

Université du Québec
INRS : Centre Eau, Terre et Environnement

**Relations statistiques entre les mesures de vent *in situ* et les
estimations de vents en région côtière obtenus par imagerie
RSO de RADARSAT-1**

Par
Benoit RICARD

Mémoire présenté
pour l'obtention
du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)
Sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Examineur externe	Pierre LAROUCHE, Institut Maurice-Lamontagne Laboratoire de télédétection
Examineur interne	Yves GRATTON, INRS : Centre Eau, Terre et Environnement
Directrice de recherche	Monique BERNIER, INRS : Centre Eau, Terre et Environnement
Codirecteur de recherche	Gaëtan LAFRANCE, INRS : Centre Énergie, Matériaux et Télécommunications

RÉSUMÉ

Projet : Évaluation de la ressource éolienne à partir d'images RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) du satellite RADARSAT-1.

Volet : Relations statistiques entre les valeurs de vent *in situ* et les estimations en milieu côtier.

Cas : Golfe du Saint-Laurent

Une étude réalisée à l'INRS (Choisnard, Lafrance et Bernier, 2004) a démontré l'intérêt d'utiliser la cartographie du vent par imagerie RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) de RADARSAT-1 en région côtière. Cette étude a mis en évidence la complémentarité qu'apporte cette méthode aux modèles meso-échelles déjà utilisés par l'industrie éolienne. En effet, la sensibilité du RSO face aux turbulences locales permet l'analyse des patrons de vent complexes. L'étude a été réalisée avec un jeu de 57 images radar transformées en cartes de vent du Golfe du Saint-Laurent par l'application d'un modèle hybride en bande C (modèle empirique CMOD-IFR2 et rapport de polarisation de Kirchhoff).

Afin d'exploiter la méthode RSO pour estimer la distribution du vent sur la côte, il est intéressant d'évaluer l'impact du changement de régime terre/mer. Ce changement est caractérisé par une orographie plus complexe ainsi que par une augmentation de la rugosité due à l'occupation du sol en milieu terrestre. De plus, le changement de température à la surface vient influencer les déplacements d'air.

L'objectif de cette étude est d'explorer une méthode d'extrapolation du vent en milieu côtier. Pour ce faire, les données de vent préalablement estimées par imagerie RSO sont comparées aux données mesurées, *in situ*, par les anémomètres installés sur des mâts de mesure terrestres. Avant tout, une hypothèse est posée selon laquelle la vitesse du vent en un point situé sur la côte serait une fonction des variables suivantes :

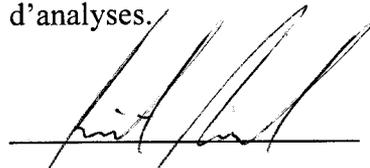
$$U_t = f(U_m, \Phi, \Delta T, Z_d, Z_a, Z_r)$$

où U_t est la vitesse du vent obtenue sur terre, U_m est la vitesse estimée du vent en mer, Φ est la direction du vent mesurée, ΔT est la différence de température à la surface (terre/mer), Z_d est la distance séparant le point sur terre et la ligne de côte, Z_a est l'élévation de ce même point et Z_r est la longueur de rugosité moyenne séparant le point de la ligne de côte

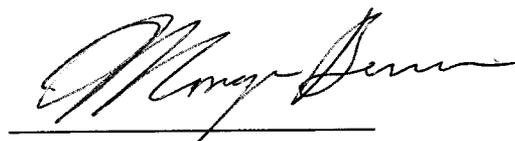
Ce travail a permis l'identification des facteurs ayant un rôle sur la distribution des vents en milieu côtier. Ainsi, cinq facteurs ont été retenus pour l'évaluation de leurs impacts sur les déplacements d'air. De plus, cette recherche identifie des sources de données qui sont très utiles pour l'évaluation de la ressource éolienne au Québec et même au Canada en plus de proposer une démarche à suivre pour cibler ou paramétrer les facteurs retenus.

Du point de vue méthodologique, l'utilisation d'un SIG (Système d'Information Géographique) permet de corréler les facteurs qui sont co-localisés. Les couches d'information géoréférencées, représentant les différents facteurs, sont superposées afin d'analyser leur influence respective. Les données numériques pour 12 sites de la région côtière située au nord de la péninsule gaspésienne ont été comparées. Ces analyses ont fait ressortir que chaque site possède des caractéristiques distinctes susceptibles d'influencer la vitesse et/ou la direction du vent et que la portée relative de ces facteurs est inter-reliée. Pour surmonter cette difficulté, l'étude propose de séparer les données de l'échantillon en un certain nombre de classes en fonction de la direction du vent et de la situation orographique du milieu.

Finalement, en séparant l'échantillon en classes et en intégrant un facteur qui est sensible à la pente du milieu côtier ou à la rugosité de la surface, nous sommes en mesure d'améliorer l'explication de la mesure terrestre à partir de la mesure marine. Cette amélioration est obtenue grâce à une liste d'équations simples proposée suite à une série d'analyses.



Étudiant



Directrice de recherche

REMERCIEMENTS

Avant de débiter, j'aimerais remercier Yves Gratton, professeur à l'INRS-ETE, et Pierre Larouche, chercheur à l'IML, pour avoir accepté d'être examinateurs de ce mémoire. De plus, je remercie le laboratoire de télédétection de l'Institut Maurice-Lamontagne pour les matrices SST (températures de surface du Saint-Laurent obtenues à partir des images AVHRR des satellites NOAA) que j'ai pu utiliser pour en extraire les données nécessaires à la création de mon échantillon.

Aussi, merci aux gens qui ont eu un rôle important dans cette étape de ma formation. Je tiens donc à remercier les professeurs Monique Bernier et Gaëtan Lafrance qui m'ont proposé un sujet d'actualité qui s'insérait bien dans mon cheminement scolaire et professionnel. Plus particulièrement, merci à Monique d'avoir été aussi accessible et de m'avoir encouragé à participer à différents événements formateurs. Merci à Gaëtan pour sa bonne humeur et sa disponibilité malgré un horaire chargé. Merci aussi à Julien Choissard pour son excellent travail qui m'a servi de référence pour ce projet. Merci à Philippe Beaucage avec qui j'ai eu des discussions qui m'ont permis d'évoluer dans ma recherche.

Je voudrais aussi remercier Karl qui m'a redonné goût à la compétition de vélo de montagne. La forme et la santé aident à éclaircir les idées. Sans oublier Marie-Ève que je remercie pour son support, ses paroles d'encouragement et ses corrections.

Pour terminer, lors de la rédaction de ce mémoire, le gouvernement provincial annonçait un éventuel appel d'offre pour l'achat d'un nouveau bloc de 2000 MW d'énergie éolienne par Hydro-Québec. Les travaux qui devront être effectués aideront sûrement le Québec à développer son expertise dans le domaine et positionnera la province comme étant un important producteur d'électricité à partir de la filière éolienne.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
REMERCIEMENTS	v
1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS	1
1.1 MISE EN CONTEXTE.....	1
1.2 L'ESTIMATION DU POTENTIEL ÉOLIEN	2
1.3 PROBLÉMATIQUE	5
1.4 OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES	6
1.5 PLAN DU MÉMOIRE.....	7
2 MÉCANISMES DU VENT.....	9
2.1 COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE.....	9
2.2 CHANGEMENT DE RÉGIME TERRE/MER.....	10
2.2.1 La direction du vent	12
2.2.2 Les propriétés thermiques de la surface.....	13
2.2.3 L'orographie	14
2.2.4 La variation de la rugosité.....	15
2.2.5 Les vitesses de vent.....	16
3 MÉTHODOLOGIE ET RÉGION À L'ÉTUDE.....	17
3.1 RÉGION D'ÉTUDE	17
3.2 SITES D'ÉTUDE.....	19
3.2.1 Identification des sites.....	19
3.2.2 Visite et localisation des mâts de mesures	23
3.3 DONNÉES OROGRAPHIQUES.....	24
3.3.1 Description des données	25
3.3.2 Correction des données	27
3.3.3 Illustration du facteur orographique.....	28
3.4 DONNÉES DE RUGOSITÉ.....	29
3.4.1 Description des données	29
3.4.2 L'occupation du sol.....	29
3.4.3 Conversion de l'occupation du sol en longueur de rugosité	33
3.4.4 Illustration du facteur de rugosité	34
3.5 ESTIMÉS DE LA VITESSE DU VENT.....	35
3.5.1 Illustration des estimés de la vitesse du vent	36
3.6 DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE SURFACE POUR LE SAINT-LAURENT	38
3.6.1 Illustration des températures de surface pour le Saint-Laurent	39
3.7 DONNÉES SUR LA DIRECTION DU VENT.....	42
3.7.1 Illustration de la direction du vent	42
3.8 DONNÉES DE VENT POUR CHACUN DES SITES TERRESTRES	42
3.8.1 Données du MRNQ.....	42
3.8.2 Données d'Environnement Canada.....	44
3.9 DÉFINITION DE L'ÉCHANTILLON.....	44
4 ANALYSES ET RÉSULTATS	47
4.1 CAS DES STATIONS PRÈS DE LA CÔTE	47
4.2 ENSEMBLE DES CONDITIONS	48
4.3 ÉVALUATION DE LA VARIABLE INTENSITÉ DU VENT	50

4.4	ÉVALUATION DE LA VARIABLE DIRECTION DU VENT	51
4.5	ÉVALUATION DE LA VARIABLE OROGRAPHIE	53
4.5.1	Vents de mer	54
4.5.2	Vents de terre	57
4.5.3	Vents parallèles	60
4.6	ÉVALUATION DE LA VARIABLE RUGOSITÉ	63
4.6.1	Vents de mer	64
4.6.2	Vents de terre	65
4.6.3	Vents parallèles	66
4.7	ÉVALUATION DE LA VARIABLE TEMPÉRATURE	66
4.8	ÉQUATIONS D'EXTRAPOLATION DU VENT	68
4.9	L'EXTRAPOLATION DU VENT	69
5	CONCLUSIONS	71
	ANNEXE	77
	LISTE DES RÉFÉRENCES	91

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1 - Carte de vent à macro-échelle. Extraite de http://www.cdc.noaa.gov/map/ (2005).....	3
Figure 1.2 - Carte de vent à méso-échelle. Extraite de Hélimax Énergie inc. (2004)	3
Figure 1.3 - Exemple d'instruments de mesure du vent. Extrait de http://www.nrgsystems.com/store/sensors.php (2005).	4
Figure 2.1 – Trois cartes produites à partir des scènes de RADARSAT-1 illustrant les trois principales directions de vent. Adaptées d'images traitées par Choisnard (2004)..	12
Figure 2.2 – Graphique illustrant l'augmentation de la vitesse du vent au sommet d'une colline aux pentes douces. Modifiée d'après Troen et Petersen (1991).	14
Figure 2.3 – Graphique illustrant le ralentissement de la vitesse du vent au voisinage du sol dû à la rugosité du terrain et aux obstacles au sol. Modifié d'après Troen et Petersen (1991).	15
Figure 3.1 – Carte illustrant les cadres des scènes RADARSAT-1 superposées à la région d'étude.	18
Figure 3.2 – Carte de localisation des mâts de mesure sélectionnés.	19
Figure 3.3 – Illustration des informations topographiques pour un des sites. i) en haut à gauche : carte topographique au 1 : 50 000, ii) en bas à gauche : MNA corrigé de la même région, iii) en bas à droite : coupe topographique transversale à la ligne de côte, iv) en haut à droite : photo servant de comparaison avec la coupe topographique.	28
Figure 3.4 – Exemple de carte d'occupation du sol et longueurs de rugosité	34
Figure 3.5 – Illustration des quatre méthodes d'extraction.....	37
Figure 3.6 – Comparaison des régressions linéaires entre la vitesse du vent de surface sur les images de RADARSAT-1 et la vitesse du vent aux stations côtières (pour	

l'ensemble du jeu de données). Chacune des couleurs correspond à une des méthodes d'extraction des vitesses qui ont été proposées.	37
Figure 3.7 – Exemple de carte de températures de surface pour le cas du 17 septembre 2002 (données de températures provenant du laboratoire de télédétection de l'Institut Maurice-Lamontagne).	41
Figure 4.1 – Régressions linéaires entre la vitesse du vent de surface dérivée des images de RADARSAT-1 et la vitesse du vent aux stations côtières pour les deux stations près de la côte.	47
Figure 4.2 – Régression linéaire entre la vitesse du vent de surface dérivée des images de RADARSAT-1 et la vitesse du vent aux stations côtières pour l'ensemble des conditions.	49
Figure 4.3 – Régressions linéaires entre la vitesse estimée sur mer (gauche) ; la vitesse mesurée sur terre (droite) et la différence des mesures de vitesses du vent (vitesse de surface en mer moins la vitesse de surface sur terre).....	50
Figure 4.4 – Régressions linéaires entre la vitesse estimée sur mer en séparant l'échantillon d'après trois directions distinctes et la vitesse mesurée sur terre (gauche) ; différence des mesures de vitesses du vent (vitesse de surface en mer moins la vitesse de surface sur terre) (droite).	52
Figure 4.5 – Schéma de la création d'une zone de séparation.	54
Figure 4.6 – Régressions linéaires entre la vitesse du vent de surface sur mer et la vitesse du vent de surface sur terre pour les quatre situations de vent de mer.	55
Figure 4.7 – Régressions linéaires entre la vitesse du vent en mer et la différence entre les vitesses de vent (vitesse de surface en mer moins la vitesse de surface sur terre) pour deux situations de vent de mer : « Pente » (gauche) et « Escarpement » (droite).	56
Figure 4.8 – Régressions linéaires résultantes lorsqu'un indice de pente (élev./dist.) est ajouté aux quatre situations de vents de mer.	57

Figure 4.9 – Régressions linéaires entre la vitesse du vent de surface en mer et la vitesse du vent de surface sur terre pour les trois situations de vent de terre.	58
Figure 4.10 – Régressions linéaires entre la vitesse en mer et la différence entre les vitesses (vitesse de surface en mer moins la vitesse de surface sur terre) pour la classe « Sommet ».	59
Figure 4.11 – Amélioration de la corrélation pour les vents de terre de la classe « Sommet » (en mettant de côté le site de Pointe-St-Pierre).	60
Figure 4.12 – Régressions linéaires entre la vitesse du vent de surface en mer et la vitesse du vent de surface sur terre pour les quatre situations de vents parallèles.....	61
Figure 4.13 – Régressions linéaires entre la vitesse en mer et la différence entre les vitesses (vitesse de surface en mer moins la vitesse de surface sur terre) pour deux situations de vents parallèles : « Escarpement » (gauche) et « Sommet » (droite).....	62
Figure 4.14 – Régressions linéaires résultantes lorsqu'un indice de pente (élev./dist.) est ajouté à deux situations de vents parallèles : « Sommet » (gauche) et « Pente » (droite).....	63
Figure 4.15 – Régressions linéaires résultantes lorsqu'un facteur de correction illustrant la rugosité est ajouté pour deux situations de vent de mer : « Talus » (droite) et « Sommet » (gauche).	65
Figure 4.16 – Régressions linéaires résultantes lorsqu'un facteur de correction illustrant la rugosité est ajouté pour deux situations de vent de terre : « Talus » (droite) et « Sommet » (gauche).	66
Figure 4.17 – Comparaison de la différence entre les vitesses (vitesse de surface en mer moins la vitesse de surface sur terre) et le gradient de température mer/terre.	67
Figure 4.18 – Régression linéaire entre la vitesse du vent mesurée à 10 mètres sur terre et la vitesse du vent extrapolée à partir des estimées en mer par RSO.....	69

Figure 4.19 – Organigramme des étapes devant être réalisées pour extrapoler sur terre les mesures obtenues par la méthode RSO en mer.	70
Tableau 3-1 : Période d'enregistrement des données (en continu), d'après le catalogue des stations climatologiques canadiennes et le rapport d'Enviromet International Inc.	24
Tableau 3-2 : Coordonnées géographiques des mâts de mesure	24
Tableau 3-3 : Les données numériques d'élévation du Canada, niveau 1 (DNEC1) retenues	26
Tableau 3-4 : Description des trois images Landsat 7 retenues.....	32
Tableau 3-5 : Longueur de rugosité (inspiré de l'échelle proposée dans l'Atlas Éolien Européen, 1991).....	34
Tableau 3-6 : Synthèse des images RADARSAT-1 utilisées	36
Tableau 3-7 : Comparaison des périodes d'acquisition pour 41 des 57 images RADARSAT-1.....	40
Tableau 3-8 : Définition de l'échantillon et des points aberrants	45
Tableau 4-1 : Comparaisons des vitesses de vent de surface dérivée des images de RADARSAT-1 et les vitesses de vent aux stations côtières pour les deux stations près de la côte	48
Tableau 4-2 : Comparaison des vitesses de vent de surface dérivée des images de RADARSAT-1 et des vitesses de vent aux stations côtières pour l'ensemble des conditions.....	49
Tableau 4-3 : Présentation des équations dégagées de l'analyse pour extrapoler les données d'après les résultats obtenus pour les vitesses de vent supérieures à 2 m s^{-1} , les conditions de vent stationnaires et pour les périodes sans glaces (U_t est le vent de surface (à 10 m) sur terre; U_m est le vent de surface (à 10 m) sur mer; Cor est le facteur de correction lié à la longueur de rugosité; P est le facteur de pente)	68

Tableau 4-4 : Comparaison des vitesses de vent mesurées à 10 mètres sur terre et les vitesses de vent extrapolées à partir des estimées en mer par RSO.....69

1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS

1.1 Mise en contexte

Depuis quelques années, l'industrie de l'énergie renouvelable gagne en popularité. La filière éolienne, parmi celles-ci, est sans doute une solution adéquate à nos besoins. Le protocole de Kyoto, démontrant une sensibilisation au réchauffement climatique et à l'environnement, en plus des chiffres récents illustrant la raréfaction des combustibles fossiles, sont des éléments favorisant la construction de parcs d'éoliennes. En effet, l'évolution de la puissance éolienne installée dans le monde, de croissance exponentielle (BTM Consult, 2005), illustre bien la popularité de cette filière.

Les principaux acteurs dans ce domaine sont européens. Parmi les plus grands producteurs d'énergie éolienne, on compte l'Allemagne et l'Espagne (pour l'année 2004). Il est important de mentionner la contribution du Danemark (petit pays de 43 000 km²) où la production d'énergie à partir de l'éolien pourrait atteindre 50% de la consommation énergétique du pays en 2025 selon le Danish Wind Industry Association (WindPower, 2005). Le Canada ne fait pas exception. Les divers paliers de gouvernement sont favorables à son développement. Des systèmes de quota et des programmes d'encouragement à la production d'énergie éolienne sont implantés pour favoriser l'ajout de parcs éoliens au Québec et ailleurs au Canada.

La réalisation de tels projets nécessite la connaissance des technologies disponibles, celle de l'ingénierie utilisée pour la mise en réseau de l'énergie produite, mais avant tout, la connaissance de la ressource elle-même est essentielle. Pour évaluer la production énergétique d'un site donné, il est nécessaire de connaître la distribution du vent avec précision. Le climat du vent est généralement représenté sous forme d'une rose des vents pour la direction et d'un histogramme pour les vitesses (% d'occurrence). Pour en arriver là, les vitesses et directions des vents sont modélisées sur l'ensemble d'un territoire à partir de données d'entrée acquises pendant une certaine période de temps. Plusieurs

modèles ont été développés par différents centres de recherche dans le but de représenter le plus fidèlement possible l'écoulement de l'air.

Cependant, pour effectuer une estimation précise des vents, il faut préalablement établir les zones où le potentiel éolien est optimal. C'est donc ici que s'insère la recherche portant sur l'évaluation de la ressource éolienne à partir d'images RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) du satellite RADARSAT-1 (Furevik et Espedal, 2002 ; Horstmann *et al.*, 2002 ; Vachon et Dobson, 2000, Choisnard, Bernier et Lafrance, 2004)). Cette technique à haute résolution spatiale offre l'opportunité d'une nouvelle information sur les patrons de vent complexes à la surface de l'eau. L'utilisation de la télédétection des vents à partir d'un satellite radar pour la cartographie à méso-échelle pourrait devenir un outil d'aide à la décision indispensable pour les différents joueurs de l'industrie éolienne.

1.2 L'estimation du potentiel éolien

Les vents soufflent dans toutes les régions du monde, mais seules quelques-unes d'entre elles ont le potentiel pour justifier la construction d'un parc éolien. Pour l'industrie éolienne, il est primordial d'avoir une information sur la vitesse du vent qui est fiable. Pour l'identification des meilleurs sites, les décideurs doivent passer à travers différents niveaux de résolution et de précision (modèle en cascade). Selon Choisnard (2004), les phénomènes responsables des mouvements de masses d'air sont connus, mais les équations permettant la représentation de ces mouvements pour toutes les échelles spatiales et temporelles sont difficiles à résoudre. Il existe donc plusieurs sources de données et plusieurs méthodes d'estimation qui possèdent chacune leurs caractéristiques et illustrent les systèmes à différentes échelles.

Macro-échelle

Au départ, il existe des données météorologiques à l'échelle globale. Ces bases de données sont généralement produites à partir des sources de données disponibles : stations météorologiques, radiosondes, ballons sondes, observations aériennes et maritimes, bouées et satellites. Les données sont analysées et ré-échantillonnées sur une grille géographique fixe (Figure 1.1). Elles reproduisent la circulation atmosphérique globale pour une résolution grossière et couvrent un large territoire géographique de l'ordre planétaire à partir d'un historique de données de quelques décennies (Landberg *et al.*, 2003). Ces bases de données permettent une vision globale de la distribution des vents, de la température, de la pression atmosphérique et de l'humidité. Elles sont généralement utilisées pour des applications météorologiques ou océanographiques (Swail et Cox, 2000).

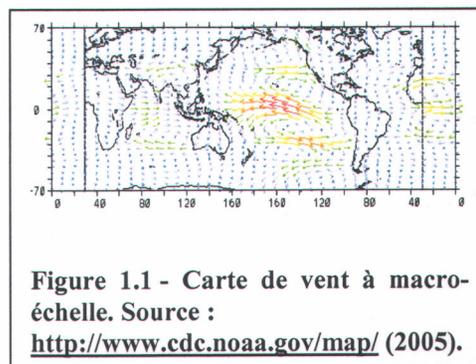


Figure 1.1 - Carte de vent à macro-échelle. Source : <http://www.cdc.noaa.gov/map/> (2005).

Méso-échelle

Ensuite, la cartographie des vents à méso-échelle (Atlas éolien) d'une résolution de quelques kilomètres (1 à 5 kilomètres) illustre une distribution géographique plus précise (Figure 1.2). Ces cartes sont généralement destinées à l'étude des vents, cependant les données utilisées en entrée sont généralement opérées pour des fins de prévisions météorologiques et/ou de sécurité aérienne/nautique, elles sont rarement localisées sur des sites venteux et par conséquent, sont rarement représentatives des sites venteux d'une région donnée. Ces atlas sont obtenus en interpolant directement les données des réseaux de stations synoptiques et/ou par la méthode du *downscaling* (raffinement de la

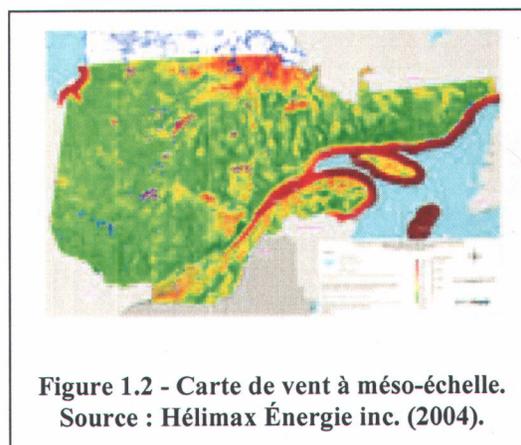


Figure 1.2 - Carte de vent à méso-échelle. Source : Hélimax Énergie inc. (2004).

résolution) des données météorologiques globales (Robert et Yu, 2004). L'interpolation entre les mesures tient compte des phénomènes dynamiques importants.

Micro-échelle

Finalement, avant d'installer les éoliennes, une campagne de mesures ponctuelles doit être réalisée pour les sites retenus. Des systèmes de cueillette de données sont utilisés pour la prévision de la production électrique d'un parc d'éoliennes (Figure 1.3). Les données sont prises à l'aide d'anémomètres et de girouettes montés sur des mâts de mesure ou des nouvelles

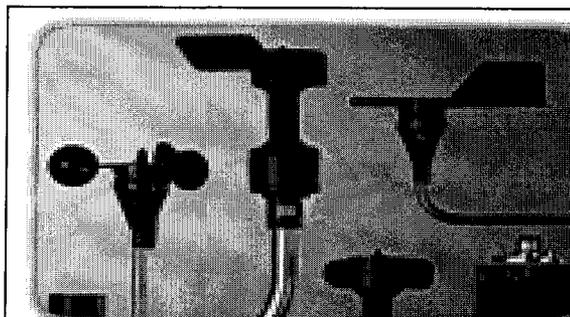


Figure 1.3 - Exemple d'instruments de mesure du vent. Source : <http://www.nrgsystems.com/store/sensors.php> (2005).

techniques SODAR (sondeur acoustique) et LIDAR (sondeur laser) (Peterson *et al.*, 1998b). Généralement, elles sont enregistrées pendant 2 ans avant la construction d'un parc (AWS Scientifics, Inc., 1997). Les données sont interpolées grâce aux modèles micro-échelles qui sont des modèles simples de conservation de la masse. Le principal facteur pris en compte par ce type de modèle est la topographie.

Méthode par imagerie RSO

Cette technologie propose l'ajout d'une nouvelle information pour les décideurs. En effet, avant l'utilisation de la télédétection, la plupart des mesures de vent océaniques étaient effectuées à bord des bateaux marchands, faisant en sorte que la distribution et la qualité des mesures du vent étaient limitées (Herfst, 1974). L'utilisation des images RSO permet d'obtenir une carte globale du vent en milieux marin et côtier. La haute résolution spatiale et la capacité des images RSO à observer le vent offshore permettent la localisation de fluctuations fines et indiquent une forte variabilité spatiale du vent.

De plus, depuis quelques années, on note une émergence des projets éoliens en mer due à deux facteurs déterminants. Premièrement, on considère la meilleure qualité de la

ressource éolienne en mer, tant en intensité qu'en persistance (ADEM-CLAROM, 2002). Deuxièmement, dans certains pays d'Europe, la raréfaction des espaces propices à l'accueil de nouvelles constructions éoliennes (par exemple en Allemagne et au Danemark) doit aussi être considérée. La maturité des technologies terrestres a permis de franchir le pas de l'installation en mer. Ces avancés permettront la construction d'éoliennes de grande puissance et ainsi une production énergétique importante (Henderson *et al.*, 2003).

1.3 Problématique

Une étude récente réalisée à l'INRS (Choisnard, 2004), a permis d'examiner l'intérêt des images RSO du satellite RADARSAT-1 pour la cartographie du vent dans un milieu côtier comme celui du Golfe Saint-Laurent. Cette étude a proposé une évaluation des capacités multi-faisceaux de RADARSAT-1 et des modèles d'extraction d'information servant à l'analyse et à l'estimation de la ressource éolienne. Dans le cadre de cette première étude, étape indispensable au volet qui sera traité dans le présent mémoire, un jeu total de 57 images RSO a été traité et converti en cartes de vent.

Pour évaluer la pertinence de ces résultats, ils ont été comparés avec les mesures *in situ* à l'emplacement (coordonnées géographiques : 49°33' N ; -65°45' E) de la bouée Mont-Louis C45138. Une régression linéaire avec un R^2 de 0,78 (RMSE de 2,3 et un biais de 0,4) a été obtenue ce qui correspond à une corrélation intéressante compte tenu qu'elle est semblable à ce qui est obtenu en condition de mer ouverte (Choisnard, 2004). De plus, les données ont été comparées à celles estimées par le diffusionomètre QuicSCAT. Cette fois, la comparaison donnait une corrélation élevée avec un coefficient de détermination de 0,89 (RMSE de 1,5 et un biais de 0,05).

La comparaison directe des valeurs de vitesses obtenues au niveau des stations côtières avec celles des images RSO est plus complexe. En effet, le régime de vent change lorsqu'il traverse la ligne de côte. C'est pour cette raison qu'il est essentiel de connaître

les facteurs influents et l'impact qu'ils ont sur les vitesses de vent lors du changement de régime terre/mer.

1.4 Objectifs et hypothèses

Afin d'exploiter la méthode RSO pour estimer la distribution du vent sur la côte, il est essentiel d'évaluer l'impact du changement de régime terre/mer. Ce changement est caractérisé par une orographie plus complexe ainsi que par une augmentation de la rugosité due à l'occupation du sol en milieu terrestre. En corollaire, la validation exige l'utilisation de données *in situ*. Or, ces mâts de mesure sont le plus souvent terrestres.

Ainsi, notre but est d'explorer une méthodologie pour l'extrapolation du vent en milieu terrestre (côtier) à partir des vitesses extraites par imagerie radar sur le plan d'eau. Pour y arriver les cinq objectifs suivants devront être atteints.

- (1) Identifier les facteurs ayant une influence sur le comportement du vent (en milieu marin ainsi qu'en milieu terrestre)
- (2) Paramétrer les facteurs influents
- (3) Corréler les variables observées avec les estimés des vents afin d'établir un ordre d'influence
- (4) Établir une ou plusieurs relations statistiques entre les données de vent extraites sur plan d'eau par imagerie RSO et les données météo de mâts de mesures terrestres.
- (5) Comparer les données extrapolées avec les données *in situ*

Au départ, nous faisons l'hypothèse que la distribution éolienne sera influencée par l'occupation du sol, l'orographie du milieu, la direction des vents et pour terminer le gradient de température (terre/mer). Nous tenterons donc de déterminer le rôle des différents facteurs ainsi que l'importance de chacun d'entre eux. Nous croyons que les vitesses seront principalement influencées par l'occupation du sol, produisant une diminution des vitesses de vents sur terre par rapport aux vents sur plan d'eau. Normalement, la direction des vents et l'orographie devraient aussi jouer un rôle de

premier ordre. Cependant, nous évaluons que l'impact du gradient de température pourra être négligé puisqu'il ne devrait influencer que les très faibles régimes de vent qui ne sont pas intéressants pour la production énergétique. Cette dernière hypothèse est appuyée par Troen et Petersen (1991) pour qui l'apport de ce facteur au potentiel d'énergie éolienne en zone côtière est faible compte-tenu des vitesses relativement basses qui sont associées aux brises de mer et de terre.

1.5 Plan du mémoire

Le présent mémoire traitant du comportement éolien en milieu côtier et complexe, est divisé en cinq chapitres. Le chapitre 1 servant d'introduction, propose une mise en contexte pour le lecteur et fait un survole simplifié de la problématique de l'estimation de la ressource éolienne en plus de décrire les objectifs de la recherche. Le chapitre 2 décrit les mécanismes du vent, de la circulation atmosphérique globale aux systèmes locaux en mettant l'accent sur le changement de régime terre/mer. Le chapitre 3 est consacré à la présentation de la région d'étude et des sites retenus et surtout à la méthodologie suivie pour créer notre jeu de données. Le chapitre 4 comprend les analyses graphiques effectuées à partir de notre jeu de données ainsi que la présentation de la méthodologie d'extrapolation résultante et nous concluons au chapitre 5.

2 MÉCANISMES DU VENT

Lorsqu'on compare les données de vitesse du vent obtenues en mer avec celles obtenues sur la côte, on remarque un biais important entre les deux valeurs. À des altitudes très élevées (à plus de 1000 mètres), le vent est un déplacement d'air produit par les forces de gradient de pression et de Coriolis¹ qu'on appelle vent géostrophique (Godard et Tabeaud, 1998). À l'intérieur de la couche limite (entre 0 et plus de 1000 mètres), la topographie et la rugosité du substrat continental introduisent des forces susceptibles de ralentir, d'accélérer et/ou de dévier l'écoulement de l'air. Ce sont essentiellement ces éléments de la couche limite atmosphérique qui sont responsables du biais entre les mesures (si on néglige l'erreur sur les mesures).

2.1 Couche limite atmosphérique

La Couche limite atmosphérique (CLA) est la portion de la basse troposphère² qui interagit directement avec la surface de la terre en créant un milieu turbulent. Cette région a été largement étudiée pour différents domaines de recherche comme l'environnement, l'agriculture et l'ingénierie. Son épaisseur varie, tel que mentionné plus haut, en fonction de la vitesse du vent, de la rugosité de la surface terrestre et de l'ensoleillement. C'est la section près du sol, nommée couche de surface, souvent définie comme étant une fraction fixe de la profondeur de la CLA (10%), qui intéresse les chercheurs. En effet, pour la climatologie de l'énergie éolienne, on néglige généralement les vents de faible intensité,

¹ La force de Coriolis décrit une force apparente due à la rotation de la Terre. Elle agit sur le déplacement des masses d'air puisque la Terre tourne autour d'un axe de l'ouest vers l'est. Ainsi pour un observateur terrestre, elle dévie les vents vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud (Ahrens, 1994). Des vents soufflants près des pôles seront déviés plus que des vents de même vitesse près de l'équateur.

² La troposphère est la couche inférieure de l'atmosphère. C'est elle qui est en contact avec la surface terrestre (Godard et Tabeaud, 1998).

donc on conserve les situations où l'épaisseur de la CLA est d'environ 1 kilomètre (Petersen *et al.*, 1998a). Avec une CLA de 1 kilomètre d'épaisseur, on obtient une couche de surface d'environ 100 mètres qui est approximativement la hauteur du rotor des éoliennes actuelles.

C'est pour cette section (couche de surface) que s'applique la loi du profil de vent logarithmique. Cette hypothèse logarithmique, définie dans plusieurs ouvrages de climatologie du vent, est à la base des lois de similitude qui permettent d'estimer la vitesse du vent à différentes hauteurs. L'approximation des vitesses moyennes de vent en fonction de la hauteur est généralement bien estimée à partir de cette expression, supportée par des considérations théoriques (Petersen *et al.*, 1998a) :

$$U(z) = (u^*/\kappa) [\ln(z/z_0) - \psi] \quad (2.1)$$

où $U(z)$ est la vitesse moyenne à la hauteur z désirée, z_0 est la longueur de rugosité, κ est la constante de von Karman ($\sim 0,4$), ψ est un facteur de correction de la stabilité et u^* est la vitesse de friction qui s'obtient par la relation suivante :

$$u^* = \sqrt{\tau/\rho_{\text{air}}} \quad (2.2)$$

où τ est la contrainte de surface et ρ est la densité de l'air.

Comme c'est le cas pour plusieurs modèles mathématiques liés à la météorologie de l'énergie éolienne, l'expression du profil logarithmique s'applique pour des conditions de terrain plat et relativement homogène. Ainsi, pour ces conditions idéales, les variations de la vitesse du vent avec la hauteur sont gouvernées par trois variables qui sont : la hauteur au-dessus de la surface, la rugosité du sol, et la vitesse de friction.

2.2 Changement de régime Terre/Mer

Les scientifiques ont acquis quelques connaissances quant aux phénomènes se produisant à l'intérieur de la couche limite pour les milieux homogènes terrestres ou marins, mais elles ne sont généralement pas applicables aux milieux hétérogènes, typiques des zones côtières (Shimada et Kawamura, 2005 et NATIONAL ACADEMY

PRESS, 1992). Notre étude tentera d'évaluer l'impact des différents facteurs de la surface susceptibles d'influencer la distribution des vents. Le rôle de ces facteurs devrait être d'autant plus important puisque le changement de régime terre/mer présente des discontinuités nettes à la ligne de côte.

Avant tout, nos connaissances par rapport à cette problématique et la lecture des ouvrages de référence dans le domaine nous amènent à poser une hypothèse. Ainsi, nous évaluons que la vitesse du vent en un point situé sur la côte serait une fonction de :

$$U_t = f(U_m, \Phi, \Delta T, Z_d, Z_a, Z_r) \quad (2.3)$$

- où
- U_t est la vitesse obtenue sur terre
 - U_m , la vitesse estimée du vent en mer
 - Φ , la direction du vent
 - ΔT , le gradient de température à la surface (terre/mer)
 - Z_d , la distance séparant le point sur terre et la ligne de côté,
 - Z_a , l'élévation de ce même point
 - Z_r , la longueur de rugosité entre le point et la ligne de côte

La zone côtière, prisée par les promoteurs éoliens, est la zone de transition entre une climatologie du vent qui est soit de type continental, soit de type maritime. La largeur de la zone côtière dépend du climat et de la topographie existante (Troen et Petersen, 1991). Dans l'Atlas Éolien Européen, une zone tampon de 10 kilomètres de part et d'autre de la ligne de côte a été utilisée. Pour le cas de la péninsule gaspésienne, où l'orographie est imposante, la zone côtière devrait être plus restreinte. En effet, l'équipe d'Hélimax Énergie Inc. a remarqué, grâce à des simulations du modèle micro-échelle WA^sP³, que les vents provenant de la mer atteignaient des conditions continentales après avoir traversé environ 2 kilomètres de terre ferme et que les vents provenant de la terre atteignaient les conditions maritimes à 10 kilomètres de la côte (Hélimax Énergie Inc., 2003). Cette étude

³ WA^sP est un logiciel commercial d'estimation de la ressource éolienne développé par le Laboratoire National de Risø au Danemark.

a été réalisée au site de Pointe-St-Pierre qui est à l'extrémité Est de la péninsule gaspésienne. Les prochaines sections de ce chapitre discuteront de l'impact que peuvent avoir ces facteurs.

2.2.1 La direction du vent

L'analyse de l'impact du changement de régime (terre/mer) nécessite en premier lieu de distinguer trois directions de vents : provenant de la mer, provenant de la terre et parallèles à la côte. Les obstacles sont différents dans ces trois cas. Dans le cas des vents parallèles, il y a une canalisation des vents (jet côtier) lorsque la topographie est imposante. Ce phénomène a été démontré, entre autres, dans les études de Choisnard (2004) et Parent (1998).

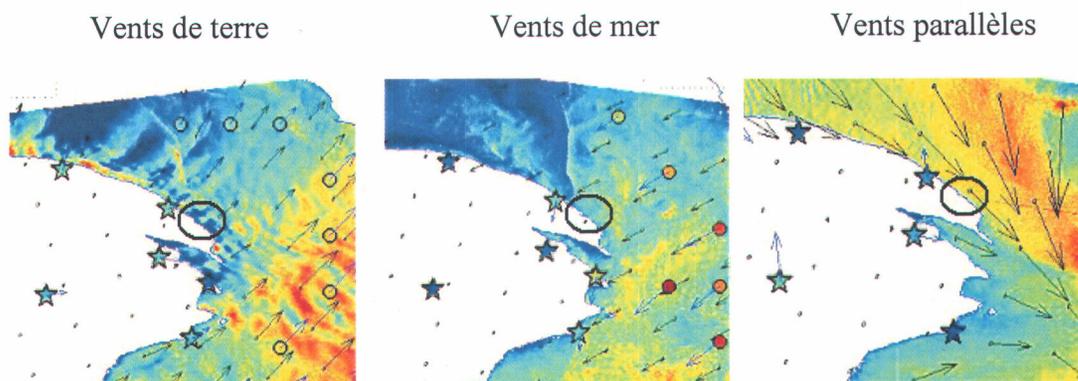


Figure 2.1 – Trois cartes produites à partir des scènes de RADARSAT-1 illustrant les trois principales directions de vent. Adaptées d'images traitées par Choisnard (2004).

Les trois images, présentées à la Figure 2.1, sont des cartes de vent produites à partir des scènes de RADARSAT-1. Elles représentent bien les phénomènes associés à la direction du vent. Sur ces cartes, les vitesses de vent sont exprimées dans un dégradé de couleurs allant du bleu foncé au rouge foncé en passant par le jaune. La direction des vents est illustrée par des petits vecteurs noirs. Les étoiles représentent la position géographique des mâts de mesure alors que les cercles représentent le centre des pixels de la matrice obtenue par le diffusiomètre QuicSCAT.

Dans le premier cas (vents de terre), le cercle noir cible des traînées bleues (zones de vents plus faibles). Ceci illustre la distance que doivent parcourir les masses d'air avant d'atteindre des conditions maritimes. Sur la deuxième image (vents de mer), ces traînées de vents faibles ne sont pas présentes. On comprend que les masses d'air frappent la côte en ayant sensiblement les mêmes conditions qu'en mer. Pour ce qui est du troisième cas, les vents sont orientés parallèlement à la côte. On remarque que les vitesses de vent près de la côte sont élevées. Ce phénomène est causé par la canalisation convergente des vents, ce qui signifie que les vents qui n'étaient pas totalement parallèles à la côte sont réorientés de façon à le devenir. Ainsi, la masse d'air est comprimée résultant en une augmentation de la vitesse. L'impact de ce facteur est illustré par les analyses d'Hélimax Énergie Inc. (2003) qui démontrent une variation des équations de régression linéaire obtenues par comparaison des résultats de modélisation micro-échelle (WA⁵P) avec ceux de modélisation RSO pour les trois directions énumérées dans ce paragraphe.

2.2.2 Les propriétés thermiques de la surface

La différence de température entre la surface terrestre et la surface de l'eau peut influencer de façon significative le flux (direction et vitesse) de vent en zone côtière à cause des phénomènes de brise de mer et de brise de terre (Figure 2.2). Les masses d'air froid se déplaçant vers les masses d'air chaud, la brise de mer est une influence locale de la mer vers le continent lorsque la mer est plus froide que le continent. Durant le jour, le continent se réchauffe plus rapidement que la surface d'eau adjacente. Vice et versa, lorsque le continent est plus froid que la mer, il s'agit d'une brise de terre (se produisant généralement durant la nuit). Les brises de mer peuvent affecter les couches atmosphériques de 100 mètres à plus de 1000 mètres de hauteur. Les effets peuvent être mesurés de 1 kilomètre et moins à 100 kilomètres en distance horizontale avec une propagation d'environ 5 m s^{-1} et plus (NATIONAL ACADEMY PRESS, 1992). Pour ce qui est des brises de terre, les effets sont moins bien connus. En générale, les brises sont de faibles intensités et par conséquent le phénomène est plus important quand le vent est faible.

2.2.3 L'orographie

La présence d'une colline force la masse d'air à circuler dans un plus mince couloir atmosphérique ce qui résulte en une augmentation de la vitesse. Pour donner une idée de l'ordre de grandeur : selon l'Atlas Européen Éolien (Troen et Petersen, 2001), elle peut atteindre une survitesse positive de 80 %. Cependant, il faut faire attention puisque seulement le sommet de la colline est susceptible de connaître une survitesse. La face au vent et la face à l'abri de la colline enregistrent une diminution de la vitesse de 20 à 40 % (Troen et Petersen, 2001). De plus, il faut distinguer la pente pour voir s'il s'agit d'une pente douce, comme c'est le cas sur l'image ci-dessous (Figure 2.3). Une pente abrupte ressemblerait plutôt à un obstacle et provoquerait alors de fortes turbulences.

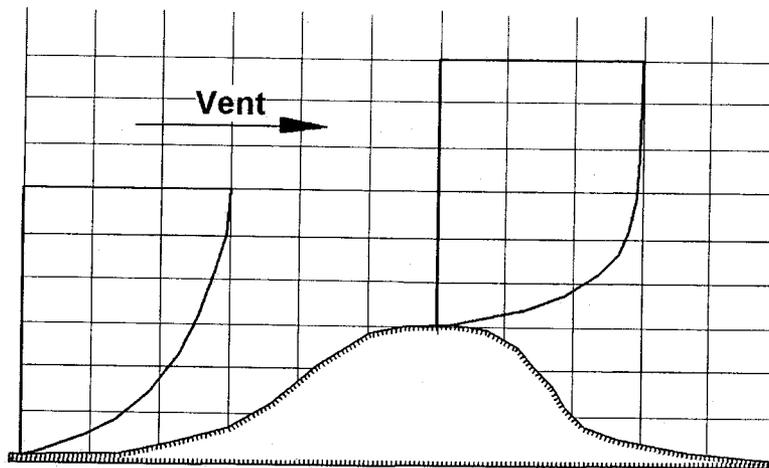


Figure 2.2 – Graphique illustrant l'augmentation de la vitesse du vent au sommet d'une colline aux pentes douces. Modifiée d'après Troen et Petersen (1991).

Selon quelques auteurs dont Pinard (1999) ou Taylor et Lee (1984), l'impact qu'aura la présence de montagnes dépend de l'importance relative attribuée à l'énergie potentielle et cinétique du déplacement d'air sur l'obstacle. Ce paramètre est représenté par le nombre de Froude. Le *Panel on Coastal meteorology* du NATIONAL ACADEMY PRESS (1992) basé sur les travaux de Smith (1989) prétend qu'un vent de surface sera généralement bloqué par une montagne lorsque le nombre de Froude est inférieur à 1. La valeur de Froude se calcule ainsi :

$$F_r = U/h_m N \quad (2.4)$$

où N est la stabilité statique qui est égale à $(-g\partial_z\theta/\theta_o)^{1/2}$,
 U est la vitesse du vent libre,
 h_m est la hauteur de l'obstacle,
 θ_o est la température potentielle moyenne,
 g la gravité.

La valeur obtenue considère l'importance relative des déplacements verticaux par rapport au flux se déplaçant autour et au-dessus d'un obstacle.

2.2.4 La variation de la rugosité

La surface du terrain et les obstacles au sol ont pour effet commun de conduire à un ralentissement du vent au voisinage du sol (Figure 2.4). Ce ralentissement est causé par la rugosité du terrain. La rugosité d'une surface donnée est déterminée par la taille et la distribution de ses éléments rugueux (Troen et Petersen, 1991). Pour des milieux continentaux, ces éléments se rapportent essentiellement à la végétation et aux zones de construction à la surface.

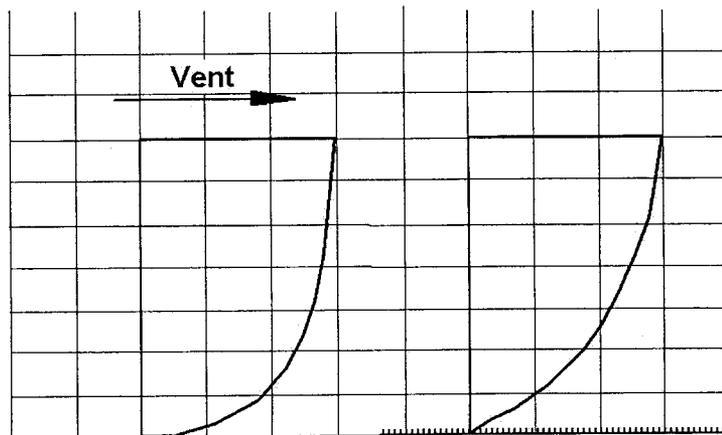


Figure 2.3 – Graphique illustrant le ralentissement de la vitesse du vent au voisinage du sol dû à la rugosité du terrain et aux obstacles au sol. Modifié d'après Troen et Petersen (1991).

2.2.5 Les vitesses de vent

La capacité de chacun des facteurs à influencer la météorologie du vent à l'intérieur de la couche limite dépend des conditions de vent au moment où il les traverse. L'effet de barrière imposé par le changement de rugosité ou encore l'effet de colline ou de canalisation causé par la topographie locale risque d'être modulé par la classe de vent du moment. C'est, en partie, ce qu'a démontré Parent (1998) au moyen d'une modélisation de la circulation atmosphérique pour le secteur de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Ainsi, un vent modéré de 5 m s^{-1} et moins est régulièrement canalisé le long de la côte pour les vents de mer ou parallèles, tandis que le vent provenant de la mer dont la vitesse est supérieure à 5 m s^{-1} ne sera pas réorienté. Cependant, la vitesse limite de 5 m s^{-1} n'est pas applicable à toutes les côtes, elle dépend des caractéristiques topographiques de celle-ci.

3 MÉTHODOLOGIE ET RÉGION À L'ÉTUDE

La réalisation de ce projet d'étude nécessite l'acquisition d'un certain nombre de données qui serviront de base aux analyses statistiques. Les données recueillies sont représentatives des facteurs retenus pour leur influence sur la distribution des vitesses de vent. Ce sont des données majoritairement présentées sous forme de matrices avec lesquelles nous tenterons d'obtenir une valeur ponctuelle qui sera ensuite utilisée pour établir des corrélations avec les variations de la vitesse du vent.

Ce troisième chapitre donne une description de la région à l'étude et plus particulièrement, il présente les différents sites retenus pour ce travail de recherche. Ensuite, les sections 3.3 à 3.8 donnent les informations sur la source des données, les traitements réalisés et l'extraction des données servant à paramétrer les facteurs identifiés. Pour terminer, la section 3.9 présente une description de l'échantillon utilisé pour les analyses.

3.1 Région d'étude

La région ciblée pour ce projet est le golfe du Saint-Laurent, plus précisément la région côtière de la Gaspésie. Ce territoire a été retenu puisqu'il est reconnu pour son potentiel éolien et surtout puisque le plan d'eau est suffisamment grand pour permettre une évaluation adéquate des vents par RSO. Pour les besoins de ce mémoire, la région d'étude est limitée par la couverture des images traitées (Figure 3.1). De plus, la reconnaissance terrain a restreint la région d'étude à la côte de la péninsule gaspésienne.

Description géographique

Ce territoire au relief montagneux est probablement la région la plus accidentée du Québec. Il s'agit de l'extrémité nord de la chaîne des Appalaches qui s'étend de l'Alabama jusqu'à Terre-Neuve. Le massif gaspésien, qui occupe une bonne partie du territoire, est une chaîne de sommets à surface tabulaire constituant un haut plateau

sillonné de vallées encaissées. Du côté nord, on y retrouve la chaîne des Chics-Chocs dont le point culminant est le mont Jacques-Cartier avec une hauteur de 1 268 mètres. Au sud, la baie des Chaleurs est une étroite plaine côtière au relief peu accidenté où l'altitude est généralement inférieure à 150 mètres. Un point important pour cette étude est la présence de grandes superficies d'eau, soit le fleuve Saint-Laurent et son golfe ainsi que la baie des Chaleurs.

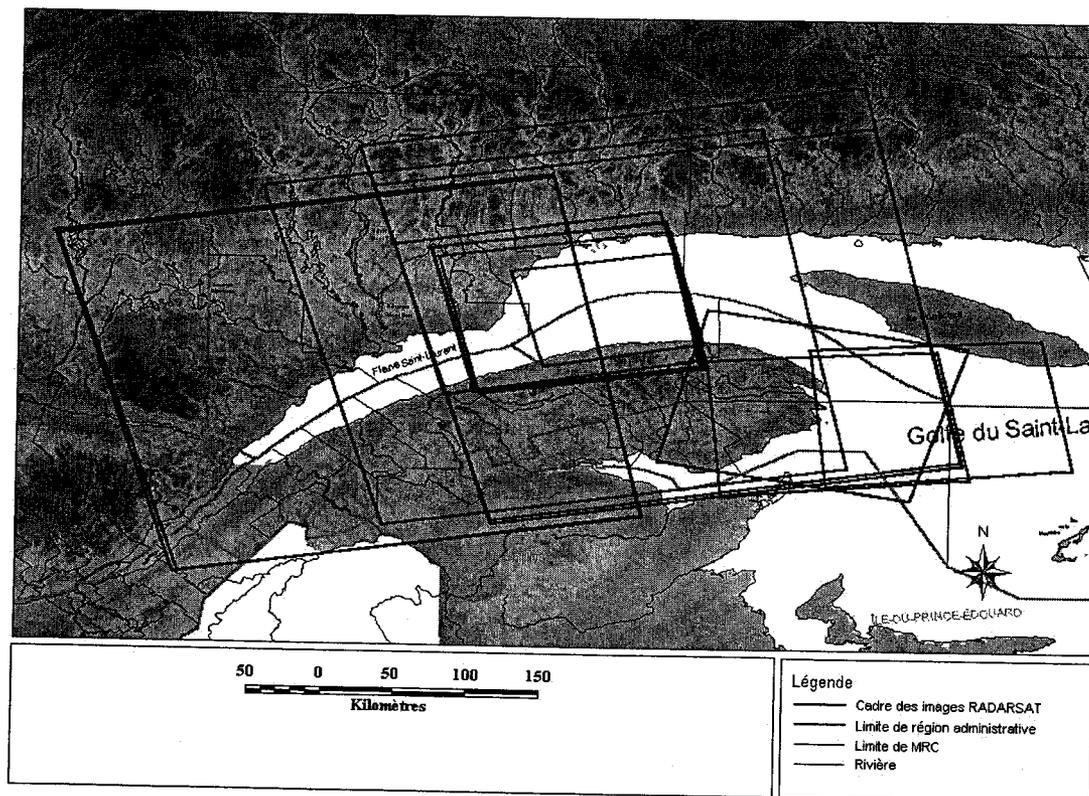


Figure 3.1 – Carte illustrant les cadres des scènes RADARSAT-1 superposées à la région d'étude.

Potentiel éolien de la région

Cette région est caractérisée par un haut niveau de complexité d'analyse du vent. La présence d'une grande masse d'eau, le Saint-Laurent, combinée aux zones montagneuses, les Appalaches avec les Chics-Chocs, font de ce territoire une région particulière (Choisnard, 2004).

Suite à l'annonce de l'appel d'offre d'Hydro Québec distribution pour 1 000 MW installé en Gaspésie, le potentiel éolien de cette région a été intensément étudié depuis 2003. Une étude d'Hélimax Énergie Inc. (2004), où une modélisation à méso-échelle du Québec a été faite (au sud du 53° parallèle) à partir du modèle MASS à 1km de résolution et à 80 mètres de hauteur, démontre l'excellent potentiel de la région. Il existe d'autres études permettant de noter la qualité des vents de la Gaspésie : Hélimax Énergie Inc., AWS Truewind, LLC (2005) et le site Internet de l'Atlas Éolien Canadien (www.windatlas.ca).

3.2 Sites d'étude

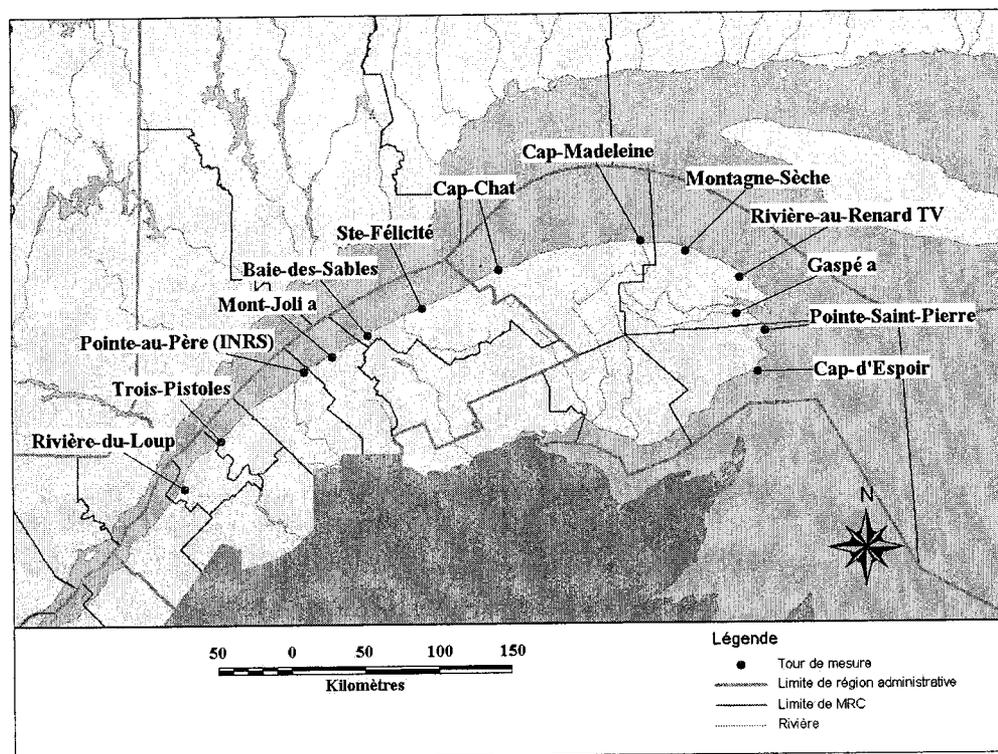


Figure 3.2 – Carte de localisation des mâts de mesure sélectionnés.

3.2.1 Identification des sites

L'identification des sites a été réalisée à l'aide d'un système d'informations géographiques. Les différentes couches d'informations dont les domaines couverts par les 57 images répertoriées lors de l'étude de Julien Choignard (Choignard, 2004), les

Modèles Numériques d'Altitude (MNA) qui étaient accessibles et l'ensemble des mâts de mesure du territoire gaspésien ont été superposés. Les mâts de mesure retenus sont gérés par Environnement Canada et le Ministère des Ressources Naturelles du Québec (MRNQ). Ainsi, les domaines et les MNA servant de restriction ont permis de faire ressortir 13 mâts de mesure distribués le long de la côte dans les régions du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie (Figure 3.2).

Cap-Chat : L'instrumentation est installée à Cap-Chat-Est sur un terrain plat et couvert de gazon. L'anémomètre est situé entre le fleuve Saint-Laurent et les habitations du nord de la route 132. Il est séparé du fleuve par un talus d'environ 5 mètres et une mince bande de bosquets au sommet de ce talus.

Cap-d'Espoir : Le site est situé sur une pointe de terre à l'extrémité est de la péninsule gaspésienne (légèrement au sud). Le terrain est relativement plat et principalement couvert de gazon. On y retrouve deux bâtiments situés au nord-ouest et un phare au sud-ouest. Ces constructions sont à quelques dizaines de mètres de l'installation. Une falaise de 15 à 20 mètres sépare la position où les données sont enregistrées du Golfe Saint-Laurent.

Cap-Madeleine : Situé à une distance de 15 kilomètres au nord-ouest de la municipalité de Grande-Vallée, l'instrumentation est érigée sur une pointe de terre s'avancant dans le Golfe. Le terrain est plat et gazonné. Un bâtiment et un phare sont situés à quelques dizaines de mètres à l'ouest du site. À cet endroit la ligne de côte est caractérisée par une falaise d'environ 15 mètres de hauteur.

Gaspé a : L'anémomètre de Gaspé est situé sur le site de l'aérogare de Gaspé. Ainsi, le terrain est plat et dégagé, mais entouré de forêts et de collines. L'installation est située à environ 7 kilomètres de la plage de Haldimand qui est considérée comme la ligne côte à cet endroit. Entre le Golfe et l'aérogare, on note la présence de forêts, d'herbes courtes, de tourbières et du delta de la rivière St-Jean.

Mont-Joli a : L'anémomètre de Mont-Joli est situé sur le site de l'aérogare de Mont-Joli à environ 1,5 kilomètres au nord-ouest de la ville. L'endroit est plat et dégagé. L'instrumentation se trouve à 2 kilomètres du fleuve St-Laurent et entre les deux, l'occupation du sol est surtout de type agricole.

Pointe-au-Père : Le site est situé à l'est de Rimouski. Le milieu topographique du site est plat et très peu élevé (environ 2 mètres). Le mât est situé très près de la côte et sur une pointe de terre. Sur le terrain environnant on trouve du gazon et de l'herbe. Au sud-est de l'anémomètre, on remarque quelques bâtiments qui pourraient faire obstacle au vent provenant de la terre.

Rivière-du-Loup : La station est située au sommet d'une colline de 140 mètres au sud-sud-ouest du centre ville et au nord-est de l'aéroport local. Le site est situé à environ 3 kilomètres au sud de la ligne de côte et le terrain entre les deux est caractérisé par la présence d'arbres, de petits quartiers résidentiels et d'importantes routes dont l'autoroute 20.

Baie-des-Sables : Le mât de mesure est installé au sommet d'un petit talus de pente douce. Il est situé à 200 mètres de la ligne de côte et séparé de celle-ci par de l'herbe courte, la route 132 et une rangée de bâtiments (dont un garage à 80 mètres créant un obstacle lorsque les vents proviennent de la mer). Il se trouve au nord-est de la municipalité du même nom.

Montagne-Sèche : Ce site n'a pas été visité, mais l'interprétation des cartes démontre que le mât a été érigé sur une surface dénudée au sommet de la Montagne Sèche située au sud-ouest de la municipalité de Cloridorme-Ouest. La montagne a une altitude de 350 mètres. Le site se trouve à un peu moins de 3 kilomètres de la ligne de côte. Le territoire qui sépare l'instrumentation de la ligne de côte est caractérisé par une topographie très pentue et la présence d'une forêt.

Pointe-Saint-Pierre : Le site établi à l'extrémité de la péninsule gaspésienne, près de la municipalité de Saint-Georges-de-Malbaie, est situé sur un petit terrain de camping. Le terrain est gazonné et une rangée d'arbres est située à l'ouest de la position du mât de mesure. L'instrumentation est située à 150 mètres du Golfe et au sommet d'une colline dont la pente est modérée.

Rivière-au-Renard TV : Le site de Rivière-au-Renard n'a pas été visité, cependant, les cartes topographiques démontrent qu'il est situé au sommet d'une montagne d'environ 315 mètres au sud-ouest de la municipalité de Rivière-au-Renard-Ouest. L'instrumentation partage le site d'une antenne de télévision. Elle enregistre les données de vent à un peu moins de 3 kilomètres de la ligne de côte. La pente de la montagne est relativement douce et on y note la présence d'un plus petit sommet d'environ 150 mètres. De plus, le terrain entre le Golfe et le site de mesure est occupé en grande partie par de la forêt à l'exception de la route 132 et de quelques maisons le long de cette route.

Sainte-Félicité : Le mât de Sainte-Félicité est installé sur une pente douce à 500 mètres de la ligne de côte. Il est situé au sud-est de la route 132 sur des terres agricoles. Ainsi, le terrain séparant l'instrumentation de la ligne de côte est surtout de type herbes hautes ou courtes (selon la saison).

Trois-Pistoles : Le mât de Trois-Pistoles a été érigé sur des terrains agricoles à l'ouest de la Rivière-Trois-Pistoles et au nord de la route 132. Entre le fleuve et l'instrumentation, on retrouve de l'herbe et des arbres. Le site est situé à 250 mètres de la ligne de côte, au sommet d'un talus de 45 mètres. Puisque la pente est très accentuée, on pourrait le qualifier de falaise. La particularité de ce site est qu'il est situé très près de la Rivière-Trois-Pistoles (650 mètres) qui est encaissée profondément (75 mètres). Cette particularité laisse imaginer que les vents dans ce secteur seront difficiles à analyser puisqu'ils risquent d'être déviés et canalisés par l'orographie de la rivière.

3.2.2 Visite et localisation des mâts de mesures

Les positions préliminaires des mâts ont été obtenues des différents ministères c'est-à-dire du MRNQ et d'Environnement Canada. Pour ce qui est des positions du MRNQ, elles ont été comparées à celles du rapport de la compagnie Enviromet International inc. (Lelièvre et Dafinova, 2003). Cette comparaison a soulevé une incertitude sur la validité des coordonnées géographiques étant donné la distance séparant certains points représentant une même entité (jusqu'à un kilomètre). De plus, les coordonnées géographiques obtenues de la base de données d'Environnement Canada sont arrondies à la minute près créant une incertitude de plus de 1,5 kilomètre. C'est pour ces raisons qu'une sortie de terrain ayant pour mission la cueillette des coordonnées géographiques des mâts, à l'aide d'un Système de Positionnement Global (GPS), s'imposait. Celle-ci a été réalisée du 22 au 25 septembre 2004. Sur le terrain, les mâts étaient tout d'abord identifiés à l'aide de jumelles. Ensuite, leur position était prise à l'aide d'un appareil GPS de marque Garmin. Cette position était dessinée à main levée sur une carte topographique 1:50000 afin de confirmer l'emplacement des mâts. Finalement, quelques photos du site (sous différents angles) étaient prises pour des analyses ultérieures (voir en annexe). En effet, elles serviront à qualifier la topographie du milieu.

Certains mâts n'ont pas pu être trouvés. Les raisons étant, soit le grand écart entre la coordonnée obtenue au départ et la position réelle sur le terrain, soit le démantèlement de l'instrumentation (Tableau 3.1). D'autres mâts n'ont pas pu être approchés à cause de leur position élevée en altitude. Les coordonnées des mâts du MRNQ ont été confirmées par la firme Hélimax Énergie Inc (Tableau 3.2).

Tableau 3-1 : Période d'enregistrement des données (en continu), d'après le catalogue des stations climatologiques canadiennes et le rapport d'Enviromet International Inc. (Lelièvre et Dafinova, 2003)

ID	Station	Date début	Date fin
705S002	Cap-Chat	09/26/1999	...
7051050	Cap-d'Espoir	12/17/1999	...
7051163	Cap-Madeleine	09/25/1999	...
7052605	Gaspé a	04/01/1968	...
7055120	Mont-Joli a	01/01/1943	...
7056068	Pointe-au-Père (inrs)	10/09/1996	...
7056616	Rivière-du-Loup	05/01/1980	...
MRN0105	Baie-des-Sables	14/11/2000	01/04/2001
HM21105	Montagne-Sèche	30/10/2001	28/03/2003
HM21106	Pointe-Saint-Pierre	29/11/2001	31/03/2001
HM21103	Rivière-au-Renard TV	19/10/2000	31/03/2003
MRN0102	Ste-Félicité	07/06/2001	31/03/2003
HM20107	Trois-Pistoles	21/11/2001	30/03/2003

Tableau 3-2 : Coordonnées géographiques des mâts de mesure

ID	Station	Gérant	Latitude	Longitude	Confirmation
705S002	Cap-Chat	EC	49,1093 N	66,6546 O	Terrain
7051050	Cap-d'Espoir	EC	48,4193 N	64,3175 O	Terrain
7051163	Cap-Madeleine	EC	49,2505 N	65,3246 O	Terrain
7052605	Gaspé a	EC	48,7769 N	64,4781 O	Terrain
7055120	Mont-Joli a	EC	48,6028 N	68,2106 O	Terrain
7056068	Pointe-au-Père (INRS)	EC	48,5139 N	68,4683 O	Terrain
7056616	Rivière-du-Loup	EC	47,8000 N	69,5500 O	non confirmé
MRN0105	Baie-des-Sables	MRNQ	48,7296 N	67,8804 O	Terrain
HM21105	Montagne-Sèche	MRNQ	49,1733 N	64,9094 O	Hélimax Énergie
HM21106	Pointe-Saint-Pierre	MRNQ	48,6623 N	64,2263 O	Hélimax Énergie
HM21103	Rivière-au-Renard TV	MRNQ	48,9978 N	64,4322 O	Hélimax Énergie
MRN0102	Ste-Félicité	MRNQ	48,8880 N	67,3744 O	Hélimax Énergie
HM20107	Trois-Pistoles	MRNQ	48,0931 N	69,2233 O	Hélimax Énergie

3.3 Données orographiques

Les matrices d'élévations ont été obtenues sur le site Internet de la GéoBase du Canada. Elles sont disponibles sous la rubrique « Extraction de données » suivi de « Données numériques d'élévation ».

3.3.1 Description des données

Les Données Numériques d'Élévation du Canada, niveau 1 (DNEC1) sont basées sur les données de la Base Nationale de Données Topographiques (BNDT) aux échelles 1:50000 et 1:250000 et bonifiées de données de positions de diverses échelles (Centre d'information topographique, 2003a). Pour la présente étude, l'échelle 1:50000 a été retenue pour permettre une meilleure évaluation des effets de l'orographie (par exemple, les effets de barrière et l'effet de colline).

Les matrices d'élévations sont découpées selon le Système National de Référence Cartographique (SNRC) et divisées en deux cellules. Elles portent les noms de partie Est et partie Ouest. Les données ont une résolution maximale de 0,75 secondes d'arc et une résolution minimale de 3 secondes d'arc, selon la latitude. Pour la région de la Gaspésie, située environ entre le 48° et 49,5° parallèle, la résolution est de 0,75'' x 0,75'' ou de 23m (Nord-Sud) x 16-11m (Est-Ouest). Il est important de savoir que le système de référence nord-américain de 1983 (NAD83) en fonction de l'ellipsoïde GRS80 est utilisé pour une représentation cartographique de la Terre la plus fidèle possible. Pour ce qui est de l'altitude, elle est estimée selon le système de référence géodésique canadien de 1928 (CVGD28), donc exprimée en mètres par rapport au Niveau Moyen des Mers (NMM).

Pour initier le processus d'interpolation réalisé par le centre d'information topographique (CIT), une collection de points (x, y, z) ont été combinés. Chaque cellule contient le même nombre de points d'élévation. Tous les profils sont orientés Nord-Sud et comportent 1201 points cotés. Chaque cellule contient 1201 profils, pour un total de 1 442 401 points d'élévation pour les sections Est et Ouest d'un feuillet 1:50 000 du système SNRC. Les points ont été extraits des éléments hypsométriques et hydrographiques ou des données acquises par le CIT des provinces et territoires. La couverture temporelle des données est de 1945 à aujourd'hui.

En guise de contrôle de la qualité, le CIT a porté une attention particulière aux rivières présentant normalement une légère inclinaison et aux lacs qui, naturellement, doivent

avoir une élévation constante. Ainsi, la valeur NMM de 0 devant représenter le niveau moyen des mers a été fixée pour les océans et les estuaires. Les autres étendues d'eau ont obtenu leur valeur connue ou une évaluation par rapport à la plus basse courbe de niveau connue ceinturant le plan d'eau. Les étendues d'eau sont représentées de façon à ce qu'elles soient plus basses que le terrain environnant. De plus, le sens de l'écoulement des eaux est vérifié pour éviter les incohérences. Les élévations ont été générées à l'aide de l'« Australian National University's Digital Elevation Model » (ANUDEM) version 5, utilisée par l'« US Geological Survey » (USGS) pour créer ses fichiers « Digital Terrain Elevation Data » (DTED). L'algorithme mis en application interpole les valeurs d'élévation en imposant des contraintes sur la structure de drainage et en lui imposant de respecter les crêtes et la canalisation orographique. Les erreurs possibles sur les DNEC1 sont attribuées en grande partie aux données sources qui peuvent être accentuées par les conversions qui leur sont appliquées. Le processus de réalisation de ces fichiers est détaillé dans le document (au format pdf) s'intitulant *Données numériques d'élévation du Canada, niveau 1 – Spécification du produit*.

Tableau 3-3 : Les données numériques d'élévation du Canada, niveau 1 (DNEC1) retenues

Identification de la cellule	Source des données	Date de l'acquisition des données sources	Date de publication du fichier DNEC
021N13 Est	BNDT 1:50000	1982/01/01	2000/09/25
022C03 Ouest et Est	BNDT 1:50000	1982/01/01	2000/09/07
022C07 Est	BNDT 1:50000	1978/01/01	2000/09/07
022C09 Ouest et Est	BNDT 1:50000	1978/01/01	2000/09/07
022B12 Ouest et Est	BNDT 1:50000	1973/01/01	2004/03/19
022B14 Ouest	BNDT 1:50000	1973/01/01	2004/03/19
022G02 Est	BNDT 1:50000	1975/01/01	2004/03/20
022H03 Ouest	BNDT 1:50000	1977/01/01	2004/04/04
022H01 Ouest	BNDT 1:50000	1977/01/01	2001/04/25
022A16 Ouest	BNDT 1:50000	1977/01/01	1999/08/23
022A09 Est	BNDT 1:50000	1977/01/01	2004/06/18
022A08 Est	BNDT 1:50000	1976 /01/01	2004/06/18

Les données téléchargées grâce au protocole de transfert de fichier (FTP), ont été comparées aux cartes topographiques de la même échelle, soit 1:50000, pour en faire une validation. Dans la majorité des cas, la correspondance était excellente. Cependant, un problème a été noté pour les feuillets 021N13, 022C03, 022C07 et 022C09. Pour ces quelques cas, on remarque une erreur d'évaluation du niveau du fleuve. Là où on aurait dû obtenir une valeur de 0 mètre, on obtient plutôt des valeurs de 5 à 10 mètres. De plus, sur l'ensemble des cellules, on peut remarquer des erreurs de découpage entre le milieu terrestre et le milieu marin (fleuve). Puisque la délimitation de ces milieux est très importante pour cette étude, la limite a été recréée de façon à obtenir une meilleure représentation des obstacles.

3.3.2 Correction des données

Pour améliorer la limite terre/mer, les matrices de données ont été reconverties en vecteurs. Les vecteurs utilisés à la base étaient des isolignes d'altitudes à intervalles réguliers de 50 pieds. Pour conserver les détails de la modélisation telle que décrite plus haut, des isolignes à intervalle beaucoup plus restreint ont été tracées. L'intervalle de 5 mètres permet de maintenir un meilleur niveau de détail. Ensuite, les polygones de 0 mètre et celles de 5 mètres ont été modifiées pour suivre la ligne de côte. Cette tâche a été réalisée en utilisant les cartes topographiques 1:50000 en référence. Une fois l'opération terminée, les polygones ont été converties en points. Ainsi, à chaque mètre suivant l'isoligne, un point coté était numérisé. C'est à partir de ces points qu'une interpolation a été lancée. L'interpolation par triangulation a été la méthode sélectionnée. De cette façon, la matrice recréée garde sensiblement la même structure orographique, à l'exception de la limite terre/mer.

Pour faciliter la superposition des différents jeux de données, les MNA ont été projetés selon la projection cylindrique Universal Transverse Mercator (UTM). Il s'agit d'une projection conforme où les directions sont conservées (Duquette et Lauzon, 1996). Cette transformation permet d'obtenir des pixels carrés et métriques de la résolution désirée. Une résolution de 15 mètres a été retenue. Il s'agit d'une amélioration de la résolution par

rapport à celle de 0,75 secondes d'arc de départ sans toutefois signifier une amélioration de l'exactitude.

3.3.3 Illustration du facteur orographique

Pour les fins d'analyse, l'information sur l'altitude à laquelle est situé chacun des mâts a été extraite du MNA et la mesure séparant le mât terrestre de la ligne de côte a été effectuée à partir des cartes topographiques au 1 : 50 000. Ensuite, pour distinguer les phénomènes orographiques propres à chacune des situations, un graphique de la coupe topographique perpendiculaire à la ligne de côte a été tracé (Figure 3.3). Les coupes topographiques sont répertoriées en annexe.

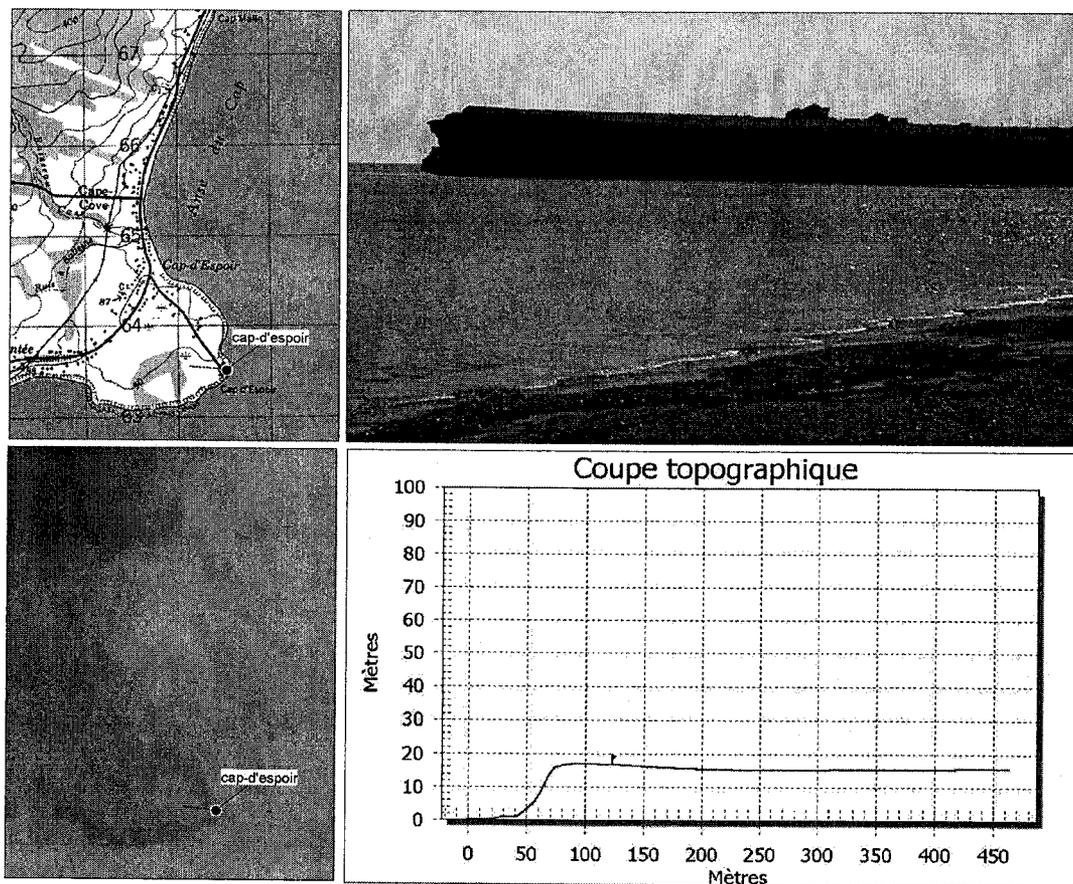


Figure 3.3 – Illustration des informations topographiques pour un des sites. i) en haut à gauche : carte topographique au 1 : 50 000, ii) en bas à gauche : MNA corrigé de la même région, iii) en bas à droite : coupe topographique transversale à la ligne de côte, iv) en haut à droite : photo servant de comparaison avec la coupe topographique.

3.4 Données de rugosité

Les matrices de rugosité sont extraites d'images satellite Landsat 7. Tout comme c'est le cas pour les MNA, les images satellites proviennent du site Internet de la GéoBase du Canada. On peut les obtenir sous la rubrique « Extraction de données » suivi de « Imagerie Landsat 7 orthorectifiée ».

3.4.1 Description des données

Le terme « orthorectifiée » signifie que les images ont été géoréférencées et qu'elles ont été corrigées géométriquement à l'aide d'un MNA. Ce processus permet le redressement d'une image et ainsi la suppression des déplacements causés par la géométrie du système de prise de vue et par le relief du terrain (Bonn et Rochon, 1996). Pour avoir plus de détails sur le processus de création de ces ortho-images, il est suggéré de lire le document d'accompagnement des images qui s'intitule *Imagerie Landsat 7 orthorectifiée du Canada, niveau 1 – Spécification de produit*.

Les images du satellite Landsat 7 sont produites à partir de données numériques matricielles. Elles comprennent neuf bandes spectrales : une bande panchromatique de 15 mètres de résolution, six bandes multispectrales de 30 mètres de résolution et deux bandes infrarouges thermiques dont les pixels atteignent 60 mètres de côtés. (Centre d'information topographique, 2003b).

3.4.2 L'occupation du sol

Pour illustrer la couverture du sol selon un composé de couleurs et pour extraire les signatures spectrales des différents éléments à la surface du sol, les bandes 3, 4 et 5 ont été retenues. La bande 3 se situe entre 0,63 et 0,69 micromètre et il s'agit de la couleur rouge dans le spectre électromagnétique. Cette longueur d'onde est absorbée par la chlorophylle. Elle est donc idéale pour détecter les routes, les sols nus et elle peut aider à discriminer les types de végétation. La bande 4 se situe entre 0,76 et 0,9 micromètre. Cette section du spectre électromagnétique que l'on nomme le proche infrarouge est

utilisée pour estimer la biomasse. Elle est idéale pour évaluer l'humidité du sol, donc très utile pour identifier les plans d'eau. Pour ce qui est de la bande 5, elle représente la section du spectre électromagnétique située entre 1,55 et 1,75 micromètre correspondant au moyen infrarouge. Cette bande est considérée comme étant la meilleure bande à utiliser seule pour séparer les signatures spectrales. Le moyen infrarouge distingue les routes, les sols nus et les plans d'eau. Il peut aussi permettre l'identification de quelques types de végétation.

La classification des images a été réalisée à partir d'une interprétation du composé de couleurs et d'après une certaine connaissance du terrain d'étude. Le processus a été validé grâce à des outils statistiques. La composition colorée a été créée par l'affichage multibandes des trois bandes décrites plus haut. La bande 5 était présentée en rouge, la bande 4 en vert et la bande 3 en bleu. Ce composé coloré a permis d'établir les sites d'entraînement nécessaires à l'échantillonnage.

Avant de débiter la classification dite supervisée, une liste des classes thématiques pouvant être retrouvées sur le territoire d'étude a été établie. L'important pour cet exercice était de répertorier l'occupation du sol en fonction de sa rugosité sur l'écoulement de l'air. De façon préliminaire, quatre classes ont été définies : les milieux forestiers, les milieux agricoles, les milieux dénudés et les plans d'eau. Ces quatre classes présentent des niveaux de rugosité nettement distincts.

Par la suite, l'analyse visuelle des images Landsat a permis l'ajout de sous-classes. Par exemple, faisant partie de la grande classe des milieux forestiers, on pouvait distinguer sur l'ensemble du territoire des zones de conifères, de feuillus, d'arbustes ou encore des zones de forêt trouée. Durant l'étape d'échantillonnage, les classes ont été subdivisées de façon à obtenir une couverture plus précise du territoire couvert par l'image. Ainsi, 11 classes représentaient l'image : Plan d'eau, Rivière, Eau peu profonde, Route, Surface dénudée, Terrain agricole, Tourbière, Arbuste, Forêt trouée, Forêt de feuillus, Forêt de conifères. Ces surfaces possèdent toutes une signature spectrale différente.

Pour évaluer la qualité des échantillons, les matrices de séparabilité des classes donnaient, pour l'ensemble des images, un indice moyen de 1,97, alors que la valeur maximale signifiant une totale discrimination des classes est de 2,00. Les classes présentant le plus de confusion étaient celles des routes et celles des surfaces dénudées. Ces indices de séparabilité sont calculés à partir des caractéristiques statistiques de chacune des signatures. La méthode utilisée dans ce cas-ci se nomme la mesure de distance de Bhattacharrya (Jeffries-Matusita) telle que décrite par les formules 3.1 et 3.2 (PCI geomatics, 2004).

$$BD(i,j) = 2*[1-\exp(-a(i,j))] \quad (3.1)$$

où $BD(i,j)$: distance de Bhattacharrya entre les classes i et j

$$a(i,j) = 0,125*T[M(i)-M(j)]*Inv[A(i,j)]*[M(i)-M(j)]+ 0,5 \\ *ln\{\det(A(i,j))/SQRT[\det(S(i))*\det(S(j))]\} \quad (3.2)$$

où $M(i)$: vecteur moyen de la classe i , vecteur à N bande(s)

$S(i)$: matrice de covariance pour la classe i , de N bande(s) par N bande(s) d'éléments

$Inv[S(i)]$: matrice inverse $S(i)$

$T[]$: matrice transposée

$A(i,j) : 0,5*[S(i)+S(j)]$

$\det()$: déterminant de la matrice

$\ln\{\}$: logarithme naturel de la valeur scalaire

$SQRT[]$: racine carrée de la valeur scalaire

La méthode de classification retenue est celle du maximum de vraisemblance. Il s'agit sans doute de la méthode de classification la plus aboutie (Caloz et Collet, 2001). Suite à la classification de l'image, un dernier traitement a été réalisé sur la matrice résultante. Ainsi, les classes de routes et de surfaces dénudées ont été combinées pour former une seule entité : une surface dénudée. Comme il est mentionné dans le paragraphe précédent, il s'agit des deux classes présentant le plus de confusion au niveau de leur signature spectrale. Pour créer des surfaces routières plus près de la réalité sur le terrain, les routes

ont été extraites du Réseau Routier National du Canada (RRNC) produit par le CIT. Puisqu'il s'agit d'un ensemble de polygones, une zone tampon de 50 mètres de largeur a été créée autour d'elles. Cette information étant plus précise que celle obtenue par la classification de l'image Landsat, les polygones représentant différentes classes (généralement des surfaces dénudées) ont été sectionnés pour faire place à ces nouvelles surfaces routières (Figure 3.4).

Tableau 3-4 : Description des trois images Landsat 7 retenues

Ortho-Image		Image Source	
ID	009026_0100_010909_L7	Numéro	LE7009026000125250
Date de production	2002/03/28	Début de l'acquisition	2001/09/09 14:54:56
Rééchantillonnage	Convolution cubique		
Datum	NAD83	Fin de l'acquisition	2001/09/09 14:55:23
Projection	UTM		
Zone UTM	20	Nuages (%)	Moins de 10
Exactitude horizontale	18 m		
ID	010026_0100_990927_L7	Numéro	LE7010026009927050
Date de production	2002/03/28	Début de l'acquisition	1999/09/27 15:05:32
Rééchantillonnage	Convolution cubique		
Datum	NAD83	Fin de l'acquisition	1999/09/27 15:05:59
Projection	UTM		
Zone UTM	20	Nuages (%)	Moins de 10
Exactitude horizontale	19 m		
ID	011026_0100_020622_L7	Numéro	LE7011026000217350
Date de production	2003/02/10	Début de l'acquisition	2002/06/22 15:07:11
Rééchantillonnage	Convolution cubique		
Datum	NAD83	Fin de l'acquisition	2002/06/22 15:07:38
Projection	UTM		
Zone UTM	19	Nuages (%)	Moins de 10
Exactitude horizontale	24 m		

Pour couvrir la totalité du territoire d'étude, nous avons dû traiter trois scènes d'environ 180 kilomètres de côté (Tableau 3.4). Deux d'entre elles ont été enregistrées au mois de septembre alors qu'une a été acquise en juin. Pour éviter l'incompatibilité causée par

l'impact des changements de saisons sur la végétation, les classes obtenues ont été validées à partir des cartes topographiques. Il est essentiel de mentionner ici que la gratuité des images, la résolution des données, la grande couverture des images et les dates récentes d'acquisition font de ces informations enregistrées par le satellite Landsat 7 : les données les plus accessibles et les mieux adaptées à nos besoins.

3.4.3 Conversion de l'occupation du sol en longueur de rugosité

En météorologie et dans l'industrie éolienne, pour paramétrer les différents types de surfaces, celles-ci sont converties en longueur de rugosité z_0 (Troen et Petersen, 1991). Ces longueurs sont ensuite regroupées en classes. Une classe de rugosité élevée offrira plus de friction, plus de résistance au vent, alors qu'une surface ayant une classe de 0 n'offrira pratiquement pas de résistance. Le laboratoire national de Riso dans l'Atlas Éolien Européen (Troen et Petersen, 1991) propose un tableau des longueurs et classes de rugosité en fonction des caractéristiques de la surface du sol qui est appuyé par la relation empirique donnée par Lettau (1969) :

$$z_0 = 0,5 (h.S/A_H) \quad (3.3)$$

où h est la hauteur de l'élément, S est la section transversale face au vent et A_H est la densité surfacique.

La longueur de rugosité est une longueur théorique représentant la hauteur à laquelle la vitesse de vent est nulle et commence à augmenter de façon logarithmique (Hélimax Énergie Inc., 2003). Il faut noter que le tableau suivant (Tableau 3.5) donne une valeur fixe de rugosité. En réalité, la rugosité d'une classe d'occupation du sol peut varier en fonction de la foliation, de la végétation, de la couverture de neige, etc.

Tableau 3-5 : Longueur de rugosité (inspiré de l'échelle proposée dans l'Atlas Éolien Européen, 1991)

Z ₀ (m)	Caractéristique du terrain	Classe de rugosité évaluation
1	Ville	3,8
0,8	Forêt	3,7
0,2	Beaucoup d'arbres et/ou buisson	2,8
0,1	Terrain agricole d'allure fermée	2,0
0,03	Terrain agricole avec très peu de constructions, arbres	1,0
0,008	Herbes hautes	0,9
0,005	Sol nu	0,7
0,001	Surface de neige	0,4
0,0003	Surface de sable	0,1
0,0001	Plan d'eau	0

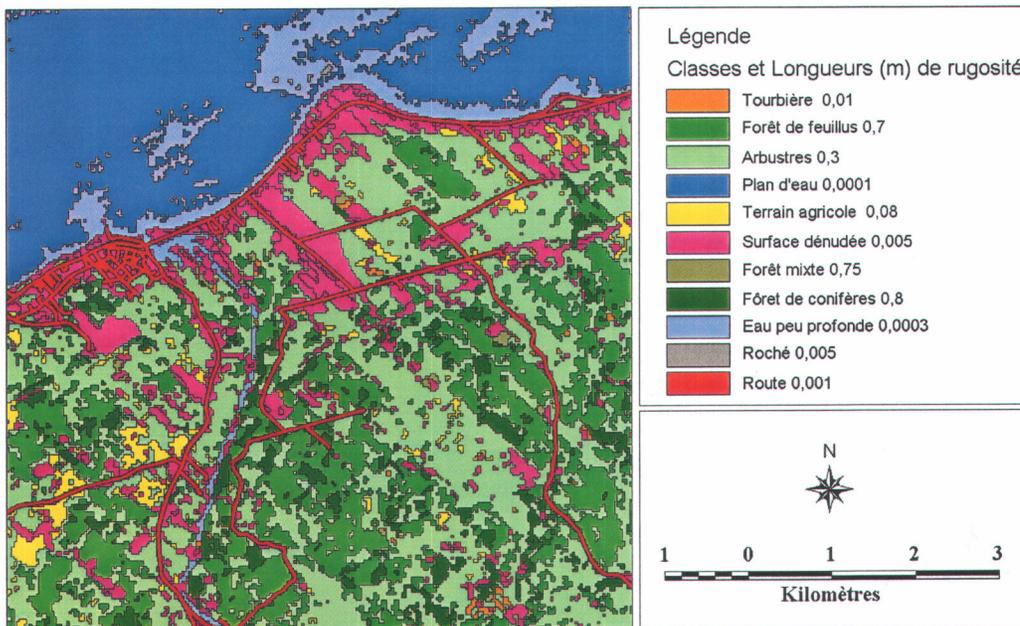


Figure 3.4 – Exemple de carte d'occupation du sol et longueurs de rugosité pour le secteur de Cap-Chat.

3.4.4 Illustration du facteur de rugosité

Avant d'illustrer la discontinuité du facteur rugosité entre le mât de mesure et la ligne de côte, Troen et Petersen (1991) mentionnent que la vitesse du vent en surface dépend des

caractéristiques de celle-ci jusqu'à une certaine distance. Cette distance est évaluée comme étant de l'ordre de 10 à 100 kilomètres en amont. Les obstacles dépassant cette distance ne sont pas considérés puisque la CLA a tendance à s'approcher de l'équilibre entre la force du gradient de pression et la force de frottement. Pour les vents provenant de la mer, la distance à évaluer est inférieure à 10 kilomètres puisque la tour la plus éloignée de la côte est située à 7 km de celle-ci. Alors, l'ensemble des éléments de surface sera inclus dans le paramètre de rugosité pour cette direction. Pour ce faire, une ligne droite a été tracée entre la position du mât de mesure et le Saint-Laurent de façon à être perpendiculaire à la ligne de côte. Ensuite, nous avons fait une moyenne qui regroupait les valeurs de rugosité de chacun des pixels qui étaient interceptés par cette ligne. Pour les directions de vent de terre et de vent parallèle à la côte, la valeur de rugosité utilisée a été obtenue en faisant la moyenne des valeurs incluses à l'intérieur d'une zone tampon de 100 mètres de rayon autour du mât de mesure.

3.5 Estimés de la vitesse du vent

Les vitesses estimées sur mer proviennent des 57 images RSO du satellite RADARSAT-1 (Tableau 3.6) utilisées lors de l'étude de Choïnard (2004). La résolution spatiale des images originales a été dégradée à 400 mètres pour limiter l'effet de chatoiement. Ensuite, la technique d'estimation des vitesses du vent de surface à partir des images RSO du satellite RADARSAT-1 est une modélisation empirique de la rétrodiffusion. Il s'agit de la description du coefficient de rétrodiffusion pour une polarisation et une fréquence donnée :

$$\sigma^0 = f(U_{10}, \theta, \phi) \quad (3.4)$$

- où U_{10} = vitesse du vent à 10 mètres dans les conditions de stabilité neutre
 θ = l'angle d'incidence mesuré dans le plan vertical entre l'onde incidente et la normale à la surface
 ϕ = normale à la surface ou angle d'azimut mesuré dans le plan horizontal entre la direction de visée du radar et celle du vecteur vent

Dans plusieurs cas, comme pour le CMOD-IFR2, les modèles empiriques d'estimation du vent sont développés pour la bande C (Quilfen *et al.*, 1998 ; Stoffelen et Anderson, 1993). Ce modèle a été créé par l'Institut Français d'Étude de la Mer (IFREMER) en utilisant les données du diffusiomètre d'ERS-1 avec les données des bouées NOAA et des champs de vent du modèle norvégien DNMI (Norwegian Numerical Institute). Les paramètres de ce modèle en bande C ont été fixés pour une polarisation VV d'ERS-1. Puisque le satellite RADARSAT-1 opère en polarisation HH et qu'il n'existe pas de jeu de données suffisant pour développer un nouveau modèle empirique, c'est un modèle hybride qui a été utilisé. C'est à dire qu'un rapport de polarisation a été ajouté au modèle empirique CMOD-IFR2. Ainsi, la relation optique de Kirchhoff a permis d'appliquer ce modèle aux images de RADARSAT-1, polarisées HH. Le CMOD-IFR2 appliqué aux images RADARSAT-1 avec le bon rapport de polarisation est reconnu fiable pour la gamme de vitesses du vent de 2 m s^{-1} à 25 m s^{-1} avec une précision autour de 2 m s^{-1} pour les conditions les moins favorables (Vachon et Dobson, 2000). Pour en savoir plus sur la relation entre le signal radar et les vitesses de vent ou pour une description des modèles empiriques et des rapports de polarisation, le chapitre deux de la thèse de Choïnard (2004) explique bien ces approches. Ensuite, pour plus d'informations sur les différentes images et le traitement appliqué, le chapitre trois de la même étude y est consacré.

Tableau 3-6 : Synthèse des images RADARSAT-1 utilisées

Nombre d'images	Mode	Orbite (A/D)	Résolution Spatiale (m)
29	Wide	Ascendant	25
12	Wide	Descendant	25
14	ScanSAR Narrow	Ascendant	50
1	ScanSAR Narrow	Descendant	50
1	ScanSAR Wide	Ascendant	100

3.5.1 Illustration des estimés de la vitesse du vent

Pour obtenir une valeur d'estimation représentative des données de vent obtenues près de la côte, quatre méthodes d'extraction ont été évaluées. Les données ont été extraites

systématiquement aux pixels se situant à 1, 2 et 3 kilomètres de la côte et moyennées à l'intérieur d'une surface carrée de 1 kilomètre de côté alignée parallèlement à la côte et à 1,5 kilomètre de celle-ci. La figure 3.5, illustre les différentes alternatives.

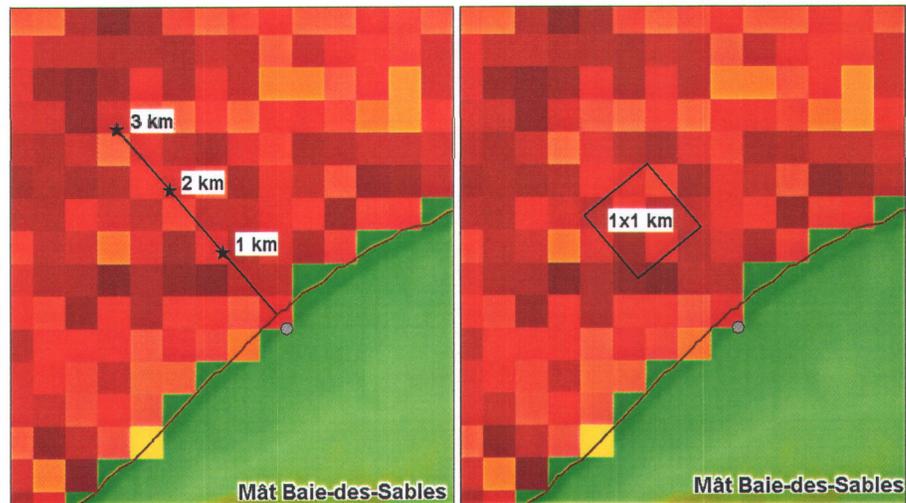


Figure 3.5 – Illustration des quatre méthodes d'extraction.

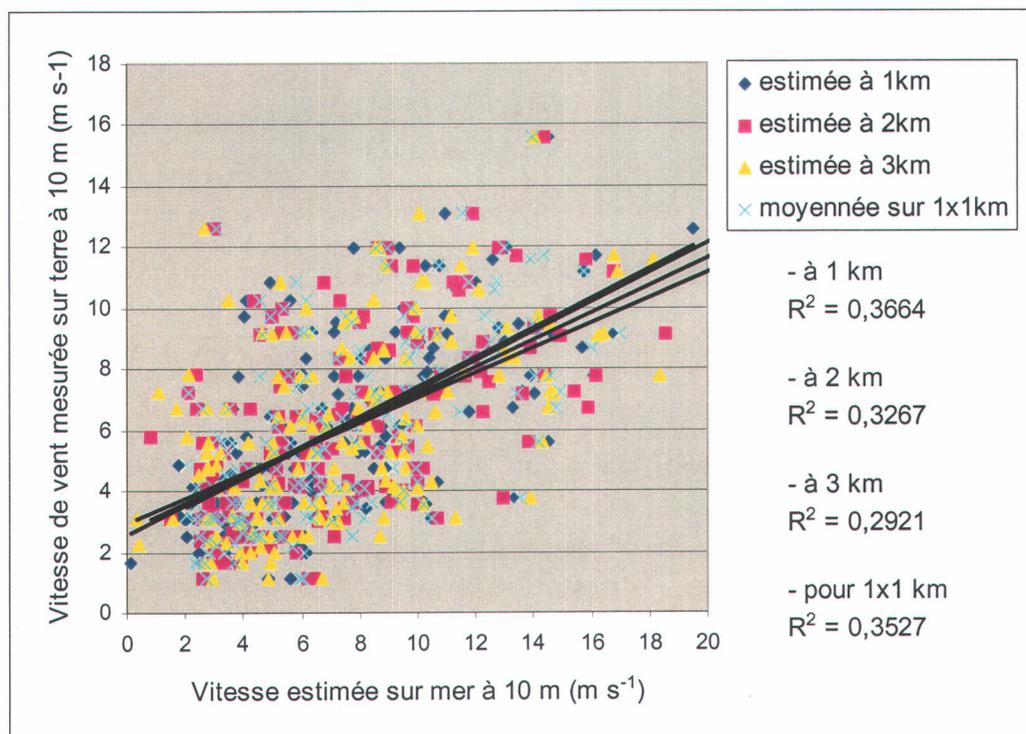


Figure 3.6 – Comparaison des régressions linéaires entre la vitesse du vent de surface sur les images de RADARSAT-1 et la vitesse du vent aux stations côtières (pour l'ensemble du jeu de données). Chacune des couleurs correspond à une des méthodes d'extraction des vitesses qui ont été proposées.

Avec un coefficient de détermination de 0,37, la méthode systématique d'extraction de la donnée à 1 kilomètre de la côte semble être la plus adéquate pour arriver à estimer la donnée enregistrée sur la côte (Figure 3.6). Il s'agit donc de la méthode retenue pour créer le tableau d'analyses.

3.6 Données de température de surface pour le Saint-Laurent

Il est possible d'obtenir la température en mer à partir de la bande thermique de quelques satellites. Parmi ceux-ci, les images AVHRR des satellites NOAA offrent une résolution intéressante d'environ 1,1 kilomètre au nadir et un grand nombre de passages au dessus d'un même territoire. Le capteur AVHRR est sensible à cinq bandes spectrales du visible et du proche infrarouge ainsi qu'à trois bandes spectrales de l'infrarouge thermique. Les deux bandes spectrales suivantes : 10,5-11,5 et 11,5-12,5 μm sont les bandes utilisées à la base de l'estimation des températures de surface océanique (Ouaidrari *et al.*, 2002). Ainsi l'application des bons filtres pour éliminer les nuages et la correction de l'atténuation atmosphérique permet l'estimation de la température de surface (McClain, 1985). Le produit est généralement nommé SST pour Sea Surface Temperature.

Les données utilisées pour le golfe du Saint-Laurent sont une gracieuseté du laboratoire de télédétection de l'Institut Maurice-Lamontagne (IML). Les SST sont obtenues suite à l'application d'une chaîne de traitements aux images AVHRR des satellites NOAA (développée par l'IML). Les matrices de données résultantes sont formées de valeurs entières entre 0 et 255 (1 octet). Les valeurs de 0 à 254 indiquant les données SST et la valeur 255 représentant les données manquantes. Pour convertir ces données en degrés Celsius, la relation linéaire suivante est appliquée (Gosselin, 2005) :

$$s = v * 0,1168 - 1,8 \quad (3.5)$$

où s est la valeur SST en degrés Celsius

v est la valeur entière donnée par la matrice

3.6.1 Illustration des températures de surface pour le Saint-Laurent

Étant donné les fortes variations locales de température (jusqu'à 1 °C) dues à la précision spatiale des données et le faible pourcentage de données causé par une forte présence de nuages dans la région aux périodes de passage du satellite RADARSAT-1 (Figure 3.7), les données retenues sont celles qui étaient les plus représentatives et les plus près des sites à l'étude. La convergence de l'air marin au dessus de la ligne de côte peut produire de fortes convections chargées en pluie (Rogers, 1995). Tout d'abord, une sélection des matrices SST a été effectuée pour s'approcher de la co-localisation temporelle.

**Tableau 3-7 : Comparaison des périodes d'acquisition pour 41 des 57 images RADARSAT-1
avec les matrices SST**

Images RADARSAT-1		Images NOAA
Heure (UTC)	Date	Heure (UTC)
21:52	2001/11/23	21:00
21:56	2001/12/10	21:00
21:52	2001/12/17	19:55
10:38	2001/12/27	07:21
21:56	2002/01/03	21:34
21:52	2002/04/16	20:45
10:38	2002/04/26	10:21
10:38	2002/05/20	08:07
21:56	2002/05/27	21:03
21:52	2002/06/03	21:35
22:05	2002/06/06	20:23
10:38	2002/06/13	09:30
21:52	2002/06/27	20:19
10:38	2002/07/07	09:54
21:52	2002/07/21	20:43
10:38	2002/07/31	08:21
21:56	2002/08/07	20:34
21:52	2002/08/14	21:06
10:38	2002/08/24	10:41
21:56	2002/08/31	20:57
21:52	2002/09/07	21:28
10:38	2002/09/17	09:23
21:56	2002/09/24	21:19
21:52	2002/10/01	21:50
22:17	2002/10/07	21:06
10:38	2002/10/11	09:45
22:13	2002/10/14	21:37
21:56	2002/10/18	21:40
22:09	2002/10/21	20:28
21:52	2002/10/25	20:31
22:05	2002/10/28	20:59
10:38	2002/11/04	10:05
22:13	2002/11/07	20:17
10:37	2003/06/08	07:26
22:03	2003/08/12	21:04
22:13	2003/08/22	20:20
22:13	2003/10/09	20:49
22:09	2003/10/16	21:18
22:12	2003/11/02	21:03
21:56	2003/11/06	21:05
22:08	2003/11/09	21:32

Ensuite, une extraction manuelle a forcé l'analyse cas par cas des différentes situations. Premièrement, il était nécessaire d'identifier les sites couverts par l'image RADARSAT-1 co-localisée dans le temps. Deuxièmement, s'assurer que les données SST étaient disponibles près de la côte aux sites d'études. Troisièmement, noter la valeur la plus représentative du secteur. Ainsi, une série de données près de la région étaient vérifiées pour évaluer les écarts et s'assurer que ces écarts n'étaient pas produits par des pixels de nuages ou des pixels de côte. Tel que mentionné plus haut, la forte présence de nuage a diminué considérablement le nombre de données pour illustrer ce facteur. Par conséquent, les corrélations obtenues seront probablement peu représentatives du phénomène.

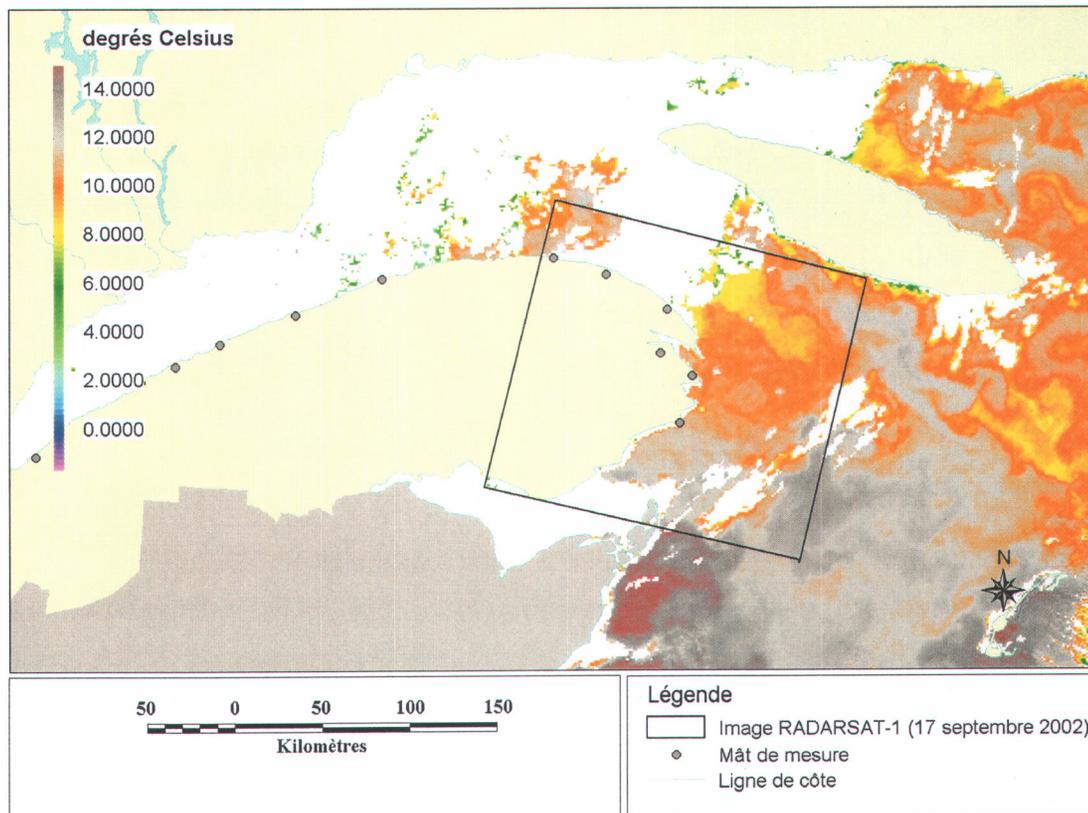


Figure 3.7 – Exemple de carte de températures de surface pour le cas du 17 septembre 2002 (données de températures provenant du laboratoire de télédétection de l'Institut Maurice-Lamontagne).

3.7 Données sur la direction du vent

Pour chacune des images RADARSAT-1, les informations sur la direction des vents proviennent des mesures à la bouée de Mont-Louis et des mâts de mesures terrestres en plus des estimés du diffusiomètre QuicSCAT. Les données ont été interpolées par la méthode d'interpolation bi-harmonique *spline* sur un quadrillage dont les pixels mesurent 400 mètres par 400 mètres correspondant à la partie maritime des images RADARSAT-1 (Choisnard, 2004). Pour diminuer les risques d'erreurs sur les données, une attention particulière a été portée aux cas présentant une différence de direction exagérée (90° et plus). Dans ces cas, la donnée jugée erronée n'était pas utilisée pour l'interpolation.

3.7.1 Illustration de la direction du vent

Tel que suggéré par Hélimax Énergie Inc. (2003), les données ont été séparées en trois cas pour évaluer de façon spécifique les changements de vitesse en fonction de la distance de la côte. À partir des informations sur l'alignement de la côte et des données sur la direction des vents, les images associées aux positions des mâts de mesure se sont vues attribuer les classes de vents provenant de la mer, vents provenant de la terre et vents parallèles à la côte. La classification a été réalisée suite à l'interprétation des données illustrées sous forme de cartes.

3.8 Données de vent pour chacun des sites terrestres

3.8.1 Données du MRNQ

Les données utilisées proviennent du CD distribué par le MRNQ. Les mesures à ces emplacements ont été prises à 20 mètres et 40 mètres de hauteur. L'installation de ces mâts de mesure, dans le cadre du programme de mise en valeur du potentiel éolien au Québec, s'est divisée en quatre volets (I, II, III, IV) et a été réalisée par différents intervenants externes au Ministère.

La qualité et la fiabilité de ces données ont été évaluées par le groupe Enviromet International inc. (Lelièvre et Dafinova, 2003) mandaté par le MRNQ. Voici une liste des mises en garde notées par les experts-conseils dans leur rapport :

- les données de température peuvent souffrir d'un biais supérieur à 3°C (en valeur absolue)
- les données de vitesses de vent peuvent souffrir d'un biais supérieur à 10% en valeur absolue
- les données de direction de vent peuvent souffrir d'un biais supérieur à 18° en valeur absolue

De plus, les experts d'Enviromet International inc. (Lelièvre et Dafinova, 2003) portent une attention particulière au fait que certaines des données de vitesse et de direction de vent qu'ils ont identifiées comme valides sont influencées par la présence de glace sur les anémomètres. Ainsi, les vitesses peuvent être plus faibles que la réalité et la direction du vent peut être faussée. Pour ces raisons, les conclusions de notre étude, quant à ces différents mâts de mesure, devront être nuancées.

Pour ces mesures, les valeurs à 20 mètres et à 40 mètres ont été utilisées pour calculer un coefficient de cisaillement. Ensuite, c'est ce coefficient qui a été utilisé pour extrapoler la donnée de vent à 10 mètres de hauteur. La méthode utilisée est l'approximation de la loi de puissance du vent décrite par la formule suivante (Wind Economics and Technology Inc. et L'Université du Québec à Rimouski, 1996):

$$U_2/U_1=(z_2/z_1)^\alpha \quad (3.6)$$

où U_2 est la vitesse qui sera estimée ($m\ s^{-1}$)

U_1 est la vitesse mesurée initialement ($m\ s^{-1}$)

z_1 est la hauteur de l'observation initiale de la vitesse du vent (m)

z_2 est la hauteur à laquelle la vitesse sera estimée (m)

α est le facteur de puissance ou coefficient de cisaillement (à titre d'information, la valeur de 1/7 est généralement retenue pour les sites classiques bien exposés aux vents)

En effectuant cette extrapolation, nous ramenons les valeurs de vitesse de vent à 10 mètres au-dessus du sol. Les données des stations d'EC et les estimés de vent par RSO étant obtenus à 10 mètres, c'est à cette hauteur que les relations statistiques seront évaluées.

3.8.2 Données d'Environnement Canada

Les données d'Environnement Canada ont été fournies par le Centre de Ressource en Impacts et Adaptation au Climat (CRIACC). Pour l'ensemble des stations, les mesures ont été prises à 10 mètres au-dessus de la surface du sol. Chaque station retenue enregistre une mesure moyenne du vent sur 10 minutes et ce, à toutes les heures (à l'exception des deux stations d'aviation « Gaspé a » et « Mont-Joli a », où les données sont moyennées sur 2 minutes). Les données de vitesses et de directions de vent sont données avec une précision de $0,1 \text{ m s}^{-1}$ et 1° ainsi qu'une précision théorique de $\pm 0,3 \text{ m s}^{-1}$ et $\pm 3^\circ$.

3.9 Définition de l'échantillon

Tel qu'illustré par le tableau suivant (Tableau 3.7), avant de commencer les analyses, une première épuration des données a été effectuée. Nous avons donc éliminé (1) les données de vent inférieures à 2 m s^{-1} , (2) les périodes où les conditions de vent ne sont pas stationnaires, (3) les dates où il y a possibilité de glace sur le fleuve puisque la méthode empirique utilise la rugosité de la surface de l'eau pour estimer la vitesse des vents, (4) les données terrestres à plus de 3km de la côte et (5) un site complexe dû à la canalisation des vents.

Tableau 3-8 : Définition de l'échantillon et des points aberrants

Champs	Conditions	Q _{init}	Points aberrants	Q _{final}
Intensité du vent	Gamme de vitesse entre 0 et 25 m s ⁻¹	261	Vitesse < 2 m s ⁻¹	97
			$V_{\text{mer}} - V_{\text{terre}} \leq 3 \text{ m s}^{-1}$	13
	Total	261	Total	151
Direction du vent	Mer	39		
	Terre	40		
	Parallèle	72		
Total	151	Total	151	
Conditions de vent	Ensemble des conditions	151	- Possibilité de glace	8
			- Vents non stationnaires	20
Total	151	Total	129	
Mât de mesure	EC	7	- Mât à plus de 3 km (mât Gaspé)	1
	MRN	6		
	Total	13	Total	12
Topographie	Sommet	4	- Effet de canalisation (mât Trois-Pistoles)	1
	Pente	4		
	Escarpement	2		
	Talus	2		
	Total	12		
Échantillon initial		261	Échantillon final	109

C'est ainsi que l'échantillon est passé de 261 à 109 enregistrements. Premièrement, les valeurs de vitesse de vent inférieures à 2 m s⁻¹ ont été éliminées puisque le modèle CMOD-IFR2 est reconnu fiable pour une gamme de vitesses plus élevées (tel que mentionné plus tôt). De plus, dans le domaine de la météorologie de l'énergie éolienne les vitesses trop faibles sont généralement rejetées puisqu'elles ne sont pas intéressantes du point de vue de production énergétique et surtout puisqu'elles sont très peu ou pas influencées par la topographie du milieu. Deuxièmement, nous avons estimé que les enregistrements où les valeurs de vent sur terre étaient supérieures de 3 m s⁻¹ aux valeurs sur mer étaient rares et probablement causées par des conditions météorologiques particulières tel que le passage d'un front. Nous comptons 13 de ces cas pour les vitesses de vent supérieures à 2 m s⁻¹, mais ce nombre tombe à 4 lorsque nous éliminons toutes les conditions problématiques. Troisièmement, les 29 cas où les conditions de vent ont été jugées non stationnaires ont été éliminés. Ce processus est nécessaire puisque les données

ne sont pas exactement co-localisées dans le temps (± 1 heure dans les pires cas). Pour ce faire, nous avons comparé les données enregistrées une heure avant et une heure après celle retenue. Si les données de vitesses et de directions du vent dépassaient un seuil de tolérance établi à 2 m s^{-1} et 20° respectivement, elles étaient analysées et généralement éliminées. Quatrièmement, les dates identifiées par Choisnard (2004) comme étant influencées par la présence de glace (établit à partir des prévisions horaires de concentration en glace de l'Institut Maurice-Lamontagne) ont été retirées de l'échantillon final. Pour terminer, deux sites ont été rejetés pour des raisons différentes. Le mât de Gaspé situé à plus de trois kilomètres de la côte a été jugé trop profond à l'intérieur des terres. À cette distance de la côte, les conditions de vent risquent d'être de type continental. Ainsi, elles n'ont plus de relations possibles avec les données du milieu côtier. Pour ce qui est du mât de Trois-Pistoles, la présence de la Rivière-Trois-Pistoles, située très près du site et très encavée, fait de cet endroit un milieu orographique plus complexe. Dans plusieurs situations de vents, ceux-ci risquent d'être réorientés vers le canal, rendant ce site distinct et difficilement comparable avec les autres cas.

Les traitements réalisés sur les données ont nécessité l'utilisation d'un logiciel communément appelé un Système d'Information Géographique (SIG). Les SIG sont conçus pour manipuler de l'information géoréférencée qui peut être de format vectoriel ou matriciel. Ils permettent la superposition de données, sous forme de couches. La seule exception se situe à l'étape de création des matrices d'occupation du sol. Celles-ci ont demandé l'utilisation d'un logiciel de traitement d'images numériques. C'est aussi grâce au SIG que les données de vent sur terre et sur mer, co-localisées dans le temps, et les valeurs représentatives de chacun des facteurs ont été extraites pour être importées dans un tableur qui a servi les fins d'analyses présentées dans le chapitre suivant.

4 ANALYSES ET RÉSULTATS

4.1 Cas des stations près de la côte

Dans un premier temps, pour s'assurer de la pertinence de la méthode d'estimation des vents par RSO, l'ensemble des données (sans restriction et sans distinction sur la direction du vent) estimées en mer ont été comparées aux données terrestres pour les mâts de mesure les moins influencés par la topographie et la rugosité de surface (Figure 4.1). Ce sont les mâts de Cap-Chat et de Pointe-au-Père qui ont été retenus. Ces deux stations érigées sur des terrains relativement plats sont séparées de la côte par un petit talus d'environ un mètre d'élévation pour Pointe-au-Père et cinq mètres pour Cap-Chat. Ensuite, la végétation du terrain environnant se limite à du gazon ou de l'herbe courte pour les deux sites. Ainsi, la hauteur à laquelle l'influence du changement de rugosité est perceptible est inférieure ou très près de la hauteur de l'instrumentation de mesure (10 mètres). De plus, les deux stations sont situées à proximité de la côte, soit à 60 mètres pour Cap-Chat et 120 mètres pour Pointe-au-Père.

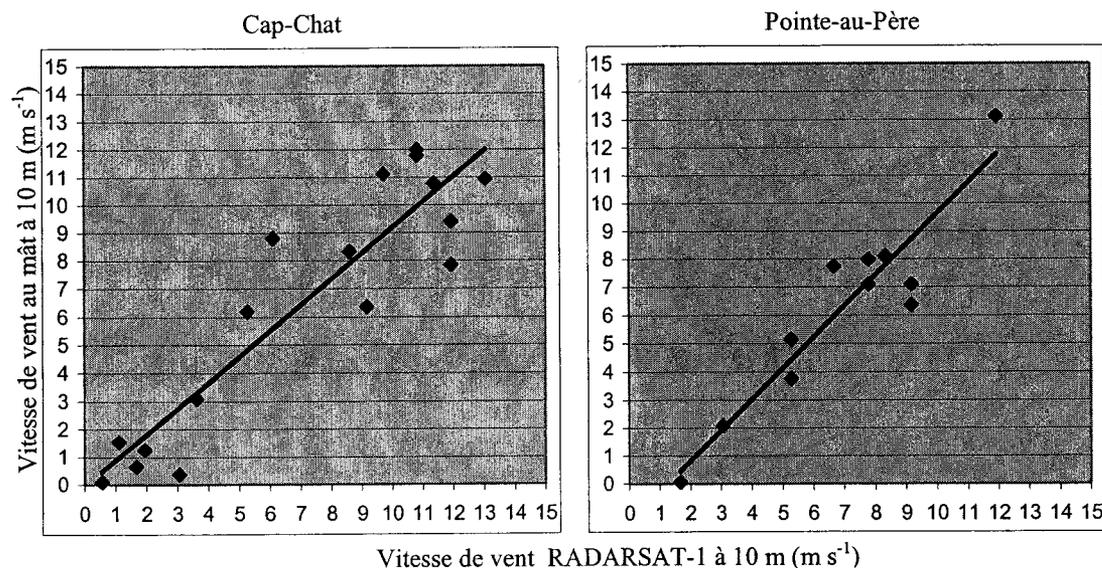


Figure 4.1 – Régressions linéaires entre la vitesse du vent de surface dérivée des images de RADARSAT-1 et la vitesse du vent aux stations côtières pour les deux stations près de la côte.

Tableau 4-1 : Comparaisons des vitesses de vent de surface dérivée des images de RADARSAT-1 et les vitesses de vent aux stations côtières pour les deux stations près de la côte

Station	nb données	RMSE ($m s^{-1}$)	Biais ($m s^{-1}$)	Corrélation	R^2
Cap-Chat	17	1,8	-0,6	0,92	0,84
Pointe-au-Père	11	1,4	-0,7	0,94	0,87

Dans ces deux cas, ce sont de fortes corrélations avec des coefficients de corrélation de 0,92 et 0,94 et des coefficients de détermination de 0,84 et 0,87 (Tableau 4.1). L'interprétation de ces graphiques permet d'avancer que la méthode d'estimation du vent à partir des images RSO de RADARSAT-1 en région côtière donne une très bonne indication de la vitesse des vents à 10 m au-dessus de l'eau. Il est important de mentionner que Choisnard (2004) a évalué l'erreur sur les estimations en mer à $\pm 1,5 m s^{-1}$ en comparaison avec les estimés de QuikSCAT et $2 m s^{-1}$ en comparaison avec la bouée de Mont-Louis. De plus, l'éloignement de la régression linéaire par rapport à la droite 1:1 pourrait probablement être expliqué par l'effet barrière causé par le talus séparant les deux milieux.

4.2 Ensemble des conditions

Pour les prochaines analyses, nous avons utilisé l'échantillon épuré. Pour connaître les enregistrements éliminés, référez-vous au chapitre 3.

Avant de tenter l'extrapolation sur terre des vitesses de vent obtenues en mer, le graphique suivant (Figure 4.2) illustre la comparaison directe entre les deux données prises quasi simultanément. Malgré un R^2 de 0,52, et un biais de $1,68 m s^{-1}$, ce qui peut sembler faible, il est toutefois possible de dégager une tendance. Les sections suivantes tenteront d'améliorer la corrélation en distinguant quelques conditions et en paramétrant les facteurs qui influent.

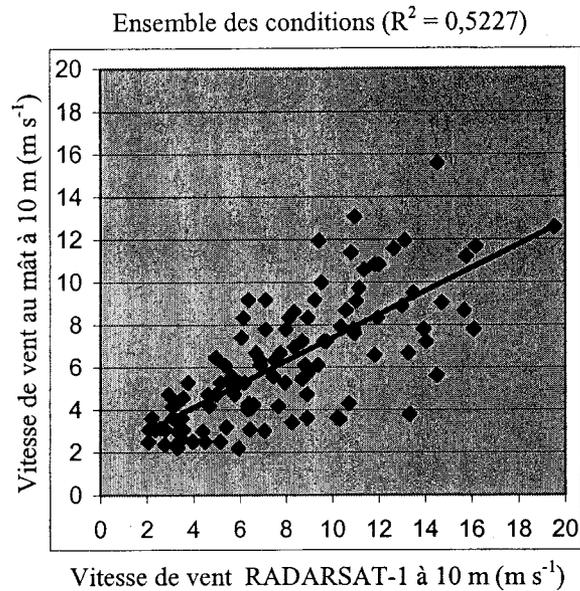


Figure 4.2 – Régression linéaire entre la vitesse du vent de surface dérivée des images de RADARSAT-1 et la vitesse du vent aux stations côtières pour l'ensemble des conditions.

Tableau 4-2 : Comparaison des vitesses de vent de surface dérivée des images de RADARSAT-1 et des vitesses de vent aux stations côtières pour l'ensemble des conditions

Station	nb données	RMSE ($m s^{-1}$)	Biais ($m s^{-1}$)	Corrélation	R^2
Total	109	3,15	1,68	0,72	0,52

Pour obtenir un modèle statistique d'extrapolation des vitesses de vent, on devrait normalement procéder à une étude paramétrique pour découvrir si les facteurs ont une influence significative et vérifier s'il est possible de les combiner pour améliorer l'estimation. Pour ce qui est de l'étude des vents, cette approche est mise de côté dans le cas où l'ensemble des conditions est pris en compte, les impacts des facteurs étant inter-reliés. Par exemple, l'effet du ralentissement des vents, causé par la turbulence que produit la rugosité du sol, change en fonction du positionnement orographique du site étudié, de la classe du vent (en fonction de la vitesse), de la direction du vent et des conditions atmosphériques. Puisque le territoire de la Gaspésie est très hétérogène et que le nombre d'images RSO est limité, il est pratiquement impossible d'isoler un seul facteur pour quantifier son rôle. En ce sens, Shimada et Kawamura (2005) concluent que les méthodes simples d'interpolation du vent de surface, de part et d'autre de la ligne

côtière, sont inappropriées. Selon eux, la compréhension du vent côtier, qu'ils qualifient de « très variable », nécessite le traitement numérique des phénomènes de la météorologie côtière et de l'océanographie.

Ainsi, le présent projet de recherche tentera d'améliorer l'estimation des vents de surface sur terre à partir des données obtenues en mer en proposant un certain nombre de classes regroupant des situations semblables et en identifiant quelques tendances.

4.3 Évaluation de la variable intensité du vent

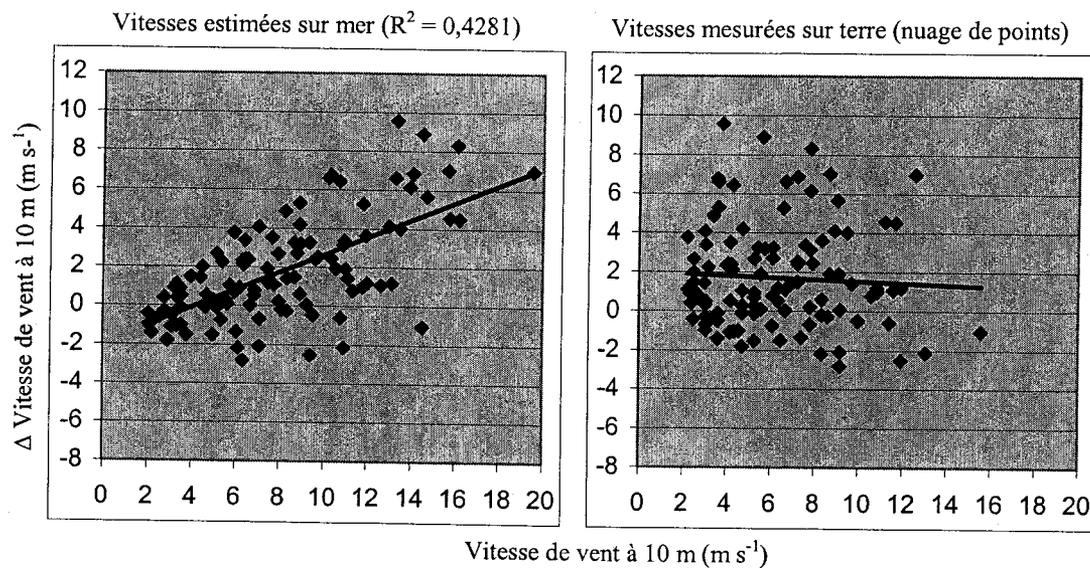


Figure 4.3 – Régressions linéaires entre la vitesse estimée sur mer (gauche) ; la vitesse mesurée sur terre (droite) et la différence des mesures de vitesses du vent (vitesse de surface en mer moins la vitesse de surface sur terre).

Les deux graphiques plus hauts (Figure 4.3) illustrent la différence entre la mesure terrestre et l'estimation en mer, qui sont co-localisées dans le temps, par rapport aux vents estimés sur mer et aux vents mesurés sur terre. Dans cet échantillon, les vitesses de vents estimées en mer semblent déterminer l'impact qu'a le changement de régime. Ainsi, plus la vitesse estimée en mer est élevée, plus la différence entre les données est élevée. Ces graphiques, réalisés à partir de nos données, laissent voir que si les vents

estimés en mer sont très faibles (inférieurs à 3 m s^{-1}), les vents en milieu terrestre sont systématiquement plus forts que ceux en milieu marin. Cependant, il faut savoir que nos images sont enregistrées en fin de journées ou tôt en matinée (17-18h ou 5-6h), il se peut alors que les vents de terre soient sur-représentés. Pour ces périodes de la journée, les gradients de température peuvent être inversés (brise de terre), ce qui expliquerait que le vent sur la côte est plus fort qu'en mer. Ce phénomène n'est pas représentatif de la moyenne. Pour les conditions de vents forts, les vents de mer enregistrent des vitesses plus élevées, car la rugosité et l'orographie peuvent être négligées en milieu marin.

Sachant qu'il ne faut pas généraliser une telle observation, l'interprétation de ces deux graphiques suggère qu'il est plus adéquat d'estimer les vitesses sur la terre à partir des données obtenues en mer que l'inverse (situation où la distribution des points ne présente pratiquement aucune tendance). Ce constat vient donc consolider l'hypothèse selon laquelle il est possible de préciser les vitesses terrestres à partir des vitesses marines.

4.4 Évaluation de la variable direction du vent

En séparant l'échantillon en trois, selon la direction du vent (Figure 4.4), on remarque qu'il est possible d'expliquer directement la vitesse du vent sur terre à partir de la vitesse obtenue sur mer lorsque les vents proviennent de la mer. En effet, la meilleure corrélation est obtenue lorsqu'on compare directement les deux mesures. Tandis que pour les vents de terre et les vents parallèles, la vitesse mesurée en mer explique plutôt l'écart entre les deux mesures (Δ vitesses). Ceci sous-entend que pour ces deux situations, l'impact du changement de régime prend de l'importance de façon régulière lorsque la vitesse augmente. En effet, la corrélation directe entre les mesures est faible (R^2 de 0,39 et 0,29), alors que plus les vents estimés en mer sont élevés, plus l'écart entre les mesures est grand (R^2 de 0,64 et 0,48). Par rapport aux vents de mer, la perte de vent est plus forte pour les directions de vent venant de la terre ou de vent parallèle. Cela implique une pondération dans la rose des vents lors d'une comparaison du potentiel des milieux.

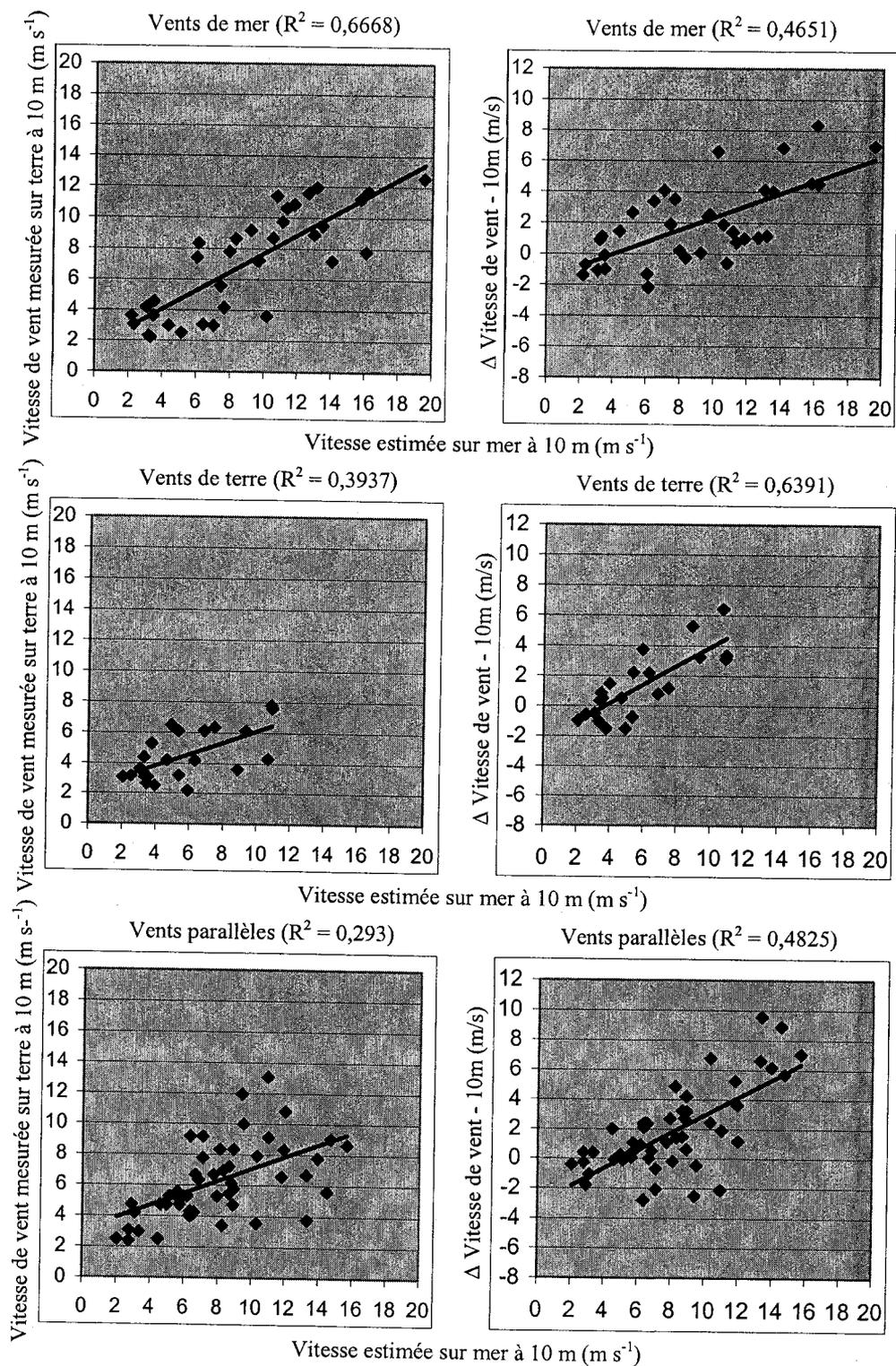


Figure 4.4 – Régressions linéaires entre la vitesse estimée sur mer en séparant l'échantillon d'après trois directions distinctes et la vitesse mesurée sur terre (gauche) ; différence des mesures de vitesses du vent (vitesse de surface en mer moins la vitesse de surface sur terre) (droite).

4.5 Évaluation de la variable orographie

Pour ce qui est de l'orographie, plusieurs études dont Taylor et Lee (1984), Jackson et Hunt (1975), Mason et Sykes (1979) et Ayotte et Hugues (2004), ont tenté d'expliquer l'impact qu'avait la présence d'une colline sur la vitesse mesurée à son sommet par rapport à celle mesurée à sa base. Pour chacune de ces études, les auteurs s'entendent pour dire qu'en milieu terrestre, le sommet d'une colline est l'endroit où le vent est le plus intéressant pour l'installation d'aérogénérateurs. L'accroissement de la vitesse au sommet d'une colline se calcule de la façon suivante :

$$\Delta U = (U(z) - U_0(z))/U_0(z) \quad (4.1)$$

où $U(z)$ est la vitesse du vent au sommet, z est l'élévation à laquelle la mesure est prise et $U_0(z)$ est la vitesse du vent en amont de la colline.

De plus, ces auteurs avancent que, pour des conditions d'air normalement stratifié et pour des vitesses de vent supérieures à 6 m s^{-1} , l'accroissement de la vitesse est de l'ordre de h/L , où h est la hauteur de la colline et L est la demi-largeur de l'obstacle mesurée à la mi-hauteur de la surélévation. Puisque les mâts de mesure utilisés pour cette étude ne sont pas tous situés au sommet d'une colline ou d'une montagne et que, tel que mentionné au chapitre 2, les surélévations ne produisent pas le même effet de survitesse, les sites ont été séparés en classes. C'est l'interprétation des coupes topographiques (en annexe) qui a permis d'identifier 4 classes: Talus, Escarpement, Sommet et Pente. Ainsi, les 11 sites restants ont été classés de la façon suivante :

- Talus : Cap-Chat, Pointe-au-Père
- Escarpement : Cap-d'Espoir, Cap-Madeleine
- Sommet : Pointe-Saint-Pierre, Montagne-Sèche, Rivière-au-Renard TV, Rivière-du-Loup
- Pente : Sainte-Félicité, Baie-des-Sables, Mont-Joli

La classe « Talus » regroupe les sites très peu élevés par rapport au niveau de la mer où les deux milieux sont séparés par un talus. La classe « Escarpement » a été définie pour les mâts situés au sommet d'un plateau dont les côtés sont très abrupts. La classe

« Sommet » regroupe les instruments installés au sommet d'une montagne ou d'une colline. Pour terminer, les mâts situés sur le flanc d'une montagne ou d'une colline ont été classés dans la catégorie « Pente ».

4.5.1 Vents de mer

En effectuant cette nouvelle classification des données, on améliore le coefficient de détermination pour trois des quatre classes (Figure 4.6). Les données des classes « Escarpement » et « Pente » démontrent une perte plus importante de la vitesse des vents lorsqu'ils traversent la ligne de côte. Concernant la classe « Pente », l'interprétation de ce résultat indique que l'augmentation des vitesses du vent provoquerait une zone de séparation dans le flanc de la colline créant de fortes turbulences (Figure 4.5). Cette situation résulterait en une diminution plus importante de la vitesse (augmentation de l'écart entre les vitesses).

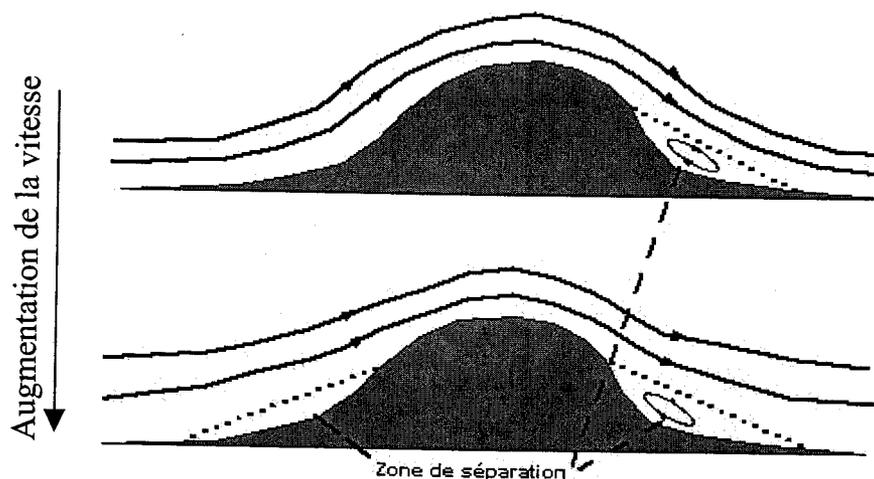


Figure 4.5 – Schéma de la création d'une zone de séparation.

Pour ce qui est de la classe « Escarpement », la forte pente séparant le milieu marin du mât de mesure créerait un obstacle au vent. Ainsi, lorsque les vitesses de vent seraient élevées, la présence d'un obstacle produirait de la turbulence au sommet de la falaise. Par ce processus, l'écart entre les vitesses augmenterait (Figure 4.7).

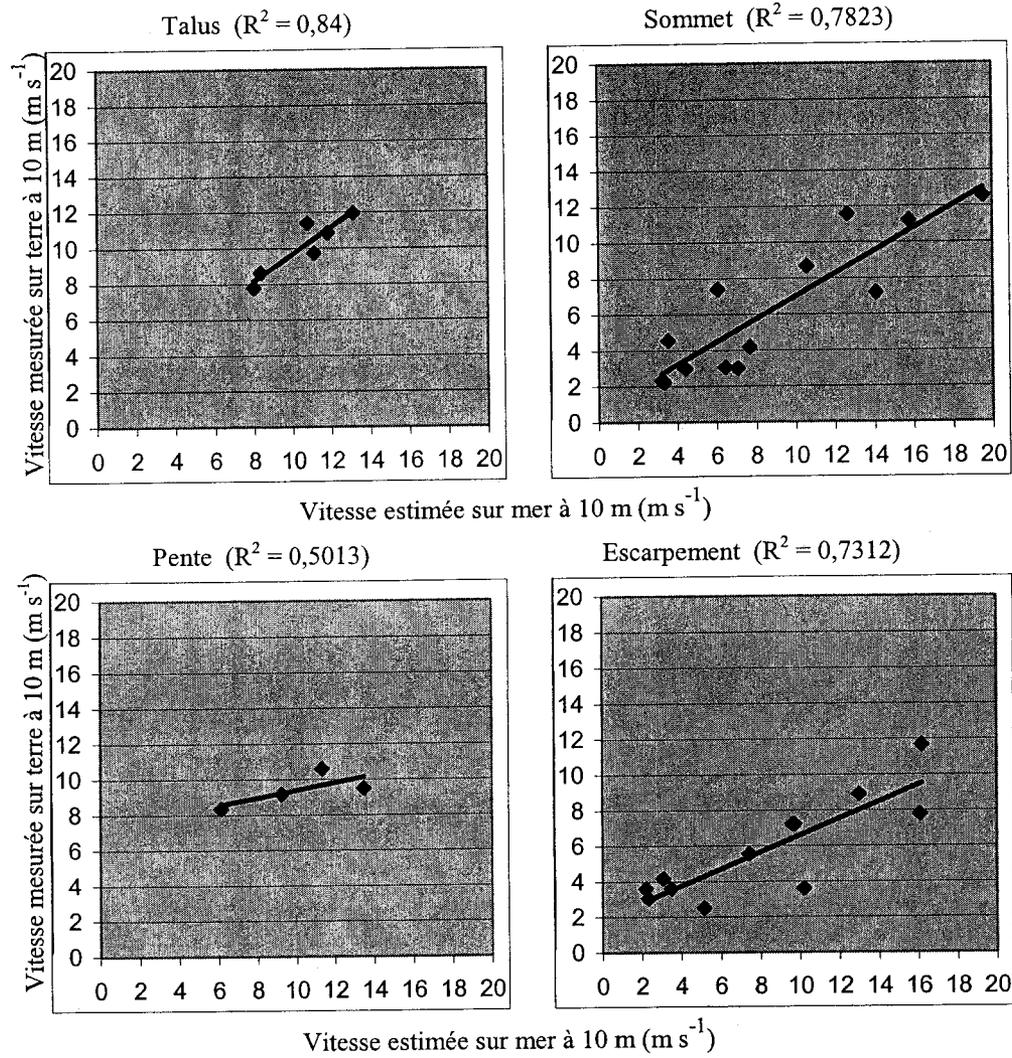


Figure 4.6 – Régressions linéaires entre la vitesse du vent de surface sur mer et la vitesse du vent de surface sur terre pour les quatre situations de vent de mer.

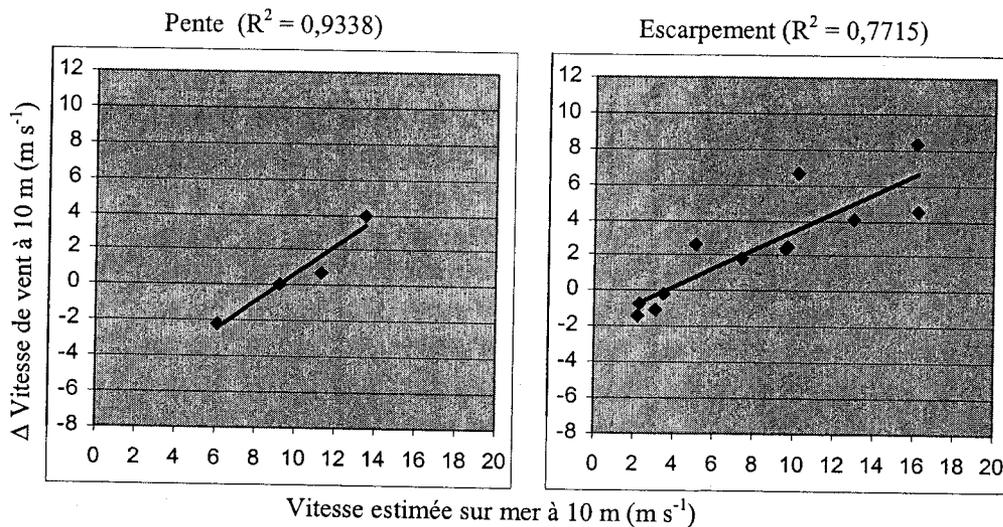


Figure 4.7 – Régressions linéaires entre la vitesse du vent en mer et la différence entre les vitesses de vent (vitesse de surface en mer moins la vitesse de surface sur terre) pour deux situations de vent de mer : « Pente » (gauche) et « Escarpement » (droite).

Ensuite, en intégrant le facteur de pente dans l'analyse, on améliore encore une fois les corrélations pour certains cas (Figure 4.8). Ce facteur de pente permet de faire une distinction entre les sites d'une même classe. La pente est calculée par Z_a/Z_d , où Z_a est l'altitude à l'emplacement du mât et Z_d est la distance par rapport à la ligne de côte. Notons, d'après les graphiques, que pour les milieux côtiers, les sommets de montagnes ne présentent pas de survitesse à moins que les vitesses soient très faibles. On remarque même une perte de vitesse qui est plus ou moins importante selon les cas. En principe, il devrait y avoir survitesse au sommet de la montagne par rapport à sa base. La raison de la perte de vitesse causée plutôt par l'effet de la rugosité ou l'effet de barrière.

Pour les classes « Pente » et « Talus », l'indice de pente ne semble pas avoir d'impact sur les vents. En effet, dans ces deux cas la corrélation ne s'améliore pas. Ce résultat peut s'expliquer par le faible échantillon. Cependant, les deux mâts de la classe « Talus » sont à de très faibles altitudes, laissant croire que la pente a très peu d'impact perceptible sur la vitesse du vent. Pour la classe « Sommet », la vitesse sur terre au sommet d'une montagne par rapport à la vitesse en mer est de l'ordre de Z_a/Z_d , alors que pour le sommet

d'un escarpement, c'est la perte de vitesse, tel que calculée en 4.1, qui est de l'ordre de Z_a/Z_d .

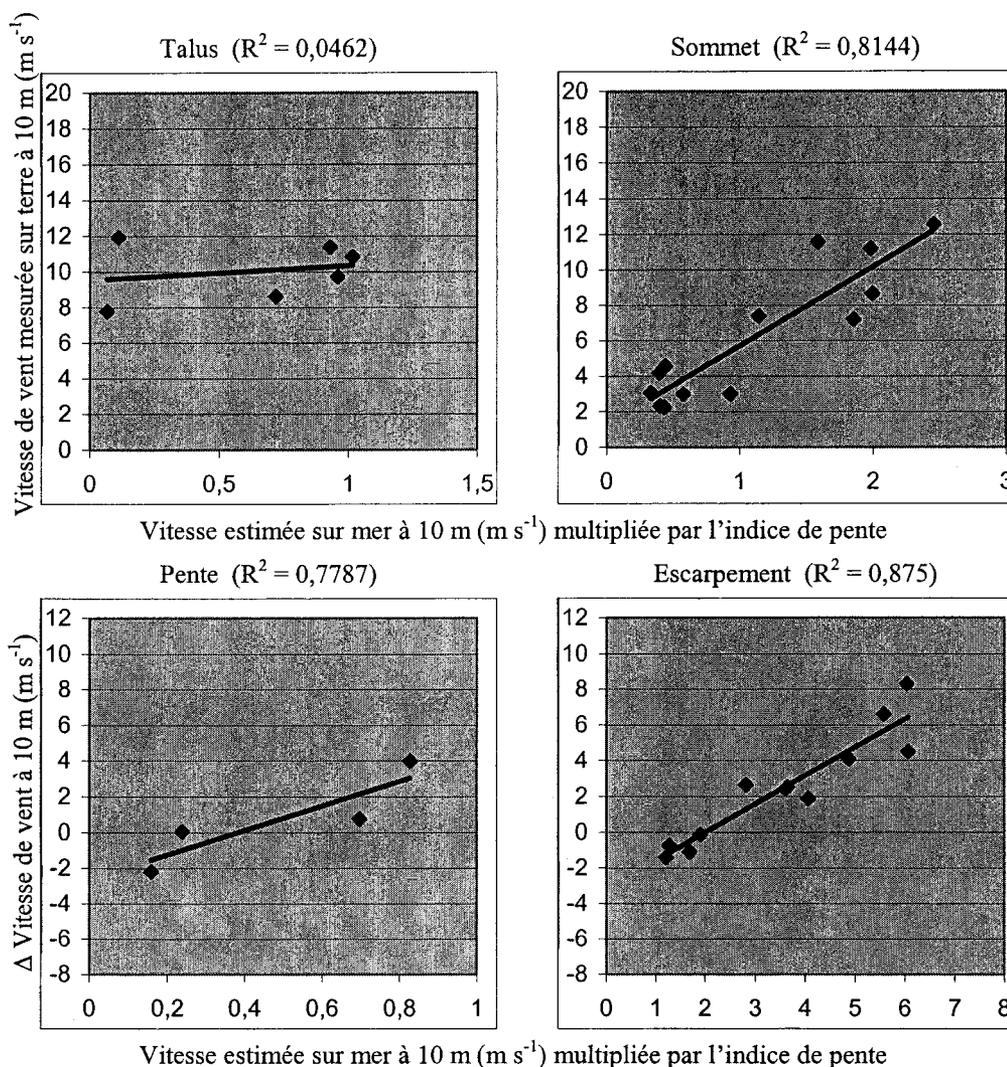


Figure 4.8 – Régressions linéaires résultantes lorsqu'un indice de pente (élev./dist.) est ajouté aux quatre situations de vents de mer.

4.5.2 Vents de terre

Pour les situations de vents de terre, seulement trois classes orographiques sont représentées (Talus, Sommet et Escarpement). Il est intéressant de constater que les vents sont moins forts pour cette direction (Figure 4.9), ce qui est confirmé par la rose des vents. Par ailleurs, ces vents plus faibles présentent deux points pénalisant pour nos

études de corrélation : 1) les vents faibles sont généralement de direction variable, 2) le modèle RSO est moins performant dans cette gamme de vent. Cela dit, on tire tout de même quelques conclusions.

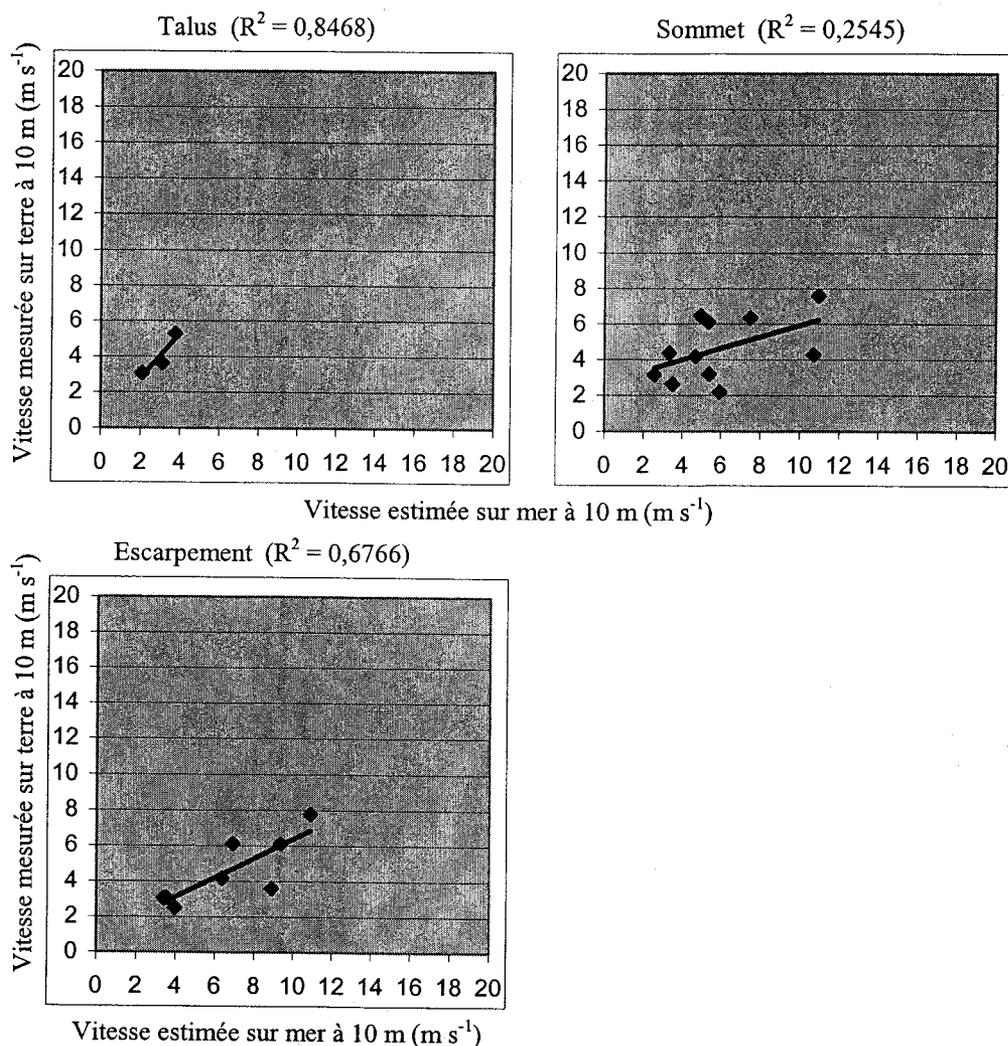


Figure 4.9 – Régressions linéaires entre la vitesse du vent de surface en mer et la vitesse du vent de surface sur terre pour les trois situations de vent de terre.

Tout comme pour les vents de mer, on améliore la corrélation en séparant l'échantillon en classes orographiques (à l'exception du cas de la classe « Sommet »). Cependant, la classe « Sommet » donne de meilleurs résultats lorsqu'on compare les données sur mer avec la différence entre les vitesses (Figure 4.10). Dans ce cas, le gain de vitesse de vent

de la terre vers la mer est plus important, laissant croire que la rugosité au sommet de ces montagnes est plus importante créant ainsi une résistance aux vents. L'augmentation des vitesses de vent augmente la turbulence au sommet due à la rugosité de la surface, alors que sur mer, la rugosité est presque nulle. Ainsi, plus les vitesses en mer (à 1km de la côte) sont élevées, plus l'écart entre les mesures mer/terre est grand. Cependant, d'après notre échantillon, si les vents sont de faible intensité ($< 5 \text{ m s}^{-1}$), il est très probable que les vents en mer soient plus faibles que ceux sur terre. Ce dernier constat est difficilement explicable puisque la friction est plus importante sur terre. À ce sujet, on pourrait se poser la question suivante : Serait-il possible que, pour des vitesses de vent faibles, la distance nécessaire pour atteindre les conditions maritimes soit plus grande (donc supérieure à 1 km) ?

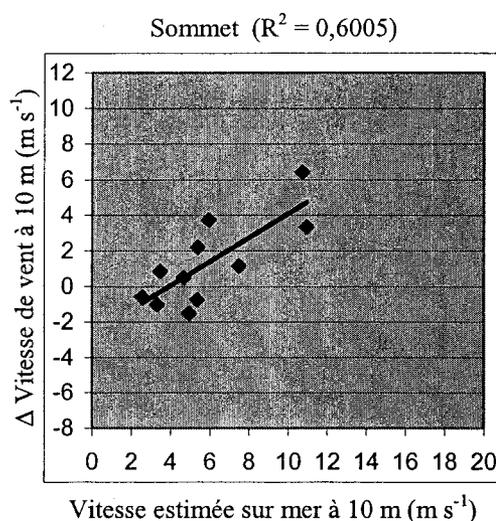


Figure 4.10 – Régressions linéaires entre la vitesse en mer et la différence entre les vitesses (vitesse de surface en mer moins la vitesse de surface sur terre) pour la classe « Sommet ».

Pour la classe « Sommet », qui possède le coefficient de détermination le moins intéressant, il est possible de mettre de côté le site de Pointe-St-Pierre. Lorsqu'on isole les données attribuées à ce site et qu'on illustre la régression linéaire entre celles-ci, on remarque qu'il n'y a pas de tendance perceptible. Il est possible que l'instrumentation utilisée ait été défectueuse. De plus, il est intéressant de noter qu'il s'agit d'un site du MRN qui a été étudié par la firme Enviromet International Inc. (2003). Cette étude a soulevé un nombre important de possibilités d'erreurs causées par le manque de

calibrage, la présence de glace ou l'usure de l'anémomètre. Les auteurs recommandent d'ailleurs de porter une attention particulière à ces données. C'est pour ces raisons que ces quatre points sont mis de côté de manière à améliorer notre corrélation (Figure 4.11).

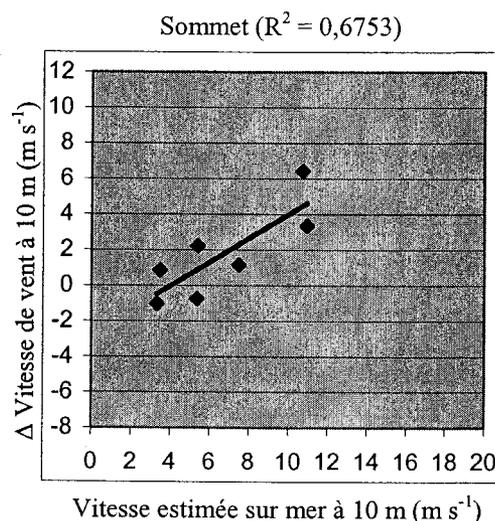


Figure 4.11 – Amélioration de la corrélation pour les vents de terre de la classe « Sommet » (en mettant de côté le site de Pointe-St-Pierre).

Pour tenter d'améliorer les résultats, nous avons distingué les sites en intégrant l'indice de pente. Cette fois, nous n'avons remarqué aucune amélioration. Ainsi, pour les situations de vents de terre, la distribution des vitesses de vent ne semble pas être influencée par la pente de la zone côtière.

4.5.3 Vents parallèles

Les situations de vents parallèles sont celles que l'on rencontre le plus souvent au nord de la péninsule gaspésienne. En effet, l'important canal créé par la présence du fleuve Saint-Laurent réoriente les déplacements d'air de façon à ce qu'ils soient alignés à la côte. Tout comme pour les autres situations, nous avons regroupé les données selon le type d'orographie. Pour l'ensemble des classes, on note une amélioration de la corrélation (Figure 4.12). Pour deux des quatre classes, les vents obtenus en mer expliquent mieux la différence entre les vitesses. Il s'agit des milieux d' « Escarpement » et de « Sommet » (Figure 4.13) qui sont, encore une fois, les classes présentant la plus importante perte de

vitesse. Par leur forme, ces deux types d'orographies sont plus susceptibles de réorienter les vents de forte intensité provoquant une augmentation de la vitesse. Ainsi, plus les vitesses de vent seront élevées, plus l'écart entre les données sera grand.

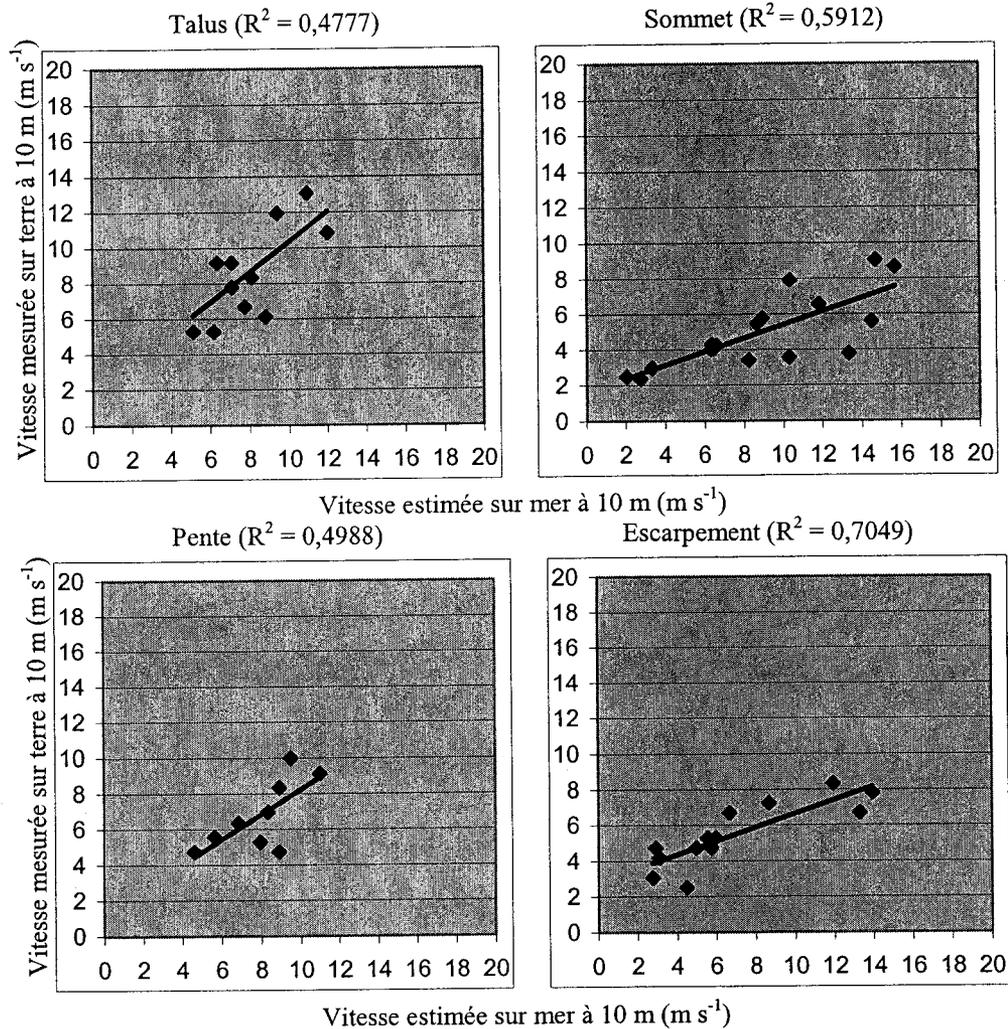


Figure 4.12 – Régressions linéaires entre la vitesse du vent de surface en mer et la vitesse du vent de surface sur terre pour les quatre situations de vents parallèles.

Pour les classes « Pente » ou « Talus », il semble plus adéquat d'expliquer directement la vitesse sur terre à partir de la donnée obtenue en mer malgré le fait que la corrélation soit faible (Figure 4.12).

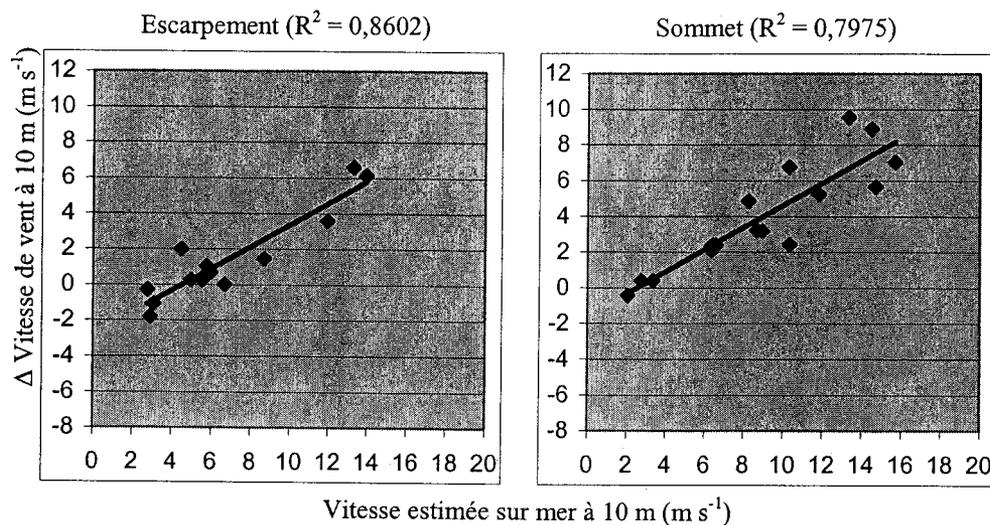


Figure 4.13 – Régressions linéaires entre la vitesse en mer et la différence entre les vitesses (vitesse de surface en mer moins la vitesse de surface sur terre) pour deux situations de vents parallèles : « Escarpement » (gauche) et « Sommet » (droite).

Tout comme pour certaines situations de vent de mer, l'intégration d'un facteur de pente permet d'améliorer la corrélation pour deux classes. Les classes « Sommet » et « Pente » sont celles qui voient leur coefficient de détermination augmenter par l'ajout d'un facteur de correction associé à la pente (Figure 4.14). Ainsi, dans le cas des sites installés sur une pente ou bien au sommet d'une montagne ou d'une colline, la vitesse des vents sur terre par rapport à la vitesse en mer serait de l'ordre de Z_a/Z_d .

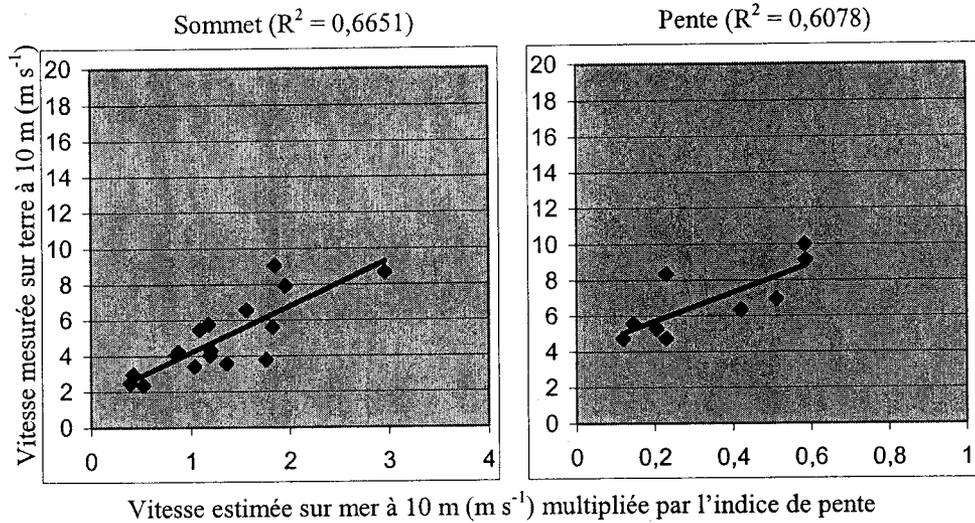


Figure 4.14 – Régressions linéaires résultantes lorsqu'un indice de pente (élev./dist.) est ajouté à deux situations de vents parallèles : « Sommet » (gauche) et « Pente » (droite).

Après avoir évalué l'impact de l'orographie du milieu, il est important d'analyser le rôle de la rugosité de surface. La section suivante présente les analyses effectuées.

4.6 Évaluation de la variable rugosité

Le calcul d'un facteur de correction représentant la rugosité du sol est inspiré de l'Atlas Éolien Européen (Troen et Petersen, 1991). Avant tout, les valeurs de rugosité (obtenues selon la méthode décrite au chapitre 3), ont été pondérées selon trois périodes annuelles partant du moment où le frottement est le plus important (jusqu'à celui où il est le moindre) : (1) la période de verdure; (2) la période sans feuilles et sans herbes; (3) la période de neige au sol. Les périodes ont été déterminées à partir de la date d'acquisition des 57 images RADARSAT-1.

Une fois qu'on a défini les longueurs de rugosité de part et d'autre de la discontinuité pour chacun des sites, on doit définir la distance (x) qui sépare le site terrestre du site marin et la hauteur (h) de la couche limite interne sous le vent de la discontinuité de rugosité. La valeur de x est obtenue à partir des cartes topographiques et la valeur de h est estimée à partir d'un graphe illustrant l'équation suivante :

$$h/z_0 (\ln h/z_0 - 1) = 0,9 x/z_0 \quad (4.2)$$

où la valeur de z_0 est la longueur de rugosité la plus élevée entre les deux milieux.

Pour les situations où la valeur de h est inférieure à la hauteur de la mesure (mesure à 10 m de hauteur pour ce cas), les valeurs de vitesse de vent ne sont pas influencées par le changement de rugosité. Au-dessus de cette hauteur le terrain devrait être perçu comme homogène. Pour les autres situations, un facteur de correction est calculé d'après la formule suivante :

$$\text{Cor} = [\ln(z/z_0) \ln(h/z_0)] / [\ln(z/z_0) \ln(h/z_0)] \quad (4.3)$$

où z est la hauteur de la mesure, z_0 est la longueur de rugosité en mer (établie à 0,0002 m) et z_0 est la longueur de rugosité qui a été attribuée au site terrestre. Lors d'un changement dans la rugosité du sol, la vitesse du vent à cet endroit correspond à la vitesse avant la discontinuité corrigée par un facteur Cor (< 1 dans notre cas).

Les sites de Cap-d'Espoir, Cap-Madeleine et Cap-Chat sont trois milieux où la hauteur de l'instrumentation de mesure est supérieure à la hauteur où la perturbation causée par le changement de rugosité est perceptible. Ainsi la classe « Escarpement » qui est exclusivement composée de deux de ces mâts est mise de côté pour cette analyse.

4.6.1 Vents de mer

Le facteur de correction, tel que décrit plus haut, a été intégré à la valeur en abscisse (vitesse en mer) pour distinguer les sites selon la rugosité du milieu. Le comportement graphique de cette manipulation nous permet d'analyser l'impact de cette variable sur la distribution des vents.

En multipliant ce facteur à nos données en mer, le graphique de la classe « Talus » présente une légère amélioration de la corrélation et la classe « Sommet » semble être la plus influencée par le changement de rugosité (Figure 4.15). C'est d'ailleurs les sites de cette classe (Sommet) qui présentent la discontinuité la plus marquée. De plus, pour cette

classe, la distinction faite à partir de la rugosité donne un meilleur résultat que celui obtenu par l'indice de pente.

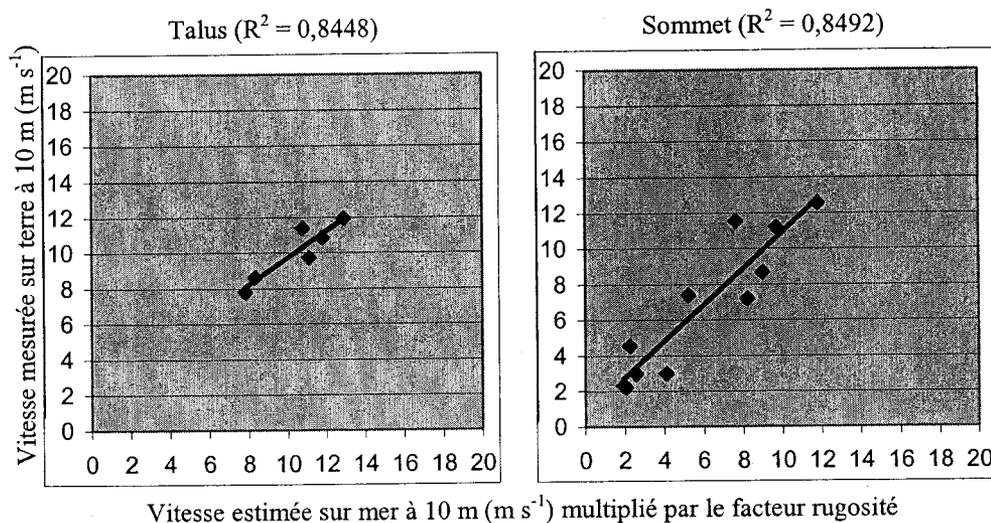


Figure 4.15 – Régressions linéaires résultantes lorsqu'un facteur de correction illustrant la rugosité est ajouté pour deux situations de vent de mer : « Talus » (droite) et « Sommet » (gauche).

4.6.2 Vents de terre

Pour des conditions de vent provenant de la terre, nous avons remarqué que le facteur de rugosité avait plus d'impact lorsqu'il était divisé à la vitesse estimée en mer (plutôt que multiplié). Tout comme pour les vents de mer, les classes « Talus » et « Sommet » sont affectées par l'occupation du sol (Figure 4.16).

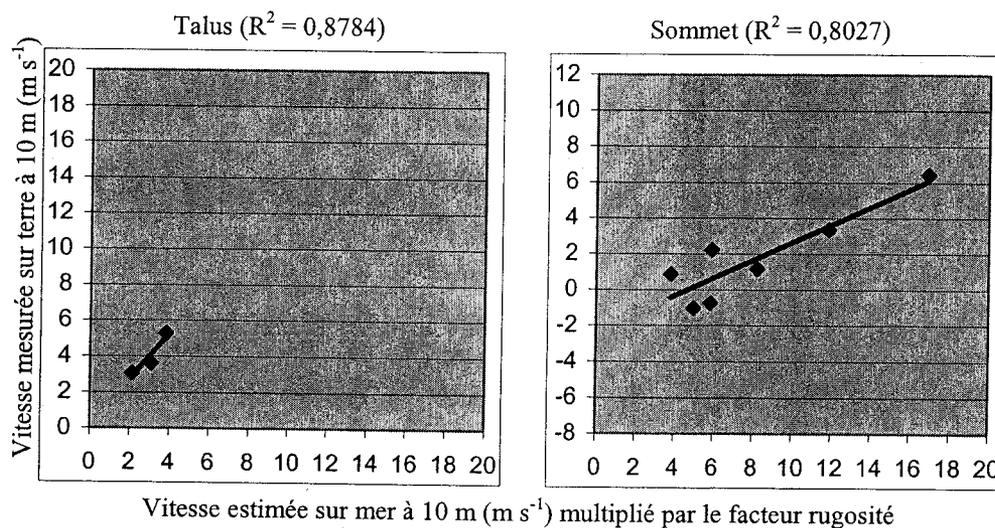


Figure 4.16 – Régressions linéaires résultantes lorsqu'un facteur de correction illustrant la rugosité est ajouté pour deux situations de vent de terre : « Talus » (droite) et « Sommet » (gauche).

4.6.3 Vents parallèles

Pour ce qui est des vents parallèles, nous n'avons remarqué aucune sensibilité à la rugosité du milieu. Les situations de vent parallèle semblent être celles où les vents sur terre sont les plus difficiles à expliquer à partir des mesures sur mer. En effet, les vents enregistrés circulent dans deux milieux distincts : milieu marin et milieu terrestre. La zone de transition (côtière) devrait donc être inexistante.

4.7 Évaluation de la variable température

Comme il a été décrit au chapitre trois, la forte présence de nuages le long de la côte a limité considérablement la quantité de données accessible pour l'analyse de cette variable. Le graphique suivant (Figure 4.17) illustre la différence entre les mesures par rapport au gradient de température pour l'ensemble des données recueillies. Il n'est pas possible d'identifier une tendance claire. Pour y arriver, les données auraient dû être regroupées en fonction de la distance par rapport à la ligne côte, de l'élévation par rapport au niveau de la mer ou de la direction du vent. L'échantillon restreint a limité l'évaluation de l'impact de cette variable sur le régime de vent. Il serait intéressant, dans une étude

ultérieure, de trouver une nouvelle méthode afin d'obtenir une mesure de la température à la surface de la mer qui soit co-localisée dans le temps et dans l'espace avec les mesures terrestres.

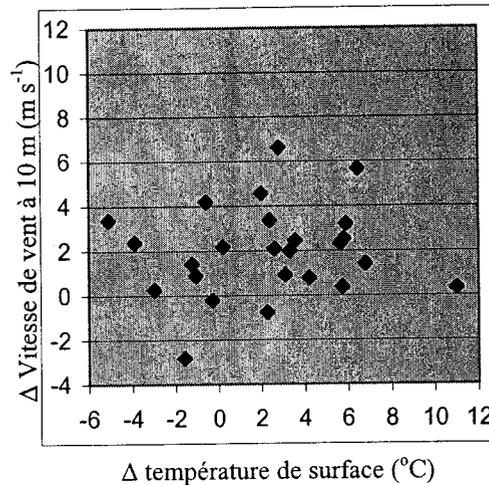


Figure 4.17 – Comparaison de la différence entre les vitesses (vitesse de surface en mer moins la vitesse de surface sur terre) et le gradient de température mer/terre.

Pour conclure, ces analyses démontrent qu'il est difficile de paramétrer les facteurs pouvant avoir un impact sur la distribution des vents. Chaque site possède des caractéristiques distinctes susceptibles de modifier la vitesse et la direction du vent. De plus, l'impact des facteurs n'est pas constant. Le rôle des différents facteurs dépend surtout de la classe de vent (en fonction de la vitesse), de la direction du vent et de l'environnement orographique du site. Finalement, et c'est le principal point faible de cette étude, les échantillons sont trop petits pour faire une régression multi-variables. La rugosité et la température sont des variables qui doivent être mises en parallèle avec la topographie pour expliquer les différences de vents entre la mer et la terre. Sans compter que la direction est un paramètre important. Le nombre de données analysées est nettement insuffisant.

4.8 Équations d'extrapolation du vent

Tel que mentionné au chapitre 1, la méthode RSO pour l'estimation du potentiel éolien n'a pas pour but d'estimer le vent terrestre à la façon des postes de mesure. Il s'agit plutôt d'une technique dédiée à l'étude des vents « offshore » ou d'une information complémentaire à l'évaluation du potentiel sur la côte. Subséquemment, nos conclusions sont les mêmes que celles de la firme Hélimax Énergie Inc. (2003) parmi lesquelles ils mentionnent que le trop grand nombre d'images nécessaires à la cartographie des vitesses moyennes rendent les prévisions éoliennes presque impossibles en utilisant exclusivement cette méthode. Notre approche est donc de spécifier les zones d'intérêts.

Étant donné le faible nombre de données et les erreurs relatives aux différentes mesures, cette étude ne proposera pas un modèle d'extrapolation du vent en zone côtière. Elle propose plutôt une méthodologie et une évaluation des tendances relevées avec cet échantillon restreint. Tout de même, le tableau 4.3 donne une liste d'équations obtenues suite aux analyses décrites dans cette section.

Tableau 4-3 : Présentation des équations dégagées de l'analyse pour extrapoler les données d'après les résultats obtenus pour les vitesses de vent supérieures à 2 m s⁻¹, les conditions de vent stationnaires et pour les périodes sans glaces (U_t est le vent de surface (à 10 m) sur terre; U_m est le vent de surface (à 10 m) sur mer; Cor est le facteur de correction lié à la longueur de rugosité; P est le facteur de pente)

Direction du vent	Classe	Équation résultante	R ²
Vents de mer	Sommet	$U_t = 1,0215 * (U_m * Cor) + 0,7015$	0,89
	Escarpement	$U_t = -1,5802 * (U_m * P) + 3,1631 + U_m$	
	Talus	$U_t = 0,7569 * (U_m * Cor) + 2,1311$	
	Pente	$U_t = 0,2108 * U_m + 7,2749$	
Vents de terre	Sommet	$U_t = -0,4964 * (U_m / Cor) + 2,3388 + U_m$	0,67
	Escarpement	$U_t = 0,5395 * U_m + 0,9603$	
	Talus	$U_t = 1,2639 * (U_m / Cor) + 0,168$	
Vents parallèles	Sommet	$U_t = 2,5875 * (U_m * P) + 1,5962$	0,73
	Escarpement	$U_t = 0,3838 * U_m + 2,8145$	
	Talus	$U_t = 0,854 * U_m + 1,7894$	
	Pente	$U_t = 8,0846 * (U_m * P) + 4,0579$	

À partir de ces 11 équations, nous avons extrapolé sur terre les mesures obtenues par la méthode RSO en mer. Nous avons ensuite comparé ces données à celles enregistrées par les mâts de mesures terrestres (Figure 4.18). Avec un R^2 de 0,83, on voit bien que la séparation en classes et l'ajout d'indices de rugosité ou de pente permettent d'améliorer l'explication des mesures terrestres. En effet, au départ nous avions un R^2 de 0,52.

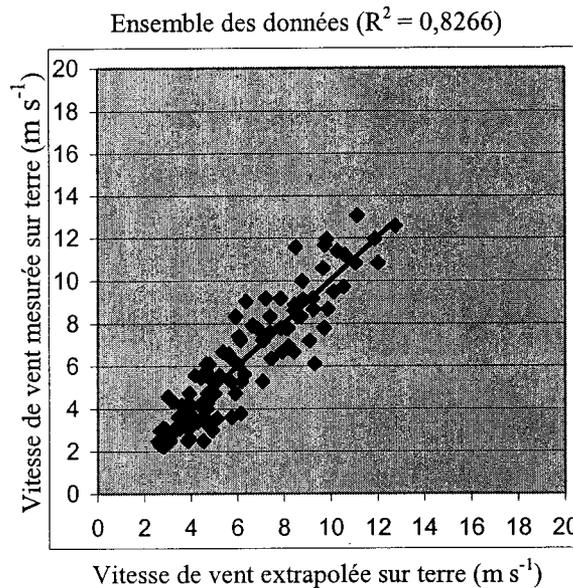


Figure 4.18 – Régression linéaire entre la vitesse du vent mesurée à 10 mètres sur terre et la vitesse du vent extrapolée à partir des estimées en mer par RSO.

Tableau 4-4 : Comparaison des vitesses de vent mesurées à 10 mètres sur terre et les vitesses de vent extrapolées à partir des estimées en mer par RSO.

Station	nb données	RMSE ($m s^{-1}$)	Biais ($m s^{-1}$)	Corrélation	R^2
Total	105	1,16	nul	0,91	0,83

4.9 L'extrapolation du vent

Pour terminer cette section d'analyses et de résultats, l'organigramme suivant (Figure 4.19) résume les étapes réalisées dans le cadre de cette étude. Il propose une méthodologie pour l'extrapolation du vent en milieu terrestre (côtier) à partir des vitesses extraites par imagerie radar sur le plan d'eau.

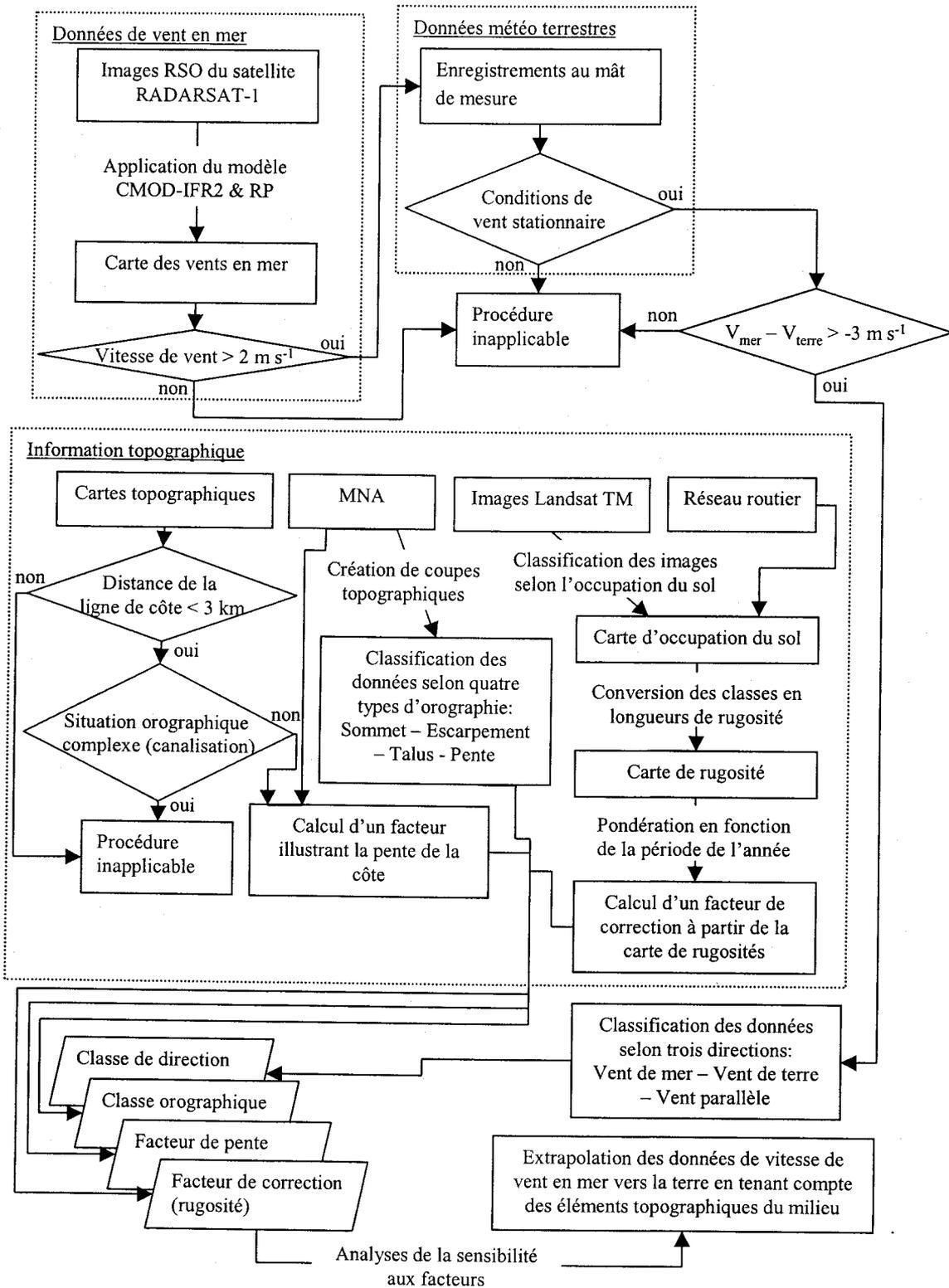


Figure 4.19 – Organigramme des étapes devant être réalisées pour extrapoler sur terre les mesures obtenues par la méthode RSO en mer.

5 CONCLUSIONS

L'explication des vitesses de vent sur terre à partir des données obtenues en mer grâce à des relations statistiques simples est une tâche complexe. Le principal but de ce mémoire était d'explorer une méthodologie pour l'extrapolation du vent en milieu terrestre (côtier) à partir des vitesses extraites par imagerie radar (RSO de RADARSAT-1) sur le plan d'eau. Ce travail a été réalisé dans l'optique qu'une telle méthodologie permettrait d'obtenir une information pertinente sur le potentiel éolien en milieu côtier où la puissance des vents est reconnue comme étant très intéressante. Ces données issues de la modélisation prometteuse qui estime les vitesses de vent sur un large territoire à partir d'imagerie radar pourraient être complémentaires à celles obtenues par les méthodes plus classiques ; comme les réseaux de stations météorologiques, les SODAR et les LIDAR (pour spécifier les zones d'intérêts et non pour les remplacer). De plus, elle permettrait de comparer la cartographie des vents par la méthode RSO aux données *in situ* pour des fins de validation.

Lorsque le vent traverse la ligne de côte, il passe d'un régime de type marin à un régime de type terrestre ou vice-versa. La discontinuité entre ces deux milieux est très marquée pour plusieurs éléments qui ont un impact important sur le régime de vent. Par conséquent, ce travail a d'abord permis l'identification des facteurs influençant la vitesse et/ou la direction du vent. Premièrement, l'analyse de l'impact du changement de régime (terre/mer) nécessite essentiellement la distinction de trois directions de vent : vents provenant de la mer, vents provenant de la terre et vents parallèles à la côte. Deuxièmement, le gradient de température entre la surface terrestre et la surface de l'eau peut modifier de façon significative le flux (direction et vitesse) de vent en zone côtière à cause des phénomènes de brise de mer et de brise de terre. Troisièmement, l'orographie du milieu peut provoquer une augmentation de la vitesse par compression des masses d'air, un ralentissement de la vitesse par effet d'obstacle ou une déviation du vent par canalisation. Quatrièmement, la surface du terrain et les obstacles au sol ont pour effet commun de conduire à un ralentissement du vent au voisinage du sol.

Notons que le golfe du Saint-Laurent, la région concernée par ce travail, avec son relief montagneux, est sans doute le milieu le plus accidenté du Québec rendant l'analyse du vent plus complexe. Cependant, cette région est reconnue pour son excellent potentiel éolien. L'étude repose sur un jeu de 57 images RSO du satellite RADARSAT-1 (couvrant chacune une partie de ce territoire) en plus des données météorologiques enregistrées par 11 mâts de mesure situés à moins de trois kilomètres de la ligne de côte.

La procédure méthodologique retenue pour illustrer les facteurs démontre les possibilités des systèmes d'information géographiques pour la manipulation de données à références spatiales. Ce mémoire propose des sources de données qui sont très utiles pour l'évaluation de la ressource éolienne au Québec et même au Canada (MNA, images des satellites Landsat, images AVHRR des satellites NOAA, données vectorielles du réseau routier canadien, stations de mesure d'Environnement Canada et du Ministère des Ressources Naturelles). De plus, une description détaillée des traitements et calculs effectués à partir des données géographiques sert d'indication pour paramétrer les différents facteurs identifiés.

L'analyse des données a nécessité une manipulation exhaustive de notre échantillon de données afin de découvrir l'ensemble des possibilités. Ce processus a démontré que chaque site possède des caractéristiques distinctes qui sont susceptibles d'influencer la vitesse et/ou la direction du vent. Pour surmonter cette difficulté amplifiée par un manque de données, nous proposons de séparer l'échantillon en 12 classes tenant compte de la direction des vents et de la situation orographique.

Tout d'abord l'analyse a établi que la méthode d'estimation du vent à partir des images RSO de RADARSAT-1, en région côtière, donne une très bonne indication de la vitesse des vents à 10 m au-dessus du sol, et ce, malgré une précision estimée à $\pm 2 \text{ m s}^{-1}$ des données de vents obtenues à partir du modèle hybride (CMOD-IFR2 combiné au rapport de polarisation de Kirchhoff) (Vachon et Dobson, 2000). De plus, ce constat est réalisé malgré l'incompatibilité entre les données moyennées dans l'espace par la méthode RSO et les données moyennées dans le temps aux anémomètres (problème noté par Freilich et

Dunbar (1999), pour le diffusiomètre NSCAT1). Pour arriver à ce constat, nous avons comparé les données obtenues en mer aux données mesurées *in situ* pour les deux tours installées très près de la côte.

Ensuite, nous avons démontré qu'en séparant notre échantillon en classes déterminées par la direction des vents (vents de mer, vents de terre et vents parallèles) et par la situation orographique des sites (talus, escarpement, sommet et pente) on améliorerait la corrélation entre les données obtenues en mer par la méthode RSO et celles mesurées sur terre par les tours de mesure. Toujours dans le but d'améliorer nos corrélations, nous avons intégré à nos analyses un facteur variant selon la pente du milieu et un facteur sensible à la rugosité de la surface. De cette façon, nous étions en mesure d'identifier les facteurs qui avaient le plus d'impact pour chacune des classes. Les différentes classes ne réagissent pas toutes de la même façon aux indices. Ainsi, certaines classes sont influencées par la pente, d'autres par la rugosité alors que quelques-unes n'améliorent pas leur corrélation lorsque les facteurs sont ajoutés. À partir de ces observations, nous proposons une liste d'équations simples servant à extrapoler en milieu terrestre (côtier) les données de vitesses extraites par imagerie radar (RSO de RADARSAT-1) sur le plan d'eau.

Contrairement à notre hypothèse de départ où nous suggérions que le facteur ayant le plus d'impact sur le régime de vent serait la rugosité de la surface, nous avons remarqué que le facteur le plus important était plutôt l'orographie du milieu. Cependant, il est nécessaire de mentionner que le rôle de ces facteurs est modulé par la direction et la vitesse des vents étudiés. D'autre part, il est impossible pour nous d'évaluer l'impact du gradient de température. Cette conclusion fait suite à nos analyses incomplètes dues au manque de données de température à la surface du fleuve et du golfe du Saint-Laurent.

Puisqu'un des objectifs de cette étude était d'obtenir un outil de validation de l'approche RSO, nous sommes en mesure de faire quelques recommandations dans cette optique :

- Faire attention aux données utilisées pour les fins de comparaison en portant une attention à la direction du vent.

- Pour les conditions de vents parallèles à la côte, les déplacements d'air peuvent être accélérés en mer par la canalisation si les conditions orographiques et les vitesses de vent le permettent.
- Pour les conditions de vents de terre, les vitesses de vent sont généralement plus faibles.
- Vérifier que les données comparées sont prises dans des conditions de vent stationnaire puisque la co-localisation dans le temps n'est pas parfaite.
- S'assurer que les mesures *in situ* ne sont pas influencées par un effet de canalisation causé par l'orographie du site et éviter les tours de mesure situés trop loin de la côte.

Finalement, malgré un échantillon très restreint, nous sommes en mesure d'améliorer notre explication des données terrestres à partir des données marines en tenant compte de la discontinuité entre les milieux. Éventuellement, la liste des équations proposées devra être vérifiée avec un échantillon plus complet et une région différente pour ensuite les appliquer à l'étude des vents côtiers à partir des images RSO. À ce sujet, il est intéressant de mentionner que l'équipe des chercheurs Monique Bernier et Gaëtan Lafrance avec Philippe Beaucage élabore présentement un nouvel échantillon de cartes de vents pour la Baie d'Hudson et continue d'étoffer celui du golfe du Saint-Laurent.

Perspectives de recherche

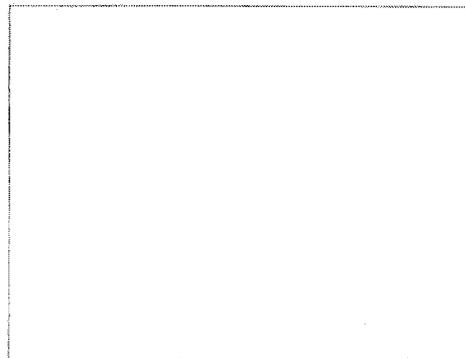
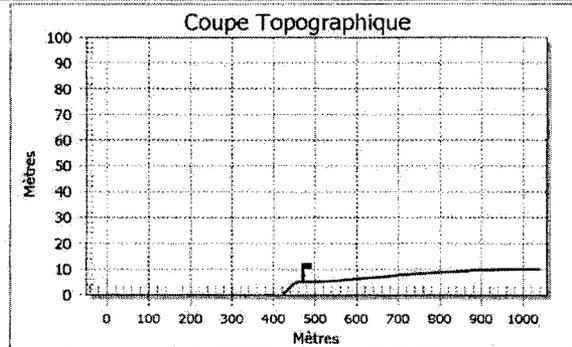
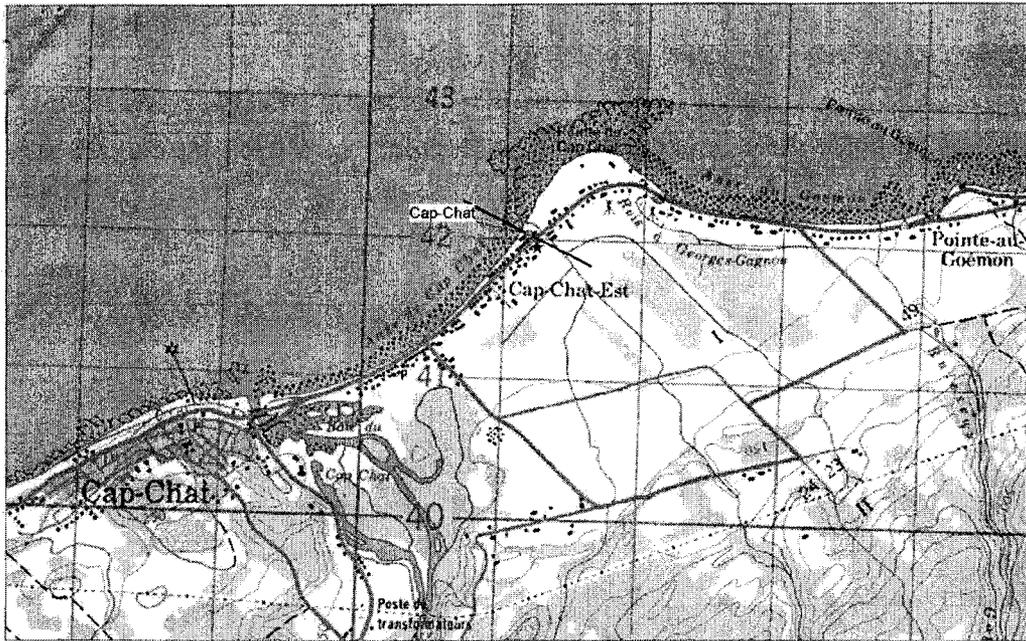
Afin d'obtenir une relation statistique simple qui permettrait l'extrapolation des données en milieu marin vers le milieu terrestre, il serait important d'envisager l'utilisation d'un plus grand nombre d'images RSO. De plus, il faudrait faire attention aux choix des sites d'étude pour s'assurer qu'ils sont tous représentatifs des facteurs qui doivent être étudiés. En fait, nous recommandons de procéder à l'installation d'instruments de mesure dédiés à ce type d'analyses. Les instruments actuels n'ont pas été installés essentiellement dans l'optique de la mesure du vent pour le cas des tours d'Environnement Canada et ils n'ont pas tous été calibrés et entretenus de façon adéquate pour celles du MRN. Ainsi, le choix des sites doit être stratégique. Il faudrait aussi proposer une méthode servant à paramétrer

la forme de la côte. Dans notre cas, nous avons simplifié l'approche en séparant l'échantillon d'après des classes orographiques.

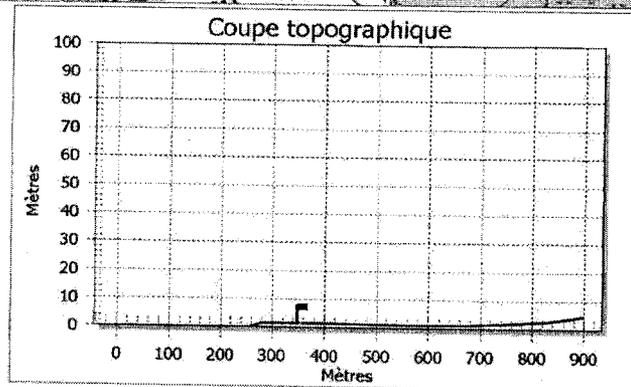
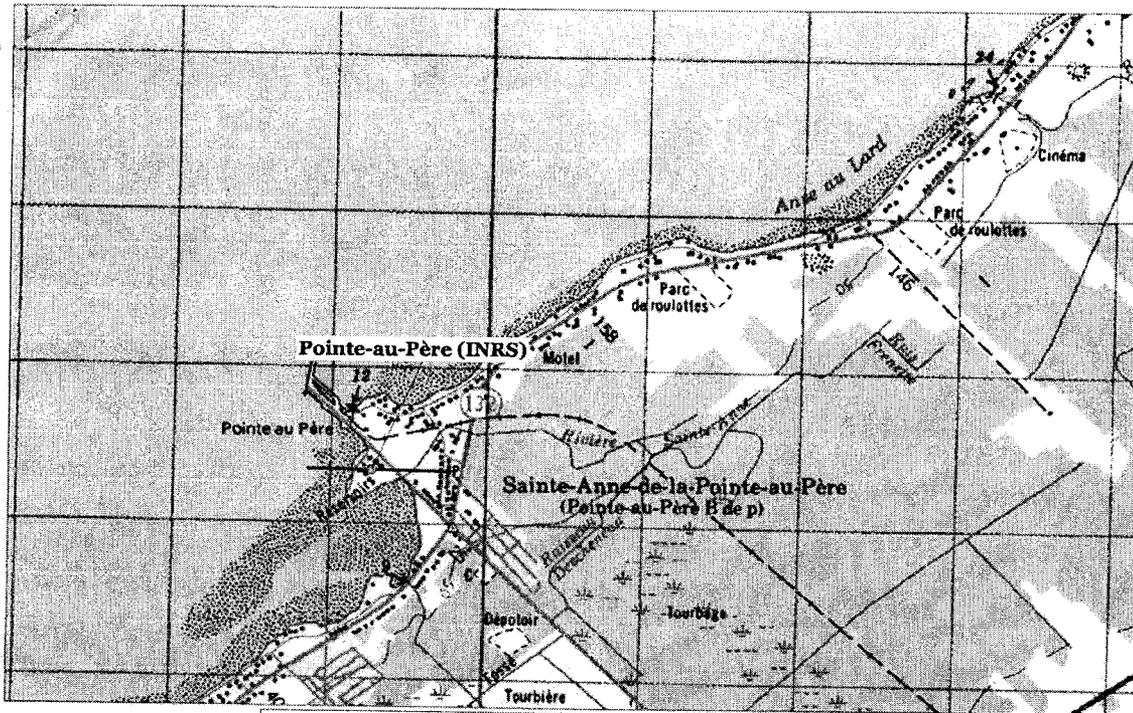
ANNEXE

COUPES TOPOGRAPHIQUES

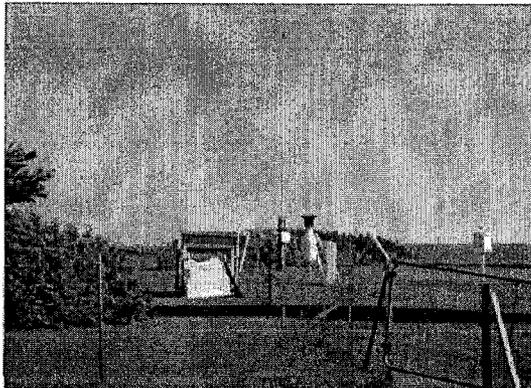
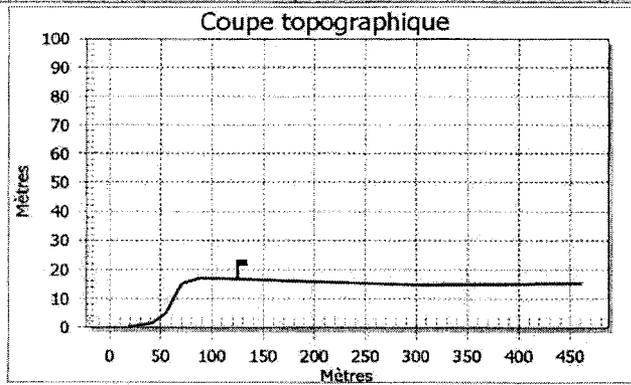
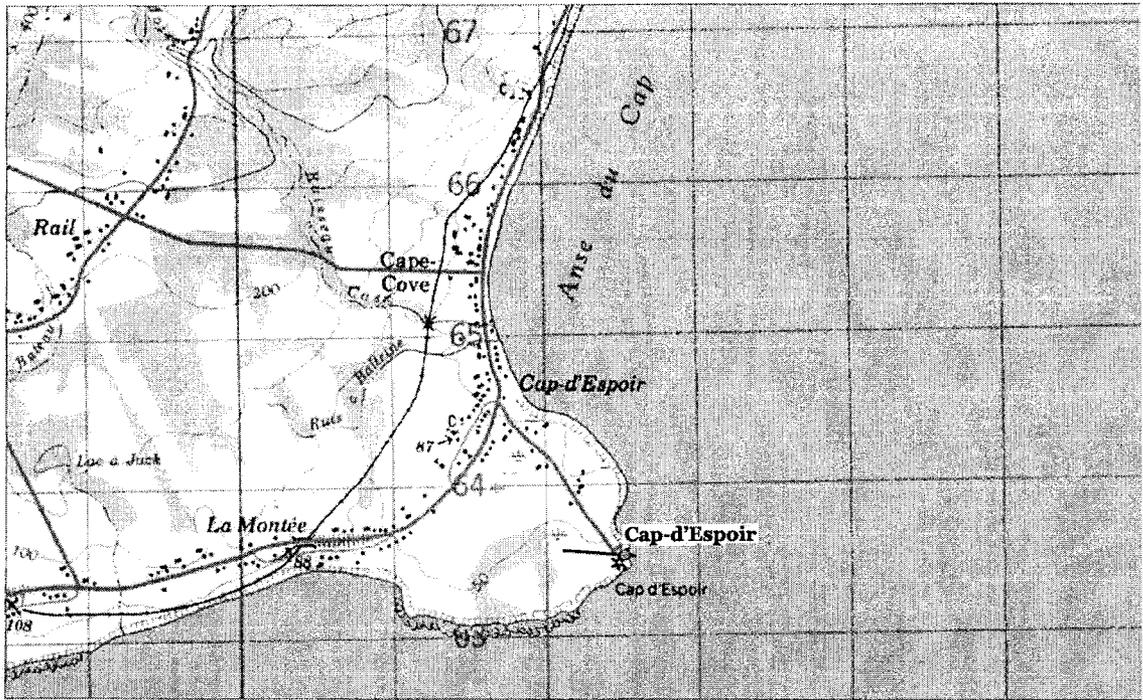
Classe Talus : mât Cap-Chat



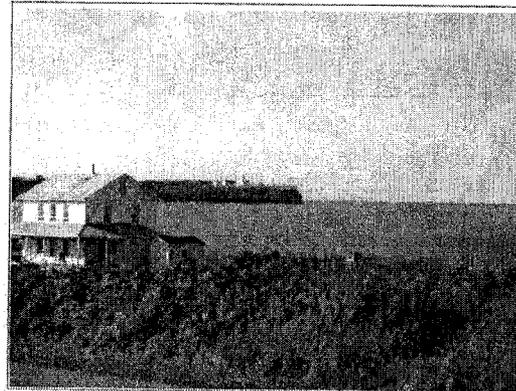
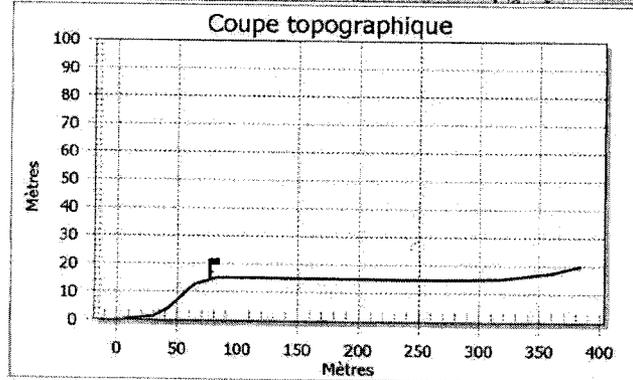
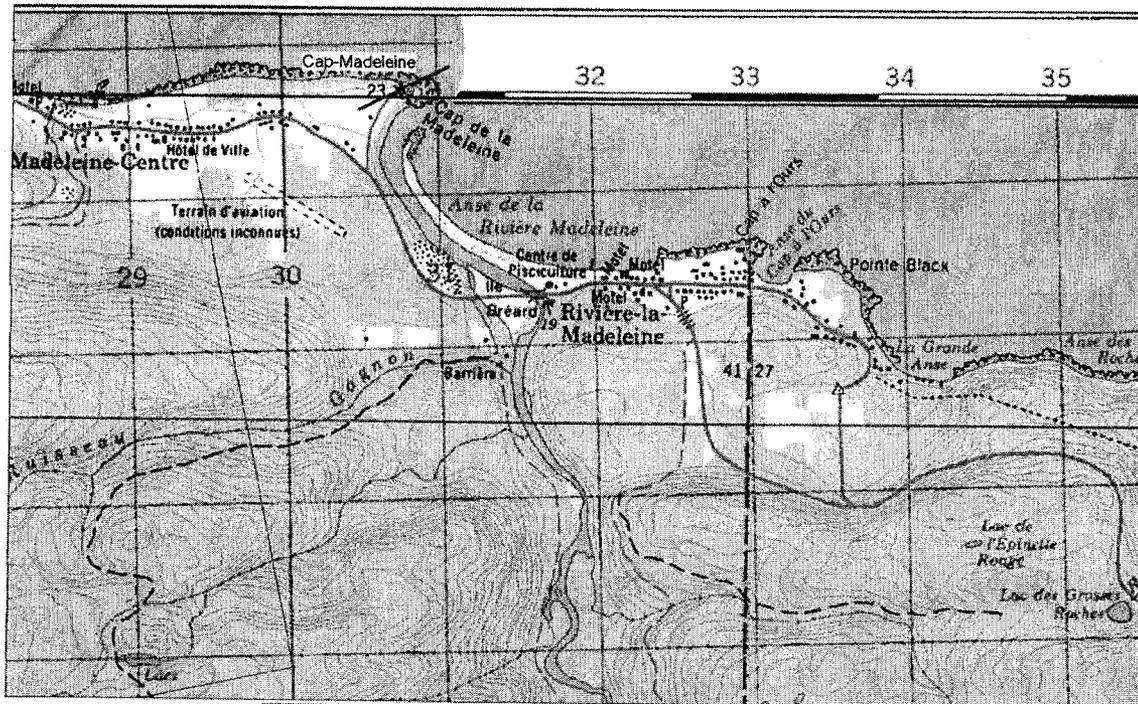
Classe Talus : **mât Pointe-au-Père (INRS)**



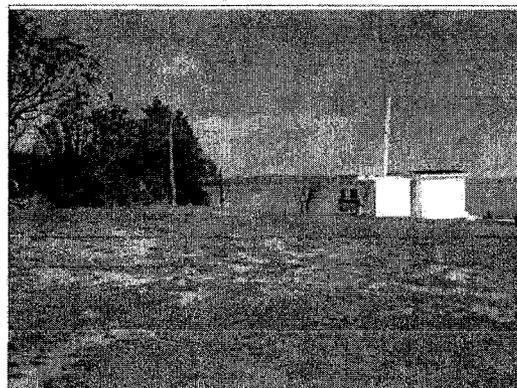
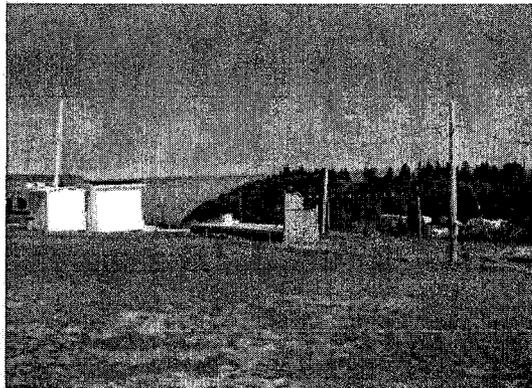
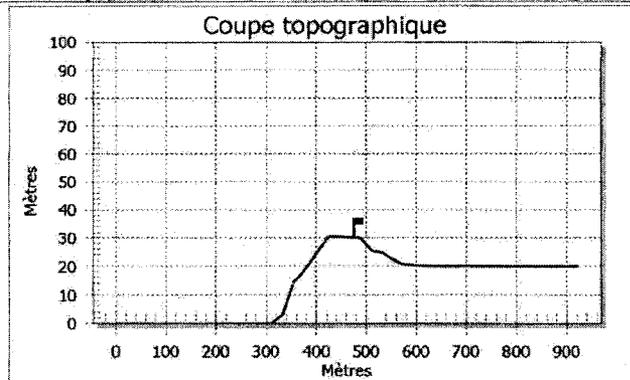
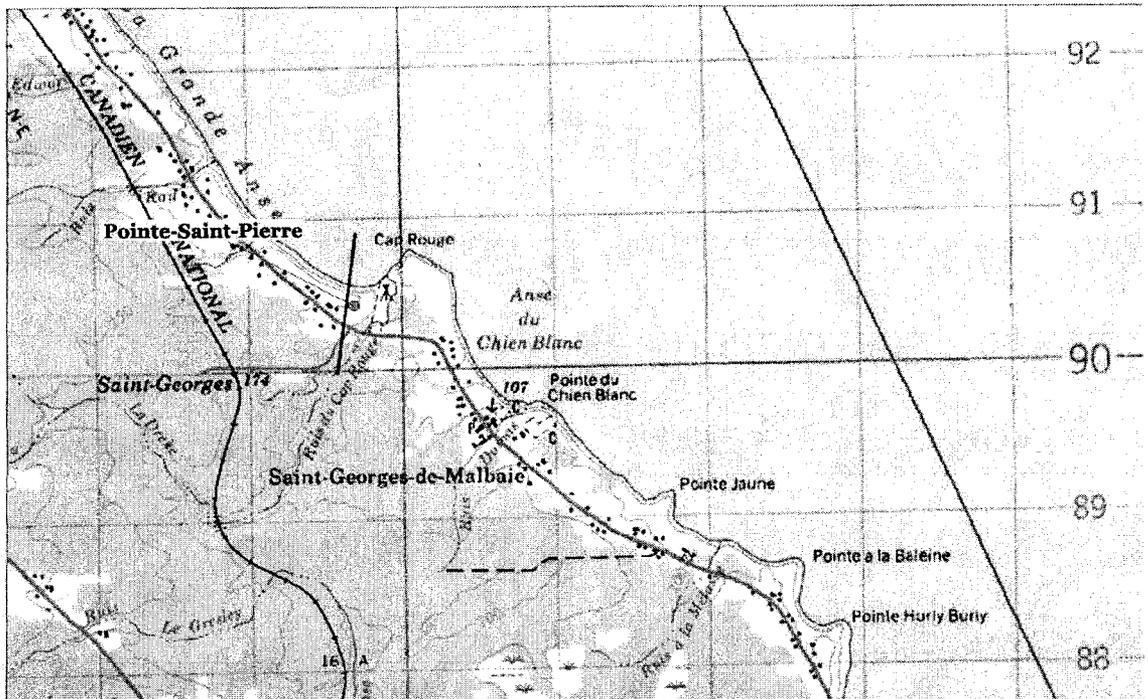
Classe Escarpement : **mât Cap-d'Espoir**



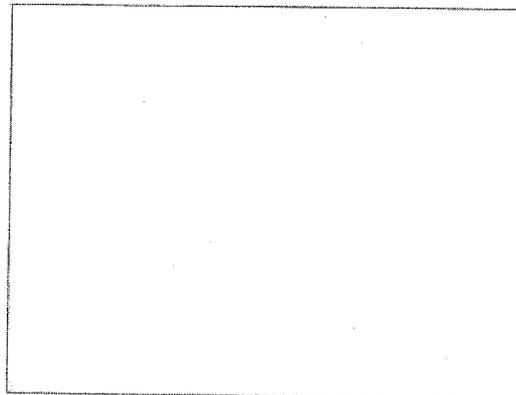
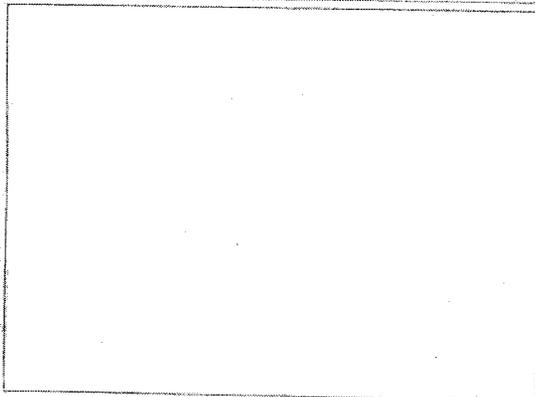
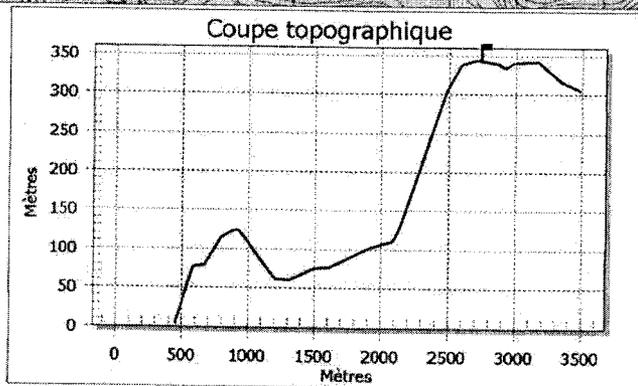
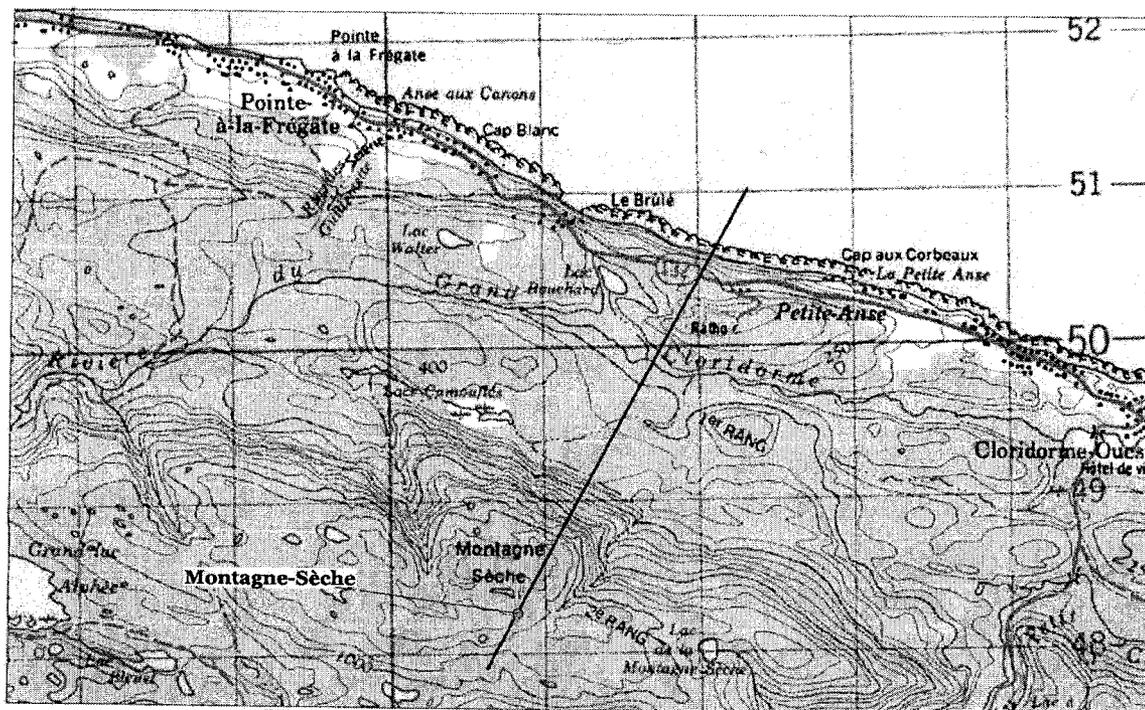
Classe Escarpement : mât Cap-Madeleine



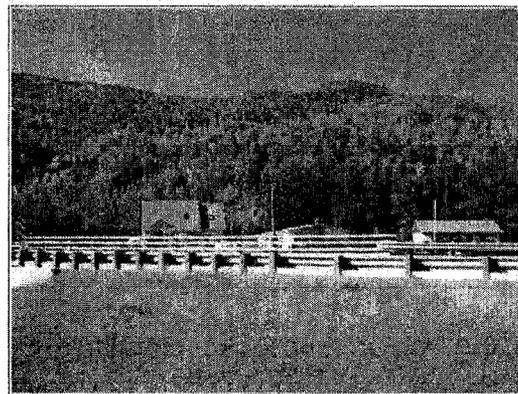
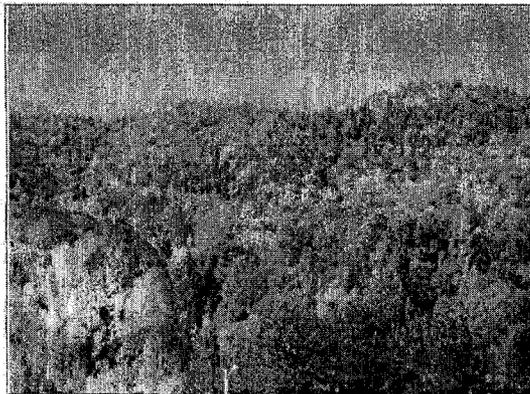
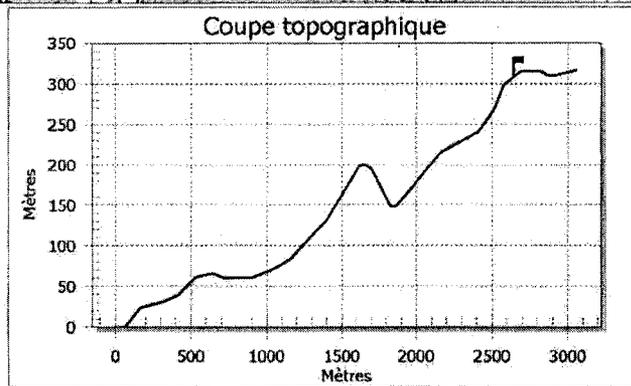
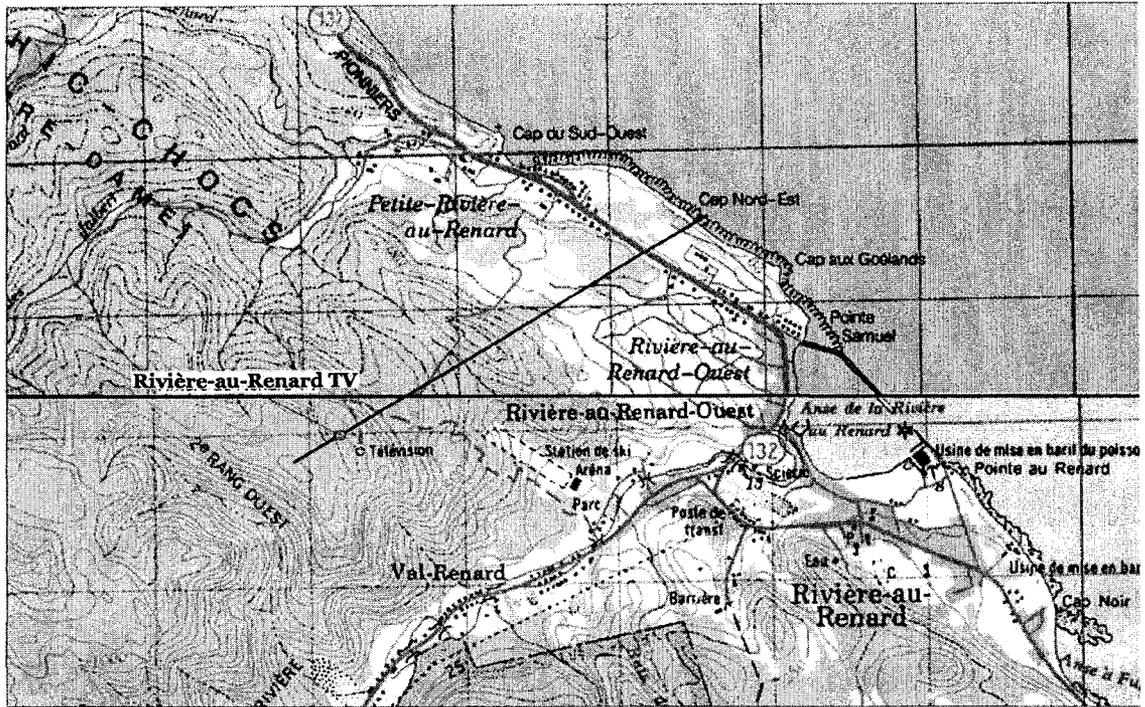
Classe Sommet : **mât Pointe-St-Pierre**



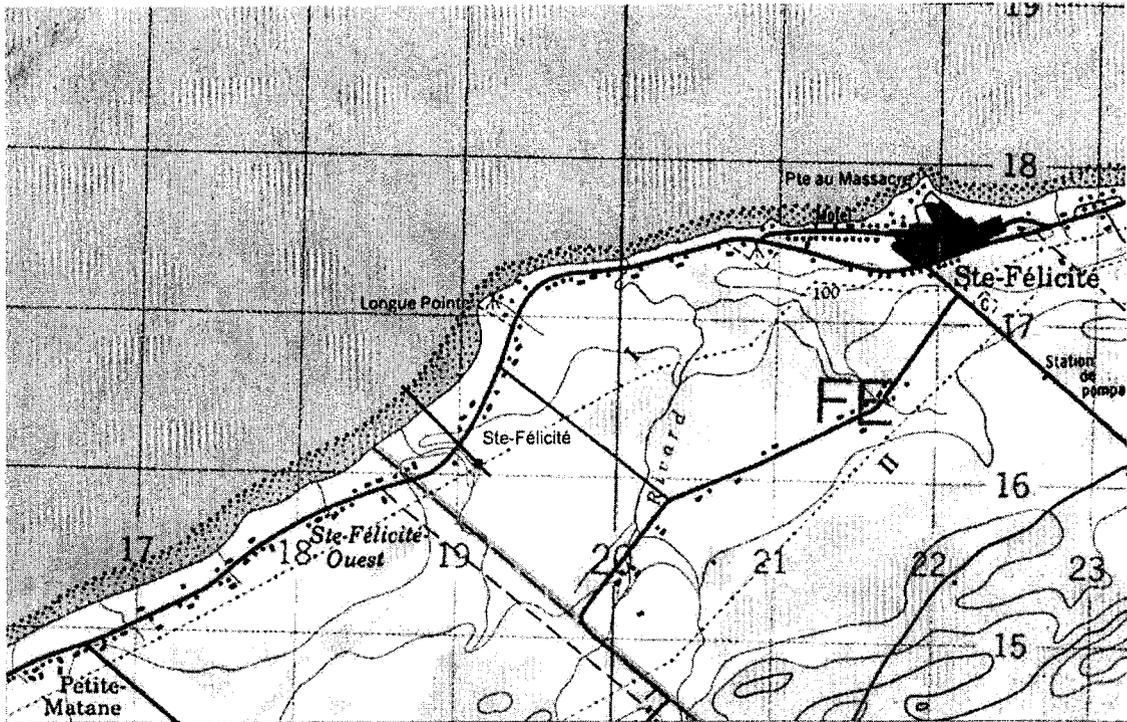
Classe Sommet : mât Montagne-Sèche



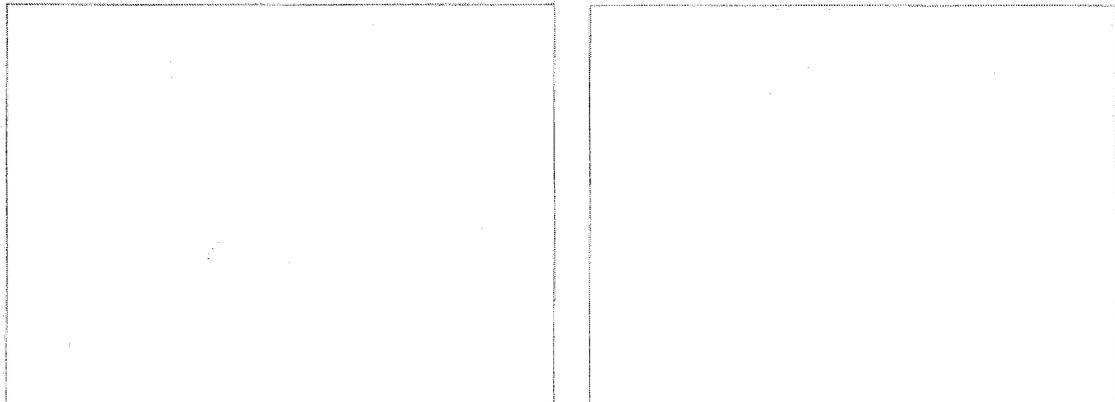
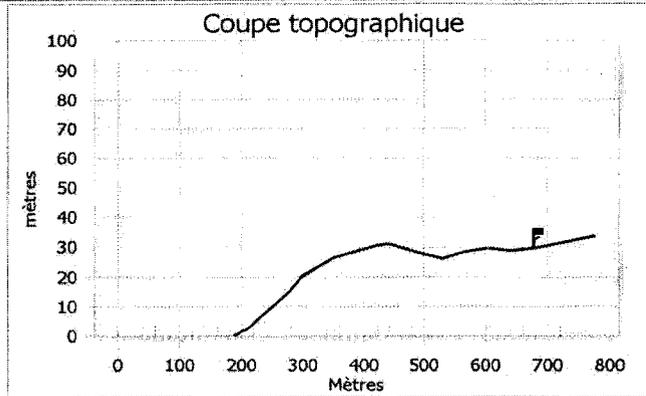
Classe Sommet : mât Rivière-au-Renard TV



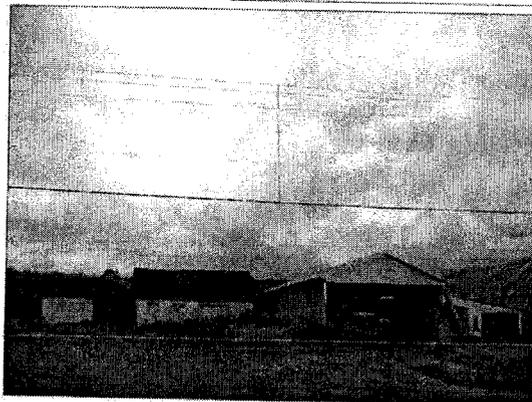
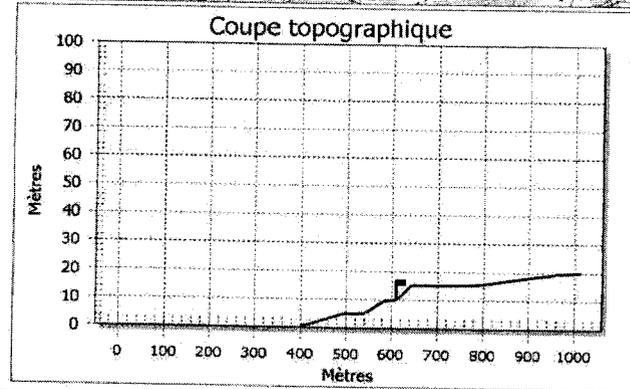
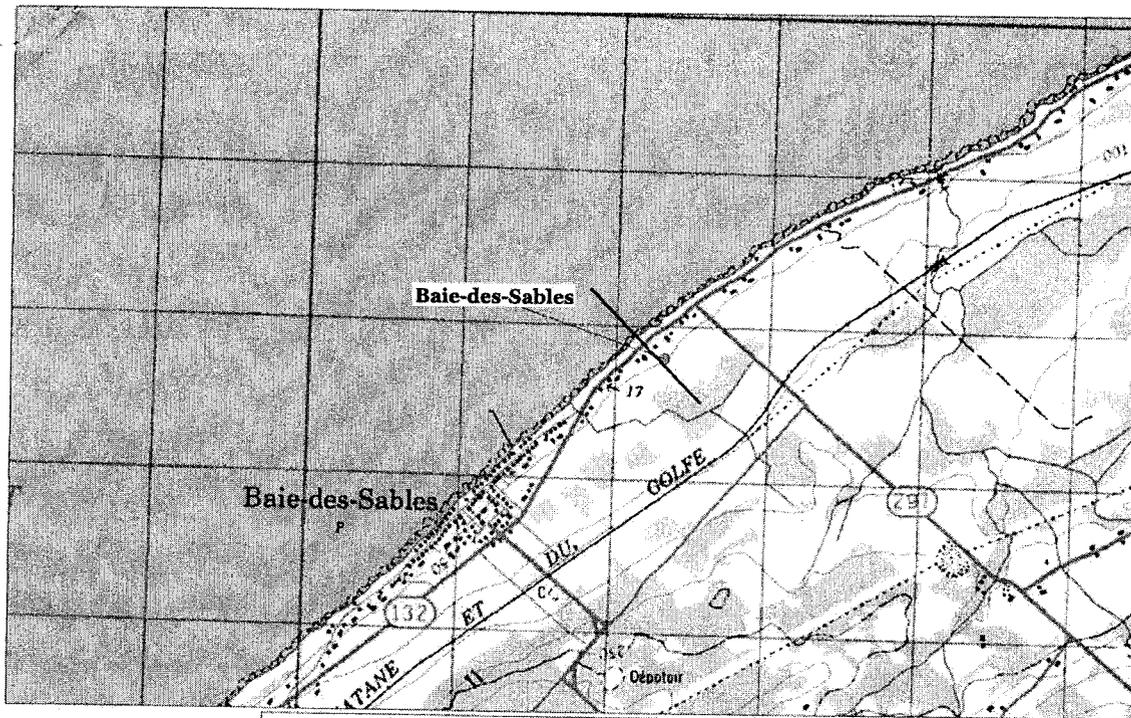
Classe Pente : mât Ste-Félicité



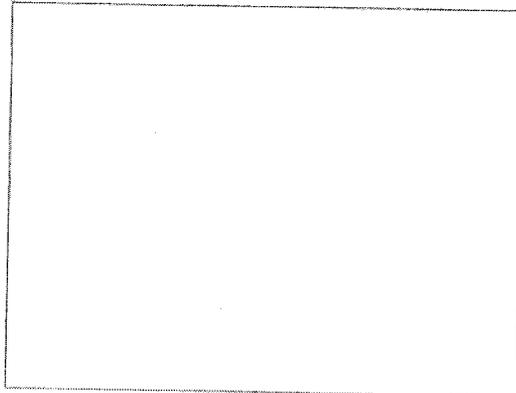
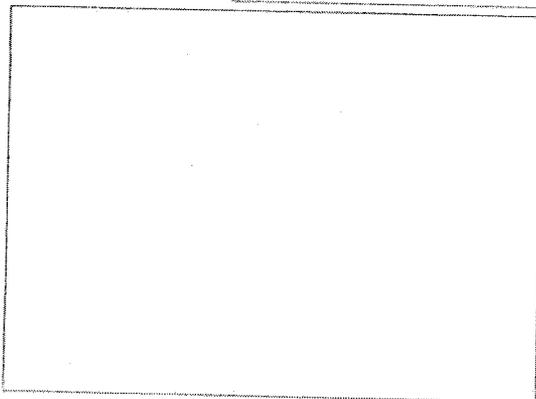
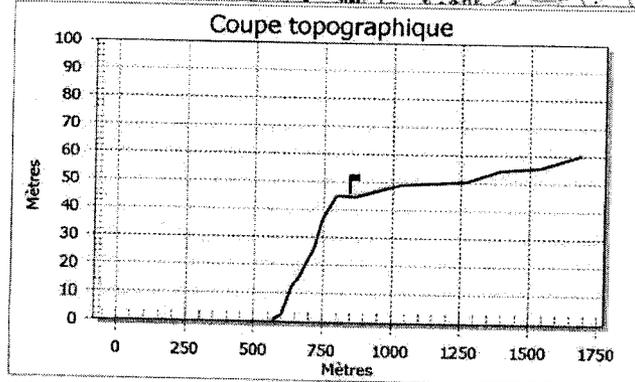
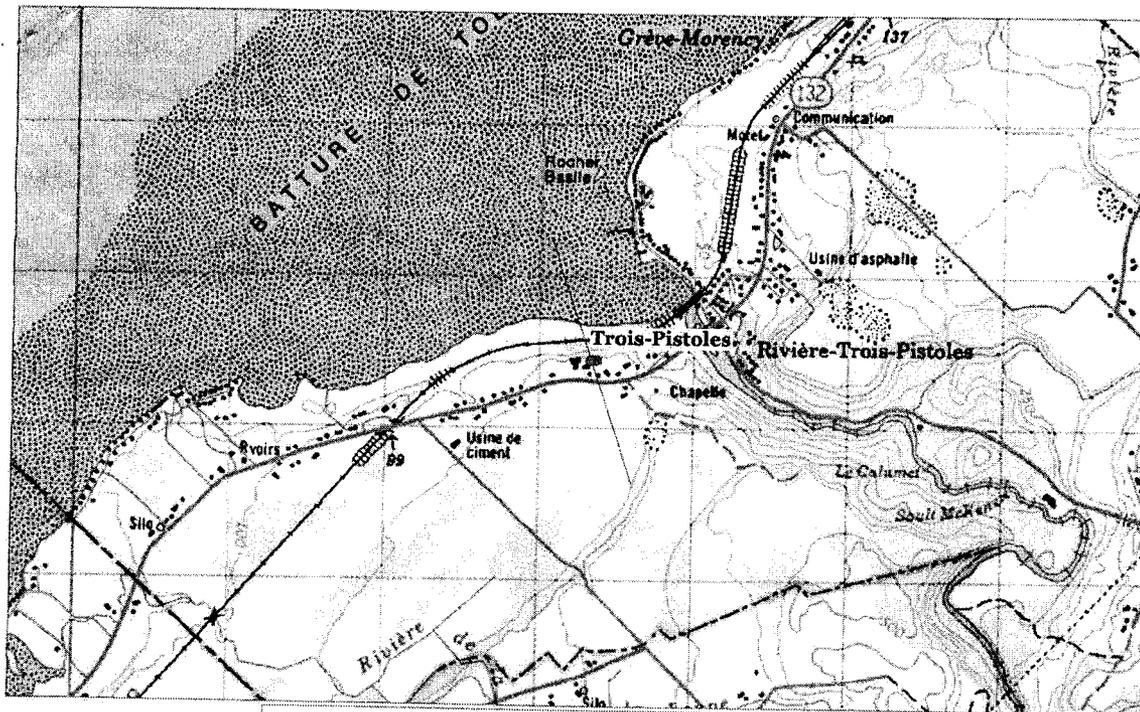
Coupe topographique



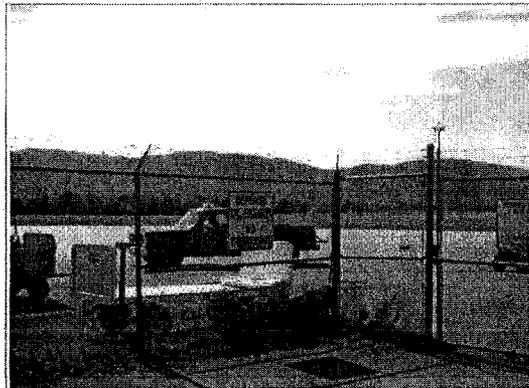
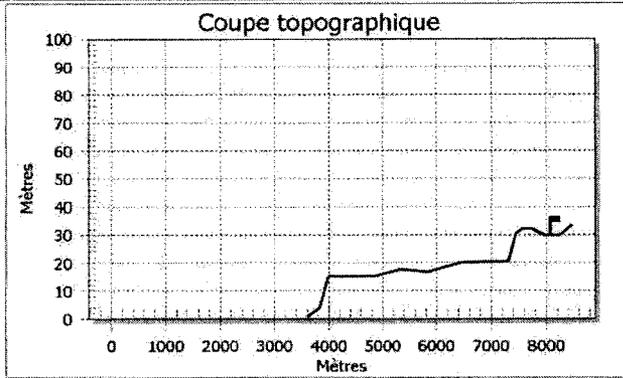
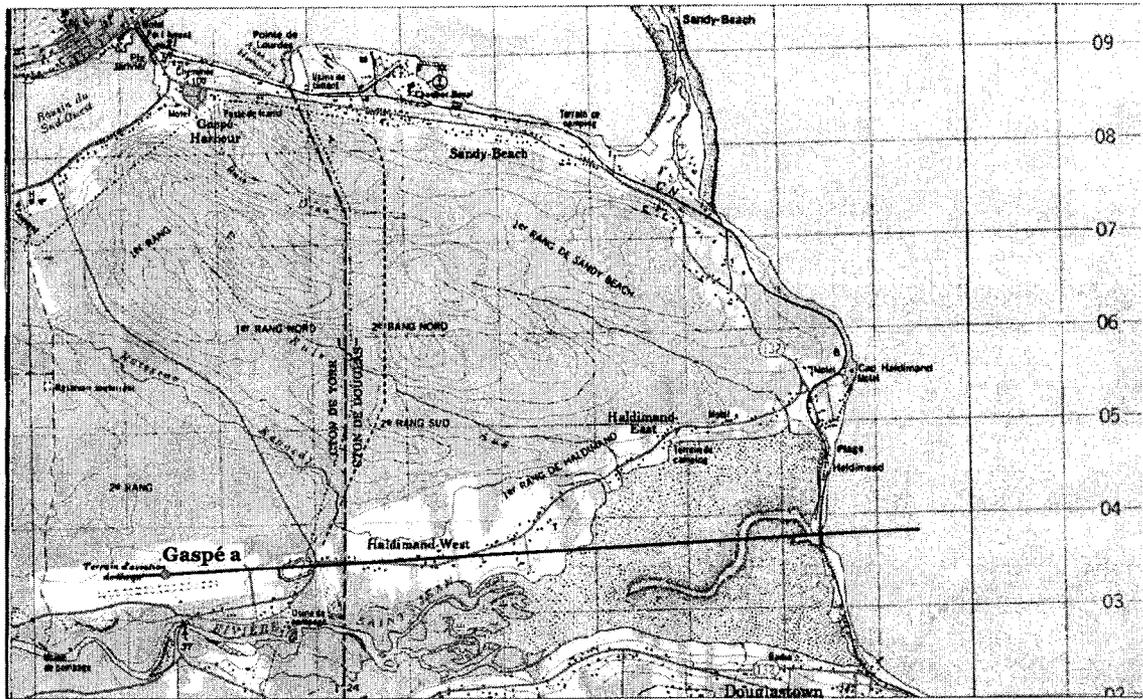
Classe Pente : **mât Baie-des-Sables**



Site rejeté : mât Trois-Pistoles



Site rejeté : mât Gaspé a



LISTE DES RÉFÉRENCES

ADEM-CLAROM, 2002. « État des lieux du développement de l'éolien offshore ». Document de cadrage, In Séminaire Éolienne Offshore (IFP, 21 novembre 2002), 8 p.

AHRENS, C.D., 1994. Meteorology today : an introduction to weather, climate and environment. Library of congress cataloging-in-publication data, St-Paul, 592 p.

AWS SCIENTIFIC, INC., 1997. « Wind resource assessment handbook, fundamentals for conducting a successful monitoring program ». Golden, CO.: National Renewable Energy Laboratory, 71 p.

AYOTTE, K.W. et D.E. HUGHES, 2004. « Observation of boundary-layer wind-tunnel flow over isolated ridges of varying steepness and roughness ». Boundary-Layer Meteorology, 112, pp. 525-556.

BONN, F. et G. ROCHON, 1996. Précis de télédétection, Volume 1 - Principes et méthodes. Sainte-Foy, Presse de l'université du Québec, 485 p.

BTM CONSULT APS., 2005. « International Wind Energy Development: Status by end of 2004 and Forecast 2005-2009 ». (7 selected slides which are part of the report on CD-ROM), Ringkøbing, DK. www.btm.dk

CALOZ, R. et C. COLLET, 2001. Précis de télédétection, Volume 3 - Système d'information géographique et de traitement numérique d'image. Sainte-Foy, Presse de l'Université du Québec, 386 p.

CENTRE D'INFORMATION TOPOGRAPHIQUE, 2003a. Données numériques d'élévation du Canada, niveau 1 - Spécifications de produit. Édition 01, Ressource Naturelle Canada, Sherbrooke, 25 p.

CENTRE D'INFORMATION TOPOGRAPHIQUE, 2003b. Imagerie Landsat 7 orthorectifiée du Canada, niveau 1 - Spécifications de produit. Édition 01, Ressource Naturelle Canada, Sherbrooke, 17 p.

CHOISNARD, J., 2004. « Cartographie du vent en région côtière par images RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) de RADARSAT-1: cas du golfe du Saint-Laurent ». Thèse de doctorat, Varennes, Université du Québec, INRS-EMT, 211 p.

CHOISNARD, J., M. BERNIER et G. LAFRANCE, 2004. « Cartographie des vents dans le golfe du Saint-Laurent à l'aide de l'imagerie RADARSAT-1 ». Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 30, no. 4, pp. 604-616.

- CHOISNARD, J., G. LAFRANCE et M. BERNIER, 2004. « SAR-satellite for offshore and coastal wind resource analysis, with examples from St-Lawrence Gulf, Canada ». Journal of Wind Engineering, vol. 28, no. 4, pp. 367-382.
- DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION, 2005. « 50% wind energy in the grid is feasible ». News overview: www.windpower.org/en/news051105.htm
- DUQUETTE, R. et E.P. LAUZON, 1996. Topométrie générale. 3^e édition, Montréal, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 652 p.
- FREILICH, M.H. et R.S. DUNBAR, 1999. « The accuracy of NSCAT1 vector winds: comparisons with NDBC buoys ». J. Geophys. Res. 104(C5), pp. 11231-11246.
- FUREVIK, B.R. et H. ESPEDAL, 2002. « Wind energy mapping using Synthetic Aperture Radar ». Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 28, no. 2, pp.196-204.
- GODARD, A. et M. TABEAUD, 1998. Les climats : Mécanismes et répartition. 2^e édition. Paris : Armand colin, 192 p.
- GOSELIN, A., 2005. Notes sur le traitement des fichiers HDF produits par la chaîne ctn1b. Version 1.0.1, Laboratoire de télédétection de l'IML, Mont-Joli, 11 p.
- HÉLIMAX ÉNERGIE INC., 2003. « Évaluation du potentiel éolien par images satellites ». Montréal, Projet 00-1401 : Agence Spatiale Canadienne, 166 p.
- HÉLIMAX ÉNERGIE INC., 2004. « Étude sur l'évaluation du potentiel éolien, de son prix de revient et des retombées économiques pouvant en découler au Québec ». Montréal, Dossier R-3526-2004 : Régie de l'Énergie du Québec, 79 p.
- HÉLIMAX ÉNERGIE INC., AWS TRUEWIND, LLC, 2005. « Inventaire du potentiel éolien exploitable du Québec ». Préparé pour : Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Montréal, 60 p.
- HENDERSEN, A. R., C. MORGAN, B. SMITH, H. C. SORENSEN, R. J. BARTHELMIE et B. BOESMANS, 2003. « Offshore wind energy in Europe – A review of the state-of-the-art ». Wind Energy, vol. 6, no. 1, pp. 35-52.
- HERFT, F. J., 1974. « Wind regimes in the St. Lawrence river valley ». Mémoire de maîtrise, dépt. de physique, Université de Toronto, Toronto, 152 p.
- HORSTMANN, J., W. KOCH, S. LEHNER et R. TONBOE, 2002. « Ocean winds from RADARSAT-1 ScanSAR ». Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 28, no. 3, pp. 524-533.

- JACKSON, P.S. et J.C.R. HUNT, 1975. « Turbulent wind flow over a low hill ». Quart. J. R. Met. Soc., 101, pp. 929-955.
- LANDBERG, L., L. MYLLERUP, O. RATHMANN, E.L. PETERSEN, B. H. JORGENSEN, J. BADGER et N. G. MORTENSEN, 2003. « Wind resource estimation – An overview ». Wind Energy, vol. 6, no. 3, pp. 261-271.
- LELIÈVRE, C. et D. DAFINOVA (Enviromet International inc.), 2003. « Validation des données météorologiques ». Montréal : Ministère des Ressources Naturelles, 34 p.
- LETTAU, H., 1969. « Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element distribution ». J. Appl. Met., 8, pp. 828-832.
- MASON, P.J., et R.I. SYKES, 1979. « Flow over an isolated hill of moderate slope ». Quart. J. R. Met. Soc., 105, pp. 383-395.
- MCCLAIN E.P., W.G. PICHEL et C.C. WALTON, 1985. « Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperature ». Journal of Geophysical Research, vol. 90, no. C6, pp.11,587-11,601.
- NATIONAL ACADEMY PRESS (éd.), 1992. Coastal meteorology : a review of the state of science. Washington, DC.: National Academy Press, 112 p.
- OUAIDRADI, H., S.N. GOWARD, K.P. CZAJKOWSKI, J.A. SOBRINO et E. VERMOTE, 2002. « Land surface temperature estimation from AVHRR thermal infrared measurements. An assesment for the AVHRR Land Pathfinder II data set ». Remote Sensing of Environnement, 81, pp. 114-128.
- PARENT, S., 1998. « Effet de la topographie côtière sur les vents de surface de l'estuaire maritime et du nord-ouest du Golfe du Saint-Laurent ». Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, 117 p.
- PCI Geomatics, 2004. « Signature separability » in ImageWorks Multispectral. <http://www.pcigeomatics.com/cgi-bin/pcihlp/CLWORKS|Signature+Separability>
- PETERSEN, E. L., N.G. MORTENSEN, L. LANDBERG, J. HOJSTRUP et H. P. FRANK, 1998a. « Wind power meteorology. Part I : Climate and Turbulence ». Wind Energy, vol. 1, no. 1, pp. 2-22.
- PETERSEN, E. L., N.G. MORTENSEN, L. LANDBERG, J. HOJSTRUP et H. P. FRANK, 1998a. « Wind power meteorology. Part II : Sitting and Models ». Wind Energy, vol. 1, no. 2, pp. 55-72.
- PINARD, J.-P., 1999. « Computer models for wind flow over mesoscale mountainous terrain applied to the Yukon ». EAS 521 – Final Report, University of Alberta, Department of earth and atmospheric sciences, 45 p.

QUILFEN, Y., B. CHAPRON, T. M. ELFOUHAILY, K. KATSAROS ET J. TOURNADRE, 1998. « Observation of tropical cyclones by high-resolution scatterometry ». Journal of Geophysical Research, Vol. 103, No. C4, pp. 7767-7786.

ROBERT, B. et W. YU, 2004. « Cartographie et analyse du gisement éolien du Québec par le système WEST ». Expertise pour le RRSE, Dorval, Dossier R-3526-2004 : Régie de l'Énergie du Québec, 22 p.

ROGERS, D.P., 1995. « Coastal meteorology ». Rev. Geophys., 33, pp. 889-896.

SHIMADA, T., et H. KAWAMURA, 2005. « Statistical compartmentalization of surface wind field over coastal seas using high-resolution SAR-derived winds ». Geophys. Res. Lett., 32, L05607, 4 p.

SMITH, R. B. 1989 « Hydrostatic airflow over mountains ». Advances in Geophysics, Academic Press, 31, pp. 1-41.

STOFFELEN, A. et D. L. T. ANDERSON, 1993. « Wind retrieval and ERS-1 scatterometer radar backscatter measurements ». Advanced Space Research, Vol. 13, No. 5, pp. 53-60.

SWAIL, V.R. et A.T. COX. 2000. « On the use of NCEP-NCAR reanalysis surface marine wind fields for a long-term North Atlantic wave hindcast ». Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 17, no. 4, pp. 532-545.

TAYLOR, P.A. et R.J. LEE, 1984. « Simple guidelines for estimating wind speed variations due to small scale topographic features ». Climatol. Bull., Vol. 18, No. 2, pp. 3-22.

TROEN, I. et E.L. PETERSEN, 1991. « Atlas éolien européen ». Laboratoire National Risø, Roskilde, 278 p.

VACHON, P.W. et F.W. DOBSON, 2000. « Wind retrieval from RADARSAT SAR images: selection suitable C-band HH polarization wind retrieval model ». Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 26, no. 4, pp. 306-313.

WIND ECONOMICS AND TECHNOLOGY INC et L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI, 1996 « Évaluation du potentiel éolien du Québec » Expertise pour Hydro-Québec et le Ministère des Ressources Naturelles du Québec, 55 p.