDM, 2010) et à l'outil didactique n°2 du projet européen ANCORIM (panorama des solutions douces de protection des côtes ; cf. bibliographie, sources internet).

Il est important d'effectuer des suivis des ouvrages de défense contre la mer et en particulier de leur impact sur les milieux naturels adjacents, pour planifier les futures interventions (MEEDDM, 2010). Le présent guide n'a pas vocation à traiter des suivis d'ouvrages géotechniques, en revanche il est préconisé de faire des suivis des **indicateurs** de « milieu naturel » qui bordent ces ouvrages. A titre d'exemple, il est recommandé de faire des suivis d'une plage frangeante à un ouvrage et du trait de côte de part et d'autre, notamment en aval par rapport à la dérive littorale si celle-ci est marquée.

3.3. FRÉQUENCE ET DURÉE DES SUIVIS

Pour un suivi fin des processus sédimentaires, la fréquence d'acquisition doit être élevée (hebdomadaire, mensuelle) et l'acquisition doit être la plus précise possible (précision centimétrique).

Pour des sites à évolution rapide (court terme) et en présence d'enjeux forts, la fréquence des levés doit être annuelle ou mensuelle dans le cas de sites à évolution très rapide. La précision planimétrique des levés doit être de bonne qualité. Ainsi, la surveillance doit être précise et régulière (MEEDDM, 2010).

Par ailleurs, il est préconisé de faire des relevés après chaque tempêtes ou événements (ex : mouvements de terrain, submersion marine...), afin de mieux les caractériser (impacts, amplitude, fréquence, origine des processus...).

Pour un suivi à long terme, la fréquence d'acquisition peut être plus ou moins importante suivant les objectifs de suivi, par exemple elle est faible (trimestrielle, annuelle, etc.) pour suivre les évolutions saisonnières, et élevée pour les évolutions liées aux marées, courants, vagues, etc. Un suivi durable et à long terme est indispensable pour observer et caractériser les évolutions à diverses échelles de temps et d'espace.

Pour des sites à évolution lente (long terme), la fréquence sera faible (annuelle voire pluriannuelle) et la précision des données ne sera pas élevée (pluri-centimétrique).

« Le suivi régulier du trait de côte n'est efficace que si des procédures d'intervention à court et moyen termes sont établies à l'avance et déclenchées afin de compenser les déficits sédimentaires » (MEEDDM, 2010).

A titre d'exemple, le suivi de l'évolution des plages et du trait de côte du Département de la Manche⁵ est réalisé depuis 1991 (concernant la façade ouest) au droit d'une centaine de sites. Trois levés annuelles permettent d'apprécier les fluctuations saisonnières de l'évolution de la côte, mais aussi de disposer d'une information suffisante pour analyser des tendances évolutives à l'échelle de plusieurs années. Ces levés sont réalisés préférentiellement à l'automne, en fin d'hiver et en début d'été. En cas de tempêtes exceptionnelles, la date de levé peut être modifiée afin d'apprécier les évolutions de la côte dues à ces événements.

L'étude de Bulteau et Garcin (2011), présente d'autres exemples de réseaux d'observation et de suivi du trait de côte (ex : en Aquitaine, Corse, Ile de la Réunion...) dont certains sont développés dans les cas d'étude à la fin du présent document (Chapitre 7).

⁵ Plus d'informations disponibles sur http://crec.unicaen.fr/suivi50/sl50_st.php?css=1

4. Les outils de levés pour le suivi du trait de côte

Ce chapitre correspond aux étapes 3 (les besoins) et 4 (les méthodes de levé) de l'organigramme (figure 1).

Ce chapitre présente les principaux outils de levés du trait de côte qui peuvent être préconisés pour mettre en œuvre une stratégie de suivi. Ces techniques diffèrent d'une part selon les types de **littoraux** (géomorphologie, évolution rapide ou lente, côte stable, etc.), ainsi qu'en fonction des objectifs de suivi (types de levés, enjeux, accessibilité, fréquence, objectifs de recherche, coûts, etc.).

Pour avoir une compréhension complète de la frange côtière, il est recommandé de faire une cartographie, aussi complète que possible, du littoral (partie terrestre et marine). C'est pourquoi, il est recommandé d'avoir une connaissance de la partie terrestre et marine en utilisant des outils de levés de topographie ou de bathymétrie pour suivre la frange côtière.

Les mesures doivent suivre certaines règles afin que les données acquises puissent être comparées entre elles, d'une date sur l'autre.

Les outils de levés sont classés par catégories d'instruments mis en œuvre *in situ* (à terre ou en mer) ou à distance (capteurs aéroportés ou spatiaux) pour suivre le trait de côte. Pour chaque outil présenté, les mêmes rubriques sont détaillées : domaines d'application, modes d'utilisation, fréquence d'acquisition, précision (ou résolution), avantages, inconvénients, méthodes de traitement. Le principe de fonctionnement de chaque instrument est présenté au début de chaque partie.

Le suivi du trait de côte repose sur l'acquisition des caractéristiques de quatre types d'objets (Suanez *et al.*, 2012) :

- Objet « ligne » (tous types de côtes) : le trait de côte (ou son indicateur) est obtenu par photo-interprétation pour les périodes les plus anciennes (photographies aériennes), par mesure sur le terrain ou par télédétection (spatiale ou aérienne) pour la période récente et l'actuel. Ce type de levé donne une représentation sur le plan (x, y) de l'indicateur du trait de côte sous la forme d'une ligne. Le suivi de l'évolution du trait de côte réside dans la comparaison des lignes levées à des dates différentes (analyse diachronique) ;
- Objet « transect » (hors falaises rocheuses) : mesure de l'altimétrie le long de radiale(s) perpendiculaire(s) au trait de côte (profils transverses). Il offre une représentation en deux dimensions (relief) d'une plage. Ce type de levé est le plus commun et le plus facile à mettre en œuvre pour une morphologie de la plage. Le suivi de l'évolution de transects réside dans la comparaison, le long de l'axe du transect, des changements du relief de la plage ;
- Objet « polygone » : il délimite une région d'intérêt sur le terrain par photo-interprétation de photographies aériennes ou d'images satellites. Par exemple : plage comprise entre le pied de dune et la limite du jet-de-rive, zone de mangrove, etc. Le suivi de l'évolution revient à comparer les modifications des polygones (surfaces) entre deux dates ;
- Objet « surface 3D » : restitution de la topographie littorale en 3D à partir de Modèle(s) Numérique(s) de Terrain (MNT). Cela concerne aussi bien la mesure réalisée à terre (topographie) qu'en mer (bathymétrie de la frange côtière). Ils permettent de lever le relief de la plage.

Pour chaque outil de levé, une fiche synthétique (Figure 19) est fournie afin d'aider au mieux l'utilisateur (milieu, fréquence, coûts, compétences requises, avantages, etc.). Des fourchettes de coûts sont établies : coût faible si $< 1\,000\text{ €}$ ou $< 100\text{ € / km}^2$, coût moyen si compris entre $1\,000$ et $5\,000\text{ €}$ ou entre 100 et 500 € / km^2 , coût fort si $> 5\,000\text{ €}$ ou $> 500\text{ € / km}^2$. Pour chaque outil de levé, il est possible d'amortir le prix à long terme, à la condition toutefois d'effectuer des suivis réguliers (plusieurs fois par an).

MODELE TYPE			
Utile sur...	Tous types de plage	côtes rocheuses	marais/zones humides
Permet d'obtenir...	Profils	Traits de côte	MNT
Fréquence du suivi	Jours	Mois	Année
Précision/résolution	cm	dm	m
Coût	faible	moyen	fort
Compétence technique particulière ?	Non	Oui	Oui (spécialiste)
Principaux avantages	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		
Principaux inconvénients	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		
Autres informations...	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		

Figure 19 : Modèle type d'une fiche synthétique

Pour chaque outil la précision des mesures est donnée. Il convient également de prendre en compte les autres types d'incertitudes liées à l'opérateur sur le terrain ou lors du traitement des données (ex : lors de la digitalisation de données sous SIG).

4.1. LEVÉS TERRESTRES

De manière générale, les déplacements de personne et de matériel en milieu vaseux présentent des difficultés et par conséquent les mesures *in situ* du trait de côte (levés terrestres) sont difficilement réalisables. Dans ce cas présent, il est recommandé d'utiliser d'autres méthodes de levé (télédétection...).

4.1.1. Les repères de terrain

Des points de repère permettent de suivre l'évolution du trait de côte : ils peuvent être matérialisés par des poteaux en béton, en bois, des repères métalliques (clous de géomètre) sur différents milieux (plage, dune, falaise, voiries, blockhaus, etc.). Comme sur la côte sableuse aquitaine, les bornes peuvent être positionnées en couple : constituées d'une borne

principale et d'une borne de repère, alignées perpendiculairement à la côte et matérialisant ainsi les profils.

Ces repères sont un support à l'utilisation de tous types de levés (outils GPS, DGPS, théodolite, etc. ; Figure 20). Ils permettent :

- _ des mesures directes : des levés topographiques, principalement des profils dunes et plages ;
- _ de disposer d'un réseau géodésique permanent constituant un référentiel important pour réaliser des levés topographiques précis sur le littoral. Les bornes servent alors de points de référence géodésiques pour effectuer des relevés topographiques divers à l'aide de GPS principalement.

Des fiches de suivi de ces repères ou bornes doivent être saisies dans une base de données nécessaire à la maintenance et à la pérennité du réseau.

Domaines d'application

Cette technique est majoritairement employée sur la côte sableuse, la côte rocheuse et les côtes artificialisées. Sur les côtes rocheuses, la mesure en sommet de falaise s'effectue au niveau de la borne. Les zones humides (en raison du sol et de la végétation) ne permettent pas toujours l'installation de repères/jalons.

Coûts

Les coûts d'installation sont généralement faibles (une centaine d'euros) mais ils restent variables selon l'usage (fréquence de l'entretien, des suivis).



Figure 20 : Repère de terrain (borne jaune) en complément du DGPS

Avantages

Ces repères sont faciles à mettre en œuvre, peu coûteux, utiles pour d'autres types de levés et éventuellement à des fins pédagogiques sur le terrain (photographies de terrain montrant l'évolution autour du repère à différentes dates). Des jalons gradués peuvent également permettre de mesurer les variations de niveau d'une plage.

Inconvénients

Les dégradations, les intempéries, les recouvrements sableux, les travaux particulièrement importants le long du littoral peuvent endommager, voire détruire ces repères. Ils nécessitent un suivi régulier (ONF, 2009).

Recommandations

Les repères de terrain ou jalons sont complémentaires de tous les autres types de levés (GPS, DGPS, etc.). Ils servent de points de référence invariants lors d'un levé cartographique. À ce titre, ils sont fortement préconisés quel que soit le mode de levé choisi.

La fiche synthétique ci-dessous (Figure 21) résume les propriétés des repères de terrain.

REPÈRES DE TERRAIN			
Utile sur...	Tous types de plage	côtes rocheuses	marais/zones humides
Permet d'obtenir...	Profils	Traits de côte	MNT
Fréquence du suivi	Jours	Mois	Année
Précision/résolution	cm	dm	m
Coût	faible	moyen	fort
Compétence technique Particulière ?	Non	Oui	Oui (spécialiste)
Principaux avantages	coûts, indicateurs représentatifs de l'évolution du trait de côte		
Principaux inconvénients	coûts variables selon l'usage, suivi régulier, fragile (dégradations)		
Autres informations...	Complémentaires des autres outils (GPS, DGPS, etc.)		

Figure 21 : Fiche synthétique concernant les repères de terrain

4.1.2. Le GPS (Global Positioning system)

Le positionnement par GPS est un procédé de radio-positionnement qui s'appuie sur un réseau de satellites. La localisation d'un point se détermine par la mesure du temps de trajet des signaux radioélectriques émis à partir de satellites. Le temps est multiplié par la célérité de la lumière et donne ainsi la distance du satellite au récepteur. La position de l'antenne GPS du récepteur (Figure 22) est déterminée par triangulation. Le satellite fournit au récepteur l'heure exacte à laquelle le signal a été émis. Le récepteur peut alors comparer les heures d'émission et de réception et donc en déduire la position. Le GPS est un instrument de levé cartographique rapide. Les localisations peuvent être enregistrées directement dans le GPS sur le terrain, puis transmises sur un micro-ordinateur au bureau, et enfin, visualisables soit avec le logiciel fourni par le constructeur, soit sous SIG avant traitement (Hoareau, 2010⁶).



Figure 22 : GPS pour la cartographie (© Magellan)

Domaines d'application

Le système de GPS est utilisé pour tous les types de milieux. Les indicateurs de type altimétrique, hydrodynamique, géomorphologique et botanique peuvent être relevés.

Modes d'utilisation

Ce système permet d'effectuer des levés des différents **indicateurs** du trait de côte (chap. 3) par simple mesure de l'opérateur au-dessus de l'**indicateur** visé, en lecture directe des coordonnées à l'écran ou en les enregistrant dans la mesure où l'**indicateur** est visible sur le terrain.

Pour le levé *in situ* du front de **mangrove**, le recours à une embarcation légère (petits fonds) à marée haute permet de s'affranchir des déplacements à pied dans la vase et dans l'eau. Il est alors possible de lever cette limite au GPS (coordonnées x, y uniquement) (De la Torre *et al.*, 2006).

⁶ Document disponible sur demande.

Fréquence du levé

L'usage peut être très fréquent car le GPS est facile à mettre en œuvre. Cependant, compte tenu de sa précision, il est recommandé de ne faire un suivi qu'après un événement (fortes marées, houles, tempêtes, etc.) au cours duquel le trait de côte a pu subir une évolution importante (plusieurs mètres) ou lorsque la mer a laissé des traces d'érosion ou de submersion. Ainsi, la fréquence peut être mensuelle ou trimestrielle selon les secteurs, principalement lorsque l'évolution de la côte est rapide et importante.

Précision

Le GPS standard possède une précision qui peut varier de 1 à 10 mètres en (x, y) en fonction du lieu, du matériel, etc. La valeur (z) n'est pas utilisée en raison de sa grande imprécision. L'utilisation de plusieurs satellites permet une meilleure précision. Lors de la mesure, l'appareil doit afficher la 3D (trois dimensions) afin de garantir une bonne précision. Il faut plus de 3 satellites pour l'obtenir. Les repères de terrain peuvent servir de points de référence géodésiques afin d'estimer la précision de la mesure. Il est ainsi recommandé en début et en fin de levé de réaliser un enregistrement sur un point dont les coordonnées sont connues.

Coûts

L'acquisition d'un récepteur GPS ne coûte que quelques centaines d'euros. Les coûts sont donc rapidement amortis (achat de logiciel, système, etc.). L'utilisation de ce système ne nécessite pas de formation lourde et peut être utilisé sur le terrain par un seul technicien.

Méthodes de traitement

Les données sont directement téléchargées sur l'ordinateur (à l'aide du logiciel du constructeur). Les données récupérées sont ainsi intégrées sous SIG.

Avantages

Le GPS permet de prendre des mesures facilement et rapidement. C'est un outil peu coûteux (très facilement accessible dans le commerce), facile d'utilisation et relativement « précis » (en fonction des besoins, il n'est pas forcément nécessaire d'avoir une grande précision).

Inconvénients

Le GPS peut présenter dans certains cas une précision trop faible (10 m ou plus). Pour les levés le long d'une falaise (en contrebas), ou sous couverture végétale, le GPS peut montrer quelques limites liées à des difficultés pour capter les satellites.

La fiche synthétique ci-dessous (Figure 23) résume les propriétés du système GPS.

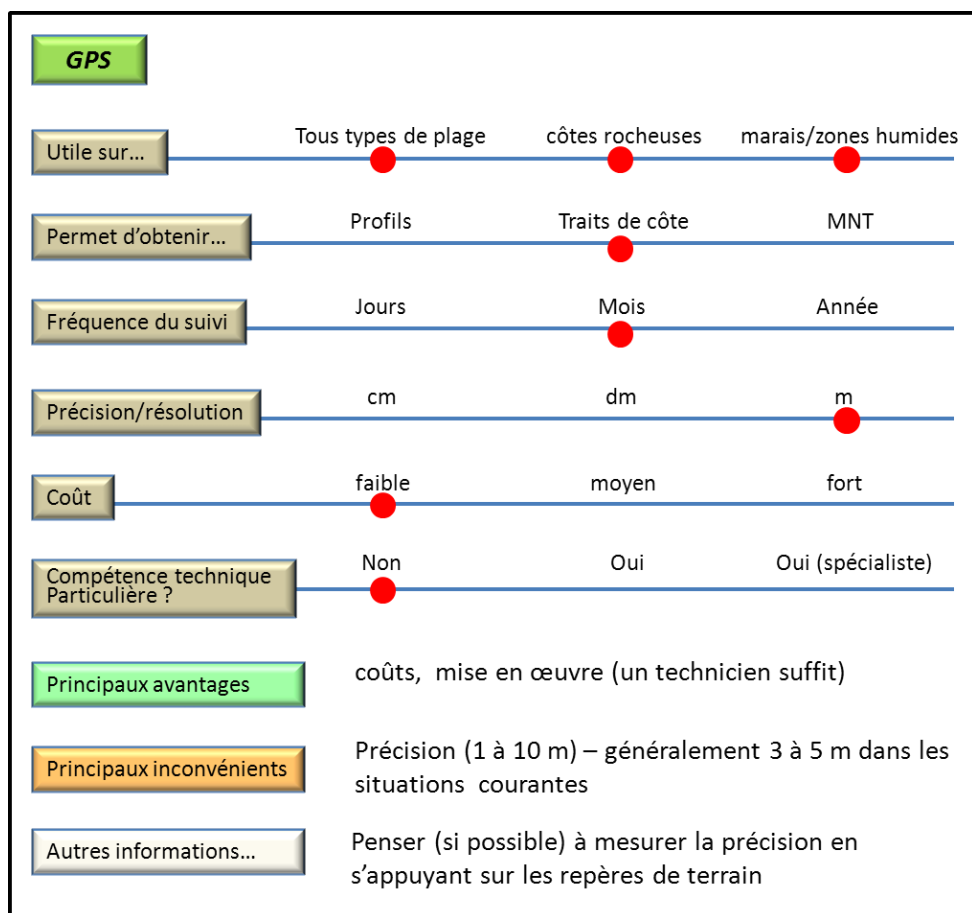


Figure 23 : Fiche synthétique concernant le GPS

4.1.3. Le DGPS (ou GPS Différentiel)

Ce chapitre s'inspire de la méthode de travail de Hoareau, 2010⁷.

Le DGPS est un GPS différentiel qui consiste à utiliser un récepteur GPS, appelé ici « base », positionné sur une station dont les coordonnées sont connues. Cette base est couplée à un ou plusieurs GPS mobiles distants. Les deux GPS base et mobile réceptionnent simultanément les mêmes signaux issus des satellites, ce qui permet à chacun de calculer ses propres coordonnées. Le positionnement de la base étant connu avec précision (infra-centimétrique), celle-ci peut déterminer les corrections à appliquer par comparaison entre sa position calculée à partir des signaux satellitaires et ses coordonnées absolues afin de les transmettre au GPS mobile. Les corrections sont transmises par le récepteur de la base vers le ou les GPS mobiles distants par l'intermédiaire d'un système radio.

Le système complet se compose d'une base (possibilité d'un répéteur radio⁸), d'un mobile (comprenant le « controller » ou « carnet de terrain ») et d'un système radio reliant ces deux

⁷ Document disponible sur demande. Une méthode spécifique (modes opératoires du système DGPS) a été mise en place dans le cadre des missions de suivi du trait de côte de l'Observatoire de la Côte Aquitaine.

récepteurs (Figure 24). Chaque levé génère un fichier de données dans la mémoire du GPS et/ou du carnet de terrain. Ces fichiers sont sauvegardés sur un ordinateur portable après les mesures.

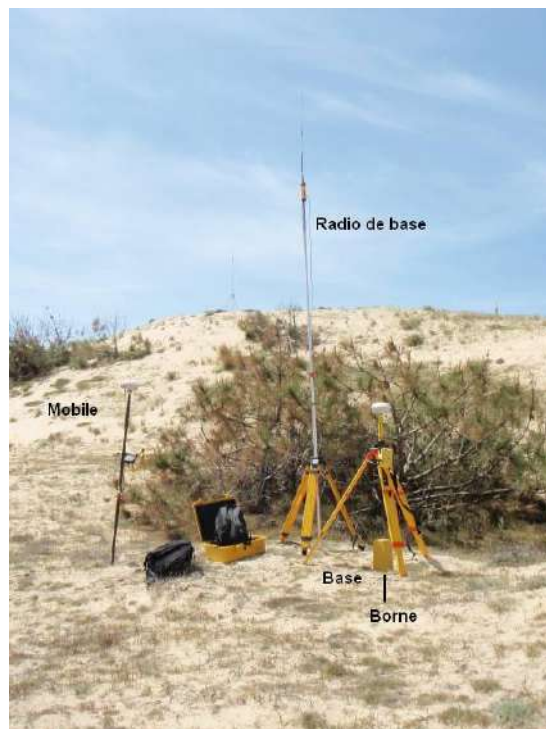


Figure 24 : Système complet du DGPS avec une borne, Aquitaine, Contis Sud, 2010 (© Observatoire Côte Aquitaine)

Il est important de connaître le secteur d'étude avant de commencer une mission de levés GPS. Cela permet de déterminer la position de la station de base, les parcours du ou des GPS mobiles (en fonction des indicateurs à lever, des repères géodésiques existants, des obstacles, etc.) et de prévoir si nécessaire l'utilisation d'un répéteur radio.

Ainsi, il est conseillé avant chaque mission d'obtenir les informations suivantes :

- Y a-t-il un point d'appui géodésique à proximité (borne ONF/IGN par exemple, repère, etc.) ?
- Quels sont les obstacles possibles à la réception des satellites (dune, couvert végétal, falaise, construction, etc.) ?
- Est-ce que le réseau du téléphone mobile ou GSM (Global System for Mobile communication) fonctionne sur le site ? (se référer au paragraphe concernant le levé RTK afin de choisir le mode de levé adapté).
- Quelle est l'emprise du levé, la durée de la mission, la précision et la densité des points, les **indicateurs** à cartographier sont-ils faciles à observer ? etc.

⁸ Permet de relayer le signal radio de la station de base. On l'utilise lorsque la distance entre la base et le mobile est supérieure à la portée radio de la base, soit environ 10 km.

NB : La majeure partie de ces questions sont également valables pour les autres techniques. Il ne s'agit ici que d'un exemple (employé pour le DGPS en raison de son utilisation fréquente).

Il existe deux types de levé pour mesurer des coordonnées de points à partir d'un DGPS :

- Levé RTK (« Real Time Kinematic »), la mesure (dite cinématique) se fait selon une précision centimétrique en temps réel (instantanée) ;
- Levé PPK (« Post Processing Kinematic »), la mesure (cinématique) est faite en temps différé, c'est-à-dire qu'elle nécessite un post-traitement pour atteindre une précision centimétrique. Aussi, pour ce type de levé, il est nécessaire d'utiliser les stations du Réseau Géodésique Permanent (RGP) de l'IGN.

Afin de choisir entre ces deux types de levé (Figure 25), il faut prendre en compte la radio et le point d'appui géodésique (borne, repère).

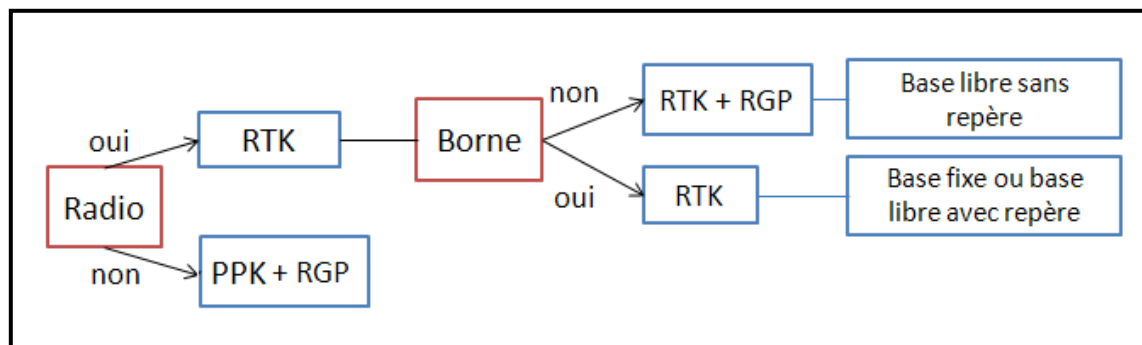


Figure 25 : Les deux types de levé DGPS (voir explications et acronymes dans le texte ; © BRGM)

Levé RTK

Dans le cas d'un levé **RTK**⁹ (Figure 26), les mobiles sont positionnés en temps réel en recevant les corrections émises par une base. Celle-ci peut être déployée de manière spécifique et temporaire sur la zone d'étude ou bien elle peut être installée de façon permanente sur un site éloigné (quelques km à quelques dizaines de km).

Dans ce dernier cas, les corrections sont transmises en temps réel au mobile via le réseau GSM à partir des stations GPS permanentes. Des opérateurs privés proposent des abonnements à ces réseaux (en métropole par exemple TERIA®, Orpheon® ou Réseau Lél@® sur l'île de la Réunion). Il faut toutefois vérifier au préalable que le réseau soit disponible sur la zone d'étude lors de la mesure (fréquent sur les littoraux non urbanisés pour lesquels les réseaux de téléphonie mobiles sont peu déployés).

Pour une utilisation optimale, la base doit être installée au-dessus d'une borne repère, de coordonnées connues, de manière à obtenir une précision centimétrique en (x, y, z) : c'est le principe de la méthode « base fixe » (Figure 27). Il est donc utile de disposer d'un réseau de

⁹ Lors d'un levé en **RTK** (cinématique en temps réel), on utilise les corrections de la base pour positionner en temps réel le mobile

points connus sur le littoral (chap. 4.1.1). Cette méthode ne nécessite pas de post-traitement particulier avant exportation sous SIG.

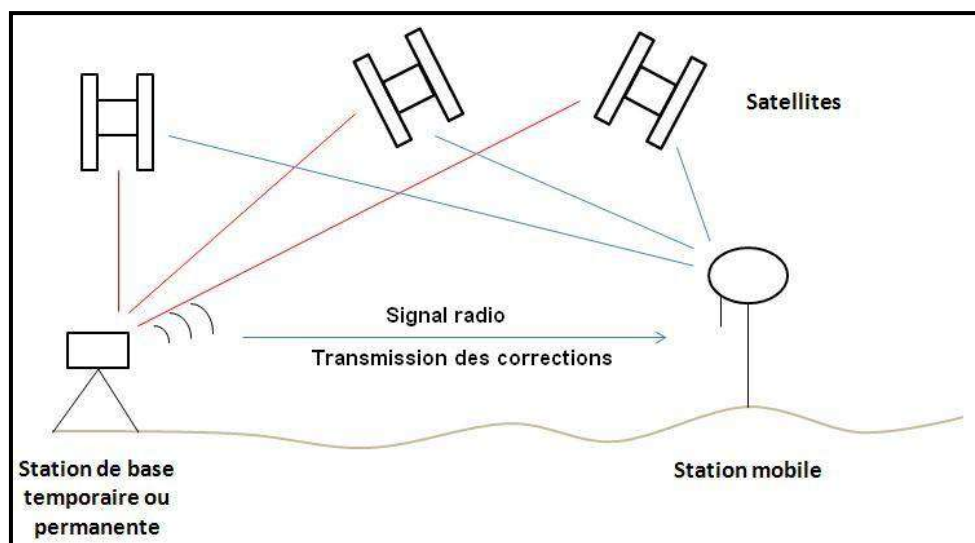


Figure 26 : Principe du levé en RTK (DGPS : station de base permanente ou temporaire + mobile, voir explications dans le texte)

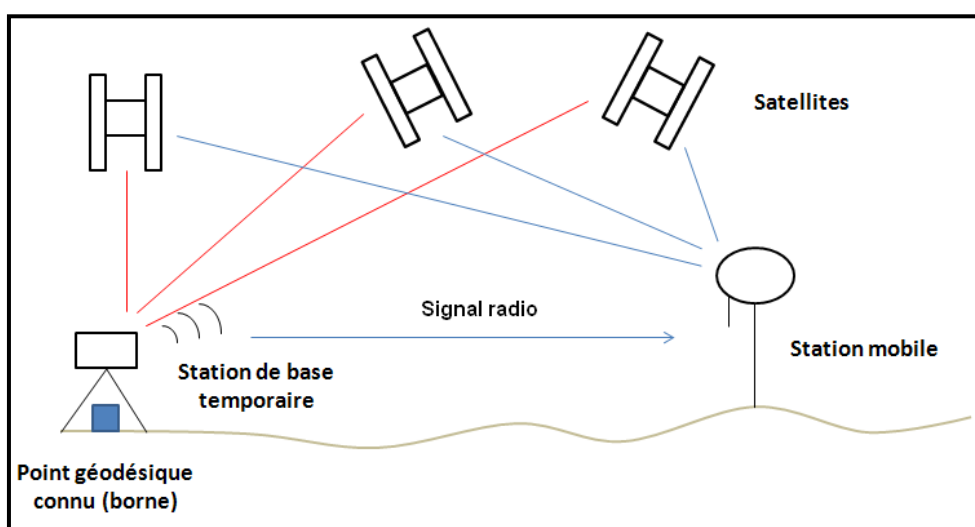


Figure 27 : Méthode base fixe (borne dont les coordonnées sont connues)

A pas de temps régulier, la position du GPS mobile est calculée grâce aux corrections transmises par la base (par radio) et enregistrée dans le carnet de terrain électronique.

Autre cas de figure : la station de base est positionnée sur un point dont les coordonnées ne sont pas connues et un repère géodésique (dont les coordonnées sont déjà connues et précises) est levé avec le mobile au cours de la campagne de mesure. Il s'agit de la méthode « base libre avec repère » (Figure 28). Après les levés, un post-traitement est effectué au bureau à partir du logiciel fourni par le constructeur du DGPS, permettant de définir le repère géodésique levé par le mobile comme étant la station de base. Cette opération consiste à

inverser la ligne de base¹⁰ qui relie la station de base au repère géodésique. L'ensemble des coordonnées des autres points levés au cours de la campagne est ensuite automatiquement corrigé par le logiciel, de manière à appliquer les corrections issues de cette modification.

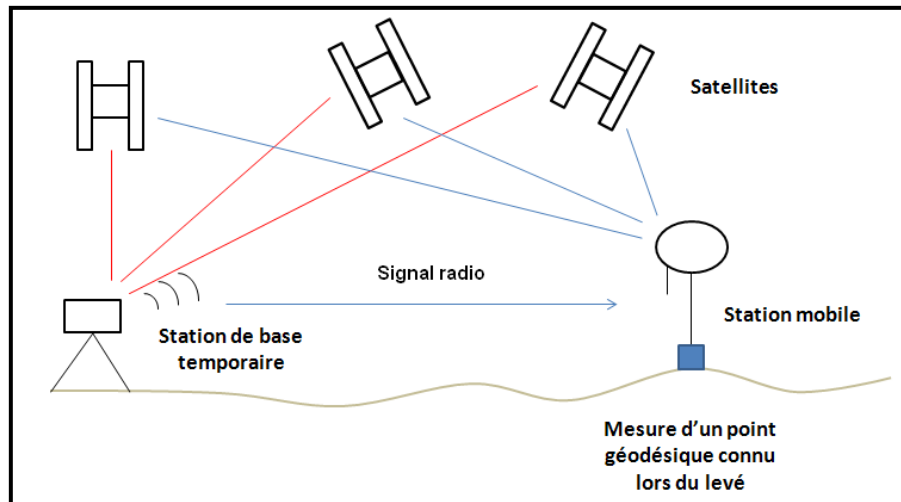


Figure 28 : Méthode base libre avec repère

Dernier cas de figure : lorsque le terrain ne permet pas d'accéder à un repère géodésique, que ce soit pour le déploiement de la base ou pour le levé d'un point à l'aide du mobile, il s'agit de la méthode « base libre sans repère ». Il faut alors travailler en relatif à partir d'un point dont les coordonnées ne sont pas connues avec précision (centimétrique). Après les levés, un post-traitement au bureau est effectué à l'aide des données RGP (Réseau Géodésique Permanent) de l'IGN. Ces stations permanentes permettent de calculer très précisément la position de la base. Ces coordonnées théoriques sont ensuite utilisées pour déterminer l'écart avec les coordonnées mesurées sur le terrain lors de la mission. Cette correction est ensuite appliquée à tous les autres points du levé.

En RTK, il existe deux méthodes d'acquisition de points :

- topo continue : utilisée lors de l'acquisition de points en continu, pour le levé du trait de côte, du pied de falaise ou du sommet de falaise. Une acquisition régulière en fonction du temps (toutes les 10 secondes par exemple) ou en fonction de la distance (tous les 5 mètres par exemple) peut se faire ;
- point topo : utilisée lors de l'acquisition de points le long d'un transect ou de points remarquables. L'utilisateur enregistre à sa demande le point.

Levé PPK

Le levé en PPK est également possible (Figure 29). La station de base enregistre les données brutes GPS sur la carte mémoire du récepteur alors que le mobile enregistre également les données brutes GPS directement dans le carnet électronique de terrain. Le mobile ne se positionne plus en temps réel (pas de radio de base donc pas de corrections radio). Ce levé

¹⁰ Ligne théorique reliant la base à chaque point mesuré par le mobile lors du post-traitement.

nécessite un post-traitement obligatoire (en PPK, il n'y a pas de configuration de levé différentiel). Les mobiles ne reçoivent pas les corrections émises par la base, il faut alors utiliser les stations du Réseau Géodésique Permanent (RGP) de l'IGN pour effectuer les calculs à postériori. Ces stations permanentes sont des bases fixes dont les positions sont connues. Les stations enregistrent en continu les chroniques GPS émises par les satellites. On compare les chroniques satellites enregistrées d'une part par le GPS mobile et la base lors de l'acquisition avec celles des stations permanentes sur la même période. Cette comparaison permet d'obtenir la correction différentielle qui sera appliquée aux points PPK.

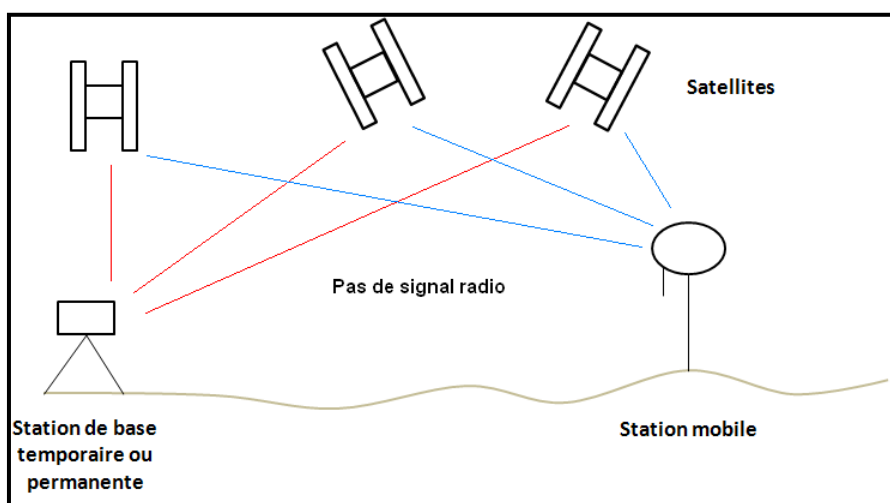


Figure 29 : Principe du levé DGPS en PPK (voir explications et acronymes dans le texte)

Domaines d'application

Le système de DGPS est utilisé pour tous les types de littoraux. Les **indicateurs** de type altimétrique, hydrodynamique, géomorphologique et botanique peuvent être relevés (limite de végétation, pied de dune/falaise, sommet des ouvrages, etc. ; chap. 3).

Modes d'utilisation

Ce système permet d'effectuer des levés de trait de côte (Figure 30, Figure 31 et Figure 32), ainsi que des levés d'**indicateurs** bien précis, des profils topographiques (mesures de profils de plages, dunaires, etc.) et des MNT. Le DGPS est particulièrement adapté dans les levés de haute précision, avec des cotes altimétriques (z) précises (cm).



Figure 30 : Système du DGPS (mobile Trimble R6®) positionné au pied de dune, Aquitaine, Amélie Sud, 2011 (© Observatoire Côte Aquitaine)

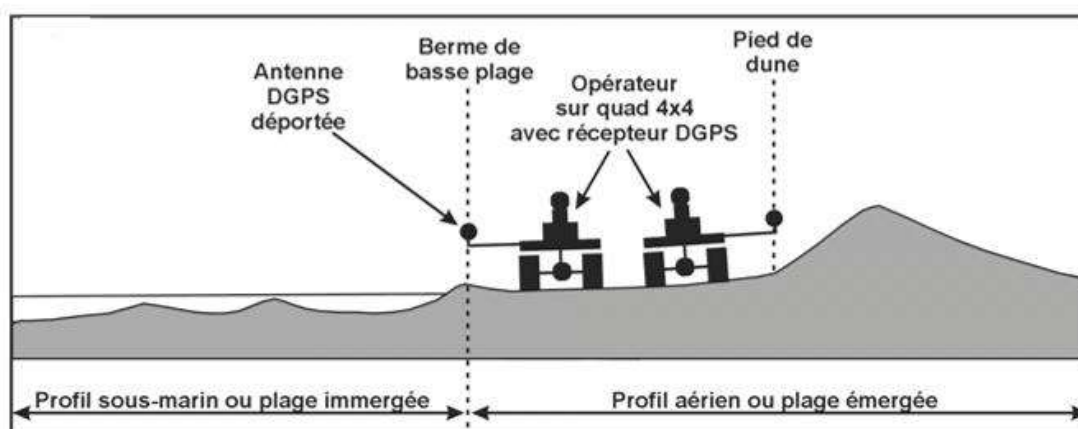


Figure 31 : Technique utilisée pour le levé du trait de côte par DGPS sur une plage sableuse méditerranéenne (Stepanian et al., 2010)

Le recours à des levés de topographie immergée¹¹ de précision centimétrique, fréquemment utilisée dans la partie sous-marine des plages coralliennes, c'est-à-dire de la **dépression d'arrière-récif** (DAR), sont réalisables en utilisant une double perche (Figure 33).

¹¹ On distingue la « topographie immergée » de la « bathymétrie » car il s'agit d'une mesure directe de l'altitude des fonds (mesure absolue) contrairement à la bathymétrie qui correspond à une mesure de la profondeur par rapport à la surface de la mer (mesure relative), qui doit ensuite être rattachée au référentiel altimétrique local.



Figure 32 : Méthodes de relevé de la position du trait de côte (Stepanian et al., 2011) : les levés longitudinaux du trait de côte sont effectués à l'aide d'un DGPS installé sur un quad ou transporté par un opérateur.



Figure 33 : Exemple de levé topographique immergé dans une DAR peu profonde (De la Torre, 2006)

En effet, la faible profondeur de certains environnements limite l'usage d'embarcations. Les tentatives de sondages embarqués (échosondeurs, sonar latéral, sismique ; chap. 4.3) dans ces environnements peu profonds se soldent souvent par une détérioration des instruments sur le récif.

Ce système a pour avantage de pouvoir lever en une seule fois la partie aérienne et sous-marine de la plage. Cependant, cette méthode ne peut être utilisée qu'avec des conditions météorologiques et un état de la mer calmes (vent, vagues) et en présence de faibles courants (De la Torre, 2006).

Fréquence du levé

L'usage peut être très fréquent. La fréquence peut être mensuelle ou trimestrielle selon les secteurs, principalement lorsque l'évolution de la côte est rapide et importante.

Précisions

La précision est centimétrique en plan (x, y) et en altitude (z).

Coûts

Les coûts peuvent être onéreux lors de l'investissement : à partir de 30 k€. Ce système nécessite des moyens humains non négligeables (au minimum 2 personnes). Un minimum de compétence est requis. La méthode par DGPS nécessite une formation minimum de quelques heures, ainsi qu'une bonne expérience du matériel.

Méthodes de traitement

Chaque type de levé (RTK, PPK, etc.) possède sa propre méthode de traitement. Les données récupérées nécessitent un traitement sous SIG. Les données peuvent nécessiter des traitements préalables à l'exploitation dans un SIG à l'aide d'un logiciel fourni par le constructeur : calcul de coordonnées de la station de base, vérification des systèmes de coordonnées, post-traitements RTK et PPK, etc.

Avantages

Ce système permet de prendre des mesures facilement et rapidement. C'est une méthode peu coûteuse si l'utilisation s'étend sur plusieurs années. Elle est très précise. La sous-traitance de la mesure topographique auprès d'un opérateur non expert du littoral est possible pour ce système, cependant, une compétence en géomorphologie est indispensable afin de relever les « bons » **indicateurs** de trait de côte.

Inconvénients

Pour les levés le long d'une falaise, sous couverture végétale ou à proximité d'autres obstacles (milieu urbain, etc.), le DGPS peut montrer quelques limites liées à des difficultés pour capter les satellites. De même, la liaison radio (dont la portée est relativement faible) entre le capteur GPS mobile et sa base peut parfois être perturbée en fonction du contexte (obstacle visuel, mauvaises conditions météorologiques, transport éolien de sable, présence d'autres signaux radio, etc.).

Recommandations

Actuellement, les indicateurs de trait de côte sont le plus fréquemment suivis à l'aide du DGPS, au moins pour le calage géodésique d'autres types de mesures (photos aériennes, images spatiales). Le DGPS permet tous les types de levés (profils, trait de côte, géoréférencement, MNT) sur tous types de milieux dès lors qu'ils sont accessibles. Il est recommandé de faire un suivi avant et après un événement (fortes marées, houles, tempêtes, etc.) qui a conduit à une évolution importante du trait de côte ou d'une trace d'atteinte des vagues de tempête sur le haut de plage.

La fiche synthétique ci-dessous (Figure 34) résume les propriétés du système DGPS.

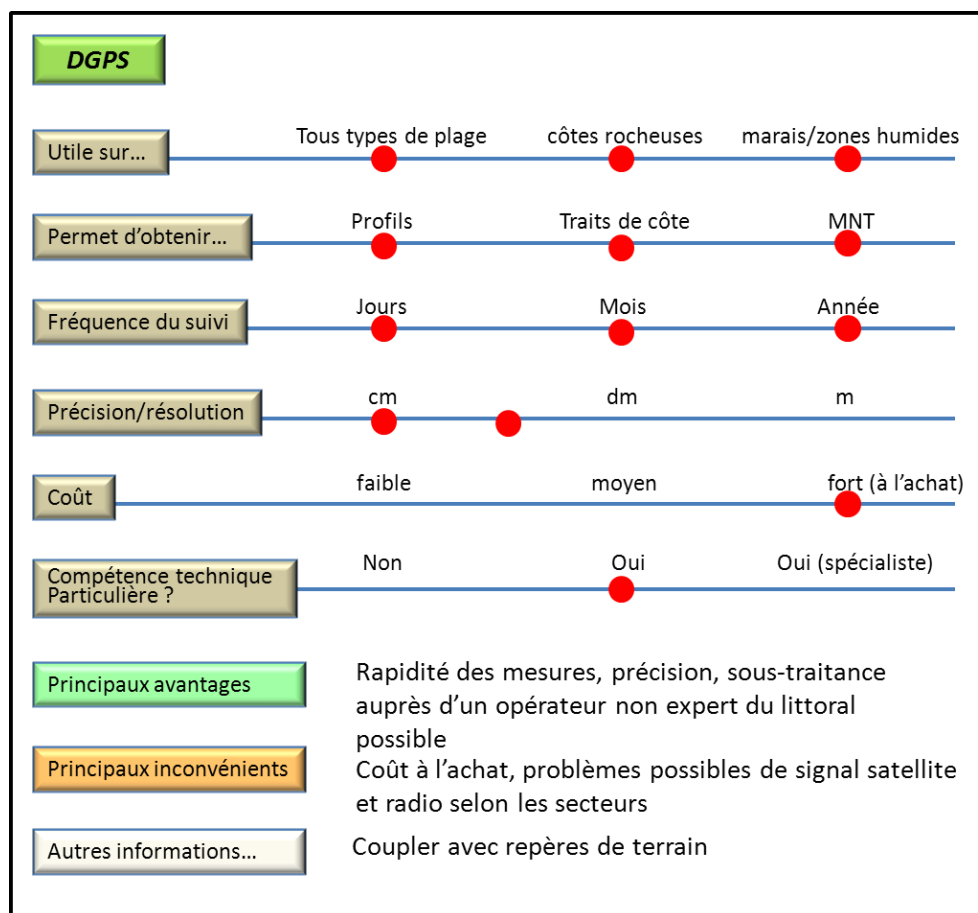


Figure 34 : Fiche synthétique concernant le DGPS

4.1.4. Le théodolite

Le théodolite est un instrument de géodésie complété d'un instrument d'optique indispensable en topographie (Figure 35). C'est une lunette montée sur les deux axes vertical et horizontal. Le théodolite est placé sur un trépied, et à la verticale (la verticale est une droite parallèle à la direction de la pesanteur, donnée notamment par le fil à plomb) exacte d'un point (Graphie) connu en coordonnées (x, y et z). Sa base doit être parfaitement horizontale.



Figure 35 : Théodolite (Leica Geosystems®)

Le théodolite peut être associé à différents instruments :

- tachéomètre : permettant de mesurer les distances grâce à un télémètre à visée infrarouge intégré à l'appareil. L'utilisation de cet outil pour des levés topographiques implique de rattacher les mesures à un repère fixe local (**mire**), en particulier pour les données altimétriques (z) ;
- station totale : permettant de saisir automatiquement les mesures.

Domaines d'application

Cette technique est employée sur tous types de côtes mais elle est plus adaptée sur les plages et les dunes (tous types de plage y compris les plages de galets). Les **indicateurs** de type géomorphologique et hydrodynamique peuvent être relevés.

Modes d'utilisation

Le théodolite est utilisé dans les mesures de profils topographiques (profils de plages, dunaires) et de levés d'**indicateurs** de trait de côte (pied de falaise rocheuse ou dunaire, sommet des ouvrages, limite de végétation, etc.). La réalisation d'un MNT ne pouvant pas se faire en mode d'acquisition continue mais selon des mesures point par point, n'est pas adaptée (il convient mieux à des transects). Il est particulièrement adapté dans les levés de haute précision, avec des cotes altimétriques (z) précises (cm).

Il est nécessaire de mesurer un point géodésique connu (repère, borne) lors du levé, de manière à obtenir des coordonnées absolues raccordées à un système géodésique.

Fréquence du levé

Plusieurs campagnes annuelles peuvent être faites. La fréquence peut être mensuelle ou trimestrielle selon les secteurs d'étude. Il est recommandé d'effectuer autant de campagnes qu'il est nécessaire en fonction des objectifs recherchés. Cependant, deux campagnes par an peuvent suffire afin d'avoir un bon suivi du trait de côte et de prendre en compte les évolutions saisonnières.

Précisions et qualité des données

Le tachéomètre offre des visées de portée d'environ 40 à 50 km en plaine en France. La précision est de l'ordre du décimilligrade (angle sous lequel à 40 km par exemple, un objet d'environ 6 cm est identifié). La précision d'un tachéomètre est souvent meilleure que celle des DGPS centimétriques (x, y et z).

Coûts

Les coûts (matériel) restent abordables pour un système classique : entre 3 et 5 k€. La mise en œuvre nécessite du personnel qualifié qui augmente le coût de l'intervention.

Méthodes de traitement

Les données acquises nécessitent un traitement préalable à une utilisation sous SIG ou tableur, à l'aide d'un logiciel provenant du constructeur.

Avantages

La précision d'un tachéomètre est très bonne. Le théodolite peut raccorder les mesures acquises à un référentiel géodésique (nécessité de mesurer un point connu). Il peut dans certains cas s'affranchir des problèmes du GPS relatifs à la réception des signaux satellites (obstacles, couvert végétal, etc.).

Inconvénients

L'utilisation d'un théodolite nécessite de bonnes compétences (acquisition et traitement). Généralement, il faut avoir recours à des techniciens expérimentés. Les coûts (frais de personnel) restent abordables.

La fiche synthétique ci-dessous (Figure 36) résume les propriétés du théodolite.

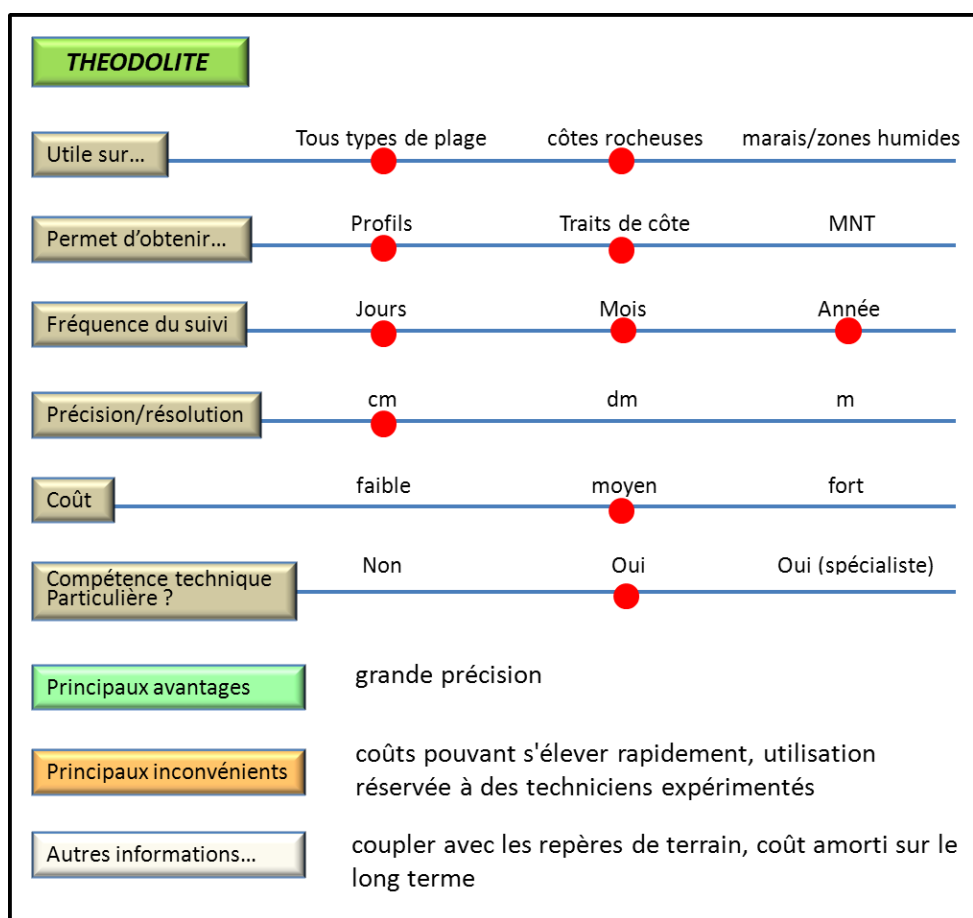


Figure 36 : Fiche synthétique concernant le théodolite

4.1.5. Le scanner 3D ou LiDAR terrestre

Le scanner 3D ou TLS¹² (Figure 37) permet au moyen de l'émission-réception d'un signal laser, de « scanner » un versant de falaise. Il effectue des mesures au sol (station immobile) ou à partir d'un véhicule terrestre ou marin (depuis un bateau). Lorsqu'il est embarqué (terre ou mer), le capteur TLS doit être couplé à un dispositif DGPS (mesure x, y et z ; chap. 4.1.3), lui-même couplé à une centrale inertielle (pour prendre en compte les mouvements du porteur/véhicule). Cet appareil permet de mesurer et d'enregistrer plusieurs millions de points tridimensionnels en quelques minutes, à une densité pouvant atteindre plus d'un point au millimètre.

Domaines d'application

Ce système est surtout utilisé pour le suivi des falaises rocheuses. Les indicateurs de type géomorphologique (sommet de l'ouvrage, pied de falaise, sommet de falaise, pied de dune, crête de dune) peuvent être relevés.

Modes d'utilisation

Ce système permet de mettre en place des MNT (images en 3D) de surfaces verticales à subverticales sans végétation.

Fréquence du levé

La fréquence d'acquisition peut être semestrielle à annuelle ou après un événement (effondrement d'un pan de falaise par exemple).

Précision

La précision est centimétrique en plan (x, y) et en vertical (altitude z). La précision peut être de quelques millimètres avec un appareil d'excellente qualité.

Coûts

Les coûts sont assez onéreux à l'achat : entre 10 et 30 k€ mais il est possible de louer le matériel (ou en prestation de service). Les moyens humains peuvent engendrer également des coûts importants (requiert au moins 2-3 techniciens expérimentés pour l'acquisition).

Méthodes de traitement

Les données récupérées nécessitent un traitement sous SIG. Au préalable, il est nécessaire de faire des traitements à l'aide du logiciel fourni par le constructeur. Il est possible de faire intervenir des prestataires pour traiter les données 3D (modèles maillés tridimensionnels, analyses géométriques et exploitations cartographiques).

Avantages

Il possède une bonne précision et une capacité de répétitivité de la mesure (notamment si possibilité d'investissement). Il permet également d'obtenir des images 3D à très haute résolution. Le scanner 3D offre des données qualitatives (images) et quantitatives (un très

¹² Terrestrial Laser Scanning

grande nombre d'informations très rapidement et à distance). Il donne une estimation quantitative des processus d'érosion (volume et vitesse d'érosion).

Inconvénients

Les données sont longues à traiter et la mise en œuvre (terrain) peut être lourde. En effet, en fonction de la superficie couverte, la forte densité de points implique que les traitements des données soient lourds mais aussi que la capacité de stockage des données doit être importante. Des compétences techniques très spécifiques sont donc nécessaires. Il en résulte des coûts d'acquisition et de traitement importants. Les contraintes d'utilisation sont nombreuses : falaises verticales à subverticales dépourvues de végétation, estran large si le système est déployé depuis le sol, conditions de navigation (accès, marée, vagues) si le système est déployé depuis un bateau (mise en œuvre plus délicate).



Figure 37 : Scanner 3D ou LiDAR terrestre (Riegl LMS-Z 420i ; © ATM 3D)

La fiche synthétique ci-dessous (Figure 38) résume les propriétés du scanner 3D ou TLS.

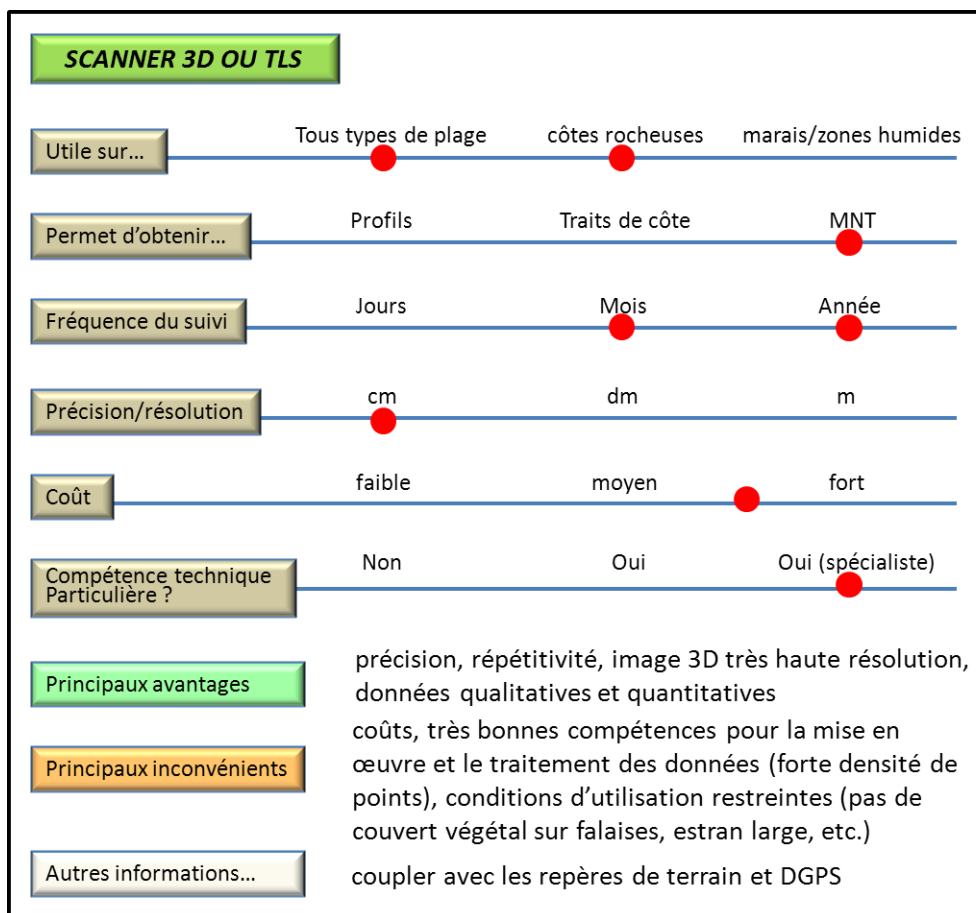


Figure 38 : Fiche synthétique concernant le scanner 3D ou TLS

4.1.6. Les suivis photographiques au sol

Cette méthode consiste à établir des successions de prises de vues, faites à partir d'un même point d'observation depuis le sol et selon la même direction, à des intervalles réguliers qui peuvent varier du jour au mois ou à la saison (printemps, été, etc.) ou à l'année. Ce système permet de procéder à des **analyses diachroniques** qualitatives avec identification des changements (à condition que les suivis de paysage soient systématiques et rigoureux). Les objectifs de ces suivis sont (MEEDDM, 2010) :

- de disposer d'un système de veille photographique permettant de faire ressortir sans délai les évolutions du trait de côte (repères, **indicateurs**, etc.) ;
- d'accompagner les réflexions qui touchent à l'évolution de l'espace littoral ;
- de permettre aux gestionnaires du littoral de prendre les mesures correctives fondées sur une observation la plus fine possible.

Ces suivis sont des outils de surveillance qui complètent les photographies aériennes verticales et les levés de terrain.

Domaines d'application

Ils sont adaptés pour tous les types de milieux. Cependant, certains secteurs difficiles d'accès (ex. : falaises, marais) nécessitent de prendre des précautions particulières (utilisation de cordes, etc.) tout en garantissant des conditions d'observations identiques d'un levé à l'autre (position, angle de visée, etc.). Les **indicateurs** de type géomorphologique notamment, et de type botanique et hydrodynamique peuvent être relevés (limites de végétation, pied de l'ouvrage, pied de falaise, laisse de mer, etc.). Des repères facilement identifiables dans le paysage sont nécessaires pour les comparaisons diachroniques.

Modes d'utilisation

La photographie permet de montrer un état instantané du littoral et de suivre dans la continuité la mobilité de ce dernier (repères, comparaisons, etc.). Le suivi photographique doit s'effectuer depuis le même point (x, y et z) et selon le même azimuth (horizontal et vertical) et dans des conditions identiques (saison, heure du jour, marée, focale).

Il y a deux types d'utilisation concernant les suivis photographiques :

- la prise de vue instantanée unique ;
- la prise de vue destinée à la **photogrammétrie**. Cela nécessite alors d'avoir des points de calage (coordonnées x, y et z connues).

Fréquence du levé

Les photographies doivent être prises à intervalles de temps réguliers (mensuels ou annuels) qui sont fonction de la vitesse d'évolution du trait de côte. Dans certains cas, des suivis sont effectués après chaque tempête. Dans les deux cas, ils doivent être mis en place rigoureusement (même emplacement, cadrage, luminosité, focale) afin de faciliter les comparaisons et d'analyser correctement les données (MEEDDM, 2010). Des photographies anciennes ou des cartes postales anciennes peuvent être utilisées pour compléter les chroniques d'images.

Précisions

Les suivis photographiques offrent une information généralement qualitative. Cependant, elles peuvent être quantitatives s'il y a présence d'un repère (borne, jalon, ouvrage, etc.) sur la prise d'observation.

Coûts

Les suivis photographiques peuvent être menés de façon isolés mais ils sont généralement effectués en même temps que les autres types de levés au sol (DGPS par exemple lors de la mission), ce qui réduit les coûts (frais de déplacement, moyens humains, etc.). Le coût du matériel est faible : une centaine d'euros.

Méthodes de traitement

La **photogrammétrie** est adaptée à ce type de levé (cette méthode présente cependant beaucoup de contraintes pour les photos obliques prises du sol).

Avantages

Les suivis photographiques depuis le sol présentent un bon rapport coût / efficacité. Ils apportent des données et informations souvent complémentaires aux photographies aériennes verticales et aux levés topographiques afin d'assurer un suivi du trait de côte pertinent (Figure 39).



Figure 39 : Erosion du rocher de Basta à Biarritz entre 1907 et 2004 (Aubié S. et al., 2005)

Inconvénients

La méthode nécessite d'être rigoureux lors des suivis (même emplacement, cadrage, focale...). Cette technique est insuffisante pour une estimation précise des volumes des matériaux. Les suivis photographiques ne permettent pas toujours d'apporter des données quantitatives (cf. précisions).

La fiche synthétique ci-dessous (Figure 40) résume les propriétés des suivis photographiques au sol.

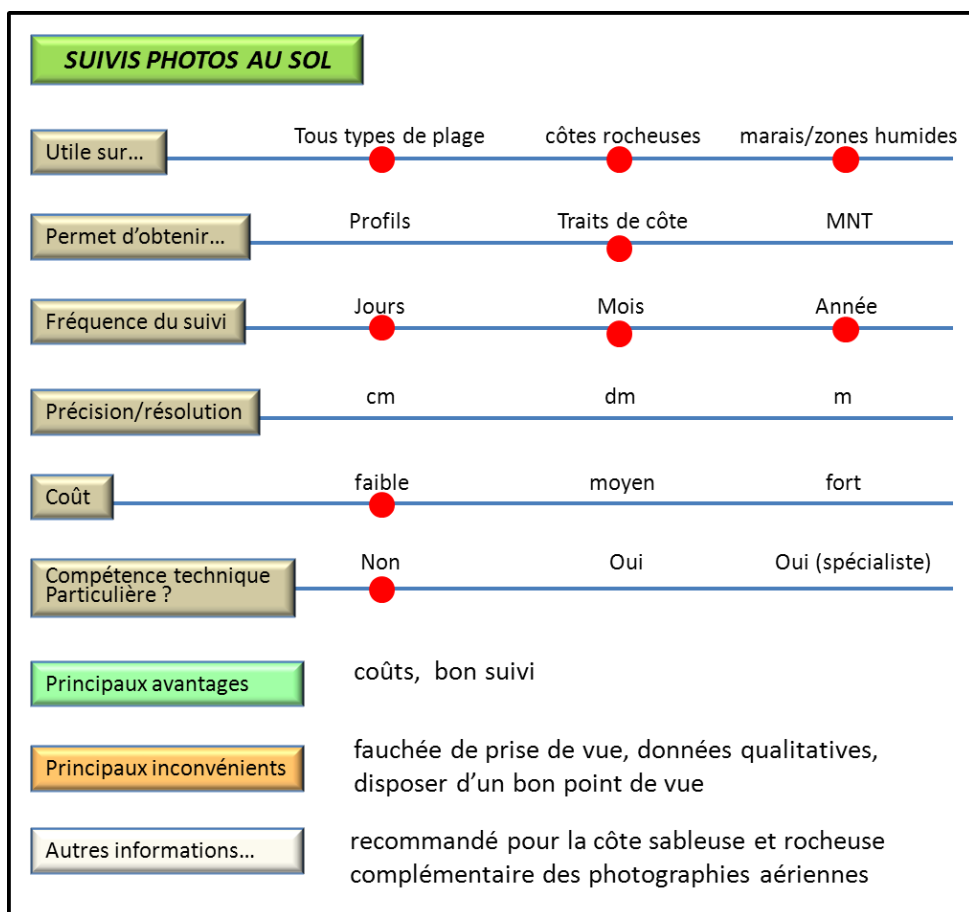


Figure 40 : Fiche synthétique concernant les suivis photos au sol

4.1.7. L'imagerie vidéo

Le principe de cette méthode est d'installer des caméras vidéo numériques de grande précision sur un site étudié. Les caméras sont connectées via un ordinateur permettant la synchronisation des données (temps, etc.). Il existe différents types de systèmes d'acquisition de haute précision, actuellement utilisés en France, à titre d'exemple :

- ARGUS utilisé par le BRGM sur le site de Sète (technologie développée depuis les années 1980) ;
- CAM-ERA utilisé par le laboratoire EPOC (Université Bordeaux 1) sur le site de Biscarosse ;
- VM₄GIS utilisé par le bureau d'études CASAGEC en collaboration avec le Conseil Général de l'Hérault, l'Observatoire de la Côte Aquitaine, la Ville de Biarritz, d'Hendaye, etc. (Figure 41).

Le système vidéo permet d'acquérir *in situ* et en continu des images selon une fréquence d'acquisition donnée. Le rayon d'action varie entre 40 m et 2,5 km. Les images peuvent couvrir une surface au sol de l'ordre de quelques centaines de mètres dans la direction transversale

par rapport au trait de côte (« **cross-shore** ») et sur quelques kilomètres parallèlement à la côte « **longshore** ». Les prises de vues sont réalisées à partir d'une altitude (z) qui doit être suffisamment élevée (une trentaine de mètres), ainsi elles sont obliques par rapport au sol.

Lors de l'installation, ce type de levé nécessite des paramétrages optiques (calibration des lentilles) et géographiques (calage de la station et des images).



Figure 41 : Système de suivi vidéo (VM₄GIS / CASAGEC ; Rihouey, 2011)

Domaines d'application

Cette méthode est adaptée pour tous les types de milieux ayant des modifications géomorphologiques importantes, étant peu adaptée aux falaises et aux mangroves dont les évolutions sont plus lentes, ne nécessitent pas une observation continue à haute fréquence ou dont l'emprise spatiale est trop importante. Ce système est pertinent dans des milieux à dynamique forte. Il permet notamment de relever les indicateurs altimétrique et hydrodynamique (limite sable mouillé/sec, zone de déferlement, ligne correspondant à l'altitude d'une basse mer moyenne, etc.).

Modes d'utilisation

L'imagerie vidéo permet en partie d'effectuer des suivis du trait de côte et des levés de topographie intertidale. Elle permet également de générer des MNT. Par exemple, les **indicateurs** suivants peuvent être mesurés sur une côte à marnage :

- la limite sable/eau est délimitée plusieurs fois au cours d'une marée montante et descendante ;
- le niveau de l'eau est connu (soit par marée théorique ou prédite, soit à l'aide d'un marégraphe ou d'un capteur de pression).

Par ailleurs, par interpolation des différentes limites sable/eau (x , y) et du niveau de marée correspondante (z), on obtient alors un MNT de la zone intertidale (chap. 5.2.2).

Afin de mieux distinguer les objets tels que le trait de côte, les images en couleur sont préférées. Les images produites peuvent être instantanées (photographie normale), moyennées (image moyennée sur un temps d'exposition) et elles peuvent être de type variance¹³. Les images stockées périodiquement (plusieurs fois par jour) sont comparées et permettent de suivre l'évolution de l'indicateur du trait de côte (limite sable mouillé/sec, ligne d'eau instantanée, laisse de mer, etc.).

Fréquence du levé

La fréquence du levé est continue et journalière. Elle peut être très basse (1 image par heure), ce qui est idéal pour le suivi à long terme du trait de côte ou très haute (plusieurs images par seconde), pour l'analyse des processus hydrodynamiques (houle, courant).

En général, une acquisition par heure est réalisée, incluant : une image instantanée et sur une durée de 10 min une image moyennée et une image issue de la variance (Idier *et al.*, 2005).

Résolution/précision

Pour une visée parallèle à la côte, la résolution spatiale peut aller de 0.1 à 0.5 m **cross-shore** et de 0.5 à 12.5 m **longshore**. La précision en (z) est d'environ 0.1 m dans le meilleur des cas, mais plus le point d'observation est éloigné des caméras, plus l'erreur est grande.

Les images ont une résolution minimale de 640 x 480 pixels (variable selon les systèmes optiques) et peuvent être en noir et blanc (256 niveaux de gris), en couleur (rouge-vert-bleu sur 256 niveaux) ou autre (infra-rouge, etc.). Elles dépendent du type de webcam utilisé.

Le rayon d'action et la résolution des capteurs dépendent du type de capteur choisi et de l'objectif de l'étude. À titre d'exemple, sur les capteurs classiques d'ARGUS, la zone d'emprise pour des études quantitatives de processus physiques est généralement de l'ordre de 1 km en **longshore**. Les capacités des capteurs numériques évoluent constamment au niveau de la résolution, saturation, etc. (Idier *et al.*, 2005).

Coûts

Les coûts d'acquisition et de maintenance sont moyens à forts mais peuvent être amortis sur le long terme :

- de 25 à 30 k€ pour les équipements, l'installation et les licences (par caméra) ;
- de 3 à 5 k€ pour les maintenances (par caméra).

Méthodes de traitement

Le principe du traitement des images consiste à convertir les coordonnées de l'image (u, v en pixels) en coordonnées « terrain » (x, y, z).

Une fois les images sélectionnées, la zone d'étude est définie manuellement. Les pixels contenus à l'intérieur de cette zone peuvent être traités à partir d'un algorithme de détection de contour comme par exemple le filtre de SOBEL (chap. 4.2.3.2).

¹³ Somme des carrés des écarts par rapport à la valeur moyenne du jeu de données.

Les données acquises peuvent être intégrées sous SIG. Cependant, elles nécessitent de nombreux traitements au préalable (traitements des paramètres optiques et géographiques, etc.). Les calculs quantitatifs (traitements informatiques) de cette évolution sont basés sur la méthode de la **photogrammétrie**.

Avantages

L'imagerie vidéo est une technique autonome qui permet d'accéder à plusieurs types d'informations (fréquentation de plage, suivi de végétation, pollution, suivi de travaux, laisses de mer, hydrodynamique, sécurité...) en même temps sur le long terme, à pas de temps réguliers et à haute fréquence. Elle possède une bonne précision en 2D (Bulteau *et al.*, 2011) et elle est efficace dans des zones difficiles d'accès ou encore lors de tempêtes (après un événement notable), dans la mesure où les conditions météorologiques ne perturbent pas trop l'image (vent, embruns, luminosité...). Les données peuvent être facilement partagées sur un site internet offrant un visuel de communication parfois « attractif » pour les gestionnaires.

Si l'opération est mutualisée (appui en sous-traitance ou compétences scientifiques disponibles), le suivi à haute fréquence et sur le long terme est moins coûteux que des levés de terrain. Cette méthode présente de nombreux aspects innovants :

- la robustesse des outils de haute technologie déployés en milieu naturel (conditions météorologiques et océaniques rigoureuses) ;
- le développement de programmes informatiques d'acquisition, de stockage et de traitement des images ;
- l'amélioration des connaissances des processus dynamiques côtiers (vagues, courants, déplacement des bancs de sable, etc.) selon des hautes fréquences et sur le long terme dans le cadre de projets de recherche scientifique.

Inconvénients

Ce système nécessite des compétences importantes dans l'installation de l'équipement, dans sa maintenance et dans le traitement des données.

Les coûts peuvent s'avérer importants. Il y a un manque de précision concernant la valeur (z). La qualité des images peut être dégradée si les conditions météorologiques sont défavorables au système (contre-jours, mauvais temps, etc.). La superficie couverte est faible.

L'installation sur site requiert d'obtenir des autorisations de la part des gestionnaires et des propriétaires pour l'implantation sur un terrain nu ou sur un bâtiment ou construction existant. De même pour les autorisations de construction (s'il n'y a pas de point haut permettant de mettre en place le système, il faut construire une tour/mât). L'installation du système en milieu naturel (non urbanisé) est difficile en raison de l'impact paysager qui peut être fort et des autorisations sont requises (paysage, sécurité aérienne, etc.).

Ce type de système nécessite un local « sec » avec de l'électricité et un téléphone. À défaut, on peut recourir à un téléphone mobile (GSM) et à l'installation de panneaux solaires (surcoût à prévoir et maintenance adaptée).

Le matériel installé de façon permanente peut être soumis à des événements naturels exceptionnels ou encore à des actes de malveillance (vol, vandalisme), ce qui représente un risque pour l'intégrité du système (Idier *et al.*, 2005).

La fiche synthétique ci-dessous (Figure 42) résume les propriétés de l'imagerie vidéo.

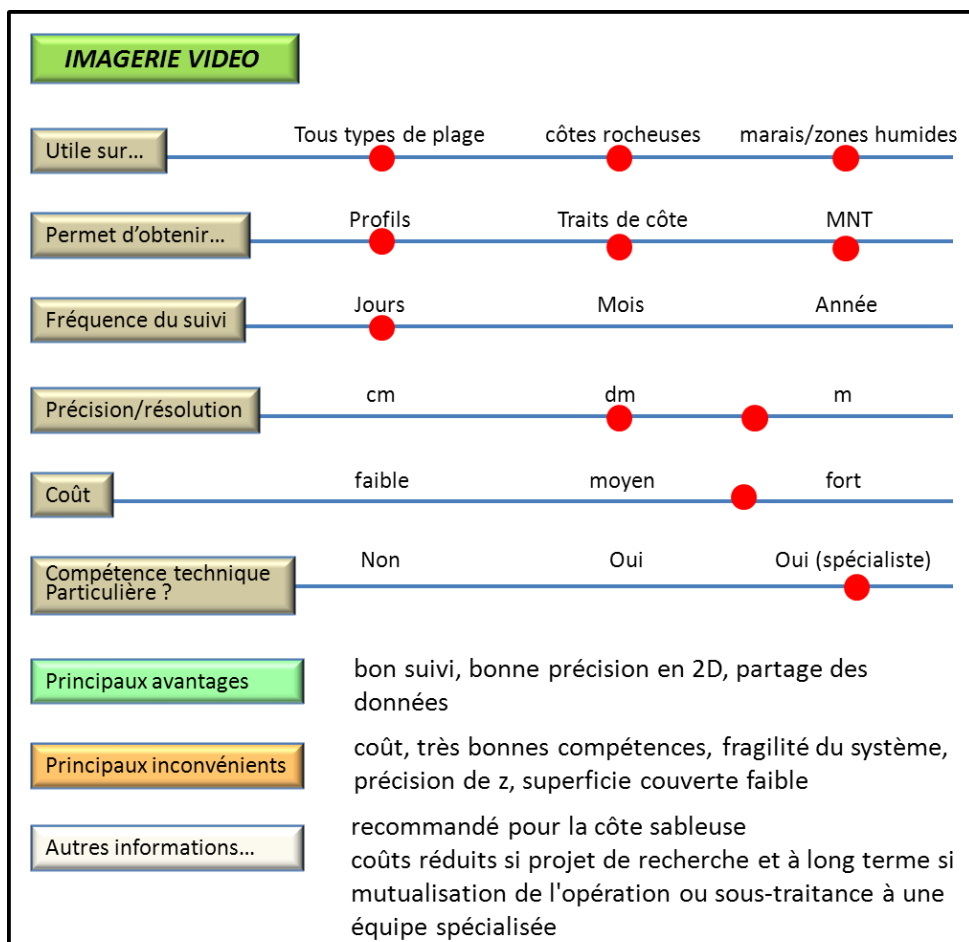


Figure 42 : Fiche synthétique concernant l'imagerie vidéo

4.2. LEVÉS AÉRIENS ET IMAGERIE SATELLITE

Ce chapitre sur les levés aériens et satellites fait l'objet d'une attention particulière dans ce rapport. En effet, la télédétection, au sens large du terme, est de nos jours une méthode de plus en plus utilisée dans le suivi de la frange côtière et le sera d'autant plus dans les années à venir. La première partie de ce chapitre est consacrée aux techniques basées sur le principe de la télédétection aéroportée (photos aériennes, LiDAR, etc.) et satellitaire (imagerie optique – exemple : SPOT, FORMOSAT, etc. - et imagerie radar). La deuxième partie du chapitre traite des différentes méthodes d'extraction du trait de côte par la méthode de la photo-interprétation et du filtre de SOBEL.

La **télédétection** regroupe l'ensemble des procédés et techniques qui permettent d'acquérir à distance des informations sur les objets terrestres, en utilisant les propriétés des ondes électromagnétiques émises ou réfléchies par ces objets (d'après le site SFPT, 1989).

La **télédétection** est surtout utilisée pour acquérir des données (planimétriques et/ou altimétriques) permettant d'établir des cartes (cartographie, états de surface, etc.) depuis un

moyen aéroporté (**télédétection** aérienne verticale ou oblique), ou par voie de prises de vue par satellite (**télédétection** spatiale ou satellitale).

Il existe trois grands prétraitements¹⁴ des photographies aériennes et des images satellitales :

- le géoréférencement (corrections de l'image) : il permet de délimiter avec précision l'espace par des coordonnées géographiques ou cartographiques. Afin de pouvoir superposer correctement différentes couches d'informations, il est indispensable d'avoir recours au même système de projection (Lambert II étendu, Lambert 93, etc.) ;
- l'orthorectification : elle permet de corriger les déformations de l'image (géométrie de l'image) liées aux projections optiques, aux variations de l'altitude du porteur aérien ou au relief. L'image est corrigée à partir de points de calage connus (x, y et z) ;
- le mosaïquage (s'il y a lieu) : il permet d'assembler des **orthophotographies**¹⁵ à l'aide d'un logiciel spécifique. Ce dernier permet d'éliminer les problèmes de parallaxes entre l'avion et l'objet géographique observé et de corriger les différences radiométriques¹⁶.

Recommandations

La télédétection doit être couplée avec des outils de levé terrestre (DGPS par exemple ; chap. 4.1) afin de disposer d'indicateurs de trait de côte bien calibrés (géoréférencement, identification, etc.).

Pour lever par télédétection des **indicateurs** dynamiques de type jet-de-rive, il est nécessaire de bien maîtriser les conditions météorologiques et océanographiques pendant la prise de vue.

4.2.1. La télédétection aéroportée

a) La photographie aérienne verticale et oblique

Les appareils de prise de vue (optique ou numérique) associés à un porteur aérien (annexe 5) permettent d'obtenir des photographies aériennes (données brutes). Ces dernières sont la base de nombreuses données géographiques.

Une photographie aérienne à but cartographique est caractérisée par son format (généralement 24 cm x 24 cm), sa résolution (pixel de 10 à 50 cm) et par son échelle (du 1/8 000 jusqu'au 1/60 000) (d'après le site SEIG, a).

La photographie aérienne peut être à axe vertical (l'axe de prise de vue est très proche de la verticale du lieu), ou à axe oblique (vue en perspective de la zone représentée).

¹⁴ Exemple de référence : **Faye I.B.ND.** (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 photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes. Volume 1. Thèse. Université de Bretagne Occidentale. 321 p., 4 ann.

¹⁵ Photographies orthorectifiées.

¹⁶ Dates de prises de vue différentes entre deux bandes ou au sein d'une même bande par exemple.

Les photographies aériennes verticales sont utilisées en cartographie. La représentation des objets est proche d'une projection sur un plan.

Domaines d'application

La photographie aérienne est pertinente sur tous les types de milieux (attention toutefois aux erreurs possibles de projection au niveau des falaises en lien avec l'axe de vol). Les indicateurs botaniques (limites de végétation) et géomorphologiques (pied de falaise, pied de dune, sommet de l'ouvrage, etc.) peuvent être relevés.

Modes d'utilisation

Les photographies aériennes permettent de déterminer les indicateurs de trait de côte choisis et de suivre si possible (en fonction de la fréquence d'acquisition des images) dans la continuité, leur mobilité par l'intermédiaire de transects (lignes de côte analysées dans le SIG). Les photographies aériennes peuvent être drapées¹⁷ sur un MNT.

Les prises de vues aériennes sont souvent réalisées avec un intervalle de temps tel que deux clichés successifs ont un recouvrement de 60%. La surface commune peut alors être vue en relief à l'aide de lunettes stéréoscopiques : il s'agit de la vision stéréoscopique. Cependant, cette technique nécessite une échelle haute (1/5000^e) et un grand nombre de clichés pour suivre le trait de côte (CETE Sud-Ouest, 2011).

Fréquence du levé

La fréquence d'acquisition de la photographie aérienne verticale est de quelques années entre chaque survol (tous les 5 ans environ ; IGN) mais dans le cas de levé spécifique, les campagnes peuvent être plus fréquentes. Les photographies aériennes sont programmées en fonction des besoins de chacun.

Ainsi, il existe plusieurs types de campagnes de photographies aériennes :

- les campagnes institutionnelles aujourd'hui commanditées par l'État et réalisées par l'IGN ou par un autre prestataire, par exemple : BdOrtho®¹⁸ (IGN), ©Ortho-Littorale v2¹⁹ et ©Ortho-Littorale 2000¹⁹, etc. à l'échelle d'un département, d'une région ou nationale ;
- les campagnes faites à l'échelle locale sur demande.

Par ailleurs, des campagnes anciennes sont disponibles pour une grande majorité du littoral français (portail Sextant, Géoportail, IGN, portail du CRIGE PACA).

Précision / résolution

En général pour les photos acquises antérieurement aux années 2000, une photographie aérienne verticale (enregistrée sur un négatif de 23 cm de côté) présente une résolution photographique de 10 à 15 µm (taille du grain photosensible) en noir & blanc (panchromatique) avec une échelle de 1/30 000. La taille des plus petits objets discernables est d'environ 1 m. La finesse de l'image sera ainsi décrite par l'expression usuelle de : « précision métrique » (d'après le site CNIG).

¹⁷ Habillées. Ici, principe de superposer une image sur un MNT.

¹⁸ Mise à jour tous les 5 ans.

¹⁹ www.geolittoral.equipement.gouv.fr

A l'heure actuelle, la résolution (taille terrain du pixel) des photos telle que la BdOrtho® de l'IGN est pluri-centimétrique (de 20 cm à 50 cm environ). L'utilisation des photos aériennes récentes pour la cartographie du trait de côte offre une grande précision (décimétrique à centimétrique ; Moore, 2000).

Coûts

Les coûts sont relativement importants dans le cas de campagnes sur demande. En effet, il faut prendre en compte le coût de la campagne d'acquisition mais aussi les traitements spécialisés. Cependant, les coûts peuvent être moindres si les photographies sont accessibles sur catalogue.

Méthodes de traitement

Les images brutes saisies, en l'occurrence les photographies aériennes verticales, sont redressées (mises en conformité géographique) et positionnées dans l'espace (géoréférencement). Il est nécessaire pour cela de disposer de points de référence géographique de façon à localiser, recalcr et redresser les images, et éliminer ainsi les déformations dues à la prise de vue (déformations optiques, variations de l'assiette et de l'altitude de l'avion et au relief). La position géographique réelle peut être obtenue directement par GPS sur le terrain (les porteurs aériens doivent alors être équipés d'une **centrale inertielle** couplée à un GPS), sur une photographie déjà redressée et positionnée, sur une carte.

Enfin, les images sont intégrées dans un ensemble d'images pour constituer un orthophotoplan géoréférencé (**orthophotographie**), directement géré par un système d'information géographique (SIG). Les images sont mosaïquées de manière à se recouper de façon cohérente dans un plan et à harmoniser les couleurs entre les différentes images.

La méthode par photo-interprétation²⁰ (chap. 4.2.3.1) est préconisée pour extraire le trait de côte des photographies aériennes verticales. Les techniques de **photogrammétrie** sont utilisées pour les traitements préalables des photos (orthorectification ou redressement des images notamment).

Avantages de la photographie aérienne verticale

La photographie aérienne classique scannée permet d'avoir une résolution plus fine que le mètre si la qualité de la photo le permet, ainsi que le grain et l'échelle de prise de vue (d'après le site SEIG, a).

Elle permet de suivre l'évolution des indicateurs de trait de côte (par exemple, les limites de végétation si la fréquence est régulière) sur une longue période (échelles de temps de plusieurs années voire plusieurs décennies, Figure 43).

²⁰ Il est important d'avoir accès ou de disposer de photographies aériennes anciennes (géoréférencées) car elles permettent notamment d'observer l'évolution de la frange côtière par superposition à des données plus récentes. Elles offrent aussi des témoignages historiques de l'occupation du littoral et de son évolution urbaine.

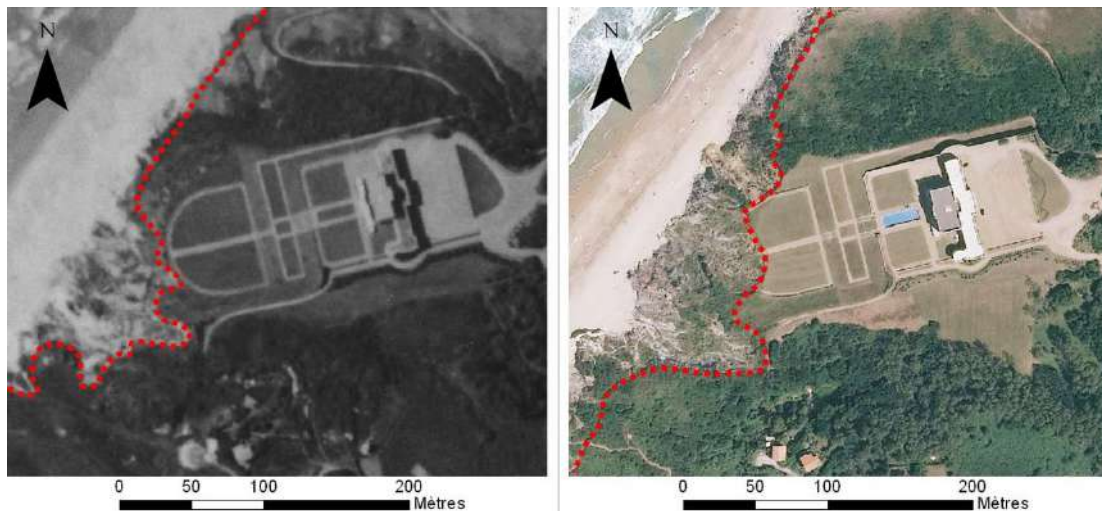


Figure 43 : Etude diachronique d'orthophotographies datant de 1954 (©BRGM, IGN et Observatoire de la Côte Aquitaine) et de 2009 (©BRGM, IGN, Observatoire de la Côte Aquitaine, Convention n°0137/GIP ATGeRI) révélant de fortes instabilités au niveau du château de la Reine de Serbie sur la plage du Pavillon Royal à Bidart

Des photographies aériennes anciennes peuvent être scannées, géoréférencées et mosaïquées, offrant ainsi la possibilité de faire des **études diachroniques** sur plusieurs décennies.

Inconvénients de la photographie aérienne verticale

Les coûts sont variables en fonction de la demande (sur catalogue ou campagne sur demande). La mise en œuvre d'une campagne de photographie aérienne demande des moyens assez lourds (location de l'avion et du matériel, pilote, etc.), d'excellentes compétences sont donc requises (au moins deux techniciens expérimentés).

Avantages de la photographie aérienne oblique

Elle est datée et localisable sans grande difficulté. Elle offre des informations précises sur le contexte géomorphologique de la zone étudiée et permet de montrer son évolution. Elle permet de retracer l'évolution du trait de côte sur des échelles de temps de plusieurs décennies (d'après le site CNIG). Elle permet d'avoir un aperçu qualitatif sur de grands espaces après un événement météo-marin notable. Les coûts de mise en œuvre et de traitement sont relativement faibles. Concernant le suivi des falaises, elle présente un intérêt dans le cas de mouvements de terrain (éboulements, glissements, etc., Figure 44). Plus généralement, elle présente un intérêt pour la dynamique des systèmes.



Figure 44 : Etude diachronique de photographies aériennes obliques datant de 2008 (à gauche) et 2010 (à droite), révélant un mouvement de terrain, au niveau de la plage de Maiarko à Saint-Jean-de-Luz (© Observatoire de la Côte Aquitaine)

Inconvénients de la photographie aérienne oblique

La mise en œuvre d'une campagne de photographie oblique peut demander des moyens assez lourds (location de l'avion ou de l'hélicoptère, du matériel, pilote, etc.).

Recommandations : il est préconisé de se renseigner sur les différents types de porteurs aériens (annexe 5) en raison de la variabilité des coûts.

Les fiches synthétiques ci-dessous (Figure 45 et Figure 46) résument les propriétés des photographies aériennes verticales et obliques.

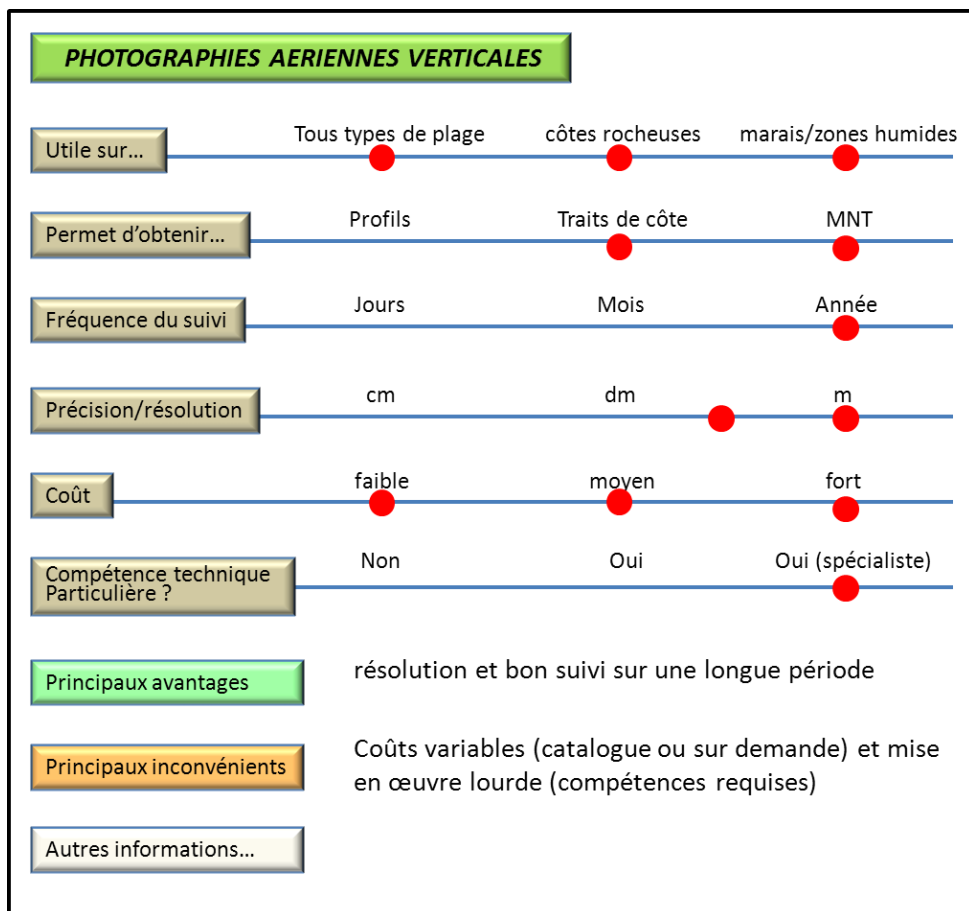


Figure 45 : Fiche synthétique concernant les photographies aériennes verticales

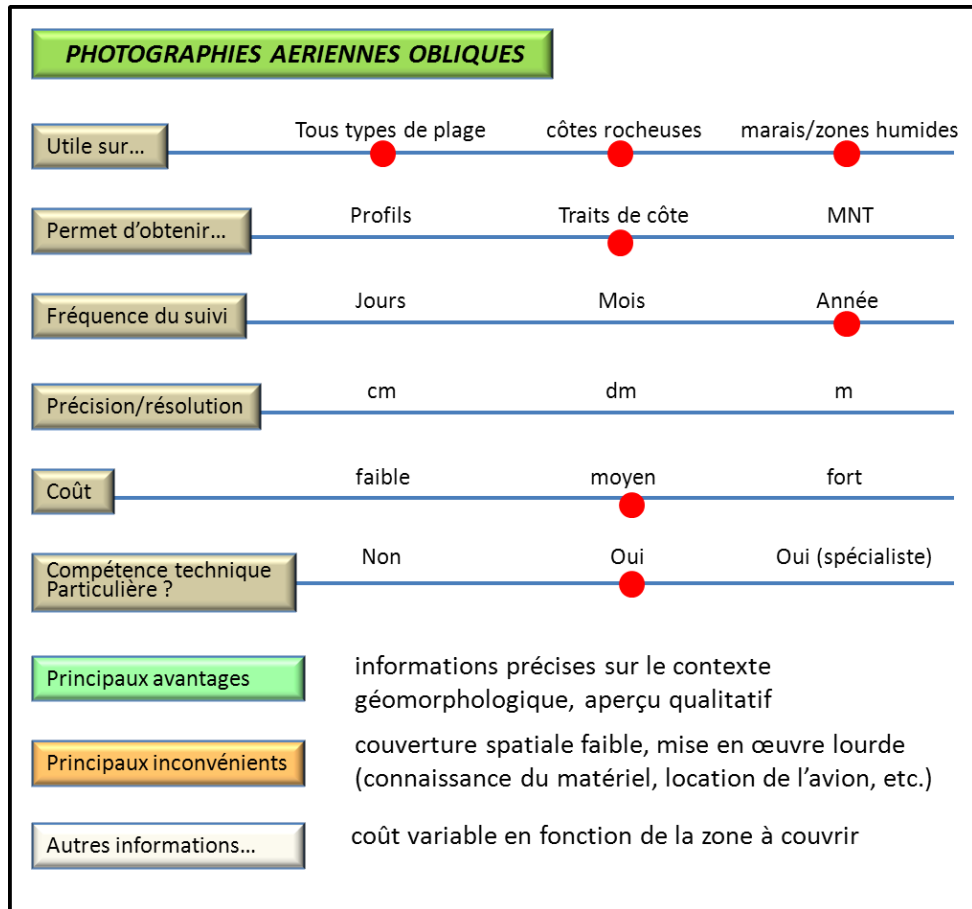


Figure 46 : Fiche synthétique concernant les photographies aériennes obliques

b) Le laser aéroporté ou LiDAR topo-bathymétrique (Light Detection And Ranging)

Le LiDAR est une technique de télédétection active qui repose sur un double système d'émission / réception de lumière. Un télémètre laser émet une faible impulsion lumineuse et reçoit en retour l'impulsion réfléchie par l'objet touché. La mesure du temps écoulé entre l'impulsion et la réception permet de calculer la distance franchie par le signal initialement émis. Le LiDAR aéroporté est utilisé pour la mesure topo-bathymétrique qui associe deux télémètres lasers à balayage transversal indépendants fixés à bord d'un avion ou d'un hélicoptère et dont le positionnement est estimé par géoréférencement direct (couplage GPS / **centrale inertielle**). Deux types de LiDAR existent : le LiDAR topographique (terre) et le LiDAR bathymétrique (mer).

Le rendement de l'équipement est élevé car le vol s'effectue à environ 55 m/s permettant de couvrir de vastes surfaces en quelques heures. L'altitude de vol peut varier de 200 m à 5000 m environ permettant d'obtenir une fauchée variant de quelques dizaines de mètres à 7000 m selon le réglage de l'ouverture du LiDAR (annexe 6). Lors des levés LiDAR, une acquisition de photographies aériennes verticales de basse résolution (1,3 Mo pixels) est systématique (Bretel et Levoy, 2011 ; dans le cadre du projet CLAREC).

Le programme Litto3D (d'après le site de l'IGN, a et le site du SHOM, a ; programme Litto3D®)

En France, le programme Litto3D®²¹ de l'IGN (Institut Géographique National) et du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) a été mis en place. Il constitue le socle de données indispensable à la mise en œuvre de politiques publiques de la mer et du littoral (prévention des risques, protection du littoral, etc.). Les droits de libre utilisation et de libre diffusion des données Litto3D® à l'ensemble de la sphère publique sont donnés, dans le cadre de missions de service public de chaque organisme.

Il existe trois moyens de levés utilisés dans le programme Litto3D® (Figure 47). Il s'agit du laser bathymétrique aéroporté, du laser topographique aéroporté et du sondeur multifaisceaux embarqué à bord d'un bateau (zones maritimes inaccessibles pour le signal LiDAR, en complément du laser bathymétrique). Ce programme prévoit l'acquisition de données LiDAR sur l'ensemble du littoral national (Métropole et Outremer).

Le LiDAR topographique aéroporté concerne la partie terrestre (annexe 6). Ce LiDAR est un distance-mètre laser dans les longueurs d'onde proche infrarouge (1064 nm).

Le LiDAR bathymétrique aéroporté, concerne la partie maritime (annexe 6). Le laser bathymétrique émet un rayonnement visible dans le vert (532 nm) qui permet d'ailleurs de détecter les fonds marins, et un rayonnement dans le proche infrarouge (1064 nm). Les données issues du levé LiDAR bathymétrique peuvent être complétées par des données issues de campagnes de levés bathymétriques par sondeur multifaisceaux.

Domaines d'application

Le LiDAR s'utilise sur tous les types de littoraux. Dans les eaux claires (et non dans les eaux turbides), il est possible d'aller jusqu'à -20/-30m de profondeur lorsque l'eau est claire avec un LiDAR bathymétrique. Pour les milieux tropicaux, il est particulièrement compliqué de trouver une saison appropriée à ces levés entre les fortes précipitations de la saison humide et les conditions météo-marines agitées de la période sèche qui génèrent des problèmes de turbidité d'une part et d'irisation du plan d'eau d'autre part et perturbent la pénétration du signal dans la mer (De la Torre *et al.*, 2012). Les indicateurs de type géomorphologique (rupture de pente topographique, pied de falaise, limite du schorre/slikke, etc.) peuvent être relevés.

Modes d'utilisation

Cette méthode d'observation aéroportée est directement exploitée pour décrire l'altitude de la surface terrestre et produire des Modèles Numériques d'Élévation (MNE), de Terrain (MNT) et de Hauteur du sursol (MNH).

Fréquence du levé

Cette technologie est relativement récente. Il est donc difficile d'avoir un retour d'expérience concernant la fréquence de levé. Cependant, une fréquence de 5 à 10 ans est avancée par l'IGN et le SHOM. Dans le cadre de projets de recherches, certaines régions bénéficient de levés plus fréquents comme c'est le cas pour le projet CLAREC (Bretel et Levoy, 2011). Aux

²¹ Litto3D : <http://www.shom.fr/> et <http://www.ign.fr>

Etats-Unis des suivis de ce type peuvent être effectués avant et après tempête (Balouin et *al.*, 2011) et ils sont réalisés annuellement aux Pays Bas.

Précisions

Le LiDAR permet la réalisation de semis de points au sol sur de grandes surfaces (plusieurs dizaines à centaines de km²/vol de quelques heures), avec des densités de points élevées (exemple du projet CLAREC : 1 à 10 points/m² d'après Bretel et Levoy, 2011). La précision dépendra alors de l'usage des données. Par exemple, un MNT à 5 m type litto-3D sera suffisant pour avoir un bon aperçu de la topographie d'une plaine littorale, mais ne permettra pas de détecter ni un cordon dunaire étroit (exemple du Lido de Sète qui ne fait que quelques mètres de large), ni une digue ou un mur de protection, ce qui peut poser des problèmes si le travail porte sur la submersion marine.

La précision altimétrique du LiDAR aéroporté est décimétrique (inférieure à 20 cm). La précision altimétrique absolue (z) est de l'ordre de 10 cm et 10 – 17 cm en x et y, respectivement (Bretel et Levoy, 2011 ; dans le cadre du projet CLAREC).

La résolution planimétrique est pluri-centimétrique (généralement inférieure à 50 cm) en fonction de la hauteur de vol (d'après le site IGN, b).

Cependant pour le LiDAR bathymétrique, les très petits fonds (de 0 à -2 m) sont les plus difficiles à lever (zone d'agitation). Dans ces zones, les manques de données sont fréquents et par conséquent les marges d'erreur associées sont plus importantes qu'en topographie, ou pour des bathymétries plus importantes. La précision de la mesure d'indicateur géomorphologiques est alors au mieux métrique pour ces petits fonds.

Coûts

Les coûts sont importants. Ils comprennent d'une part la location d'un avion ou d'un hélicoptère (possédant une trappe qui permet les tirs laser sous la carlingue), le déploiement au sol des GPS (plus ou moins nombreux), coûts de missions, d'amené/repli, et le traitement des données (personnel spécialisé). La nécessité d'avoir des plans de vols rectilignes influe sur le coût final. Le plan de vol sur une côte très découpée sera beaucoup plus complexe ce qui engendrera un surcoût. Il sera alors préférable d'utiliser un hélicoptère plutôt qu'un avion sur des littoraux non-rectilignes.

Concernant le LiDAR topographique, le coût moyen au km² est de l'ordre de 250 € pour des surfaces d'études de plus de 100 km². Pour des surfaces plus petites, les frais incompressibles augmentent les coûts au km²/levé.

Dans le cas du LiDAR bathymétrique, le coût est bien plus élevé en raison du coût de mobilisation d'un avion équipé du LiDAR bathymétrique. Le coût de mobilisation d'un avion peut varier entre 50 k€ et 200 k€ suivant le prestataire (hors acquisition). D'après Balouin et Heurtefeux (2007), le coût d'une application LIDAR est, selon les prestataires, compris entre 1 500 et 6 000 € /km². Cependant, en domaine littoral, la zone à couvrir est variable et rarement rectiligne. Il en résulte des plans de vol plus complexes qui entraînent souvent un surcoût de l'opération. Il est donc préconisé de travailler sur de larges zones (> 300 km²) afin de diminuer les coûts au km².

Les coûts de traitement des données ne sont pas pris en compte ici.

Méthodes de traitement

Au préalable, les données brutes subissent des traitements : élimination de valeurs aberrantes, filtrage d'objets ne présentant pas d'intérêt direct pour l'utilisateur, etc. Il faut vérifier que la précision horizontale se situe dans les limites spécifiées : c'est-à-dire entre 0,5 et 1 mètre rms²² pour du LiDAR topographique. La vérification de la précision verticale peut être effectuée. Généralement, sur un terrain nu, uni et de pente modérée, une précision verticale supérieure à 0,15 m rms est systématique. Ces chiffres se dégradent en présence d'une végétation rase, de marais littoraux, et de pentes comme c'est le cas pour les rivages à falaise (Huisin and Gomes Pereira, 1998 ; Joinville *et al.*, 2002 ; Populus *et al.*, 2003). Une fois les données traitées, elles sont intégrées dans un SIG.

Les vérifications de terrain pour le levé LiDAR bathymétrique, sont plus complexes à réaliser. L'idéal est de mesurer les données de terrain à l'aide d'un échosondeur mono- ou multifaisceaux. Il est préférable de choisir des emplacements où les sédiments du fond sont nus et facilement accessibles par bateau (échosondeurs).

Avantages

Le LiDAR topo-bathymétrique offre une grande résolution. Il fournit une cartographie 3D (MNT) complète d'une zone étudiée, cartographie continue topographique et bathymétrique du littoral de l'eau à la terre ferme (frange côtière). L'érosion est alors exprimée en termes de volume. Les données LiDAR peuvent couvrir de larges zones très rapidement. Le LiDAR topographique permet de sonder des zones dangereuses et le LiDAR bathymétrique de sonder des zones inaccessibles par voie maritime. D'autres données peuvent également être fournies si le signal brut est traité (sédimentologie, herbiers...)

Inconvénients / limites

Le laser du LiDAR topo-bathymétrique ne peut pas traverser la couverture nuageuse et les nuages. Le réseau de base DGPS au sol pour le calage en absolu des données laser est important (l'avion ne doit pas se situer à plus de 25 km d'une base pour obtenir les précisions annoncées). Les coûts sont importants. Des opérateurs spécialisés sont nécessaires pour l'acquisition, le traitement et l'interprétation des données LiDAR (recours à la sous-traitance dans la plupart des cas).

L'extraction de la bathymétrie se fait par différenciation entre le pic de fréquence correspondant à la « surface de l'eau » et celui correspondant au fond marin. Dans la gamme de profondeur 0 à 1 m, la différenciation des deux pics est très difficile et le LiDAR est souvent aveugle dans les très petits fonds. Cela rend son utilisation peu intéressante sur certaines lagunes par exemple où les zones périphériques parfois importantes n'ont qu'une très faible tranche d'eau.

Dans le cas du LiDAR bathymétrique, les lasers ne pénètrent pas dans les eaux turbides.

Compte-tenu des quantités importantes de données à traiter, les délais d'obtention des résultats (restitution finale) peuvent être de plusieurs mois (jusqu'à 6 mois) en fonction de la surface survolée. Cependant, il est possible de récupérer les premiers jeux de données rapidement.

²² Root mean square : erreur moyenne quadratique (écart type) utilisée pour caractériser la qualité d'un travail ou appareil.

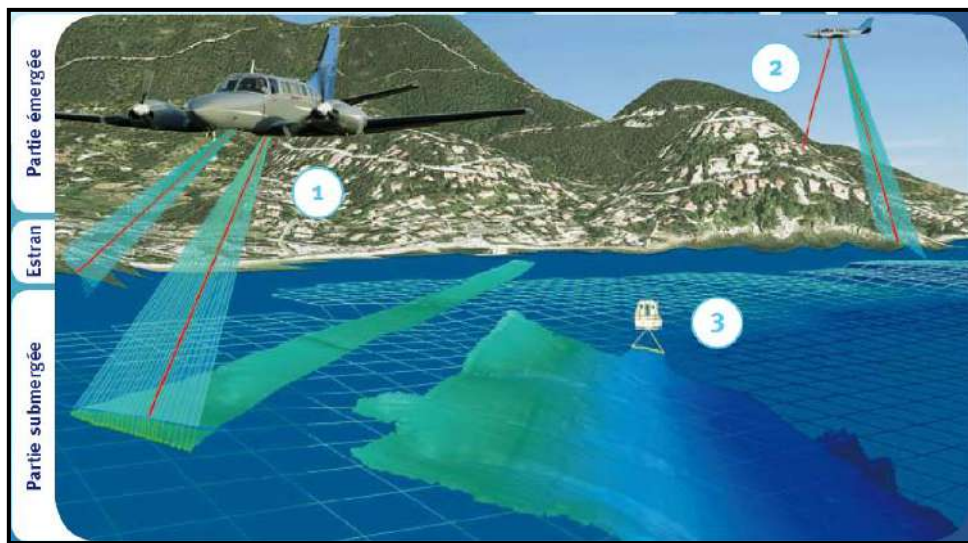


Figure 47 : Moyens de mesures des données (site de l'IGN, c ; programme Litto3D®, 2010) : 1.laser bathymétrique ; 2.laser topographique et 3.sondeur multifaisceaux.

La fiche synthétique ci-dessous (Figure 48) résume les propriétés du LiDAR aéroporté.

LiDAR AEROPORTE			
Utile sur...	Tous types de plage	côtes rocheuses	marais/zones humides
Permet d'obtenir...	Profils	Traits de côte	MNT
Fréquence du suivi	Jours	Mois	Année
Précision/résolution	cm	dm	m
Coût	faible	moyen	fort
Compétence technique Particulière ?	Non	Oui	Oui (spécialiste)
Principaux avantages	résolution, cartographie 3D complète		
Principaux inconvénients	Mauvaise pénétration si couverture végétale et ciel nuageux, coûts, opérateurs spécialisés, en mer : mauvaise pénétration en eaux turbides, zone de déferlement non couverte		
Autres informations...	outil récent		

Figure 48 : Fiche synthétique concernant le LiDAR aéroporté

c) L'imagerie hyperspectrale : l'image CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager)

L'imagerie **hyperspectrale** comprend de nombreuses bandes **spectrales** (environ une centaine) de largeur fine (10 à 20 nm), comparée aux trois larges bandes RVB des capteurs aériens classiques. CASI est un instrument largement utilisé (le leader au niveau de l'acquisition d'images **hyperspectrales** dans le domaine du visible ; Christophe, 2006). Il enregistre une gamme **spectrale** dans les longueurs d'ondes visible et infrarouge (de 430 à 940 nm).

Domaines d'application

Cet outil est applicable pour tous les types de milieux.

Il est bien adapté pour les mangroves ou les récifs coralliens (Figure 49). L'analyse d'images CASI, répétées à intervalles temporels réguliers, pourrait être un outil de premier ordre pour une surveillance de la dégradation ou de la régénération des récifs coralliens (les platiers récifaux sont souvent vastes et difficilement accessibles ; Despinoy et Naim, 1998). Les indicateurs de type botanique et hydrodynamique sont relevés. Il est utilisé notamment pour identifier des limites de végétation et entre le sable mouillé et sec.

Modes d'utilisation

Les levés CASI permettent de relever le trait de côte (limite de végétation et limite sable mouillé/sec) par l'intermédiaire de transects (cf. méthodes de traitement ; lignes de côte analysées dans le SIG).

Fréquence du levé

Les fréquences d'acquisition peuvent être très ponctuelles dans l'espace et dans le temps (quelques images par an, notamment après un événement notable). Cependant, la fréquence se définit au cas par cas, sur des emprises au sol réduites.

Résolution

La résolution spatiale varie du centimètre au mètre (en fonction de l'altitude de l'avion). La résolution **spectrale** est quant à elle, de l'ordre du nanomètre (aux environs de 2 nm dans certains cas).

Coûts

Les coûts sont élevés. Ils le sont d'autant plus que la résolution est élevée.

Méthodes de traitement

Les données brutes récoltées nécessitent d'être prétraitées (géoréférencements, corrections géométriques, radiométriques, distorsions dues aux écarts de sensibilité entre les détecteurs de l'instrument de prise de vue, etc.) afin de produire une image brute traitée qui peut être intégrée, par exemple, dans un SIG. La majeure partie des pré-traitements s'effectue grâce au logiciel fourni par le constructeur. Le suivi du trait de côte, (limite de végétation ou encore la limite sable mouillé/sec) peut se faire par photo-interprétation (chap. 4.2.3.1).

Les pixels contenus à l'intérieur d'une zone sélectionnée peuvent aussi être traités à partir d'un algorithme de détection de contour (filtre de SOBEL ; chap. 4.2.3.2), basé sur une technique de

segmentation, qui permet de séparer les pixels en plusieurs groupes distincts (exemple : un groupe concernant les pixels « secs » côté terre et un groupe concernant les pixels « humides » côté mer). Il est ensuite possible de détecter de façon précise (en fonction du pixel de l'image) la position de l'indicateur pris pour le trait de côte.

Avantages

De larges zones peuvent être couvertes et des informations spectrales détaillées peuvent être fournies (exemple : types de végétation). La résolution radiométrique est assez élevée. Cet outil est plutôt réservé à une cartographie des habitats, des substrats rocheux ou de l'état de santé des récifs coralliens.

Inconvénients

La résolution des pixels étant relativement faible, il est inutile d'effectuer des levés avec une fréquence trop grande. Cet outil nécessite des compétences importantes pour le traitement et l'interprétation des données. Les coûts sont assez élevés (les données sont donc limitées à l'échelle temporelle et spatiale).

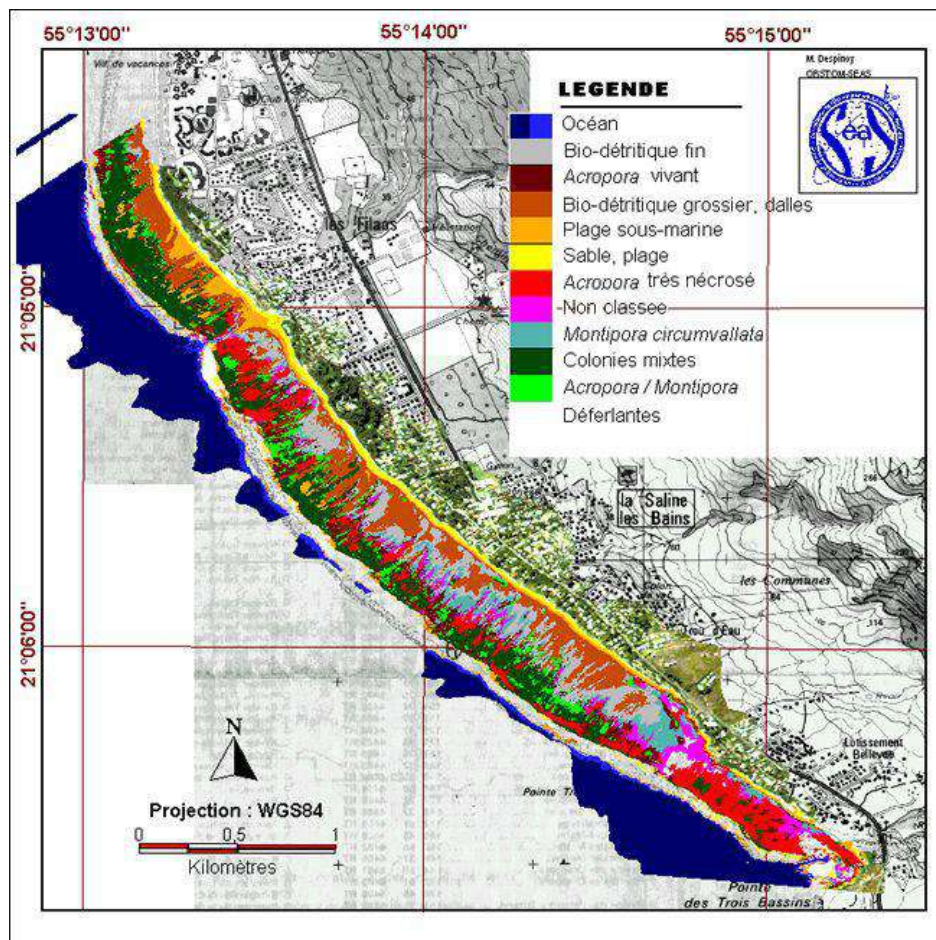


Figure 49 : Exemple de classification par l'imagerie hyperspectrale aéroportée en milieu corallien. Les limites entre sable humide et sec et la végétation de haut de plage sont clairement identifiables (Despinoy et Naim, 1998)

La fiche synthétique ci-dessous (Figure 50) résume les propriétés de l'imagerie hyperspectrale (CASI).

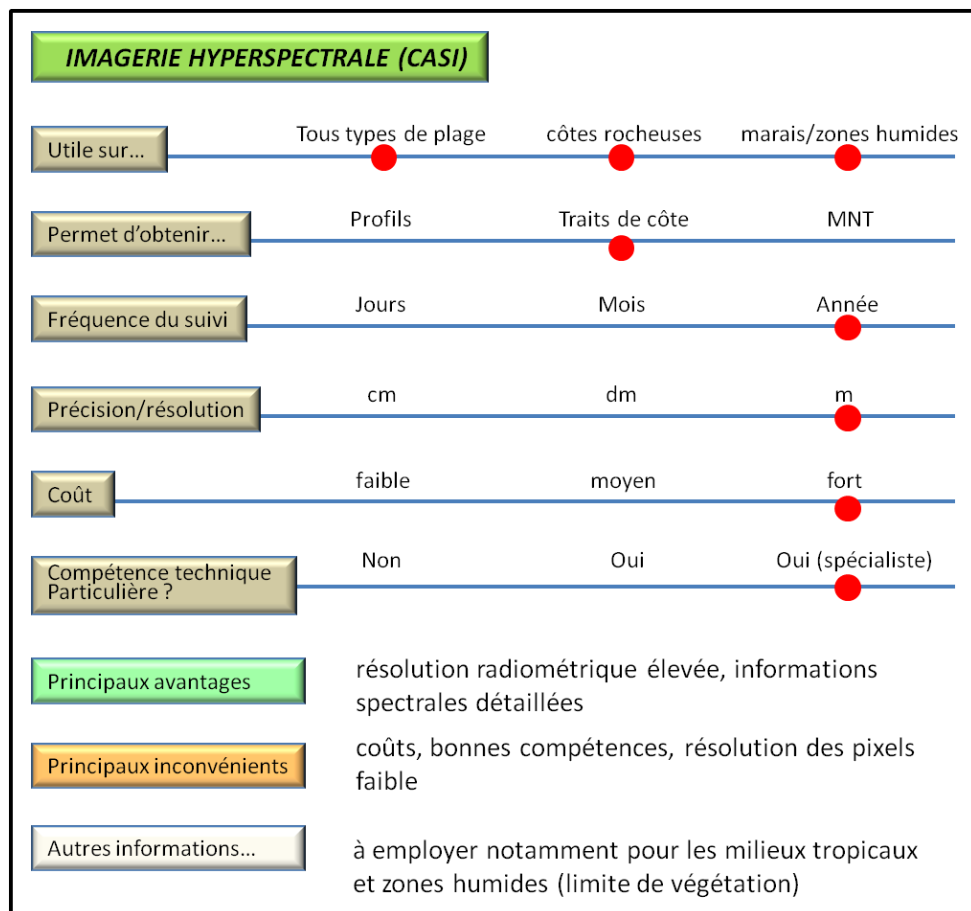


Figure 50 : Fiche synthétique concernant l'imagerie hyperspectrale (CASI)

4.2.2. La télédétection spatiale

Ce chapitre s'inspire en grande partie, du site Astrium (2012) et d'une communication écrite de Lafon V. (2011).

a) L'imagerie satellitaire multispectrale, exemples de SPOT 5 et de FORMOSAT-2

L'imagerie **multispectrale** (ou multibandes) est obtenue par un capteur qui opère dans plusieurs bandes **spectrales**.

SPOT-5 est un satellite à défilement d'orbite quasi-polaire. Il acquiert donc des images suivant une trace légèrement inclinée par rapport à l'axe terrestre. Les images SPOT sont précises et globales. L'emprise de chaque scène est de 60 x 60 km. Les archives possèdent plus de 20 millions d'images et couvrent de nombreuses fois la quasi-totalité du globe terrestre. L'imagerie très haute résolution SPOT-5 dispose de quatre bandes **spectrales** : XS1, XS2, XS3 et XS4 ou SWIR (Short-Wave InfraRed). Les images sont traitées et mises à disposition dans des délais très courts (max. 3 jours ouvrés après l'acquisition) (Figure 51 ; d'après le site Astrium, b).

Le satellite FORMOSAT-2 est un satellite d'observation terrestre à haute résolution doté d'une revisite quotidienne, donc particulièrement adapté à la détection de changements (Figure 52). FORMOSAT-2 décrit une orbite quasi-polaire unique, les images ne couvrent donc pas l'ensemble de la surface terrestre. L'emprise de chaque scène est de 24 x 24 km. Les paramètres de prise de vue sont constants et connus à l'avance, ce qui permet d'apporter une garantie quant au nombre d'images acquises et à leur superposabilité.

Les deux satellites disposent de 4 bandes (bleu, vert, rouge et proche infrarouge). La bande bleue (associée aux bandes verte et rouge) permet de réaliser sans traitement important des compositions en couleurs naturelles. Elle peut également donner des informations sur la limite de végétation ou encore sur la limite eau-plage, etc. (d'après le site Astrium, a).

Domaines d'application

Les données SPOT et FORMOSAT-2 sont adaptées à l'étude de tous les types de milieux hormis la côte rocheuse. Cependant, compte-tenu de la précision et de la fréquence d'acquisition, ces méthodes sont particulièrement adaptées aux sites ayant subis des évolutions supérieures au mètre entre deux acquisitions. Elles sont couramment utilisées pour les zones humides (les mangroves ou les bancs de vase, les marais maritimes) et elles peuvent être exploitées pour extraire des indicateurs morphologiques en domaine terrestre (rupture de pente topographique, pied de falaise, pied de dune, etc.), mais également dans les petits fonds marins.

Les données optiques sont utilisées pour extraire la morphologie sous-marine par inversion de la réflectance de l'eau (optique marine valable pour les eaux peu turbide).

Les **indicateurs** de type botanique et hydrodynamique (limites de végétation, ligne d'eau instantanée, etc.) peuvent être relevés.

Modes d'utilisation

Les images spatiales permettent de suivre la mobilité du trait de côte, limite plage/dune, couvert végétal, occupation des sols. Elles peuvent draper un MNT.

Fréquence du levé

Les satellites SPOT-5 et FORMOSAT-2 permettent d'enregistrer quelques images par an (observation sur programmation²³). La constellation des satellites SPOT et la répétitivité des prises de vues permettent d'acquérir chaque jour une image de n'importe quel point du globe (revisite quotidienne).

Résolution et précision

Les images SPOT offrent une vaste couverture spatiale (60 x 60 km) et une gamme complète de résolution allant de 20 m (SPOT-1 à -4) jusqu'à 2,5 m de résolution (SPOT-5) pour des travaux à l'échelle régionale ou locale (du 1:100 000 au 1:10 000). L'imagerie FORMOSAT-2 a

²³ Exemple : 4/an au minimum à Arcachon qui bénéficie d'un programme de recherche spécifique, Kalideos (site web : <http://kalideos.cnes.fr/spip.php?article11>).

une couverture spatiale de 24 x 24 km et a une résolution de 8 m en mode normal et 2 m en fusionné²⁴.

La précision du positionnement du trait de côte est limitée par plusieurs facteurs : la taille du pixel sur l'image ainsi que la précision liée au géoréférencement des images. Ces incertitudes se rajoutent aussi à celles provenant de la méthode par photo-interprétation (cf. méthodes de traitement).

Coûts

Ce sont des solutions peu onéreuses dans le cas où elles permettent de couvrir de grandes zones géographiques ou spécifiques. Les images standard pour l'imagerie SPOT sont estimées à partir de 0.3 € à 2.25 €/ km² pour des scènes **multispectrales** de 60 km de côté soit 3 600 km². Concernant les données FORMOSAT, les coûts peuvent être compris entre 3,25 et 6 € /km² pour des images couvrant des surfaces de 576 km² (24 x 24 km).

Méthodes de traitement

Les données brutes récoltées des satellites SPOT-5 ou FORMOSAT-2 sont prétraitées (corrections géométriques, radiométriques, distorsions dues aux écarts de sensibilité entre les détecteurs de l'instrument de prise de vue, etc.) afin de produire une image brute traitée qu'il est possible d'intégrer, par exemple, dans un SIG. Le suivi du trait de côte peut ainsi se faire par photo-interprétation²⁵ (chap. 4.2.3.1) ou traitement des scènes FORMOSAT-2 à l'aide de l'algorithme de Sobel (chap. 4.2.3.2).

Les images optiques ont été utilisées notamment pour extraire le trait de côte en Guyane (données SPOT) et le long du **littoral** aquitain (FORMOSAT-2). Sur la base de ces travaux, une approche semi-automatisée à automatisée du tracé du trait de côte est en cours d'élaboration dans le cadre du programme INFOLITTORAL-1 (annexe 1).

Avantages

Les données ont une grande emprise spatiale, la restitution des contours est homogène à l'échelle de plusieurs dizaines de kilomètres. Les images (format geotiff) sont directement intégrables dans les systèmes de traitement d'images²⁶, d'information géographique (SIG). Les parties terrestre et marine (dans le cas où l'eau est peu turbide) peuvent être exploitées. Ces images sont des solutions efficaces et peu onéreuses. Les données FORMOSAT-2 sont parfaitement adaptées aux applications de détection des changements et à la couverture rapide de zones étendues. Le capteur infrarouge est utile pour la détection de la végétation (indicateur botanique).

Inconvénients

Il est nécessaire de réaliser un géoréférencement (les images doivent être « projetées » sur un MNT, même approximatif, pour être corrigées géométriquement) notamment dans les zones de relief accidenté. Les **indicateurs** du trait de côte ne peuvent pas être détectés dans les zones

²⁴ Fusion des images (traitement) afin d'obtenir une meilleure résolution spatiale tout en préservant l'information spectrale.

²⁵ En Guyane, une approche par segmentation des faciès et/ou photo-interprétation est retenue (Prost, 2007, Walcker *et al.*, 2011) et fait, en partie, l'objet des travaux de thèse de Romain Walcker (EcoLab / CEREGE).

²⁶ Exemple le logiciel ENVI (© ITT)

d'ombre (exemple en pied de falaise). La résolution est fine mais difficilement exploitable : les quatre bandes spectrales disponibles ne permettent pas de détecter toutes les limites géomorphologiques du littoral (ex. : limite entre deux zones couvertes de végétation, sommet de falaise, pied de falaise sur un platier rocheux de couleur proche, etc. ; Lafon et Aubié, 2008). Aussi, la résolution est insuffisante pour les évolutions du trait de côte faibles. Un couvert nuageux important peut rendre difficile voire impossible l'exploitation de l'image ou d'une partie de l'image.



Figure 51 : Image SPOT-5, résolution 2,5 m - Fécamp, France (©CNES/ Spot Image 2005)



Figure 52 : Image FORMOSAT-2, résolution 2 m, couleurs - Baie d'Algeciras- Espagne (© NSPO/ Distribution Spot Image 2006)

La fiche synthétique ci-dessous (Figure 53) résume les propriétés de l'imagerie satellitale multispectrale (l'exemple de SPOT-5 et FORMOSAT-2).

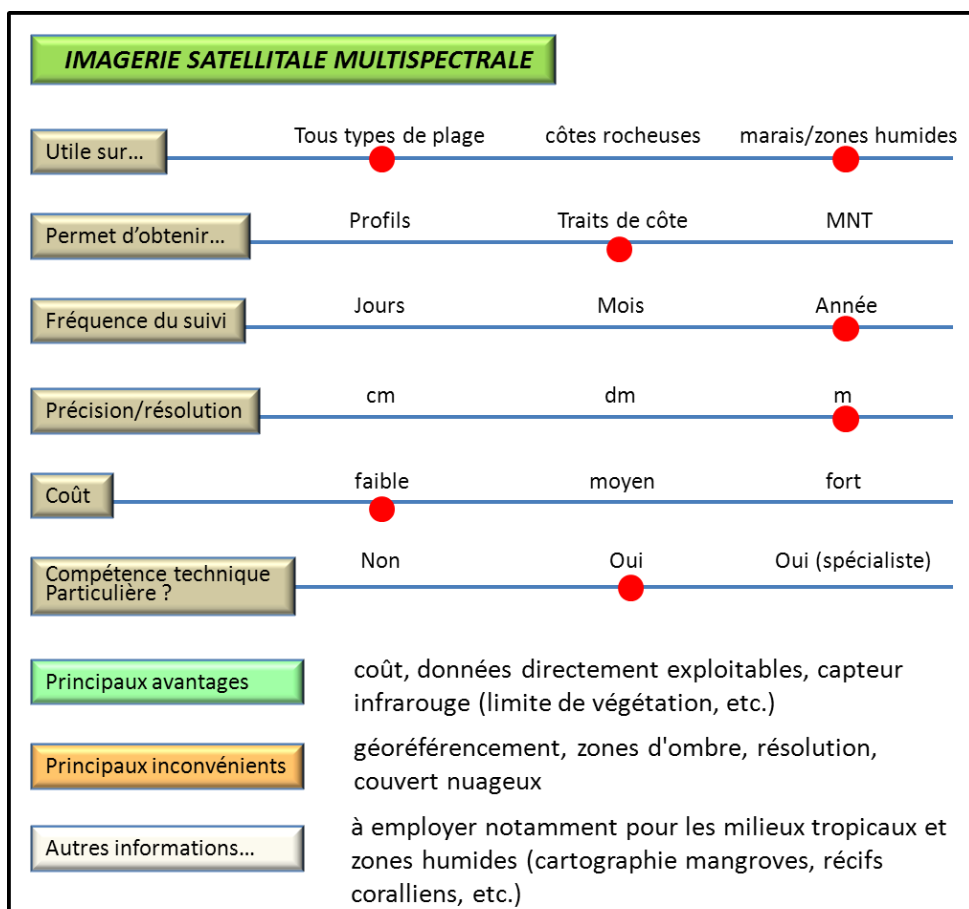


Figure 53 : Fiche synthétique concernant l'imagerie satellitale multispectrale (l'exemple de SPOT-5 et de FORMOSAT-2)

b) L'imagerie Pléiades

(D'après le site Astrium, c)

Pléiades est un satellite à défilement d'orbite quasi-polaire. Il offre une imagerie de très haute résolution dotée d'une revisite quotidienne (en tout point du globe). De même que l'imagerie FORMOSAT-2, le satellite dispose de 4 bandes spectrales (bleu, vert, rouge et proche infrarouge), il est donc à la fois adapté pour la cartographie d'**indicateurs** du trait de côte au-dessus du niveau marin et en dessous si les eaux sont claires. Le premier capteur a été lancé fin 2011.

Domaines d'application

Les données Pléiades sont adaptées à l'étude de tous les milieux littoraux. Les **indicateurs** de type botanique et hydrodynamique (limites de végétation, laisse de mer, etc.) peuvent être relevés.

Modes d'utilisation

Ces images permettent de suivre l'évolution du trait de côte par l'intermédiaire de transects (lignes de côte analysées dans le SIG). Elles permettent également, de produire des MNT.

Fréquence du levé

Plusieurs images par an peuvent être acquises sur programmation.

Résolution

Elle offre une excellente résolution spatiale pouvant aller jusqu'à 50 cm (niveau de détail très fin) pour des emprises comprises entre 20 et 100 km (Figure 54).

Coûts

Les données pléiades sont accessibles à tous gratuitement. Pour le domaine public, le fournisseur est l'IGN alors que pour le privé, il s'agit d'Astrium.

Méthodes de traitement

Les données brutes récoltées du satellite Pléiades sont prétraitées (corrections géométriques, radiométriques, distorsions dues aux écarts de sensibilité entre les détecteurs de l'instrument de prise de vue, etc.) afin de produire une image brute traitée qu'il est possible d'intégrer par exemple, dans un SIG. Le suivi du trait de côte peut se faire par photo-interprétation (chap. 4.2.3.1).

Étant donné que le capteur est récent, il n'y a pas encore de retour d'expérience (traitement des pixels de l'image, etc.).

Avantages

L'imagerie Pléiades fournit des produits en couleur d'excellente résolution spatiale avec un niveau de détail extrêmement fin (excellente qualité de l'image). Elle présente une capacité de revisite quotidienne en tout point du globe, elle est donc parfaitement adaptée à la détection de changements. Le portail Pléiades offre un accès facile à la base de données d'archive et au système d'acquisition. Elle possède une grande capacité d'acquisition (petites cibles rapprochées, larges zones jusqu'à 10 000 km², stéréo, tri stéréo ou suivi linéaire tel qu'un trait de côte, etc.). Ainsi, des restitutions 3D peuvent être réalisées. Les données pléiades sont accessibles à tous gratuitement.

Inconvénients

Les inconvénients principaux relevés pour les données SPOT et FORMOSAT restent valables pour l'imagerie Pléiades (ombre, précision du calage géométrique). Toutefois, la résolution spatiale doit permettre de détecter des objets et changements plus fins. Ces images seront expertisées lors de la recette en vol. Il sera alors possible de préciser si la qualité radiométrique des données jointe à la plus haute résolution permet de distinguer des objets indiscernables avec les données SPOT ou FORMOSAT. La couverture nuageuse pose les mêmes problèmes que ceux rencontrés par SPOT et FORMOSAT.



Figure 54 : Image Pléiades, le Mont Saint-Michel, France (© CNES 2012)

La fiche synthétique ci-dessous (Figure 55) résume les propriétés de l'imagerie Pléiades.

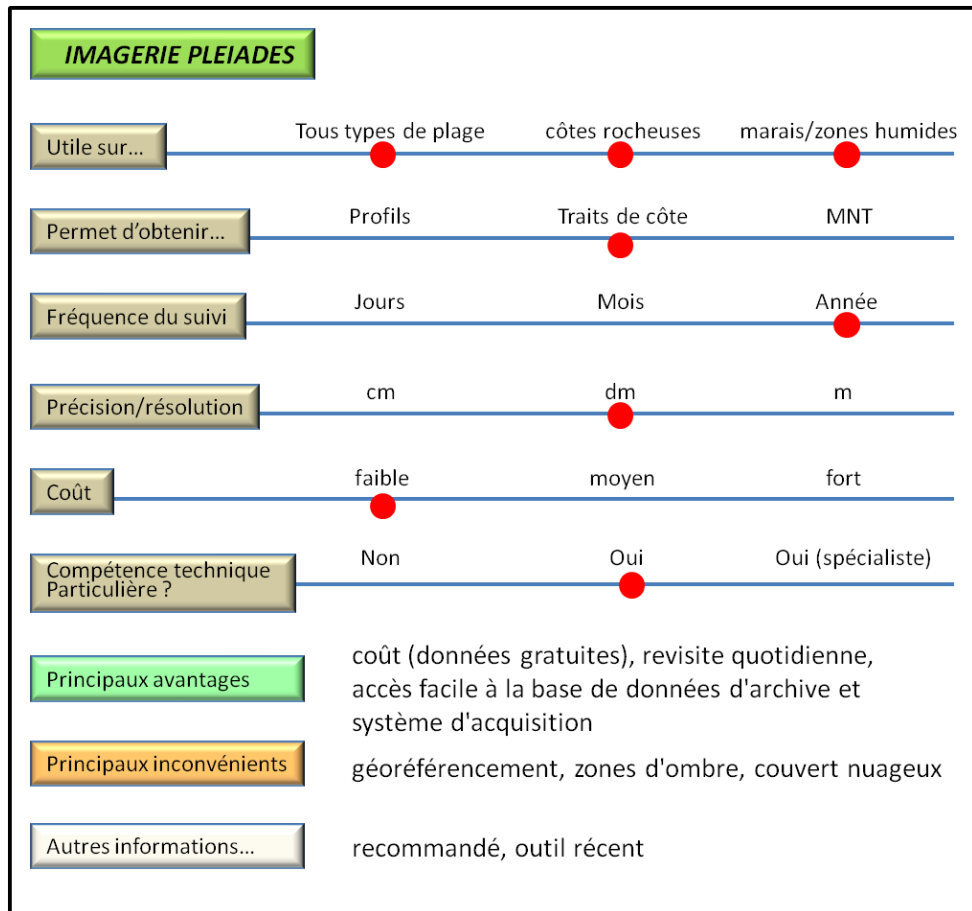


Figure 55 : Fiche synthétique concernant l'imagerie Pléiades

c) L'imagerie radar SAR (Synthetic Aperture Radar), exemple de TerraSAR-X

(D'après le site Astrium, d)

TerraSAR-X est un satellite à défilement d'orbite quasi-polaire. Il fournit des images SAR de résolution métrique, indépendamment des conditions météorologiques et lumineuses. C'est pourquoi, ce satellite de conception très récente enrichit continuellement une archive qui contient déjà plus de 100 000 scènes couvrant la quasi-totalité de la surface de la Terre au moins une fois. La technique de mesure, contrairement aux capteurs optiques est basée sur un instrument actif²⁷. Une onde radar est émise par le satellite, le signal rétrodiffusé par le sol ou la canopée vers l'antenne radar est traité afin de construire le long de la trace du satellite, une image du coefficient de rétrodiffusion²⁸ des cibles au sol. Cette dernière dépend en grande

²⁷ Les objets étudiés sont « éclairés » avant d'enregistrer l'énergie naturelle qu'ils émettent ou réfléchissent vers le détecteur.

²⁸ Paramètre mesurable sur une image radar. Il peut être relié à des paramètres tels que l'humidité, la rugosité du sol ou encore la végétation.

partie de la rugosité²⁹ centimétrique 3D de la surface cible (surface en eau ou sol émergé) et de son humidité.

Domaines d'application

Les données SAR sont exploitables sur tous les milieux. En milieu tropical, l'imagerie radar peut s'affranchir sous certaines conditions du couvert végétal de la **mangrove** et déterminer le contact terre-mer (Figure 56). Des **indicateurs** de type hydrodynamique (limite sable mouillé/sec par exemple) peuvent être relevés.

Modes d'utilisation

Ces images permettent de suivre l'évolution des **indicateurs** du trait de côte. Elles permettent également, d'effectuer des cartes topographiques, ainsi que de produire des MNT et MNS (modèles numériques de surface). L'imagerie radar a la capacité d'opérer de la zone émergée à la zone immergée (à faible profondeur).

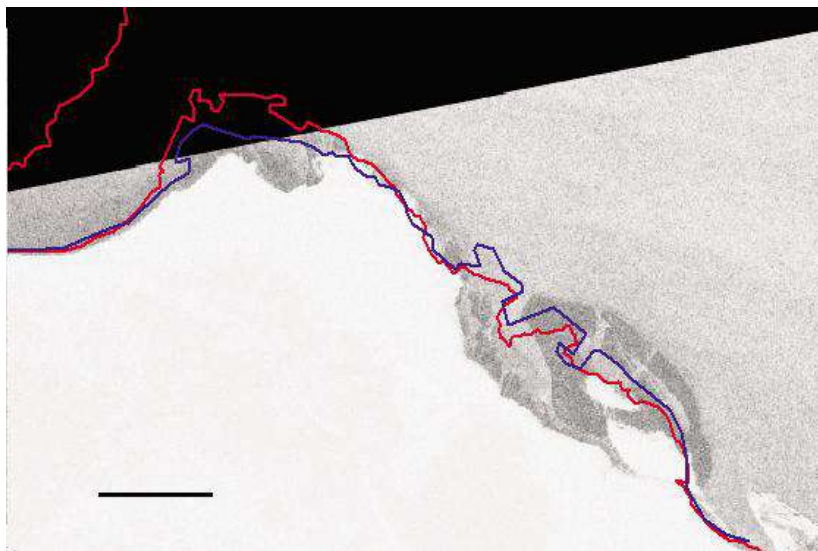


Figure 56 : Evolution du trait de côte (contact terre-mer) en Guyane par imagerie radar (Baghdadi et al., 2004)

Fréquence du levé

Le temps de revisite d'un même site est estimé à 2,5 jours au maximum.

Résolutions et précisions

En fonction des produits, la résolution des données, ainsi que l'emprise des images produite, est variable. Quatre gammes de résolution sont accessibles : 1, 2, 3 m et 18.5 m.

²⁹ Paramètre important du sol permettant de comprendre le mécanisme de l'érosion et du transport sédimentaire.

Coûts

Les prix des produits TerraSAR sont compris entre 0,2 €/km² pour les plus faibles résolutions et une couverture spatiale de 100 x 150 km et 135 €/km² pour à 1 m de résolution pour 150 km². Les tarifs pour les données d'archives sont deux fois moindres.

Méthodes de traitement

Les données SAR nécessitent des traitements bien spécifiques et nécessitent d'être intégrées dans un SIG.

Pour plus d'informations sur les données SAR (pour la détection du trait de côte), des documents sont disponibles :

- utilisation des images simple bande : méthode de segmentation multi- temporelle (Fleming, 2005) ;
- les images ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) en bande C : acquisition en polarisation croisée (ex. HH-HV) (Baghdadi *et al.*, 2007) ;
- le potentiel des données TerraSAR-X (1 m de résolution) (Gurreonero Robinson *et al.*, 2011).

L'interface détectée peut être, à l'instar des images elles-mêmes, géoréférencée bien que le géoréférencement des données SAR peut s'avérer complexe. Les conditions météorologiques (vent / vagues) peuvent compromettre ou compliquer l'exploitation des données (Lafon, 2011 ; communication écrite).

Avantages

Les capteurs radar acquièrent des images avec ou sans couvert nuageux, de nuit comme de jour, ce qui augmente considérablement la possibilité de couverture des littoraux à l'échelle mondiale en particulier dans les zones équatoriales. De plus, le délai entre deux prises de vue peut être réduit à un faible nombre de jours. Enfin, la tarification est attractive.

Inconvénients

Le traitement des données SAR recourt à des méthodes complexes et lourdes à mettre en œuvre par des centres spécialisés. La photo-interprétation est délicate.

La fiche synthétique ci-dessous (Figure 57) résume les propriétés de l'imagerie radar SAR.

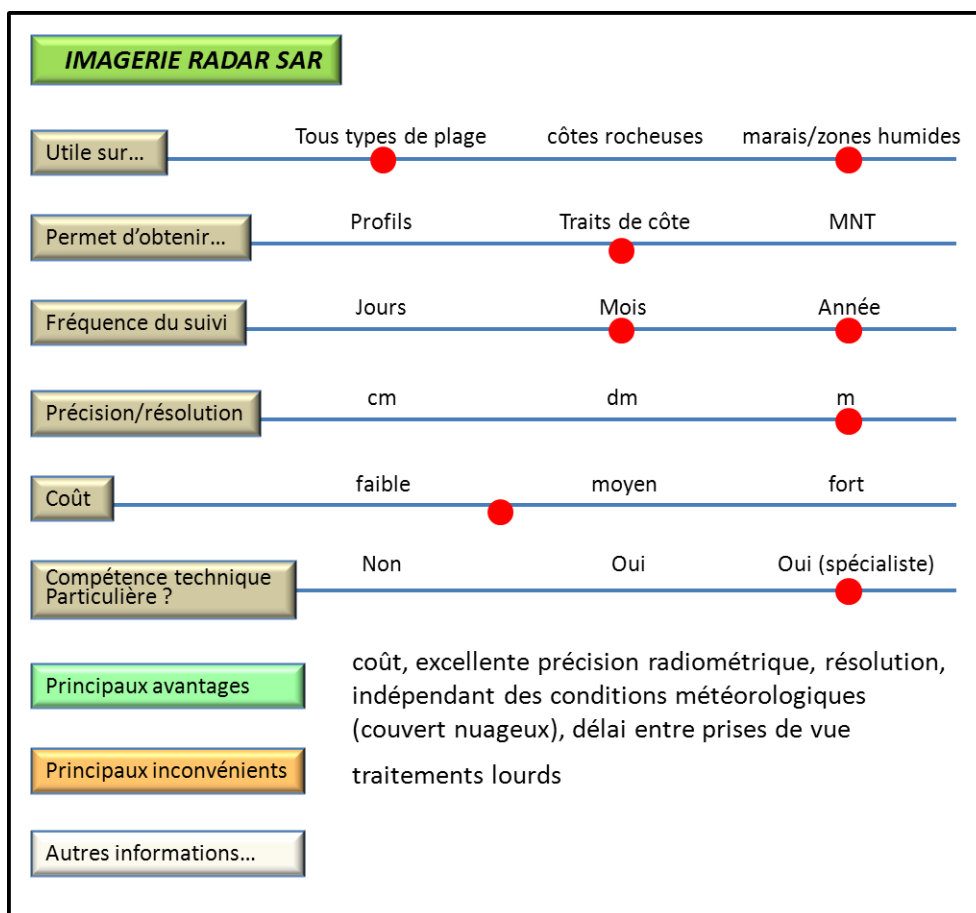


Figure 57 : Fiche synthétique concernant l'imagerie radar SAR

Recommandations

La télédétection apparaît comme une approche complémentaire pour un suivi à long terme de grandes surfaces mais avec une résolution moindre et une marge d'erreur plus importante que pour les méthodes classiques (DGPS). Elle reste toutefois pertinente lorsque les évolutions sont importantes. La télédétection aérienne (photographie aérienne) et spatiale (imagerie satellite) est un outil efficace pour observer une zone d'étude (applicables sur tous types de milieux). Des traitements sont alors nécessaires pour mesurer des indicateurs du trait de côte de façon plus ou moins rapide et précise en fonction du support. Les images SPOT-5, FORMOSAT-2 et Pléiades offrent un grand nombre de perspectives en matière de suivi à court terme de l'évolution du trait de côte (Le Berre *et al.*, 2008).

Ces méthodes peu onéreuses voire gratuites (avec le lancement fin 2011 de Pléiades) possèdent une grande emprise spatiale et une très bonne résolution. Ainsi, elles offrent des perspectives intéressantes. La détection des surfaces boisées de mangrove dans l'optique (SPOT, FORMOSAT, Pléiades) et le radar est bien maîtrisée et évolue en résolution avec l'amélioration des capteurs.

4.2.3. Comment extraire le trait de côte ?

Il existe différentes méthodes d'analyses d'images qui s'appuient notamment sur des outils statistiques : le recuit simulé, le réseau de neurones, etc.

Deux méthodes sont expliquées ici : la photo-interprétation et le filtre de SOBEL.

a) La photo-interprétation de photographies aériennes verticales orthorectifiées ou non

La photo-interprétation³⁰ permet d'extraire le trait de côte à partir de photographies aériennes verticales et d'images satellites.

Cette méthode peut s'effectuer soit sous SIG (classiquement, les logiciels utilisés sont MapInfo®, ArcView® ou encore QGIS®), soit par un opérateur qui détecte visuellement le trait de côte (à l'écran ou sur une photo éditée sur un support papier). Dans les deux cas, il s'agit de relever l'indicateur de trait de côte choisi au préalable, d'une photographie aérienne ou satellite et de le reporter sur un calque³¹. Cette étape est à renouveler pour toutes les photographies d'années différentes d'une même zone. Il advient ensuite, de placer toutes ces limites (indicateurs de trait de côte) sur une même carte géoréférencée du secteur étudié, afin de commencer l'analyse de l'évolution.

Dans les logiciels classiquement utilisés (MapInfo®, ArcView®), il existe des outils permettant de calculer l'écart entre deux limites sélectionnées (avancée ou recul).

Il est préconisé d'accompagner les études de photo-interprétation par des campagnes de terrain et par des recommandations d'experts (vérifier les points de calage, les limites, etc.).

La photo-interprétation permet de lever de nombreux indicateurs de milieux différents.

À titre d'exemple, la limite de front de mangrove (contact entre la mangrove et la mer – Figure 58) peut être suivie aisément sur une photographie aérienne verticale, à la différence de la limite d'arrière mangrove qui n'est pas toujours visible, en particulier lorsqu'il n'y a pas ou peu de rupture entre la canopée de la mangrove et celle de la forêt sèche adjacente.

³⁰ Les logiciels de traitement d'image sont multiples et peuvent être couplés au SIG. Le plus utilisé étant le logiciel ENVI®.

³¹ En informatique, un calque virtuel est plus connu sous le nom de « couche ».

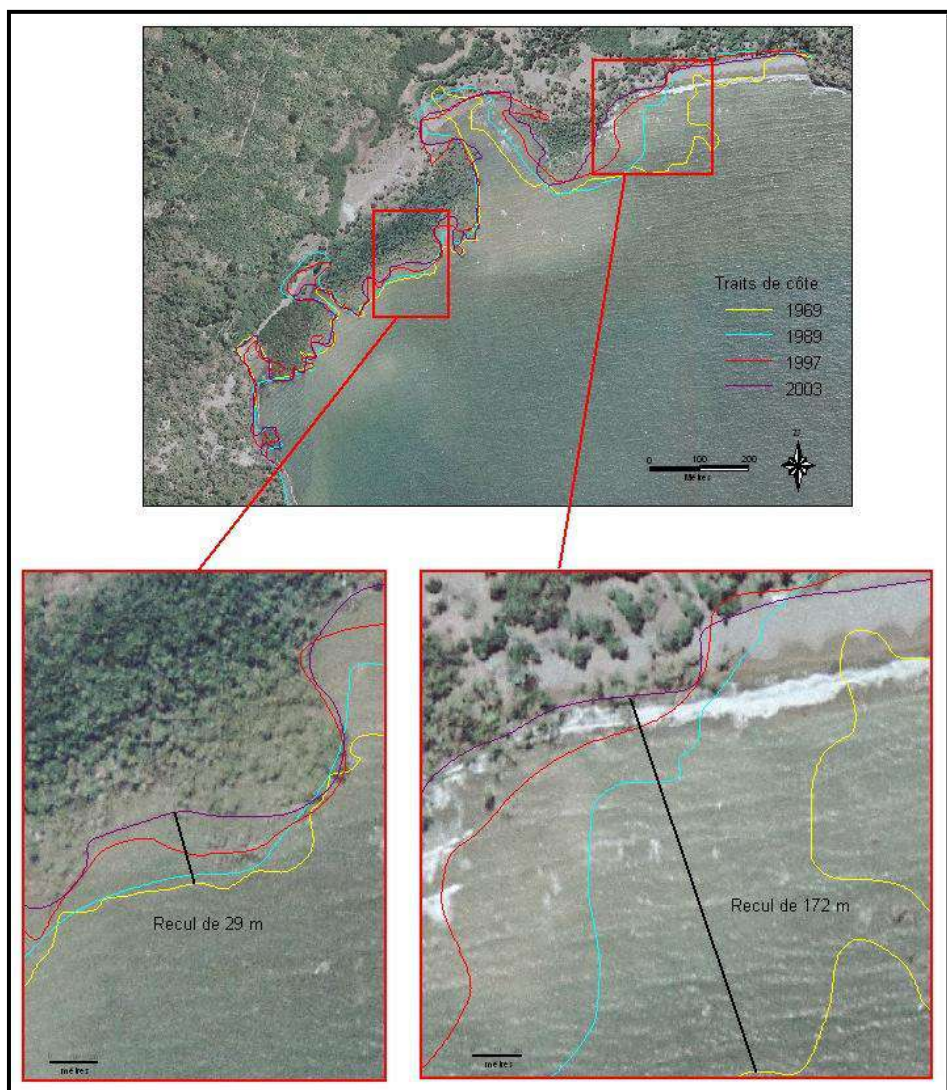


Figure 58 : Limite du front de mangrove pour le suivi du trait de côte à Mayotte à partir de photographie aérienne (De la Torre et al., 2006)

b) Le filtre de SOBEL

Le filtre de SOBEL est un outil utilisé en traitement d'image basé sur une technique de segmentation, qui permet de séparer les pixels en deux groupes distincts (calcul du gradient de l'intensité de chaque pixel).

Les pixels contenus à l'intérieur d'une zone choisie (d'une image), sont traités à partir de l'algorithme de détection de contour. Le principe est de repérer les points d'une photographie numérique qui correspondent à un changement brutal de l'intensité lumineuse (discontinuités dans la profondeur, dans l'orientation d'une surface, dans les propriétés d'un matériau, etc.). La détection de contour permet de supprimer de manière significative les informations les moins pertinentes, tout en préservant les propriétés importantes de l'image.

Prenons pour exemple la Figure 59 : un groupe concernant les pixels « secs » côté terre et un groupe concernant les pixels « humides » côté mer sont ainsi différenciés.

Il est ensuite possible de détecter de façon précise (en fonction du pixel de l'image) la position du trait de côte. Les coordonnées 2D (u, v en pixels) du trait de côte sur l'image initiale sont ensuite transformées en coordonnées 3D (x, y et z) (Rihouey *et al.*, 2007).

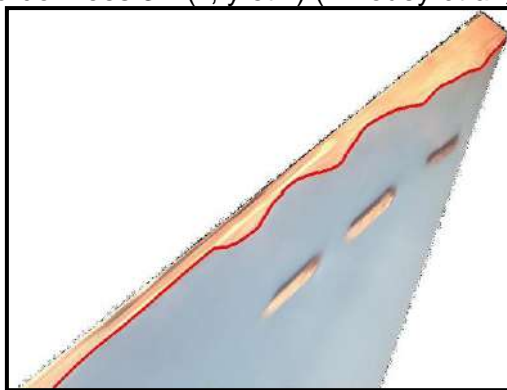


Figure 59 : Suivi du trait de côte : application du filtre SOBEL (Morichon *et al.*, 2008)

L'extraction du trait de côte à partir de la télédétection permet d'envisager dans les années à venir une mise à jour régulière du linéaire côtier à l'échelle régionale voire nationale.

4.3. AUTRES TYPES DE LEVÉS : LES LEVÉS EN MER

Les outils de mesure utilisant les principes acoustiques sont à ce jour, les seules techniques utilisables pour la mesure et cartographie des fonds marins sans limitation liée à la profondeur.

Afin d'évaluer le budget sédimentaire et de suivre l'évolution des barres d'avant-côte, il est important de prolonger les profils topographiques de plage par des levés bathymétriques (MEEDDM, 2010). Cependant, les conditions de houles et de courants de marée peuvent rendre les opérations embarquées plus périlleuses et difficiles à mettre en œuvre.

Les méthodes de levé en mer n'ont pas pour objectif le suivi du trait de côte, mais des systèmes côtiers qui bordent le trait de côte. Ces méthodes sont présentées dans le présent guide et doivent être considérées comme complémentaires aux méthodes présentées précédemment.

Les suivis de la frange côtière visant à analyser l'évolution du « trait de côte », s'effectuent en mer depuis l'estran jusqu'aux profondeurs de mobilisation des sédiments (en conditions normales ou de tempêtes). Les méthodes de suivis consistent à la base en des mesures de la bathymétrie (échousonneur multi- et monofaisceau), de la nature et de l'épaisseur des sédiments (échousonneur sismique réflexion), de la couverture superficielle (sonar à balayage latéral), de la flore éventuelle (ex. posidonies, herbiers marins, etc.).

4.3.1. L'échousonneur monofaisceau et multifaisceaux

(D'après sites de l'Ifremer³²)

Ces systèmes mesurent la profondeur avec des instruments placés sous la surface de l'eau : les sondeurs utilisent les ondes acoustiques et la profondeur est déduite du temps de trajet de

³² Voir références bibliographiques internet.

l'onde acoustique émise et réfléchiée par le fond. Ils sont embarqués à bord de bateaux, zodiac ou jet-ski, par exemple (Figure 60). Ces systèmes permettent de compléter l'information bathymétrique sur des zones où le LiDAR bathymétrique n'a pas déterminé la profondeur (turbidité, zone de déferlement).

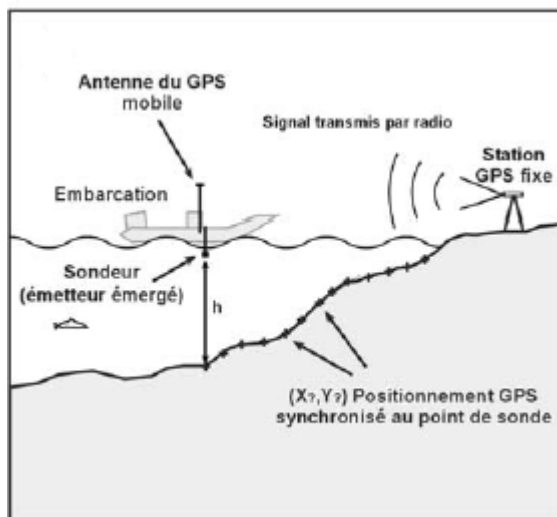


Figure 60 : Principe d'acquisition du profil sous-marin par sondeur bathymétrique monofaisceau (Stepanian et al., 2010)

Le sondeur acoustique monofaisceau détermine la profondeur en émettant une impulsion sonore au travers d'un faisceau dirigé selon la verticale du navire, en mesurant le temps nécessaire au signal à parcourir le trajet aller-retour navire-fond, et en calculant la profondeur.

La plupart des sondeurs multifaisceaux fonctionnent selon la technique dite des faisceaux croisés. Une impulsion sonore est émise au travers d'un lobe d'émission étroit dans la direction longitudinale et large transversalement. La réception se fait à l'aide de faisceaux étroits dans le plan transversal. Pour chaque faisceau de réception, la zone du fond explorée est l'intersection entre le lobe d'émission et le faisceau de réception. Le système multifaisceaux acoustique permet d'obtenir de manière précise et rapide des relevés topographiques du relief sous-marin (bathymétrie).

Ces deux outils de levé permettent d'appréhender les processus d'**érosion** de l'avant-côte ou des chenaux, pouvant déstabiliser les plages à long terme. Ils permettent d'analyser les volumes de sédiments échangés entre l'avant-côte et la plage.

Domaines d'application

Les sondeurs bathymétriques doivent être utilisés dans les zones immergées des plages (zone subtidale).

Ils sont vivement conseillés sur les côtes à régime microtidal, afin d'évaluer le budget sédimentaire et de suivre l'évolution des barres d'avant-côte. Ces outils sont également conseillés dans les chenaux ou platiers à marée haute. Des indicateurs de type géomorphologique (talus de collision par exemple) peuvent être relevés.

Modes d'utilisation

Ces techniques permettent de produire des MNT ou des profils (relevés topographiques du relief sous-marin).

Fréquence du levé

La fréquence d'acquisition est annuelle ou pluriannuelle (recommandé 2 fois/an en complément du DGPS par exemple) voire occasionnelle (souvent après un événement important ou avant et après une opération de dragage ou de rechargement).

Résolution et précision

Le système multifaisceaux possède une très bonne résolution spatiale (x, y), de l'ordre du mètre (décimétrique à métrique). La précision verticale quant à elle, dépend de la précision des mesures d'angles et de distance, du système de positionnement, de la centrale d'attitude, de la mesure de marée, du rattachement à un référentiel altimétrique, de l'agitation (vagues) etc..

La précision peut aller jusqu'à 10 cm en z et elle est de l'ordre du mètre en x,y.

Le système monofaisceau possède une résolution planimétrique de l'ordre de 0,5 à 5 mètres. La précision altimétrique quant à elle est de l'ordre de 0,1 à 0,2 mètres.

Coûts

Le coût d'un levé avec un système de sondeur multifaisceaux est plus important qu'avec un système de sondeur monofaisceaux et peut s'élever à environ 10 euros l'hectare soit 1000 €/km² (voire jusqu'à 4000 €/km²). D'une manière générale, les coûts sont très variables en fonction des équipements, de la précision requise et des conditions de sites (forte influence des conditions météorologiques).

Méthodes de traitement

Le traitement des données de bathymétrie comprend le contrôle (calibration *in-situ*, calage, etc.), la validation et le traitement des données brutes³³. Ces dernières peuvent être dégradées, soit par la présence de sondes aberrantes, soit par des bruits de mesure (paramètres d'environnement : mouvements et position du navire, mesure de la célérité du son dans l'eau..). Les traitements permettent de produire un MNT ou des profils. Ce dernier dépend de la qualité des données brutes, des opérations d'élimination d'erreurs appliquées à celles-ci, ainsi qu'au choix du pas³⁴ de grille qui permet d'adapter le modèle à l'espacement des sondes et à l'échelle de la carte. Des opérations sont appliquées au MNT afin d'éliminer certains artefacts liés aux données brutes. D'autres traitements spécifiques existent, notamment le traitement des données de réflectivité, nécessaire pour obtenir une mosaïque d'images acoustiques de bonne qualité. Les modèles de bathymétrie s'intègrent naturellement aux outils SIG développés pour la gestion et l'analyse des données géophysiques (d'après le site Ifremer, e).

³³ A titre d'exemple, depuis 1997, le logiciel Caraïbes (CARtographie Appliquée à l'Imagerie et la Bathymétrie des Sonars et sondeurs multifaisceau) a été développé par Ifremer, en réponse aux importantes évolutions de méthodes et fonctionnalités de traitement, et aux nouveautés informatiques.

³⁴ En mètre, kilomètre, etc.

Avantages

La méthode par sondeur monofaisceau ne nécessite pas beaucoup de traitement. Le sondeur multifaisceaux possède l'avantage par rapport au sondeur monofaisceau d'explorer le fond sur une large bande (de l'ordre de 5 à 7 fois la profondeur), avec une très grande résolution.

Inconvénients

La mise en œuvre ainsi que le traitement des données du sondeur multifaisceaux, sont lourds. Les coûts peuvent aussi être élevés.

La fiche synthétique ci-dessous (Figure 61) résume les propriétés des échosondeurs mono- et multifaisceaux.

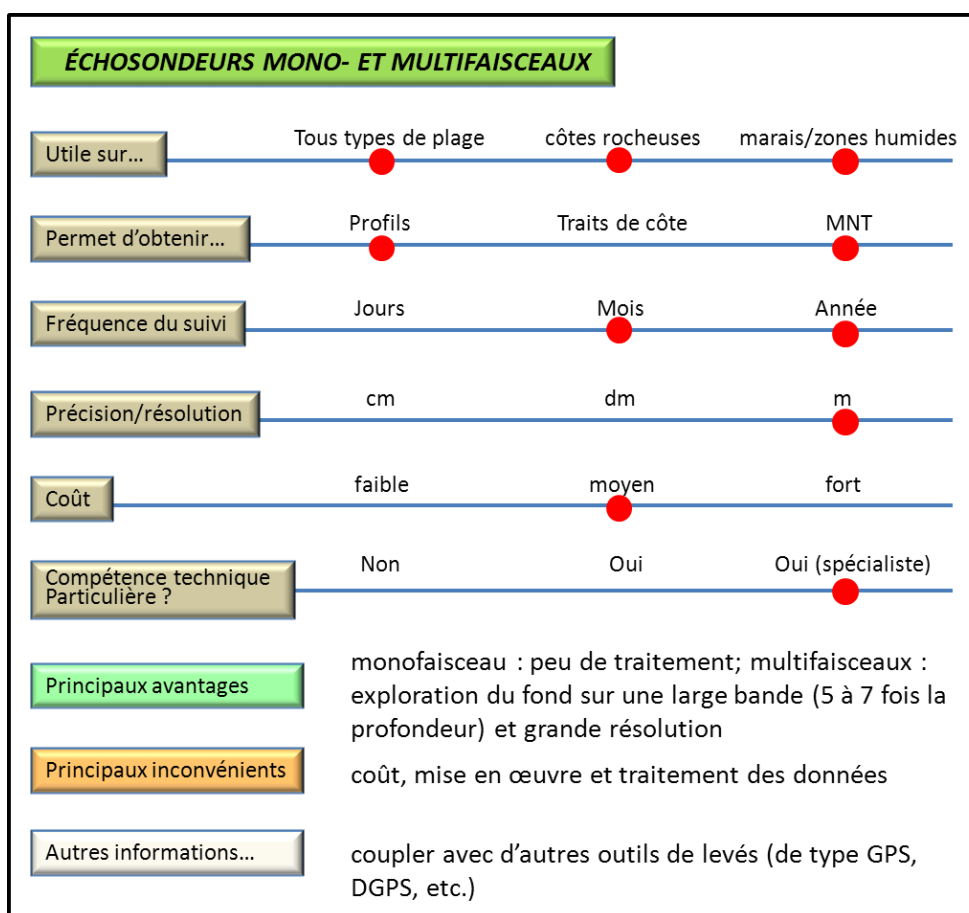


Figure 61 : Fiche synthétique concernant les échosondeurs mono- et multifaisceaux

4.3.2. L'échosondeur sismique réflexion

La sismique est basée sur le principe de la propagation d'ondes acoustiques basse fréquence dans un milieu continu et élastique. À partir de la mesure du temps de propagation des ondes dans le sous-sol et du signal retour obtenu, les propriétés et les épaisseurs des couches du sous-sol traversées sont déduites (d'après le site du SHOM, a).

Le principe consiste à produire des ondes sismiques depuis la surface de la mer (en bateau) par le biais de canons à air (source sismique) dont les caractéristiques sont connues

(fréquence, durée, amplitude). Ces ondes sont réfléchies sur les interfaces entre les couches présentant des contrastes d'impédance différentes. Elles sont ensuite enregistrées lors du retour, par une **flute sismique** contenant des récepteurs (hydrophones) qui convertissent l'onde acoustique en tension électrique (Nouzé et Chauchot, 1999 ; Figure 62).

Il existe plusieurs sortes de mesures sismiques, utilisées selon la résolution et la profondeur d'investigation recherchée, qui sont inversement proportionnels. Par exemple, les applications concernant le SHOM (détection sonar, etc.) s'intéressent aux faibles épaisseurs (quelques mètres à quelques dizaines de mètres) et à une très haute résolution (systèmes de sismique ayant des fréquences proche du kilohertz).

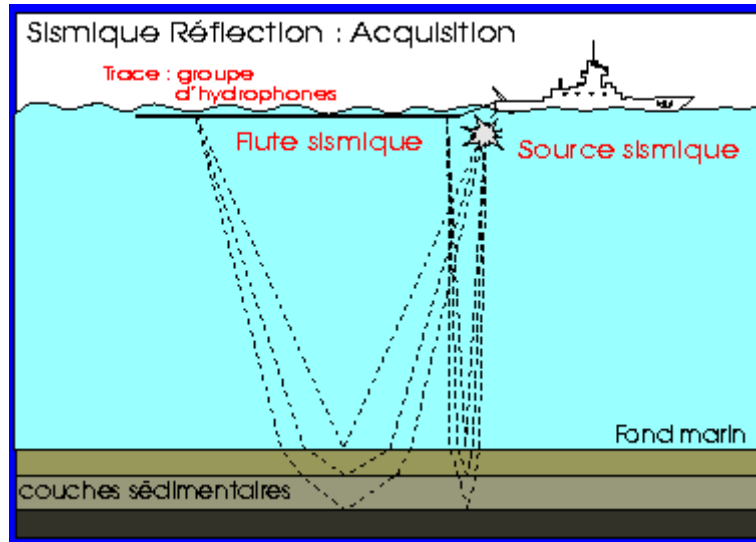


Figure 62 : Principe de la sismique réflexion (© Ifremer)

Domaines d'application

Cet outil est adapté à tous types de littoraux (hormis les mangroves). En exemple d'application, la sismique peut décrire le cadre millénaire de la mise en place et de l'évolution des prismes sableux. Ainsi, elle permet de déterminer avec précision les volumes sédimentaires gagnés ou perdus (chap. 7.2 ; Certain *et al.*, 2011).

Modes d'utilisation

Cette approche permet de déterminer avec précision les volumes sédimentaires des prismes (épaisseur de sédiment entre la surface et le fond rocheux « dur ») gagnés ou perdus dans le but d'estimer l'évolution de la frange côtière. Les données sismiques servent pour la cartographie sédimentaire et la reconstitution 3D du sous-sol.

Fréquence du levé

Ces levés n'ont pas vocation à être répétés sur le même site. En effet, les données mesurées (prismes) n'évoluent pas sur une échelle de temps courte.

Résolution

La résolution verticale (z) est inférieure au mètre (pluri-décimétrique).

Coûts

Le coût de cette technique est élevé : moyens humains conséquents, coûts du matériel (y compris le bateau) élevés même en location.

Méthodes de traitement

Les méthodes de traitement des données sismiques restent très spécifiques.

Avantages

Cet outil permet un diagnostic des volumes totaux constitutifs du disponible sédimentaire (volumes gagnés ou perdus) (Certain *et al.*, 2011).

Inconvénients

Cette approche doit être couplée à d'autres méthodes pour une exploitation maximale (LiDAR, bathymétrie, granulométrie et sédimentologie, etc. ; Certain *et al.*, 2011). Il est nécessaire d'avoir de bonnes compétences dans l'acquisition, le traitement et l'interprétation des données.

La fiche synthétique ci-dessous (Figure 63) résume les propriétés des échosondeurs sismiques réflexions.

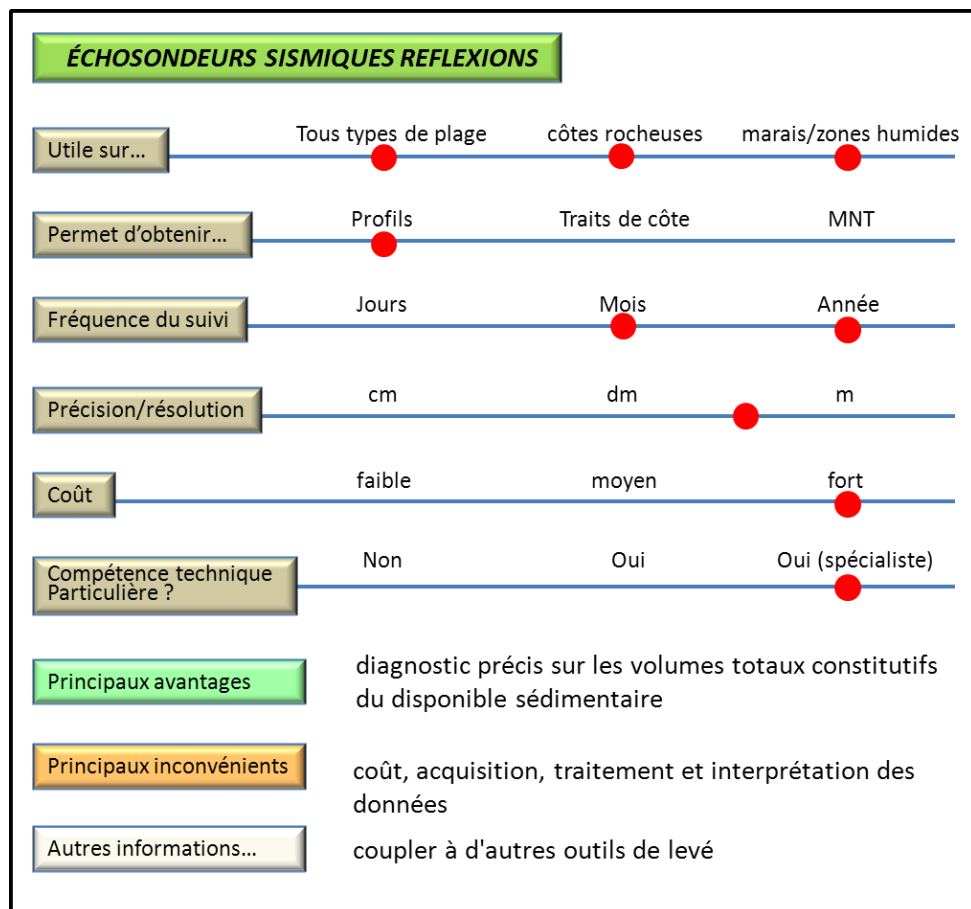


Figure 63 : Fiche synthétique concernant l'échosondeur sismique réflexion

4.3.3. Le sonar à balayage latéral

(D'après le site du SHOM, a)

Ce système acoustique permet de donner une vision du fond marin dont le but est d'estimer d'éventuels transports de sédiments. Cet outil est très utile en sédimentologie car il apporte une vision du fond comparable à une photographie aérienne du sol.

Le sonar à balayage latéral est un émetteur-récepteur d'ondes acoustiques qui présente l'avantage de visualiser les fonds sur une largeur importante (Figure 64). Une impulsion électrique est envoyée vers les **transducteurs**³⁵ portés par le poisson³⁶. Transformées en ondes acoustiques de courte durée et de haute fréquence, les impulsions ultrasonores successives se propagent dans l'eau et sont réfléchies sur le fond. Seule l'onde empruntant la même trajectoire après réflexion, est reçue par le poisson. Le signal acoustique est transformé en signal électrique. Il est traité pour reconstituer une image acoustique du fond marin. La méthodologie de levé doit être suivie de manière rigoureuse.

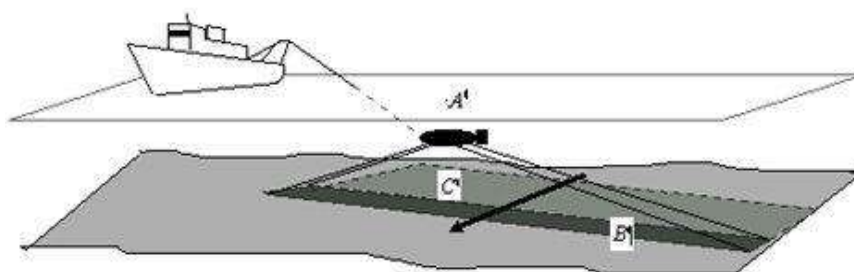


Figure 64 : Mise en oeuvre d'un sonar latéral. A : poisson ; B : surface insonifiée et C : surface fauchée
(© Ifremer)

Au niveau des traitements, les données morpho-sédimentaires d'imagerie sonar latéral sont regroupées sous forme de mosaïques. Ces dernières sont interprétées afin de fournir des cartes de structures sédimentaires qui sont intégrables dans des bases de données.

Domaines d'application

Cette méthode s'utilise dans les zones immergées des plages. Elle permet d'étudier l'évolution des petits fonds et de cartographier les figures sédimentaires, pour étudier les mouvements sédimentaires sur le fond (rides, sillons, dunes, etc.).

Modes d'utilisation

Ce système permet de donner une cartographie du fond marin dont le but est d'analyser les modes de transport de sédiments (impact sur la frange côtière). Cette technique permet également de produire des MNT lorsqu'elle est couplée à un sondeur bathymétrique.

³⁵ Voir glossaire.

³⁶ Poisson cylindrique comprenant des ailerons de stabilisation, un lest en zinc dans le nez pour l'équilibre hydrodynamique, de caissons étanches pour les transducteurs et l'électronique, un bras de remorque et une prise étanche câble électroporteur-poisson.

Sont ainsi obtenues, des informations sur la morphologie et la nature texturale du fond. Les nuances de gris varient : un sédiment dur paraît foncé (ex. : roche) et un sédiment meuble apparaît plus clair (ex. : vase).

Fréquence du levé

Pour le sonar, la fréquence d'acquisition peut être annuelle dans certains cas (études spécifiques), voire occasionnelle (souvent après un événement important). Cependant, il est recommandé de faire un suivi tous les 10 ans environ (si le site présente des mouvements sédimentaires importants).

Précision / résolution

La résolution est métrique en planimétrie. La combinaison d'un sondeur multifaisceaux et d'un sondeur à balayage latéral fournit une bathymétrie précise (quelques décimètres en z) et une imagerie de haute résolution (pas horizontal de 10 cm ; Ehrhold, 2003).

Coûts

Les coûts sont relativement élevés pour ce type de levé (système complet : poisson, centrale d'acquisition, logiciels ; techniciens expérimentés, minimum de traitement). Pour une journée en mer, il faut compter à peu près 1 500 € pour une acquisition minimale. Les coûts des traitements des données sont conséquents : ils peuvent être de l'ordre de 10 000 € selon le degré de traitement et d'interprétation requis. Il faut noter que les fourchettes de prix restent assez variables et dépendent en grande partie des moyens humains, des traitements des données et des conditions de sites (forte influence des conditions météorologiques pour les missions).

Méthodes de traitement

En temps réel, les outils informatiques assurent l'acquisition et la sauvegarde des données (navigation, bathymétrie, imagerie, capteurs d'environnement, etc.). Ceci permet de vérifier leur qualité.

Les traitements en temps différé sont destinés à la correction des données, au calcul de MNT et à la visualisation cartographique 2D et 3D des fonds.

Pour l'imagerie, des opérations de traitement du signal sont appliquées afin d'homogénéiser les données et de réhausser les contrastes de réflectivité sur le fonds, afin de produire des cartes de bonne qualité. Les images sonar s'intègrent aux outils SIG.

Avantages

Il permet de fournir en continu, et sur plusieurs dizaines à centaines de mètres de largeur, une cartographie acoustique (en niveau de gris) de très haute résolution du fond. Cette approche permet de fournir de multiples informations (orientation des flux sableux, types de fonds, zones de roches, etc.). Les images du sonar latéral paraissent aussi explicites que des photographies aériennes (MEEDDM, 2010). La morphologie des figures sédimentaires donne des indices sur les transports sédimentaires et sur la mobilité du fond.

La qualité des données n'est pas affectée par les changements de profondeur, à partir du moment où l'altitude du poisson est fixée à une hauteur constante au-dessus du fond. Le sonar

permet également, de cartographier d'autres objets avec précision (épaves, débris, herbiers, roches, etc.).

Inconvénients

Ce système est mis en œuvre pour des fonds supérieurs à 10 m. La prospection acoustique des fonds littoraux (inférieurs à 10 m) à partir des navires côtiers se prête mal à son utilisation, non seulement pour des raisons de sécurité, mais aussi en raison d'une dégradation des données restituées. La marge d'erreur peut être importante, des différences peuvent exister entre les données du sonar et l'observation terrain.

La nature du fond a une influence sur les ondes acoustiques (pertes de propagation dues à la réflexion, etc.). Les limites de cette technique sont dues à des problèmes de distorsion (déformation) pouvant être causés par la mer et à des problèmes de positionnement du poisson lorsque les courants sont forts (il faut connaître la position exacte du poisson sous l'eau). Les teintes de gris peuvent être sensiblement différentes d'un profil à l'autre, notamment lorsqu'ils n'ont pas la même orientation (Ehrhold, 2003).

L'acquisition et le dépouillement des mosaïques géoréférencées (traitement) requièrent un haut niveau d'expertise. Les coûts sont relativement élevés pour un système complet. Enfin, les levés acoustiques doivent être complétés par des prélèvements sédimentaires (carottages, bennes...) et éventuellement, des enregistrements par caméra vidéo, pour aider à l'interprétation des données.

La fiche synthétique ci-dessous (Figure 65) résume les propriétés du sonar à balayage latéral.

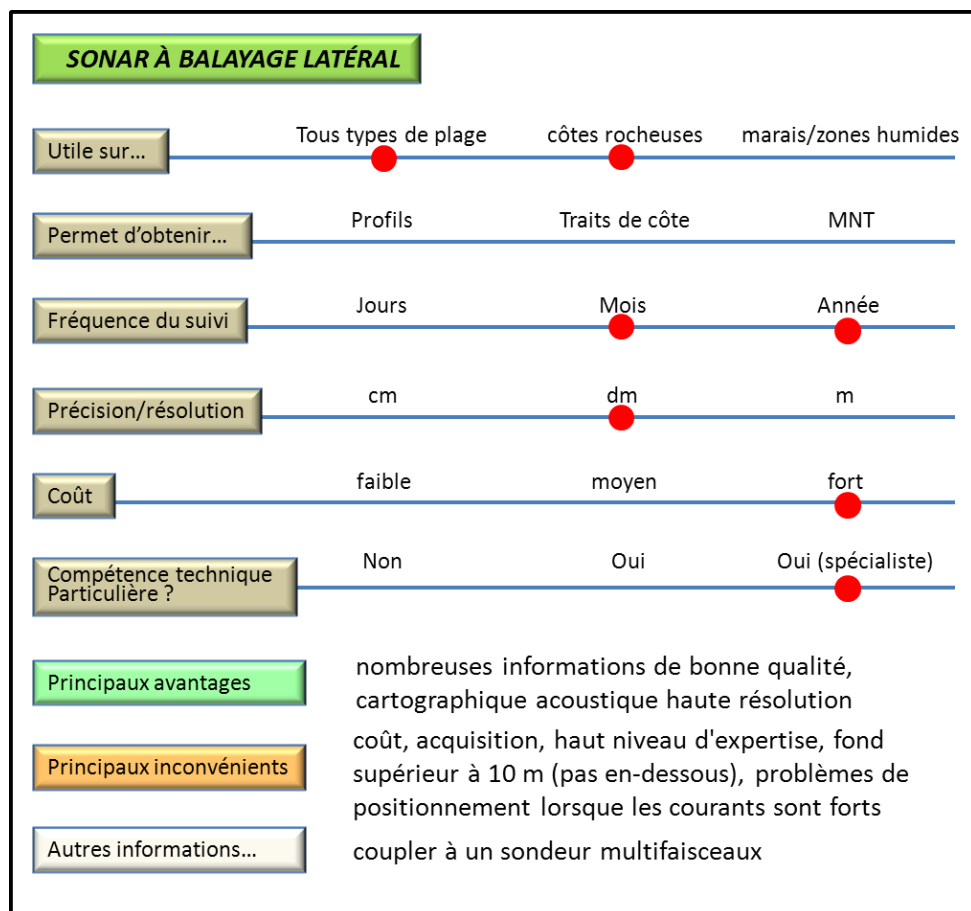


Figure 65 : Fiche synthétique concernant le sonar à balayage latéral

4.4. SYNTHÈSE DES OUTILS DE LEVÉ ET DES MÉTHODES DE TRAITEMENT

Des recommandations générales et deux tableaux synthétiques permettent de conclure ce chapitre sur les outils de levé ainsi que sur les méthodes de traitement des données.

4.4.1. Recommandations générales

Des recommandations sont faites à la fin de ce chapitre afin d'aider le lecteur dans sa recherche. Le tableau ci-dessous recommande de manière synthétique les levés à employer par type de milieu (Figure 66).

Milieu	Levé-type généralement recommandé
Côte sableuse	DGPS + jalons, suivis photos (et orthophotos et satellite), LiDAR, bathymétrie
Côte rocheuse	DGPS + jalons, suivis photos, photographie aérienne (orthophotos), LiDAR
Marais maritime	télédétection (aérienne ou satellite) ou prise de vue aérienne, GPS + jalons, LiDAR
Plage corallienne (milieu tropical)	télédétection (aérienne ou satellite) ou prise de vue aérienne, DGPS (et topographie immergée), LiDAR
Mangrove (bancs de vase; milieu tropical)	télédétection (aérienne ou satellite) ou prise de vue aérienne, GPS + jalons
Côte artificialisée	DGPS + jalons, suivis photos, imagerie vidéo, LiDAR, bathymétrie

Figure 66 : Recommandations des levés par type de milieu

Concernant la côte sableuse et la côte rocheuse, il est tout particulièrement recommandé d'utiliser les repères de terrain en complément du DGPS pour des suivis réguliers et fréquents (2 fois par an). Les coûts sont amortis sur le long terme. Cependant, certains secteurs à évolution lente peuvent être suivis moins souvent (fréquence tous les 5 ans). Ainsi, des outils tel que le LiDAR (de plus en plus employé malgré des coûts d'acquisition et de traitement encore relativement élevés) ou encore les photographies aériennes (notamment pour la côte rocheuse) sont préconisés quel que soit le milieu.

La télédétection aérienne et spatiale est quant à elle recommandée pour les zones humides. En effet, les difficultés d'accès, le couvert végétal ou encore l'environnement vaseux sont d'autant de contraintes pour des outils de levé terrestre. La télédétection reste néanmoins une méthode précise et efficace sur le long terme, permettant d'effectuer des suivis de fréquence annuelle.

Enfin, il est conseillé d'accompagner autant que possible et dans la mesure où les coûts ne sont pas trop élevés, les levés du trait de côte par des relevés morphologiques complémentaires (présence d'éboulis par exemple), hydrographiques (niveaux marins, données de houle et de courants), bathymétriques et topographiques (fines et mises à jour de façon régulière), de végétation des dunes, etc. Ces données permettent d'analyser l'évolution de la frange côtière et ainsi, de s'orienter vers une décision.

Pour chaque suivi, il est conseillé de vérifier si des études scientifiques sont en cours ou ont été réalisées avant de définir une stratégie de levé du trait de côte.

4.4.2. Tableaux synthétiques des outils de levé et des méthodes de traitement pour le suivi du trait de côte

Le tableau suivant (Figure 67) est une synthèse des outils de levé pour le suivi du trait de côte. Il reprend les principaux avantages et inconvénients des méthodes mais aussi leurs caractéristiques principales telles que la précision, la résolution, la fréquence d'acquisition et les estimations de coût (faible à fort).

		Milieu										
Outils de levés	CS	CR	MM	Co	Ma	O	Précision / résolution	Fréquence	Coûts	Avantages	Inconvénients	
Repères de terrain (bornes)							en lien avec le DGPS donc précision centimétrique (x, y et z).	fonction de l'outil combiné avec le repère, si DGPS suivi annuel ou plusieurs fois par an	faibles (mais variables selon l'usage)	indicateurs représentatifs de l'évolution de la côte qui peuvent être utilisés à des fins pédagogiques sur le terrain	coûts variables, destruction ou endommagement des repères par dégradations / intempéries / recouvrements sableux importants le long du littoral, suivi régulier	
Gps							métrique : de 1 à 10 m (de 3 à 5 m dans les meilleures situations) en (x, y) et pas de z	après un événement notable sinon fréquence mensuelle ou trimestrielle selon les secteurs	faible	mise en œuvre simple, méthode peu coûteuse et "précise" quand il est question d'obtenir des données spécifiques du trait de côte	précision trop faible (dans certains cas), le GPS peut montrer quelques limites liées à des difficultés pour capter les satellites (levés le long d'une falaise, ou sous couverture végétale)	
DGPS							centimétrique (x, y et z)	plusieurs campagnes annuelles. La fréquence peut être mensuelle ou trimestrielle selon les secteurs	fort	rapidité des mesures, outil précis, sous-traitance auprès d'un opérateur non expert du littoral possible (quelques heures de formation technique)	coûts à l'achat, problèmes de connexion aux satellites (levés en haut de plage, le long d'une falaise, ou sous couverture végétale), perturbation de la communication radio entre le capteur GPS mobile et sa base en fonction du contexte	
Théodolite							centimétriques (x, y et z)	plusieurs campagnes annuelles (2/an) sinon elle peut être mensuelle ou trimestrielle selon les secteurs	moyen	grande précision, peut raccorder les mesures acquises à un référentiel géodésique, peut s'affranchir des problèmes du GPS relatif à la capture des signaux	nécessite de bonnes compétences (techniciens expérimentés), les coûts peuvent s'élever rapidement mais restent abordables (amorti à long terme) si le système est utilisé plusieurs fois par an	
CS : Côte sableuse; CR : côte rocheuse; MM : marais maritime; Co : plage corallienne; Ma : mangrove; O : côte artificialisée												
acquisition terrestre		utilisation adaptée et pertinente						Fourchette de coûts				
acquisition aérienne et satellite		utilisation limitée										
acquisition en mer		non adapté ou non pertinent										
								faible				
								entre 1000 et 5000 € ou entre 100 et 500 € / km ²				
								fort				
								> 5000 € ou > 500 € / km ²				
Figure 65 : Tableau synthétique des outils de levés pour le suivi du trait de côte												

Outils de levés	Milieu						Fréquence	Coûts	Avantages	Inconvénients
	CS	CR	MM	Co	Ma	O				
Scanner 3D	dune						semestrielle à annuelle	moyen à fort	précision, capacité de répétitivité de la mesure, images 3D très haute résolution, données quantitatives	utilisation réservée à des techniciens expérimentés, outil coûteux à l'achat (loué ou prestation complète), capacité de stockage des données, conditions d'utilisation restreintes
Les suivis photographiques au sol							mensuelle ou annuelle, après chaque tempête	faible	coût, complément avec les photos aériennes verticales, bon suivi dans la continuité de la mobilité du trait de côte (indicateurs, repères)	suivis rigoureux, méthode insuffisante pour une estimation des volumes des matériaux, offre rarement des données quantitatives
Imagerie vidéo (type webcam)		falaise					journalière	moyen à fort	technique autonome, bons suivis à long terme, régulier et à haute fréquence, bonne précision en 2D	imprécision de la valeur z, nécessite un point « haut », nécessite de très bonnes compétences, matériel fragile, coûts onéreux, superficie couverte faible
CS : Côte sableuse; CR : côte rocheuse; MM : marais maritime; Co : plage corallienne; Ma : mangrove; O : côte artificialisée										
acquisition terrestre							Fourchette de coûts			Figure 65 : Tableau synthétique des outils de levés pour le suivi du trait de côte
acquisition aérienne et satellite										
acquisition en mer										
								faible	< 1000 € ou < 100 € / km ²	
								moyen	entre 1000 et 5000 € ou entre 100 et 500 € / km ²	
								fort	> 5000 € ou > 500 € / km ²	

Outils de levés	Milieu						Précision / résolution	Fréquence	Coûts	Avantages	Inconvénients
	CS	CR	MM	Co	Ma	O					
Photographie aérienne verticale							environ 1 m pour la taille des plus petits objets discernables, « précision métrique » pour la finesse de l'image, données qualitatives	fréquence de quelques années entre chaque survol (tous les 5 ans environ)	faible sur catalogue à fort sur demande	résolution inférieure au mètre, numérisation et suivi de l'évolution du trait de côte sur une longue période avec une précision acceptable (suivi quantitatif), possibilité de coupler plusieurs outils pour obtenir des images RVB classiques et proche infrarouge, intéressant dans le cas où l'on relève la limite d'une zone en eau	redressement des clichés (réalisation d'orthophotographies) sans lequel les comparaisons sont erronées, coût important, mise en œuvre lourde (deux techniciens expérimentés)
Photographie aérienne oblique							données qualitatives	en fonction des besoins de chacun	faible à moyen	datées et localisables sans difficulté, informations précises sur le contexte géomorphologique de la zone étudiée, suivi de l'évolution du trait de côte sur une longue période, aperçu qualitatif sur de grands espaces après un événement météo-marin notable, coût faible à moyen, intérêt pour la représentation de la géographie et dynamique des systèmes	informations qualitatives, couverture spatiale faible, mise en œuvre lourde (deux techniciens expérimentés)
CS : Côte sableuse; CR : côte rocheuse; MM : marais maritime; Co : plage corallienne; Ma : mangrove; O : côte artificialisée											
acquisition terrestre											Figure 65 : Tableau synthétique des outils de levés pour le suivi du trait de côte
acquisition aérienne et satellite											
acquisition en mer											
							utilisation adaptée et pertinente		faible	< 1000 € ou < 100 € / km ²	Fourchette de coûts
							utilisation limitée		moyen	entre 1000 et 5000 € ou entre 100 et 500 € / km ²	
							non adapté ou non pertinent		fort	> 5000 € ou > 500 € / km ²	

Outils de levés	Milieu						Fréquence	Coûts	Avantages	Inconvénients
	CS	CR	MM	Co	Ma	O				
Laser aéroporté ou LIDAR aéroporté							décimétrique (précision altimétrique absolue de l'ordre de 10 cm (z) et 10 – 17 cm en x et y)	moyen à fort selon les études et le type de LIDAR (LIDAR topo 250 €/km ²)	grande résolution, cartographie 3D (MNT) complète d'une zone étudiée (cartographie continue topographique du littoral de l'eau à la terre ferme), les données LIDAR peuvent rapidement couvrir de larges zones	problèmes de pénétration si couverture végétale et ciel nuageux, importance du réseau de base DGPS au sol pour le calage en absolu des données laser, coûts importants, bonnes compétences requises (acquisition, traitement et interprétation des données), sous-traitance possible, aucune pénétration dans les eaux turbides (LIDAR bathymétrique)
Imagerie hyperspectrale (image CASI)							résolution spatiale de 0,5 à 10 m et spectrale de 2,2 nm environ, précision radiométrique de 470-800 nm ± 2% absolu et de 430-870 nm ± 5% absolu	fort	large couverture spatiale, résolution radiométrique assez élevée, levé utile pour la cartographie des habitats, substrats rocheux, etc.	les coûts peuvent être forts (les données sont donc limitées à l'échelle temporelle et spatiale), la résolution des pixels n'est pas élevée, nécessité des opérateurs spécialisés pour le traitement et l'interprétation des données
CS : Côte sableuse; CR : côte rocheuse; MM : marais maritime; Co : plage corallienne; Ma : mangrove; O : côte artificialisée										

acquisition terrestre	Fourchette de coûts	faible	< 1000 € ou < 100 €/km ²
acquisition aérienne et satellite		moyen	entre 1000 et 5000 € ou entre 100 et 500 €/km ²
acquisition en mer		fort	> 5000 € ou > 500 €/km ²

Figure 65 : Tableau synthétique des outils de levés pour le suivi du trait de côte

Outils de levés	Milieu						Fréquence	Coûts	Avantages	Inconvénients	
	CS	CR	MM	Co	Ma	O					
Imagerie SPOT-5							large champ d'observation (60 km x 60 km) et multirésolution : gamme complète d'images allant de 20 m jusqu'à 2,5 m de résolution pour des travaux à l'échelle régionale ou locale	quelques images par an (observation sur programmation)	faible 0,3 à 2,25 € / km ²	images directement intégrables dans les systèmes de traitement d'images, de SIG ou de rédaction cartographique, associées à d'autres données géographiques afin d'obtenir le plus d'informations possibles, solutions efficaces et peu onéreuses	attention au géoréférencement, les ombres portées limitent l'exploitation des données, résolution fine (insuffisante pour les évolutions du trait de côte faible) mais difficilement exploitable, inadapté si couvert nuageux
Imagerie FORMOSAT-2							emprise spatiale de 24 x 24 km, résolution de 8 m en mode normal et 2 m en fusionné	quelques images par an (observation sur programmation)	faible 3,25 à 6 € / km ²	adaptées aux applications de détection des changements et à la couverture rapide de zones étendues, images directement intégrables dans les systèmes de traitement d'images, de SIG ou de rédaction cartographique, traitées de manière simple, coût faible	attention au géoréférencement, les ombres portées limitent l'exploitation des données, résolution fine (insuffisante pour les évolutions du trait de côte faible) mais difficilement exploitable, inadapté si couvert nuageux
CS : Côte sableuse; CR : côte rocheuse; MM : marais maritime; Co : plage corallienne; Ma : mangrove; O : côte artificialisée											

acquisition terrestre		Fourchette de coûts	faible	< 1000 € ou < 100 € / km ²	Figure 65 : Tableau synthétique des outils de levés pour le suivi du trait de côte
acquisition aérienne et satellite			moyen	entre 1000 et 5000 € ou entre 100 et 500 € / km ²	
acquisition en mer			fort	> 5000 € ou > 500 € / km ²	

		utilisation adaptée et pertinente
		utilisation limitée
		non adapté ou non pertinent

		Milieu					Précision / résolution	Fréquence	Coûts	Avantages	Inconvénients
Outils de levés		CS	CR	MM	Co	O					
Echosondeurs multifaisceaux et monofaisceau		zone immergée des plages	zone immergée des plages		zone immergée des plages		sondeur multifaisceaux : bonne résolution spatiale (m), précision jusqu'à 10 cm en z et de l'ordre du mètre en (x, y). sondeur monofaisceau : résolution planimétrique de 0,5 à 5 m, précision altimétrique de 0,1 à 0,2 m	annuelle ou pluriannuelle (recommandé 2 fois/an en complément du DGPS par exemple) voire occasionnelle (après un événement important ou avant et après une opération de dragage ou de rechargement)	moyen : de 1 à 4 k€ /km ²	sondeur monofaisceau : peu de traitement pour nettoyer les données. sondeur multifaisceaux : exploration du fond sur une large bande avec une très grande résolution	incertitude sur la profondeur mesurée non négligeable, mise en œuvre et traitement des données lourds, coûts peuvent être élevés
Echosondeur sismique		zone immergée des plages	zone immergée des plages		zone immergée des plages		résolution verticale z : inférieure au mètre (pluri-décimétrique)	tous les 5 ans environ	fort	diagnostic précis sur les volumes totaux constitutifs du disponible sédimentaire (volumes gagnés ou perdus)	en complément d'autres outils (LiDAR, bathymétrie, granulométrie, etc), compétences requises (acquisition, traitement, interprétation), coût fort
CS : Côte sableuse; CR : côte rocheuse; MM : marais maritime; Co : plage corallienne; Ma : mangrove; O : côte artificialisée											

acquisition terrestre	utilisation adaptée et pertinente	
acquisition aérienne et satellite	utilisation limitée	
acquisition en mer	non adapté ou non pertinent	

Figure 65 : Tableau synthétique des outils de levés pour le suivi du trait de côte		
Fourchette de coûts	faible	< 1000 € ou < 100 € / km ²
	moyen	entre 1000 et 5000 € ou entre 100 et 500 € / km ²
	fort	> 5000 € ou > 500 € / km ²

Outils de levés	Milieu					Précision / résolution	Fréquence	Coûts	Avantages	Inconvénients
	CS	CR	MM	Co	Ma					
Sonar à balayage latéral	zone immergée des plages	zone immergée des plages		zone immergée des plages		bathymétrie précise (dm) et image haute résolution (pas horizontal de 10 cm) si sondeur multifaisceaux et un sondeur à balayage latéral combinés	tous les 10 ans environ, annuelle ou occasionnelle (étude spécifique)	fort	cartographie acoustique de très haute résolution du fond, taux élevé d'informations , bonne qualité des images, la morphologie des figures sédimentaires donne des indices sur les transports sédimentaires et sur la mobilité du fond, la qualité des données n'est pas affectée par les changements de profondeur, permet de cartographier d'autres objets avec précision (épaves, débris, herbiers, roches, etc.)	prospection acoustique des fonds : < à 10 m à partir des navires se prête mal à son utilisation (sécurité, dégradation des données restituées), coûts forts, teintes de gris différentes d'un profil à l'autre, limites dues à des problèmes de distorsion et à des problèmes de positionnement du poisson lorsque les courants sont forts, haut niveau d'expertise, possibilité que la marge d'erreur soit importante entre observation terrain et données du sonar
	CS : Côte sableuse; CR : côte rocheuse; MM : marais maritime; Co : plage corallienne; Ma : mangrove; O : côte artificialisée									

acquisition terrestre	Fourchette de coûts	faible	< 1000 € ou < 100 € / km ²
acquisition aérienne et satellite		moyen	entre 1000 et 5000 € ou entre 100 et 500 € / km ²
acquisition en mer		fort	> 5000 € ou > 500 € / km ²

utilisation adaptée et pertinente	Figure 65 : Tableau synthétique des outils de levés pour le suivi du trait de côte
utilisation limitée	
non adapté ou non pertinent	

Outils de levés	Milieu						Précision / résolution	Fréquence	Coûts	Avantages	Inconvénients
	CS	CR	MM	Co	Ma	O					
Imagerie Pléiades							centimétrique : jusqu'à 50 cm de résolution	plusieurs images par an peuvent être acquises sur programmation	faible (données gratuites)	très haute résolution avec un niveau de détail très fin, très bonne précision et excellente qualité de l'image, capacité de revisite quotidienne en tout point du globe, accès autonome du portail Pléiade et permanent (demande d'une nouvelle acquisition, rechercher une image d'archive, consulter un service de géoinformation, etc.), grande capacité d'acquisition	mêmes inconvénients que les données SPOT et FORMOSAT (ombre, précision du calage géométrique), données inexploitable en présence de nuages
Imagerie radar SAR, exemple de TerraSAR-X							quatre gammes de résolution sont accessibles : 1, 2, 3 m et 18.5 m	le temps de revisite d'un même site est estimé à 2.5 jours au maximum	faible à moyen : 0,2 € / km ² (faible résolution) à 135 € / km ² (forte résolution)	images avec ou sans couvert nuageux de nuit comme de jour, augmentation de la possibilité de couverture des littoraux à l'échelle mondiale, faible délai entre deux prises de vue (max. 2,5 jours), très hautes résolutions, coût attractif	méthodes complexes et lourdes à mettre en œuvre par des centres spécialisés, la photo-interprétation reste délicate
CS : Côte sableuse; CR : côte rocheuse; MM : marais maritime; Co : plage corallienne; Ma : mangrove; O : côte artificialisée											

acquisition terrestre	utilisation adaptée et pertinente
acquisition aérienne et satellite	
acquisition en mer	

Fourchette de coûts	faible	< 1000 € ou < 100 € / km ²
	moyen	entre 1000 et 5000 € ou entre 100 et 500 € / km ²
	fort	> 5000 € ou > 500 € / km ²

Figure 65 : Tableau synthétique des outils de levés pour le suivi du trait de côte

Figure 67 : Tableau synthétique des outils de levés pour le suivi du trait de côte

Le tableau (Figure 68) ci-dessous, reprend les principales méthodes de traitement (notamment préalables) utilisées pour les données issues des outils de levés.

OUTILS / METHODES	EXEMPLES DE TRAITEMENTS (y compris l'extraction du trait de côte)
GPS (repères de terrain associés) DGPS (repères de terrain associés) Théodolite Scanner 3D ou LiDAR terrestre	Traitements préalables (logiciel du constructeur), géoréférencement, SIG
LiDAR aéroporté	Élimination de valeurs aberrantes, filtration des objets, etc., SIG
Suivis photographiques	Photo-interprétation, photogrammétrie, stéréoscopie, SIG
Imagerie vidéo	Traitements préalables (corrections des paramètres optiques, géographiques, etc.), photogrammétrie, filtre de Sobel, SIG
Photographie aérienne plane ou oblique	Géoréférencement, orthorectification, mosaïquage, photo-interprétation, photogrammétrie, stéréoscopie, SIG
Imagerie hyperspectrale (CASI) Imagerie satellitaire multispectrale (SPOT, FORMOSAT) Imagerie Pléiades	Géoréférencement, orthorectification, mosaïquage, photo-interprétation, filtre de Sobel, SIG
Imagerie radar SAR	Géoréférencement des données, etc. SIG
Échosondeurs multi- et monofaisceau	Contrôle, validation, filtrage des données, élimination des artefacts, etc. SIG
Échosondeur sismique	Calcul des signaux reçus en fonction des signaux émis, traitement qualitatif (amélioration de l'imagerie), traitement quantitatif (inversion), etc.
Sonar à balayage latéral	Traitements en temps réel et en temps différé, etc., SIG

Figure 68 : Exemples de traitements adaptés aux données issues des outils de levé

5. Les outils et les méthodes de traitement du trait de côte

Ce chapitre correspond à l'étape 5 (les outils et les méthodes de traitement) de l'organigramme (figure 1).

Une fois les données³⁷ issues des levés recueillies (images, points GPS, MNT, etc.), il convient de les traiter à l'aide d'outils spécifiques afin de cartographier le trait de côte, de capitaliser les données ou encore d'effectuer des **études diachroniques** visant à calculer les taux d'évolution du trait de côte.

5.1. GÉNÉRALITÉS

Le **SIG** (Système d'information Géographique) est l'outil de référence pour l'analyse du trait de côte. Associé aux tableurs (exemple : le logiciel Microsoft Excel®) et aux bases de données³⁸ (exemple : le logiciel Microsoft Access® ou Géodatabases ESRI®), il offre une multitude de choix possibles quant aux représentations graphiques et cartographiques.

À titre d'exemple, un suivi a été réalisé par l'Observatoire de la Côte Aquitaine sur le site de Soulac-sur-Mer en Gironde (Mugica *et al.*, 2008). Les profils réalisés au DGPS entre la dune et la plage sableuse entre 2003 et 2008 sont compilés au sein d'un tableur dans un seul fichier. La représentation en coupe permet de comparer, pour un couple de bornes donné, l'évolution des profils de plage réalisés pour cette période (Figure 69).

Les fichiers contenant les mesures du trait de côte sont directement intégrés sous SIG afin d'analyser leur évolution. La représentation en plan (x, y) permet de vérifier que les mesures ont bien suivi le même axe du transect d'une année sur l'autre.

Des analyses diachroniques sont possibles pour caractériser l'évolution du trait de côte, dans ce cas caractérisé par le pied de dune côté plage. À partir de la représentation des transects en deux dimensions (horizontale et verticale), il est possible de quantifier l'évolution des surfaces de plage et de dunes, entre deux années. Les volumes sédimentaires peuvent être estimés en multipliant ces surfaces par une troisième dimension horizontale choisie arbitrairement comme étant un mètre linéaire théorique. Les volumes obtenus sont ainsi exprimés en m³ par mètre linéaire (ce qui revient à des surfaces).

Les métadonnées sont renseignées et diffusées sur un catalogue mis en ligne sur Internet et interopérable par d'autres catalogues. Une interface cartographique permet de visualiser les profils de ces données une fois éditées sur le site (exemple : le site internet de l'Observatoire de la Côte Aquitaine³⁹).

³⁷ Comme il a été vu dans le chapitre précédent, ces données brutes subissent des traitements préalables (exemple : géoréférencement, orthorectification, etc.).

³⁸ Actuellement, il existe des bases de données faciles d'accès et présentant une couverture nationale : BdTopo® (IGN), BdCarto® (IGN) et Histolitt (SHOM et IGN).

³⁹ <http://littoral.aquitaine.fr/Mise-en-place-du-Systeme-d.html>

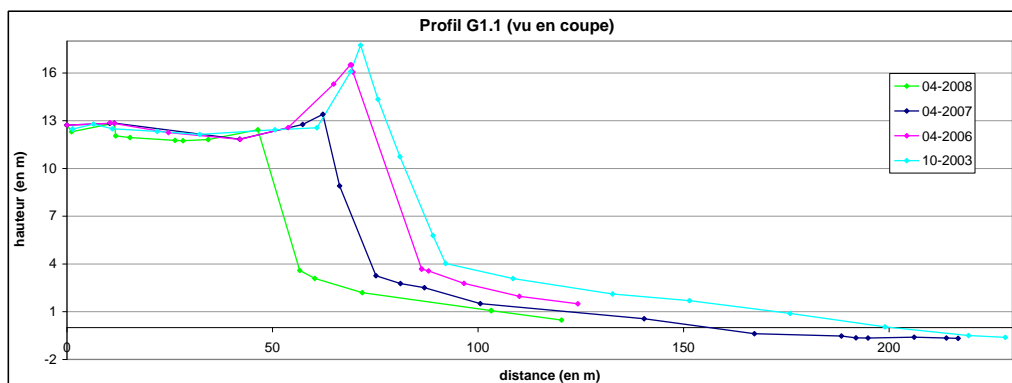


Figure 69 : Evolution du profil plage-dune entre 2003 et 2008 au niveau de Soulac-sur-Mer (Mugica et al., 2008)

5.2. LES MÉTHODES DE TRAITEMENT DU TRAIT DE CÔTE SOUS SIG

Il existe plusieurs méthodes de traitement et d'analyse. Les principales ou celles qui sont actuellement les plus utilisées sont détaillées dans les paragraphes ci-dessous à partir d'exemples.

5.2.1. Exemple de traitement du trait de côte issu d'un MNT

Le traitement du trait de côte à partir d'un MNT⁴⁰ peut être résumé par les cinq étapes suivantes présentées ici à titre d'exemple (Figure 70), d'autres méthodes existant par ailleurs :

- l'acquisition des données topographiques et bathymétriques géoréférencées (x, y et z) sur une bande côtière (ex. : plage-dune) par les outils de levé (ex. : DGPS) ;
- l'interpolation. Cette opération mathématique permet d'obtenir une représentation du relief du terrain (en 2D ou en 3D suivant une grille régulière ou irrégulière) en reliant entre eux les points topo-bathymétriques issus du levé et dont la distribution dans l'espace est plus ou moins homogène. Il existe différentes méthodes d'interpolation. Il conviendra à l'utilisateur de choisir celle qui est la plus adaptée en fonction des nuages de points à traiter, des outils dont il dispose et de ses connaissances. Parmi les principales méthodes, il existe l'interpolation linéaire, par triangulation, le krigeage⁴¹ qui permet d'associer en tout point de la grille une estimation de l'erreur, etc. Ces méthodes s'effectuent directement sous SIG (ex. : 3D-Analyst d'ArcGIS) ou avec un logiciel dédié (Surfer) ;
- la création du MNT découle directement de l'interpolation des points de levés. Les MNT diffèrent selon le type de maillage utilisé : le maillage carré / rectangulaire (notamment pour les petites zones couvertes), le maillage hexagonal et le maillage triangulaire régulier ou irrégulier ;

⁴⁰ Le MNT est pris en exemple car il offre une description plus complète que les transects.

⁴¹ Pour plus d'informations : **Chilès J.P.** et **Delfiner P.** (1999) - Geostatistics: modeling spatial uncertainty, Wiley series in probability and statistics.

- l'identification du trait de côte. Ce dernier peut être identifié de différentes manières à partir du MNT, par exemple :
 - par interprétation directe du relief par un opérateur (cartographie dressée à l'écran sur le SIG) ;
 - par photo-interprétation de la combinaison d'une photographie aérienne drapée sur le MNT (surface 2D horizontale ou bloc 3D) ;
 - soit par une méthode de calculs réalisée sur le MNT à partir d'un SIG permettant d'extraire les ruptures de pente définissant la berme, la limite entre la plage et la dune ou d'autres **indicateurs** géomorphologiques.
- l'**analyse diachronique**. D'une manière générale, on peut analyser et calculer des surfaces ou des volumes pour un même site à partir de MNT issus de différentes dates, effectuer des tracés de profils topographiques au sein de ces MNT, etc.

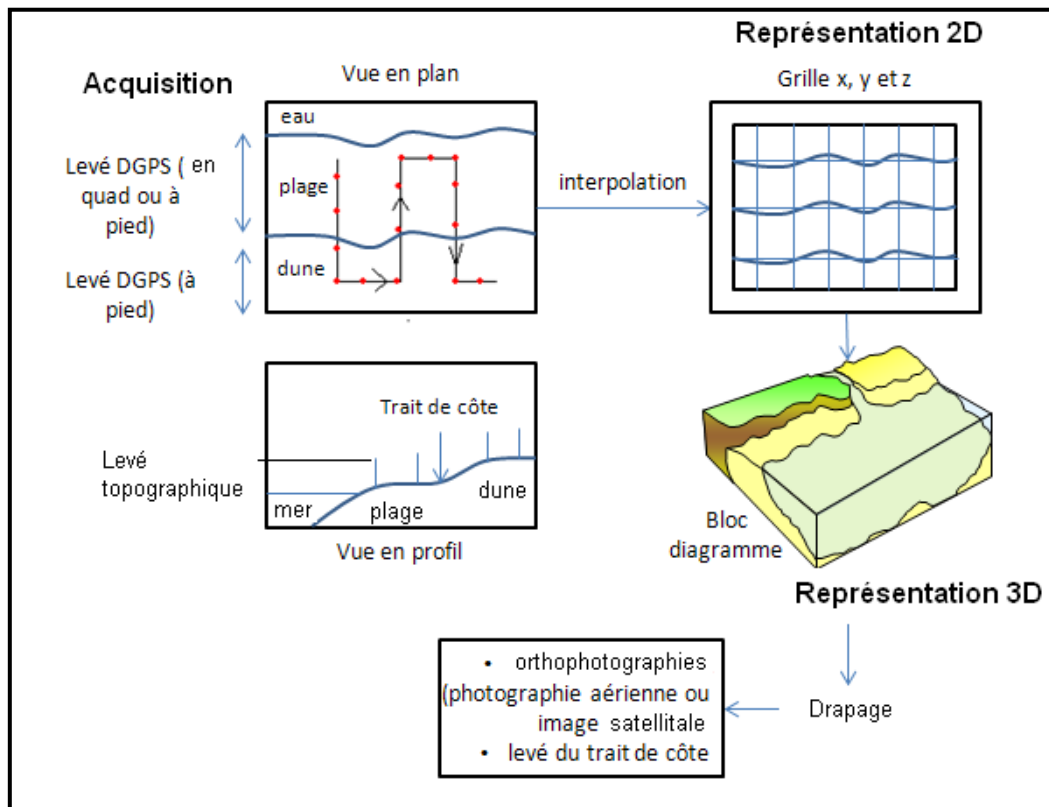


Figure 70 : Réalisation d'un MNT : modèle de l'interpolation utilisé

5.2.2. La méthode d'utilisation des tampons pour représenter l'évolution de l'indicateur du trait de côte sous Arcmap d'ESRI©

(D'après Mugica *et al.*, 2008).

Les fonctionnalités des zones tampons (buffer) d'un SIG sont utilisées afin de tracer l'évolution du trait de côte (Figure 71). Pour ce faire, des bandes parallèles de largeur fixe sont créées de part et d'autre du trait de côte de référence (par exemple le plus ancien). L'évolution entre un

trait de côte récent et ancien est représentée grâce à un code couleur. À chacune de ces bandes est associée une classe de couleur représentant un déplacement positif ou négatif par rapport au trait de côte de référence. L'intersection du trait de côte récent avec la zone tampon permet de distinguer les portions en avancée et les portions en recul par rapport au trait de côte ancien. Sur une carte, des tronçons de couleurs différentes représentent l'éloignement du trait de côte le plus récent par rapport à celui le plus ancien (chaque couleur représente une classe de distances) (chap. 7.1). Les variations du trait de côte dépendent des marges d'erreurs liées aux méthodes d'acquisition et de suivi.

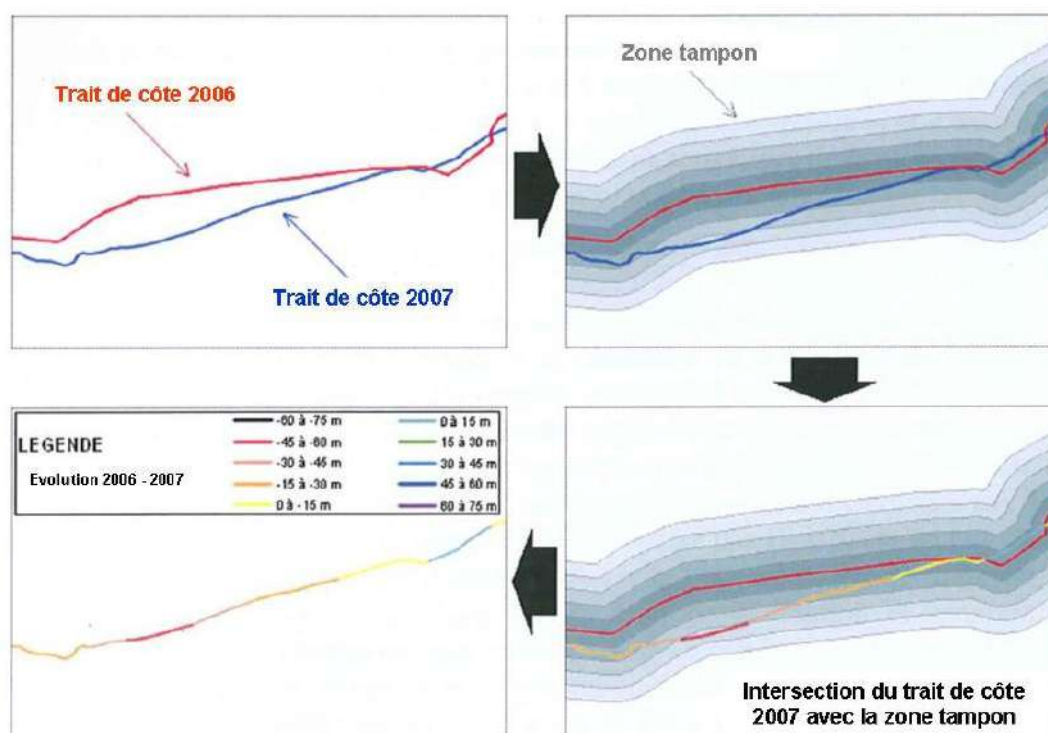


Figure 71 : Méthode d'utilisation des tampons pour représenter l'évolution du trait de côte girondin en Aquitaine à partir d'un SIG (Mugica et al., 2008)

Les informations de l'évolution du trait de côte sont ensuite reportées sur le trait de côte de référence (à définir).

5.2.3. Le traitement de l'indicateur du trait de côte sous DSAS

(D'après Aubié et al., 2011).

L'outil DSAS permet d'analyser l'évolution passée du littoral. Il est rapidement pris en main et facilement opérationnel et permet une grande traçabilité des différentes étapes de construction des traits de côte futurs. Cet outil permet de réaliser un calcul statistique des taux d'évolution à partir des différents traits de côte. Il s'opère sous le logiciel SIG ArcMap (® ESRI).

L'outil DSAS nécessite la réalisation manuelle d'une ligne de base (Figure 72) se trouvant soit en mer, soit en terre. L'utilisation de cet outil nécessite également, de définir une longueur pour les transects, un pas de mesure et de disposer de traits de côte projetés dans un même système géographique. Il génère automatiquement, selon le pas de mesure défini par l'utilisateur, des transects perpendiculaires aux linéaires côtiers, mesure les distances entre les

traits de côte et calcule les taux moyens de déplacement le long de chaque transect (Figure 72). L'analyse automatique de ces derniers permet de définir des secteurs d'évolution type et d'en calculer les valeurs moyennes. Cette méthode d'extrapolation de l'évolution du trait de côte, s'applique plus ou moins bien selon les secteurs et nécessite la correction *in fine* d'un opérateur expert du littoral étudié (certains secteurs nécessitent une étude plus approfondie prenant en compte la dynamique du milieu).

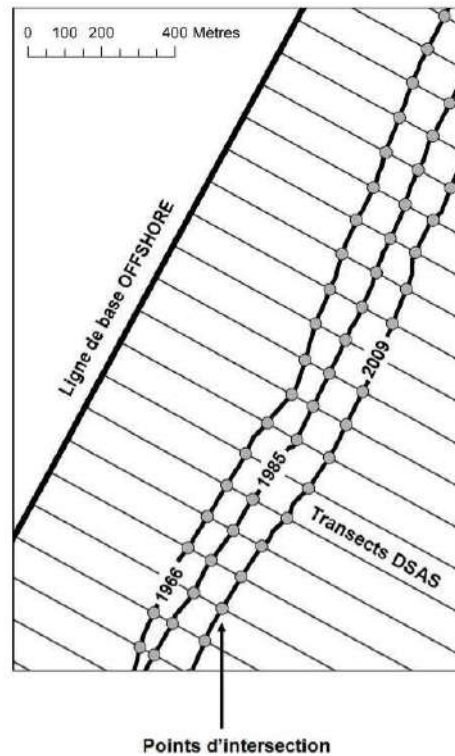


Figure 72 : Illustration du calcul de DSAS (Arcgis, ® ESRI). La ligne de base « offshore » est une ligne imaginaire de référence permettant de fournir une origine aux transects perpendiculaires aux différents traits de côte (par ex. ici : 1966, 1985, 2009 ; Aubié et al., 2011)

Exemple concret issu du rapport produit par Aubié et al. (2011) : caractérisation de l'aléa érosion (2020-2040) de la côte aquitaine.

Ce dernier s'inscrit dans le cadre de l'étude stratégique de gestion du trait de côte.

Un trait de côte à échéance 2020 est défini comme étant la limite maximale amont où des instabilités (évolution du littoral, mouvements de terrain, etc.) peuvent se produire. Ce trait de côte a été établi à partir du taux d'évolution moyen historique du sommet de falaise entre 1954 et 2009 pour les secteurs à falaise et le haut de plage entre 1954 et 2009 pour les secteurs de plage.

L'outil DSAS d'ArcGis (®ESRI) a été utilisé pour réaliser un calcul statistique des taux d'évolution entre les traits de côte de 1954 et 2009 par transects espacés tous les 10 m (orthogonales au sommet de falaise). À partir de ces résultats et de la connaissance du terrain, un taux d'évolution moyen a été défini par secteur homogène. Ce taux a été appliqué sur chacun des secteurs à partir d'une zone tampon pour extrapoler la position du trait de côte de 2009 à 2020 (Figure 73 et Figure 74).

Cet outil a été utilisé sur la côte aquitaine (côte rocheuse et sableuse) afin de connaître l'évolution historique du trait de côte mais aussi pour en connaître l'évolution future à échéance 2020 et 2040 (Aubié *et al.*, 2011).

Commune	Secteur	Taux évolution (m/an)	Recul extrapolé à 2020 (m)	Largeur maximale sommet de falaise (m)	Position à 2020 par rapport au TC de référence (m)	Type	Source
Anglet/Biarritz	Miramar-VVF	-0,15	-1,65	10	-11,65	falaise	entre 1954 et 2009
Biarritz	Atalaye	0,00	0,00	10	-10,00	falaise	entre 1954 et 2009
Biarritz	Côte des Basques	-0,20	-2,20	10	-12,20	falaise	entre 1954 et 2009
Biarritz	Côte des Basques	-0,50	-5,50	10	-15,50	falaise	entre 1954 et 2009
Biarritz	Grande plage	-0,15	-1,65	0	-1,65	plage	entre 1954 et 2009
Biarritz	Marbella	-0,35	-3,85	10	-13,85	falaise	entre 1954 et 2009
Biarritz	Milady	-0,35	-3,85	0	-3,85	falaise	entre 1954 et 2009
Biarritz	Plage Ibarritz	-0,15	-1,65	0	-1,65	falaise	entre 1954 et 2009
Bidart	Chapelle-Uhabia	-0,05	-0,55	10	-10,55	falaise	entre 1954 et 2009
Bidart	Chemin falaise	-0,20	-2,20	10	-12,20	falaise	entre 1954 et 2009
Bidart	Erretegia sud	-0,20	-2,20	10	-12,20	falaise	entre 1954 et 2009
Bidart	Erretegia-Pavillon	-0,35	-3,85	10	-13,85	falaise	entre 1954 et 2009
Bidart	Ilbarritz golf	-0,20	-2,20	10	-12,20	falaise	entre 1954 et 2009
Bidart	Parlementia	-0,30	-3,30	10	-13,30	falaise	entre 1954 et 2009
Bidart	Plage Uhabia	-0,15	-1,65	0	-1,65	plage	entre 1954 et 2009
Bidart	Uhabia	-0,15	-1,65	0	-1,65	falaise	entre 1954 et 2009
Ciboure	Baie St Jean	-0,15	-1,65	0	-1,65	plage	entre 1954 et 2009
Guéthary	Harotzen-Port	-0,15	-1,65	10	-11,65	falaise	entre 1954 et 2009
Guéthary	Senix nord	-0,15	-1,65	10	-11,65	falaise	entre 1954 et 2009
Hendaye	Baie de Loya	-0,10	-1,10	10	-11,10	falaise	entre 1954 et 2009
Hendaye	Plage Hendaye	-0,15	-1,65	0	-1,65	plage	entre 1954 et 2009
Hendaye	Sainte-Anne	-0,05	-0,55	10	-10,55	falaise	entre 1954 et 2009
St Jean de Luz	Baie St Jean	-0,15	-1,65	0	-1,65	falaise	entre 1954 et 2009
St Jean de Luz	Baie St Jean	-0,15	-1,65	0	-1,65	plage	entre 1954 et 2009
St Jean de Luz	Erromardie plage	-0,15	-1,65	10	-11,65	plage	entre 1954 et 2009
St Jean de Luz	Erromardie sud	-0,15	-1,65	10	-11,65	falaise	entre 1954 et 2009
St Jean de Luz	Lafitenia-Senix	-0,15	-1,65	10	-11,65	falaise	entre 1954 et 2009
St Jean de Luz	Sainte-Barbe	-0,15	-1,65	10	-11,65	falaise	entre 1954 et 2009
Urrugne	Comiche	-0,10	-1,10	10	-11,10	falaise	entre 1954 et 2009

Figure 73 : Taux d'évolution du trait de côte par secteur géomorphologique du littoral des Pyrénées Atlantiques pour 2020 (Aubié *et al.*, 2011)

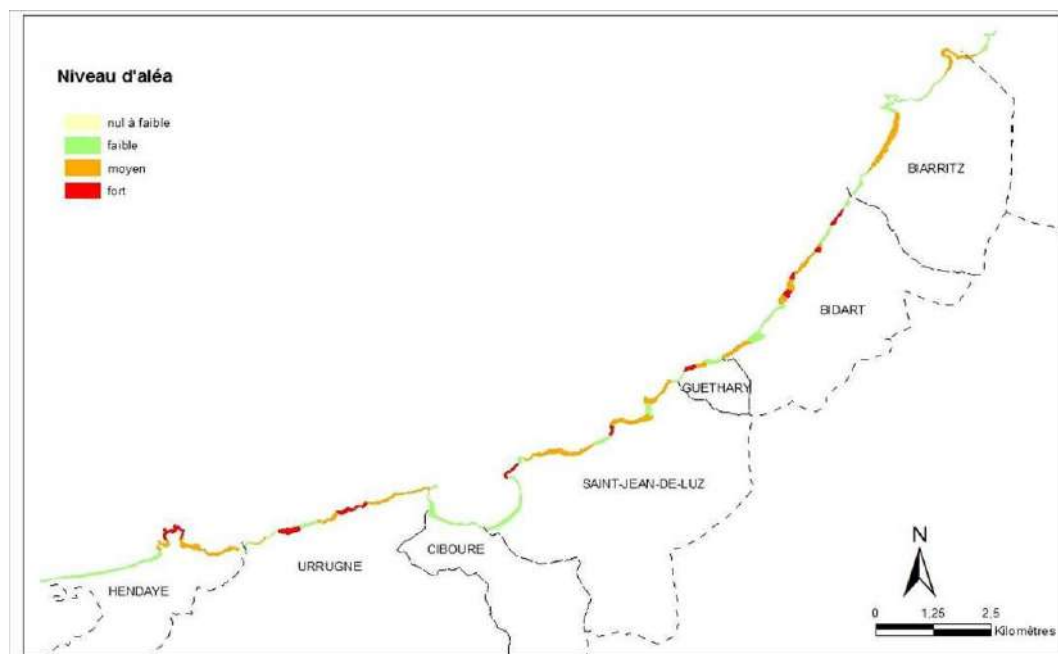


Figure 74 : Cartographie de l'aléa mouvements de terrain et érosion du littoral des Pyrénées Atlantiques à échéance 2020 (Aubié *et al.*, 2011)

5.2.4. Le traitement de l'indicateur du trait de côte sous MobiTC

(D'après Pons et Trmal, 2012).

Le logiciel MobiTC (Mobilité du Trait de Côte) est développé par le CETE Méditerranée et reprend le logiciel DSAS en vue de son amélioration. L'objectif est de travailler sur les indicateurs de position de trait de côte observables sur des photographies aériennes orthorectifiées. La première étape consiste à créer une ligne de base issue du squelette des traits de côte disponibles (squelette des enveloppes), c'est à dire « au milieu » des traits de côte existant, ce qui permet de mieux appréhender des formes complexes comme des pointes, des golfes, des flèches, etc. Des traces perpendiculaires à cette ligne de base sont ensuite créées et leurs intersections avec les traits de côte disponibles font l'objet de traitements statistiques simples comme un coefficient de régression, une régression linéaire et des intervalles de confiance associés. Les résultats sont ensuite convertis sous forme SIG afin de répondre à une visualisation simple de la mobilité du trait de côte (Figure 75). Pour chaque trace, des sorties graphiques de l'évolution du trait de côte sont à prévoir (Figure 76). La projection des traits de côte est aussi disponible en prenant à la fois la projection de la régression linéaire et ses intervalles de confiance.

MobiTC est à ce jour en cours de finalisation et a pour objectif de répondre aux besoins des politiques publiques (gestion du trait de côte et prévention des risques littoraux).

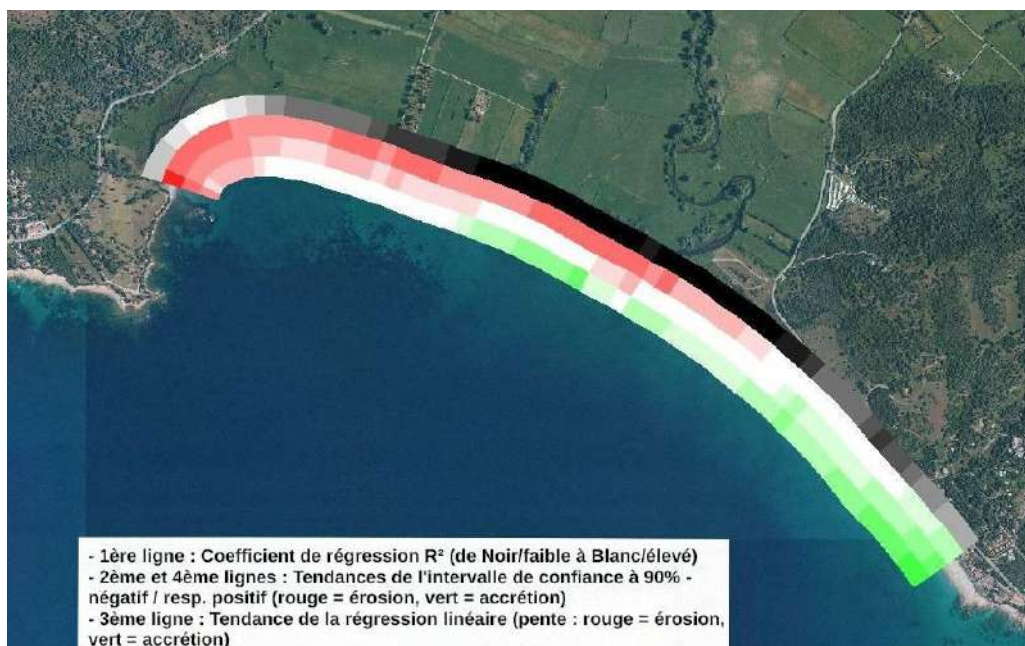


Figure 75 : Représentation de l'évolution du trait de côte par l'outil MobiTC (plage de Taravo, Corse du sud ; © CETE Méditerranée)

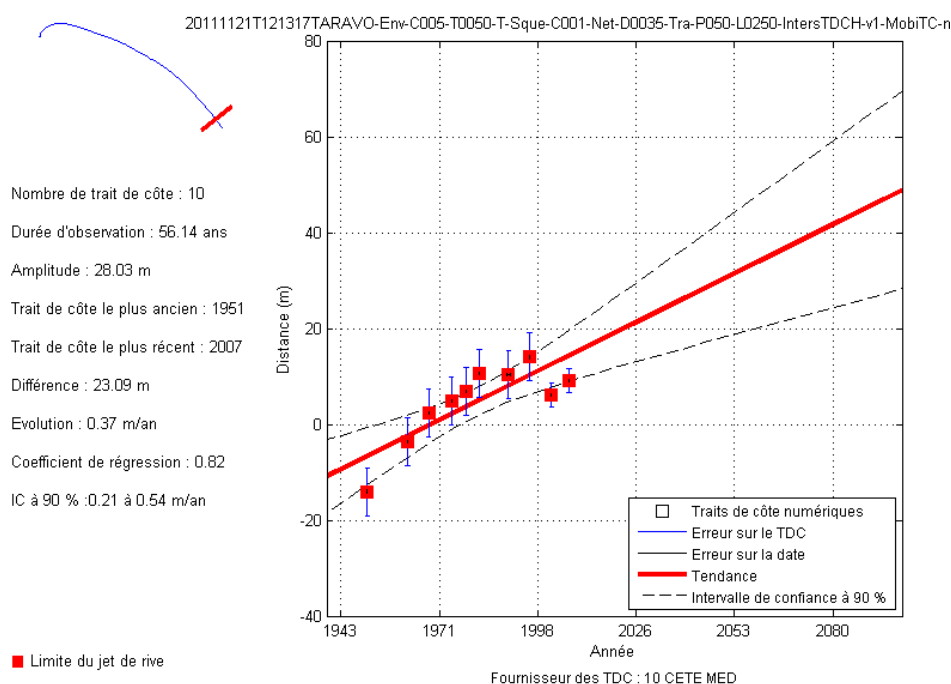


Figure 76 : Interprétation graphique de l'évolution du trait de côte, sur une trace de la plage de Taravo, Corse du sud (© CETE Méditerranée)

5.3. QUE FAIRE DES DONNÉES APRÈS TRAITEMENT ?

Après traitement, les données doivent impérativement être renseignées par des **métadonnées**⁴². Cette étape est primordiale pour faciliter leur archivage numérique, leur catalogage et les échanges entre acteurs (gestionnaires, décideurs, scientifiques, bureaux d'étude, ONG, grand public...).

Le format des métadonnées doit être effectué selon des normes (ISO 19115 et 19139) de manière à garantir leur interopérabilité et à répondre aux exigences de la directive INSPIRE⁴³, élaborée par la Direction générale de l'environnement de la Commission européenne. Cette directive vise à établir en Europe une infrastructure de données géographiques afin d'assurer l'interopérabilité entre les bases de données et faciliter la diffusion, la disponibilité, l'utilisation et la réutilisation de l'information géographique en Europe (d'après le site IGN, d).

Par ailleurs, il est fortement conseillé aux producteurs de données de leur attribuer des formats interopérables (de type WMS et WFS) de manière à faciliter leur mutualisation.

⁴² Par exemple, l'outil GeoSource gratuit permet de créer facilement des métadonnées.

⁴³ <http://inspire.ign.fr/>

6. Le bilan : ultime étape avant de définir une stratégie de levé du trait de côte

Ce chapitre correspond à l'étape 6 (l'étape finale / bilan) de l'organigramme (figure 1).

Cette étape permet à l'utilisateur de vérifier que les choix opérés préalablement notamment en matière d'indicateurs de trait de côte, d'outils de levé et de méthodes de traitement correspondent aux besoins initiaux. Il est ainsi amené à se poser une liste de questions visant à contrôler les décisions ou les analyses effectués lors des précédentes étapes.

Étape 1 : le milieu

Quels sont les agents naturels et/ou anthropiques responsables de l'évolution du trait de côte ? Est-ce que la géomorphologie et la dynamique du secteur ont bien été étudiées ?

Il s'agit de prendre en compte les facteurs responsables de la mobilité du trait de côte (érosion, accrétion, stabilité) ou des risques de submersion et d'avoir une estimation des vitesses d'évolution du trait de côte (connaissance globale du secteur).

Étape 2 : les indicateurs de trait de côte

Est-ce que l'indicateur de trait de côte retenu est bien adapté au secteur d'étude ?

Lors de cette étape, il est important de bien observer le milieu sur lequel on travaille (agents dynamiques dominants, géomorphologie, etc.) de manière à lister les indicateurs de traits de côte et à définir le plus pertinent sur le secteur.

Est-il nécessaire d'envisager plusieurs indicateurs de trait de côte ?

Étape 3 : les besoins

Quelle est la vitesse d'évolution de l'indicateur de trait de côte sélectionné ? (la vitesse d'évolution permet de déterminer quels types d'outils il est préconisé).

Est-ce que les enjeux présents ont bien été identifiés (ils peuvent être de nature économique, environnementale, sociétale, scientifique, etc.) ?

Y-a-t-il des enjeux scientifiques associés (programmes de recherche, etc.) ?

Étape 4 : les méthodes de levé

Est-ce que la précision de l'outil de levé est bien adaptée (suffisante ou au contraire trop précise ?

Est-ce que la fréquence d'acquisition et la durée des suivis conviennent bien au secteur d'étude et à (aux) l'indicateur(s) de trait de côte retenu(s) ?

Est-ce que les techniques retenues représentent bien les phénomènes localisés sur la zone d'étude ?

Est-ce que le ou les indicateurs de trait de côte identifiés à l'étape 2 seront bien mesurés par la méthode de levé sélectionnée ?

Quel est le niveau de connaissance ou d'expertise nécessaire à la mise en œuvre du levé et de traitement associés ? Est-ce que la mise en œuvre de l'outil de levé ne requiert pas un trop haut niveau d'expertise ? Faut-il avoir recours à un expert ?

Est-ce que les coûts correspondent aux besoins et aux enjeux ?

En fonction des objectifs, des enjeux et des moyens, faut-il envisager l'achat ou la location du matériel ou bien avoir recours à des opérations de sous-traitance ?

Étape 5 : les outils et les méthodes de traitement

Est-ce que les méthodes de traitement mettent bien en évidence les phénomènes responsables de l'évolution du trait de côte ?

Le bilan doit prendre en compte les retours d'expériences des premières années de levés et de suivi du trait de côte réalisés dans le cadre de missions antérieures, de manière à améliorer les différentes étapes du guide (prise en compte du milieu, indicateurs préconisés, évolution des objectifs/besoins, choix de l'outil de levé le mieux adapté, méthode de traitement envisagée, etc.).

7. Les études de cas

Des études de cas en France métropolitaine et outre-mer, sont exposées dans cette partie afin d'illustrer des stratégies de suivi du trait de côte déjà mises en œuvre. Ainsi, sont décrits :

- le suivi du trait de côte de la côte sableuse en région Aquitaine par l'Observatoire de la Côte Aquitaine ;
- le suivi du trait de côte de la côte sableuse en région Languedoc-Roussillon par le CEFREM (unité de recherche associée au CNRS) ;
- les suivis des traits de côte du littoral sableux en région Pays de la Loire par l'Observatoire du littoral du Pays de Monts et dans le cadre du programme LITEAU 3 ;
- le suivi du trait de côte des rivages à mangrove en Guyane française par le laboratoire EcoLab (rattaché à l'Observatoire Midi-Pyrénées).

Ces exemples concrets visent à illustrer la mise en application des différentes étapes préconisées dans le présent guide pour réaliser un suivi du trait de côte, telles qu'elles sont synthétisées dans l'organigramme de la Figure 1. Elles permettent d'autre part de présenter différents types d'outils utilisés selon les besoins et les secteurs. En revanche ces études de cas n'ont pas vocation à décliner les stratégies de suivi du trait de côte mise en œuvre par façade littorale ou par observatoire (informations disponibles dans le rapport de Bulteau *et al.*, 2011).

7.1. LA MÉTHODE DE TRAITEMENT DU TRAIT DE CÔTE SOUS SIG SUR LA CÔTE SABLEUSE EN AQUITAINE

(d'après Mugica *et al.*, 2008)

Cette étude a été réalisée par le BRGM dans le cadre du Contrat de Projet État-Région 2007-2013 et fait partie des travaux menés par l'Observatoire de la Côte Aquitaine⁴⁴. Son objectif est de faire une **analyse diachronique** de la côte sableuse en Aquitaine à partir des traits de côte 2006 et 2007.

L'Observatoire de la Côte Aquitaine est un partenariat régional initié en 1996, qui réunit actuellement l'Union Européenne (FEDER), l'Etat, la Région Aquitaine, les Conseils Généraux de la Gironde, des Landes et des Pyrénées Atlantiques, le Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon (SIBA), le BRGM et l'ONF.

Il a pour objectif principal de mettre à disposition des acteurs du littoral, un outil d'aide à la décision et à la gestion du milieu (mise en place d'un réseau de mesures, analyses en lien avec la recherche fondamentale, développement d'un SIG, diffusion et communication de l'information et expertises).

Acteur incontournable, il traite de nombreuses thématiques sur l'ensemble du littoral aquitain. Il met en place des suivis pertinents concernant la côte sableuse pour la compréhension de l'évolution du trait de côte :

⁴⁴ <http://littoral.aquitaine.fr/Organisation-et-missions.html>

- suivi annuel du trait de côte ;
- suivi annuel des entailles d'érosion marine ;
- suivi annuel de l'état géomorphologique des plages ;
- suivi annuel de l'état géomorphologique du contact plage/dune ;
- suivi des transects plage/dune de la faune et de la flore tous les 2-3 ans ;
- suivi du gravelot à collier interrompu tous les 2-3 ans ;
- suivi annuel par photos aériennes obliques.

Ces suivis assurent une connaissance complète du secteur (étude de la sensibilité du littoral). L'Observatoire prévoit ainsi un module d'expertises (et avis techniques) spécifique pour la gestion du littoral. Il assure la collecte de données et joue un rôle dans la diffusion et la communication de l'information.

Pour la côte rocheuse aquitaine, l'Observatoire met en place d'autres types de suivis (mouvements de terrain, piézométrie, inclinomètre, scanner 3D, télédétection, etc.).

Étape 1 : le milieu

La côte sableuse aquitaine s'étend sur 230 km entre la Gironde et l'Adour. Elle comprend des plages et des grands cordons dunaires et se situe dans un environnement macrotidal soumis à l'érosion (en moyenne de 1 à 3 m/an pouvant atteindre plus de 5 m/an pour certains secteurs).

Les plages de la côte aquitaine présentent des morphologies différentes en raison de leur particularités géographiques (portions linéaires, pointes, baies, estuaires) et de la présence d'ouvrages (épis, digues, etc.). En période de sédimentation, des banquettes et des avant-dunes se développent en haut de plage et sont accompagnées d'une avancée du trait de côte. En période à budget sédimentaire équilibré, ces avant-dunes sont stables. Quand le bilan sédimentaire est négatif, les avant-dunes sont absentes ou bien en cours de destruction par les vagues. Les figures d'érosion sont caractérisées par des entailles au niveau des dunes sous forme de falaises vives.

La dynamique sédimentaire du système plage-dune sur la côte aquitaine est intimement liée à l'action conjuguée de la houle, des marées et du vent.

Étape 2 : les indicateurs de trait de côte

Divers indicateurs de trait de côte peuvent être préconisés : le pied de dune, la limite de végétation, la crête de dune, la berme, etc. L'indicateur retenu dans cette étude est le pied de dune. En effet, il répond à des critères géomorphologiques permettant de cartographier facilement les limites estran-dune en Aquitaine à partir d'observations et de mesures de terrain, de l'analyse et de l'interprétation d'images aériennes ou spatiales. À l'échelle du temps, cet indicateur est également un marqueur durable. En présence d'ouvrage, c'est la limite marine de l'ouvrage qui est relevée.

Étape 3 : les besoins

Dans le cadre de la mission, l'objectif était notamment d'effectuer des profils de plage transversaux, des levés du trait de côte, des suivis réguliers et précis du réseau des bornes implantées sur tout le long du littoral aquitain.

Étape 4 : les méthodes de levé

Un réseau de bornes datant des années 1990 est maintenu par l'ONF avec l'appui du BRGM dans le cadre de l'Observatoire de la Côte Aquitaine (elles s'étendent de la Pointe de Grave à l'Adour). Ces bornes sont référencées à l'aide d'un DGPS Trimble 5700 et R6. Ainsi, le trait de côte est régulièrement mesuré de façon annuelle au minimum au printemps après les périodes d'érosion hivernales. Différentes techniques sont couplées.

La résolution des levés pour les suivis du trait de côte et des transects varie de 2 m à 10 m. Les transects sont définis par une ligne imaginaire passant par un couple de bornes géodésiques. Il y a 24 transects en Gironde soit à peu près 1 transect tous les 5 km, et 29 dans les Landes soit 1 transect tous les 5 km.

Les suivis s'effectuent :

- par DGPS : précision centimétrique et suivis réguliers de l'état du réseau des bornes ;
- par analyse d'images aériennes planes - ORTHOLITTORAL 2000, BD-Ortho, IGN ® - et spatiales - FORMOSAT-2 et SPOT-5 - permettant de disposer de couverture rapide de zones étendues et d'une résolution fine ainsi que de prises de vues aériennes obliques (au cours d'un survol annuel de la côte aquitaine) ;
- par analyse de données LiDAR issues de Litto3D (levé programmé en 2011-2012) : mise en jeu du volume sédimentaire. Il donne une information plus exhaustive tridimensionnelle.

Étape 5 : les outils et les méthodes de traitement

Les données acquises par DGPS et extraites des images satellites sont importées sous le logiciel ArcGis® (SIG). Les fonctionnalités des zones tampons sont utilisées afin de tracer l'évolution du trait de côte. Pour ce faire, des bandes parallèles de largeur fixe sont créées de part et d'autre du trait de côte de référence (ici, le plus ancien a été choisi). L'évolution entre un trait de côte récent et ancien est représentée grâce à un code couleur (Figure 77). À chacune de ces bandes est associée une classe de couleur représentant un déplacement positif ou négatif par rapport au trait de côte de référence. L'intersection du trait de côte récent avec la zone tampon permet de distinguer les portions en avancée et les portions en recul par rapport au trait de côte ancien. Sur une carte, des tronçons de couleurs différentes représentent l'éloignement du trait de côte le plus récent par rapport à celui le plus ancien (chaque couleur représente une classe de distances).

L'évolution du trait de côte sur plusieurs années peut également être représentée d'une autre manière (Figure 78) : le trait de côte est visualisé en portions linéaires de 1 km. Pour chaque portion, les entailles d'érosion marine du pied de dune, sont relevées au GPS après chaque événement et sont classées par année. Le ratio, I (entaille) / 1 km, est calculé puis projeté (sur la carte géoréférencée). Les différents traits de côte sont alors juxtaposés montrant l'occurrence des phénomènes d'entaille d'érosion au cours du temps.

Étape 6 : le bilan

Dans cet exemple, les marges d'erreurs liées au levé du trait de côte par DGPS et images satellitaires (FORMOSAT-2) sont respectivement de 5 à 20 cm et de 5 à 10 m (Mallet *et al.*, 2007). De ce fait, l'écart mesuré entre les traits de côte 2006 et 2007 ne sera significatif que s'il est supérieur à 10 m. C'est pourquoi, les variations du trait de côte comprises entre 0 et 15 m et entre 0 et -15 m sont considérées comme stables et non pas comme des avancées ou des

reculs (Figure 77). En Gironde, deux secteurs se distinguent par des tendances d'évolutions opposées. De Soulac à Lacanau, on observe un recul du trait de côte, alors qu'entre le sud de Lacanau et le Cap-Ferret, on constate une stabilité, voire une avancée du trait de côte. Sur la Figure 77, on peut observer une différence de 70 m sur certains sites (± 15 m) alors qu'en moyenne sur l'ensemble du linéaire côtier, le recul peut aller jusqu'à 5 m/ an.

NB : trait de côte 2006 : issu des levés DGPS ; trait de côte 2007 : issu des images satellitaires FORMOSAT-2.

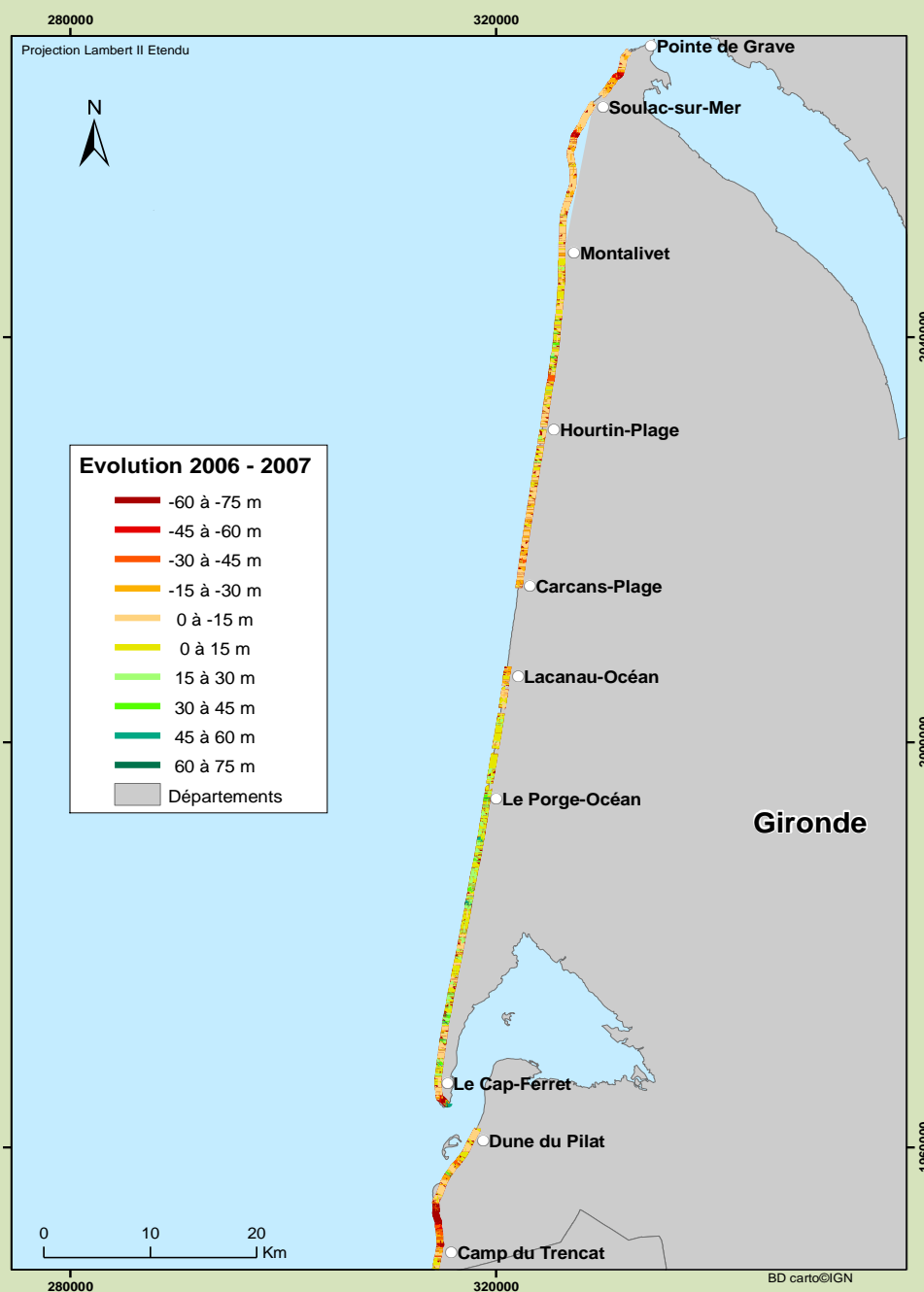


Figure 77 : Evolution du trait de côte girondin entre 2006 et 2007 (Mugica et al., 2008)

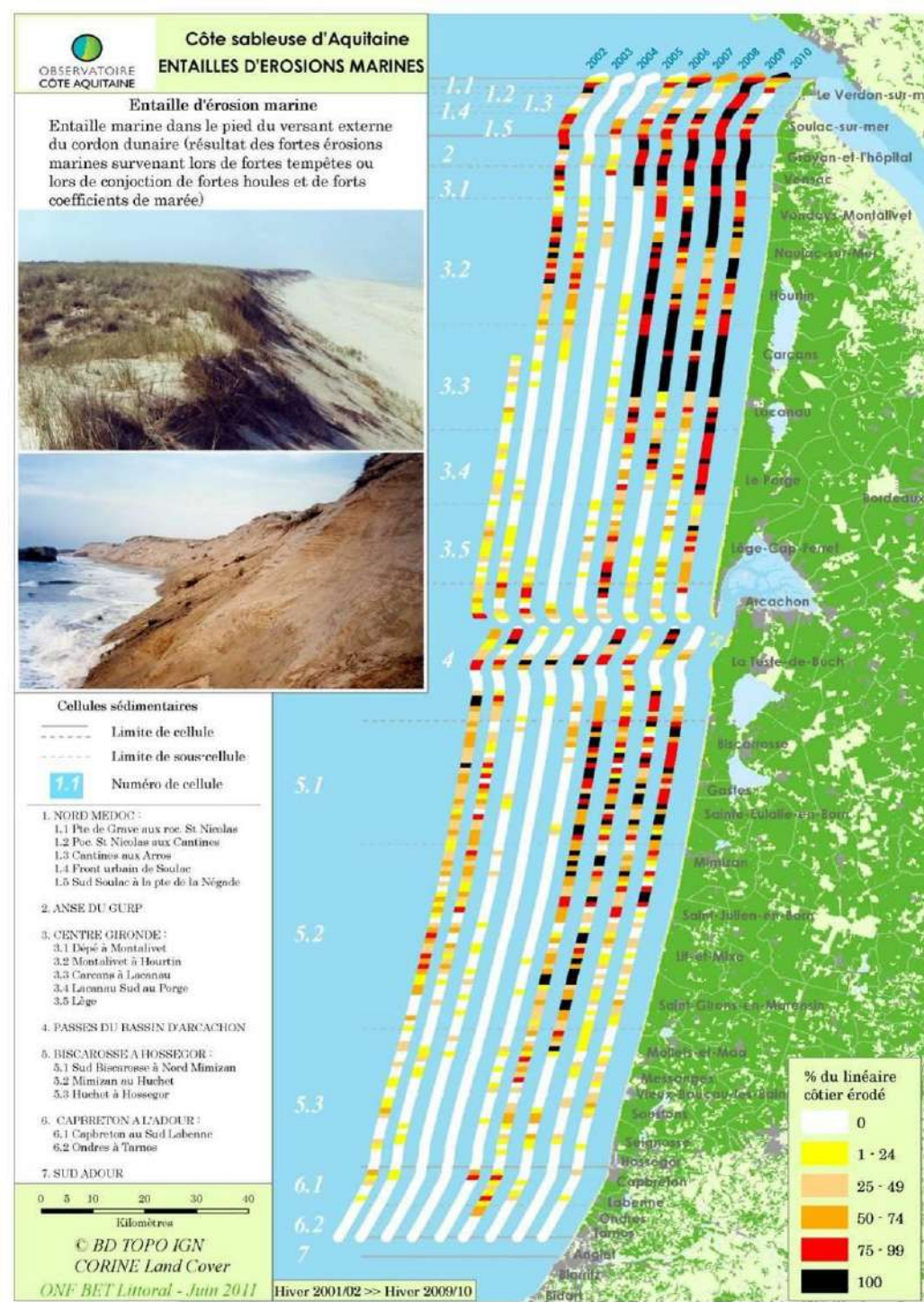


Figure 78 : Représentation de l'évolution de l'érosion littorale sur la période 2002-2011 (© ONF)

7.2. APPORT DE LA SISMIQUE TRÈS HAUTE RÉOLUTION ET DU LIDAR DANS LE SUIVI DU TRAIT DE CÔTE DU LITTORAL SABLEUX AU LANGUEDOC-ROUSSILLON

(d'après Certain *et al.*, 2011)

Le groupe LMUSCA (Littoral Multi-Scale Analyses) du CEFREM met en avant l'apport de la sismique très haute résolution ainsi que le LiDAR dans le suivi du trait de côte de la côte sableuse méditerranéenne. Un des objectifs de ce suivi est de quantifier les volumes sableux présents sur l'avant-côte (la perte de sédiments au niveau de l'avant-côte est une des principales causes de l'érosion des plages sableuses). Les finalités de ces suivis sont orientées vers des programmes de recherche appliqués à la gestion du littoral et à l'établissement d'un Plan de Gestion des Sédiments pour les collectivités locales littorales de Languedoc-Roussillon.

Le CEFREM (CEntre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéens) de l'Université de Perpignan, créé en 1997⁴⁵, est une unité de recherche associée au CNRS (UMR 5110). Son activité de recherche est focalisée sur le thème des transferts de matière et d'énergie aux interfaces du système côtier, ce qui comprend les échanges physiques des masses d'eau, des particules et des éléments. Toute cette activité se déroule dans le cadre de programmes internationaux, nationaux et régionaux.

Étape 1 : le milieu

Le secteur d'étude se situe en Languedoc-Roussillon, au Sud-est de la France, au niveau du lido de la lagune de Thau. La zone d'étude se situe dans un environnement microtidal. L'érosion est très forte sur ce secteur (recul de 1 m en moyenne par an - *sensu-stricto* la perte de volume sédimentaire) : le secteur est soumis aux attaques répétées de la houle, des vagues. Les cordons dunaires présents sur le secteur sont soit fortement dégradés par les activités anthropiques soit menacés par l'érosion (déficit d'apports en sédiments provenant notamment de l'avant-côte). Les enjeux présents à proximité sont surtout socio-économiques.

Étape 2 : les indicateurs de trait de côte

Plusieurs indicateurs peuvent être préconisés : le pied de dune, la berme de basse plage, le talus de collision (rupture de pente) ou encore la limite instantanée du jet-de-rive. L'indicateur de trait de côte retenu ici est le talus de collision (limite entre la plage immergée et émergée). C'est un bon marqueur de l'évolution du disponible sédimentaire de l'avant-côte.

Étape 3 : les besoins

Le trait de côte n'est pas toujours le reflet direct de l'érosion, ni des phénomènes de submersion. Il est donc essentiel de chercher à quantifier les volumes sableux présents sur l'avant-côte : le « disponible » sédimentaire. Il s'agit de l'épaisseur de sédiment entre la surface et le fond rocheux « dur » gagnés ou perdus dans le but d'estimer l'évolution de la frange côtière.

⁴⁵ Créé en 1963 autour d'un noyau de géologues et de sédimentologues, le laboratoire s'est progressivement ouvert à la pluridisciplinarité. Cette évolution s'est concrétisée, en 1997, par la création du CEntre de Formation et de Recherche sur les Environnement Méditerranéens (CEFREM).

Étapes 4 et 5 : les méthodes de levé et les outils et les méthodes de traitement

Afin de compléter les levés de la partie terrestre (utilisation du DGPS), des levés en mer sont recommandés afin de comprendre l'évolution du volume sédimentaire.

La sismique permet l'identification des paléo-lagunes sur l'avant-côte comme marqueurs de l'évolution des lidos. Elle permet, d'une part, de décrire le cadre millénaire de la mise en place et de l'évolution des prismes sableux, et d'autre part, elle permet un diagnostic précis sur les volumes totaux constitutifs du disponible sédimentaire.

Cependant, cette méthode doit être couplée et comparée avec d'autres afin d'être exploitée au maximum. Par exemple, le LiDAR aéroporté (Figure 79, Figure 80 et Figure 81) est utilisé. Bien que les méthodes de levé en mer et par le LiDAR soient effectuées avec des précisions et des fréquences différentes, leur couplage permet d'obtenir une analyse synoptique plus complète du système côtier terre-mer.

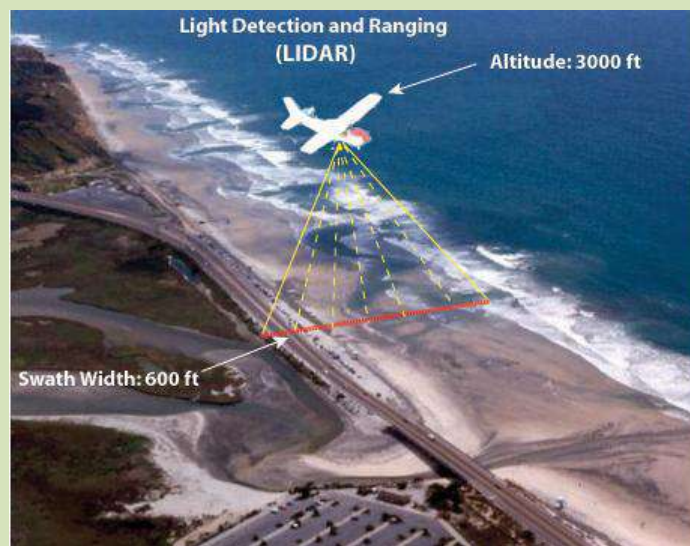


Figure 79 : Apport d'un nouvel outil, le LiDAR aéroporté bathymétrique LADS Mk II (Certain et al., 2011)

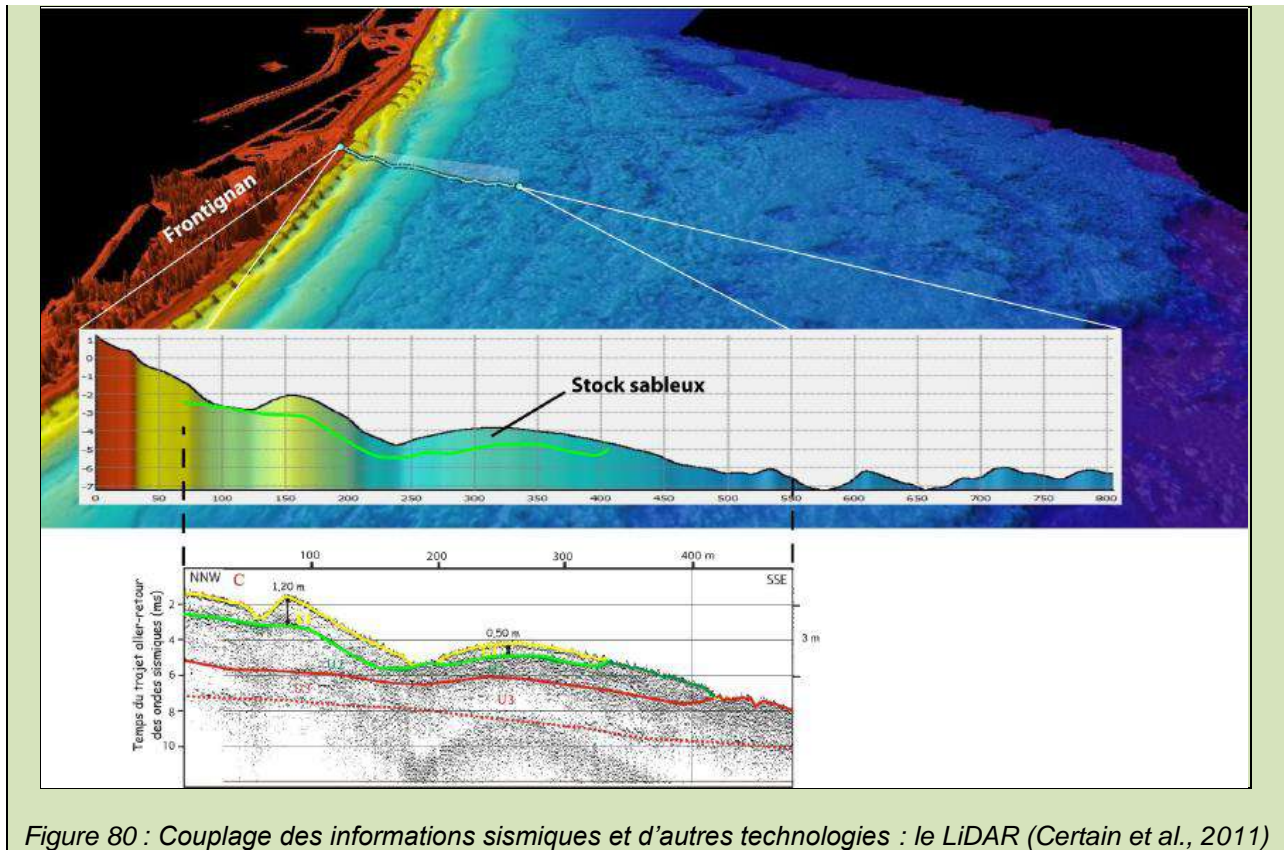


Figure 80 : Couplage des informations sismiques et d'autres technologies : le LiDAR (Certain et al., 2011)

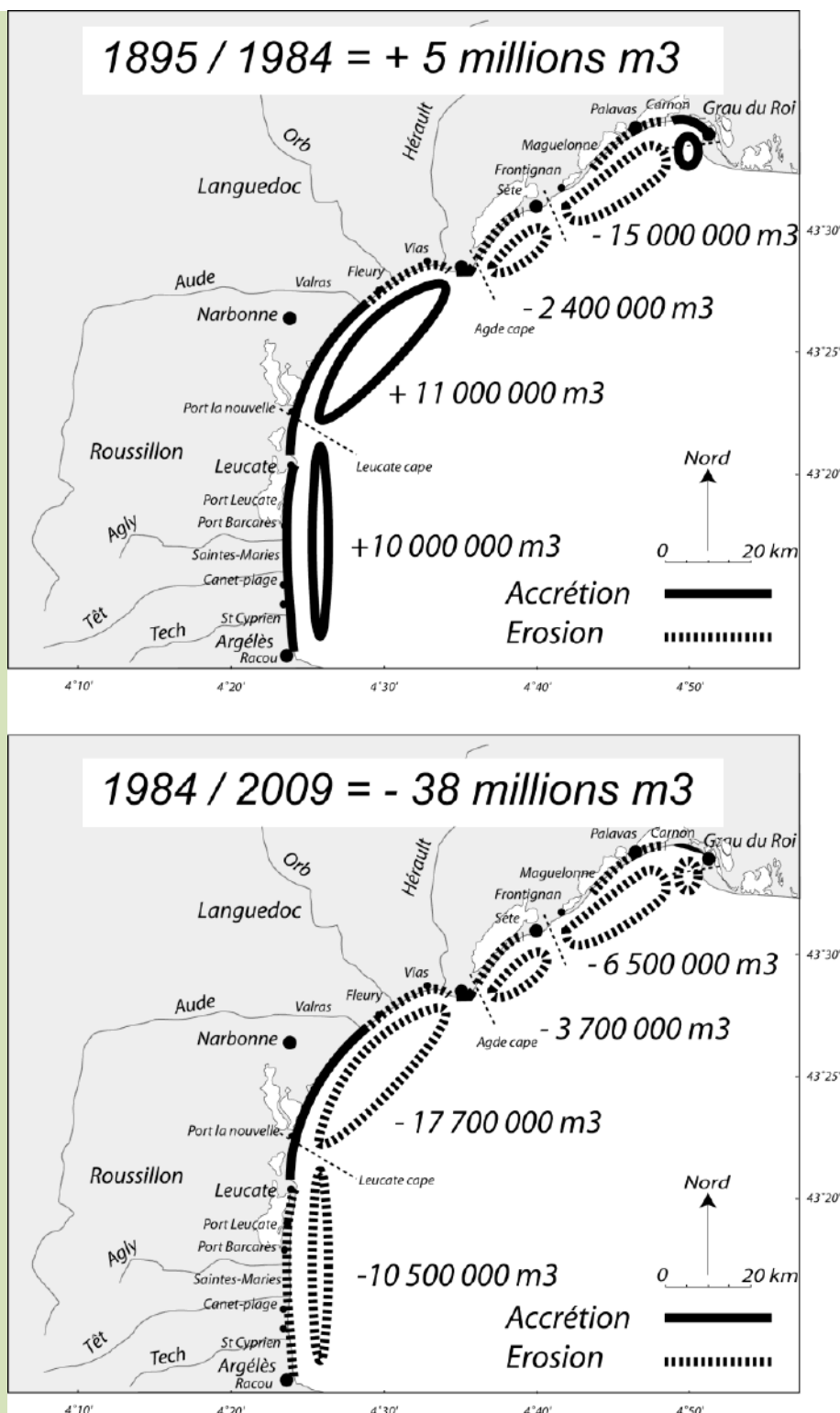


Figure 81 : Bilans sédimentaires séculaires à partir de cartes bathymétriques anciennes (SHOM) et du LiDAR (Certain et al., 2011)

Étape 6 : le bilan

Ces outils (la sismique, le LiDAR aéroporté ou encore le DGPS) déterminent avec « précision » l'évolution des lidos. Ils permettent d'analyser le volume sédimentaire et ainsi d'en déduire les évolutions (pertes – érosion, apports – accrétion).

La combinaison des outils est une solution efficace et complète (analyse côté mer et côté terre) pour la compréhension de l'évolution du milieu (actuellement, l'évolution est vers la tendance érosive).

La sismique permet d'effectuer des suivis uniquement à long terme (échelles pluri-décennale). Elle permet de décrire le cadre millénaire de la mise en place des prismes sédimentaires et peut ainsi être le support de plans de gestion des sédiments côtiers.

Cette étude s'inscrit à l'interface entre la recherche fondamentale des processus sédimentaires littoraux et la recherche appliquée et opérationnelle à des fins de gestion. Cet exemple illustre l'intérêt des programmes de recherche scientifique sur le littoral et les possibilités d'application dans le cadre d'une stratégie de suivi du trait de côte. Outre les connaissances scientifiques développées dans ces programmes, ceux-ci permettent de développer les méthodes et techniques (outils) de suivi adaptés au littoral.

7.3. EXPLOITATION D'UNE COLLECTION DE TRAITS DE CÔTE EN RÉGION PAYS DE LA LOIRE : STATISTIQUES PAR TRANSECT

(d'après Juigner *et al.*, 2012)

Une analyse de l'évolution des plages sableuses du Pays de Monts (Vendée) - entreprise dans le cadre de l'Observatoire du littoral du Pays de Monts (OPM) en partenariat avec la Communauté de Communes du Pays de Monts, l'Université de Nantes, le BRGM et l'ONF – a été faite entre 1920 et 2009. Cette étude permet d'apporter une base d'observation en matière de gestion prévisionnelle des risques littoraux liés au recul du trait de côte dans le Pays de Monts. Des collaborations existent entre l'Observatoire du Pays de Monts et l'Observatoire de la Côte Aquitaine pour échanger des protocoles, expertises, savoir-faire, etc.

L'Observatoire du littoral du Pays de Monts, créé en 2010, est mis en œuvre par l'ONF, l'Université de Nantes et le BRGM. Il a pour objectif de caractériser et *in fine* de prévenir les risques littoraux sur les côtes nord-vendéennes. De la dégradation de la dune en passant par l'érosion du trait de côte, le champ d'action de cet observatoire est très varié.

Son rôle est d'étudier les phénomènes d'érosion et d'accumulation et proposer des solutions durables en termes d'aménagements côtiers.

Étape 1 : le milieu

Les plages sableuses du littoral vendéen se situent dans un environnement macrotidal. Elles sont bordées par de grands cordons dunaires (succession dunes blanches / dunes grises / dunes boisées) qui protègent des marais rétro-littoraux. Le recul du trait de côte est plus rapide depuis ces dernières années (> 1m / an dans certains secteurs) : on constate en effet que les dunes sont soumises à une érosion marine plus forte causée par une surélévation du plan d'eau à l'occasion des coïncidences plus fréquentes entre marées hautes et tempêtes (étude réalisée sur la période 1999-2010).

Les enjeux sont principalement touristiques et patrimoniaux.

Étape 2 : les indicateurs de trait de côte

Divers indicateurs de trait de côte peuvent être préconisés : le pied de dune, la limite de végétation, la crête de dune, la berme, etc. Les indicateurs de trait de côte retenus ici correspondent au contact plage/dune (pied de dune).

Ces derniers sont bien adaptés car ils permettent de cartographier facilement la limite estran-dune à partir de l'analyse de photographies aériennes.

Étape 3 : les besoins

Une analyse de la dynamique du trait de côte doit être faite afin de montrer l'évolution des indicateurs sur le long terme (89 ans), notamment dans le but de connaître l'évolution du trait de côte et de prévenir contre les risques littoraux. Dans cette étude, il est question d'utiliser des données anciennes et récentes (comparaison des traits de côte d'années différentes – de 1920 à 2009) et de les exploiter (morphodynamique historique du secteur).

Étape 4 : les méthodes de levé

Les **orthophotographies** de 1920, 1950, 1971, 2000, 2001, 2006 et 2009 sont utilisées dans cette étude. Ces années correspondent aux données récoltées auprès des partenaires de l'OLPM. Les échelles de ces photographies sont comprises entre le 1:25000 et le 1:30000. Après numérisation et géoréférencements précis, les traits de côte ont été digitalisés par photo-interprétation assistée. Les données alimentent le SIG OLPM.

Étape 5 : les outils et les méthodes de traitement

Les traits de côte ainsi acquis sont intégrés dans une Géodatabase exploitée avec le Digital Shoreline Analysis System v.4.0 (DSAS). Le tracé à intervalle régulier (50 m) de transects perpendiculaires à une ligne de base et les intersections générées avec chaque trait de côte permettent au DSAS de calculer la distance entre chaque intersection. Les calculs statistiques du DSAS retenus pour l'étude sont les méthodes End Point Rate (EPR) et Linear Regression Rate of Change (LRR) lesquelles expriment un taux en m/an pour chaque transect. L'EPR décrit une tendance entre deux dates tandis que le LRR donne un taux d'évolution multi-date moyen intégrant les diverses tendances d'évolution aux divers pas de temps.

La spatialisation des tendances d'évolution est ainsi mise en évidence et il devient possible de segmenter longitudinalement la côte selon des tendances globales. La Figure 82 illustre cette segmentation après discrétisation (par écart-type) des EPR en sept classes, où la classe centrale (en vert) traduit une relative stabilité. La moyenne des EPR par segment permet ensuite de synthétiser et analyser l'information.

Étape 6 : le bilan

Cette figure renseigne sur la morphodynamique historique du secteur d'étude selon divers rythmes (suivis sur le long terme à partir des orthophotographies) et apporte une base d'observation en matière de gestion prévisionnelle des risques littoraux liés au recul du trait de côte dans le Pays de Monts.

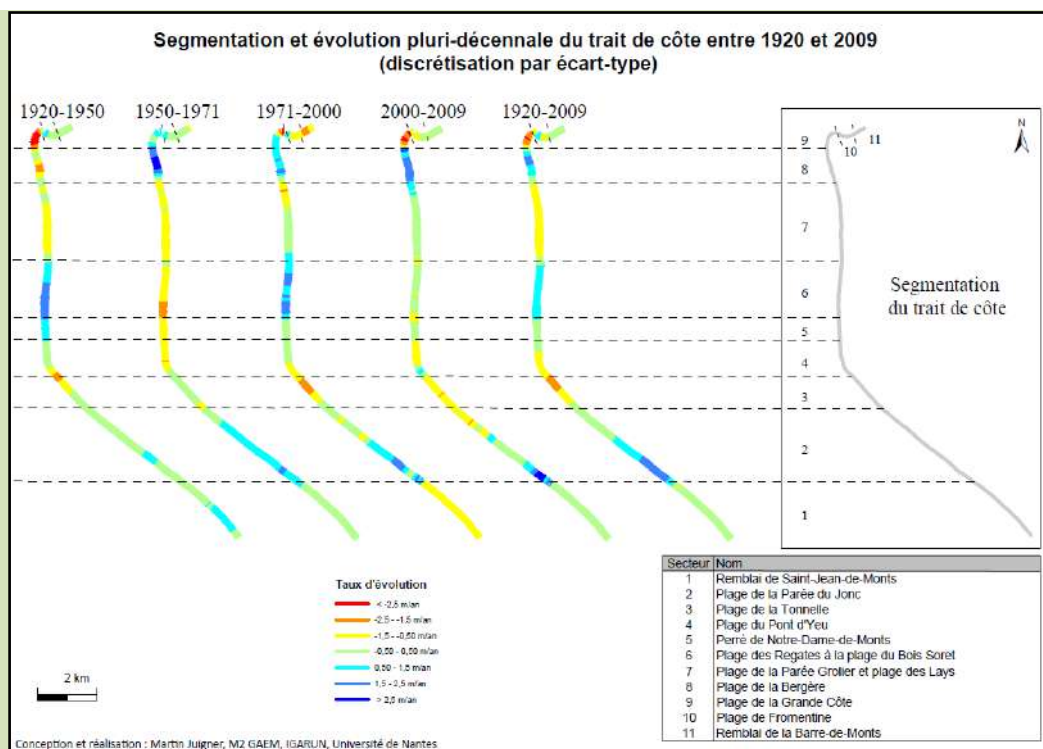


Figure 82 : Segmentation et évolution pluri-décennale du trait de côte entre 1920 et 2009 (Juigner, 2012)

7.4. EXTRACTION DES TRAITS DE CÔTE PAR L'UTILISATION DU LIDAR EN RÉGION PAYS DE LA LOIRE (ZONE DE LA TRESSON, NOIRMOUTIER)

(d'après Robin *et al.*, 2012)

Une analyse de l'évolution de la plage sableuse de la zone de la Tresson en Vendée a été faite entre 2008 et 2010. Deux campagnes LiDAR ont été exploitées dans le cadre du programme LITEAU 3 « Multidune » : celle de 2010 correspondant à Litto3D et celle de 2008 acquise dans le cadre d'un programme de la région Pays de Loire (Programme Gerrico). Cette étude permet de comparer l'évolution des indicateurs de position du trait de côte dans ce secteur (issus du LiDAR avec d'autres outils de levés) et aussi d'analyser les volumes de sédiments.

Depuis 1998, le programme LITEAU constitue l'action de recherche du ministère en charge du Développement durable pour soutenir le développement de connaissances, méthodes et pratiques scientifiques utiles à la définition et à la mise en œuvre d'actions collectives et de politiques publiques sur le littoral dans une optique de développement durable. Le programme LITEAU a connu trois phases successives (I, II et III) et a abordé 12 thématiques au travers de plus de 70 projets (gestion intégrée de la mer et du littoral, risques, vulnérabilité et adaptation, espaces protégés et aires marines protégées, etc.).

Étape 1 : le milieu

L'île de Noirmoutier est basse et très exposée aux tempêtes. Les rivages tournés vers l'ouest (dont la zone de la Tresson) sont les plus exposés en raison du vent et de la houle dominants. L'île est exposée à l'érosion et à la submersion.

La plage sableuse de la zone de la Tresson, présente dans un environnement macrotidal, se situe dans une zone assez stable sur le long terme autour de laquelle des zones d'érosion au nord et d'accrétion au sud sont observées. La dune de la Tresson (classée espace naturel sensible par le conseil général de la Vendée) s'étend sur plusieurs centaines de mètres et se situe dans un secteur très touristique. Elle comprend la dune blanche mobile, l'arrière-dune grise (souvent menacée par les activités humaines) et quelques dépressions humides intra dunales. Les dunes sont assez élevées (15 m max.) et ont un rôle de protection contre les submersions marines.

Les enjeux principaux sont patrimoniaux et touristiques.

Étape 2 : les indicateurs de trait de côte

Divers indicateurs peuvent être préconisés pour les plages sableuses (pied de dune, limite de végétation, berme, etc.). Cependant, trois limites (indicateurs) sont souhaitées en complément des traits de côte extraits des photographies aériennes ou des images satellitales et des mesures *in situ* :

- l'isohypse correspondant au 0 m du NGF, qui dépend de la morphologie de la plage au moment du survol et des conditions de mobilité sédimentaire de la zone intertidale dans les jours précédents ;
- le contact plage/dune correspondant au pied de dune (marqueur durable dans le temps), qui est caractérisé par une rupture de pente entre la plage et la dune ;
- le pied de la berme de plage, lorsqu'elle existe et est visible, qui peut être topographiquement moins marquée.

Ces indicateurs sont des marqueurs représentatifs du milieu et leurs suivis permettent une analyse complète de l'évolution du trait de côte.

Étape 3 : les besoins

Ces indicateurs nécessitent d'être levés par des outils offrant une très bonne précision, une couverture rapide de larges zones et une cartographie continue topographique du littoral, de l'eau à la terre ferme.

Étape 4 : les méthodes de levé

Les trois indicateurs de traits de côtes précédemment décrits ont été extraits par l'utilisation du LIDAR (en complément des traits de côte extraits des photographies aériennes, des images satellitales, des mesures *in situ*).

La marge d'erreur en Z des levés LiDAR comparés à un levé effectué avec un GPS différentiel dans ce secteur de l'île de Noirmoutier est inférieure à 20 cm (comparaison d'un levé DGPS et du LiDAR au niveau de la voirie sur l'ensemble du réseau du secteur – information donnée par Martin Paillart, Observatoire du Littoral, Communauté de Communes de l'île de Noirmoutier).

Étape 5 : les outils et les méthodes de traitement

Deux modèles numériques de surface ont été calculés par krigeage (méthode d'interpolation) avec un pas d'échantillonnage en XY de 1 m.

Lors des traitements, les trois limites ont été extraites différemment.

L'isohypse correspondant au 0 m du NGF est extraite directement à partir du modèle numérique de surface comme toute courbe de niveau.

Pour le contact plage/dune correspondant au pied de dune, un simple calcul de pente (dérivée première) permet de l'extraire. Il coïncide ici approximativement avec la limite de végétation dunaire.

Le pied de la berme de plage est cependant, plus difficile à extraire à partir de la seule pente car il peut être moins marqué. Il peut être mis en évidence par la dérivée seconde (concavité - même légère - du pied de berme). La contrepartie est que la dérivée seconde est très sensible au bruit et qu'il faut bien adapter le seuillage de cette dérivée et lisser si nécessaire le modèle d'élévation avant le calcul. Dans cet exemple, il n'y a pas de berme significative sur le levé de 2010 et seule la berme de 2008 est particulièrement visible.

Étape 6 : le bilan

La Figure 83 ci-après représente ces diverses limites aux deux dates disponibles. La précision du LiDAR met en évidence une mobilité sédimentaire conforme à l'attendu dans ce secteur côtier par d'autres moyens d'investigations terrestres - tendance globale à l'engraissement sur l'ensemble du secteur avec une augmentation vers le sud-est - (figure réduite : combinaison des deux dérivées et trace du pied de la berme principale au niveau de la flèche en 2008).

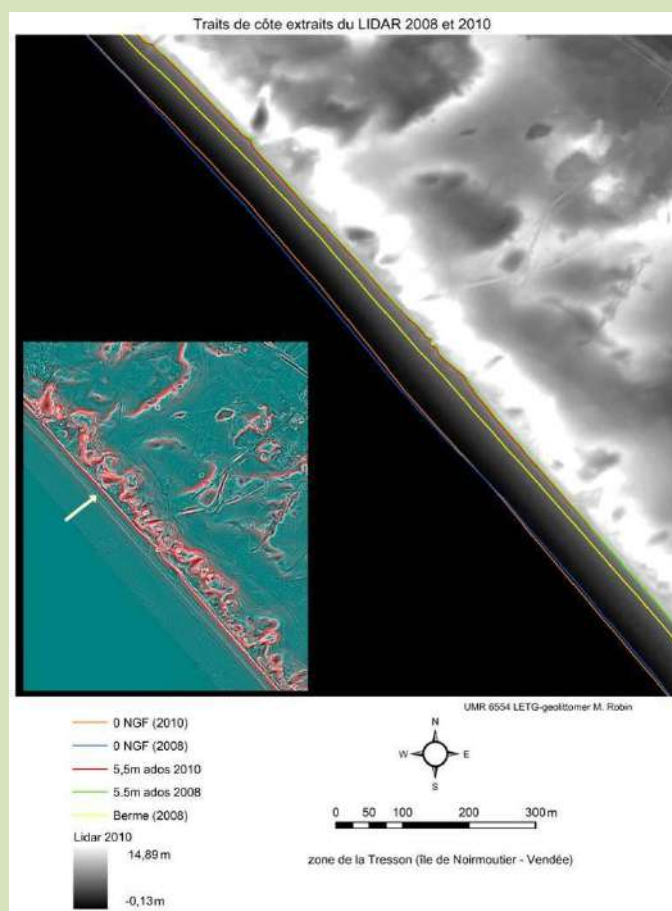


Figure 83 : Traits de côte extraits du LiDAR 2008 et 2010 (Robin, 2012)

7.5. LE SUIVI DU TRAIT DE CÔTE DES RIVAGES À MANGROVE EN GUYANE FRANÇAISE

(d'après Walcker *et al.*, 2011)

Une étude de l'évolution du trait de côte en Guyane a été réalisée sur plusieurs années faisant l'objet des travaux de thèse de Romain Walcker en 2011 (EcoLab/CEREGE/LOG/AMAP).

EcoLab – Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement, créé en janvier 2007, est une unité mixte de recherche (UMR 5245) du CNRS, de l'Université Paul Sabatier–Toulouse III et de l'Institut National Polytechnique de Toulouse. Il est l'un des six laboratoires de l'Observatoire Midi-Pyrénées et est rattaché à l'école doctorale Sciences De l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace.

Le laboratoire traite de thèmes majeurs comme le rôle de la biodiversité dans les fonctions des écosystèmes, la modélisation de la structure et du fonctionnement des écosystèmes, la restauration des milieux naturels, etc.

L'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP), créé en 1985, est un Observatoire des Sciences de l'Univers (OSU) et une composante de l'Université Paul Sabatier. Cette structure fédérative regroupe 8 laboratoires de recherche, sous multi-tutelles : CNRS, MEN, IRD, CNES, et œuvre dans tous les domaines des Sciences de l'Univers, planète Terre et Environnement.

La mission principale de l'OMP est la réalisation d'observations continues et systématiques de la Terre et de l'Univers. Pour ce faire il s'est spécialisé dans le développement et l'utilisation d'instrumentations spatiales, de modélisations numériques et de bases de données spatiales et environnementales.

Étape 1 : le milieu

Le trait de côte guyanais se caractérise majoritairement par ses rivages à mangrove (environ 80%) associés aux bancs de vase. Ces rivages sont caractéristiques de la dynamique littorale sous influence amazonienne. Les rivages sableux occupent un faible espace (environ 20%) et sont généralement colonisés par des hypomées⁴⁶. Ces deux types de rivages sont soumis aux changements récurrents induits par l'action du système de dispersion amazonien. Ce dernier génère à l'interface terre-océan un « remodelage incessant du trait de côte » et induit pour la mangrove des stratégies de fonctionnement et d'évolution originales (phases d'accrétion et périodes d'érosion).

Étape 2 : les indicateurs de trait de côte

Deux indicateurs peuvent être préconisés : la limite d'arrière-mangrove et la limite du front de mangrove. L'indicateur retenu pour cette étude est la limite de front de mangrove. Cette dernière est plus aisément identifiable sur les photographies aériennes et satellites, et s'affranchit des problèmes de marées. Cette limite constitue un **indicateur** indirect puisque que c'est la **mangrove**, en tant que formation végétale, qui est délimitée et non le marais.

⁴⁶ Plantes.

Étape 3 : les besoins

Les milieux tropicaux, en particulier les mangroves, limitent l'utilisation de certains outils de levé du trait de côte. Cependant, certaines méthodes de suivi sont très bien adaptées à ce type de milieu (telle que la télédétection). Il s'agit ici d'étudier l'évolution du trait de côte sur plusieurs années (suivis à intervalles de temps réguliers – de 5 à 10 ans). En raison d'une évolution forte du milieu, les outils doivent permettre de couvrir de larges zones assez rapidement avec une précision (ou résolution) acceptable.

Étape 4 : les méthodes de levé

Les photographies aériennes ainsi que les images satellites sont utilisées dans le suivi du trait de côte (Figure 84).

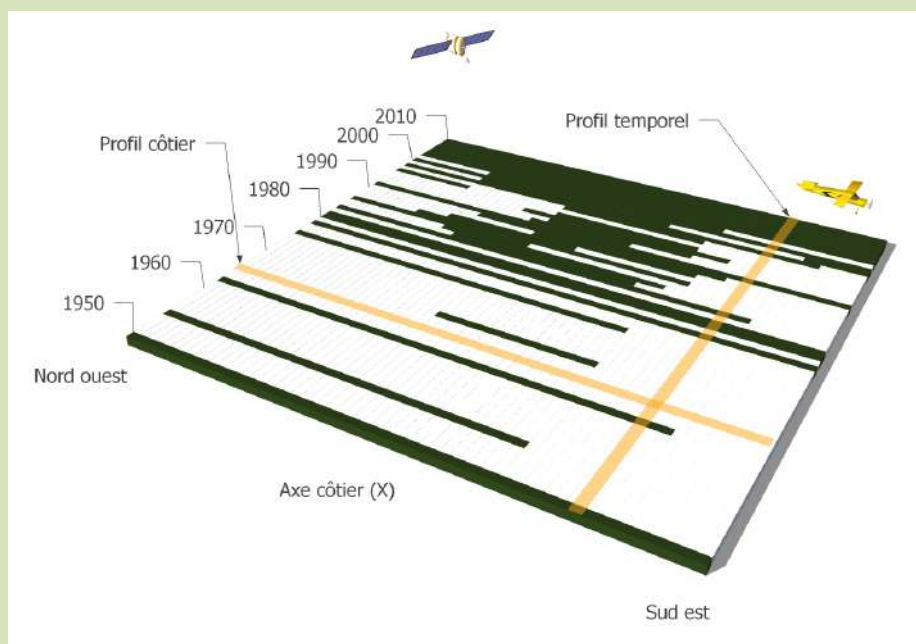


Figure 84 : Représentation schématique du suivi du trait de côte guyanais par imagerie satellite et photographies aériennes (Walcker et al., 2011)

Étapes 4 et 5 : les méthodes de levé et les outils et méthodes de traitement

Les lignes de côte sont analysées (extraction de l'indicateur de trait de côte) par photo-interprétation (étape 4) et digitalisées dans le SIG⁴⁷ (Figure 85).

⁴⁷ Le suivi du trait de côte guyanais se fait par SIG (MANGASIG).



Figure 85 : Représentation du trait de côte, limite de front de mangrove (rivage à mangrove ; Walcker et al., 2011)

Étape 5 : les outils et les méthodes de traitement

Une fois intégrées dans le SIG, les lignes de côte sont analysées afin d'extraire des profils côtiers par année et par transects (Figure 86). L'analyse par transects perpendiculaires à l'axe côtier permet de rendre compte de l'avancée et du recul de la ligne de rivage en tout point du littoral.

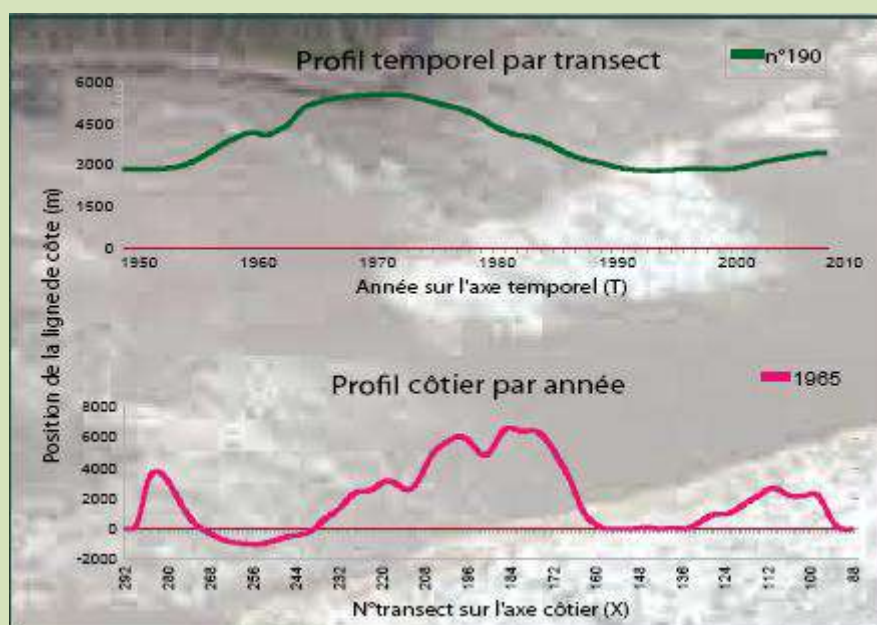


Figure 86 : Représentation des profils côtier et temporel de la ligne de rivage en Guyane (Walcker et al., 2011)

Les différentes valeurs de position sont transposées à l'intérieur d'une matrice, ce qui permet d'interpoler les données manquantes et de produire des synthèses (Figure 87).

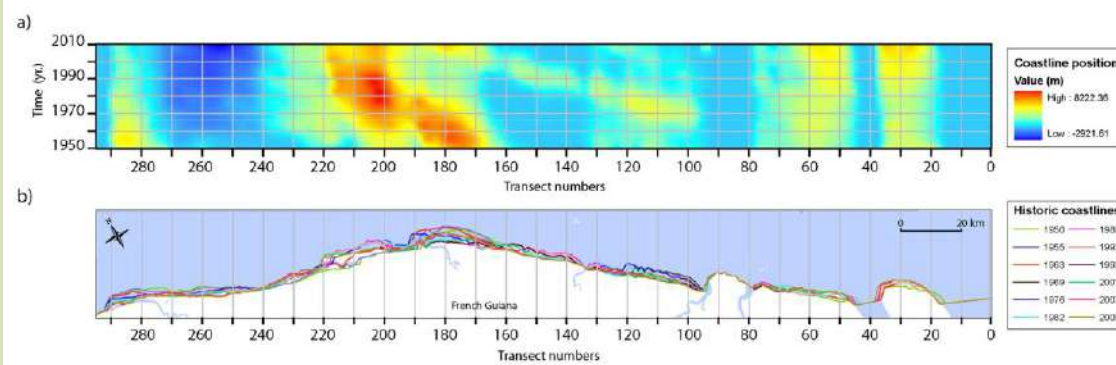


Figure 87 : Représentation des valeurs de position (Walcker et al., 2011) : a. évolution du trait de côte en fonction du temps et b. position des traits de côte historiques (localisation des traits de côte par année)

Ainsi, la position relative moyenne de la ligne de côte (MSRP) au cours des 60 dernières années affiche un signal périodique alternant les phases d'**accrétion** et d'**érosion** à l'échelle du territoire de la Guyane (Figure 88). Il s'agit ici de la moyenne annuelle sur l'ensemble du linéaire.

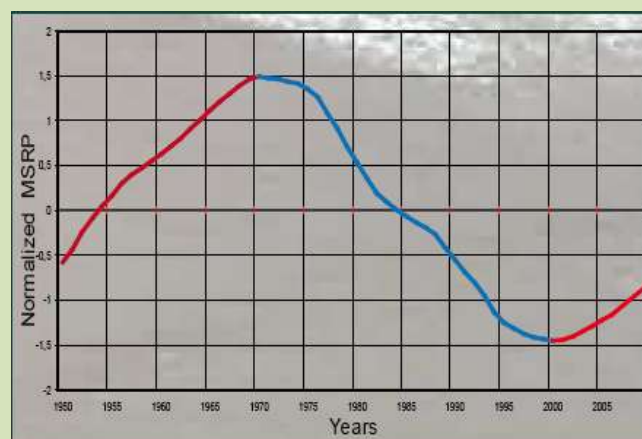


Figure 88 : Représentation graphique du signal périodique. En rouge : les phases d'accrétion. En bleu : les phases d'érosion (Walcker et al., 2011)

Étape 6 : le bilan

La télédétection s'adapte parfaitement aux environnements guyanais. Elle permet un suivi régulier du trait de côte, offre des données relativement précises et permet de couvrir de larges zones.

8. Conclusion

La connaissance et le suivi du trait de côte ou de l'évolution de la frange côtière est un élément indispensable à la gestion intégrée des zones côtières et à la prévention des risques littoraux (érosion, submersion, mouvements de terrain), mais aussi au suivi de la biodiversité littorale dans le cadre d'un contexte global de réchauffement climatique.

A l'échelle nationale, il est important de garantir que les traits de côte mesurés soient cohérents à différentes échelles spatiales (locale, régionale et nationale) et temporelles. Il est pour cela nécessaire de disposer de définitions communes de ces indicateurs de suivi de l'évolution du littoral, des protocoles de mesures et de traitements communs, ainsi que des modes d'organisation des données produites garantissant leur mise à disposition et leur mutualisation (interopérabilité des catalogues de métadonnées et des données).

Il existe de nombreux indicateurs de trait de côte pouvant être définis pour les suivis des franges côtières. Ce guide présente des informations assez complètes (notion de géomorphologie côtière, outils de levé, outils et méthodes de traitement), pour la mise en œuvre du levé de trait de côte des différents types de côtes (rocheuses, sableuses, marais, etc.). Les étapes pour le choix d'indicateurs, les méthodes de suivi et de traitement des données de l'organigramme (figurant en première partie de ce document) permettent de guider l'utilisateur dans les choix de son suivi en fonction des objectifs et des besoins.

Dans de nombreux cas, il est préférable d'envisager une technique peu coûteuse ou alors amortie sur le long terme. Il peut également être intéressant de poursuivre des levés à partir de méthodes moins récentes, de manière à maintenir une cohérence méthodologique entre les données anciennes avec celles récemment acquises.

Le partage des connaissances (diffusion, mutualisation des métadonnées et des données, des méthodes, des processus, etc.) est notamment indispensable pour effectuer des analyses diachroniques de la frange côtière, pour améliorer le dispositif de suivi de l'évolution du trait de côte et pour assurer la capitalisation des données anciennes et récentes.

Ce rapport est un outil d'aide à la décision quant aux choix des outils de levés et des méthodes de traitement à utiliser pour le suivi du trait de côte. Cependant, les technologies (outils, méthodes, savoir-faire) ne cessant d'évoluer, notamment en télédétection, il est essentiel d'actualiser régulièrement ces connaissances afin que ce document reste utile dans les années à venir. Ces évolutions technologiques doivent se faire dans un souci de garantir la cohérence entre données anciennes et récentes.

Ce document constitue l'un des éléments de la « Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte » visant notamment aux bonnes pratiques de suivi des indicateurs de trait de côte.

9. Remerciements

Les auteurs de ce guide souhaitent remercier les nombreux contributeurs qui ont bien voulu répondre à l'enquête réalisée pour cette étude et dont les références sont utilisées pour la rédaction. Également, nous tenons à remercier la cellule de transfert GEO-Transfert du laboratoire EPOC de l'Université Bordeaux 1, l'UMR LETG de l'Université de Nantes, le CETE Sud-Ouest et le CETE Méditerranée pour leur précieuse contribution au guide, notamment sur les méthodes de suivi du trait de côte (télédétection, photo-interprétation, extractions des traits de côte, etc.). Enfin, merci aux groupes de travail respectivement en charge de l'actualisation des catalogues sédimentologiques et de la révision des guides méthodologiques des PPRL pour leur contribution à la définition du trait de côte et les indicateurs de trait de côte associés.

10. Bibliographie

Références citées dans le texte

Aubié S., Mallet C. et Favennec J. en collaboration avec **Hoareau A.** (2011) - Caractérisation de l'aléa érosion (2020-2040) de la Côte Aquitaine dans le cadre de l'étude stratégique de gestion du trait de côte. Observatoire de la Côte Aquitaine, rapport BRGM/RP-59095-FR, 59 illus. 97 p., 2 Ann.

Aubié S., Genna A., Petitjean J., avec la collaboration de Mallet C. et Capdeville J.P. (2005) – Evolution historique du littoral basque français, Rapport BRGM/RP-53454-FR, 32 illustrations, 1ann., 59 p.

Baghdadi N., Gratiot N., Lefebvre J.P., Oliveros C., and Bourguignon A. (2004) - *Coastline and mudbank monitoring in French Guiana: contributions of radar and optical satellite imagery.* *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 30, No. 2, p. 109–122, 20.

Baghdadi N., Pedreros R., Lenotre N., Dewez T et Paganini M. (2007) - Impact of polarization and incidence of the ASAR sensor on coastline mapping: example of Gabon. *International Journal of Remote Sensing*, 28, No. 17, 10, 3841–3849.

Balouin Y. et Heurtefeux H., (2007) - Utilisation de la technologie du LiDAR bathymétrique pour le suivi du littoral : Retours d'expériences sur le littoral méditerranéen. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 186, pp 74-80.

Boak E.H. and Turner I.L. (2005) - Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 688–703. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

Bonnot-Courtois C. et Levasseur J.E. (2002) – Reconnaissance de la limite terrestre du domaine maritime. Intérêts et potentialités de critères morpho-sédimentaires et botaniques. Rapport Ministère de l'Équipement des transports et du logement CETMEF / UMR 8586 PRODIG / CNRS, Laboratoire de Géomorphologie et Environnement Littoral (EPHE Dinard) ; Service de Botanique (Université de Rennes 1), 160 p.

Bretel P. et Levoy F. (2011) - Morphodynamique Continentale et Côtière. Présentation du LiDAR aéroporté. Laboratoire CNRS-Université de Caen. Document PDF. Juillet 2011.

Bulteau T. et Garcin M., avec la participation de Oliveros C. et Lenôtre N. (2011) – Synthèse des travaux menés sur l'observation de l'évolution du trait de côte. Rapport BRGM/RP-59396-FR, 152 p., 25 fig., 5 tab., 1 ann.

Certain R., Aleman N., Barusseau J-P., Billy J., Brunel C., Dia A., Gervais M. Raynal O. et Robin N. (2011) - Apport des technologies sismique et LIDAR dans le suivi du trait de côte. Application au Languedoc-Roussillon. Journées de l'Observatoire du trait de côte. Novembre 2011. Document PDF.

CETE Sud-Ouest (2011) - Note méthodologique. Actualisation des catalogues sédimentologiques. Indicateurs de position du trait de côte. Document PDF.

CETMEF - CETE Méditerranée (2011) - Analyse des résultats de l'enquête sur l'actualisation des catalogues sédimentologiques des côtes françaises. CETMEF, Août 2011. 51p. ISRN : EQ-CETMEF-11-02-FR

Chilès J.P. et Delfiner P. (1999) - Geostatistics: modeling spatial uncertainty, Wiley series in probability and statistics.

Christophe E. (2006) - Compression des images hyperspectrales et son impact sur la qualité des données. Thèse. École nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace. Octobre 2006.

Communication écrite de Stéphane Costa (2011) - université de Caen, laboratoire Géophen, Basse Normandie.

Communication écrite de Virginie Lafon (2011) – GEO-Transfert.

Communication écrite de Carlos Oliveros (2011) – BRGM.

Communication écrite de Marie-Hélène Ruz (2011) – laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR 8187, ULCO.

Communication écrite de François Sabatier (2011) - université d'Aix en Provence, laboratoire CEREGE.

Cordier E. (2007) - Dynamique hydrosédimentaire du récif frangeant de l'Hermitage / La Saline (La Réunion) : processus physiques et flux sédimentaires. Thèse de doctorat de l'Université de La Réunion – 208 p.

De la Torre Y. (2006) - Morphodynamique des littoraux de La Réunion. Phase 2 : estimation de l'érosion côtière sur les sites identifiés comme sensibles. BRGM/RP-55014-FR, 84 p.

De la Torre Y., Dolique F. et Jeanson M. (2006) – Morphodynamique des littoraux de Mayotte. Phase 2 : mise en place d'un réseau de quantification de l'érosion côtière. BRGM/RP-54832-FR, 71 p.

De la Torre Y., Bastone V., Bodere G., Desprez A. (2012) – Morphodynamique des littoraux de La Réunion. Phase 4. BRGM/RP-57431-FR, 103 p.

Despinoy M. et Naim, O. (1998) - Étude des récifs coralliens à l'île de la Réunion par télédétection multibande. Septièmes journées scientifiques du réseau de télédétection de l'AUPELF-UREF. "La réalité de terrain en télédétection : Principes et Méthodes". Ste Foy (Québec). Universités francophones, Actualités scientifiques, p.29-36.

Ehrhold A. (2003) – L'application du Sonar à Balayage Latéral (SBL) pour la cartographie des habitats marins en domaine subtidal. Fiche Outil. Ifremer. Décembre 2003.

ERMMA-MNHN (2007) - Rappel de la définition de quelques termes utilisés. Vocabulaire OCA.

Faye I.B.ND. (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 photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes. Volume 1. Thèse. Université de Bretagne Occidentale. 321 p., 4 ann.

Fleming J. N. (2005) - Design of a semi-automatic algorithm for shoreline extraction using synthetic aperture radar (SAR) images. Thèse, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Canada.

Gurreonero Robinson D. A., Bijker W. et Tolpekin V. A. (2011) - Shoreline detection using TERRASAR-X quad polarization mode. Proceedings of the 4th TerraSAR-X Science Team Meeting, Oberpfaffenhofen, 10 pp.

Hénaff A., Lageat Y., Costa S. et Plessis E. (2002) - Le recul des falaises crayeuses du Pays de Caux : détermination des processus d'érosion et quantification des rythmes d'évolution / Retreat of chalk cliffs in the Pays de Caux: processes and rates. In: *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. Avril-juin. Vol. 8, n°2.

Hoareau A. (2010) - Traitement des données GPS sous TGO. Méthode de travail BRGM/MT-40, 95 p., 89 fig., 3 ann.

Huising E.J. and Gomes Pereira L.M. (1998) - Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 53, p. 245-261., pp. 17.

Idier D. avec la collaboration de **Mallet C. et Lenôtre N.** (2005) – Utilisation de l'imagerie vidéo numérique oblique pour le suivi du littoral : étude de faisabilité et bibliographie. Rapport BRGM/RP-53522-FR, 85 p., 29 fig., 6 tabl., 2 ann.

Joinville O., Ferrand B. et Roux M. (2002) - Levé laser aéroporté : État de l'art, traitement des données et comparaison avec des systèmes imageurs, in : Bulletin SFPT N°166, p. 72-81.

Juigner M., Robin M., Fattal P., Maanan M. et Debaine F. (2012) - Exploitation d'une collection de traits de côte : statistiques par transect. Document PDF issu d'une communication écrite de Robin M (mai 2012). UMR 6554 LETG Géolittomer – Université de Nantes.

Komar P.D. (1997) - Beach processes and sedimentation. - 2nd edition, Prentice Hall, New Jersey, 544 p.

Lafon V. et Aubié S. (2008) - Cartographie des faciès géomorphologiques du littoral de la Côte Basque française à partir des données FORMOSAT 2. BRGM/RP-56917-FR, 49 p., 33 fig.

Le Berre I., Hénaff A., Devogèle T., Mascaret A. et Wenzel F. (2008) - « SPOT5 : un outil pertinent pour le suivi du trait de côte ? », *Noréis* [En ligne], 196 | 2005/3, mis en ligne le 15 décembre 2008, consulté le 07 décembre 2011. URL : <http://norois.revues.org/378>

Lebigre J.M. (2004) - *Les marais à mangrove de Nouvelle-Calédonie, un exemple de milieu « naturel » lagonaire*. Nouméa, Centre de Documentation Pédagogique, Scérén, Sce 44, 48 p. + 20 diapositives.

Mallet C., Lafon V. et Desprats J.F. (2007) – Cartographie des faciès géomorphologiques du littoral aquitain à partir des données FORMOSAT-2. Rapport BRGM/RP-56101-FR, 69 p., 39 ill.

MEEDDM. (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer) (2010) - La gestion du trait de côte. Quae. 978-2-7592-0360-4, 290 p.

MEEDDM. (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer) (2012) – Propositions pour une stratégie nationale de gestion du trait de côte, du recul stratégique et de la défense contre la mer, partagée entre l'État et les collectivités territoriales. Ministère de l'environnement. Le grenelle de la mer. 36 p., 5 ann.

Montaggioni L. et Faure G. (1980) – *Les récifs coralliens des Mascareignes (océan Indien)*. Coll. des travaux Centre Universitaire de La Réunion, 151 p.

Moore, L.J. (2000) - "Shoreline Mapping Techniques." *Journal of Coastal Research*. Vol. 16, p. 111-124.

Morichon D., Dailloux D., Aarnikhof S. et Abadie S. (2008) - "Using a shore-based video system to hourly monitor storm water plumes (Adour River, Bay of Biscay)", *Journal of Coastal Research*, 24, 4C, p. 133-140.

Mugica J. et Mallet C., avec la collaboration de Hennequin V. (2008) - Étude de l'évolution géomorphologique récente de la côte sableuse aquitaine. BRGM/RP-56874-FR, 165 p., 29 ill., 9 ann.

Nouzé H. et Chauchot P. (1999) – Les sismiques : des outils essentiels pour l'étude des structures océaniques. *Geosciences Marine*. Vol. 21, p. 25-29.

ONF (2009) - Bilan des activités 2007-2008 de l'ONF dans le cadre de l'Observatoire de la Côte Aquitaine. Rapport ONF/50-2001.

Paskoff R. (1998) – Les littoraux, impacts des aménagements sur leur évolution. Armand Colin, 257 p.

Pons F. et Trmal C. (2012) – MobiTC. Wikhydro. CETE Méditerranée/DREC/SRILH, PCI Inondations et Aléas Côtiers. Article consulté le 13 février 2012.
Lien disponible : <http://www.wikhydro.org/index.php/MobiTC>

Populus J., Laurentin A., Rollet C., Vasquez M., Guillaumont B. et Bonnot-Courtois C. (2003) - Surveying coastal zone topography with airborne remote sensing for benthos mapping, eProceedings of Earsel's GIS "Remote Sensing of the Coastal Zone", Ghent, June 5-7, 2003, p. 105-117.

Prost E. (2007) - La côte de la Guyane au plus près. SPOT Magazine, n°43, p. 8-10.

Rihouey D. (2011) – Suivi vidéo du littoral. Journées des Observatoires du Trait de Côte. Novembre 2011. Document PDF.

Rihouey D., Dailloux D., Nader J.R. et Morichon D. (2007) - Vidéo quantification appliquée à la topographie de la plage intertidale. Congrès SHF - «Nouvelles approches sur les risques côtiers», Paris, 30-31 janvier 2007. Document PDF.

Robin M. (2002) – « Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique », dans Baron-Yellès (N.), Goeldner-Gianella (L.), Velut (S.) (dir.), *Le littoral, regards, pratiques et savoirs*, Paris, ENS, p. 95-115.

Robin M., Debaine F., Fattal P., Maanan M., Juigner M. et Paillart¹ M. (2012) - Extraction des traits de côte par l'utilisation du LIDAR (zone de la Tresson, Noirmoutier). Document PDF issu d'une communication écrite de Robin M (mai 2012). UMR 6554 LETG Géolittomer – Université de Nantes. ¹Communauté de Commune de l'île de Noirmoutier.

Saffache, P. (2003) - Glossaire de géomorphologie. Paris : Ibis Rouge Editions, Presses Universitaires Créoles (Collection Documents Pédagogiques - Géographie), 172 p.

SHOM (2011) - Descriptif technique du Trait de côte Histolitt – v2.0, relevé sur le site internet du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine <http://www.shom.fr/> en mai 2011, 5 p.

SHOM (2011) – Références altimétriques maritimes. Côtes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée. 98 p. ISBN 978-2-11-097286-6

Stepanian A., Bodéré G., Hennequin V. et Palvadeau E. (2009) – Réseau d'observation du littoral de la Corse. Sites sensibles à évolution forte et problématique. Note d'avancement. Lecture et exploitation des données des sites de Tavignano et de Porticciolo. Année 2009. Rapport provisoire BRGM/RP-57768-FR, 64 p., 35 ill.

Stepanian A., Balouin Y., Bodéré G., Hennequin V. et Palvadeau E. (2010) – Réseau d'Observation du Littoral de la Corse. Rapport d'observation 2009. Rapport BRGM/RP-58563-FR, 168 p., 114 ill.

Stepanian A., Bélon R. et Morel O. (2011) – Étude de faisabilité de l'élaboration d'un portail internet de diffusion des informations du ROL – Réseau d'Observation du Littoral de Corse. Rapport BRGM/RP-60128-FR, 57 p., 21 ill. + ann.

Suanez S., Garcin M., Bulteau T., Rouan M., Lagadec L. et David L. (2012) « Les observatoires du trait de côte en France métropolitaine et dans les DOM », *EchoGéo* [En ligne], numéro 19 | 2012, mis en ligne le 10 février 2012, consulté le 15 mars 2012. URL : <http://echogeo.revues.org/12942>

Verger F. (1968) - Marais et wadden du littoral français, étude de géomorphologie littorale. Bordeaux, Biscaye frères imprimerie, 544 p.

Verger F. (2005) - Marais et estuaires du littoral français, Paris, Editions Belin, 335 p.

Walcker R., Fromard F., Proisy C., Gardel A. et Anthony E. (2011) – Suivi du trait de côte en Guyane Française. Journées de l'Observatoire du trait de côte. Document PDF.

Sources internet

Site internet ANCORIM. Consulté le 20 mars 2012.

Lien disponible : http://ancorim.aquitaine.fr/-90-outils-d-animation-#outil_sommaire

Site internet ASTRIUM. Consulté le 13 février 2012.

<http://www.astrium-geo.com/>

Liens disponibles :

- a. <http://www.astrium-geo.com/fr/258-formosat-2>
- b. <http://www.spotimage.com/web/fr/93-images-spot.php>
- c. <http://www.astrium-geo.com/fr/237-pleiades-imagerie-satellite-tres-haute-resolution>
- d. <http://www.astrium-geo.com/fr/255-terrasar-x>

Site internet ATM 3D. Consulté le 22 mars 2012.

Lien disponible : <http://www.atm3d.com/v5/html/download.htm>

Site internet du CNIG. Consulté le 13 février 2012.

Lien disponible : <http://www.cnig.serveur-1.net/fiches/46Orthophotographie.htm>

Site internet du CNRS – Université de Brest – Laboratoire de Géosciences Marines.

Consulté le 13 février 2012.

Lien disponible : <http://www-sdt.univ-brest.fr/partenaires/la-geophysique/drones>

Site internet du CREC – Université de Caen. Consulté le 19 octobre 2012.

Lien disponible : http://crec.unicaen.fr/suivi50/sl50_st.php?css=1

Site internet Ifremer. Consulté le 13 février 2012.

Liens disponibles :

- a. <http://flotte.ifremer.fr/flotte/Presentation-de-la-flotte/Equipements/Equipements-acoustiques/Sondeurs-multifaisceaux/Cours-SMF> (cours en ligne de H. Bisquay, novembre 2010)
- b. <http://envlit.ifremer.fr/infos/glossaire/t/teledetection>
- c. <http://flotte.ifremer.fr/flotte/Presentation-de-la-flotte/Equipements/Equipements-acoustiques/Courantomètres-Doppler>
- d. http://flotte.ifremer.fr/flotte/content/download/5143/114665/version/1/file/3_intechmer_monofaisceau.pdf (cours en ligne de H. Bisquay, novembre 2010)
- e. http://wwz.ifremer.fr/drogm_eng/Cartography/Cartographie-marine/Cartography-technics/Traitements#traitement

Site internet IGN. Consulté le 13 février 2012.

Liens disponibles :

- a. http://professionnels.ign.fr/DISPLAY/000/529/585/5295850/Plaque_Litto3D.pdf
- b. <http://www.ign.fr/institut/documentArticle.do?idDoc=5591865&indexRoot=8&indexChild=5>
- c. www.ign.fr/litto3d
- d. <http://inspire.ign.fr/index.php/inspire/84>

Site internet INFOLITTORAL. Consulté le 13 février 2012.

Lien disponible : <http://infolittoral.spotimage.com/web/7-motivations-et-enjeux.php>

Site internet de Kalideos. Consulté le 02 juillet 2012.

Lien disponible : <http://kalideos.cnes.fr/spip.php?article11>

Site internet de l'Observatoire Côte Aquitaine (OCA). Consulté le 13 février 2012.

Lien disponible : <http://littoral.aquitaine.fr/>

Site internet de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection (SFPT)

Document PDF (1989). Consulté le 13 février 2012.

Lien disponible : <http://www.sfpt.fr/>

Site internet SEIG. Consulté le 23 février 2012.

Liens disponibles :

- a. <http://seig.ensg.ign.fr/fichchap.php?NOFICHE=FP9&NOCONT=CONT3&NOCHEM=CHEMS002&NOLISTE=1&N=1&RPHP=&RCO=&RCH=&RF=&RPF=>
- b. <http://seig.ensg.ign.fr/sommlexi.php?>
- c. <http://seig.ensg.ign.fr/fiche.php?NOCONT=CONT0&NOFICHE=FP53&RPHP=&RCO=&RCH=&RF=&RPF=&RPC=#3>

Site internet SHOM. Consulté le 10 mai 2012.

Liens disponibles :

- a. http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_geo/sonar.htm
- b. http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_Litto3D/Specifications%20techniques_Litto3D_V1-doc_v1.3.pdf

Références supplémentaires

Ferrer P., Benabdellouahed M., Certain R., Tessier B., Barusseau J.P. et Bouchette F. (2010) – The Late Holocene sediment infilling and beach barrier dynamics of the Thau lagoon (Gulf of Lions, Mediterranean sea, SE France). p. 197-209.

Fromard F., Vega C. et Proisy C. (2003) - Coastal evolution and mangrove dynamics in French Guiana over the last fifty years. A case study based on aerial and satellite remote sensing data and field surveys. *Marine Geology* 208, issues 2-4 : p. 265-280.

Lafon V., Hoareau A. Mallet C. et Desprats J.F. (2010) - Suivi du trait de côte en Aquitaine par imagerie Formosat-2. *In* Levacher, D et Sanchez, M. (Eds), *XI^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil*, Sables D'Olonne 22-25 Juin 2010. Vol. 2, p. 497-504.

Levoy F. (2011) – Réflexion nationale sur l'utilisation de la technologie LiDAR et les risques littoraux. CNRS INSU. Document PDF. Janvier 2011.

11. Liste des abréviations

ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler

ASAR : Advanced Synthetic Aperture Radar

BD : Base de Données

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CASI : Compact Airborne Spectrographic Imager

CEFREM : CEntre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéens

CETE SO : Centre d'Études Techniques du Sud-Ouest

CETMEF : Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales

CRIGE PACA : Centre Régional de l'Information Géographique Provence-Alpes Côte d'Azur

CNIG : Conseil National de l'Information Géographique

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

CPIBP : Contrat de Plan Interrégional du Bassin Parisien

DAR : Dépression d'Arrière-Récif

DSAS : Digital Shoreline Analysis System

DGPS : Differential Global Positioning system

DOM : Départements d'Outre-Mer

EPR : End Point Rate

RMS : Root Mean Square

ERMMA : Environnement et Ressources des Milieux Marins Aquitains

GPS: Global Positioning system

GSM: Global System for Mobile communication

IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

IGN : Institut Géographique National

INSU : Institut National des Sciences de l'Univers

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

LiDAR : Light Detection And Ranging

LMUSCA : Littoral Multi-Scale Analyses

LRR : Linear Regression Rate of Change

MEDDE : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie

MEDDTL : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement

MEEDDM : Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer

MNE : Modèle Numérique d'Élévation

MNH : Modèle Numérique de Hauteur

MNHN : Muséum National d'Histoire Naturelle

MNS : Modèle Numérique de Surface

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MobiTC : Mobilité du Trait de Côte

MSRP : Mean Shoreline Relative Position

OCA : Observatoire de la Côte Aquitaine

OPM : Observatoire du Pays de Monts

ONF : Office National des Forêts

PPK : Post Processing Kinematic

PPRL : Plan de Prévention des Risques Littoraux

RFRC : Réseau Français de Recherche Côtière

RGP : Réseau Géodésique Permanent

RTK : Real Time Kinematic

SAR : Synthetic Aperture Radar

SBL : Sonar à Balayage Latéral

SFPT : Société Française de Photogrammétrie et Télédétection

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

SIG : Système d'Information Géographique

SWIR : Short-Wave InfraRed

TLS : Terrestrial Laser Scanning

TOM : Territoires d'Outre-Mer

ULM : Ultra-Léger Motorisé

UMR LETG : Unité Mixte de Recherche du Littoral, de l'Environnement, de la Télédétection et de la Géomatique

WMS : Web Map Service

WFS : Web Feature Service

12. Glossaire

Accrétion

Avancée de la terre sur la mer sous l'effet d'une accumulation sédimentaire, par exemple (Saffache P., 2003).

Analyse diachronique

Analyse qui envisage les changements dans le temps (MEEDDM, 2010).

Baie

Échancrure du littoral. En général, un ou plusieurs fleuves se jettent dans une baie. Celle-ci forme un port naturel, un abri exploité par les hommes, en fonction du climat (Dictionnaire Larousse).

Berne

Corps sédimentaire sableux de plage situé sur la zone supérieure de battement de la houle. Créé lors des périodes d'engraissement de plage par des houles calmes et régulières. Plusieurs bermes peuvent se succéder sur un profil de plage (© Observatoire de la Côte Aquitaine, glossaire).

Cadastre

Document contenant une matrice des états de section, un plan topographique des propriétés d'une commune et servant à fixer l'impôt foncier (MEEDDM, 2010).

Cellule sédimentaire

Portions de côte homogènes, cohérentes en termes de morphologie et de fonctionnement, indépendantes de toute structure administrative.

Centrale inertielle

Appareil de navigation de précision comprenant des capteurs de vitesse angulaire (gyroscope) et d'accélération (accéléromètre) capables de mesurer les accélérations et les vitesses de rotation du porteur selon les 3 axes de l'espace (Pitch, Roll, Yaw) (Dictionnaire Larousse).

Cross-shore

Perpendiculaire à la côte.

Drone

Petit engin aéroporté (hélicoptère ou avion) sans pilote permettant des prises de vue aériennes.

Descripteur

Variable ou caractéristique quelconque décrivant de manière standardisée et répétable un aspect du milieu ou de l'écosystème (© ERMMA-MNHN 2007).

Dune

Accumulation de sable édifiée par un agent de transport, on distingue les dunes éoliennes (édifiées par le vent) des dunes sous-marines (édifiées par les courants ou la houle) (© Observatoire de la Côte Aquitaine, glossaire).

Écroulement (mouvement de terrain)

Mouvement rapide entraînant, au pied d'un versant de pente forte, une masse de matériau issue d'une fragmentation (MEEDDM, 2010).

Érosion

Phénomène actif qui résulte des effets combinés de la marée, de la houle et des courants induits, des vents et des processus continentaux et du bilan sédimentaire côtier. Les activités humaines peuvent aussi intervenir. L'érosion marine se traduit par un recul du trait de côte, dû à une perte de matériaux à la mer.

L'érosion fragilise la base des ouvrages, attaque les cordons dunaires et peut augmenter le risque de submersion temporaire puis définitive (MEEDDM, 2012).

Estran

(syn. plage) Zone comprise entre les plus hautes et les plus basses mers connues ou zone de balancement des marées (MEEDDM, 2010).

Estuaire

Embouchure fluviale soumise à la marée (Verger F., 2005).

Flute sismique

Antenne acoustique linéaire remorquée par un bateau.

Glissement (géol., mouvement de terrain)

Mouvement entraînant une masse de matériaux meubles vers le bas d'un versant, avec une vitesse faible (de l'ordre de quelques mètres par jour) (MEEDDM, 2010).

Halophile

Organisme vivant tolérant ou exigeant une forte concentration en sel, souvent rencontré en haut de plage ou sur les prés-salés (MEEDDM, 2010).

Hyperspectrale

Terme utilisé pour des données spectrales contenant des centaines de bandes de **spectres** (gamme **spectrale** dans les longueurs d'ondes visible et infrarouge).

Indicateur

Descripteur auquel on peut après étude rattacher une propriété caractéristique de l'environnement (© ERMMA-MNHN 2007).

Le terme de **descripteur** est mieux adapté dans ce contexte d'étude. Cependant, par souci de simplifier la terminologie, nous utiliserons le terme d'**indicateur** dans ce guide.

Jet-de-rive

Masse d'eau projetée sur un rivage vers le haut de l'estran par l'action de déferlement des vagues (MEEDDM, 2010).

En anglais : *swash*.

Laisse-de-mer

Dépôts d'algues et de matériaux organiques divers abandonnés par la mer à marée haute ou après une tempête.

Laisse de pleine (resp. basse) mer : désigne la limite haute (resp. basse) atteinte lors des plus grandes marées astronomiques (MEEDDM, 2010).

LiDAR

Système de topographie laser.

Littoral

Zone de contact entre l'hydrosphère, l'atmosphère et la lithosphère. Au sens strict, c'est la zone comprise entre les plus hautes et les plus basses mers. La largeur de ce domaine est variable ; il englobe l'arrière-côte dans la terre ferme, le rivage proprement dit et la zone de balancement des marées ou estran, ainsi que l'avant-côte submergée en permanence (© Observatoire de la Côte Aquitaine, glossaire).

Longshore

Parallèle à la côte.

Mangrove

Formation arbustive et arborée se développant sur un substrat vaseux dans la zone intertidale. Le substrat étant parfois très liquide, les palétuviers – qui constituent l'élément floristique dominant – s'y sont adaptés (Saffache P., 2003)

Marnage

Amplitude d'une marée, distance verticale entre la limite de la basse et de la haute mer (© Observatoire de la Côte Aquitaine, glossaire).

Métadonnée

Il s'agit d'une donnée décrivant une autre donnée. Les métadonnées simplifient les recherches d'information.

Mire

Généralement, il s'agit d'une règle plate graduée que l'on dispose verticalement sur les points dont on veut repérer la position ou l'altitude (Dictionnaire Larousse).

Multispectrale (ou multibande)

Terme désignant l'acquisition simultanée des enregistrements dans différentes bandes du spectre visible ou infrarouge.

Nadir

Point « le plus bas ». Point de la sphère céleste représentant la direction verticale descendante en un point donné (Dictionnaire Larousse).

Orthophotographie

Image photographique sur laquelle ont été corrigées les déformations dues au relief du terrain, à l'inclinaison de l'axe de prise de vues et à la distorsion de l'objectif. Une orthophotographie peut toutefois présenter des déformations résiduelles et des manques de couverture d'autant moins négligeables que les pentes du terrain sont plus fortes et les superstructures plus nombreuses et élevées. On parle aussi d'ortho-image (©IGN).

Palétuvier

Arbre ou arbuste habitant les mangroves tropicales et caractérisé par des racines aériennes formant des arceaux ou des racines pneumatophores sortant de la vase (Dictionnaire Larousse).

Photogrammétrie

La photogrammétrie utilise le principe de la vision en relief (trois dimensions), c'est une méthode basée sur la vision stéréoscopique (relief donné par la vision binoculaire). C'est une méthode qui a pour objectif de localiser et de restituer très précisément les caractéristiques géométriques (forme, dimensions, etc.) d'un objet à l'aide d'images photographiques aériennes verticales mais aussi à l'aide de photographies terrestres prises de deux points de vue différents. Les objets perçus en relief peuvent être pointés et leurs coordonnées géographiques x, y et z (longitude, latitude, altitude) sont enregistrées (d'après le site SEIG, 2012).

Plage

Voir estran.

Platier rocheux

Haut-fond ou estran rocheux affleurant à marée basse (MEEDDM, 2010).

Récif barrière

Stade du cycle de formation des récifs coralliens tropicaux correspondant à une barrière annulaire de corail séparée d'une île volcanique résiduelle par un lagon (MEEDDM, 2010).

Récif frangeant

Premier stade de formation d'un récif corallien tropical constitué à proximité immédiate d'une île volcanique (MEEDDM, 2010).

Schorre

Partie supérieure d'un marais maritime, submergé exclusivement par pleine mer de vive-eau et constitué de vasières colonisées par une végétation exigeant une forte concentration en sel (MEEDDM, 2010).

Slikke

Partie inférieure d'un marais maritime, inondée à marée haute et constituée de vasières nues découvertes à marée basse (MEEDDM, 2010).

Spectrale (bande)

Intervalle du spectre électromagnétique, compris entre deux limites précisées en fréquences ou en longueurs d'onde (© SEIG, b, glossaire).

Spectre

Terme désignant en optique la gamme des couleurs observées lors de la dispersion de la lumière blanche à travers un prisme (Dictionnaire Larousse).

Submersion marine

La submersion est d'abord un phénomène passif, du point de vue de la côte, principalement liée aux conditions de marée, de houles, de vent et de pression et exceptionnellement aux tsunamis.

La submersion marine intervient de trois manières : par rupture d'ouvrages ou de cordons dunaires, par surverse ou par franchissements de paquets de mer. Elle est souvent temporaire mais parfois définitive si la topographie est modifiée ou par l'effet de la surélévation du niveau moyen de la mer ou par affaissement des terrains. Dans ce cas, elle se traduit par un recul du trait de côte.

Une submersion temporaire, au cours d'une tempête, en dehors des cas de brèche dans des ouvrages de génie civil, conduit à des modifications de la topographie ou de l'état du milieu : elle peut fragiliser le littoral et faciliter l'action future de l'érosion marine (MEEDDM, 2012).

Télédétection

Ensemble des sciences et techniques utilisées pour la détection à distance (sans contact direct) d'objets et la détermination de leurs caractéristiques (physiques, biologiques, etc.).

La télédétection est surtout utilisée pour acquérir des données permettant d'établir des cartes depuis un moyen aéroporté (télédétection aérienne verticale ou oblique), ou par voie de prises de vue par satellite (télédétection spatiale). La télédétection océanique opère des travaux de recherche et d'acquisition de relevés des mers et des océans. Les cartes qui en résultent diffèrent les unes des autres par le traitement appliqué aux données spatiales (imagerie spatiale) (© Ifremer, b, glossaire).

Tidal (micro-, méso-, macro-, et étagements)

Adjectif (anglicisme) se rapportant au **marnage**, relatif au niveau de marée. On distingue différents types de marnages (© Ifremer, b, glossaire) :

- microtidal : qualifie un milieu subissant des amplitudes de marée faibles (lorsque la marée maximum est inférieure à 1 m) ;
- mésotidal : qualifie un milieu subissant des amplitudes de marée moyennes (entre 1 et 4 mètres) ;
- macrotidal : qualifie un milieu subissant des amplitudes de marée importantes (plus de 4 à 5 mètres).

On distingue également les différents étagements (© Ifremer, b, glossaire) :

- subtidal / infratidal : zone située en-dessous de la zone de balancement des marées et ne découvrant donc jamais à marée basse ;
- intertidal : partie du littoral comprise entre les limites extrêmes atteintes par les marées ;
- supratidal : étage situé au-dessus du niveau de la pleine mer (© Observatoire de la Côte Aquitaine, glossaire).

Transducteur

Dispositif convertissant une grandeur physique en une autre (Dictionnaire Larousse).

Wadden

Étendue intertidale de sédiments fins qui comprend la slikke et le schorre (MEEDDM, 2010).

13. Annexes

Annexe 1 : Présentation du projet INFOLITTORAL-1

En 2010, à l'occasion du 9^{ème} appel à projets « Fond Unique Interministériel », Astrium GeoInformation Services, SIRS, **GEO-Transfert**, CLS et les UMR EPOC, IRD AMAP, ECOLAB et LOG ont réuni leurs compétences pour développer une offre de service à vocation internationale pour la surveillance de l'environnement littoral à partir de technologies spatiales. Le projet INFOLITTORAL-1 est une phase préliminaire et porte sur deux sites pilotes : le littoral aquitain et le littoral guyanais. INFOLITTORAL-1 a obtenu le label « Pôle de Compétitivité Aerospace Valley ».

Ce projet répond à la fois à un besoin en informations, fiables et mises à jour régulièrement, et en connaissance des interactions qui existent entre les différentes composantes de l'environnement littoral. Il s'adresse aux gestionnaires et décideurs impliqués dans la modification ou la gestion de l'environnement littoral, afin de leur fournir des outils efficaces d'aide à la décision.

Les objectifs

Les principaux objectifs d'INFOLITTORAL-1 sont :

- la compréhension des besoins des utilisateurs ainsi que leurs retours d'expérience quant à la mise en œuvre d'informations géo-spatiales ;
- la définition, l'élaboration et la validation de produits d'information pour l'aide à la décision adaptés prenant en compte les aspects liés au forçage hydrodynamique et sédimentaire, la géomorphologie et la caractérisation du littoral continental ;
- une première définition du service INFOLITTORAL (spécifications et modèle économique).



Méthodologie

Les résultats attendus s'inscrivent dans une démarche innovante de mise à disposition de technologies nouvelles accessibles au plus grand nombre d'utilisateurs :

- validation de la complémentarité entre l'utilisation de méthodes traditionnelles et issues des technologies spatiales ;
- utilisation de données spatiales multi-sources (optique et radar) et couplage avec les mesures *in-situ* ;
- adoption d'une démarche résolument orientée « utilisateurs » et non spécialistes de la télédétection ;
- définition d'une offre de service type pour le suivi du littoral, unique sur le marché de la géo-information, constituant la première étape avant de déployer un service opérationnel à l'horizon 2015 (d'après le site INFOLITTORAL).

Annexe 2 : Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte

Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte

Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte

Sous l'égide du MEDDTL, l'enquête est réalisée par le BRGM Le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement envisage de produire un guide méthodologique de suivi du trait de côte. Ce guide a vocation à être une référence méthodologique qui permettra de mettre en place un protocole d'acquisition des données d'évolution du trait de côte. Cette référence sera particulièrement utile pour le travail des observatoires locaux du trait de côte et pour la capitalisation des données engagée pour la mise à jour des catalogues sédimentologiques. Ces actions, qui visent à la constitution du socle commun de connaissances relatives au littoral, constituent les premiers éléments de la stratégie nationale de gestion du trait de côte portée par le MEDDTL. Cette enquête est destinée aux producteurs de données de suivi du trait de côte. Elle a pour objectif principal d'apporter des précisions quant aux pratiques couramment utilisées en France. Le questionnaire comprend 4 parties (1 page par partie). Le temps de réponse de ce questionnaire est estimé à environ 15 - 20 min.

Merci d'entrer votre nom / prénom si vous le souhaitez et de préciser l'organisme pour lequel vous travaillez (ceci afin de nous aider dans l'analyse de vos réponses)



Continuer »

Fourni par [Google Documents](#)

[Signaler un cas d'utilisation abusive](#) - [Conditions d'utilisation](#) - [Clauses additionnelles](#)

[https://docs.google.com/spreadsheet/formResponse?...4H504WtQ3NjAzNmYyZEd&ptok=5159641015006315406&llq \[07/02/2012 09:52:19\]](https://docs.google.com/spreadsheet/formResponse?...4H504WtQ3NjAzNmYyZEd&ptok=5159641015006315406&llq [07/02/2012 09:52:19])

Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte



Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte

1ère partie : les méthodes d'acquisition du trait de côte

les méthodes d'acquisition stricto sensu

Sur quel type de littoral travaillez-vous ?

- ☐ côte sableuse
- ☐ côte rocheuse
- ☐ zones humides

En fonction du type de littoral sur lequel vous travaillez, quel indicateur du trait de côte choisissez-vous ?

Proposez une définition du trait de côte

Lors de vos missions, sur quelle échelle d'espace travaillez-vous ?

- ☐ locale
- ☐ départementale
- ☐ régionale
- ☐ nationale

<https://docs.google.com/spreadsheets/formRespo...4NTQ3NJA2NmYyZEBptok=51596410150083154066#q> (1 sur 7) [07/02/2012 09:53:55]

Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte

☐ Autre :

Télédétection spatiale

Lors de vos missions, quel type de capteur utilisez-vous ?

- ☐ imagerie SPOT
☐ imagerie FORMOSAT
☐ imagerie hyperspectrale

☐ Autre :

Pour quelle raison ? (si possible à préciser)

précision et qualité des données, coûts attractifs, etc.

Quelles sont les fréquences d'acquisition par rapport à ces méthodes que vous utilisez ?

journalière, hebdomadaire, mensuelle, etc.

Pouvez-vous donner des fourchettes de coûts des méthodes d'acquisition sélectionnées ?

coûts au km², précisez les moyens matériels et humains, etc.

<https://docs.google.com/spreadsheet/formRespo...4NTQ3NjAzNmYyZlE0ptok=51596410150083154088#fq> (2 sur 7) [07/02/2012 09:53:55]

Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte

Télédétection aérienne

Lors de vos missions, quelle méthode d'acquisition utilisez-vous ?

- ☐ photo aérienne oblique
- ☐ photo aérienne plane (orthorectifiée ou non)
- ☐ LiDAR aéroporté
- ☐ vidéo
- ☐ Autre :

Pour quelle raison ? (si possible à préciser)

précision et qualité des données, coûts attractifs, etc.

Quelles sont les fréquences d'acquisition par rapport à ces méthodes que vous utilisez ?

journalière, hebdomadaire, mensuelle, etc.

Pouvez-vous donner des fourchettes de coûts des méthodes d'acquisition sélectionnées ?

<https://docs.google.com/spreadsheets/formRespo...4NTQ3NjAzNmYyZkE0ptok=51596410150083154080#f/q> (3 sur 7) [07/02/2012 09:53:55]

Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte

coûts au km², précisez les moyens matériels et humains, etc.

Les types de porteur aérien

Quel type de porteur aérien utilisez-vous ?

- ☐ avion
- ☐ hélicoptère
- ☐ ULM
- ☐ drone
- ☐ ballons (captifs ou non)
- ☐ Autre :

Pour quelle raison ? (si possible à préciser)

précision et qualité des données, coûts attractifs, etc.

Quelles sont les fréquences d'acquisition par rapport à ces méthodes que vous utilisez ?

journalière, hebdomadaire, mensuelle, etc.

<https://docs.google.com/spreadsheets/formRespo...4NTQ3NjA2NmYyZEBptok=51596410150083154088Ifq> (4 sur 7) (07/02/2012 09:53:55)

Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte

Autres mesures à distance

Lors de vos missions, quelle méthode d'acquisition utilisez-vous ?

☐ sondeur bathymétrique monofaisceau

☐ sondeur bathymétrique multifaisceau

☐ Autre :

Pour quelle raison ? (si possible à préciser)

précision et qualité des données, coûts attractifs, etc.

Quelles sont les fréquences d'acquisition par rapport à ces méthodes que vous utilisez ?

journalière, hebdomadaire, mensuelle, etc.

Pouvez-vous donner des fourchettes de coûts des méthodes d'acquisition sélectionnées ?

coûts au km², précisez les moyens matériels et humains, etc.

<https://docs.google.com/spreadsheet/formRespo...4NTQ3NjAzNmYyZzE0ptok=51596410150063154068#f/q> (5 sur 7) [07/02/2012 09:53:55]

Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte

Mesures directes au sol

Lors de vos missions, quelle méthode d'acquisition utilisez-vous ?

méthode directe

- ☐ GPS non différentiel
- ☐ DGPS
- ☐ repères terrain (suivis photos)
- ☐ théodolite
- ☐ scanner 3D
- ☐ Autre :

Pour quelle raison ? (si possible à préciser)

précision et qualité des données, coûts attractifs, etc.

Quelles sont les fréquences d'acquisition par rapport à ces méthodes que vous utilisez ?

journalière, hebdomadaire, mensuelle, etc.

Pouvez-vous donner des fourchettes de coûts des méthodes d'acquisition sélectionnées ?

coûts au km², précisez les moyens matériels et humains, etc.

<https://docs.google.com/spreadsheet/formRespo...4NTQ3NjA2NmYyZzE0ptok=51596410150083154088lfq> (6 sur 7) [07/02/2012 09:53:55]

Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte

Disposez-vous d'un protocole d'utilisation pour les instruments utilisés ?

Si oui, ces protocoles sont-ils disponibles ?

« Retour



Continuer »

Fourni par [Google Documents](#)

[Signaler un cas d'utilisation abusive](#) - [Conditions d'utilisation](#) - [Clauses additionnelles](#)

<https://docs.google.com/spreadsheet/formRespo...4NTQ3NJAzNmYyYzE0ptok=S1596410150083154060Ifq> (7 sur 7) [07/02/2012 09:53:55]

Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte

Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte

2ème partie : les méthodes de traitement du trait de côte
les traitements postérieurs à l'acquisition

Quel outil employez-vous pour traiter les données récoltées ?

- ☐ système d'information géographique (SIG) (MapInfo, ArcGis, etc.)
- ☐ base de données (Access, etc.)
- ☐ tableur (logiciel de création et de manipulation interactives de feuilles de calcul, par exemple Microsoft Excel)
- ☐ Autre :

Pour quelle raison ?
avantages / inconvénients, selon les objectifs de l'étude, etc.

Quelle méthode employez-vous pour traiter les données récoltées ?

- ☐ représentation plan/profil du trait de côte
- ☐ croisement SIG du trait de côte (indicateurs cartographiques)

<https://docs.google.com/spreadsheets/formRespo...4NTQ3NjA2NmYyZEBptok=51596410150083154088&itq> (1 sur 2) [07/02/2012 09:57:59]

Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte

☐ Autre :

Pour quelle raison ?
avantages / inconvénients, selon les objectifs de l'étude, etc.

Pour vos analyses, avez-vous besoin d'autres informations complémentaires ? Procédez-vous à des levés d'autres types de données pour aboutir à ces analyses d'évolution ? Si oui, lesquels ?


Quel type d'outil vous permet de réaliser ces analyses ?
SIG, logiciel d'évolution morphodynamique, etc.

Fourni par [Google Documents](#)

[Signaler un cas d'utilisation abusive](#) - [Conditions d'utilisation](#) - [Clauses additionnelles](#)

<https://docs.google.com/spreadsheets/formRespo...4NTQ3NjA2NmYyZEBptok=5159641015006315406&lfq> (2 sur 2) [07/02/2012 09:57:59]

Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte



Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte

3ème partie : valorisation et capitalisation
après traitement, bilan/résultat

Quel est le type de donnée finale produite ?

carte, site internet, rapport, publication, etc.

Mettez-vous à disposition les traits de côte que vous levez ? Via quel(s) moyen(s) ?

accessibilité de la donnée produite

Connaissez-vous des exemples d'application de ces méthodes ? (projets concrets en France métropolitaine et/ou DOM TOM)

citez les sources, références, etc.

<https://docs.google.com/spreadsheet/formRespo...4HTQ3HJAzhmYyZEE8ptok=51596410150083154088Jfq> (1 sur 3) [07/02/2012 09:58:24]

Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte

Quel type d'information devrait contenir selon vous un "trait de côte standard" afin de pouvoir être exploité par différents utilisateurs et d'être comparé à différentes échelles ?

Quelle est la finalité des suivis que vous réalisez ?

recherche, aménagement, gestion des risques, etc.

Quelle est l'origine des financements ?

autofinancement, collectivités, services d'état, CNRS, universités, etc.

« Retour

Continuer »

Fourni par [Google Documents](#)

[Signaler un cas d'utilisation abusive](#) - [Conditions d'utilisation](#) - [Clauses additionnelles](#)

<https://docs.google.com/spreadsheets/formRespo...4NTQ3NjAzNmYyZkE0ptok=51596410150083154060#f/q> (2 sur 3) [07/02/2012 09:58:24]

Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte



Enquête sur les méthodes d'acquisition et de traitement du trait de côte

4ème partie : commentaire libre
Ce questionnaire touche à sa fin. Nous vous remercions d'avoir pris le temps de le compléter.

Si vous avez des remarques complémentaires, merci de les indiquer ci-dessous :
expression de besoins en terme de suivi du trait de côte ou d'autres types de méthodes pratiquées à l'étranger, etc.

Fourni par [Google Documents](#)

[Signaler un cas d'utilisation abusive](#) - [Conditions d'utilisation](#) - [Clauses additionnelles](#)

<https://docs.google.com/spreadsheets/formResponse?...4M504WTQ3NjAzNmYyZ2E&ptok=51596410150083154085#q> [07/02/2012 09:59:02]

Annexe 3 : Liste des organismes sollicités pour l'enquête

Rattachement Région	Organisme
Nord Pas-de-Calais	DREAL
	Université du Littoral Côte d'Opale, LOG
	DDTM Pas-de-Calais
Picardie	Conseil Général de la Somme, Amiens
	Syndicat mixte Baie de Somme Grand Littoral Picard
	Université de Picardie Jules Verne UFR des sciences
	DDTM Somme
	Conseil Régional de Picardie
	Groupe d'Étude des Milieux Estuariens et Littoraux - GEMEL Station Étude Baie de Somme
Normandie	DDTM Manche / SERIS / RISC
	DDTM Seine-Maritime
	Université de Caen pour Basse et Haute Normandie, laboratoire Géophen
	CREC-UCBN (Univ. Caen)
	Région Basse-Normandie
	ROLNP
	CETE Normandie Centre
Ile-de-France	SOeS / MEEDDM / MEDDE
Centre	BRGM / RIS
Bretagne	Vice-président de Cap l'Orient Agglomération
	CETE Ouest / LRPC St-Brieux

	Laboratoire de géomorphologie et environnement littoral, CNRS
	DDTM Morbihan
	DDTM Finistère
	DREAL Bretagne (CZ2M)
	Pôle Mer Bretagne
	BRGM Bretagne
	Université de Bretagne Occidentale, IUEM
	In Vivo Environnement
	SHOM
Pays de la Loire	BRGM Pays de la Loire
	DREAL Pays de la Loire
	GIP Loire Estuaire
	Université de Nantes, IGARUN, Observatoire du littoral des Pays de Monts
	Communauté de Communes de l'Île de Noirmoutier
	ONF Nantes
	Observatoire de l'île de Noirmoutier
Poitou-Charentes	Conseiller municipal de la Tranche/Mer
	Université La Rochelle, laboratoire LIENSs
	DREAL Poitou-Charentes
	CREOCEAN
Aquitaine	Conservatoire du Littoral
	Observatoire Côte Aquitaine / BRGM AQI
	GEO-Transfert
	Sogreah
	CETE Sud-Ouest

	CASAGEC
	ONF
Languedoc-Roussillon	BRGM LR
	Université de Montpellier 2, SO LTC
	Observatoire départemental du littoral de l'Hérault
	Université de Perpignan, laboratoire IMAGES
	DREAL
	EID Méditerranée Montpellier
	Observatoire Régional des Risques
PACA	DDTM Var / DML / BATB
	Observatoire des zones humides de Camargue gardoise
	CRIGE PACA
	BRGM Paca
	Conseil Général Bouches-du-Rhône
	Université d'Aix en Provence, laboratoire CEREGE
	Région PACA
	CG Alpes-Maritimes
Corse	BRGM Corse
La Réunion	Laboratoire Géosciences Réunion de l'Université de La Réunion
Guyane (contact)	EcoLab (laboratoire écologie fonctionnelle et environnement), université Paul Sabatier-Toulouse III / CNRS / institut national polytechnique de Toulouse
Echelle nationale	CETMEF
	EUCC-France
	IGN

Figure 89 : Liste des organismes sollicités pour l'enquête

Annexe 4 : Analyse des résultats de l'enquête

Une enquête a été menée auprès des principaux producteurs de données « de trait de côte » en France métropolitaine et outremer afin de compléter la synthèse bibliographique. Le questionnaire a été validé par le Comité de Pilotage. La liste des personnes interrogées a été définie par le Comité de Pilotage de manière à représenter les principaux acteurs impliqués techniquement dans les suivis du trait de côte (établissements publics, universités, services de l'État, des collectivités, etc.). L'objectif principal de cette enquête est d'apporter des précisions quant aux pratiques de suivi et de traitement couramment utilisées en France, ainsi qu'au contexte de réalisation (recherche, aménagement, etc.).

Cette enquête complète celle qui fut précédemment réalisée dans le cadre de l'actualisation des catalogues sédimentologiques des côtes françaises. Elle confirme d'une part les besoins exprimés des organismes concernés (majoritairement les producteurs de données), et précise surtout les méthodes de suivi couramment employées en France.

Le questionnaire a été mis en ligne du 30/11/11 au 31/01/12. Il comprend 36 questions et nécessite environ 15 à 20 minutes pour être complété (annexe 2).

Lors de cette enquête, 81 personnes ont été sondées et 27 ont répondu, soit 33% environ (annexe 3 ; Figure 89).

Cette analyse de résultats se présente sous forme d'une synthèse plus ou moins détaillée et ne donne en aucun cas, d'informations précises sur les méthodes de suivi ou autre. Il est donc nécessaire de se référer au sein même du document.

NB 1 : L'enquête ayant été réalisée en fin d'année 2011, il est possible que certaines propositions de réponses ne soient pas « visibles » au sein du guide méthodologique de suivi du trait de côte. En effet, quelques changements (notamment concernant les méthodes de traitement) ont été effectués en tout début d'année 2012.

NB 2 : Certaines questions donnent la possibilité de réponses multiples, c'est pourquoi les pourcentages de réponses peuvent être supérieurs à 100%.

1^{ère} partie : Les méthodes d'acquisition du trait de côte

La première partie vise à connaître les différentes techniques utilisées sur le littoral français (métropole et DOM TOM), tout en précisant au préalable, le type de milieu faisant l'objet de suivi (fréquenté), ainsi que le ou les indicateurs de trait de côte choisi(s).

1. Milieux fréquentés

Comme le montre le graphique ci-dessous (Figure 90), la côte sableuse est le milieu le plus suivi / fréquenté.

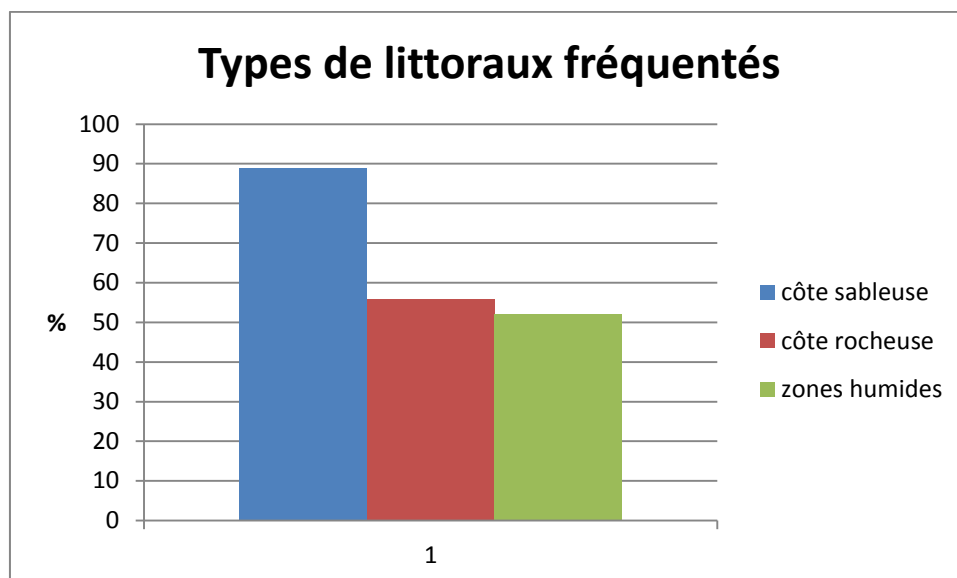


Figure 90 : Réponses à la question 1: Sur quel type de littoral travaillez-vous ?

2. Choix des indicateurs de trait de côte

A la question « En fonction du type de littoral sur lequel vous travaillez, quel indicateur du trait de côte choisissez-vous ? », il en ressort que les sondés choisissent le ou les indicateur(s) de trait de côte en fonction du milieu, de l'objectif recherché mais aussi de la méthode de suivi qu'ils emploient. En général, le pied de dune est cité pour le milieu côte sableuse et le pied/sommet de falaise pour la côte rocheuse.

3. Echelles d'espace

Comme le montre le graphique ci-dessous (Figure 91), il en ressort que seule une minorité des sondés travaille à l'échelle nationale (environ 31%), la majeure partie travaillant à l'échelle locale (74%).

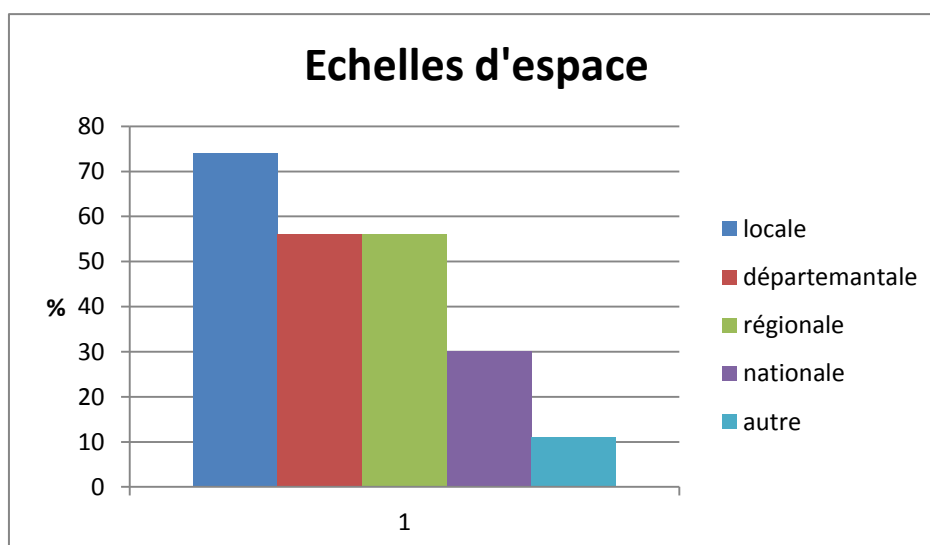


Figure 91 : Réponse à la question 3 : Lors de vos missions, sur quelle échelle d'espace travaillez-vous ?

4. Télédétection spatiale

Les images satellites sont encore rarement utilisées par rapport à d'autres méthodes (DGPS, LiDAR, photographie aérienne). Cependant, elle présente de nombreux avantages tels que les coûts pouvant être amortis, la fauchée importante de la prise de vue, la très bonne résolution et précision des images, la répétitivité qui permet d'obtenir des images à intervalles de temps rapprochés, dans des zones éloignées ou difficiles d'accès, etc. D'après le graphique ci-après (Figure 92), les images multispectrales de type SPOT restent les plus utilisées.

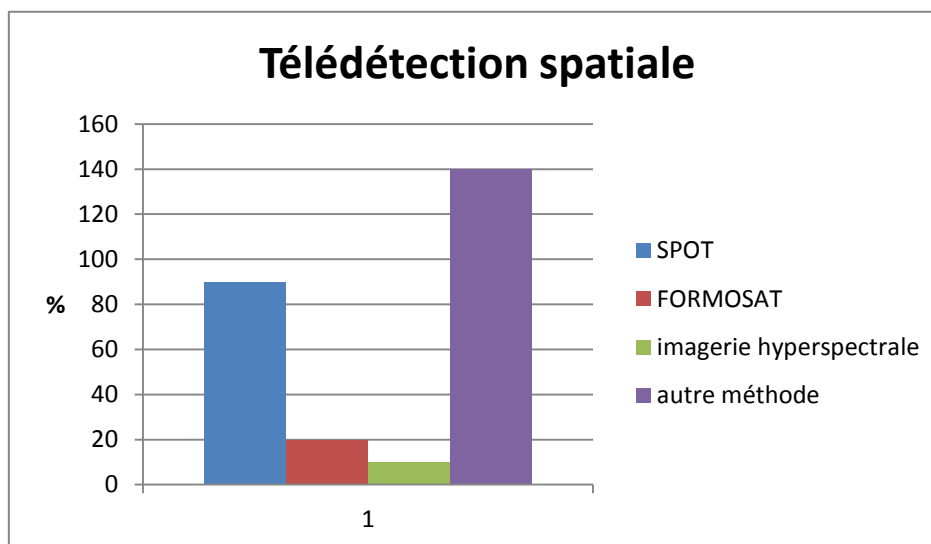


Figure 92 : Réponses à la question 4 : Lors de vos missions, quel type de capteur utilisez-vous ?

Concernant les coûts financiers, il reste difficile de les estimer (très variable). Quelques fourchettes de coûts ont été estimées par certains sondés, mais elles restent très spécifiques au projet donné.

5. Télédétection aérienne

Concernant la télédétection aérienne, il s'avère que, dans le cas présent, la photographie aérienne plane (ou verticale) principalement, ainsi que le LiDAR aéroporté sont fortement employés (Figure 93), en raison, de la bonne efficacité de ces méthodes. En effet, le LiDAR permet de donner une référence altimétrique et les informations topographiques, acquises par ce dernier, permettent d'éviter des erreurs de photo-interprétation. La photographie aérienne, quant à elle, offre des données de très bonne qualité et notamment la photographie aérienne oblique, donne un aperçu qualitatif sur de grands espaces, souvent, à la suite d'un événement météo-marin notable.

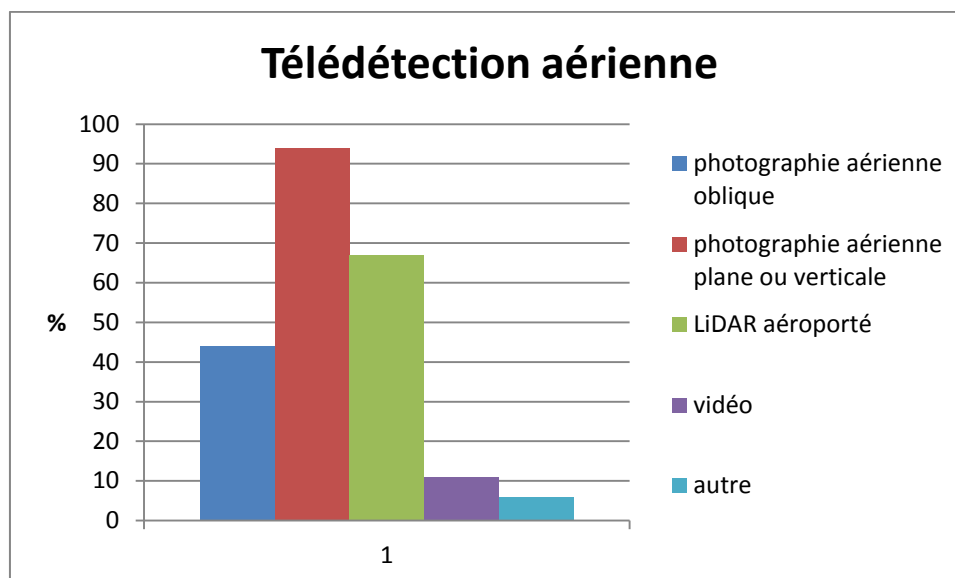


Figure 93 : Réponses à la question 8 : Lors de vos missions, quelle méthode d'acquisition utilisez-vous ?

Au niveau des fréquences d'acquisition, elles sont souvent occasionnelles (en fonction des événements importants) voire annuelles. Les coûts restent, une fois encore, très variables (pouvant aller de 1 à 5 k€/ km²).

6. Types de porteur aérien

Comme le montre le graphique suivant (Figure 94), l'avion est le porteur aérien le plus utilisé. Cependant, le drone et notamment l'ULM, sont les méthodes les moins onéreuses. Aussi, les caractéristiques de ces méthodes restent facilement attractives pour effectuer des levés notamment obliques (porteur lent, possibilité de survol à basse altitude). Il faut noter que le ballon (captif ou non), est un porteur aérien utilisé uniquement par l'Observatoire de la Côte Aquitaine.

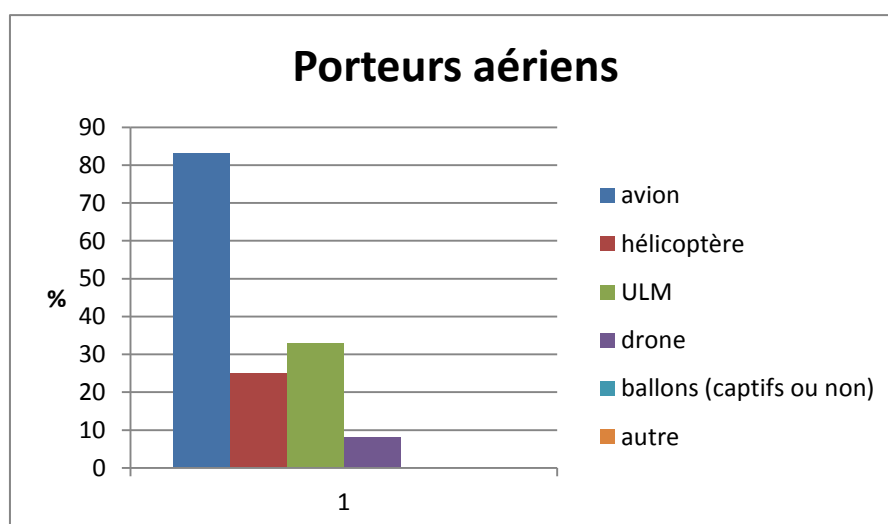


Figure 94 : Réponses à la question 12 : Quel type de porteur aérien utilisez-vous ?

7. Autres mesures à distance

Ce type de technique reste encore peu employé (Figure 95), actuellement, en France métropolitaine (excepté dans le Languedoc-Roussillon où l'échosondeur sismique fait l'objet de nombreuses études) notamment en raison des coûts qui peuvent s'avérer élevés. Cependant, ces approches offrent de nombreux avantages (bonne précision) et mériteraient d'être plus exploitées.

Les relevés bathymétriques semblent plus utilisés dans les DOM TOM en raison de la géomorphologie des côtes des milieux tropicaux (bancs de vase, mangroves, etc.).

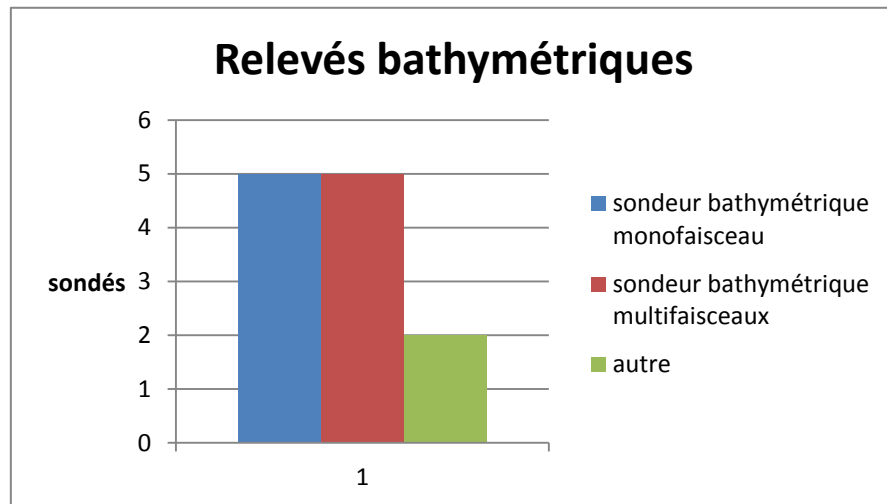


Figure 95 : Réponses à la question 15 : Lors de vos missions, quelle méthode d'acquisition utilisez-vous ?

8. Mesures directes au sol

La méthode par DGPS reste la plus utilisée (Figure 96) en raison notamment de sa simple utilisation, de ses coûts attractifs, de l'excellente précision des données (centimétrique) et de sa fréquence d'utilisation (plusieurs campagnes annuelles). Le scanner 3D est, quant à lui, une méthode peu employée. De manière générale, les mesures directes au sol (acquisition terrestre) sont des techniques connues et utilisables facilement.

De même, pour ces approches, les coûts sont difficiles à estimer (moyens humains, matériels, maintenance, etc.) mais sont dans l'ensemble peu coûteux.

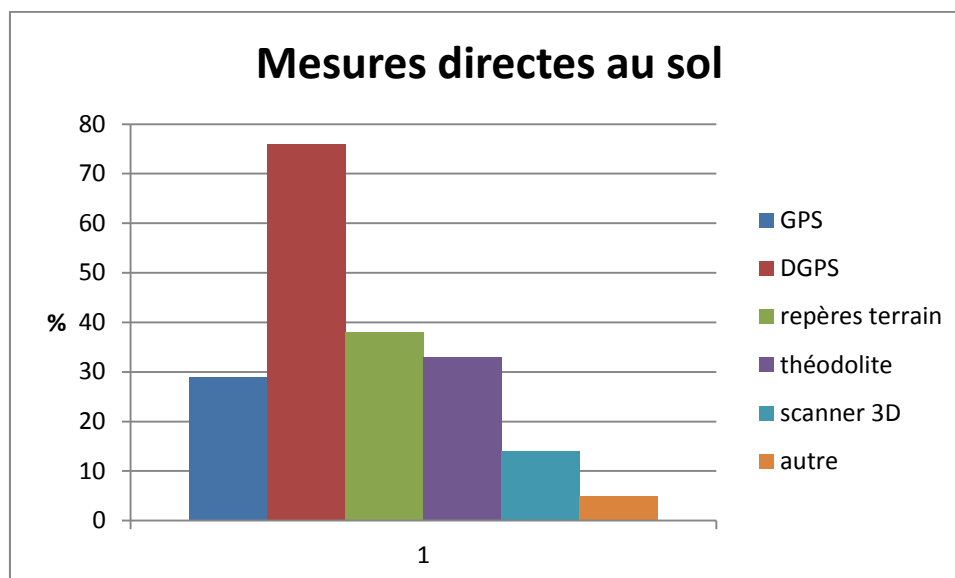


Figure 96 : Réponses à la question 19 : Lors de vos missions, quelle méthode d'acquisition utilisez-vous?

9. Protocole d'utilisation

Les sondés reconnaissent avoir accès à des protocoles d'utilisation concernant les méthodes de suivi qu'ils utilisent et dans certains cas, peuvent éventuellement les mettre à disposition.

2^{ème} partie : Les méthodes de traitement du trait de côte

La deuxième partie vise à connaître les différents outils d'archivage et méthodes de traitement utilisés sur le littoral français (métropole et DOM TOM).

1. Outils employés pour le traitement des données

Les SIG (arcGis®, MapInfo®) principalement, ainsi que les tableurs de type Excel (Microsoft®) sont des outils fréquemment employés pour traiter les données récoltées (Figure 97). Les bases de données sont utilisées en complément (calculs) du SIG, de même que les tableurs (création de graphiques, profils, etc.).

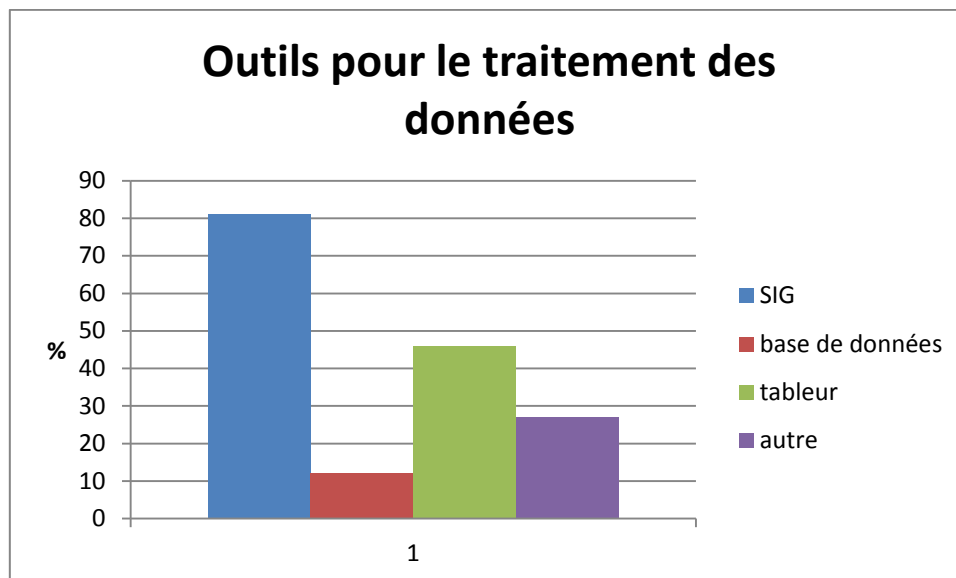


Figure 97 : Réponses à la question 24 : Quel outil employez-vous pour traiter les données récoltées ?

2. Méthodes de traitement utilisées

Les méthodes de traitement suivantes sont très utilisées : représentation plan/ profil du trait de côte et croisement SIG du trait de côte (Figure 98). Les méthodes employées varient en raison des demandes, des objectifs, des problématiques de sujet, etc.

Cette question n'apporte pas réellement d'informations à l'étude.

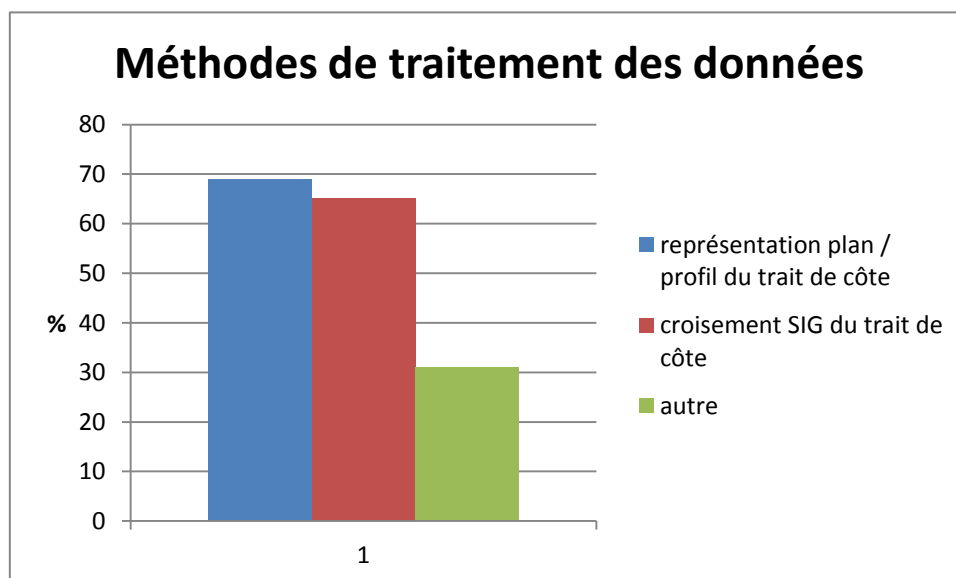


Figure 98 : Réponses à la question 26 : Quelle méthode employez-vous pour traiter les données récoltées ?

3. Données complémentaires

Aux questions posées, « Pour vos analyses, avez-vous besoin d'autres informations complémentaires ? Procédez-vous à des levés d'autres types de données pour aboutir à ces

analyses d'évolution ? Si oui, lesquels ? Et quel type d'outil vous permet de réaliser ces analyses ? », il en ressort que les sondés témoignent d'un besoin de données complémentaires afin d'aboutir aux analyses d'évolution du trait de côte. Les informations souhaitées sont des données hydrographiques (niveaux marins, données de houle et de courants), bathymétriques et topographiques (fines et mises à jour de façon régulière), de végétation des dunes, etc. Le croisement des données avec d'autres partenaires est également à prendre en compte. Les outils utilisés pour ces analyses sont principalement les SIG.

3^{ème} partie : Valorisation et capitalisation

La troisième partie vise à connaître, après acquisition et traitement des données, le bilan et les résultats de l'étude.

1. Donnée finale produite

La majeure partie des données finales produites sont des cartes, des publications scientifiques et des rapports (y compris les graphiques).

2. Mise à disposition des traits de côte levés

La mise à disposition des données peut se faire dans le cadre des observatoires du littoral (Observatoire de la Côte Aquitaine, Pays de Monts, etc.). La mise à disposition n'est cependant pas systématique, et dans la majeure partie des cas, les échanges ne s'effectuent qu'entre partenaires locaux.

3. Projets concrets en France métropolitaine et DOM TOM

L'application des méthodes de suivi s'effectue notamment dans le cadre des différents observatoires du littoral. Il existe aussi des projets mettant en place ces applications (Litto 3D, calculs d'érosion, cartes marines, stratégie régionale de gestion du trait de côte, etc.).

4. Trait de côte standard

Un trait de côte standard doit contenir certaines informations (métadonnées) afin d'être exploité par différents utilisateurs et d'être comparé à différentes échelles. Ces informations peuvent être la définition du trait de côte utilisée, la méthode d'acquisition choisie, la marge d'erreur moyenne, le type de côte, la date, la marée (hauteur d'eau lors de la mesure), l'estimation de la vitesse sur une période de temps assez longue, l'auteur de la donnée, etc.

5. Finalité des suivis

La finalité des suivis réalisés peuvent être des missions dans le cadre des observatoires, la gestion du risque et du territoire, des suivis d'indicateurs, etc. Les suivis sont établis pour mettre à disposition des connaissances et communiquer auprès des gestionnaires, des élus, du grand public, etc.

6. Origine des financements

Les sources de financements sont diverses. Elles peuvent provenir de l'État, des collectivités, des universités, etc.

4^{ème} partie : Commentaire libre

Aucune information particulière ne se dégage de cette partie.

Conclusion

Cette enquête a permis d'apporter des compléments d'informations (méthodes de suivi du trait de côte fréquemment utilisées en France) par rapport à celle précédemment lancée par le Ministère de l'Écologie (CETMEF – CETE Méditerranée, 2011). Les informations fournies par les sondés sur leurs activités indiquent une bonne représentativité des acteurs du littoral notamment en terme de localisation et d'organismes concernés.

De manière générale, il en ressort que certaines méthodes de suivi restent encore peu employées (LiDAR, bathymétrie par exemple), en raison des coûts qui peuvent présenter un obstacle non négligeable mais aussi de la mise en œuvre de certaines techniques qui peuvent présenter certaines difficultés en fonction du milieu fréquenté. Les techniques courantes (GPS, DGPS, photographie aérienne, etc.) ont cependant besoin d'être couplées à d'autres afin d'effectuer des analyses précises de l'évolution du trait de côte. L'utilisation des outils d'archivage, ainsi que les méthodes de traitement du trait de côte, sont, dans la majeure partie des cas, spécifiques à chaque organisme.

Il demeure important de bien définir au préalable les besoins, l'**indicateur** dans le milieu choisi, et enfin, il faut tenir compte des autres données (hydrographiques, bathymétriques, topographiques, etc.) pour aboutir à une analyse plus précise.

Annexe 5 : Les porteurs aériens

La **télétection** aérienne associe un appareil de prise de vue ⁴⁸ à un moyen de transport (porteur aérien) de cet appareil tel que les avions légers monomoteur, les hélicoptères, les ULM, les **drones**, les ballons captifs (uniquement pour les prises de vue aériennes obliques), les dirigeables et montgolfières.

Avantages

Les porteurs permettent de couvrir de grandes surfaces. Le coût des survols est relativement élevé, mais l'acquisition de photographies d'archive reste attractive.

L'ULM reste le moyen le moins coûteux des porteurs aériens.

Le drone est très apprécié en raison notamment de son gabarit léger permettant ainsi une mise en œuvre rapide sans accès à un aéroport et un faible coût de mise en œuvre et de consommation. La vitesse lente de cet appareil permet des prises de vue de grande qualité et un pilotage relativement facile qui permet de couvrir de grandes surfaces. Cependant, ce type d'appareil est fortement dépendant des conditions météorologiques (dépend fortement du vent et de la pluie) (d'après le site du CNRS).

Inconvénients

L'utilisation de porteurs aériens nécessite de prendre des précautions notamment sur le plan législatif (assurances, droit d'utilisation des couloirs aériens etc.). Certains dépendent particulièrement des conditions météorologiques (ULM, drone, etc.). Certains porteurs sont mieux adaptés à certaines missions : l'avion est utilisé pour la prise de vue verticale.

⁴⁸ Les appareils de prises de vue sont d'une part les appareils optiques classiques, et d'autre part les appareils numériques (imagerie optique).

Annexe 6 : Paramètres et caractéristiques du levé LiDAR

Cette annexe s'inspire du site du SHOM, b (programme Litto3D®).

Le LiDAR bathymétrique

Les caractéristiques du LiDAR bathymétrique sont :

- une vitesse de vol comprise entre 50 et 100 m/s ;
- une altitude de vol comprise entre 200 et 400 m ;
- des profondeurs sondées comprises entre 0,2 et 70 m ;
- quatre résolutions de sondes disponibles : 2x2, 3x3, 4x4, ou 5x5 (mxm) ;
- une largeur de fauchée comprise entre 50 et 240 m en fonction de la densité de sondes choisie ;
- une fréquence d'acquisition très variable. En général, le LiDAR bathymétrique opère à une fréquence plus faible que le système topographique car l'eau est un milieu plus dense que l'air et la puissance des impulsions est plus élevée.

L'acquisition Litto3D® est réalisée pour fournir un point/25 m².

Les précisions sont de 2,80 m en planimétrie et 50 cm en altimétrie.

Les limites d'emploi sont la turbidité, le soleil, les facteurs climatiques.

Le LiDAR topographique

Les principaux paramètres du système, qui influent sur la densité de points obtenus au sol, sont :

- la vitesse et la hauteur de vol ;
- l'angle maximal et la fréquence de balayage ;
- la fréquence des impulsions laser.

Par exemple, pour un vol à 80 m/s et à 900 m, avec une fréquence de balayage de 45 Hz à +/- 22° et des impulsions à 100 kHz, on obtient une densité au sol de 2 points/m².

La précision altimétrique d'un levé LiDAR est principalement limitée par celle de la trajectographie. Elle est de l'ordre de 15 à 20 cm en règle générale.

La précision planimétrique dépend directement de la hauteur de vol, et est de l'ordre de 20 à 50 cm selon cette dernière.

L'acquisition LiDAR est réalisée de telle façon qu'elle fournisse en moyenne 2 impulsions/m².

Après l'acquisition, différents traitements sont réalisés :

- calcul de la trajectographie du vecteur aérien ;
- mise en géométrie du nuage de points LiDAR (y compris passage en coordonnées planes et altitudes) et recalage relatif du nuage de points ;
- classification automatique et interactive du nuage de points, de façon à ne conserver que des points situés effectivement au sol.

Les seules contraintes prises en compte pour déterminer les plages horaires acceptables lors de l'acquisition des données sont celles liées aux hauteurs d'eau (hauteur comprise entre 20% et 50% du marnage, déterminée au cas par cas). Ceci ne concerne que les axes de vols sur l'estran. Il n'y a aucune limitation horaire pour l'acquisition des axes de vol situés à l'intérieur des terres, sous réserve que les images acquises simultanément soient exploitables.

Annexe 7 : Descriptions complémentaires de l'imagerie satellitaire FORMOSAT-2 et Pléiades

1. Les caractéristiques des scènes FORMOSAT-2 sont détaillées dans la Figure 99 ci-après :

Produits	N&B : 2 m Couleur : 2 m (produit fusionné) Multispectral (R, V, B, PIR) : 8 m Bundle (images Pan et MS séparées)
Bandes spectrales	P : 0,45 – 0,90 μ m B1 : 0,45 – 0,52 μ m (Bleu) B2 : 0,52 – 0,60 μ m (Vert) B3 : 0,63 – 0,69 μ m (Rouge) B4 : 0,76 – 0,90 μ m (Proche Infra Rouge)
Emprise	24 km x 24 km
Revisite	quotidienne
Angles de visée	latéral et avant-arrière : +/- 45°
Programmation	oui L'acquisition simultanée des images panchromatiques et multispectrales est possible
Dynamique de l'image	8 bits/pixel
Taille des images (niveau 1A hors métadonnées)	MS : 35 Mo Pan : 137 Mo

Figure 99 : Tableau présentant la description des données FORMOSAT-2 (d'après le site ASTRIUM, a)
NB : Les données sont exprimées pour des images acquises en visée verticale (au **nadir**)

2. Les caractéristiques des scènes Pléiades sont détaillées dans la Figure 100 ci-après :

Produits	Couleur : 50 cm (fusion) Bundle : 50 cm panchromatique; 2 m multispectral
Précision de localisation	4,5 m CE90 sans points d'appui avec RATT fine
Revisite	Quotidienne, grâce à la constellation
Bandes spectrales	P : 480 - 830 nm Bleu : 430 - 550 nm Vert : 490 - 610 nm Rouge : 600 - 720 nm Proche infrarouge : 750 - 950 nm
Fauchée	20 km
Programmation	Plan mis à jour toutes les 8 heures
Niveaux de prétraitement	Standard (1A) Ortho (automatique)

Figure 100 : Tableau présentant la description des données Pléiades (d'après le site Astrium, c)



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

BRGM Aquitaine
Parc Technologique Europarc
24, Avenue Léonard de Vinci
33600 – Pessac - France
Tél. : 05 57 26 52 70