



HAL
open science

Apports du LiDAR à l'étude de la végétation des marais salés de la baie du Mont-Saint-Michel

Clélia Bilodeau

► **To cite this version:**

Clélia Bilodeau. Apports du LiDAR à l'étude de la végétation des marais salés de la baie du Mont-Saint-Michel. Géographie. Université Paris-Est, 2010. Français. NNT: 2010PEST1007. tel-00587416

HAL Id: tel-00587416

<https://theses.hal.science/tel-00587416>

Submitted on 20 Apr 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ PARIS-EST

**ÉCOLE DOCTORALE « Mathématiques, Sciences et Technologies de l'Information et
de la Communication »**

Thèse de doctorat

Sciences de l'Information Géographique

Clélia BILODEAU

**APPORTS DU LIDAR A L'ETUDE DE LA VEGETATION DES MARAIS SALES DE LA
BAIE DU MONT-SAINT-MICHEL**

***Thèse dirigée par* Benoît DEFFONTAINES et Jean-Paul DEROIN**

Soutenue le 14 décembre 2010

Président et rapporteur

Rapporteur

Examineurs

Invités

Fernand VERGER

Eric FEUNTEUN

Marianne COHEN

Olivier DE JOINVILLE

Alain RADUREAU

Michel GODRON

Résumé de la thèse

Les marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel forment un écosystème complexe et fragile dont la biodiversité est essentielle au maintien de la santé des côtes. Afin de mieux comprendre l'organisation spatiale de la végétation de ces marais et de développer une vision synthétique de la dynamique de ce milieu, des données de télédétection optiques (orthophotographie) et altimétrique (LiDAR), ainsi que des observations de terrain ont été réunies et traitées conjointement.

Le contrôle qualité des données LiDAR ayant mis en évidence un biais systématique dépendant de la hauteur et de la densité de la végétation, une correction, consistant à assigner à chaque pixel la valeur LIDAR minimale au sein d'un carré de 3x3 m, a été appliquée. Une importante base de données spatialisées a ensuite été constituée, comprenant la description en termes de végétation, d'altitude, de géomorphologie, de sédimentologie et d'utilisation agricole de près de 10 000 points d'observation répartis sur l'ensemble de la Baie. L'analyse s'est d'abord portée sur trois secteurs de la Baie, représentatifs de différents contextes en termes d'altitude, de géomorphologie, de sédiments et d'utilisation agricole, avant d'être élargie à l'ensemble de la Baie.

Des analyses fréquentielles ont permis de quantifier les liaisons entre les différentes espèces végétales, afin d'identifier les espèces ayant été rencontrées fréquemment ensemble, et de définir les associations végétales caractéristiques des marais salés. Cette méthode a également permis de dresser la liste exhaustive des liaisons statistiques entre toutes les espèces végétales de la Baie du Mont-Saint-Michel et quatre facteurs écologiques: l'altitude, la géomorphologie, le contexte sédimentaire et le pâturage. Les variations de l'altitude moyenne des espèces végétales à l'échelle de la Baie s'expliquent par l'existence d'une double pente hydraulique qui engendre des altitudes plus élevées à l'Est et à l'Ouest de la Baie. Le contexte géomorphologique et le pâturage peuvent également modifier les valeurs d'altitude moyenne des espèces végétales, et profondément perturber le schéma classique des marais salés, qui ne se retrouve que rarement dans la Baie.

La connaissance des liaisons entre les espèces végétales et les valeurs des facteurs écologiques peut constituer une aide importante à la cartographie des marais salés. Si un seul facteur ne suffit pas à déterminer le contenu floristique d'un secteur, la combinaison des facteurs altitude, géomorphologie, sédiment, pâturage et pente, peut être intégrée, en plus d'une image optique, dans un processus de classification automatique supervisée.

Mots clés : Marais salés, LiDAR, Baie du Mont-Saint-Michel, Analyse fréquentielle.

The use of LiDAR to study salt marshes vegetation in the Mont-Saint-Michel Bay (France)

In the Mont-Saint-Michel bay, the tidal salt marshes, also called schorre, are made up of low and dense vegetation, that is adapted to tidal flooding and high salinity, and that spreads quickly on the upper tidal flat. The study of this phenomenon requires a map of the vegetation and a simple way to update it. The aim of this study is to evaluate the potential of LiDAR data to enhance the comprehension of this ecosystem. The LiDAR data was first corrected from the systematic error due to the low vegetation that stops the laser beams before they reach the ground. A spatial data base was then created from 9811 observation points, including information on vegetation, altimetry, geomorphology, sedimentology and land use. Frequency analyses were performed on three locations characterized by different geomorphology, sedimentology and land use contexts, and in a second time at the scale of the entire Bay. The vegetation associations of the salt marsh were described, and the relations between each plant species and four ecological factors (altimetry, geomorphology, sedimentology and land use) were investigated. This study has shown the need to include in the mapping process of salt marsh vegetation LiDAR data as well as information on geomorphology, sedimentology and land use.

Keywords : Salt marsh, LiDAR data, Mont-Saint-Michel Bay, Frequency analysis.

Table des matières

Résumé de la thèse	2
Table des matières	4
Tables des figures	6
Tables des tableaux	11
Tables des diagrammes	16
1. Introduction	17
2. Contexte général.....	21
2.1. Histoire et paysages de la Baie du Mont-Saint-Michel.....	21
2.2. L'organisation spatiale de la végétation des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel 27	
2.2.1. Présentation générale des marais salés.....	27
2.2.2. Les facteurs écologiques influençant la présence des espèces végétales des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel.....	32
2.2.2.1. Les facteurs écologiques	32
2.2.2.2. Le climat.....	34
2.2.2.3. Les marées.....	35
2.2.2.4. Le contexte sédimentaire et géomorphologique.....	37
2.2.2.5. Les cours d'eau.....	40
2.2.2.6. Les facteurs biotiques.....	41
2.2.2.7. Les facteurs anthropiques.....	42
2.2.2.8. Synthèse	43
2.3. La télédétection et ses applications à l'étude des marais salés.....	44
2.3.1. Bases de la télédétection	44
2.3.2. Le LiDAR.....	46
2.3.2.1. Le Lidar, les LiDAR.....	46
2.3.2.2. Le principe du LiDAR.....	47
2.3.2.3. L'instrument LiDAR	47
2.3.2.4. Les données LiDAR	48
2.3.2.5. Les échos multiples et les différents types de LiDAR	48
2.3.2.6. L'acquisition de données LiDAR.....	50
2.3.3. Applications de la télédétection à l'étude des marais salés.....	50
3. Présentation des données et des méthodes	53
3.1. Les données brutes	53
3.1.1. Les données de végétation.....	53
3.1.1.1. Les transects	53
3.1.1.2. La carte de la végétation.....	57
3.1.2. Les données de télédétection.....	59
3.1.2.1. Les données optiques : l'orthophotographie	59
3.1.2.2. Les données altimétriques par LIDAR.....	59
3.1.3. Les autres données : topographie, sédiment et pâturage	61
3.1.3.1. Les données topographiques	61
3.1.3.2. Sédiments	62
3.1.3.3. Pâturage	63
3.2. Préparation des données et données dérivées.....	65
3.2.1. Contrôle qualité et correction de données LIDAR.....	65

3.2.1.1.	Principes du biais des données LIDAR dû à la présence de végétation...	65
3.2.1.2.	Structure de la végétation sur la zone du contrôle qualité du LiDAR.....	67
3.2.1.3.	Méthodes du contrôle qualité des données LIDAR	69
3.2.1.4.	Résultats du contrôle qualité des données LiDAR.....	72
3.2.1.5.	Discussion	76
3.2.2.	Les données de géomorphologie	80
3.2.3.	Le tableau des transects de végétation	82
3.3.	Présentation des méthodes utilisées	84
3.3.1.	Méthode générale	84
3.3.2.	L'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC).....	84
3.3.3.	L'analyse fréquentielle	85
4.	Traitements et résultats.....	88
4.1.	Etude de trois secteurs représentatifs de différents contextes	88
4.1.1.	Le Vivier-sur-Mer : un marais salés « simple »	88
4.1.1.1.	Présentation du secteur	88
4.1.1.2.	Analyse descriptive de l'organisation spatiale de la végétation.....	90
4.1.1.3.	Résultats de l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC)	98
4.1.1.4.	Résultats de l'analyse fréquentielle.....	104
4.1.1.5.	Synthèse sur l'analyse des transects de l'Ouest du Vivier-sur-Mer.....	115
4.1.2.	Chemin Dolais : un marais salé sous l'influence de cordon coquillier	115
4.1.2.1.	Présentation du secteur	115
4.1.2.2.	Analyse descriptive de l'organisation spatiale de la végétation.....	116
4.1.2.3.	Résultats de l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC)	121
4.1.2.4.	Résultats de l'analyse fréquentielle.....	124
4.1.2.5.	Synthèse du transect de Chemin Dolais	129
4.1.3.	Vains : effet du pâturage et des sédiments	130
4.1.3.1.	Présentation du secteur et des données	130
4.1.3.2.	Analyse descriptive de l'organisation spatiale de la végétation.....	131
4.1.3.3.	Résultats de l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC)	136
4.1.3.4.	Résultats de l'analyse fréquentielle.....	141
4.1.3.5.	Synthèse des transects de Vains	148
4.1.4.	Comparaison des trois situations : Vivier, Chemin Dolais, et Vains	148
4.2.	Organisation de la végétation à l'échelle de la Baie du Mont-Saint-Michel.....	152
4.2.1.	Observation de l'organisation de la végétation des marais salés	152
4.2.2.	Influence de l'altitude sur l'organisation de la végétation	156
4.2.2.1.	Résultats de l'analyse fréquentielle.....	156
4.2.2.2.	Etude de la relation entre l'altitude et la coordonnée géographique X ..	159
4.2.3.	Influence de la pente du terrain et de la géomorphologie	166
4.2.4.	Influence du contexte sédimentaire.....	173
4.2.5.	Influence de l'utilisation agricole.....	177
4.2.6.	Etude de la réflectance dans le Rouge, le Vert, et le Bleu	182
4.2.7.	Identification des associations végétales de la Baie du Mont-Saint-Michel..	187
5.	Discussion	193
6.	Conclusion.....	199
	Références	205

Tables des figures

Figure 1 : Situation géographique de la baie du Mont-Saint-Michel.....	21
Figure 2 : Vue de la Baie du Mont-Saint-Michel, depuis les falaises de Champeaux.....	22
Figure 3 : Vue des polders et du Mont-Saint-Michel depuis Roz sur Couesnon.....	22
Figure 4 : Vue du Mont-Saint-Michel, de la digue-route qui le relie à la côte, et du Couesnon, un jour de grande marée.	22
Figure 5 : Vue depuis le Mont-Saint-Michel de l'estran découvert à marée basse, de Tombelaine, et des côtes de Normandie.....	23
Figure 6 : Vue de la végétation halophile des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel.....	23
Figure 7 : Prés-salés de la baie du Mont-Saint-Michel.....	25
Figure 8: Carte des activités anthropiques dans la Baie du Mont-Saint-Michel.....	25
Figure 9 : Après chaque grande marée recouvrant les parkings entourant le Mont-Saint-Michel, les sédiments apportés par le flot sont repoussés pour empêcher leur accumulation.....	26
Figure 10 : Vue de la végétation des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel.....	27
Figure 11 : Les couleurs de la Baie du Mont-Saint-Michel: l' <i>Aster tripolium</i> en fleur, <i>Salicornia sp.</i> rouge en fin d'été, et <i>Atriplex prostrata</i> (au premier plan) contrastant avec <i>Halimione portulacoides</i> (au second plan).....	28
Figure 12 : Marais salés proche de la Chapelle Sainte Anne, depuis un cordon coquillier.....	29
Figure 13 : Marais salés situés à l'Ouest du Mont-Saint-Michel : transition entre deux zones monospécifiques : <i>Elytrigia atherica</i> à gauche et <i>Halimione portulacoides</i> à droite.....	29
Figure 14 : Vue des pâturages ovins des marais salés de Vains.....	29
Figure 15: Schéma théorique de l'organisation des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel (Bonnot-Courtois & Levasseur, 2000).....	30
Figure 16 : Schéma théorique de l'organisation des marais salés. Trois types de limite slikke-schorre sont représentés.	30
Figure 17: Courbe schématique montrant l'influence d'un facteur sur une espèce.....	32
Figure 18: Distributions hypothétique d'une communauté fermée (à gauche) et d'une communauté ouverte (à droite).	33
Figure 19: <i>Salicornia sp.</i> présente des organes végétatifs charnus qui permettent sa survie sous de forts taux de salinité.	36
Figure 20 : Les deux sous-ensembles morpho-sédimentaires de la Baie du Mont-Saint-Michel, de part et d'autre de la Chapelle Sainte-Anne.....	38
Figure 21 : Vue d'un cordon coquillier et d'une vasière.....	39
Figure 22 : photographie permettant de voir le litage de la tangué.....	39
Figure 23 : Un rayonnement électromagnétique correspond à la propagation de la variation d'un champ électrique (en rouge) et d'un champ magnétique (en bleu). Il est défini par sa longueur d'onde λ , la plus courte distance séparant deux points identiques.....	44
Figure 24 : Schéma récapitulant les étapes de la télédétection passive.....	45
Figure 25 : Schéma de l'acquisition de données altimétrique LiDAR.....	47
Figure 26 : Valeurs caractéristiques d'une impulsion (P_1) et de ses échos (E1 et E2).....	49
Figure 27 : Deux transects superposés à l'orthophotographie ©Ortho littorale 2000.....	54
Figure 28 : Schéma de la réalisation des transects de végétation.....	54

Figure 29 : Photographies de l'acquisition des transects de végétation avec les étudiants du Master TGAE de 2008 et 2009.	55
Figure 30 : Carte des 28 transects de végétation.	55
Figure 31 : Carte de la végétation des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel de 2002 (Alain Radureau & Benoît Lefeuvre, communication personnelle).....	58
Figure 32 : Dallage de l'orthophotographie (1 km de côté) et extrait de l'Ortholittorale 2000 couvrant la baie du Mont-Saint-Michel.....	59
Figure 33 : Plan de vol au sol des trois missions LIDAR (J. Populus).....	60
Figure 34 : Superposition des points Lidar (en noir), dont la densité moyenne est de 0,5 pt/m ² , et du Modèle Numérique de Terrain de 1 m de résolution obtenue par interpolation (en couleur hypsométrique). On peut voir la différence de densité de point au niveau d'un recouvrement de deux lignes de vol (en haut à gauche).	61
Figure 35 : Dallage des données LiDAR (2 km de côté) et extrait du Modèle Numérique de Surface à 1 m de résolution réalisé par kriegeage par IFREMER.	61
Figure 36 : Carte des levés topographiques (ENSG) de mai 2002, superposés à l'Ortho Littorale 2000.	62
Figure 37 : Carte géologique de la Baie du Mont Saint Michel au 1/50 000 (L'Homer <i>et al.</i> , 1999).	63
Figure 38 : Carte du pâturage de 2002 (Alain Radureau & Benoît Lefeuvre, communication personnelle).....	64
Figure 39 : Détail de l'image raster des données LIDAR (résolution : 1 m) superposée à son estompage, permettant de voir la différence d'altitude mesurée entre une zone non pâturée (à gauche) et un terrain sous pâturage ovin (à droite). Le profil permet de constater une différence d'altitude mesurée d'environ 20 cm. Cette différence n'est pas due à l'altitude du terrain, mais à la différence de hauteur de la végétation. Les photographies de ces deux types de végétation permettent de voir que la végétation est haute dans la zone non pâturée, et extrêmement rase en présence de moutons.	66
Figure 40 : Superposition de l'estompage des données LIDAR (Jacques Populus, IFREMER, Fondation d'entreprise TOTAL pour la biodiversité et la mer), de l'Ortho littorale 2000 (IGN), de la carte de la végétation (Alain Radureau & Benoît Lefeuvre, communication personnelle) et des levés topographiques (J.M. Léauthaud, IGN, ENSG, et les élèves de l'ENSG).	67
Figure 41 : Schéma et vue superposée à l'orthophotographie de points d'impact LIDAR (points noirs) situés autour de levés topographiques (points rouges) dans un carré de 3x3 m. Ztopo est l'altitude mesurée par levé topographique, Zfp est l'altitude de la mesure LIDAR premier écho la plus proche du levé topographique, Zmin est la mesure LIDAR premier écho d'altitude minimale dans le carré de 3x3 m, Zmoy l'altitude moyenne, et Zmax l'altitude maximale.	71
Figure 42 : Erreurs systématiques (m) pour chaque type de couverture au sol, obtenues en comparant les levés topographiques considérés comme points de contrôle et les données LIDAR les plus proches, premier écho (Zfp) et dernier écho (Zlp), ainsi que les données LIDAR d'altitude minimale (Zmin), moyenne (Zmoy) et maximale (Zmax) dans un carré de 3x3 m autour de chaque levé topographique.	78
Figure 43 : Schéma de quelques entités géomorphologiques rencontrées sur la Baie du Mont-Saint-Michel, en coupe altitudinale. Les codes sont donnés dans le Tableau 9.	81
Figure 44: Quelques exemples de profils permettant de déterminer le contexte géomorphologique de chaque point.	82
Figure 45 : localisation des transects étudiés (en rouge) dans les trois secteurs sélectionnés.	88

Figure 46 : Superposition des points d'observation des transect JB03 (Ouest) et VI06 (Est), en vert, et de l'orthophotographie. Les coordonnées sont en Lambert 93.	89
Figure 47: Sur le marais salé situé à l'Est du Vivier-sur-Mer, la haute slikke est marquée par des rides parallèles à la pente creusée par le va-et-vient de la mer. Photo Marianne Cohen.	89
Figure 48 : Profil altitudinal du transect Vivier Ouest JB03 et répartition de chaque espèce végétale le long du transect (point noir = dominance, point blanc = présence).	90
Figure 49 : Profil altitudinal du transect Vivier Est Vi06 et répartition de chaque espèce végétale le long du transect (point noir = dominance, point blanc = présence).	91
Figure 50 : Altitude moyenne et écart-type de chaque espèce végétale rencontrée sur le transect Ouest, JB03.	91
Figure 51 : Altitude moyenne et écart-type de chaque espèce végétale rencontrée sur le transect Est, VI06.	92
Figure 52 : Densité de la distribution des espèces selon l'altitude pour le transect Ouest JB03.	93
Figure 53 : Densité de la distribution des espèces selon l'altitude pour le transect Est Vi06.	94
Figure 55 : Schéma de la répartition des espèces végétales selon l'altitude des transects Ouest JB03 et Est Vi06. Les regroupements d'espèces correspondent aux ensembles de répartition altitudinale identique (p-value>0,05 au test de comparaisons multiples de Wilcoxon-Mann-Whitney.) Pour déterminer l'altitude d'un regroupement, la moyenne de l'altitude plus ou moins l'écart-type a été calculée pour chaque espèce et la valeur minimale et maximale au sein d'un regroupement.	97
Figure 56 : Coordonnées des relevés des transects Ouest JB03 et Est Vi06 sur les trois premiers axes de l'AFC, en fonction de leur distance à la côte. Les lignes noires verticales indiquent les discontinuités entre les segments homogènes, notés de A à P et de A' à N'.	99
Figure 57: Orthophotographie et transects de végétation, les discontinuités déterminées par l'AFC étant en rouge. Le contenu floristique des segments est décrit dans les tableaux 12 et 13. On peut voir en vert les discontinuités révélées par L'AFC malgré une composition floristique similaires dans les segments adjacents.	100
Figure 58 : Superposition de l'orthophotographie et des segments identifiées par l'AFC (en couleur), sur une portion du transect Vivier Est Vi06. On peut voir la correspondance entre les segments et les zones d'égaies apparences de l'orthophotographie.	100
Figure 59: Profils altitudinaux des transects JB03 et Vi06 et segments identifiés par l'AFC. Les espèces dominantes de chaque segment sont indiquées.	103
Figure 61: Superposition des points d'observation du transect CD07, en vert, et de l'orthophotographie. Les coordonnées sont en Lambert 93.	116
Figure 62 : Vue du transect CD07 et de la vasière située entre les deux cordons coquilliers. Photo Marianne Cohen.	116
Figure 63 : Profil altitudinal du transect CD07 et répartition de chaque espèce végétale le long du transect (point noir = dominance, point blanc = présence).	117
Figure 64 : Altitude moyenne et écart-type des espèces végétales rencontrées sur CD07.	118
Figure 65: Courbes de densité de la distribution des espèces du transect CD07 selon l'altitude.	119
Figure 66: répartition de <i>Salicornia sp.</i> sur le transect CD07.	120
Figure 67 : Schéma de la répartition des espèces végétales selon l'altitude du transect CD07. Les regroupements d'espèces correspondent aux ensembles de répartition altitudinale identique (p-value>0,05 au test de comparaisons multiples de Wilcoxon-Mann-Whitney.)	120
Figure 68 : Coordonnées des relevés du transect CD07 sur les trois premiers axes de l'AFC.	121

Figure 69 : Superposition des discontinuités déterminées par l'AFC (en rouge) et des points des transects de végétation du transect CD07.....	123
Figure 70 : Profils altitudinaux du transect CD07 et segments identifiés par l'AFC. Les espèces dominantes de chaque segment sont indiquées.	123
Figure 71 : Superposition des points d'observation des transects de Vains V108 et V208, en vert, et de l'orthophotographie. Les coordonnées sont en Lambert 93.	130
Figure 72: Vue du marais salés de Vains. On voit nettement une différence dans la hauteur de la végétation, la zone à pâturage bovin étant à gauche sur la photo, et la zone à pâturage ovin à droite.....	132
Figure 73: Profil altitudinal du transect V108 et répartition de chaque espèce végétale le long du transect (point noir = dominance, point blanc = présence).	132
Figure 74: Profil altitudinal du transect V208 et répartition de chaque espèce végétale le long du transect (point noir = dominance, point blanc = présence).	133
Figure 75: Altitude moyenne et écart-type de chaque espèce végétale rencontrée sur V108.....	135
Figure 76: Altitude moyenne et écart-type de chaque espèce végétale rencontrée sur V208.....	135
Figure 77: Coordonnées des relevées de V108 et V208 sur les trois premiers axes de l'AFC.....	136
Figure 78: Superposition des discontinuités déterminées par l'AFC (en rouge) et des points des transects de végétation du transect CD07.....	137
Figure 79: Superposition de l'orthophotographie et des segments identifiées par l'AFC (en couleur), sur une portion du transect V108. On peut voir la correspondance entre les segments et les zones d'égales apparences en couleur et texture de l'orthophotographie.....	137
Figure 80: Profils altitudinaux des transects V108 et V208 et segments identifiés par l'AFC. Les espèces dominantes des segments sont indiquées.....	140
Figure 81 : Mise en parallèle de l'orthophotographie, de la carte des sédiments, et des segments identifiés par l'AFC.	141
Figure 82 : Schéma récapitulatif de l'organisation de la végétation par rapport aux facteurs altitude et Sédiment sur trois des transects étudiés.	149
Figure 83 : Répartition de <i>Salicornia sp.</i> (1a) en Baie du Mont-Saint-Michel, obtenue à partir de la carte de végétation de 2002 (ref). Les zones pâturées sont indiquées en rouge hachuré.....	153
Figure 84 : Répartition de <i>Suaeda maritima</i> (1b) en Baie du Mont-Saint-Michel, obtenue à partir de la carte de végétation de 2002 (ref). Les zones pâturées sont indiquées en rouge hachuré.	154
Figure 85 : Répartition de <i>Spartina sp.</i> (2) en Baie du Mont-Saint-Michel, obtenue à partir de la carte de végétation de 2002 (ref). Les zones pâturées sont indiquées en rouge hachuré.	154
Figure 86 : Répartition de <i>Festuca rubra</i> (5) en Baie du Mont-Saint-Michel, obtenue à partir de la carte de végétation de 2002 (ref). Les zones pâturées sont indiquées en rouge hachuré.	154
Figure 87 : Répartition d' <i>Elytrigia atherica</i> (6) en Baie du Mont-Saint-Michel, obtenue à partir de la carte de végétation de 2002 (ref). Les zones pâturées sont indiquées en rouge hachuré.....	155
Figure 88 : Répartition d' <i>Agrostis stolonifera</i> (7) en Baie du Mont-Saint-Michel, obtenue à partir de la carte de végétation de 2002 (ref). Les zones pâturées sont indiquées en rouge hachuré.	155
Figure 89 : Répartition de <i>Puccinellia maritima</i> (3) en Baie du Mont-Saint-Michel, obtenue à partir de la carte de végétation de 2002 (ref). Les zones pâturées sont indiquées en rouge hachuré.	155

Figure 90 : Répartition de <i>Halimione portulacoides</i> (4) en Baie du Mont-Saint-Michel, obtenue à partir de la carte de végétation de 2002 (ref). Les zones pâturées sont indiquées en rouge hachuré.	156
Figure 91: Graphique des régressions linéaires et non linéaires entre l'altitude Z et la coordonnée géographique X des points d'observation de la végétation de la Baie du Mont-Saint-Michel. Les résultats des tests de corrélation sont indiqués en bas à droite.	161
Figure 92: Régressions linéaires et non linéaires entre l'altitude Z et la coordonnée géographique X des points d'observation où a été rencontrée <i>Halimione portulacoides</i> (en rouge).....	161
Figure 94: Test de corrélation entre l'altitude Z et la coordonnée X des polygones de la carte de végétation de 2002.	162
Figure 95: Test de corrélation entre l'altitude Z et la coordonnée X des polygones de la carte de végétation de 2002 où les espèces <i>Suaeda maritima</i> et <i>Salicornia sp</i> sont présentes.	163
Figure 96: Superposition des courbes de régression du second degré entre la coordonnée X et l'altitude Z des polygones de la carte de végétation de 2002 pour les différentes espèces végétales.....	163
Figure 97: Droite de régression entre l'altitude Z et la coordonnée X des polygones de la carte de végétation de 2002, et droite reliant les cotes correspondant aux altitudes de la marée du 07/09/1979 (d'après des données de Le Rhun, 1982).	165

Tables des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques climatiques de la Baie du Mont-Saint-Michel (Caline, 1982).....	34
Tableau 2 : Code, année de réalisation, longueur (m), et nombre de points d'observation.....	56
Tableau 3: Code des espèces végétales et nombre de points où elles ont été observées.	57
Tableau 4: Caractéristiques techniques de la mission LIDAR (Jacques Populus, IFREMER, Fondation d'entreprise TOTAL pour la biodiversité et la mer)	60
Tableau 5 : Codes des sédiments de la carte géologique de la Baie du Mont Saint Michel au 1/50 000 (L'Homer <i>et al.</i> , 1999).	63
Tableau 6: Codes des types de pâturage.....	63
Tableau 6 : Erreur moyenne quadratique (EMQ), erreur systématique (ES), et écart-type (ET) par type de couverture au sol des données LIDAR premier et dernier écho par rapport aux points de contrôle. Les valeurs sont en mètres, n représente le nombre de points traités.	73
Tableau 7 : Erreur moyenne quadratique (EMQ), erreur systématique (ES), et écart-type (ET) par type de couverture au sol des données LIDAR premier écho du point le plus proche (Zfp) et des données LIDAR premier écho d'altitude minimale situées dans un carré de 3x3 m centré sur chaque point de contrôle (Zmin). La correction apportée par le calcul de Zmin par rapport à Zfp est égale à $ ES\ Zfp - ES\ Zmin $. Les valeurs sont en mètres, n représente le nombre de points traités.	75
Tableau 8 : Erreur moyenne quadratique (EMQ), erreur systématique (ES), et écart-type (ET) par type de couverture au sol des données LIDAR premier écho d'altitude moyenne (Zmoy) et maximale (Zmax) situées dans un carré de 3x3 m centré sur chaque point de contrôle. La correction apportée par le calcul de Zmoy par rapport à Zfp est égale à $ ES\ Zfp - ES\ Zmoy $. Les valeurs sont en mètres, n représente le nombre de points traités.	75
Tableau 9 : Codes des entités géomorphologiques résumées (en 10 classes, « Geomor ») et détaillées (en 30 classes, « Geomori »).	81
Tableau 10: Tableau de contingence théorique entre l'espèce 1 et l'espèce 2.	86
Tableau 11 : Statistiques des altitudes (m, IGN69) où a été rencontrée chaque espèce végétale sur les Transect Ouest (JB03) et Est (VI06) du Vivier-sur-mer.	92
Tableau 12 : Composition floristique des segments déterminés par l'AFC, Transect Vivier Ouest. 2 : dominance, 1 : présence dans plus de la moitié des relevés du segment, * : présence dans moins de la moitié des relevés du segment, 0 : absence. En grisé : segments connexes ayant la même composition floristique simplifiée.	101
Tableau 13 : Composition floristique des segments déterminés par l'AFC, Transect Vivier Est. 2 : dominance, 1 : présence dans plus de la moitié des relevés du segment, * : présence dans moins de la moitié des relevés du segment, 0 : absence. En grisé : segments connexes ayant la même composition floristique simplifiée.	102
Tableau 14 : Résumé des associations végétales identifiées par analyse fréquentielle.	105
Tableau 15 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur altitude pour le transect Vivier Ouest JB03.	108
Tableau 16 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur altitude pour le transect Vivier Est Vi06.	108
Tableau 17 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur pente pour le transect Vivier Ouest JB03.	109

Tableau 18 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur pente pour le transect Vivier Est Vi06.	110
Tableau 19 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur direction de la pente pour le transect Vivier Ouest JB03.....	110
Tableau 20 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur direction de la pente pour le transect Vivier Est Vi06.	110
Tableau 21 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Géomorphologie pour le transect Vivier Ouest JB03.....	110
Tableau 22 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur géomorphologie pour le transect Vivier Est Vi06.	111
Tableau 23 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Sédiment pour le transect Vivier Ouest JB03.....	112
Tableau 24 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Sédiment pour le transect Vivier Est Vi06.	112
Tableau 25 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect Vivier Ouest JB03.....	112
Tableau 26 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Sédiment (à la verticale) sur le transect Vivier Ouest JB03.....	113
Tableau 27 : Relation entre le facteur Sédiment (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect Vivier Ouest JB03.....	113
Tableau 28 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect Vivier Est Vi06.	113
Tableau 29 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Sédiment (à la verticale) sur le transect Vivier Est Vi06.	113
Tableau 30 : Relation entre le facteur Sédiment (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect Vivier Est Vi06.....	113
Tableau 25 : Résumé des relations entre les facteurs Altitudes, Géomorphologie, et Sédiment (S : sables très fins; Tf : Tangué silto-argileuse; FMz : Tangué de schorres récents).....	114
Tableau 26 : Résumé des résultats obtenus par analyse fréquentielle sur JB03 et Vi06.	114
Tableau 27 : Statistiques des altitudes (m, IGN69) pour chaque espèce végétale sur CD07.....	118
Tableau 28: Composition floristique des segments déterminés par l'AFC, Transect CD07 : dominance, 1 : présence dans plus de la moitié des relevés du segment, * : présence dans moins de la moitié des relevés du segment, 0 : absence.....	122
Tableau 29 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Altitude pour le transect CD07.	126
Tableau 30 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Pente pour le transect CD07.	127
Tableau 31 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Géomorphologie pour le transect CD07.....	127
Tableau 32 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Sédiment pour le transect CD07.	127

Tableau 33 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Sédiment (à la verticale) sur le transect CD07.....	128
Tableau 34 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect CD07.....	128
Tableau 35 : Relation entre le facteur Sédiment (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect CD07.....	128
Tableau 36 : Résumé des relations entre les facteurs Altitudes, Géomorphologie, et Sédiment (SCb : Sables mêlés à des galets, facies coquillier ; Tg : Sablons et tangles sablo-argileuses ; FMz : Tangle de schorres récents).	128
Tableau 33: Résumé des résultats obtenus par analyse fréquentielle sur CD07.....	129
Tableau 34: Statistiques des altitudes (m, IGN69) des espèces végétales sur V108: altitude minimale (Min), moyenne, maximale (Max), et écart-type (Sd).	134
Tableau 35: Statistiques des altitudes (m, IGN69) des espèces végétales sur V208: altitude minimale (Min), moyenne, maximale (Max), et écart-type (Sd).	134
Tableau 36: Composition floristique des segments déterminés par l'AFC, Transect V108. 2 : dominance, 1 : présence dans plus de la moitié des relevés du segment, * : présence dans moins de la moitié des relevés du segment, 0 : absence.....	138
Tableau 37: Composition floristique des segments déterminés par l'AFC, Transect V208. 2 : dominance, 1 : présence dans plus de la moitié des relevés du segment, * : présence dans moins de la moitié des relevés du segment, 0 : absence.....	139
Tableau 38 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Altitude pour le transect V108.	143
Tableau 39 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Altitude pour le transect V208.	143
Tableau 40 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Pente pour le transect V108.	144
Tableau 41 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Pente pour le transect V208.	144
Tableau 42 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Géomorphologie pour le transect V108.....	144
Tableau 43 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Géomorphologie pour le transect V208.....	145
Tableau 44 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Sédiment pour le transect V108.	145
Tableau 45 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Sédiment (à la verticale) sur le transect V108.....	146
Tableau 25 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect V108.	146
Tableau 25 : Relation entre le facteur Sédiment (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect V108.	146
Tableau 25 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect V208.	146

Tableau 45: Résumé des relations entre les facteurs Altitudes, Géomorphologie, et Sédiment (S-Sm : Sables à débris des chenaux ; Tg : Sablons et tangles sablo-argileuses ; FMz : Tangle de schorres récents) pour les transects V108 et V208.....	147
Tableau 46: Résumé des résultats obtenus par analyse fréquentielle sur CD07.....	147
Tableau 47 : Résumé des apports des différentes méthodes utilisées pour analyser les données de végétation et les données écologiques sur les trois secteurs.	151
Tableau 48 : Répartition simplifiée des espèces végétales sur la Baie du Mont-Saint-Michel selon l'altitude et le pâturage.....	156
Tableau 50 (page suivante): Résultats de l'analyse fréquentielle du facteur Altitude pour l'ensemble des points d'observation des 28 transects.	157
Tableau 51: Altitude moyenne (m, IGN69) de trois espèces végétales pour les cinq transects.....	159
Tableau 52: Résultats des corrélations linéaires et non linéaires entre l'altitude et la coordonnée X pour l'ensemble des points d'observation des transects.....	159
Tableau 53: Résultats de l'analyse fréquentielle du facteur Pente pour l'ensemble des points d'observation des 28 transects.....	167
Tableau 54 : Valeurs des liaisons entre les facteurs Altitude (à l'horizontale) et Pente (à la verticale).	168
Tableau 55 : Résumé des relations entre les facteurs Altitude et Pente.....	168
Tableau 54 : Résultats de l'analyse fréquentielle du facteur Géomorphologie pour l'ensemble des points d'observation des 28 transects.	169
Tableau 55 : Liaisons entre l'Altitude (à l'horizontale) et la Géomorphologie (à la verticale).	171
Tableau 56 : Résumé des relations entre les facteurs Altitude et Géomorphologie.....	172
Tableau 57 : Résultats de l'analyse fréquentielle du facteur Sédiment pour l'ensemble des points d'observation des 28 transects.....	174
Tableau 58 : Liaisons entre les facteurs Altitude (à l'horizontale) et Sédiment (à la verticale).	175
Tableau 59 : Liaisons entre les facteurs Sédiment (à l'horizontale) et Géomorphologie (à la verticale).	175
Tableau 60 : Résumé des relations entre les facteurs Sédiment, Altitude et Géomorphologie.....	176
Tableau 61 : Nombre moyen d'espèces par point d'observation selon l'utilisation agricole.	177
Tableau 62 : Résultats de l'analyse fréquentielle du facteur Utilisation pour l'ensemble des points d'observation des 28 transects.....	178
Tableau 63 : Liaisons entre les facteurs Altitude (à l'horizontale) et Utilisation (à la verticale).	179
Tableau 64 : Liaisons entre les facteurs Utilisation (à l'horizontale) et Géomorphologie (à la verticale).	179
Tableau 65 : Résumé des relations entre les facteurs Sédiment, Altitude et Géomorphologie.....	179
Tableau 66 : Résumé des relations entre les espèces végétales des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel et les facteurs Altitude, Géomorphologie, Sédiment, et Utilisation.	181
Tableau 63 : Résultats de l'analyse fréquentielle de la luminance dans le Rouge pour l'ensemble des points d'observation des 28 transects.	184
Tableau 64 : Résultats de l'analyse fréquentielle de la luminance dans le Vert pour l'ensemble des points d'observation des 28 transects.	185
Tableau 65 : Résultats de l'analyse fréquentielle de la luminance dans le Bleu pour l'ensemble des points d'observation des 28 transects.	186

Tableau 66 : Répartition mise en évidence par analyses fréquentielles et simplifiée des espèces végétales sur la Baie du Mont-Saint-Michel selon l'altitude et le pâturage..... 192

Tables des diagrammes

Diagramme 1 : Associations végétales identifiées par analyse fréquentielle sur le transect Vivier Ouest JB03 (seules les liaisons les plus fortes sont conservées).	105
Diagramme 2 : Associations végétales identifiées par analyse fréquentielle sur le transect Vivier Est Vi06 (seules les liaisons les plus fortes sont conservées).	105
Diagramme 3 : Groupes identifiés par analyse fréquentielle sur le transect Vivier Ouest JB03 (toutes les liaisons sont indiquées).	106
Diagramme 4 : Groupes identifiés par analyse fréquentielle sur le transect Vivier Vivier Est Vi06 (toutes les liaisons sont indiquées).	107
Diagramme 5 : Associations végétales identifiées par analyse fréquentielle sur le transect CD07 (seules les liaisons les plus fortes sont conservées).	124
Diagramme 6 : Groupes identifiés par analyse fréquentielle sur le transect CD07 (toutes les liaisons sont indiquées).	125
Diagramme 7 : Associations végétales identifiées par analyse fréquentielle sur le transect V108 (seules les liaisons les plus fortes sont conservées).	142
Diagramme 8 : Associations végétales identifiées par analyse fréquentielle sur le transect V208 (seules les liaisons les plus fortes sont conservées).	142
Diagramme 9 : Associations végétales identifiées par analyse fréquentielle sur l'ensemble des transects (seules les liaisons les plus fortes sont conservées).	187
Diagramme 10 : Associations végétales identifiées par analyse fréquentielle sur les secteurs non paturés ni fauchés (seules les liaisons les plus fortes sont conservées).	188
Diagramme 11 : Associations végétales identifiées par analyse fréquentielle sur les secteurs paturés ou fauchés (seules les liaisons les plus fortes sont conservées).	190

1. Introduction

1.1. Problématique

Cette thèse s'appuie sur les méthodes de télédétection et des observations de terrain pour répondre à deux questions :

(1) Comment s'organise spatialement la végétation des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel ? (2) Comment améliorer les techniques de cartographie de la végétation des marais salés ?

Plus précisément, nous chercherons à répondre aux questions suivantes : Quels sont les facteurs écologiques déterminant la présence des espèces végétales des marais salés ? Peut-on définir des associations végétales composées d'espèces vivant ensemble sur les marais salés ? Les espèces végétales constituent-elle de bons indicateurs du milieu en termes d'altitude et de géomorphologie ? Comment évolue temporellement la végétation des marais salés ? Comment les connaissances écologiques peuvent nous permettre d'améliorer les techniques de cartographie de la végétation ? Est-il possible de passer d'une carte de l'altitude à une carte de la végétation, et inversement ?

1.2. Cadre de recherche

Situé sur l'étage supérieur du littoral et atteint par les marées de moyennes et vives eaux, les marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel sont couverts de sédiments fins (sable et vase), où pousse une végétation halophile, basse et dense. Zone de transition entre la terre et la mer, c'est un écosystème complexe et fragile dont la biodiversité est essentielle au maintien de la santé des côtes, tout en étant le siège de nombreuses activités humaines (pêche et aquaculture, tourisme, aménagement...). Même si de nombreuses études y ont été menées, une vision synthétique de l'organisation des marais salés de la Baie est absente. Or, ce secteur est couvert par de nombreuses données spatiales : outre les données habituelles disponibles en tout point du globe, la Baie a fait l'objet d'acquisitions spécifiques telles qu'une orthophotographie à 50 cm de résolution, et des données altimétriques LiDAR avec une densité moyenne de 0,5 point/m². Ces données présentent de très fortes potentialités pour comprendre la dynamique de la végétation de la Baie du Mont-Saint-Michel. Le but de ce travail de thèse est d'utiliser et d'optimiser les données de télédétection disponibles pour comprendre l'organisation spatiale de la végétation des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel. Ces données de télédétection sont complétées par des observations de terrain sous forme de transect

regroupant 9811 points, ainsi qu'une carte des associations végétales réalisée sur l'ensemble de la Baie.

1.3. Hypothèses principales

L'un des premiers objectifs de l'écologie végétale est de comprendre les processus régissant la distribution des espèces dans les communautés naturelles (Harper, 1977)(Tilman, 1988). La phytosociologie est la branche de l'écologie végétale qui s'intéresse aux communautés végétales et aux facteurs qui les influencent. L'unité élémentaire d'étude de cette discipline est l'association végétale, c'est-à-dire « un groupement végétale stable en équilibre avec le milieu ambiant, caractérisé par une composition floristique déterminée, dans laquelle certains éléments exclusifs ou à peu près (espèces caractéristiques) révèlent, par leur présence, une écologie particulière et autonome » (Braun-Blanquet, 1928). L'une des idées principales de la phytosociologie est que les associations végétales révèlent les caractéristiques écologiques de leur habitat, et « le phytosociologue espère tirer de l'observation de la végétation des connaissances, a priori cachées, sur le milieu environnant » (De Foucault, 1986). Le milieu est défini comme « l'ensemble des valeurs prises par les divers facteurs écologiques qui règnent au voisinage » (De Foucault, 1986), et les associations végétales peuvent être considérées comme des indicateurs de ce milieu.

Dans ce travail de thèse nous cherchons à savoir comment les espèces végétales s'organisent en fonction des facteurs écologiques, afin de mieux comprendre leur organisation spatiale et d'améliorer leur cartographie. Si l'on raisonne en phytosociologue, on peut se demander s'il est possible, en observant les espèces végétales de marais salés, d'avoir des informations sur les conditions écologiques du milieu, par exemple en termes d'altitude et de géomorphologie. Inversement, connaissant les caractéristiques du milieu, est-il possible de connaître les espèces végétales qui le couvrent ? Le cartographe, lui, se poserait ces questions en ces termes : peut-on passer d'une carte du milieu à une carte de la végétation, et inversement ?

Dans notre étude, la première question que l'on peut se poser est celle de l'existence d'associations végétales sur les marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel. Dans la carte de 1984 (Guillon, 1984a), 29 associations végétales ont été distinguées. Ces mêmes associations ont été utilisées dans la légende des cartes de 1995 (Bouchard *et al.*, 1995) et de 2002 (Radureau & Lefevre, communication personnelle). Ces associations sont parfois observées en combinaison avec une ou deux autres associations, ce qui conduit à la définition sur la carte de 2002 de 114 types de couvertures au sol. Cette complexité révèle le fait qu'il est difficile de regrouper les espèces des marais salés en associations clairement identifiables. S'il est tentant de vouloir regrouper les espèces qui semblent vivre au même endroit,

notamment lorsque l'on cherche à cartographier la végétation, cela ne correspond pas toujours à une réalité écologique. On peut ainsi se demander si les espèces végétales des marais salés s'organisent réellement en association végétale (école des sigmatistes), ou si le passage de l'une à l'autre des espèces se fait de façon continue (école des continuistes).

Par ailleurs, les marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel apparaissent comme spatialement structurés, et plusieurs facteurs écologiques pourraient expliquer cette organisation. Cependant, selon certains auteurs (Silvestri *et al.*, 2005), l'organisation spatiale de la végétation qui apparaît clairement sur le terrain n'est pas vérifiée statistiquement. Ils notent par exemple que l'altitude préférentielle d'une espèce végétale n'est pas la même dans différents secteurs d'un marais salés. Cette question est au cœur de notre problématique, puisque nous cherchons à savoir si les espèces végétales des marais salés sont de bons indicateurs du milieu.

1.4. Objectifs principaux

L'objectif principal de cette thèse est donc tout d'abord de vérifier si les espèces végétales des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel s'organisent en associations et de tester statistiquement l'influence de facteurs écologiques, tels que l'altitude, la géomorphologie, ou le pâturage, sur la présence des différentes espèces végétales. Nous chercherons dans un deuxième temps, grâce au résultat de ces considérations, à améliorer les techniques de cartographie automatique de la végétation.

1.5. Originalité de la thèse

L'intérêt de cette thèse vient tout d'abord de l'utilisation d'une importante base de données spatialisée concernant l'ensemble de la Baie du Mont-Saint-Michel. Elle a été constituée grâce à la mise en parallèle de données de végétation et de données de télédétection à haute résolution, acquises pour la plupart la même année. Nous disposons de données de végétation de deux types : d'une part, une carte complète des associations végétales, d'autre part, 28 transects réalisés par point-contact tous les deux mètres. Les données de télédétection sont constituées principalement d'une orthophotographie à 50 cm de résolution, ainsi que de données altimétriques LIDAR à 1 m de résolution planimétrique, et d'une précision altimétrique de 10 cm.

L'originalité de cette thèse vient de plus de l'utilisation de la méthode des analyses fréquentielles. Cette méthode, basée sur la constitution de tableaux de contingence, permet de définir des liaisons entre les espèces et de regrouper celles ayant été rencontrées fréquemment

ensemble. Elle offre également la possibilité de quantifier les liaisons entre une espèce et les différents états d'un facteur écologique. Cette méthode répond donc parfaitement à nos objectifs.

Enfin, cette étude a été menée à plusieurs échelles. Une première approche à l'échelle de secteurs choisis pour leurs situations caractéristiques en termes de géomorphologie, d'hydrologie, et de pâturage, permet de comprendre l'organisation fine de la végétation vis-à-vis des différents facteurs écologiques. Dans un deuxième temps, une analyse à l'échelle de la Baie du Mont-Saint-Michel permet le développement d'une vision synthétique de l'organisation des marais salés de la Baie.

1.6. Organisation de la thèse

Une première partie définit le contexte général de cette étude. La Baie du Mont-Saint-Michel est d'abord présentée, puis la végétation des marais salés et les différents facteurs écologiques agissant dans la Baie. Les différentes méthodes de télédétection sont ensuite décrites, notamment la télédétection LiDAR qui constitue une source de données importante dans ce travail.

Une seconde partie présente les données utilisées dans ce travail. Nous décrivons d'abord les données brutes, constituées notamment des données de végétation et des données de télédétection. La préparation des données est ensuite décrite, notamment le contrôle qualité des données LiDAR et leur correction, ainsi que la constitution de données dérivées comme les données de géomorphologie. Enfin, le principe des méthodes utilisées dans ce travail est présenté.

La troisième partie décrit les résultats obtenus dans ce travail. Trois secteurs, correspondant à trois situations différentes en termes de géomorphologie et de pâturage, sont tout d'abord étudiés et comparés. L'analyse s'élargit ensuite à l'échelle de la Baie, afin de développer une vision globale.

La quatrième partie constitue la discussion des résultats obtenus, et une conclusion vient clore cette thèse.

2. Contexte général

2.1. Histoire et paysages de la Baie du Mont-Saint-Michel

Située dans l'angle formé par les côtes de Bretagne et de Normandie (Figure 1), la Baie du Mont-Saint-Michel peut s'aborder par le Nord-Est, en longeant les côtes sableuses de Normandie, et en s'arrêtant sur les hautes falaises de Champeaux qui offrent une vue magnifique sur l'estran (Figure 2). Elle se découvre également par l'Ouest, depuis les côtes rocheuses de la Bretagne, en traversant les marais noirs et marais blancs de Dol. On se perd alors à travers les polders (Figure 3), ces terres agricoles de cultures maraichères protégées de la marée par la construction de digues, et drainées par des canaux qui débouchent dans la Baie. Le tracé de route compliqué y reflète l'histoire de l'avancée progressive de l'homme sur la mer depuis le moyen âge. Enfin, on traverse la digue-route qui relie le Mont-Saint-Michel à la côte (Figure 4), en longeant l'embouchure du Couesnon, l'un des trois fleuves côtiers, avec la Sée et la Sélune, qui débouchent sur la Baie. Chaque année, plus de trois millions de touristes font ce voyage pour découvrir le deuxième site le plus visité de France et inscrit, entre autres nombreux titres de reconnaissances et de protection (Annexe), au Patrimoine Mondial de l'Humanité par l'Unesco, à la fois pour ses qualités écologiques et culturelles.



Figure 1 : Situation géographique de la baie du Mont-Saint-Michel.



Figure 2 : Vue de la Baie du Mont-Saint-Michel, depuis les falaises de Champeaux.



Figure 3 : Vue des polders et du Mont-Saint-Michel depuis Roz sur Couesnon.



Figure 4 : Vue du Mont-Saint-Michel, de la digue-route qui le relie à la côte, et du Couesnon, un jour de grande marée.

Du haut de l'abbaye, juchée sur un pointement granitique, on peut admirer la Baie du Mont-Saint-Michel et ses 250 km² d'estran découverts chaque jour par l'une des plus grandes marées du monde (Figure 5). Ces vastes étendues de sable nu sont entourées de marais salés, dont la largeur peut atteindre 2 km, où pousse une végétation dite halophile car résistante à de forts taux de salinité (Figure 6).



Figure 5 : Vue depuis le Mont-Saint-Michel de l'estran découvert à marée basse, de Tombelaine, et des côtes de Normandie.



Figure 6 : Vue de la végétation halophile des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel.

Cet écosystème exceptionnel est concerné par de nombreux programmes de protection (RAMSAR, Natura 2000, Directive « Oiseau », « Habitat Faune Flore », cf Annexe) et abrite une faune très diversifiée, certaines espèces étant l'objet de suivis scientifiques et/ou de mesures de protection, tandis que d'autres, élevées ou pêchées, participent à l'économie de la région.

Plus de 130 espèces d'oiseaux sont visibles sur la Baie, qui correspond à une importante zone de reproduction, d'hivernage, et une étape migratoire pour de nombreux limicoles, anatidés, ou passereaux. Certaines espèces d'anatidés sont chassées depuis les gabions, abris à demi enterrés construits par les chasseurs sur les marais salés face à des mares artificielles attirant les oiseaux.

Plusieurs mammifères marins sont également recensés : le Grand Dauphin (*Tursiops truncatus*), le Marsouin (*Phocoena phocoena*), le Phoque gris (*Halichoerus grypus*), et le Phoque veau marin (*Phoca vitulina*). L'estran sableux, d'apparence désertique, est en fait le refuge de nombreuses espèces d'invertébrés, telles que certains vers polychètes comme les arénicoles des pêcheurs (*Arenicola marina*) et les néréïs (*Nereis sp.*). D'autres espèces, comme les crabes, les bigorneaux, ou les anémones, colonisent l'estran rocheux ou les bancs d'Hermelles, ces récifs formés de tubes de sable aggloméré par des vers coloniaux tubicoles (*Sabellaria alveolata*), pouvant atteindre 70 cm de haut et couvrir plusieurs hectares.

La faune pêchée et élevée de la Baie du Mont-Saint-Michel, très appréciée, constitue un autre attrait qui contribue à l'économie de la région. En premier lieu, la pêche à pied est une activité pratiquée par les habitants de la Baie depuis toujours pour se nourrir et vivre de leur vente. Elle est devenue une activité de loisir, et l'on peut voir de nombreux pêcheurs à pied parcourir l'estran lors des grandes marées, à la recherche de mollusques bivalves comme les coques (*Cerastoderma edule*) ou les palourdes (*Ruditapes decussatus*), qui vivent enfoncées dans le sable et la vase. Les crevettes grises (*Crangon crangon*) et les bouquets (*Palaemon sp.*) pêchés à la bichette (en Normandie) ou dranet (en Bretagne) font également le bonheur des pêcheurs à pied. De plus, des parcs à huîtres permettent une production importante d'huîtres creuses (*Crassostrea gigas*) et d'huîtres plates (*Ostrea edulis*). L'élevage de moules de bouchot (*Mytilus edulis*) dans la Baie apparaît dans les années 50 et représente maintenant le quart des moules de bouchot françaises, ce produit bénéficiant d'une Appellation d'Origine Contrôlée (AOC) depuis 2006. Par ailleurs, de nombreuses espèces de poisson sont recensées, la Baie étant reconnue comme l'une des plus importantes nurseries de la Manche et de la Mer du Nord pour la sole commune (*Solea solea*) et la plie (*Pleuronectes platessa*). Elle constitue également une zone de passage pour les poissons migrateurs tels que le saumon (*Salmo salar*). Ce sont les marais salés qui fournissent la nourriture aux poissons, ceux-ci remontant les chenaux à marées hautes pour se nourrir en particulier d'un petit crustacé amphipode (*Orchestia sp.*) que l'on retrouve sous une plante très commune des marais, l'Obione (*Halimione portulacoides*), car il participe à sa décomposition. La pêche dans la Baie du Mont-Saint-Michel est une activité très ancienne, puisqu'on retrouve du côté

de Saint-Jean-le-Thomas des pêcheries datant 2000 ans avant JC (L'HOMER A., 1995). Ces pêcheries sont de vastes structures en bois ou en pierre, en forme de V dont la pointe est dirigée vers le large, permettant de piéger le poisson à marée descendante. Ce type de pêche est toujours utilisé, notamment à l'Ouest de la Baie.

Enfin, le pâturage ovin, bovin, et équin est une des activités anthropiques importantes dans la Baie (Figure 7). La présence de moutons sur les marais salés remonte au moins au Moyen Age. Le pâturage de plantes halophiles, telles que la Puccinellie (*Puccinellia maritima*), donnerait aux moutons une saveur particulière, ce qui permet aux agneaux dits « de prés salés » de bénéficier également d'une AOC depuis 2006.



Figure 7 : Prés-salés de la baie du Mont-Saint-Michel.

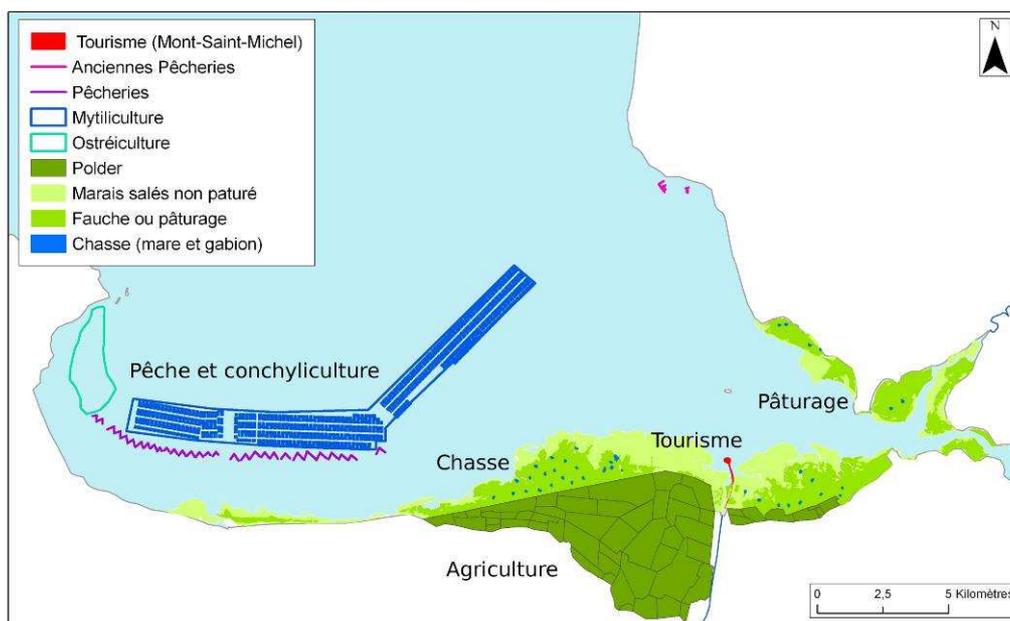


Figure 8: Carte des activités anthropiques dans la Baie du Mont-Saint-Michel.

Observation de la nature, pêche, chasse, élevage...La Baie est le siège de nombreuses activités anthropiques (Figure 8). Ces activités, importantes économiquement, ne sont pas sans conséquences sur la dynamique de la Baie, et plusieurs programmes d'étude des activités anthropiques sur la baie et de leur gestion sont en cours (Opération Grand Site, Programme National sur l'Environnement Côtier).

A cause de la morphologie de la Baie, le flot (courant à marée montante) est plus puissant que le jusant (courant à marée descendante). Une partie des sédiments apportés par le courant entrant sont donc piégés dans la Baie et s'accumulent, en particulier près des côtes (Figure 9). La Baie du Mont-Saint-Michel souffre ainsi d'un fort ensablement, processus naturel accéléré par de nombreux aménagements (digues, canalisation des rivières...). Ainsi autour du Mont-Saint-Michel, les fonds se seraient surélevés de trois mètres depuis 50 ans (Bonnot-Courtois *et al.*, 2002). Ce phénomène s'accompagne d'une avancée des herbues et menace l'insularité du Mont-Saint-Michel. Ce problème est actuellement au cœur de grands travaux, en particulier le projet de « Rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel ».



Figure 9 : Après chaque grande marée recouvrant les parkings entourant le Mont-Saint-Michel, les sédiments apportés par le flot sont repoussés pour empêcher leur accumulation.

2.2. L'organisation spatiale de la végétation des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel

2.2.1. Présentation générale des marais salés

L'estran, aussi appelé zone intertidale, est l'espace défini entre les plus hautes et les plus basses marées. C'est un écotone, c'est-à-dire une zone de transition entre deux écosystèmes plus ou moins homogènes, à savoir l'écosystème marin et l'écosystème terrestre. Couvert et découvert chaque jour par la marée, c'est un milieu extrême subissant de fortes variations de condition physico-chimique, et abritant un écosystème spécifique.

La partie haute de l'estran couverte de végétaux supérieurs s'appelle un marais salé. Les marais salés se forment sur le haut estran des zones littorales où les mouvements de l'eau sont assez modérés pour permettre l'accumulation des sédiments et la croissance de la végétation. Ils constituent l'un des écosystèmes les plus productifs au monde, avec une production pouvant atteindre 30 tonnes de matière sèche par an par hectare (Lefeuvre *et al.*, 2003). La biodiversité floristique y est pauvre mais constituée de plantes spécifiques à ce milieu. Les marais salés rendent de nombreux services à l'humanité (Costanza *et al.*, 1997), tels que la protection des côtes contre l'érosion, le filtrage des sédiments et des nutriments de la colonne d'eau, et l'alimentation des poissons, les marais salés constituant des nurseries pour de nombreuses espèces (Bertness *et al.*, 2001).

La végétation des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel apparaît au premier abord comme peu remarquable : elle constitue un tapis plus ou moins continu et dense, d'une couleur assez terne allant du vert au brun, composé en majorité de plantes souvent charnues ou poilues, portant des fleurs peu développées, et n'atteignant généralement que 20 à 30 cm de hauteur (Figure 10).



Figure 10 : Vue de la végétation des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel.

Au fil des saisons, les couleurs de la baie se dévoilent : le blanc violacé des fleurs d'Aster (*Aster tripolium*) au printemps, le rouge de la Salicorne (*Salicornia sp.*) à la fin de l'été, le vert tendre de l'Arroche couchée (*Atriplex prostrata*) contrastant avec le vert argenté de l'Obione (*Halimione portulacoides*) en automne (Figure 11)...



Figure 11 : Les couleurs de la Baie du Mont-Saint-Michel: l'*Aster tripolium* en fleur, *Salicornia sp.* rouge en fin d'été, et *Atriplex prostrata* (au premier plan) contrastant avec *Halimione portulacoides* (au second plan).

Il suffit de prendre le temps de la parcourir pour voir que la Baie, dont la végétation semblait d'abord homogène, présente des paysages tout à fait différents. A l'Ouest, on trouve des marais salés peu étendus, souvent bordés de cordons coquilliers où fleurit le Pavot cornu (*Glaucium flavum*) (Figure 12). Le centre de la Baie présente de grandes étendues monospécifiques à Chiendent du littoral (*Elytrigia atherica*) et Obione (*Halimione portulacoides*) (Figure 13). Enfin, dans la partie Est de la Baie, au bord des estuaires de la Sée, de la Sélune, et du Couesnon, où se concentre la majorité des troupeaux, les prés salés se présentent sous la forme d'un gazon de Puccinellie (*Puccinellia maritima*) (Figure 14).



Figure 12 : Marais salés proche de la Chapelle Sainte Anne, depuis un cordon coquillier.



Figure 13 : Marais salés situés à l'Ouest du Mont-Saint-Michel : transition entre deux zones monospécifiques : *Elytrigia atherica* à gauche et *Halimione portulacoides* à droite.



Figure 14 : Vue des pâturages ovins des marais salés de Vains.

Par ailleurs, lorsque l'on traverse un marais salé depuis la côte vers le large, on peut voir la végétation changer d'aspect : de dense et haute, elle devient clairsemée et sa taille se réduit progressivement. On remarque facilement que différentes espèces végétales se succèdent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la côte. Une organisation de la végétation apparaît plus ou moins clairement selon les secteurs de la Baie.

En effet, les marais salés sont communément divisés en deux sous-ensembles, le schorre et la slikke, définis par rapport aux niveaux marégraphiques (Figure 15), le schorre étant recouvert par la mer seulement quelques fois par mois, lors des marées de vives-eaux, tandis que la slikke l'est quotidiennement à marée haute. Sur le terrain, le schorre se reconnaît par la couverture continue de sa végétation, tandis que haute slikke est caractérisée par une végétation pionnière se développant en touffes éparées (Figure 16).

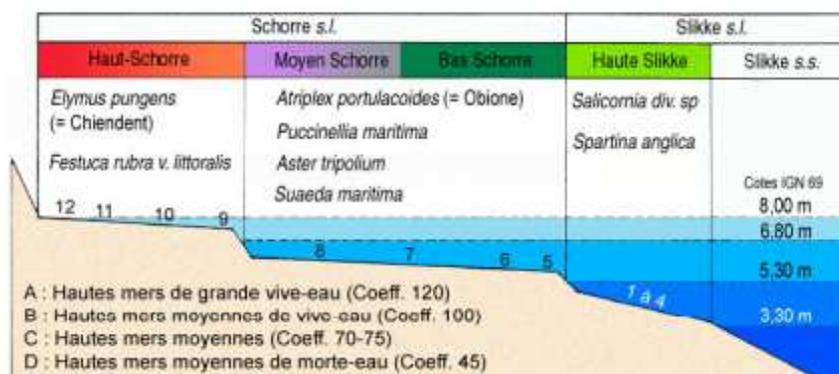


Figure 15: Schéma théorique de l'organisation des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel (Bonnot-Courtois & Levasseur, 2000).

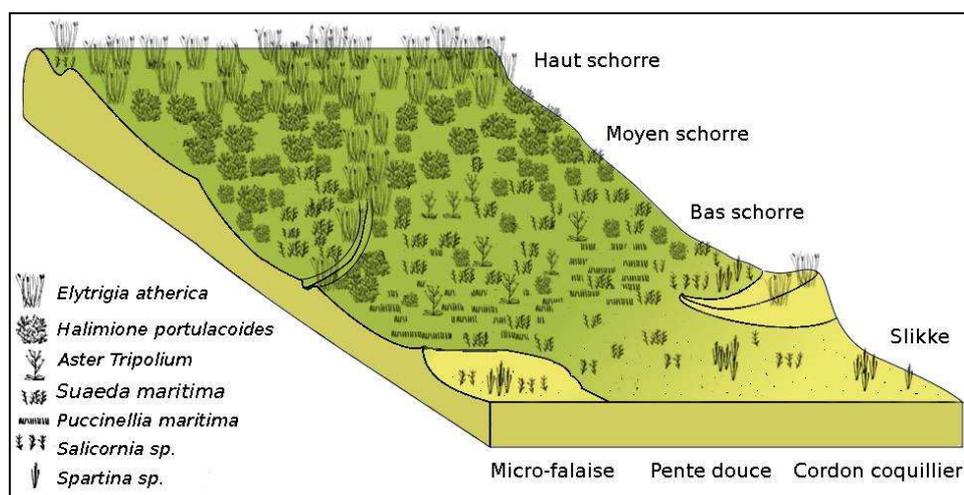


Figure 16 : Schéma théorique de l'organisation des marais salés. Trois types de limite slikke-schorre sont représentés.

Le schorre se présente comme une zone continûment végétalisée traversée de chenaux. On y rencontre principalement ((Bouchard *et al.*, 1995)(Bonnot-Courtois & Levasseur, 2000) ; Lefeuvre, 2003) : le Chiendent du littoral (*Elytrigia atherica*), la Fétuque (*Festuca rubra*), l'Obione (*Halimione portulacoides*), la Puccinellie (*Puccinellia maritima*), l'Aster (*Aster tripolium*) et la Soude (*Suaeda maritima*). On définit communément, en allant de la côte vers le large, le haut schorre, le moyen schorre et le bas schorre. La hauteur de la végétation est variable et décroît lorsqu'on s'éloigne de la côte : de environ 1 m pour les graminées du haut schorre, à quelques centimètres pour la Puccinellie du bas schorre. Le long de la Baie du Mont-Saint-Michel, le schorre peut être plus ou moins large, sa largeur pouvant atteindre plus de 2 km autour du Mont-Saint-Michel.

La slikke est une surface de sable nu où pousse une végétation pionnière composée essentiellement de Spartine (*Spartina sp.*) en touffe de 10 ou 20 cm de haut, ou de Salicorne (*Salicornia sp.*) d'environ 10 cm de haut.

La transition entre le schorre et la slikke (Figure 16) peut être progressive, lorsque l'on a une pente douce, ou au contraire brusque, dans le cas d'une micro-falaise ((Bonnot-Courtois *et al.*, 1999)). Dans certaines zones, le front est délimité par des cordons coquilliers qui recouvrent la végétation en avançant progressivement vers la côte, poussés lors de fortes tempêtes ((Bonnot-Courtois *et al.*, 2004)). Le type de limite slikke-schorre nous renseigne sur la dynamique du marais salés : on sera ainsi dans une situation d'érosion en cas de micro-falaise, ou d'accrétion (avancée du schorre) lorsque que la limite slikke-schorre est en pente douce (Kaveh & Deffontaines, 2008).

D'Est en Ouest et de la côte vers le large, les marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel sont donc composés d'une grande diversité de paysages. On peut se demander si ces paysages ont une réalité écologique : sont-ils le reflet de différences en termes de conditions de milieux, d'utilisation par l'homme? En écologie du paysage, un paysage se définit comme un ensemble d'écosystèmes, c'est-à-dire d'unités fonctionnelles homogènes et autonomes (Van Dyne, 1969) ; (Tansley, 1935). Pour comprendre la dynamique de la végétation de la Baie du Mont-Saint-Michel, nous allons chercher à identifier les différents paysages de la Baie. Godron (Godron, 1984) propose une méthode simple d'indentification des paysages : « il suffit de suivre l'ordre logique des déterminants écologiques des paysages, et de prendre en compte successivement le climat, la géomorphologie et l'influence de l'Homme ». En s'inspirant de cette méthode d'identification des paysages, nous pouvons donc faire la liste des facteurs influençant la présence des espèces végétales des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel, à petite, moyenne et grande échelle d'espace et de temps.

2.2.2. Les facteurs écologiques influençant la présence des espèces végétales des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel

2.2.2.1. Les facteurs écologiques

Un facteur écologique est un élément de l'environnement susceptible d'agir sur le développement d'un être vivant. On distingue les facteurs abiotiques, qui sont liés aux conditions physico-chimiques du milieu, et les facteurs biotiques, liés aux interactions entre les êtres vivants d'espèces différentes (interaction interspécifique) ou d'une même espèce (interaction intraspécifique). La séparation entre biotique et abiotique n'est pas si évidente, puisque la présence d'organisme peut influencer les paramètres physico-chimiques de l'environnement. Par ailleurs, on peut isoler le cas des facteurs anthropiques, qui sont les facteurs associés aux actions de l'homme.

Chaque espèce présente, vis-à-vis d'un facteur, des limites de tolérance entre lesquelles se situe son optimum écologique, c'est-à-dire un intervalle au sein duquel les valeurs du facteur permettent de façon optimale le développement de cette espèce (Figure 17). La valence est la capacité de cette espèce à vivre sur un intervalle plus ou moins large de valeur de ce facteur.

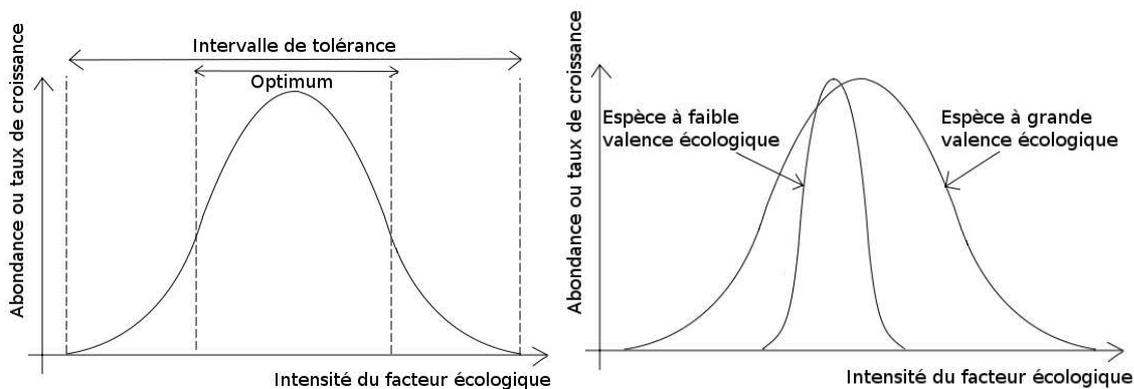


Figure 17: Courbe schématique montrant l'influence d'un facteur sur une espèce.

La distribution de plusieurs espèces selon l'intensité d'un facteur nous renseigne sur le type d'organisation qui les lie. Clements et Gleason oppose deux types d'organisation : pour Clements (Clements, 1936) ; (Clements, 1916) les espèces se regroupent en des associations correspondant à des unités discrètes, dont les frontières sont marquées. On a alors une organisation en communauté dite fermée. Les espèces d'une association végétale seraient alors étroitement liées et les limites de distribution de chacune correspondent à la distribution de l'association dans son ensemble (Figure 18). Cette théorie correspond à l'école des « Sigmatistes » chez qui le terme d'association végétale prend tout son sens. Pour Gleason

(Gleason, 1926; Gleason & Cronquist, 1964) au contraire, chaque espèce est distribuée indépendamment des autres, et les associations qui apparaissent sur le terrain sont la conséquence des adaptations des espèces leur permettant de vivre ensemble sous les conditions particulières qui caractérisent un endroit donné. On parle alors de communauté ouverte, dont les limites ne sont pas contraintes par les distributions écologiques des espèces qui les composent, lesquelles peuvent se retrouver indépendamment au sein d'autres associations (Figure 18). Ceci correspond au discours des « continuistes » pour lesquels les espèces se remplacent graduellement les unes aux autres le long des gradients de conditions physiques.

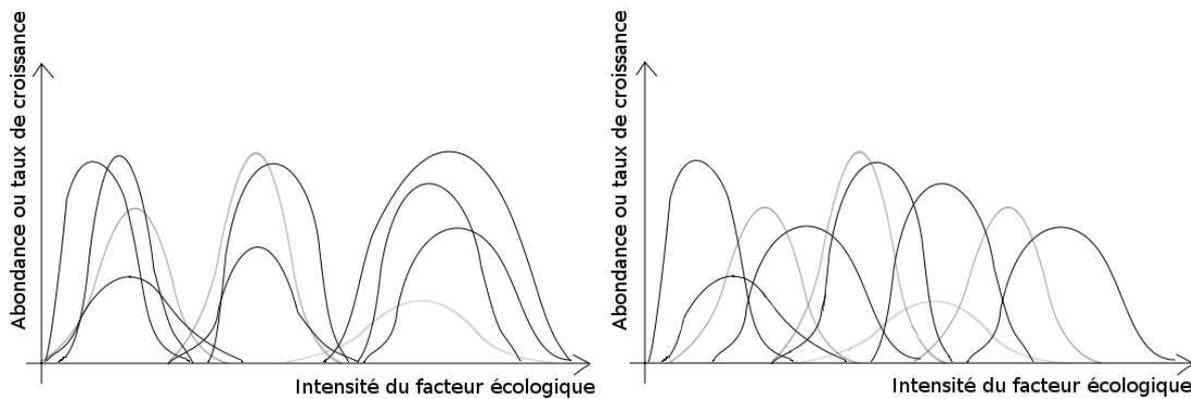


Figure 18: Distributions hypothétique d'une communauté fermée (à gauche) et d'une communauté ouverte (à droite).

L'analyse de l'organisation des espèces est compliquée dans la nature par le fait que les êtres vivants sont exposés de façon simultanée à l'action conjuguée de plusieurs facteurs. Il peut être difficile d'étudier l'influence d'un facteur sur un être vivant, celle-ci pouvant être modifiée par l'action d'un autre facteur. Il est donc important de lister dans un premier temps l'ensemble des facteurs susceptibles d'agir sur les espèces considérées.

2.2.2.2. Le climat

A petite échelle, le facteur déterminant la végétation est le climat. Ainsi, les marais salés sont présents principalement en région tempérée, et sous les tropiques, ce sont les mangroves qui couvrent les zones littorales présentant les mêmes conditions environnementales.

La zone étudiée dans ce travail, la Baie du Mont-Saint-Michel, présente un climat tempéré océanique doux (Tableau 1), avec des températures modérées et peu contrastées (environ 11° en moyenne sur une année). Les précipitations sont fréquentes, et réparties sur toute l'année. Le vent vient majoritairement de l'Ouest.

Tableau 1: Caractéristiques climatiques de la Baie du Mont-Saint-Michel (Caline, 1982).

Paramètre	Valeur
Température moyenne	11,5°C, tempéré
Précipitation moyenne	656 mm, répartie sur toute l'année
Insolation annuelle	1964 heures
Direction principale du vent	Vent d'ouest
Température de l'eau de mer	7°C-18°C
Salinité à la fin de l'hiver	34‰ à 35‰
Salinité en milieu d'été	34,5‰ à 36‰

Dans un des premiers ouvrages synthétiques sur l'écologie des marais salés, Ranwell (Ranwell, 1972) liste les paramètres climatiques pouvant avoir des effets sur la végétation des marais salés : il cite notamment les précipitations, la durée d'ensoleillement et la température. Les précipitations auraient ainsi une influence sur la germination de certaines plantes ayant lieu après la pluie, lors des baisses de salinités (Chapman, 1960). Par ailleurs, la sécheresse serait un facteur limitant pour certaines espèces de haut schorre, comme *Limonium vulgare* (Boorman, 1967). Pour cette même espèce, Boorman (Boorman, 1968) note l'influence de la durée d'ensoleillement pendant la floraison. Certaines espèces seraient également sensibles à la quantité de lumière, et survivent mal par exemple à l'ombre d'arbres ou si l'eau est turbide. Enfin, l'espèce *Halimione portulacoides* serait sensible à la température (Iversen, 1954).

Ces paramètres climatiques apparaissent homogènes sur l'ensemble de la Baie du Mont-Saint-Michel. Nous ne sommes donc pas dans le cas où la végétation est structurée par le climat, comme dans les zones montagneuses où la température varie avec l'altitude, qui est alors un facteur déterminant pour la végétation. Dans une zone mégatidale comme la Baie du Mont-Saint-Michel, l'altitude ne détermine pas la température, mais le temps et la fréquence d'immersion par l'eau de mer. C'est donc ce paramètre que nous allons analyser maintenant.

2.2.2.3. Les marées

Les marées sont dues à l'attraction des masses d'eau des océans par la Lune et le Soleil. La mer monte (c'est le flot) et descend (lors du jusant) au rythme des mouvements de ces astres. La rotation de la Terre sur elle-même engendre deux pleines mers et deux basses mers par jour. La durée de ce cycle journalier est de 12h25, ce qui correspond à un demi-jour lunaire, et entraîne un décalage progressif des heures de marées. L'amplitude des marées n'est pas constante : le marnage, qui est la différence de hauteur d'eau mesurée entre les niveaux d'une pleine mer et d'une basse mer successives, varie au cours de l'année. Tout d'abord, la rotation de la Lune par rapport à la Terre, et sa position par rapport au soleil, engendre un cycle mensuel : deux grandes marées, dites marées de Vives Eaux, sont enregistrées à la nouvelle Lune et à la pleine Lune. Deux petites marées, ou marées de Mortes Eaux correspondent au premier et dernier quartier de la Lune. Il existe de plus un cycle annuel : le changement de déclinaison de la Terre (angle observé entre le soleil et l'équateur) provoque de grandes marées aux équinoxes de printemps et d'automne, lorsque le Soleil est dans le plan de l'équateur. Au contraire les marées seront plus faibles aux solstices d'été et d'hiver, lorsque le plan du Soleil est plus haut ou plus bas que l'équateur.

Du fait de la faible profondeur de la Manche et de la forme en entonnoir des côtes, la Baie du Mont-Saint-Michel est soumise à des marées d'une ampleur exceptionnelle. Les marnages comptent parmi les plus élevés du monde : jusqu'à 15 m en Vives Eaux d'équinoxe. Chaque marée découvre environ 250 km² d'estran, dont la largeur peut atteindre 10 km.

Les mouvements montants et descendants de la mer font qu'un point donné de l'estran passera plus ou moins de temps sous l'eau, selon son altitude. On peut ainsi définir un indice d'immersion comme le pourcentage de temps que reste immergé un point donné de l'estran. La relation entre la végétation des marais salés et la fréquence d'immersion a fait l'objet de nombreuses études (Hindi 1954 ; Adams 1963 ; Chapman 1983). En effet, l'immersion par l'eau de mer est la contrainte majeure à laquelle doivent faire face les espèces végétales des marais salés. Cela correspond en fait à deux contraintes principales : le manque d'oxygène d'une part, et un taux de salinité important d'autre part.

Dans les sols gorgés d'eau des marais salés, la décomposition de la matière organique réduit le taux d'oxygène disponible, jusqu'à l'anaérobiose. Les plantes des marais salés présentent plusieurs adaptations à cette contrainte, telles que : des racines adventives, étendues et peu profondes, pour faciliter leur oxygénation ; la présence d'un parenchyme aëriifère, tissu spécialisé dans le transport passif de l'air entre les parties situées au-dessus du

sol et celles situées dans le sol (par exemple chez *Spartina sp.*) ; ou le développement de voies métaboliques anaérobiques (Bertness *et al.*, 2001).

Par ailleurs, la présence de sel dans l'eau de mer et dans le sol expose les plantes à deux dangers : premièrement l'abaissement du potentiel hydrique du sol, ce qui réduit l'approvisionnement en eau de la plante, deuxièmement l'absorption de sel dans les tissus, qui menace leur métabolisme. Les plantes halophiles, appelées les halophytes, peuvent vivre en présence de forts taux de salinité. Elles assurent leur approvisionnement en eau tout en maintenant leur bon fonctionnement physiologique grâce à certaines adaptations, notamment la présence d'organes végétatifs charnus, par exemple chez *Salicornia sp.* (Figure 19), *Suaeda maritima*, *Halimione portulacoides* et *Aster Tripolium*, ou la production d'osmoprotecteur, comme c'est le cas chez *Elytrigia atherica* (Leport et al. 2006, dans Lefeuvre).



Figure 19: *Salicornia sp.* présente des organes végétatifs charnus qui permettent sa survie sous de forts taux de salinité.

Le manque d'oxygène et le taux de salinité élevé ne sont pas les seules pressions auxquelles doivent faire face les plantes sur ce milieu très contraignant. Ainsi les courants d'eau qui mettent en mouvement les sédiments exposent les plantes à la fois au déchaussement et à l'ensevelissement. Pour lutter contre le déchaussement, certaines plantes présentent des racines pivotantes épaisses afin de permettre leur enracinement dans le sable. D'autres présentent des rhizomes très ramifiés, qui assurent la multiplication végétative de la plante malgré les épisodes de déchaussement/ensevelissement. Cette adaptation permet ainsi la survie de la plante, voire sa prolifération comme c'est le cas pour *Elytrigia atherica*, considéré comme une espèce invasive dans la Baie du Mont-Saint-Michel (Lefeuvre, Pa...)

Toutes les plantes de la Baie du Mont-Saint-Michel ne sont pas égales vis-à-vis de ces contraintes, et présentent une adaptation à l'immersion plus ou moins prononcée. Il en résulte une organisation spatiale des espèces végétales selon l'altitude, en ceintures parallèles à la côte. C'est ainsi que l'on distingue le haut schorre, le moyen schorre, le bas schorre et la slikke, décrits plus haut.

La propagation de l'onde de flot de l'Atlantique vers le Pas-de-Calais est freinée par les faibles largeurs et profondeurs de la Manche. Cela entraîne un grand décalage dans les heures de marée le long des côtes (quand la mer est haute en Bretagne, elle est basse dans le nord de la France), qui induit des courants forts à l'origine de mouvements sédimentaires importants. C'est sur le contexte sédimentaire et géomorphologique que nous allons maintenant nous concentrer.

2.2.2.4. Le contexte sédimentaire et géomorphologique

Certains auteurs ont noté la forte influence du drainage du sol sur la végétation des marais salés : de l'efficacité et de la rapidité plus ou moins grandes du ressuyage après inondation va dépendre le développement de plantes plus ou moins adaptées à ces conditions (Géhu & Géhu Franck, 1985). *Halimione portulacoides* (CHAPMAN, 1950) et *Elytrigia atherica* (Tessier, 1999) seraient par exemple présentes majoritairement sur les sols bien drainés, contrairement à *Puccinellia maritima*, rencontrée dans les dépressions (Géhu et Géhu Franck, 1985). Or, c'est le contexte sédimentaire et géomorphologique qui détermine le niveau de drainage. En particulier, la présence de sédiments grossiers, d'une pente, ou de chenaux, permettra un bon drainage du sol. Il est donc important de connaître les types de sédiments et les entités géomorphologiques présents sur la Baie du Mont-Saint-Michel.

La Baie du Mont-Saint-Michel peut être divisée en deux sous-ensembles morpho-sédimentaires, de part et d'autre de la Chapelle Sainte-Anne (Figure 20):

- La partie Ouest est protégée par le massif de Saint-Malo : cette zone de fond de golfe de forme concave est soumise à des courants de marées modérés, de type giratoire.
- La partie Est de la Baie est située face à l'ouverture de la Baie sur la mer et soumise à de violents courants de marées de type alternatif (va-et-vient NW-SE).

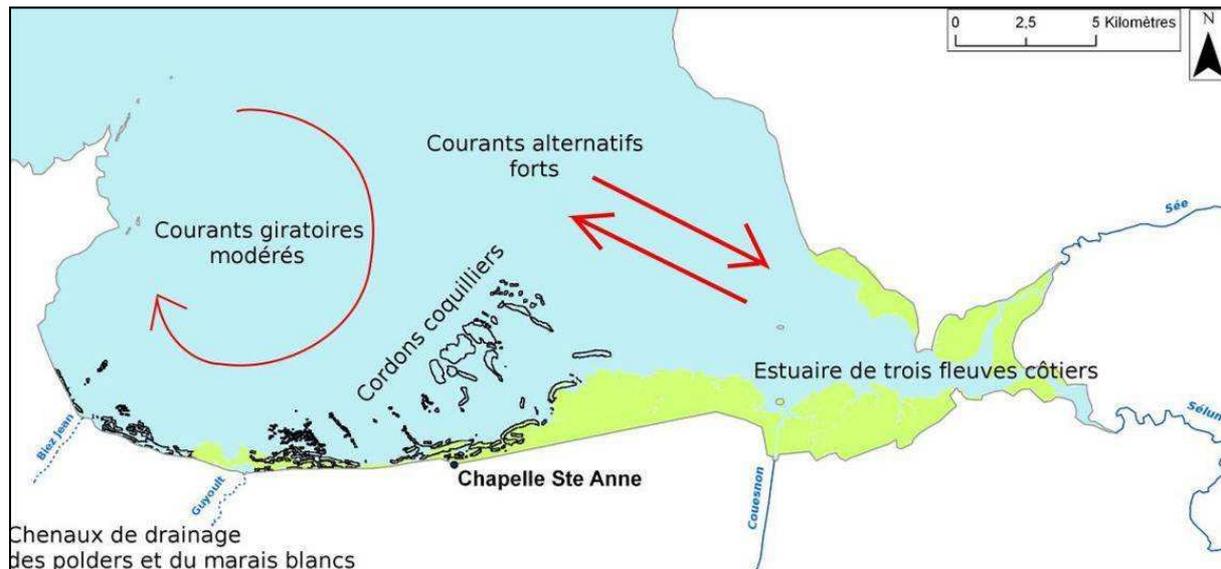


Figure 20 : Les deux sous-ensembles morpho-sédimentaires de la Baie du Mont-Saint-Michel, de part et d'autre de la Chapelle Sainte-Anne.

Le haut estran est composé de sédiments de diverses origines, natures et tailles. Dans un ordre granulométrique décroissant, on trouve des sables, de la tange et des vases. Les sables se retrouvent au niveau des bancs ou cordons coquilliers concentrés dans la partie Ouest de la Baie (Figure 19). Ils s'étendent parallèlement au rivage et sont poussés vers la côte par le courant. Ils sont formés de débris de coquille et de sable bioclastique. La tange est un dépôt sédimentaire détritique sablo-argileux de couleur grise, à teneur en calcaire élevée. Sa granulométrie est intermédiaire entre celle des vases et celles des sables. Elle se caractérise par un doublet sédimentaire : un lit clair de sable est déposé par le courant de flot, puis l'absence de courant à l'étape permet la sédimentation de l'argile, sous forme d'un lit plus sombre. Cette succession de couches claires et foncées correspond donc au rythme des marées (Figure 22). Les vases, elles, se déposent dans des conditions de courant particulièrement calme, par exemple en arrière des cordons coquilliers ou dans des dépressions d'eau stagnante (Figure 21).

Les sédiments sont donc le reflet de l'hydrodynamisme de la Baie. Ils peuvent être à l'origine de certains objets géomorphologiques, tels que les cordons coquilliers, ou peuvent en être la conséquence, comme dans les vasières en arrière des cordons.



Figure 21 : Vue d'un cordon coquillier et d'une vasière.



Figure 22 : photographie permettant de voir le litage de la tange.

De nombreuses entités géomorphologiques se rencontrent dans la Baie : cordons coquilliers, chenaux, mares, buttes.... En un point donné, la présence d'une entité géomorphologique définit la microtopographie, et aura une grande influence sur la végétation (Géhu & Géhu Franck 1985).

La géomorphologie peut donc perturber l'organisation de la végétation définie selon l'altitude. Elle semble un facteur environnemental majeur pour expliquer la présence des différentes espèces végétales de la Baie du Mont-Saint-Michel. Pour compléter cette revue des facteurs influençant la présence des espèces végétales sur les marais salés, nous allons maintenant nous intéresser à l'influence de l'eau douce et des cours d'eau.

2.2.2.5. Les cours d'eau

En ce qui concerne son fonctionnement hydrologique, la Baie du Mont-Saint-Michel peut également être divisée en deux parties (Figure 20).

La partie Ouest est un golfe non estuarien où les apports sédimentaires continentaux se limitent à quelques chenaux de drainage des polders et du marais blanc de Dol, qui débouchent sur la Baie au niveau de vannes. Il existe deux débouchés principaux : le Biez Jean à Saint-Benoit-des-Ondes et le Guyoult au Vivier sur Mer. On peut voir que des marais salés se développent aux abords de ces débouchés, plus particulièrement sur la rive droite, à l'Est. Ceci est dû à la remobilisation des sédiments du fond des chenaux lors de la marée haute, ceux-ci étant poussés vers l'Est par les vents d'Ouest (Verger, 2005).

La partie Est de la Baie correspond à l'estuaire commun de trois cours d'eau : le Couesnon, la Sélune et la Sée. Selon Caline (1981), les débits de ces fleuves sont respectivement de $20\text{m}^3/\text{s}$ pour le Couesnon et la Sélune, et $8\text{m}^3/\text{s}$ pour la Sée. Ces fleuves abaissent le taux de salinité des marais salés qu'ils traversent, ce qui peut avoir pour conséquence l'installation d'espèces végétales ne pouvant supporter qu'un faible taux de salinité, appelées glycophytes. De plus, en drainant leurs bassins versants respectifs, ces fleuves côtiers sont responsables d'apports en nitrates importants, et donc d'un phénomène d'eutrophisation. Or la tolérance à un fort taux de salinité d'*Elytrigia atherica* est liée à la présence d'azote dans le milieu (Leport, 2006). L'apport en nitrates a donc pour conséquence la prolifération de cette espèce indigène, maintenant classée comme une espèce invasive (Valéry, 2006). Les nitrates pourraient également avoir un effet positif sur *Puccinellia maritima*, et un effet négatif sur *Suaeda maritima* (Tessier 2003). Enfin, il faut noter également que la force du courant de ces fleuves peut perturber le développement de la végétation. On observera ainsi un sol nu sur les rives à une altitude susceptible d'accueillir de la végétation (Bonnot-Courtois & Lefeuvre 2000).

La présence de débouchés de fleuves ou de chenaux de drainage peut donc avoir une influence sur le développement de la végétation.

Après avoir passé en revue différents facteurs abiotiques (le climat, les marées, le contexte sédimentaire et géomorphologique, le débouché de cours d'eau), nous allons voir l'influence des facteurs biotiques.

2.2.2.6. Les facteurs biotiques

La répartition de la végétation est déterminée par des facteurs abiotiques, mais également biotiques (Tessier, 1999) : si les limites inférieures de la répartition des espèces sont déterminées par leur tolérance aux conditions physiques, les limites supérieures seraient déterminées par la compétition dans un environnement stressant (Snow & Vince 1984, Bertness & Ellison 1987, Bertness 1981, Pennings & Callaway 1992). On définit ainsi la niche fondamentale d'une espèce, et sa niche réalisée.

Bertness (1991a) met par exemple en évidence le fait que la zonation entre *Spartina patens* et *Spartina alterniflora* est due à la compétition interspécifique : *Spartina patens* est sensible à l'immersion et ne peut se développer qu'à des altitudes relativement élevées, tandis que *Spartina alterniflora* est moins sensible au condition de milieu et peut se développer sur une large plage d'altitude, mais on ne la trouve pas à des altitudes élevées car elle entre en compétition avec *Spartina patens*. C'est donc les conditions du milieu qui limitent *Spartina patens* aux hautes altitudes, alors que c'est la compétition interspécifique qui limite *Spartina alterniflora* aux basses altitudes.

Bertness (1991a) suggère également que le développement de *Spartina alterniflora* à de basses altitudes dépend de la taille du groupe de plantes : un groupe de plantes se développerait mieux qu'un pied isolé car l'ensemble des racines créeraient des conditions de milieu particulières. Il pourrait donc également y avoir des interactions positives, ou facilitation, entre les plantes des marais salés. Ceci peut se faire entre plantes d'une même espèce, par amélioration des conditions de salinité comme le cas vu plus haut, ou par piégeage des sédiments par les racines, et donc exhaussement de la zone, ce qui assure à la plante des conditions moins stressantes (Morris, 2006). Ces phénomènes de facilitation ont également lieu entre espèces, puisque les espèces pionnières facilitent l'installation d'autres espèces (Bertness, 1991b).

Ainsi dans ce milieu stressant structuré par le gradient de salinité, la limite supérieure de la répartition des espèces serait déterminée par la compétition, tandis que la limite inférieure serait définie par les conditions de milieu, des phénomènes d'interaction positive pouvant alors intervenir et faciliter la présence de plantes dans ces conditions de milieu extrêmes (Bertness, 1991b).

2.2.2.7. Les facteurs anthropiques

Les interventions de l'homme sur les marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel sont très anciennes. L'utilisation des marais pour le pâturage ovin est notée dès le Moyen Âge (Lefeuvre, Patrimoine...). Trois types de pâturage se rencontrent dans la Baie : ovin, bovin et équin. Il se concentre à l'Est de la Baie du Mont-Saint-Michel, dans la région des estuaires.

De nombreuses études se sont intéressées à l'effet du pâturage sur la végétation des marais salés. Du fait de la différence d'appétence des troupeaux pour les espèces végétales des marais salés, le pâturage peut avantager ou défavoriser une espèce végétale. Ainsi Guillon (1980) classe les espèces de la Baie : on trouve, dans un ordre d'appétence décroissant, *Puccinellia maritima*, *Halimione portulacoides*, *Festuca rubra*, *Suaeda maritima*, *Salicornia sp.* *Puccinellia maritima* est l'espèce la plus favorisée par le pâturage, au détriment de *Halimione portulacoides* (Tessier, 2003). (Bouchard *et al.*, 2003) a mis en évidence sur la Baie du Mont-Saint-Michel le fait qu'un pâturage modéré favorise la diversité végétale, alors que le surpâturage conduirait à l'appauvrissement en termes de nombre d'espèces végétales. D'autres auteurs sont arrivés aux mêmes conclusions sur d'autres marais salés, et préconisent un pâturage extensif, une faible densité d'animaux permettant de maintenir une certaine diversité végétale (Baseker *et al.* 1989 et 1993, Anderson *et al.* 1981, in Tessier 1999). D'autres, au contraire, encouragent la suppression totale du pâturage, en particulier pour le maintien des invertébrés (Kirchl *et al.* 1996, in Tessier 1999).

La fauche y a également cours en certains endroits de la Baie. Elle favoriserait *Festuca rubra* par rapport à *Elytrigia atherica* (Tessier, 1999).

La chasse est une autre activité anthropique modifiant les marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel. La création de mare artificielle pour la chasse au gabion remonte à 1947 (Lefeuvre, Patrimoine...). On peut imaginer que du fait de la présence permanente de l'eau dans ces mares, leurs abords accueillent des espèces normalement présentes à des altitudes plus faibles, où elles sont plus fréquemment immergées.

Les activités anthropiques transforment la Baie depuis des siècles, et l'on peut s'attendre à ce que l'organisation de la végétation reflète les actions des hommes sur les marais salés.

2.2.2.8. Synthèse

Nous venons de passer en revue les facteurs pouvant influencer l'organisation de la végétation de la Baie du Mont-Saint-Michel. Le va-et-vient des marées est responsable de la contrainte physique majeure à laquelle les espèces végétales des marais salés doivent faire face : l'immersion par l'eau de mer. Cette contrainte organise la végétation en ceintures parallèles à la côte, selon l'altitude. Mais cette organisation peut être modifiée par la géomorphologie, notamment les cordons coquilliers de l'Ouest de la Baie, ou par la présence de débouchés de cours d'eau comme c'est le cas à l'Est, au niveau des estuaires du Couesnon, de la Sée et de la Sélune. Le pâturage, qui se concentre à l'Est de Baie, peut également avoir une influence sur le développement de la végétation. Les différents contextes géomorphologiques, sédimentaires et hydrologiques, ainsi que le pâturage définissent donc des zones de dynamique différente d'Ouest en Est de la Baie. Enfin, les interactions interspécifiques et intraspécifiques, positives et négatives, peuvent influencer l'organisation des plantes.

Les espèces végétales de la Baie du Mont-Saint-Michel semblent donc influencées par de nombreux facteurs. Est-il possible de définir les valeurs préférentielles de ces facteurs pour chaque espèce végétale ? La présence d'une espèce est elle un bon indicateur de l'environnement ? C'est grâce à une importante base de données spatialisées que nous allons tenter de répondre à cette question, et notamment grâce à des données de télédétection.

2.3. La télédétection et ses applications à l'étude des marais salés

2.3.1. Bases de la télédétection

La télédétection est la science qui regroupe les techniques permettant la détermination à distance des caractéristiques d'un objet. Elle permet plus particulièrement l'étude des caractéristiques de la surface ou de l'atmosphère de la Terre ou d'une autre planète. La télédétection est de plus en plus utilisée pour l'étude de l'environnement, car elle permet de d'acquérir des données à une fréquence élevée, sur des surfaces de taille importante, et dans des régions parfois difficilement accessibles. Les données acquises par télédétection peuvent permettre, dans un ordre d'effort de compréhension et de synthèse croissant, (1) la description d'un état, (2) la comparaison entre les états à plusieurs dates, pour la quantification de l'évolution d'un phénomène, et (3) la recherche des agents expliquant l'évolution de ce phénomène. Pour ces raisons, la télédétection est un outil essentiel à la compréhension de la dynamique de la Terre.

L'acquisition de données de télédétection se fait par l'utilisation d'instruments de mesure de rayonnements électromagnétiques. Une onde électromagnétique est la propagation d'une variation du champ électrique et du champ magnétique (Figure 23). Elle est définie par sa longueur d'onde λ , qui est la plus courte distance séparant deux points de l'onde identiques. L'étude du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par l'objet étudié permet de déterminer certaines de ses caractéristiques, comme sa nature, sa distance ou sa vitesse.

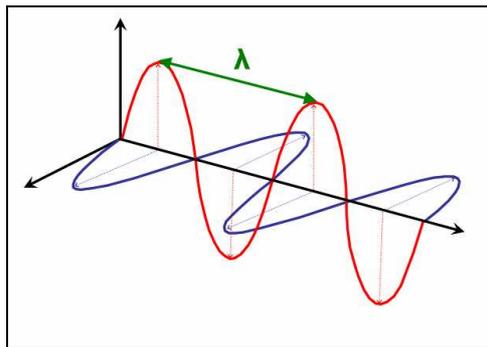


Figure 23 : Un rayonnement électromagnétique correspond à la propagation de la variation d'un champ électrique (en rouge) et d'un champ magnétique (en bleu). Il est défini par sa longueur d'onde λ , la plus courte distance séparant deux points identiques.

La télédétection est dite passive si l'instrument de mesure n'est pas la source des rayonnements mais qu'il en existe une autre, qui est généralement le soleil (Figure 24). C'est le cas de la télédétection optique. Une image satellite ou aérienne optique permet ainsi de distinguer les objets d'une scène selon les longueurs d'onde qu'ils réfléchissent. Dans les longueurs d'onde du visible ($\lambda = 380$ à 780 nm), cela correspond à leur couleur. Mais d'autres longueurs d'onde sont également utilisées, comme l'infrarouge. Une image optique correspond en fait à la superposition de plusieurs images, appelées canaux, correspondant chacun à l'enregistrement de la luminance, c'est-à-dire la quantité d'énergie réfléchie, sur une plage de longueur d'onde donnée.

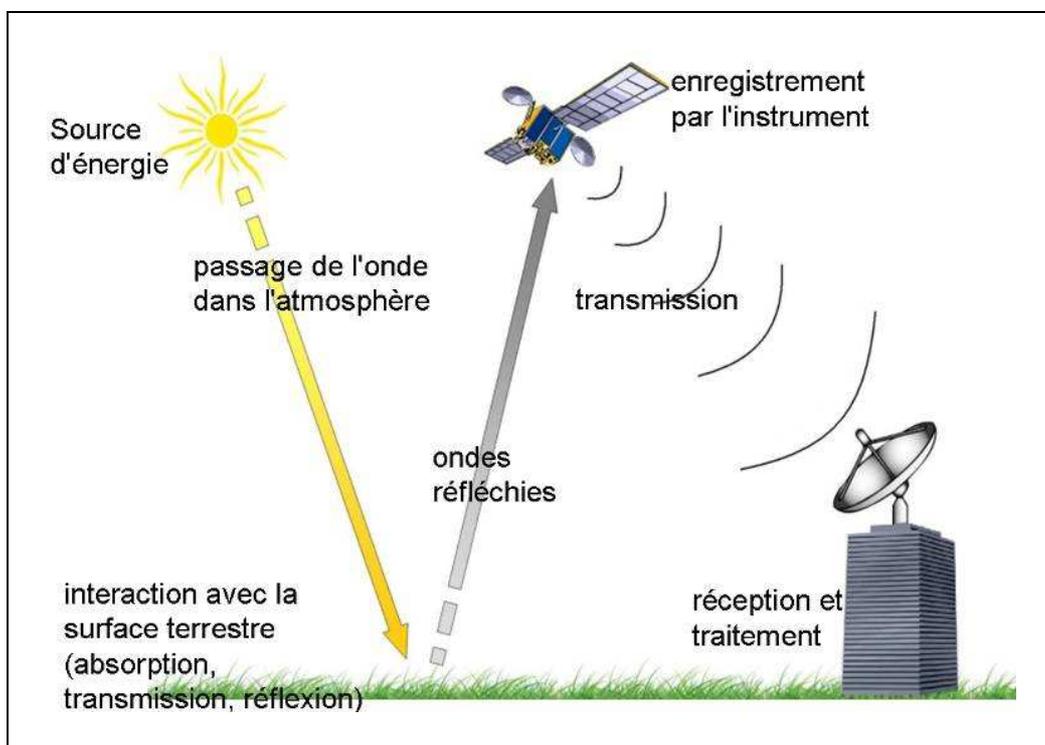


Figure 24 : Schéma récapitulant les étapes de la télédétection passive.

Dans le cas où l'instrument enregistre le retour de rayonnements électromagnétiques qu'il a lui-même envoyés, la télédétection est dite active. Le RADAR et le LiDAR sont deux techniques de télédétection active qui utilisent des types d'onde différents : le RADAR utilise des ondes électromagnétiques non polarisées, dont la longueur d'onde est supérieure à $0,1$ mm (ondes radio), tandis que le LiDAR utilise des lasers, c'est-à-dire des ondes polarisées, de longueur d'onde assez courte (généralement dans le visible ou l'infrarouge). C'est ce dernier type de télédétection que nous allons détailler dans le paragraphe suivant, car c'est celui qui a été majoritairement utilisé dans cette étude.

2.3.2. Le LiDAR

2.3.2.1. Le Lidar, les LiDAR

Le LiDAR (Light Detection And Ranging) est une technique qui permet la détermination des caractéristiques d'un objet rencontré par un faisceau laser. Cette technique a vu le jour dès la découverte du laser dans les années 50, mais son essor n'a réellement eu lieu que dans les années 80, grâce au développement des technologies annexes, comme le GPS.

Il existe deux grands domaines d'application du LiDAR : l'étude de l'atmosphère et l'étude des surfaces, la principale différence entre les deux techniques étant la taille des objets étudiés. Ainsi le LiDAR atmosphérique permet l'analyse des molécules (taille proche de 0,1 nm) et des particules (taille comprise 0,1µm et 1mm) présentes dans l'atmosphère. L'analyse de la diffusion, de l'absorption, du changement de longueur d'onde ou de fréquence du rayonnement laser envoyé peut aboutir à des applications aussi variées que l'étude des polluants atmosphériques, la détection de poussières volcaniques, la caractérisation des nuages et du vent, ou l'étude des turbulences autour des avions. Les LiDAR de surface quant à eux permettent principalement la caractérisation de la forme d'une surface, pour sa cartographie. Selon que l'instrument LiDAR soit installé au sol ou sur le toit d'une voiture, ou encore aéroporté par un hélicoptère, un avion ou un satellite, la surface étudiée peut être de taille très variable : on peut ainsi par exemple reproduire la forme d'un objet, de bâtiments pour la cartographie d'un site archéologique ou l'étude d'une zone urbaine, de l'intérieur d'une mine pour le calcul de la quantité de matière extraite, ou de la surface de la terre pour des études topographiques ou la gestion forestière. Cette technique offre ainsi de nombreuses applications, notamment en topographie, géologie, urbanisme, archéologie, et écologie : détection des bâtiments (Haala & Brenner, 1999)(Priestnall *et al.*, 2000), repérage de sites archéologiques potentiels (Bilodeau, 2008) ; gestion des ressources en eau (Ritchie, 1996), étude des écoulements d'eau et zones inondables (Cobby *et al.*, 2001), et étude de la végétation, notamment détermination de la hauteur de la canopée et de la biomasse (Genç *et al.*, 2004); (Hopkinson *et al.*, 2006).

Nous décrirons ici uniquement les techniques de LiDAR surfacique altimétrique, qui permettent la mesure de l'altitude d'un terrain.

2.3.2.2. Le principe du LiDAR

Le LiDAR est basé sur l'envoi d'un laser et l'analyse de la partie réfléchiée par les surfaces rencontrées par l'onde. Pour chaque impulsion laser envoyée, l'instrument mesure le temps mis par l'onde à faire l'aller-retour jusqu'à l'objet cible. Dans l'air ($n=1$), l'onde laser se déplaçant à la vitesse de la lumière ($c=3 \times 10^8$ m/s), la durée de l'aller-retour (τ) est convertie en distance entre l'instrument et la cible (ρ) grâce à la formule de l'équation (1):

$$\rho = \frac{c}{n} \frac{\tau}{2} \quad (1)$$

Connaissant la position de l'instrument, on peut alors obtenir la position x, y, z de la cible.

2.3.2.3. L'instrument LiDAR

L'instrument LiDAR est composé d'un émetteur et d'un récepteur de laser (le plus souvent en proche infrarouge). Installé à bord d'un avion (Figure 25) ou d'un hélicoptère, il est appelé laser aéroporté (en anglais ALS pour Airborne Laser-scanners). L'instrument est complété d'un système de positionnement GPS (couplé à une station GPS au sol) et d'une centrale de navigation interne (INS pour Inertial Navigation System). Ainsi, la position de l'appareil, sa vitesse, les changements d'attitude (roulis, lacet, tangage) et la direction d'envoi des impulsions laser sont connus en chaque instant. Différents systèmes (Wehr & Lohr, 1999)), comme le miroir rotatif, permettent un balayage de la zone perpendiculaire à l'axe de vol : les mesures couvrent ainsi une plus grande surface en moins de temps.

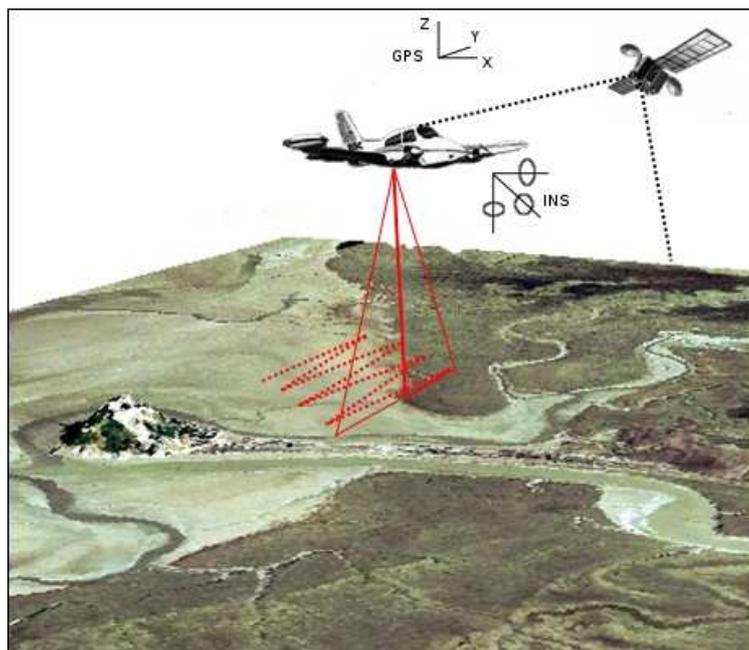


Figure 25 : Schéma de l'acquisition de données altimétriques LiDAR.

2.3.2.4. Les données LiDAR

La position de l'instrument, la direction d'émission des impulsions laser, et le temps de l'aller-retour de l'onde permettent de localiser précisément la surface cible dans l'espace, et ainsi d'obtenir son altitude. Les précisions attendues sont de l'ordre du centimètre en planimétrie (x,y), et du décimètre en altimétrie (z) (Ackermann, 1999) ; (Hodgson & Bresnahan, 2004). Les sources d'imprécisions peuvent venir (Huising & Gomes Pereira, 1998) : des instruments de mesures, de la traversée de l'atmosphère par le signal, et surtout du type de surface cible, notamment à cause de la présence de végétation (Ahokas *et al.*, 2003) ; Pfeiffer, 2004).

Les données LiDAR se présentent sous la forme d'un tableau de coordonnées x, y, z, l'intensité de l'onde retour pouvant également être enregistrée et servir à la caractérisation des terrains (Wehr & Lohr, 1999). Le LiDAR émettant généralement entre 10 000 et 30 000 impulsions par seconde (De Joinville *et al.*, 2002), il est alors possible de mesurer l'altitude d'un terrain en un grand nombre de points, la densité de points au sol étant généralement de l'ordre de 0,1 à 5 points par m² (De Joinville *et al.*, 2002); (Bergeon, 2004), mais pouvant être plus élevée selon les besoins. Une interpolation, c'est-à-dire la détermination de valeurs inconnues à partir des valeurs du voisinage, permet d'obtenir l'altitude sur une grille régulière à partir du semis de points. Le résultat se présente sous forme d'une matrice de pixels, chaque pixel ayant une valeur d'altitude. Ce format est moins lourd et plus pratique pour les calculs et la visualisation que le semis de points. Selon les cas, il s'agit d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), donnant l'altitude du terrain en tout point, ou d'un Modèle Numérique de Surface (MNS) qui représente le terrain et les objets situés dessus (bâtiment, végétation...).

2.3.2.5. Les échos multiples et les différents types de LiDAR

La surface couverte par une impulsion, que l'on appelle empreinte au sol, correspond à un cercle de 20 à 30 cm de diamètre en moyenne (Baltsavias, 1999). L'impulsion peut donc être réfléchi par plusieurs surfaces situées à l'intérieur de ce cercle, et elle engendre alors plusieurs échos. Ceci se produit principalement au niveau de la végétation et des bords de bâtiments. Par exemple, lors de l'acquisition de données LiDAR au-dessus d'une forêt, une partie de l'impulsion est réfléchi par la végétation, tandis que le reste la traverse avant d'être réfléchi par le sol. Chaque surface rencontrée par l'onde correspond à un écho, ce qui permet de distinguer des structures situées sous couvert végétal. Ce phénomène se produit si les surfaces rencontrées sont assez éloignées l'une de l'autre, sinon il y a recouvrement entre les deux échos et on ne peut plus les distinguer. Pour qu'il n'y ait pas recouvrement, il faut que le

temps mis par l'onde pour aller d'une surface à l'autre ($\tau_{12}-\tau_{11}$) soit supérieur à la durée de l'impulsion (t_p) (Figure 26).

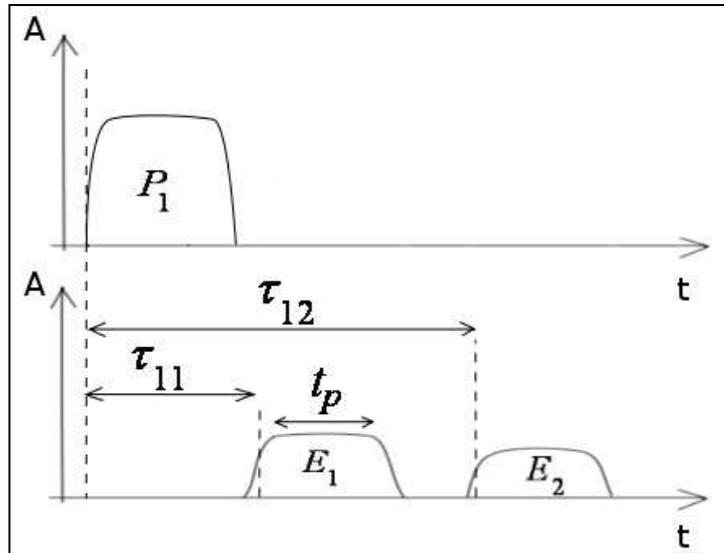


Figure 26 : Valeurs caractéristiques d'une impulsion (P_1) et de ses échos (E_1 et E_2)

Il faut donc que :

$$\tau_{12} - \tau_{11} \geq t_p \quad (2)$$

En reprenant l'équation (1), on a :

$$\tau = 2 \rho \frac{n}{c} \quad (3)$$

Si on appelle ρ_{12} et ρ_{11} les distances entre l'instrument LiDAR et les surfaces rencontrées, l'équation (3) devient :

$$2 \rho_{12} \frac{n}{c} - 2 \rho_{11} \frac{n}{c} \geq t_p \quad (4)$$

D'où :

$$\rho_{12} - \rho_{11} \geq \frac{1}{2} \frac{c}{n} t_p \quad (5)$$

Il faut donc que les surfaces rencontrées soient éloignées d'au moins $\frac{1}{2} \frac{c}{n} t_p$, c'est-à-dire d'au moins la moitié de la distance correspondant à la durée d'impulsion (Vosselman&Maas, 2009). La durée d'impulsion étant généralement comprise entre 3 et 12 ns (Baltsavias, 1999), la distance minimale entre deux surfaces identifiables est donc comprise entre 0,45 et 1,8 m.

Certains instruments LiDAR enregistrent le premier et le dernier écho, ce qui permet d'avoir d'une part une hauteur approximative de la canopée, d'autre part l'altitude du sol ou la hauteur du bâti. D'autres peuvent enregistrer jusqu'à 5 échos (De Joinville *et al.*, 2002), ce qui donne une description plus détaillée de l'organisation verticale de la zone. Enfin, une dernière génération d'instruments LiDAR, appelé LiDAR à retour d'onde complète (full-waveform), enregistre en continu l'ensemble de l'onde réfléchiée (Wagner *et al.*, 2006), ce qui permet une analyse fine de l'onde et nous renseigne sur les propriétés physiques et géométriques des surfaces cibles.

Parfois, comme c'est le cas en zone de végétation dense, une impulsion peut être entièrement réfléchiée avant d'atteindre le sol. Différentes techniques de filtrage de la végétation peuvent alors être appliquées pour corriger la surestimation de l'altitude du sol due à la présence de végétation (Axelsson, 1998) ; Pfeifer *et al.*, 2004; (Wagner *et al.*, 2004).

2.3.2.6. L'acquisition de données LiDAR

Pour certains pays comme les Pays Bas ou la Suisse, l'acquisition de données LiDAR sur l'ensemble du territoire est en cours. Pour les autres, l'acquisition de données LiDAR nécessite la commande d'une campagne de vol auprès d'une entreprise spécialisée (Balsavias, 1999). Pour organiser une mission, plusieurs paramètres doivent être déterminés avec l'entreprise réalisant la mission, selon l'utilisation future des données : zone survolée, densité de points, nombre d'échos enregistrés...

Ces missions coûtant assez cher (Balsavias, 1999), en particulier à cause de la location de l'avion, il est intéressant de coupler plusieurs études sur une même zone, puisque les données LiDAR peuvent être utilisées pour de nombreuses applications.

2.3.3. Applications de la télédétection à l'étude des marais salés

La majorité de la population mondiale se concentre sur les côtes, et cette surpopulation engendre des pressions importantes sur ces milieux fragiles. Dans le but de comprendre les phénomènes qui régissent l'évolution des côtes, et d'anticiper les risques auxquels ces populations devront faire face dans un avenir proche, la télédétection appliquée aux milieux littoraux s'est considérablement développée ces dernières années. Dès 1989, Verger (Verger F., 1989) liste comme principaux obstacles à l'application de la télédétection en milieu littoral :

-les marées, dont les mouvements doivent être pris en compte pour réaliser une acquisition au moment où la surface émergée sera maximale ;

- l'absence de points de repère permettant de recalibrer les images (points amers) afin de vérifier leur positionnement géographique ;
- les phénomènes de réflexion spéculaire sur le sable qui peuvent affecter l'image,
- et la difficulté d'acquérir des images des fonds marins par bathymétrie.

Depuis 1989, les techniques de télédétections et de positionnement se sont considérablement améliorées, permettant de réduire les contraintes des trois derniers points. Par contre, les marées sont évidemment toujours un point essentiel à considérer pour l'acquisition d'image de télédétection sur les côtes (Deroin, 2009).

Une autre spécificité de la télédétection en zone littorale est qu'elle concerne l'interface entre le domaine marin et le domaine terrestre, et que la référence altimétrique de ces deux domaines n'est pas la même. Il existe d'une part le zéro des cartes marines, ou zéro hydrographique, qui correspond au niveau des plus basses mers, et qui est défini par le SHOM et calculé à partir de marégraphes locaux. D'autre part, le zéro des cartes terrestres est donné pour toute la France par le niveau moyen de la Méditerranée mesuré par le marégraphe de Marseille, et définit la référence du Nivellement Général de la France (NGF) géré par l'IGN, appelé IGN69. La différence de hauteur entre les deux zéros est donc variable d'un port à l'autre. Il est donc essentiel de considérer cette question lors de l'intégration de données provenant à la fois du domaine marin et du domaine terrestre (Kaveh & Deffontaines, 2005).

Les applications de la télédétection optique aux milieux littoraux concernent trois domaines : l'hydrographie, la géomorphologie, et l'étude de la végétation (Verger F., 1989). Les applications du LiDAR altimétrique aéroporté à l'étude du littoral se sont également développées depuis la naissance de cette technique et concerne les mêmes domaines. Plusieurs études traitent par exemple de la géomorphologie de l'estran (Lohani & Mason, 2001), du trait de côtes (Gibeaut *et al.*, 2003), de la cartographie des dunes et de leur dynamique (Rango *et al.*, 2000);(Saye *et al.*, 2005), ou encore de la bathymétrie en zone peu profonde (Guenther *et al.*, 2000); (Wang & Philpot, 2007).

En parallèle, l'étude de la végétation par LiDAR s'est intéressée principalement à la détermination de la hauteur de la végétation, aussi bien en milieux forestier qu'en zone humide (MacKinnon, 2001) ; (Genç *et al.*, 2004) ; Hopkinson *et al.*, 2004b ; (Hopkinson *et al.*, 2006), ainsi qu'en milieu agricole (Davenport *et al.*, 2000).

Combinant ces deux domaines, l'étude de la végétation des marais salés par LiDAR s'est développée, notamment en ce qui concerne les relations entre les plantes et l'altitude (Paine *et al.*, 2004; Morris, 2007), ainsi que la texture des données LiDAR acquises au-dessus

de la végétation des marais salés (Barreau *et al.*, 2001; Rosso *et al.*, 2006). Dans certaines de ces études, il a été mis en évidence que la végétation des marais salés pouvait engendrer un biais dans les données en arrêtant le faisceau lidar avant qu'il atteigne le sol (Populus *et al.*, 2001; Rosso *et al.*, 2006). Malgré ce problème, plusieurs études mettent en évidence le potentiel des données LiDAR à l'amélioration des résultats de classification automatique de la végétation des marais salés (Barreau *et al.*, 2001; Collin *et al.*, 2010; Morris *et al.*, 2005; Paine *et al.*, 2005).

Les données LiDAR présentent donc un fort potentiel pour répondre à plusieurs points de la problématique de cette étude : l'étude de l'influence de l'altitude sur l'organisation de la végétation des marais salés, et l'amélioration des techniques de cartographies. Accompagnées de données optiques, les données LiDAR acquises sur la Baie du Mont-Saint-Michel constituent une base d'étude formidable pour comprendre les processus à l'origine de l'organisation des marais salés.

3. Présentation des données et des méthodes

3.1. Les données brutes

3.1.1. Les données de végétation

Nous disposons, d'une part, d'un ensemble de transects de végétation par points contact réalisés par Marianne Cohen (UMR Ladyss, Université Paris 7 - Diderot) et ses étudiants, d'autre part, d'une carte de la végétation réalisée par Alain Radureau & Benoît Lefeuvre à partir d'observations sur le terrain et de photo-interprétation (Alain Radureau, Université Rennes I INRA-SAD, communication personnelle).

3.1.1.1. Les transects

Un transect est un ensemble de points d'observation situés à intervalles réguliers le long d'un tracé linéaire. Ce dispositif, lorsqu'il est réalisé parallèlement à la direction de variation d'un paramètre de l'environnement, permet de tester l'existence d'organisation spatiale des entités étudiées par rapport au paramètre en question. Ainsi dans cette étude, les transects ont été réalisés parallèlement au gradient de salinité allant de la terre à la mer, c'est-à-dire perpendiculairement à la côte, le long de décamètres posés sur le sol tous les 50 m (Figure 27, 28, 29). Des observations de la végétation et des conditions du milieu ont été réalisées tous les deux mètres (Annexes). L'inventaire de la végétation s'est fait par point-contact matérialisés par la pénétration d'une aiguille à tricoter dans le tapis herbacé (Daget & Poissonet, 1995). Les espèces entrant en contact avec l'aiguille sont considérées comme contributives au recouvrement herbacé et ont été indiquées par chiffre 2 : elles seront appelées espèces « dominantes ». Les espèces rencontrées entre deux points de sondage et sur une bande de deux mètres de long sur 0,10 m de large ont été indiquées par le chiffre 1 (espèce « présente »).

L'ensemble des points GPS des 28 transects a été rassemblé et géoréférencé avec le même système de coordonnées. Nous avons effectué quelques corrections et élimination de points aberrants. Les transects de végétation ont ensuite été reconstitués dans un SIG (ESRI® ArcGis 9.2) à partir des coordonnées GPS acquises tous les 50 m : des points tous les deux mètres ont été créés automatiquement sous ArcGis le long des transects, et les données floristiques correspondantes y ont été associées.

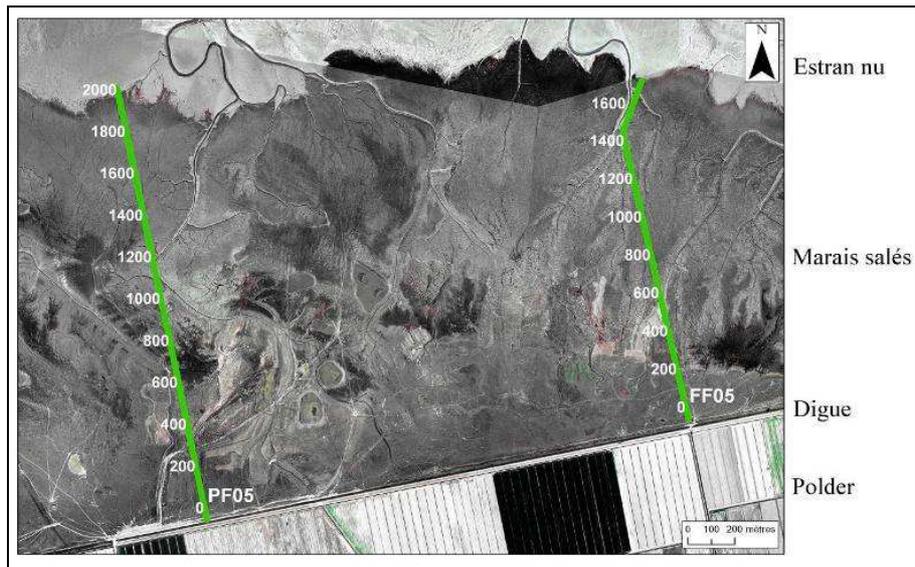


Figure 27 : Deux transects superposés à l'orthophotographie ©Ortho littorale 2000.

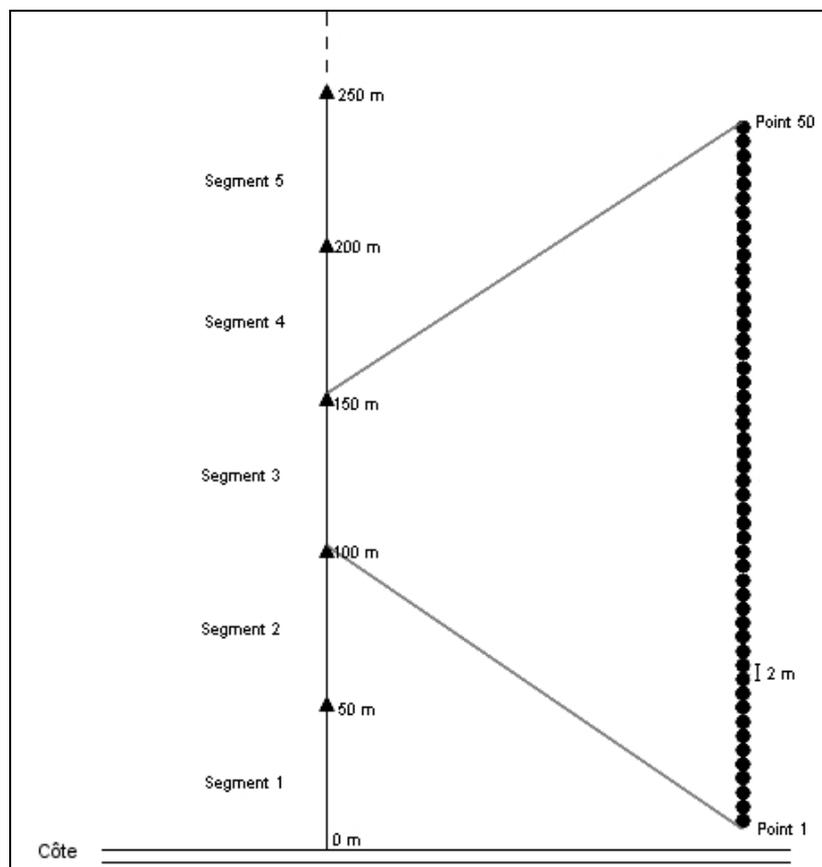


Figure 28 : Schéma de la réalisation des transects de végétation.

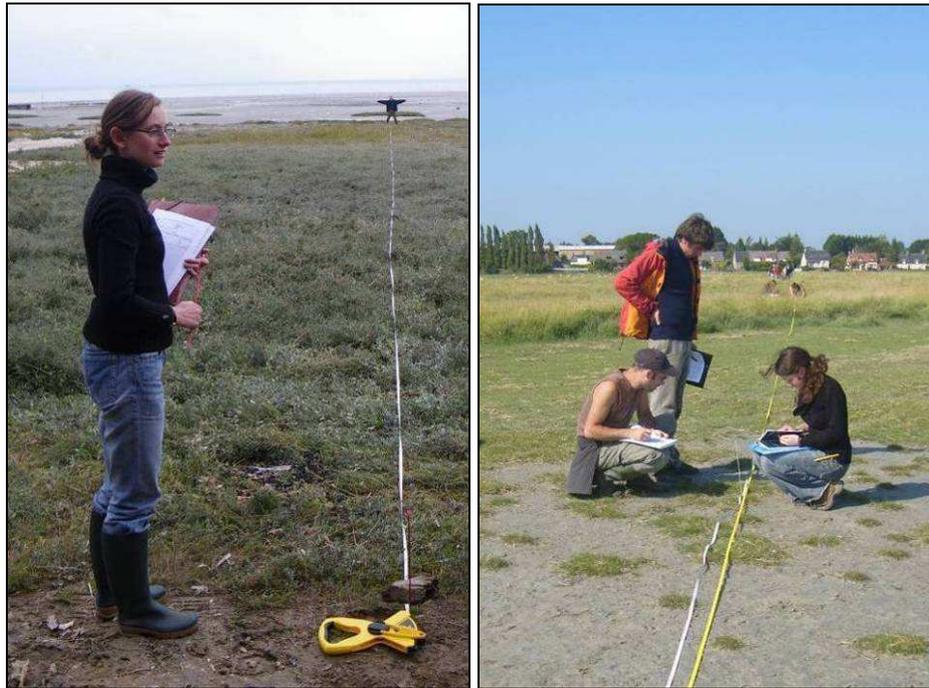


Figure 29 : Photographies de l'acquisition des transects de végétation avec les étudiants du Master TGAE de 2008 et 2009.

28 transects ont été réalisés sur l'ensemble de la Baie du Mont-Saint-Michel entre 2003 et 2009, par des étudiants de Master TGAE (Téledétection et Géomatique Appliqué à l'Environnement) de l'Université Paris VII, ainsi que des stagiaires, sous la direction de Marianne Cohen. Nous avons participé à l'acquisition de six de ces transects entre 2007 et 2009. Ces transects rassemblent 9811 points d'observation répartis sur l'ensemble de la Baie du Mont Saint Michel, correspondant à près de 20 km de marais salés (Figure 30, Tableau 2).

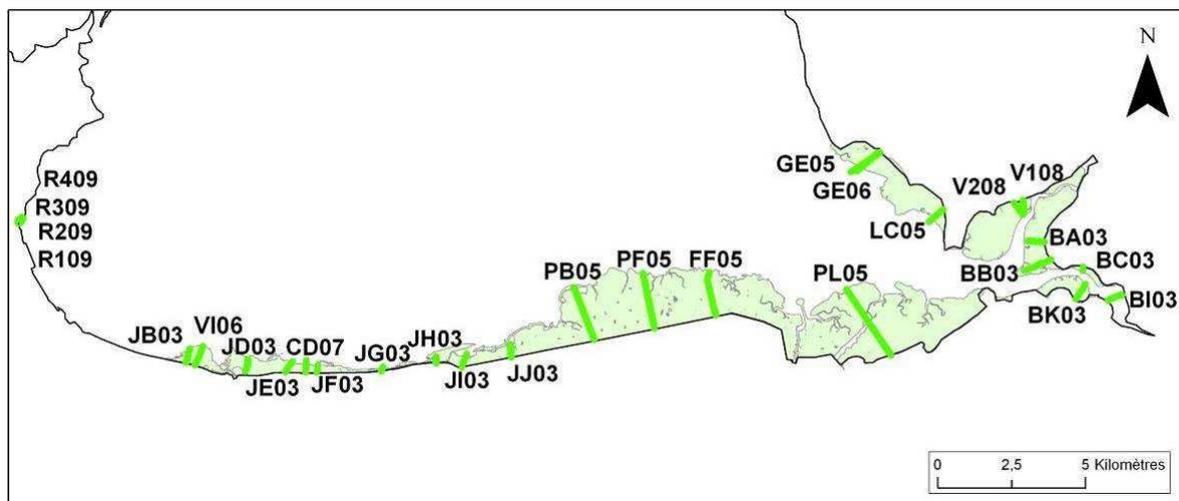


Figure 30 : Carte des 28 transects de végétation.

Tableau 2 : Code, année de réalisation, longueur (m), et nombre de points d'observation.

Code	Transect	Année	longueur (m)	Nombre de points
R409	Château Richeux 4	2009	72	38
R309	Château Richeux 3	2009	148	79
R209	Château Richeux 2	2009	84	44
R109	Château Richeux 1	2009	76	41
JB03	Jennifer_B	2003	503	259
VI06	Vivier 2006	2006	710	342
JD03	Jennifer-D (Vivier 03)	2003	434	218
JE03	Jennifer-E	2003	465	229
CD07	Chemin Dolais	2007	424	213
JF03	Jennifer-F	2003	259	131
JG03	Jennifer-G	2003	170	86
JH03	Jennifer -H	2003	226	101
JI03	Jennifer-I	2003	491	247
JJ03	Jennifer-J	2003	451	238
PB05	Polder (bertrant2)	2005	1894	951
PF05	Polder Fremont	2005	1931	1035
FF05	Ferme Foucault	2005	1526	895
PL05	Pont Landais	2005	2705	1416
BK03	Boris-K	2003	606	271
BI03	Boris-I	2003	528	263
BC03	Boris-C	2003	134	68
BB03	Boris-B	2003	1005	504
BA03	Boris-A	2003	552	273
V108	Vains est	2008	444	236
V208	Vains ouest	2008	504	254
LC05	Chaussee2	2005	656	326
GE06	Genet2006	2006	1186	594
GE05	Genet2005	2005	1008	476

34 espèces végétales ont été identifiées (Tableau 3, Annexes). Les espèces les plus couramment rencontrées sur les 9811 points d'observation sont : *Puccinellia maritima* (présentes sur 51% des points d'observation), *Elytrigia atherica* (39%), *Halimione portulacoides* (34%) et *Suaeda maritima* (29%). Viennent ensuite *Festuca rubra* (21%), *Salicornia sp.* (20%), *Agrotis stolonifera* (19%), *Aster tripolium* (18%) et *Spergularia media subsp media* (17%). Il faut noter également la présence de *Spartina townsendii* (11%) et d'*Atriplex prostrata* (8%).

D'autres espèces ont été rencontrées plus rarement (<6%), mais elles ne doivent pas pour autant être laissées de côté car leur présence peut être indicatrice de conditions particulières, comme la présence d'eau douce ou des zones de passage des troupeaux.

Tableau 3: Code des espèces végétales et nombre de points où elles ont été observées.

Code	Nom de l'espèce	Nombre d'observations	Pourcentage sur 9811 points d'observation
AGRO	<i>Agrotis stolonifera</i>	1898	19,35
ASTE	<i>Aster tripolium</i>	1765	17,99
ATRG	<i>Atriplex glabriuscula</i>	45	0,46
ATRI	<i>Atriplex prostrata</i>	763	7,78
BETA	<i>Beta vulgaris</i>	1	0,01
CARE	<i>Carex sp.</i>	3	0,03
CERA	<i>Cerastium sp.</i>	1	0,01
CIRS	<i>Cirsium vulgare</i>	81	0,83
CONV	<i>Convolvulus sp.</i>	5	0,05
ELYT	<i>Elytrigia atherica</i>	3830	39,04
FEST	<i>Festuca rubra</i>	2061	21,01
GLAU	<i>Glaux maritima</i>	326	3,32
HALI	<i>Halimione portulacoides</i>	2883	29,39
HORD	<i>Hordeum marinum</i>	470	4,79
JUMA	<i>Juncus maritima</i>	29	0,30
JUNC	<i>Juncus gerardii</i>	441	4,49
LOLI	<i>Lolium perenne</i>	2	0,02
PARA	<i>Parapholis incurva</i>	88	0,90
PHRA	<i>Phragmites australis</i>	10	0,10
PLAC	<i>Plantago coronopus</i>	372	3,79
PLAN	<i>Plantago maritima</i>	183	1,87
PMAY	<i>Plantago mayor</i>	5	0,05
POLY	<i>Polygonum maritima</i>	48	0,49
PUCC	<i>Puccinellia maritima</i>	5038	51,35
PUCR	<i>Puccinellia rupestris</i>	270	2,75
SALI	<i>Salicornia sp.</i>	1962	20,00
SCIR	<i>Scirpus maritimus</i>	18	0,18
SPAR	<i>Spartina townsendii</i>	1070	10,91
SPER	<i>Spergularia media subsp media</i>	1656	16,88
SPMA	<i>Spergularia maritima</i>	46	0,47
SUAE	<i>Suaeda maritima</i>	3299	33,63
TARA	<i>Taraxacum sp.</i>	23	0,23
TRIF	<i>Trifolium pratense</i>	620	6,32
TRIG	<i>Triglochin maritimum</i>	355	3,62

3.1.1.2. La carte de la végétation

Nous utilisons également dans cette étude une carte de la végétation de 2002 (Alain Radureau, Université Rennes I INRA-SAD, communication personnelle). Elle a été établie à partir de relevés de terrain réalisés de 2002 à 2005 et de la photo-interprétation des orthophotographies de l'IGN de 2001 pour la partie située en Ile-et-Vilaine (35) et de 2002 pour la partie située dans le département de la Manche (50). La carte couvre l'ensemble de la baie (Figure 31). 28 associations végétales ont été identifiées. Chacune est définie par la présence d'une espèce dominante. Lorsque plusieurs associations végétales ont été rencontrées sur un même secteur, celle couvrant au moins 50% de la surface considérée est indiquée en premier.

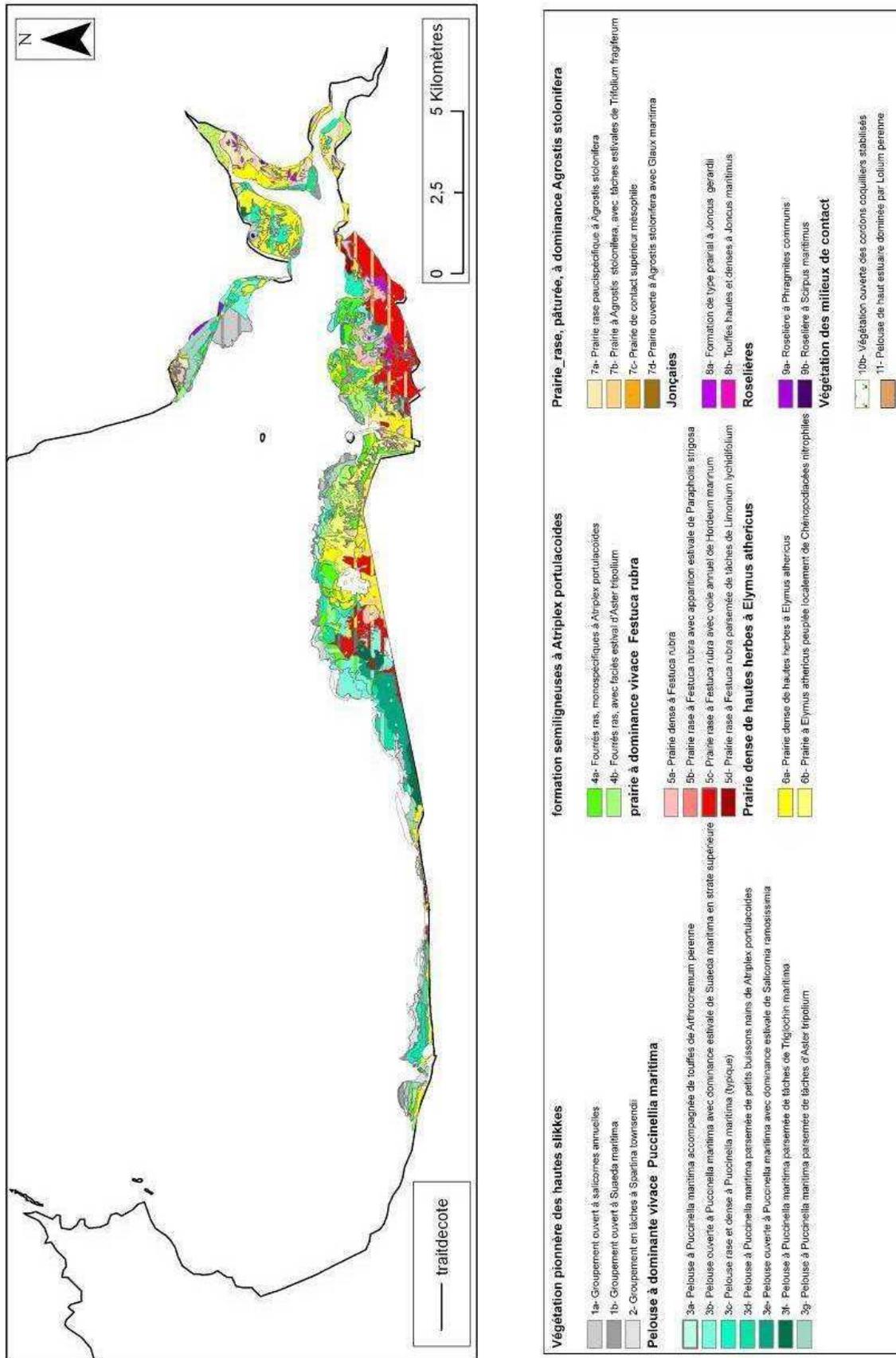


Figure 31 : Carte de la végétation des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel de 2002 (Alain Radureau & Benoît Lefevre, communication personnelle).

3.1.2. Les données de télédétection

3.1.2.1. Les données optiques : l'orthophotographie

Nous disposons d'une orthophotographie (Figure 32) appelée « Ortho Littoral 2000 » réalisée par l'IGN à partir d'un ensemble de couples stéréoscopiques de vues aériennes à 1/25000, acquises à marées basses, lors de fortes marées (coefficient supérieur ou égal à 95), afin de pouvoir observer la plus grande surface découverte possible. Cette orthophotographie couvre l'ensemble de la baie du Mont-Saint-Michel avec une résolution de 50 cm et date du 11 septembre 2002. Elle a été restituée en NTF et projetée en Lambert II étendu. Elle nous donne l'image des canaux rouge, vert et bleu sur l'ensemble des marais salés.

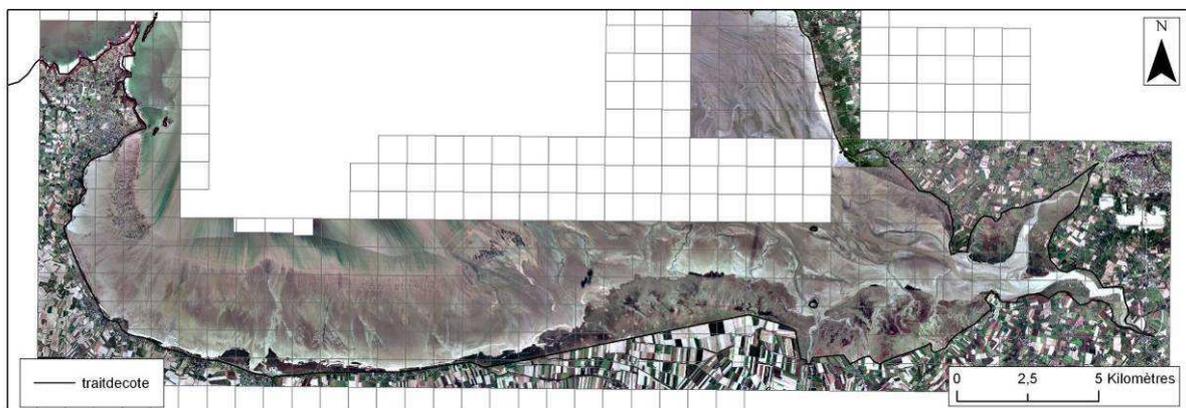


Figure 32 : Dallage de l'orthophotographie (1 km de côté) et extrait de l'Ortholittoral 2000 couvrant la baie du Mont-Saint-Michel.

3.1.2.2. Les données altimétriques par LIDAR

Nous disposons d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) réalisé par IFREMER à partir de données LIDAR aériennes. L'acquisition des données LIDAR a été réalisée les 23 et 24 septembre et 8 octobre 2002 par la société Topscan, pour IFREMER, grâce à un financement de la Fondation d'entreprise TOTAL pour la biodiversité et la mer. Les données ont été traitées par la société TerraImaging. L'ensemble de la Baie du Mont-Saint-Michel a été couvert, les axes de vol étant des lignes parallèles permettant l'acquisition de bandes dont le recouvrement est de 30% et la fauchée d'environ 700 m (Figure 33). La densité moyenne des points est de 0,5 pt/m², et la taille de l'empreinte au sol est de 25 cm (Tableau 4). Le premier et le dernier écho de chaque impulsion ont été enregistrés lors de l'acquisition. Les données ont été acquises dans le système géodésique WGS84, restituées en RGF93 et projetées en Lambert 93 grâce au logiciel CIRCE de l'IGN. La référence altimétrique est l'IGN69. Les données acquises ont été interpolées (Figure 34) par IFREMER par krigage à 1 m de

résolution (voisinage de 15 mètres avec 4 quartiers et un modèle isotrope). Les fichiers sont des dalles de 2 km par 2 km, sous forme de Grid ESRI (Figure 35). Les précisions, vérifiées sur des zones de références, sont de 20 cm en planimétrie et 10 cm en altimétrie.

Tableau 4: Caractéristiques techniques de la mission LIDAR (Jacques Populus, IFREMER, Fondation d'entreprise TOTAL pour la biodiversité et la mer)

Paramètres	Valeur
Surface	Ensemble de la Baie du Mont-Saint-Michel
Date (cf Figure 31)	- Axes bleus : $Z > - 4.77$ m (IGN69) - axes 52 à 77 le 23/09/02 de 13h04 à 16h07 TU - axes 1/27 et 51 le 24/09/02 de 1h03 à 4h16 TU - Axes rouges : $- 6.00$ m $< Z < - 4.77$ m, axes 10,11,12 et 99 le 08/10/02 de 2h à 2h 40 TU.
Acquisition des données	Topscan
Traitement des données	Terra Imaging
Financement	Fondation d'entreprise TOTAL pour la biodiversité et la mer
Client	IFREMER
Hauteur de vol	1000 m
Vitesse de vol	80 m/s
Fauchée	725 m
Recouvrement	30%
Type de LiDAR	Optech ALTM 3033
Longueur d'onde	1064 nm (proche infrarouge)
Fréquence de balayage	29 Hz
Fréquence des impulsions	33 kHz
Durée de l'impulsion	5 ns
Nombre d'échos	Deux échos : premier et dernier.
Angle de balayage	20°
Divergence du faisceau	0,25 mrad
Densité moyenne	0,57 pt/m ²
Taille de la tache au sol	0,25 m
Précision altimétrique	10 cm

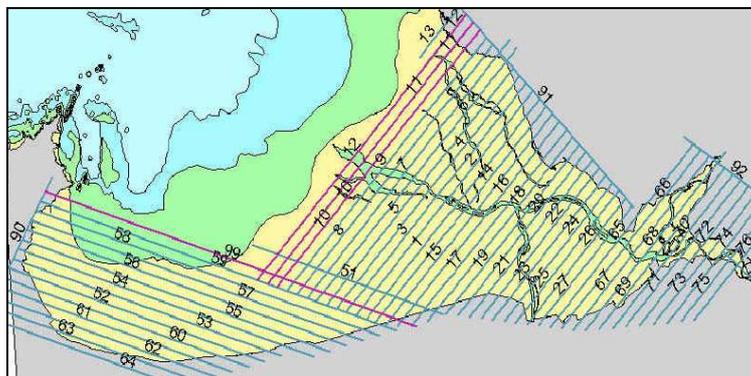


Figure 33 : Plan de vol au sol des trois missions LIDAR (J. Populus).

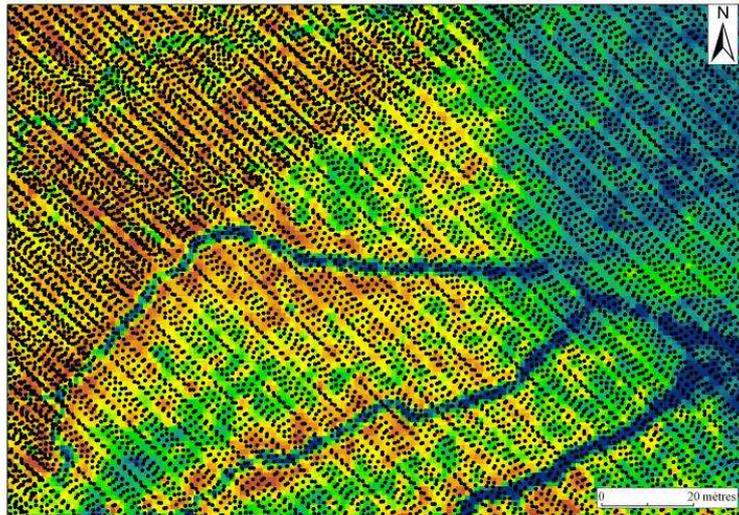


Figure 34 : Superposition des points Lidar (en noir), dont la densité moyenne est de 0,5 pt/m², et du Modèle Numérique de Terrain de 1 m de résolution obtenue par interpolation (en couleur hypsométrique). On peut voir la différence de densité de point au niveau d'un recouvrement de deux lignes de vol (en haut à gauche).

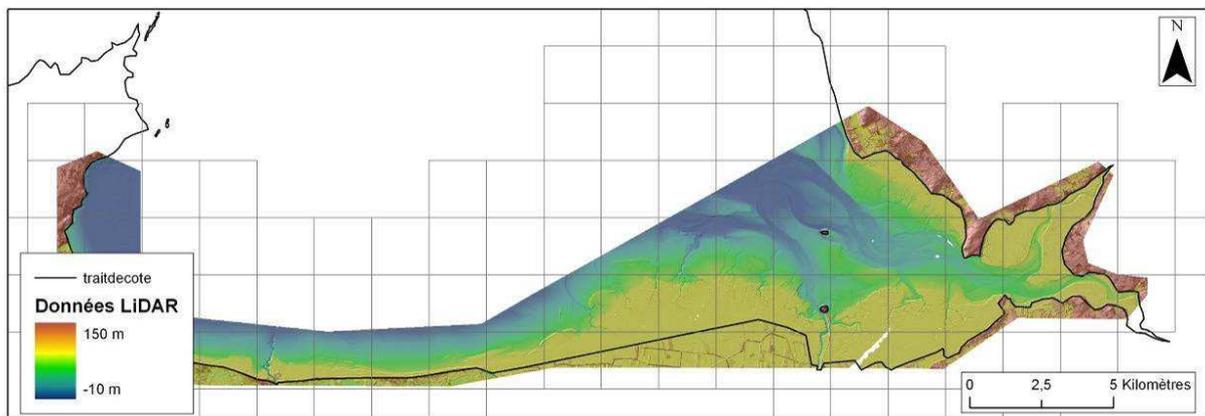


Figure 35 : Dallage des données LiDAR (2 km de côté) et extrait du Modèle Numérique de Surface à 1 m de résolution réalisé par krigage par IFREMER.

3.1.3. Les autres données : topographie, sédiment et pâturage

3.1.3.1. Les données topographiques

Nous avons utilisé comme points de contrôle des levés topographiques réalisés en mai 2002 par J.M. Léauthaud (IGN) et les élèves de l'ENSG, à l'aide d'un tachéomètre électronique, d'un réseau de piliers installés en 1991 et d'un GPS temps réel.

Ces levés topographiques sont situés autour du Mont-Saint-Michel, dans une zone qu'on appelle la Petite Baie (Figure 36). Destinées à la fois à un suivi scientifique de la topographie de la baie et au perfectionnement des élèves, ces missions ont eu lieu chaque année au mois de mai, dans les mêmes conditions de mesure, autour du Mont-Saint-Michel. Ces levés ont été effectués à l'aide d'un tachéomètre électronique, à partir d'un réseau de

piliers installés en 1991. Un GPS temps réel a également été utilisé. Chaque année l'équipe s'est assurée de la qualité des mesures, dont la précision est qualifiée d'excellente dans les rapports de mission. Ces données sont disponibles sous forme de fichiers de points Autocad (.dxf), en NTF Lambert Zone I (référence altimétrique IGN 69).

L'acquisition des données LIDAR ayant été faite en septembre 2002, il nous a paru intéressant d'utiliser les levés topographiques de 2002 comme données de référence. Il faut cependant noter un décalage de 5 mois entre l'acquisition des levés topographiques et des données LIDAR.



Figure 36 : Carte des levés topographiques (ENSG) de mai 2002, superposés à l'Ortho Littorale 2000.

3.1.3.2.Sédiments

Le type de sédiment présent au niveau de chaque point d'observation des transects a été obtenu grâce à la carte géologique de la Baie du Mont-Saint-Michel (L'Homer *et al.*, 1999) (Figure 37). La carte a été scannée et géoréférencée avec le logiciel ArcGis. 11 types de sédiments ont été rencontrés (Tableau 5). Ils diffèrent par leur granulométrie (sable, tange, et vase) et leur origine.

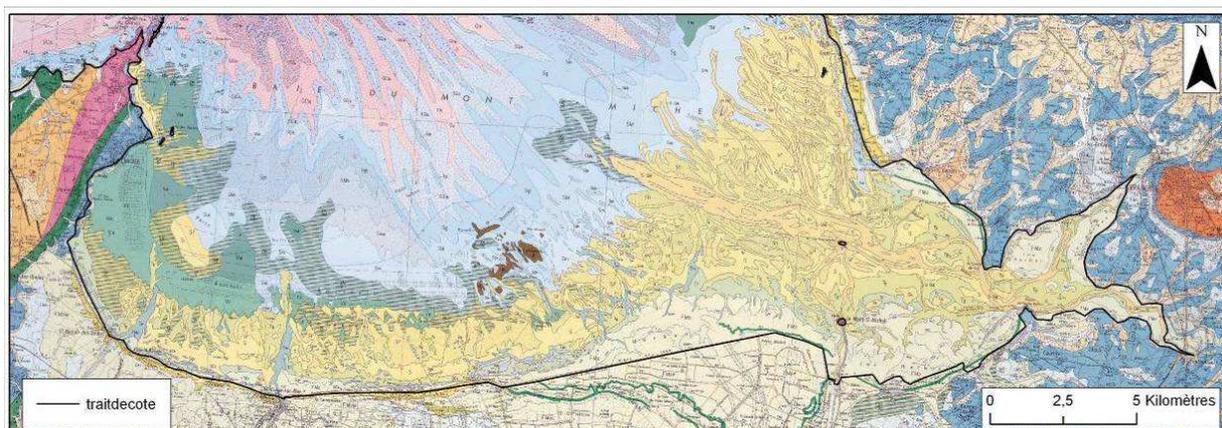


Figure 37 : Carte géologique de la Baie du Mont Saint Michel au 1/50 000 (L'Homer *et al.*, 1999).

Tableau 5 : Codes des sédiments de la carte géologique de la Baie du Mont Saint Michel au 1/50 000 (L'Homer *et al.*, 1999).

Code	Sédiments
Dz3	Sables ± bioclastique des dunes récentes (postérieures aux 9-11 ^{èmes} siècles)
FMz	Tangues de schorres récents
FMzp	Tangues de l'ancien estuaire du Couesnon, postérieures à 1858 (polders)
S	Sables très fins (lithobioclastiques)
S-Sm	Sables à débris des chenaux (fins à moyens, mal classés, présence de micas, de débris végétaux, de tests coquilliers roulés et de galets de tange)
SCb	Sables mêlés à des galets, faciès coquillier
SGb	Sables mêlés à des graviers, faciès coquillier
Sgb	Sables bioclastiques grossiers (2mm à 500µm)
Tf	Tangues silto-argileuses (dépôts finement rythmés de la haute slikke et du schorre)
Tg	Sablons et tangues sablo-argileuses
Vc	Vases très fines d'arrières-cordons coquilliers

3.1.3.3. Pâturage

L'influence du pâturage a été étudiée grâce à une carte de 2002 (Figure 38, Radureau & Lefevre, communication personnelle). Quatre types de pâturage sont rencontrés (Tableau 6), une zone pouvant accueillir jusqu'à trois types de pâturage.

Tableau 6: Codes des types de pâturage.

Code	Type de pâturage
P/O	Pâturage ovin
P/B	Pâturage bovin
P/E	Pâturage équin
F	Fauche

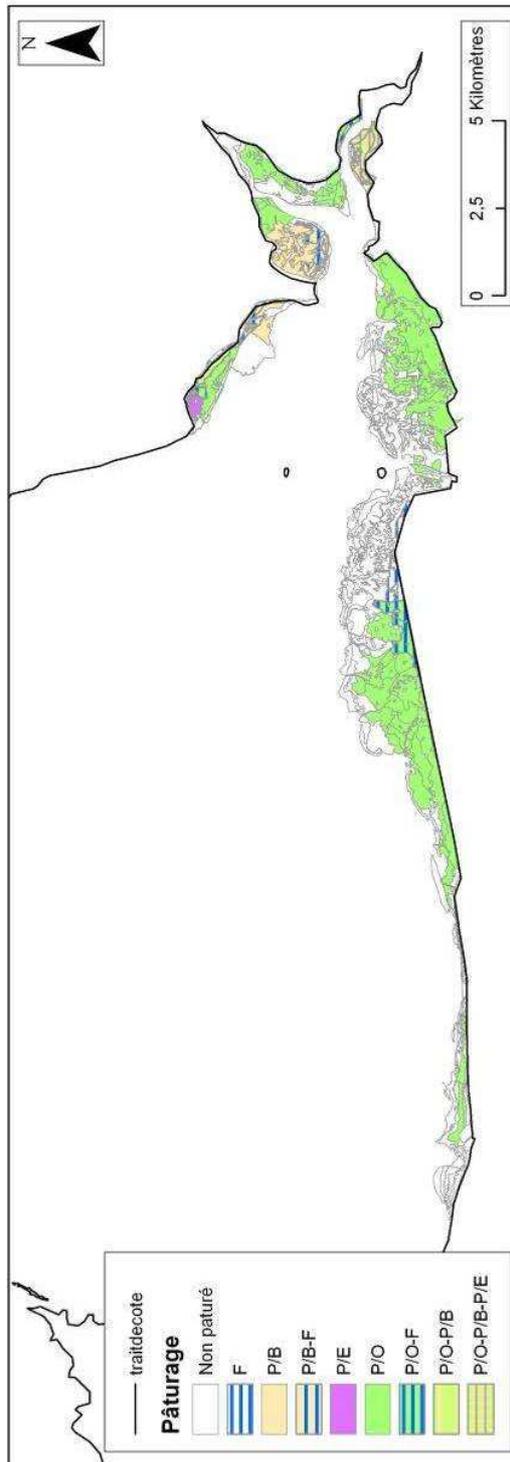


Figure 38 : Carte du pâturage de 2002 (Alain Radureau & Benoît Lefevre, communication personnelle).

3.2. Préparation des données et données dérivées

3.2.1. Contrôle qualité et correction de données LIDAR

Cette partie est tirée de l'article : Bilodeau C., Deffontaines B., Deroin J.-P., Radureau A., Cohen M., 2010. Estimation du potentiel des données LIDAR multiécho pour l'étude de la végétation des marais salés : étude du biais des données LIDAR acquises au-dessus de la baie du Mont-Saint-Michel et recherche d'une méthode de correction. *Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection*, numéro spécial suite au colloque Techniques laser appliquées à l'étude des environnements naturels et urbains, Le Mans, France, 20 et 21 janvier 2009.

3.2.1.1. Principes du biais des données LIDAR dû à la présence de végétation

De nombreux auteurs ont constaté qu'une différence d'altitude de l'ordre du décimètre pouvait se traduire sur les marais salés par la présence de différentes espèces végétales (Géhu & Géhu-Franck, 1985 ; Bonnot-Courtois *et al.*, 2000). L'étude de la relation entre l'altitude et la végétation nécessite donc une précision sub-décimétrique. La première étape de notre travail est de vérifier que la précision de nos données est satisfaisante pour répondre à notre objectif.

Les données LIDAR présentent généralement une précision allant de quelques centimètres à plus d'un décimètre (Huising *et al.*, 1998; Baltsavias, 1999). Cette technique présente donc des erreurs qui peuvent être non négligeables, selon l'objectif de l'étude. Ces erreurs peuvent être classées en deux types : l'erreur systématique, que l'on trouve sur toutes les mesures, et l'erreur aléatoire, qui varie selon les mesures. Trois sources d'erreur peuvent être identifiées (Huising *et al.*, 1998): les instruments de mesures, la traversée de l'atmosphère par le signal, et la nature de la surface cible. Nous nous intéresserons ici aux erreurs causées par la nature de la surface cible, et en particulier à la présence de végétation. Généralement l'entreprise se chargeant de l'acquisition des données LIDAR réalise l'estimation de l'erreur au niveau de surfaces idéales, planes et sans végétation, telles que des routes. L'erreur indiquée ne reflète donc pas toujours l'erreur existant réellement sur la surface étudiée (Hodgson *et al.*, 2004), particulièrement si elle est couverte de végétation basse. Or, comme il a pu être constaté dans le cas d'autres études menées sur des marais salés (Barreau *et al.*, 2001; Populus *et al.*, 2001; Mason *et al.*, 2005; Morris *et al.*, 2005; Paine *et al.*, 2005; Rosso *et al.*, 2006), le faisceau laser envoyé au sol par l'instrument LIDAR peut être arrêté par la végétation basse avant d'atteindre le sol, ce qui aboutit à une surestimation de l'altitude de l'ordre du décimètre (Figure 39).

Cette incertitude présente donc le même ordre de grandeur que la hauteur de la végétation d'une part, et que la différence d'altitude entre deux associations végétales, d'autre part. Nous pouvons donc nous demander si les données LIDAR sont assez fiables pour l'étude de la végétation des marais salés.

Pour répondre à cette question, nous avons quantifié le biais des données LIDAR dû à la présence de végétation sur les marais salés, et nous avons cherché une correction simple à ce biais. Nous nous sommes aidés pour cela du jeu de données acquises en 2002, comprenant l'orthophotographie, les données LIDAR, les levés topographiques, et la carte de la végétation. La fiabilité des données LIDAR pour chaque type de couverture au sol (route, estran nu, ou associations végétales) a été quantifiée par le calcul de la différence d'altitude entre les levés topographiques et les données LIDAR premier et dernier écho. L'erreur moyenne quadratique, l'erreur systématique et l'erreur aléatoire ont ainsi été comparées entre le premier et le dernier écho, et pour chaque type de couverture au sol. Nous avons ensuite cherché à corriger l'erreur systématique en étudiant la différence d'altitude entre les levés topographiques et les données LIDAR d'altitude minimale situées dans un carré de trois mètres de côté.

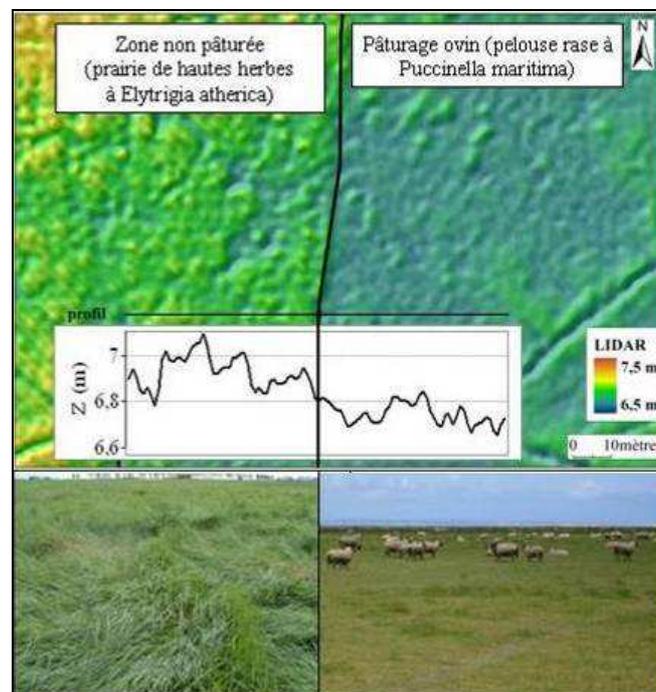


Figure 39 : Détail de l'image raster des données LIDAR (résolution : 1 m) superposée à son estompage, permettant de voir la différence d'altitude mesurée entre une zone non pâturée (à gauche) et un terrain sous pâturage ovin (à droite). Le profil permet de constater une différence d'altitude mesurée d'environ 20 cm. Cette différence n'est pas due à l'altitude du terrain, mais à la différence de hauteur de la végétation. Les photographies de ces deux types de végétation permettent de voir que la végétation est haute dans la zone non pâturée, et extrêmement rase en présence de moutons.

3.2.1.2. Structure de la végétation sur la zone du contrôle qualité du LiDAR

La carte de la végétation que nous utilisons dans cette étude couvre l'ensemble de la Baie, mais nous utilisons ici uniquement les données de la zone couverte par les levés topographiques, dont l'aire mesure un peu moins de 25 km² (Figure 40). Chaque association végétale est désignée par l'espèce dominante, qui couvre au moins 50% de la surface considérée, les espèces accompagnatrices étant indiquées entre parenthèses. Les espèces végétales sont désignées ci-dessous par leur nom français : Spartine pour *Spartina townsendii*, Salicorne pour *Salicornia sp.*, Soude pour *Suaeda maritima*, Puccinellie pour *Puccinellia maritima*, Obione pour *Halimione portulacoides*, Aster pour *Aster tripolium*, et Chiendent pour *Elytrigia atherica*. Cette carte permet d'identifier les dix types de couverture au sol sur lesquels les levés topographiques ont été effectués : la route, l'estran nu et les associations végétales « Salicorne (Soude, Puccinellie) », « Puccinellie (Salicorne) », « Obione (Puccinellie) », « Soude (Salicorne, Spartine) », « Obione », « Puccinellie (Aster, Obione) », « Obione (Chiendent) » et « Chiendent ».

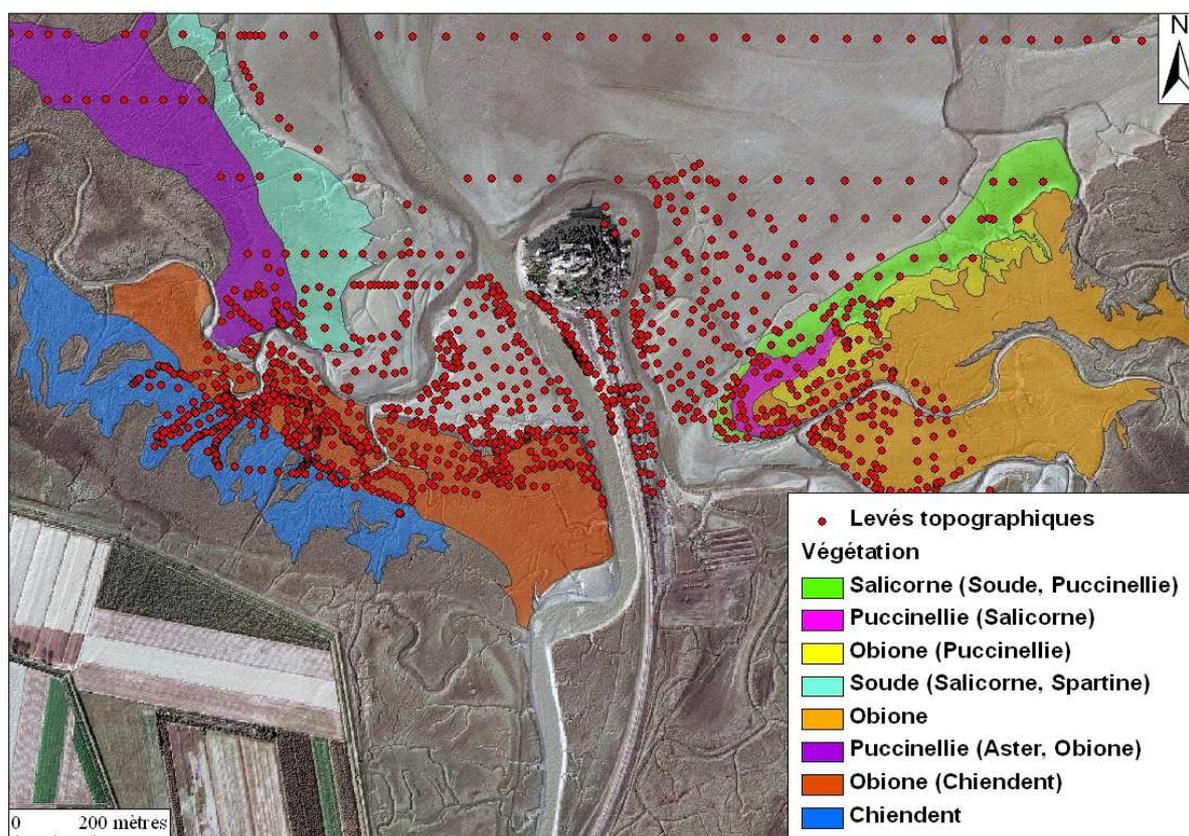


Figure 40 : Superposition de l'estompage des données LIDAR (Jacques Populus, IFREMER, Fondation d'entreprise TOTAL pour la biodiversité et la mer), de l'Ortho littorale 2000 (IGN), de la carte de la végétation (Alain Radureau & Benoît Lefeuvre, communication personnelle) et des levés topographiques (J.M. Léauthaud, IGN, ENSG, et les élèves de l'ENSG).

La hauteur et la densité de la végétation sont variables et décroissent généralement lorsqu'on s'éloigne de la côte. Le Chiendent et l'Obione sont les espèces présentant les hauteurs de canopée les plus élevées : elles atteignent en générale 30 cm à 1 m pour le Chiendent et 20 à 80 cm pour l'Obione. De plus, ces deux espèces sont présentes sur de larges zones monospécifiques où la végétation est dense. Ces deux espèces sont donc susceptibles d'arrêter le faisceau laser du LIDAR. On peut penser que lors de l'acquisition des données LIDAR, en septembre, ces plantes ont atteint leur taille maximale. Cependant, cela ne correspond par forcément à une hauteur de canopée maximale puisqu'il est probable que ces plantes aient été couchées par la marée qui a immergé la quasi-totalité du marais salé 15 jours plus tôt (le 9 septembre 2002, avec une hauteur d'eau maximale de 7,3 m en NGF-IGN69). La hauteur de ces espèces végétales peut être alors plus faible, mais la structure des plantes couchées laisse penser que le laser est susceptible d'être arrêté par la végétation avant le sol. L'Aster maritime est en fleur en septembre, et présente alors sa taille maximale, pouvant atteindre 80 cm environ. Les individus poussant de façon isolée, la densité de cette espèce est généralement faible. La Puccinellie forme des zones de végétation dense mais basse, ne dépassant généralement pas 10 cm. Cette espèce est favorisée par le pâturage (Bouchard *et al.*, 2003) qui est pratiqué sur certaines zones des marais, appelées prés-salés. La hauteur de la végétation est alors très basse (quelques centimètres), mais cette pratique n'est pas en cours dans les zones étudiées dans ce travail. La Soude et la Salicorne présentent des structures morphologiques similaires : ce sont des plantes basses et charnues formées de rameaux cylindriques dressés, et dont la taille ne dépasse généralement pas 20 à 30 cm. Du fait de leur port dressé, on peut penser qu'elles sont susceptibles de laisser passer le faisceau laser jusqu'au sol. Enfin, la Spartine, qui pousse sous forme de touffes dans les zones pionnières des marais salés, présente une densité faible et une hauteur moyenne pouvant aller de 10 à 70 cm.

A part le Chiendent et l'Obione, ces espèces se présentent rarement seules sur le terrain. Selon leur composition, les associations végétales auront alors une densité et une hauteur spécifique. Ainsi, les associations « Chiendent », « Obione », et « Obione (Chiendent) » sont susceptibles de présenter une végétation haute et dense, tandis que « Salicorne (Soude, Puccinellie) », « Puccinellie (Salicorne) », et « Soude (Salicorne, Spartine) » sont formées de végétation basse ou moyennement haute et peu dense. Les associations « Obione (Puccinellie) » et « Puccinellie (Aster, Obione) » sont composées à la fois d'espèces hautes et d'espèces basses, et doivent donc présenter une structure hétérogène.

Dans cette étude, nous avons cherché à savoir si ces différences de hauteur et de densité des associations végétales peuvent induire des variations de précision des données LIDAR acquises au-dessus de la végétation des marais salés.

3.2.1.3.Méthodes du contrôle qualité des données LIDAR

L'ensemble des calculs statistiques a été réalisé avec le logiciel R.

Comparaison des levés topographiques et des points LIDAR les plus proches

La fiabilité des données LIDAR par rapport à l'altitude réelle du terrain a été calculée grâce aux levés topographiques considérés comme points de contrôle. Grâce à la carte de la végétation et à l'orthophotographie, on a attribué à chaque point topographique un des 10 types de couverture au sol. A chaque point topographique a ensuite été associé le point d'impact LIDAR le plus proche. La moyenne de la distance entre les points de contrôle et les impacts LIDAR les plus proches est de 0,55 m. Cette distance peut être à l'origine d'une différence d'altitude entre les deux sources de données, en particulier lorsque la pente est élevée. Par exemple, lorsque deux points sont éloignés de 1 m et que la pente est égale à 10%, la différence d'altitude entre les deux points est de 10 cm. C'est pourquoi, la carte des pentes ayant été créée à partir du Modèle Numérique de Surface, les points de contrôle situés à moins de 1 m d'un terrain dont la pente est supérieure à 10% ont été éliminés du calcul. Le choix de cette valeur de pente nous permet d'éliminer les points situés aux abords des chenaux et des micro-falaises parfois présentes en bordure des herbus. De plus, les types de couverture au sol présentant moins de 10 points topographiques n'ont pas été considérés dans le calcul.

Pour l'ensemble des points topographiques restants, la valeur d'altitude de chaque levé topographique (Z_{topo}) a été comparée avec celle de la mesure LIDAR la plus proche, aussi bien en premier écho (Z_{fp} pour first pulse) qu'en dernier écho (Z_{lp} pour last pulse). On a utilisé pour cela un test de comparaison de moyenne, afin de savoir s'il y avait ou non une différence statistique entre les différents types de mesures. Le test de Shapiro-Wilk, qui permet de comparer la distribution des données à la distribution de la loi normale, a montré que les données ne suivaient pas une loi normale. Nous ne pouvons donc pas utiliser des tests paramétriques (tels que le test T utilisé pour la comparaison de deux échantillons, et l'analyse de variance ou ANOVA pour les comparaisons de plus de deux échantillons). De plus, puisqu'à un point de contrôle correspond une paire de valeurs (topographique et LIDAR), nous sommes dans le cas de deux échantillons appariés. C'est pourquoi nous avons utilisé le

test non paramétrique de Wilcoxon pour échantillons appariés. Nous avons ainsi comparé les mesures topographiques (Ztopo) aux mesures LIDAR premier écho (Zfp) et dernier écho (Zlp), et les mesures premier et dernier écho entre elles.

Afin de savoir si l'erreur des données LIDAR dépend du type de couverture au sol, nous avons ensuite quantifié la fiabilité des données LIDAR grâce au calcul de l'erreur moyenne quadratique (EMQ, ou RMSE pour Root Mean Square Error) (Maune, 2007). Cette valeur est généralement utilisée dans le cas de l'estimation de l'erreur des données LIDAR et son calcul permet une comparaison avec les autres études. Le carré de l'Erreur Moyenne Quadratique correspond à la somme du carré de l'Erreur Systématique (appelée ES, et correspondant à la moyenne des erreurs, c'est-à-dire au biais des données) et du carré de l'Ecart-Type (ET), qui correspond à l'erreur aléatoire :

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - z'_i)^2}{n}} \text{ avec } z_i = \text{altitude mesurée par LIDAR et } z'_i = \text{altitude du point de contrôle,}$$

$$\text{et } EMQ^2 = ES^2 + ET^2 \text{ avec } ES = \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - z'_i)}{n} \text{ et } ET = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((\hat{z}_i - z_i) - me)^2}{n-1}}.$$

Nous pouvons ainsi comparer pour les différents types de couverture au sol les valeurs d'erreur moyenne quadratique, d'erreur systématique, et d'écart-type. Nous avons ensuite utilisé un test de comparaison de moyenne afin de vérifier statistiquement que les données LIDAR présentent des erreurs différentes selon le type de couverture au sol. Pour comparer plusieurs échantillons indépendants, mais ne suivant pas une distribution normale (comme l'a montré un test de Shapiro-Wilk), nous avons utilisé un test de Kruskal-Wallis. Ce test permet de savoir si les moyennes des différents échantillons peuvent être considérées comme égales ou non, mais ne permet pas de savoir quel groupe se distingue des autres. C'est pourquoi nous avons ensuite utilisé un test de comparaisons multiples de Wilcoxon-Mann-Whitney (en utilisant la correction de Holm permettant de passer d'une comparaison de 2 échantillons à k échantillons) pour identifier les types de couverture au sol présentant une erreur LIDAR statistiquement différente des autres.

Comparaison des levés topographiques et des points d'impact LIDAR situés dans un carré de trois mètres de côté

Lorsque la végétation est haute et dense, le faisceau laser n'atteint pas le sol. Mais dans le cas d'une densité de végétation non homogène, il existe des zones de densité plus faible où le faisceau peut traverser la végétation. L'altitude mesurée sur ces zones est alors plus basse que les mesures situées à proximité (Figure 41). C'est pourquoi nous avons comparé chaque point de contrôle à la mesure LIDAR d'altitude la plus faible située dans un carré de 3x3 m autour du point de contrôle (Z_{min}). Cette surface de 9 m² a été choisie de telle sorte qu'elle ne soit ni trop grande pour que le terrain correspondant à cette surface reste homogène du point de vue topographique, ni trop petite pour qu'il comprenne un nombre assez important de mesures LIDAR (la densité de points LIDAR étant de 0,5 points/m², un carré de 3x3=9 m² contient théoriquement en moyenne 4,5 points).

A partir de cette altitude minimale mesurée par LIDAR sur cette surface de 9 m² autour de chaque point de contrôle, les calculs de l'erreur moyenne quadratique, de l'erreur systématique et de l'écart-type ont été menés pour chaque couverture au sol comme précédemment. Nous avons effectué les mêmes calculs pour les valeurs d'altitude maximales (Z_{max}) et moyennes (Z_{moy}) mesurées par LIDAR dans chaque carré.

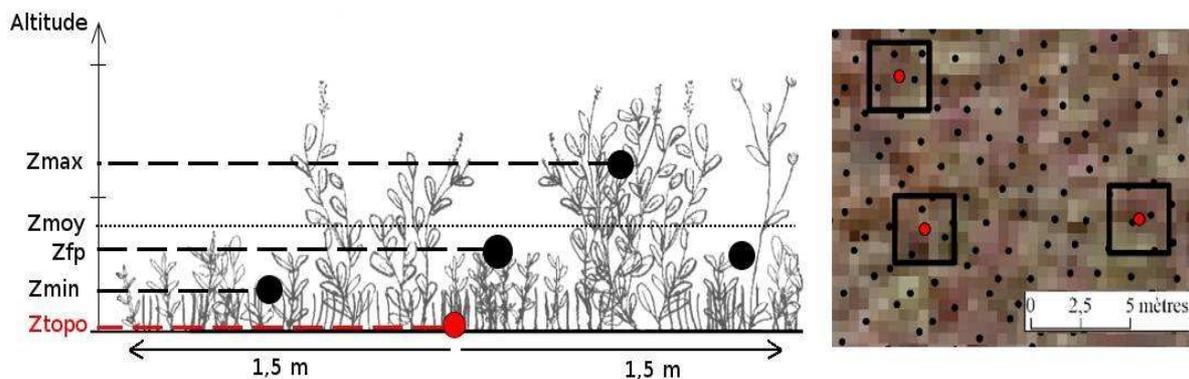


Figure 41: Schéma et vue superposée à l'orthophotographie de points d'impact LIDAR (points noirs) situés autour de levés topographiques (points rouges) dans un carré de 3x3 m. Z_{topo} est l'altitude mesurée par levé topographique, Z_{fp} est l'altitude de la mesure LIDAR premier écho la plus proche du levé topographique, Z_{min} est la mesure LIDAR premier écho d'altitude minimale dans le carré de 3x3 m, Z_{moy} l'altitude moyenne, et Z_{max} l'altitude maximale.

3.2.1.4.Résultats du contrôle qualité des données LiDAR

Comparaison des points de contrôle et des points LIDAR les plus proches

Etude de la fiabilité des données LIDAR sur l'ensemble des points

En tout, 837 points topographiques ont été étudiés. A chaque point topographique (Z_{topo}) ont été associées les valeurs d'altitude LIDAR premier écho (Z_{fp}) et dernier écho (Z_{lp}) les plus proches. Un test de Shapiro-Wilk a montré que les variables Z_{topo} , Z_{fp} , et Z_{lp} ne suivent pas une loi normale (respectivement $W = 0,9429$, $W = 0,9444$, $W = 0,9446$, et pour les trois $p < 0,001$), c'est pourquoi les données ont été traitées par des tests non paramétriques. Un test de comparaison de moyennes de Wilcoxon pour échantillons appariés a montré que Z_{topo} est significativement différente de Z_{fp} et de Z_{lp} (respectivement $V = 68263,5$ et $V = 49004,5$, et dans les deux cas $p < 0,001$). Une différence hautement significative ($V = 6535,5$, $p < 0,001$) a également été constatée entre les données premier et dernier écho. Les levés topographiques, les mesures LIDAR premier écho et les mesures LIDAR dernier écho sont donc significativement différents. La moyenne de la différence entre l'altitude topographique et l'altitude mesurée par LIDAR est égale à 9 cm pour les données premier écho et 13,5 cm pour les données dernier écho. La moyenne de la différence entre le premier et le dernier écho est égale à -4,5 cm. Ces résultats montrent que les données premier et dernier écho présentent une surestimation de l'altitude, surestimation qui est plus importante pour le dernier écho que pour le premier écho.

Comparaison de la fiabilité des données LIDAR pour les différents types de couverture au sol

L'erreur moyenne quadratique (EMQ), l'erreur systématique (ES) et l'écart-type (ET) ont été calculés pour les différents types de couverture au sol (Tableau 6). Tous les types de couverture au sol présentent une erreur systématique des données LIDAR premier écho inférieure à celle des données dernier écho: les données premier écho apparaissent donc plus fiables que les données dernier écho, et dans la suite du travail nous considérons uniquement les données LIDAR premier écho.

Dans le tableau 6, l'erreur systématique des données LIDAR premier écho apparaît différente selon la couverture au sol, ce que confirme le test de Kruskal-Wallis effectué sur Z_{topo} - Z_{fp} (Kruskal-Wallis $\chi^2 = 97,0766$, $df = 9$, $p < 0,001$). La route présente les plus faibles valeurs d'erreur moyenne quadratique (8 cm), d'erreur systématique (4 cm) et d'écart-type (7 cm). La route peut ainsi être considérée comme la surface de référence. L'estran nu présente à la fois la valeur d'erreur systématique la plus faible (4 cm) et la valeur d'écart-type

la plus élevée (37 cm). En effet, certaines zones de l'estran nu, non stabilisées par la végétation, évoluent très rapidement, comme c'est le cas au niveau des chenaux. On peut donc penser que le décalage entre les données topographiques et des données LIDAR en certaines zones vient de l'évolution de l'estran au cours des cinq mois séparant l'acquisition des deux jeux de données, et n'est pas dû à la technique LIDAR. Cet écart-type engendre une erreur moyenne quadratique forte, qui décrit mal la fiabilité des données LIDAR au niveau de l'estran nu. C'est pour cette raison qu'il est ici plus parlant de comparer les erreurs systématiques que les erreurs moyennes quadratiques.

Tableau 6 : Erreur moyenne quadratique (EMQ), erreur systématique (ES), et écart-type (ET) par type de couverture au sol des données LIDAR premier et dernier écho par rapport aux points de contrôle. Les valeurs sont en mètres, n représente le nombre de points traités.

Couverture au sol	n	Premier écho (Zfp)			Dernier écho (Zlp)		
		EMQ	ES	ET	EMQ	ES	ET
Route	22	0,08	0,04	0,07	0,10	0,07	0,08
Estran nu	409	0,37	0,04	0,37	0,38	0,08	0,37
Salicorne (Soude, Puccinellie)	26	0,13	0,07	0,11	0,15	0,11	0,11
Puccinellie (Salicorne)	21	0,11	0,07	0,08	0,15	0,12	0,09
Obione (Puccinellie)	16	0,12	0,08	0,09	0,15	0,12	0,09
Soude (Salicorne, Spartine)	18	0,14	0,09	0,10	0,19	0,16	0,11
Obione	77	0,17	0,14	0,09	0,20	0,18	0,09
Puccinellie (Aster, Obione)	42	0,19	0,15	0,11	0,23	0,21	0,11
Obione (Chiendent)	165	0,22	0,17	0,14	0,25	0,21	0,14
Chiendent	41	0,22	0,19	0,11	0,27	0,25	0,11

Les différentes associations végétales présentent des erreurs systématiques comprises entre 7 et 19 cm. Un test de comparaison multiple de Wilcoxon-Mann-Whitney utilisant la correction de Holm permet de séparer les associations végétales en deux groupes. Le premier groupe comprend celles pour lesquelles l'erreur systématique des données LIDAR n'est pas significativement différente ($p > 0,05$) de l'erreur systématique de la route (égale à 4 cm). Ce groupe rassemble l'estran nu et les associations végétales suivantes : « Salicorne (Soude, Puccinellie) » (7 cm), « Puccinellie (Salicorne) » (7 cm), « Obione (Puccinellie) » (8 cm), et « Soude (Salicorne, Spartine) » (9 cm). Les données acquises au-dessus de ces associations n'auraient donc pas besoin d'être corrigées, puisque l'erreur qu'elles présentent n'est pas significativement différente de l'erreur de la surface de référence. Le deuxième groupe est constitué des associations végétales pour lesquelles la valeur de l'erreur systématique est significativement différente de celle présentée par la route. Il s'agit des associations suivantes : « Obione » (14 cm), « Puccinellie (Aster, Obione) » (15 cm), « Obione (Chiendent) » (17 cm), et « Chiendent » (19 cm).

L'erreur systématique des données LIDAR acquises au-dessus de la végétation des marais salés dépend donc bien de l'association végétale, et c'est en particulier pour les associations végétales « Obione », « Puccinellie (Aster, Obione) », « Obione (Chiendent) », et « Chiendent » qu'une correction des données LIDAR doit être recherchée.

Comparaison des points de contrôle et des points d'impact LIDAR dans un carré de 3x3 m

Afin de définir une méthode de correction de l'erreur des données LIDAR, un carré de 3x3 m a été tracé autour de chaque point de contrôle, et l'altitude de chaque point a été comparé avec trois mesures LIDAR situées à l'intérieur de ce carré: les mesures LIDAR d'altitude minimale, moyenne et maximale.

Etude de l'altitude minimale mesurée au sein des carrés de 3x3 m

Dans le but de définir une méthode de correction des données LIDAR, la mesure d'altitude minimale située dans un carré de 3x3 m autour de chaque point de contrôle (Zmin) a été comparée à l'altitude du point de contrôle.

Un test de Wilcoxon pour échantillons appariés montre que la mesure d'altitude minimale est significativement différente de l'altitude du point de contrôle ($V = 208549$, $p < 0,001$). Le test de Kruskal-Wallis permettant de comparer ZMin-Ztopo selon le type de couverture au sol montre qu'il y a inégalité pour au moins un des types de couverture au sol (Kruskal-Wallis $\chi^2 = 114,9197$, $df = 8$, $p < 0,001$).

Pour chaque type de couverture au sol, l'erreur moyenne quadratique (EMQ), l'erreur systématique (ES) et l'écart-type (ET) ont été calculés (Tableau 7). Nous pouvons voir que l'erreur systématique de l'altitude minimale est en générale plus petite que celle de la mesure LIDAR du point le plus proche. Par exemple l'association végétale « Obione (Puccinellie) » présente une erreur systématique nulle, alors qu'elle est égale à 8 cm en prenant le point LIDAR le plus proche. Cette méthode permet une diminution de l'erreur pour huit des dix types de couverture au sol, la diminution moyenne de l'erreur étant de 6 cm. La plus grande amélioration apportée par cette méthode a été observée pour l'association végétale « Puccinellie (Aster, Obione) » (11 cm). Une augmentation de l'erreur de 1 cm est constatée pour la route, et de 2 cm pour l'association végétale « Salicorne (Soude, Puccinellie) ». Pour quatre types de couverture au sol, l'erreur, qui était positive et donc correspondait à une surestimation, devient négative et correspond ainsi à une sous-estimation de l'altitude : c'est le cas pour la route, l'estran nu, « Salicorne (Soude, Puccinellie) », et « Puccinellie (Salicorne) ».

Tableau 7 : Erreur moyenne quadratique (EMQ), erreur systématique (ES), et écart-type (ET) par type de couverture au sol des données LIDAR premier écho du point le plus proche (Zfp) et des données LIDAR premier écho d'altitude minimale situées dans un carré de 3x3 m centré sur chaque point de contrôle (Zmin). La correction apportée par le calcul de Zmin par rapport à Zfp est égale à $|ES\ Zfp| - |ES\ Zmin|$. Les valeurs sont en mètres, n représente le nombre de points traités.

Couverture au sol	n	LIDAR premier écho le plus proche (Zfp)			LIDAR premier écho d'altitude minimale (Zmin)			Correction = $ ES\ Zfp - ES\ Zmin $
		EMQ	ES	ET	EMQ	ES	ET	
Route	22	0,08	0,04	0,07	0,08	-0,05	0,05	-0,01
Estran nu	409	0,37	0,04	0,37	0,37	-0,03	0,37	0,01
Salicorne (Soude, Puccinellie)	26	0,13	0,07	0,11	0,11	-0,09	0,06	-0,02
Puccinellie (Salicorne)	21	0,11	0,07	0,08	0,06	-0,01	0,05	0,06
Obione (Puccinellie)	16	0,12	0,08	0,09	0,13	0,00	0,13	0,08
Soude (Salicorne, Spartine)	18	0,14	0,09	0,10	0,09	0,01	0,09	0,08
Obione	77	0,17	0,14	0,09	0,10	0,06	0,08	0,08
Puccinellie (Aster, Obione)	42	0,19	0,15	0,11	0,08	0,04	0,07	0,11
Obione (Chiendent)	165	0,22	0,17	0,14	0,15	0,09	0,12	0,08
Chiendent	41	0,22	0,19	0,11	0,12	0,10	0,08	0,09

Tableau 8 : Erreur moyenne quadratique (EMQ), erreur systématique (ES), et écart-type (ET) par type de couverture au sol des données LIDAR premier écho d'altitude moyenne (Zmoy) et maximale (Zmax) situées dans un carré de 3x3 m centré sur chaque point de contrôle. La correction apportée par le calcul de Zmoy par rapport à Zfp est égale à $|ES\ Zfp| - |ES\ Zmoy|$. Les valeurs sont en mètres, n représente le nombre de points traités.

Couverture au sol	n	LIDAR premier écho d'altitude moyenne (Zmoy)			Correction = $ ES\ Zfp - ES\ Zmoy $	LIDAR premier écho d'altitude maximale (Zmax)		
		EMQ	ES	ET		EMQ	ES	ET
Route	22	0,05	0,03	0,03	0,01	0,14	0,12	0,07
Estran nu	409	0,36	0,04	0,36	0,00	0,38	0,11	0,36
Salicorne (Soude, Puccinellie)	26	0,07	0,04	0,06	0,03	0,18	0,16	0,08
Puccinellie (Salicorne)	21	0,11	0,10	0,05	-0,03	0,22	0,21	0,07
Obione (Puccinellie)	16	0,12	0,07	0,10	0,01	0,16	0,14	0,07
Soude (Salicorne, Spartine)	18	0,12	0,09	0,07	0,01	0,20	0,18	0,09
Obione	77	0,15	0,14	0,06	0,01	0,23	0,21	0,08
Puccinellie (Aster, Obione)	42	0,17	0,15	0,07	0,00	0,28	0,26	0,09
Obione (Chiendent)	165	0,22	0,18	0,13	-0,01	0,31	0,27	0,15
Chiendent	41	0,21	0,20	0,07	0,00	0,32	0,31	0,10

Etude de l'altitude moyenne mesurée au sein des carrés

Nous avons réalisé les mêmes calculs avec la valeur d'altitude moyenne au sein du carré de 3x3 m entourant chaque point de contrôle (Tableau 8). Quatre types de couverture au sol voient leur erreur systématique diminuer, deux la voient augmenter, et trois présentent la même erreur qu'avec la mesure LIDAR la plus proche. Le calcul de la correction apportée par cette méthode (correction = $|ES\ Zfp| - |ES\ Zmoy|$) permet de constater que la moyenne de l'amélioration est nulle.

Etude de l'altitude maximale mesurée au sein des carrés

Enfin, nous avons réalisé les mêmes calculs avec la valeur d'altitude maximale au sein du carré de 3x3 m entourant chaque point de contrôle (Tableau 8). En effet, dans l'hypothèse que le faisceau laser n'atteint pas le sol dans les zones de végétation dense, l'erreur systématique de l'altitude maximale mesurée au sein du carré de 3x3 m peut être vue comme une approximation de la hauteur à partir de laquelle la végétation est assez dense pour réfléchir l'impulsion laser.

La valeur de l'erreur systématique la plus basse est obtenue pour l'estran nu (11 cm) puis pour la route (12 cm). Le fait que cette valeur n'est pas nulle malgré l'absence de végétation peut venir pour l'estran nu de modifications de la topographie qui ont pu avoir lieu pendant les 5 mois séparant l'acquisition des levés topographiques et des données LIDAR. En effet, les zones non couvertes de végétation sont plus mobiles et les mouvements de sédiments y sont plus fréquents. Pour la route, une raison possible serait une variation de la pente au sein du carré de 3x3 m. C'est en effet pour les points situés sur la route que la valeur moyenne de la pente est la plus élevée : elle est de 4,5%, contre 2,3% pour l'estran nu et 3,3% en moyenne pour les zones végétalisées. La distance maximale entre un point topographique et un impact LIDAR au sein d'un carré de 3x3 m étant de 2 m, l'erreur due à la pente peut donc être en moyenne de 9 cm pour la route, 6,6 cm pour les associations végétales et 4,6 cm pour l'estran nu. Deux associations végétales présentent des valeurs d'erreur systématique peu différentes de celle de la route : 14 cm pour « Obione (Puccinellie) » et 16 cm pour « Salicorne (Soude, Puccinellie) ». Par contre, l'association « Puccinellie (Salicorne) », qui pourtant est composée d'une espèce basse, la Puccinellie, et d'une espèce de hauteur moyenne mais de densité faible, la Salicorne, présente une valeur d'erreur systématique de 21 cm. Il est possible que cette forte valeur soit due à la présence de buttes fréquentes dans cette zone pionnière. Les erreurs systématiques de l'altitude maximale les plus importantes sont observées pour les associations végétales comportant le Chiendent, soit comme espèce dominante (31 cm), soit comme espèce accompagnatrice de l'Obione (27 cm). On peut penser que ces fortes valeurs sont dues au fait que cette espèce pousse en touffes hautes qui arrêtent le faisceau laser bien avant le sol.

3.2.1.5. Discussion

Fiabilité des données LIDAR premier écho et dernier écho

Le dernier écho présente des valeurs d'altitude (Zlp) plus hautes que le premier écho (Zfp). Ce résultat est étonnant car théoriquement le premier écho devrait correspondre à la première surface rencontrée par le laser, donc potentiellement à la végétation, et le dernier

écho à la dernière surface rencontrée, c'est-à-dire le sol. Z_{lp} devrait donc en théorie être plus petit que Z_{fp} , ce qui n'est pas le cas ici puisque la moyenne des différences $Z_{fp}-Z_{lp}$ est égale à -4 cm. Ce problème a déjà été rencontré dans une autre étude (Rosso *et al.*, 2006), où il a été constaté une différence entre les données premier écho et les données dernier écho de -1,9 cm pour des données acquises au-dessus de la végétation, et de -1,1 cm pour des données acquises au-dessus d'une route. Ce problème pourrait être dû au fait que les deux hauteurs d'impact sont trop proches l'une de l'autre dans le cas d'une végétation basse. La hauteur minimale entre deux surfaces discernables par deux échos différents dépend de la durée de l'impulsion laser et est généralement comprise entre un et deux mètres (Baltasvias, 1999). Puisque la végétation du marais salé ne dépasse généralement pas 1 m de haut, les deux retours de l'onde se font quasi-simultanément et il est alors difficile de distinguer les deux échos. Le premier écho serait alors plus fiable que le dernier écho, et c'est en effet le premier écho qui est généralement utilisé pour les études concernant des zones de végétation basse (par exemple Streutker *et al.*, 2006). Contrairement aux études en milieu forestier, la différence premier écho – dernier écho ne peut donc pas ici nous renseigner sur la hauteur de la végétation.

Fiabilité des données LIDAR en fonction de la couverture au sol

L'estimation de la fiabilité du LIDAR premier écho montre que la route présente les plus faibles valeurs d'erreur moyenne quadratique (8 cm), d'erreur systématique (4 cm) et d'écart-type (7 cm). Ces faibles valeurs d'erreur montrent la haute précision de ces données LIDAR. Pour comparaison, une erreur moyenne quadratique de 6 à 8 cm a été mesurée au niveau d'une route par Rosso *et al.* (2006).

Les données LIDAR premier écho acquises au-dessus de la végétation présentent une surestimation de 7 à 19 cm. Les résultats montrent que l'erreur systématique des données LIDAR dépend du type de végétation, c'est-à-dire de sa hauteur et de sa densité (Figure 42). On peut en effet remarquer que les associations végétales présentant les erreurs systématiques les plus faibles sont celles dont les espèces dominantes présentent soit une hauteur faible comme la Puccinellie, soit une hauteur moyenne mais une faible densité, comme la Salicorne, la Soude, et la Spartine. Au contraire, les associations végétales comportant les espèces les plus hautes et denses, comme le Chiendent et l'Obione, présentent les erreurs systématiques les plus élevées. On peut remarquer le cas des associations végétales présentant à la fois des espèces hautes et des espèces basses. Par exemple, l'association végétale « Puccinellie (Aster, Obione) » présente une erreur systématique de 15 cm, bien supérieure à celle de « Puccinellie

(Salicorne) » qui est de 7 cm : cette valeur élevée est certainement due à la présence de l’Aster, qui peut être haute en septembre, date de l’acquisition des données LIDAR, alors qu’elle est encore en floraison. L’autre cas concerne l’Obione, qui, accompagnée par la Puccinellie, présente une erreur systématique plus faible (8 cm) que seule (14 cm) ou accompagnée de Chiendent (17 cm). On peut penser que lorsque l’Obione est en présence de Puccinellie, elle est à la fois moins haute et moins dense, ce qui permet cette faible valeur d’erreur.

On peut donc voir que l’erreur systématique des données LIDAR acquises au-dessus de la végétation des marais salés dépend non seulement de la hauteur, mais aussi de la densité de la végétation, et que pour comprendre cette erreur il faut considérer à la fois les espèces dominantes et les espèces accompagnatrices.

Ces valeurs d’erreur systématique correspondent à celles mesurées dans une autre étude concernant les marais salés où le biais mesuré au-dessus du Chiendent était de 20 cm, et celui de l’Obione de 15 cm (Populus *et al.*, 2001). Cette surestimation ne correspondrait pas à la hauteur de la canopée, mais à une certaine hauteur entre le sol et la canopée à partir de laquelle la végétation devient trop dense pour que le faisceau LIDAR puisse la traverser.

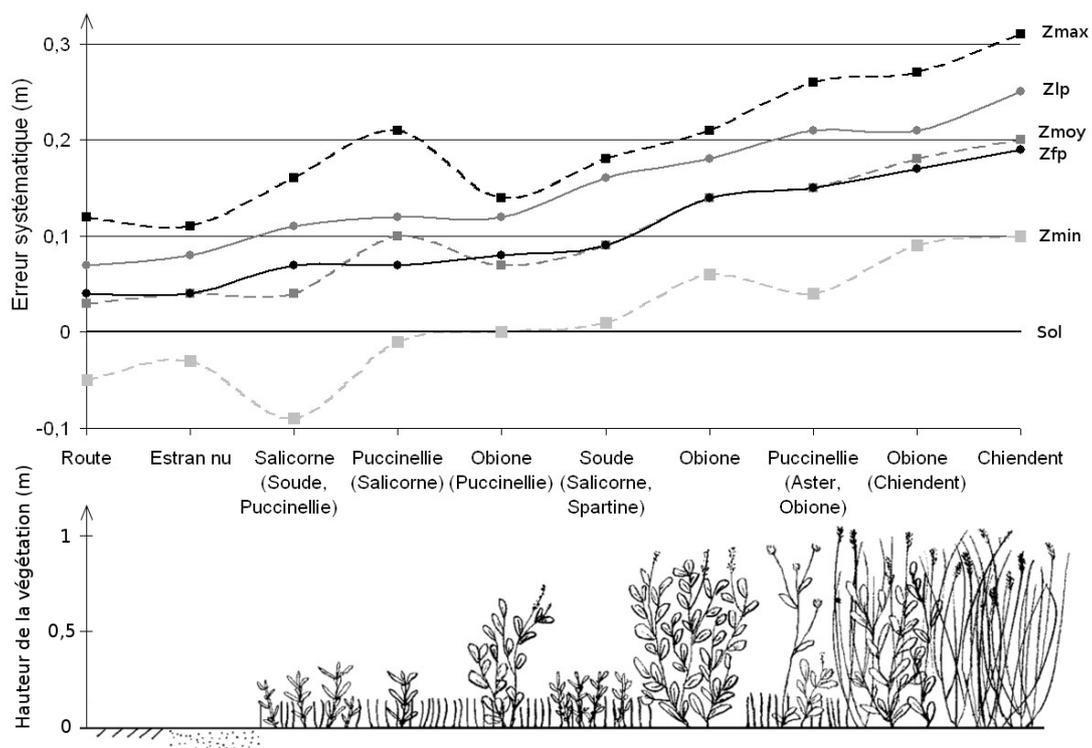


Figure 42 : Erreurs systématiques (m) pour chaque type de couverture au sol, obtenues en comparant les levés topographiques considérés comme points de contrôle et les données LIDAR les plus proches, premier écho (Zfp) et dernier écho (Zlp), ainsi que les données LIDAR d’altitude minimale (Zmin), moyenne (Zmoy) et maximale (Zmax) dans un carré de 3x3 m autour de chaque levé topographique.

Recherche d'une correction

L'acquisition de levés topographiques permet le calcul de l'erreur systématique des données LIDAR pour les différents types de couverture au sol. Ainsi, il est possible de corriger les données LIDAR en soustrayant l'erreur systématique correspondant à chaque type de couverture au sol. Cependant, l'acquisition de levés topographiques n'a été réalisée ici que sur une petite surface, et nous ne connaissons pas les erreurs systématiques des autres types de couvertures au sol situées dans le reste de la Baie. Il faudrait réaliser d'autres levés topographiques, mais c'est une opération longue et souvent malaisée dans ces zones difficiles d'accès. Il est donc intéressant de chercher une autre méthode de correction qui serait applicable à l'ensemble des marais salés, et non spécifique à chaque association végétale. C'est dans ce but que nous avons comparé les mesures topographiques aux mesures LIDAR d'altitude minimale. Considérer la mesure LIDAR d'altitude minimale dans un carré de 9 m² permet, pour 8 types de couverture au sol sur 9, une amélioration de 1 à 11 cm par rapport à la mesure LIDAR la plus proche, ce qui ramène l'erreur systématique de 1 à 10 cm en valeur absolue, au lieu de 7 à 19 cm. Seules la route et l'association végétale « Salicorne (Soude, Puccinellie) » présentent une erreur systématique plus élevée avec la valeur minimale dans le carré de 3x3 m qu'avec la mesure la plus proche (l'augmentation de l'erreur est de 1 cm pour la route et de 2 cm pour « Salicorne (Soude, Puccinellie) »). Pour quatre types de couverture au sol (Route, Estran nu, « Salicorne (Soude, Puccinellie) », et « Puccinellie (Salicorne) »), les résultats aboutissent à une sous-estimation du terrain allant de 1 à 9 cm. Cette sous-estimation peut être due au fait que le terrain présente des irrégularités, en particulier dans les zones pionnières où la végétation est organisée en mottes hautes de 20 à 30 cm (Langlois *et al.*, 2003). Ainsi la mesure d'altitude minimale peut correspondre à une petite dépression alors que la mesure topographique a pu être prise sur une butte. Cette erreur reste cependant faible, et nous pouvons dire que malgré cela, la méthode de correction est satisfaisante puisqu'elle permet d'obtenir des erreurs systématiques inférieures ou égales à 10 cm. Une correction possible du Modèle Numérique de Surface au niveau de la végétation des marais salés est d'utiliser un filtre minimum de fenêtre 3x3 m. L'efficacité de cette correction sera maximale au niveau des zones éloignées de plus de 1 m des chenaux et où la végétation est continue mais peu dense. La taille de fenêtre de 3x3 m a été choisie ici pour avoir un nombre raisonnable de mesures LIDAR (ici en moyenne 4,5) : pour de futures études, cette taille de fenêtre pourra donc être réévaluée selon la densité des données LIDAR.

Conclusion

Nous nous sommes proposé dans ce travail d'évaluer le potentiel des données LIDAR multiécho pour l'étude de la végétation du marais salé de la baie du Mont-Saint-Michel. Nous avons mis en évidence que les données LIDAR acquises au-dessus de la baie du Mont-Saint-Michel présentent une surestimation systématique. Cette surestimation est de 4 à 19 cm pour les données premier écho et de 7 à 25 cm pour les données dernier écho. Les données premier écho sont donc plus fiables que les données dernier écho. Le fait que les données dernier écho correspondent à des altitudes plus élevées que les données premier écho n'a pas encore été expliqué, et nécessite de futures études. Ce phénomène pourrait être dû au fait que la faible hauteur de la végétation (<1m) ne permet pas de distinguer les deux retours. On ne peut donc pas dans notre cas étudier la hauteur de la végétation à partir de la différence des données premier écho et des données dernier écho.

D'autre part, nous avons mis en évidence que le biais des données LIDAR dépend de la hauteur et de la densité des différentes espèces végétales présentes sur le marais salé. La valeur de cette erreur systématique dépend aussi bien des espèces végétales dominantes que des espèces accompagnatrices. La surestimation est de 7 à 8 cm pour les associations végétales de hauteur de canopée faible à moyenne, et de densité faible. Elle est de 14 à 19 cm pour les associations comprenant des espèces végétales hautes et denses.

Une correction possible de ce biais consiste à considérer la valeur LIDAR minimale au sein d'un carré de 3x3 m. Cette correction réduit l'erreur systématique à moins de 10 cm. Cette erreur est assez faible pour permettre l'étude de la relation entre l'altitude et les espèces végétales du marais salé, et les données que nous utilisons dans la suite de ce travail ont été corrigées avec cette méthode.

3.2.2. Les données de géomorphologie

A partir d'observation de terrain, de photo-interprétation de l'orthophotographie, et de l'étude de coupe altitudinales réalisées grâce au données LIDAR, nous avons créé une typologie des objets géomorphologiques présents sur les marais de la Baie du Mont-Saint-Michel (Tableau 9 et Figure 43).

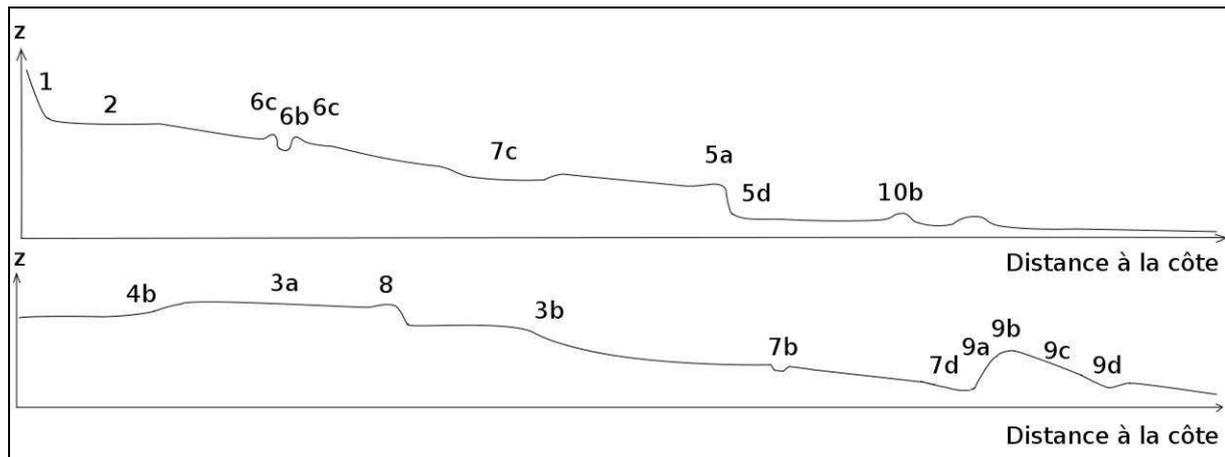


Figure 43 : Schéma de quelques entités géomorphologiques rencontrées sur la Baie du Mont-Saint-Michel, en coupe altitudinale. Les codes sont donnés dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Codes des entités géomorphologiques résumées (en 10 classes, « Geomor ») et détaillées (en 30 classes, « Geomori »).

Geomor	Géomorphologie	Géomorphologie détaillée	Geomori
1	Pente de la digue		1
2	Terrain plat		2
3	Pente normale	Faible (<1%)	3a
		Forte (>1%)	3b
4	Pente inverse	Faible (<1%)	4a
		Forte (>1%)	4b
5	Microfalaise	Levée de microfalaise	5a
		Bord de microfalaise sans levée	5b
		Pente de la microfalaise	5c
		Pied de la microfalaise	5d
6	Chenal	Bord du chenal	6a
		Fond du chenal	6b
		Levée de chenal	6c
		Micro-chenal	6d
7	Dépression	Dépression peu étendue (< 10 m) et peu profonde (-10 cm)	7a
		Dépression peu étendue (< 10 m) et profonde (-20 cm)	7b
		Cuvette (étendue > 10 m)	7c
		Dépression / vasière isolée par un cordon coquillier	7d
8	Talus	Levée de talus	8a
		Bord de talus sans levée	8b
		Pente du talus	8c
		Pied de talus	8d
9	Cordon	Versant interne	9a
		Sommet	9b
		Versant externe	9c
		Avant-cordon	9d
10	Buttes	Petites buttes (étendue <10 m), arrondies, dans le schorre	10a
		Petites buttes (étendue <10 m), arrondies, en limite slikke-schorre	10b
		Petites buttes (étendue <10 m) ; allongées, limitées par des micro-chenaux	10c
		Surélévation (étendue >10 m)	10d

C'est à partir de cette typologie que nous avons déterminé le contexte géomorphologique de chaque point d'observation. En effet, l'observation du profil altitudinal permet de définir si le point considéré est situé sur une pente faible ou forte, dans une dépression, sur une levée de chenal, ou encore sur un cordon coquillier (Figure 44).

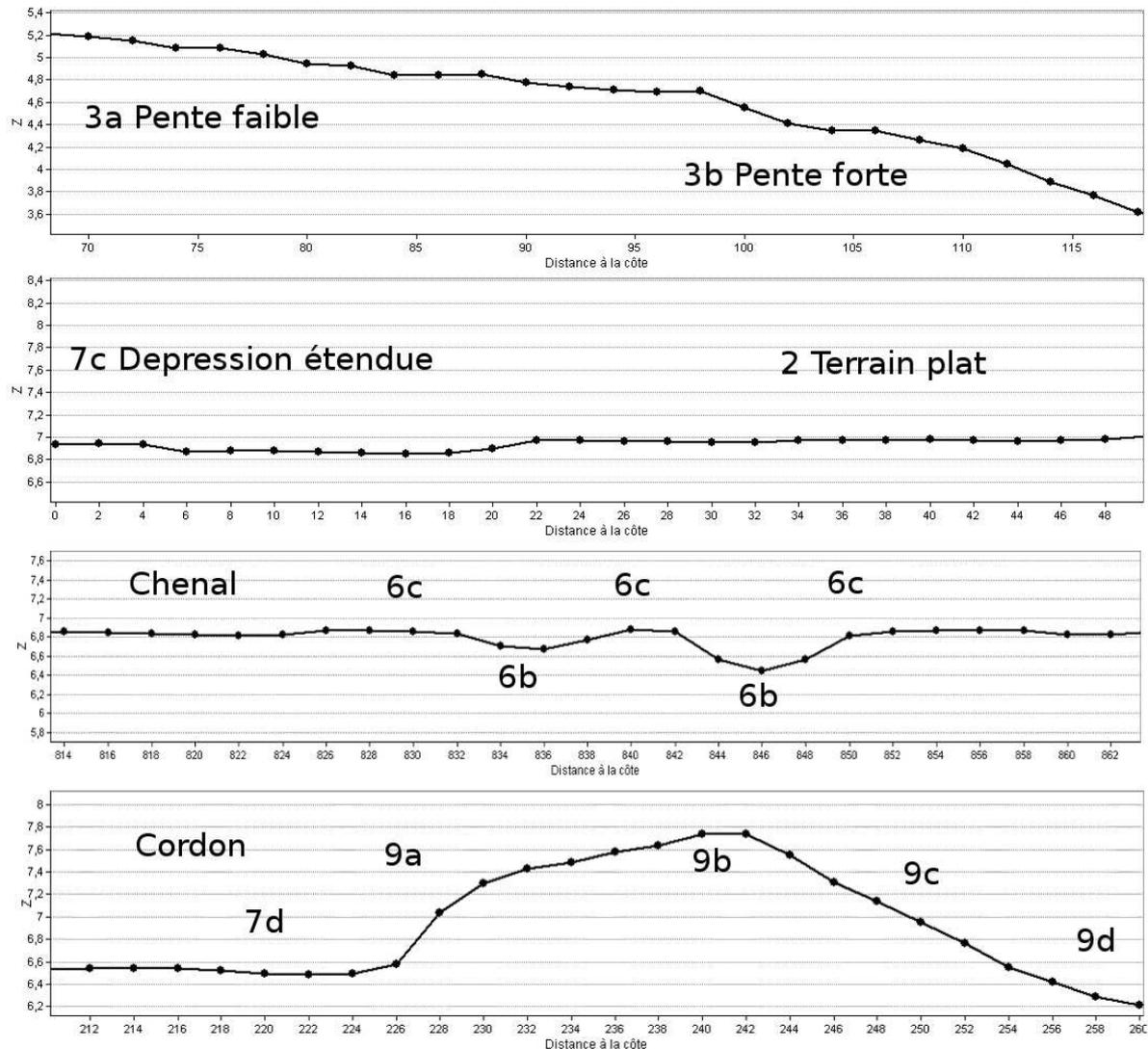


Figure 44: Quelques exemples de profils permettant de déterminer le contexte géomorphologique de chaque point.

3.2.3. Le tableau des transects de végétation

L'ensemble des points des 28 transect a été rassemblé dans un SIG (ESRI® ArcGis 9.2). Les différentes cartes et données de télédétection ont été superposées, et pour chaque point la valeur de chacune des images a été renseignée. Une base de données a ainsi été constituée et présente, pour chaque point d'observation, les champs suivants :

- « **Id** » : Identifiant numérique du point d'observation, de 0 à 9827.
- « **Code** » : Identifiant des points par transect, déterminé sur le terrain, correspondant à la distance au début du transect (tous les 2m).
- « **Transect** » : Nom du transect, les deux derniers chiffres indiquant l'année d'observation,
- « **Cle** » : Clé du point d'observation, c'est-à-dire son nom qui l'identifie de manière unique, facilement identifiable car comprenant le nom du transect et le code du point.
- « **X** » : Coordonnée du point en X en RGF93 Lambert 93.
- « **Y** » : Coordonnée en du point Y en RGF93 Lambert 93.
- 34 colonnes donnant la **composition floristique** du point d'observation (0 : absence, 1 : présence, 2 : dominance) (Tableau 3).
- « **Zcorr** » : Altitude IGN69 en 2002 (les données LIDAR ont été corrigées du biais causé par la végétation en prenant la valeur minimale 3m autour du point, la précision est de plus ou moins 10 cm).
- « **Pente** » : Valeur de la pente en pourcentage, déterminée à partir des données LIDAR de 2002.
- « **DirPente** » : Orientation de la pente en degré par rapport au Nord, déterminée à partir des données LIDAR de 2002.
- « **UtilAgri** » : Utilisation agricole, déterminée grâce à la carte de 2002 de Alain Radureau (Tableau 6)
- « **R** », « **V** », et « **B** » : Luminance (énergie réfléchie ou émise par une surface) dans le rouge, le vert, et le bleu, déterminées par rapport à l'orthophotographie de 2002 (valeurs comprises entre 0 et 255).
- « **Sediment** » : Nature des sédiments, données de la carte géologique de la Baie du Mont Saint Michel au 1/50 000 BRGM 1999 (Tableau 5).
- « **Geomor** » : Code des entités géomorphologiques déterminées à partir des profils altimétriques (données LiDAR 2002 corrigées) et de l'orthophotographie de 2002, résumées en 10 classes (Tableau 9).
- « **Geomori** » : Code des entités géomorphologiques déterminées à partir des profils altimétriques (données LiDAR 2002 corrigées) et de l'orthophotographie de 2002, détaillées en 30 classes (Tableau 9).

C'est ce tableau qui a été soumis aux analyses statistiques et fréquentielles.

3.3. Présentation des méthodes utilisées

3.3.1. Méthode générale

Nous avons choisi de commencer notre étude par l'analyse comparée de trois secteurs de la Baie du Mont-Saint-Michel. Dans le but de comprendre l'organisation spatiale de la végétation, les données des transects correspondant aux trois secteurs sont soumises à une analyse descriptive et des tests statistiques de comparaison, puis à une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC), et à une Analyse Fréquentielle. Dans un deuxième temps, l'étude est élargie à l'ensemble de la Baie. Une relation entre l'altitude et la coordonnées X est recherchée par des méthodes de régressions linéaires et non linéaires. Des analyses fréquentielles permettent ensuite l'étude des associations végétales de la Baie et leur liaison avec les différents facteurs écologiques considérés.

3.3.2. L'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC)

L'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) est une méthode d'analyse multivariée permettant de synthétiser graphiquement l'information de grands tableaux de données, grâce à la prise en compte des écarts à l'indépendance (P. Cibois, 1983). Le tableau est décomposé par un algorithme produisant tout d'abord un tableau d'estimation des écarts à l'indépendance, puis une suite de tableaux correctifs affinant cette estimation, généralement de moins en moins informatifs. Chaque tableau donne pour chaque ligne (individu) et chaque colonne (variable) une valeur qui servira de coordonnées dans la représentation graphique, définissant ainsi un axe factoriel. Généralement, le croisement des deux axes factoriels les plus informatifs sur un repère orthonormé permet d'analyser visuellement le contenu du tableau, en observant les attirances ou les répulsions entre les individus et les variables.

En écologie végétale, les AFC peuvent être utilisées pour mettre en évidence les facteurs d'organisation de la végétation, et notamment des gradients écologiques (Alexandre, 1996). Dans notre étude, le tableau soumis à l'AFC est constitué des espèces végétales en colonnes, et des points d'observation en ligne, classés pour chaque transect dans l'ordre de la distance à la côte. Les cases du tableau décrivent l'absence (0), la présence (1) ou la dominance (2) des espèces au niveau des points d'observation. En visualisant les valeurs des axes de l'AFC des points d'observation en fonction de leur distance à la côte, on donne à la représentation graphique des résultats une signification spatiale. Il est alors possible, en croisant graphiquement plusieurs axes de l'AFC, de mettre en évidence des discontinuités entre portions de transect où les trois courbes ont des comportements relativement

homogènes. Un certain nombre de segments homogènes sont ainsi identifiés le long des transects.

La composition floristique simplifiée de ces segments est ensuite déterminée de la manière suivante : pour chaque espèce, on calcule la fréquence des notations 0, 1 et 2 dans l'ensemble des relevés de 2 m composant le segment, et la notation retenue est celle qui est majoritaire. Si une espèce est présente dans moins de la moitié des relevés du segment, on lui assigne le symbole « * » pour indiquer sa présence. Cette méthode simple est préférée à des calculs plus élaborés, par exemple de fréquence spécifique, qui exigent des séries de données supérieures à 33 (Daget & Poissonet, 1995). On peut résumer cette information à des suites ordonnées d'espèces du type « ASTE > SUAE, PUCC >> ELYT », ce qui signifie que *Aster tripolium* est l'espèce dominante (notée « 2 »), alors que *Suaeda maritima* et *Puccinellia maritima* sont majoritairement présentes (notées « 1 ») et *Elytrigia atherica* minoritairement présente (notée « * »). Lorsque la composition floristique simplifiée mettra en évidence une espèce dominante (par exemple *Aster tripolium*) et une espèce minoritairement présente (par exemple *Elytrigia atherica*), on notera alors « ASTE >>> ELYT ».

La pertinence des segments définis par l'AFC peut ensuite être vérifiée en comparant les compositions floristiques simplifiées deux à deux. Si les segments ont une réalité floristique, on trouvera alors des associations floristiques différentes. Une autre méthode consiste à superposer les segments à l'orthophotographie et voir s'ils correspondent à des changements radiométriques de l'image.

3.3.3. L'analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle est un ensemble de méthodes statistiques permettant l'identification des groupements végétaux et leur caractérisation écologique (Godron, 1968 ; Daget & Godron, 1982). Cette méthode est basée sur la constitution des tables de contingence des présences et absences de chaque paire d'espèces végétales d'après des relevés de terrain. Deux espèces sont d'autant plus liées que la probabilité de leur table de contingence est faible, et elles sont alors regroupées dans le même groupement végétal. Les données de présence-absence d'une espèce selon les modalités d'un paramètre de l'environnement peuvent également être étudiées grâce à une table de contingence et au calcul de sa probabilité. Ceci permet de définir le profil écologique de chaque espèce végétale.

Prenons l'exemple de deux espèces végétales dont le tableau de contingence est le suivant (Tableau 10) :

Tableau 10: Tableau de contingence théorique entre l'espèce 1 et l'espèce 2.

		Espèce 2		Total
		Présence	Absence	
Espèce 1	Présence	a	b	a+b
	Absence	c	d	c+d
Total		a+c	b+d	n

La probabilité qu'une telle situation se rencontre sur le terrain est donnée par la formule : $P = \frac{a!b!c!d!}{(a+b)!(c+d)!(a+c)!(b+d)!n!}$

Si les deux espèces se répartissent indépendamment l'une de l'autre, a, b, c, et d présentent des valeurs proches, et la probabilité de la table de contingence est forte (proche de un). Au contraire si les deux espèces sont rencontrées ensemble plus souvent que ne le permettrait le hasard, la probabilité de la table de contingence est faible.

L'observation d'une situation sur le terrain apporte d'autant plus d'information que sa probabilité est faible, c'est-à-dire qu'elle s'éloigne de la situation attendue si les espèces se répartissaient au hasard. Pour quantifier cette information, on utilise la formule de Brillouin (1962) : $I = -\log_2 P$

L'unité d'information est le "sha".

Deux espèces seront donc d'autant plus liées que la probabilité de leur table de contingence est faible, c'est-à-dire que la quantité d'information est forte. Elles seront alors associées dans la même association végétale.

Les données de présence des espèces végétales dans les transects sont donc analysées de la manière suivante, les différents calculs étant effectués par un programme réalisé par M. Godron, sous l'environnement Dyalog : pour chaque paire d'espèce, la quantité d'information apportée par la table de contingence est calculée. La valeur la plus forte est alors recherchée parmi l'ensemble des paires d'espèces considérées. Elle correspond à la liaison la plus forte existant entre deux espèces. Ces deux espèces donnent les premières lignes du graphe de la première association végétale. Ce graphe est lu horizontalement, et la valeur d'information est indiquée entre les deux espèces végétales, au bout de deux lignes dont la longueur dépend de la valeur d'information. A nouveau, la valeur d'information la plus forte avec l'une des deux espèces est alors recherchée, et l'espèce correspondante est indiquée sur la troisième ligne. Ceci est répété, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'espèce ayant une liaison positive avec les espèces de la première association végétale. Les espèces restantes sont alors assemblées de la même manière dans une ou plusieurs autres associations végétales. Il est possible de ne faire apparaître chaque espèce seulement avec sa liaison la plus forte, ce qui permet d'obtenir les liaisons les plus fidèles.

La répartition d'une espèce selon les modalités d'un facteur écologique peut également être étudiée grâce à cette méthode. La table de contingence entre une espèce et un état d'un facteur est constituée afin de calculer sa probabilité. Lorsque une liaison entre une espèce et un état d'un facteur est statistiquement significative, c'est-à-dire lorsque la probabilité de la table de contingence est inférieure à 0,05 et elle est indiquée par un « + » (« ++ » et « +++ » si la probabilité est inférieure respectivement à 0,01 et 0,001.) Si l'espèce et l'état d'un facteur sont négativement liés, on indiquera cela par des « - ». Les degrés de signification des liaisons entre une espèce et chacun des états d'un facteur sont alors rassemblés dans un tableau. On obtient ainsi les valeurs préférentielles de chaque espèce pour chaque facteur de l'environnement. Réalisée sur plusieurs facteurs de l'environnement, cette analyse permet de tracer le profil écologique de chaque espèce.

4. Traitements et résultats

4.1. Etude de trois secteurs représentatifs de différents contextes

Nous avons choisi trois secteurs des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel représentatifs de différents contextes. Le premier, situé à l'Ouest du Vivier-sur-Mer, est un marais salés non pâturé, de pente faible et régulière. Il correspond à une situation « simple », non influencée par les facteurs de géomorphologie et de pâturage, grâce à laquelle nous espérons comprendre l'organisation générale des marais salés par rapport au phénomène des marées. Le deuxième secteur est situé face à Chemin Dolais, dans une zone où les marais salés sont bordés de cordons coquilliers. Enfin, le troisième secteur se trouve proche de l'estuaire de la Sée, à Vains, sur une zone de pâturage ovin et bovin. Ces analyses s'appuieront pour chacun de ces secteurs sur un ou plusieurs transects (Figure 45).

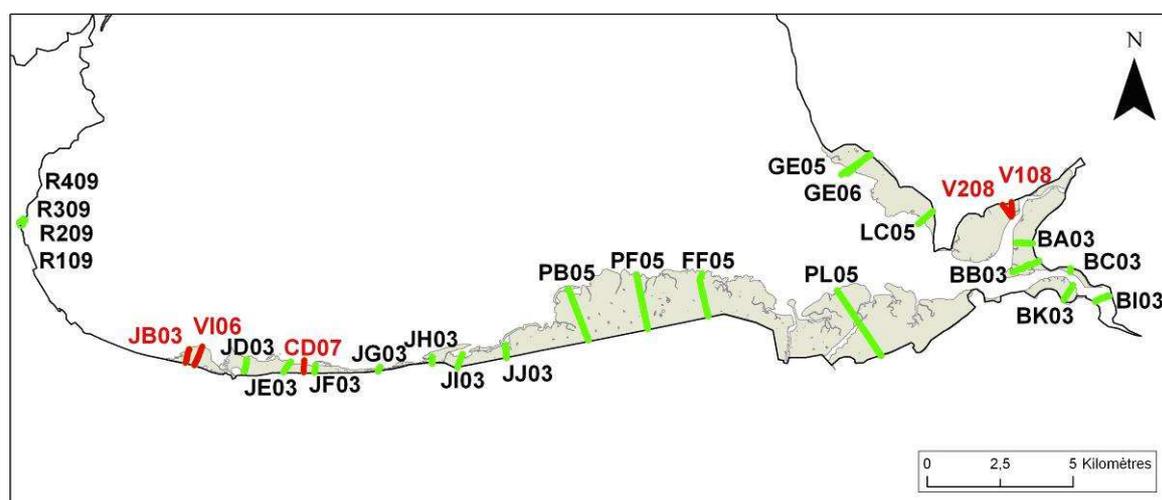


Figure 45 : localisation des transects étudiés (en rouge) dans les trois secteurs sélectionnés.

4.1.1. Le Vivier-sur-Mer : un marais salés « simple »

4.1.1.1. Présentation du secteur

Le secteur étudié se situe à l'Ouest de la Baie du Mont-Saint-Michel, à proximité de Vivier-sur-Mer. C'est un marais salé peu étendu, où le modèle de zonation semble se développer de façon particulièrement claire du fait de l'absence de pâturage et d'obstacles topographiques importants. Deux transects ont été réalisés (Figure 46): l'un en 2003, situé à l'Ouest de la zone et mesurant 516 mètres de long (JB03, Transect Ouest) ; l'autre en 2006, situé à l'Est et mesurant 696 mètres de long (Transect Est, VI06). Les altitudes sont comprises entre 7,02 m et 4,21 m pour le premier transect, et 7,05 m et 3,71 m pour le second. La pente générale est faible, respectivement de 0,55 et 0,47%.

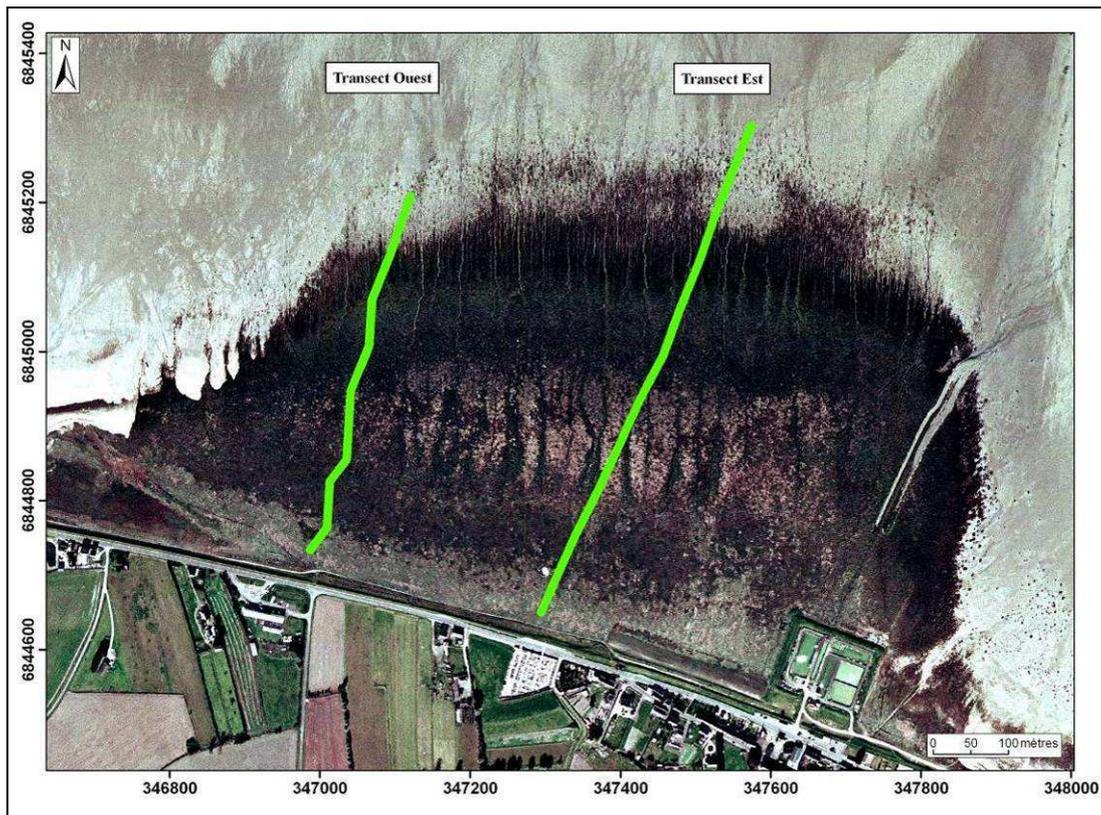


Figure 46 : Superposition des points d'observation des transect JB03 (Ouest) et VI06 (Est), en vert, et de l'orthophotographie. Les coordonnées sont en Lambert 93.



Figure 47: Sur le marais salé situé à l'Est du Vivier-sur-Mer, la haute slikke est marquée par des rides parallèles à la pente creusée par le va-et-vient de la mer. Photo Marianne Cohen.

Les deux transects traversent le haut schorre, le moyen schorre, le bas schorre, et la haute slikke. La haute slikke est marquée par des rides parallèles à la pente creusée par le va-et-vient de la mer (Figure 47). La limite du marais salé est une large zone pionnière constituée d'une végétation discontinue composée de touffe de Salicorne et de Spartine. Ce type de limite indique une avancée du marais sur l'estran, peu à peu colonisé par les plantes pionnières (Kaveh, 2005).

4.1.1.2. Analyse descriptive de l'organisation spatiale de la végétation

Les neuf espèces ont été rencontrées sur ces transects : *Aster tripolium* (rencontrée sur 46% des points d'observation du premier transect et 55% du second), *Atriplex prostrata* (47% et 37%), *Elytrigia atherica* (43% et 26%), *Festuca rubra* (20% sur JB03, absente sur Vi06), *Halimione portulacoides* (46% et 34%), *Puccinellia maritima* (35% et 28%), *Salicornia sp.* (20% et 13%), *Spartina sp.* (44% et 14%), et *Suaeda maritima* (65% et 61%). Couvrant plus de la moitié des transects, *Aster tripolium* et *Suaeda maritima* sont très présentes sur le secteur. Trois espèces végétales sont observées en moyenne pour chaque point. C'est dans le moyen schorre qu'on rencontre le plus d'espèces, avec un nombre maximal d'espèces rencontrées en un point d'observation égal à six.

Les données Lidar permettent de tracer le profil altitudinal de chaque transect, et le rapprocher à la répartition de chaque espèce (Figure 48 et 49).

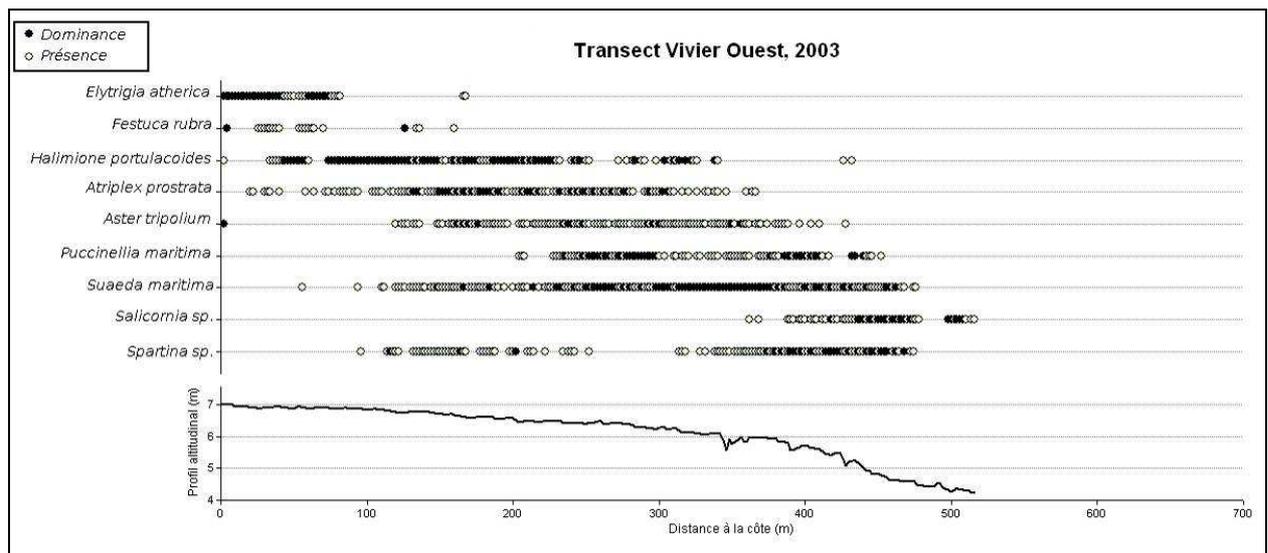


Figure 48 : Profil altitudinal du transect Vivier Ouest JB03 et répartition de chaque espèce végétale le long du transect (point noir = dominance, point blanc = présence).

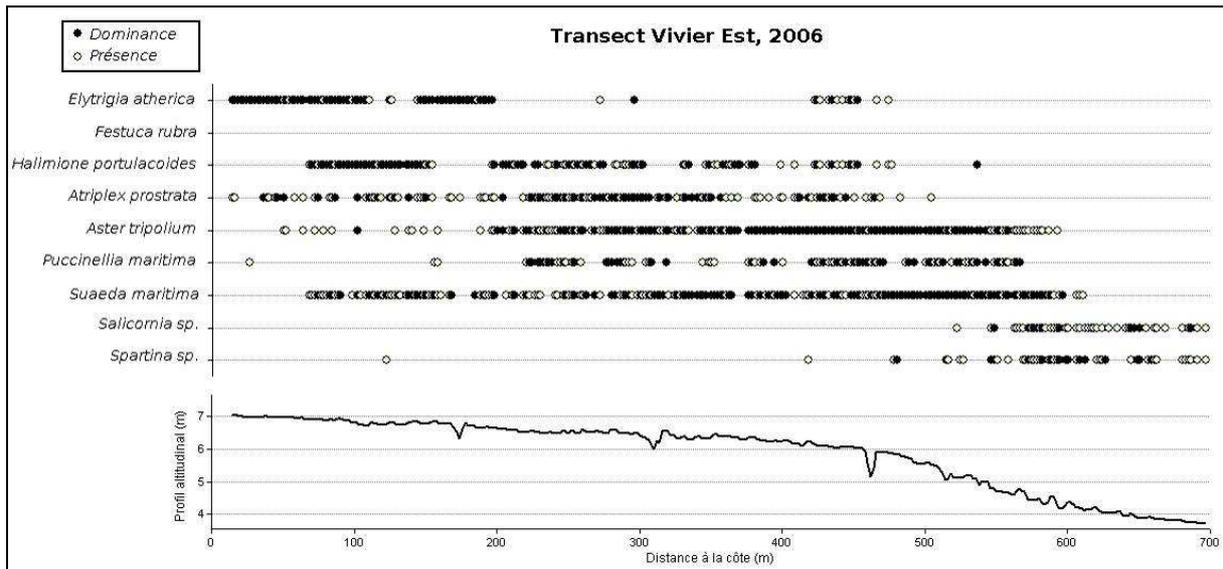


Figure 49 : Profil altitudinal du transect Vivier Est Vi06 et répartition de chaque espèce végétale le long du transect (point noir = dominance, point blanc = présence).

Les zones de répartition des espèces végétales sont larges, la plupart des espèces étant présente la majorité du transect, exception faite de *Festuca rubra* rencontrée seulement en début de transect et de *Salicornia sp.* observée seulement en fin de transect.

Les données LiDAR ont également permis de calculer la moyenne d'altitude à laquelle chaque espèce a été rencontrée (Figure 50 et 51, Tableau 11).

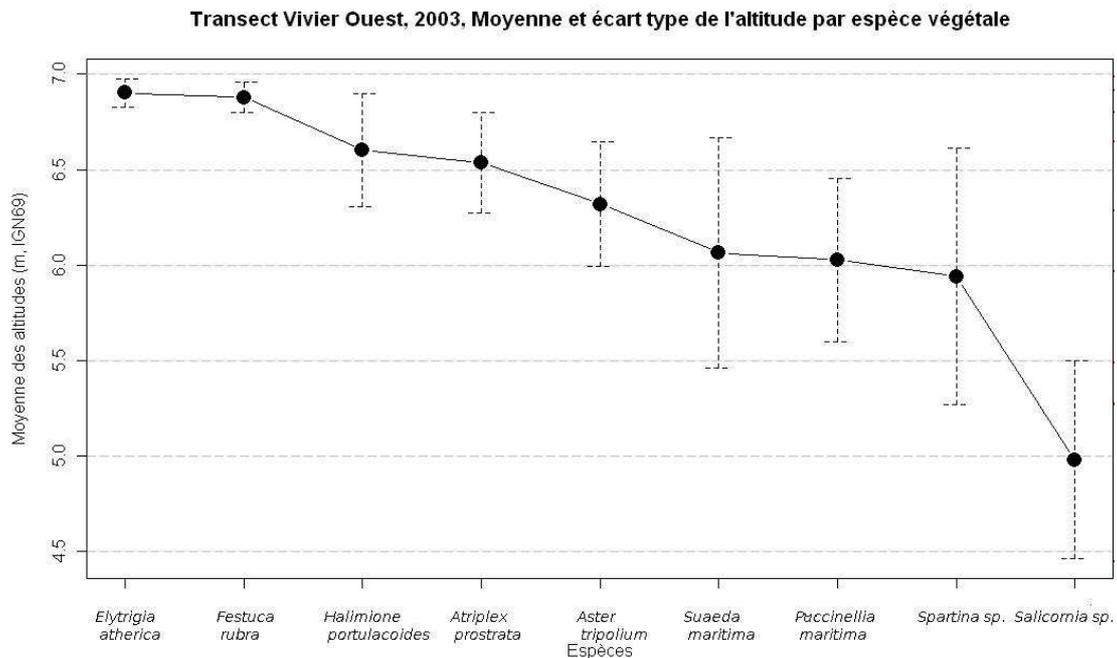


Figure 50 : Altitude moyenne et écart-type de chaque espèce végétale rencontrée sur le transect Ouest, JB03.

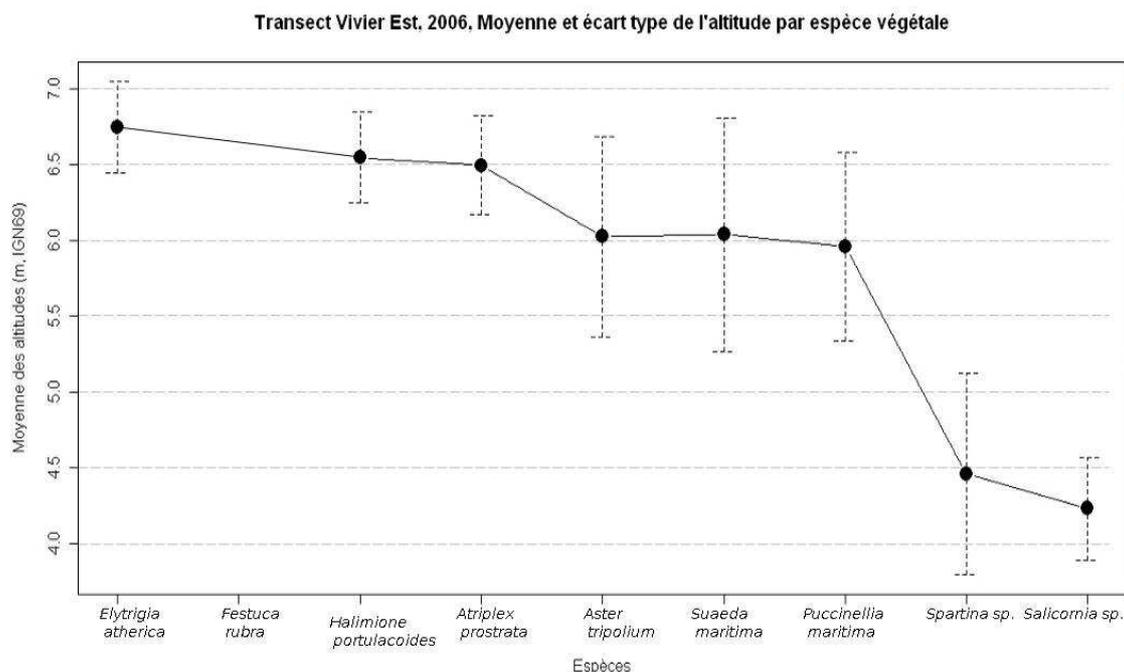


Figure 51 : Altitude moyenne et écart-type de chaque espèce végétale rencontrée sur le transect Est, VI06.

Tableau 11 : Statistiques des altitudes (m, IGN69) où a été rencontrée chaque espèce végétale sur les Transect Ouest (JB03) et Est (VI06) du Vivier-sur-mer.

Espèce	Transect Ouest JB03				Transect Est VI06			
	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type
<i>Elytrigia atherica</i>	6,62	6,90	7,02	0,08	5,90	6,75	7,05	0,30
<i>Festuca rubra</i>	6,67	6,88	7,02	0,08				
<i>Halimione portulacoides</i>	5,23	6,60	7,00	0,30	5,07	6,55	6,95	0,30
<i>Atriplex prostrata</i>	5,56	6,54	6,95	0,26	5,17	6,50	7,05	0,33
<i>Aster tripolium</i>	5,08	6,32	7,00	0,33	4,32	6,03	6,99	0,66
<i>Suaeda maritima</i>	4,53	6,06	6,91	0,60	4,17	6,04	6,95	0,77
<i>Puccinellia maritima</i>	4,77	6,03	6,52	0,43	4,59	5,96	7,00	0,63
<i>Spartina sp.</i>	4,58	5,94	6,89	0,67	3,72	4,46	6,75	0,66
<i>Salicornia sp.</i>	4,21	4,98	5,99	0,52	3,72	4,23	5,11	0,34

On observe bien une organisation des espèces végétales selon l'altitude, dans l'ordre suivant (les altitudes moyennes sur les transects Ouest et Est sont entre parenthèse) : *Elytrigia atherica* (6,90 m et 6,75 m), *Festuca rubra* (6,88 m, présente uniquement sur le transect Ouest), *Halimione portulacoides* (6,60 m, 6,55 m), *Atriplex prostrata* (6,54 m et 6,50), *Aster tripolium* (6,32 m et 6,03 m), *Suaeda Maritima* (6,06 m et 6,04 m), *Puccinellia maritima* (6,03 m et 5,96 m), *Spartina sp.* (5,94 m et 4,46 m), et *Salicornia sp.* (4,98 m et 4,23 m).

Si l'organisation spatiale de la végétation selon altitude est bien visible sur les figures 50 et 51, certaines espèces présentent des écarts-type d'altitude importants. C'est le cas notamment pour les espèces du moyen schorre, comme *Suaeda maritima* (d'écart type 0,60 m et 0,77 m), qui est présente sur presque tout le transect (65% et 61% des points) comme le montre sa répartition sur les Figures 48 et 49. Ces écarts-type élevés sont la preuve d'une certaine plasticité de ces espèces vis-à-vis du facteur altitude.

Une autre façon de visualiser la valence de chaque espèce par rapport au facteur altitude est de tracer les courbes de densité des espèces selon l'altitude (Figure 52 et 53) : plus une courbe de densité est aplatie, plus l'espèce sera susceptible de se développer sur une large plage de valeur du facteur considéré.

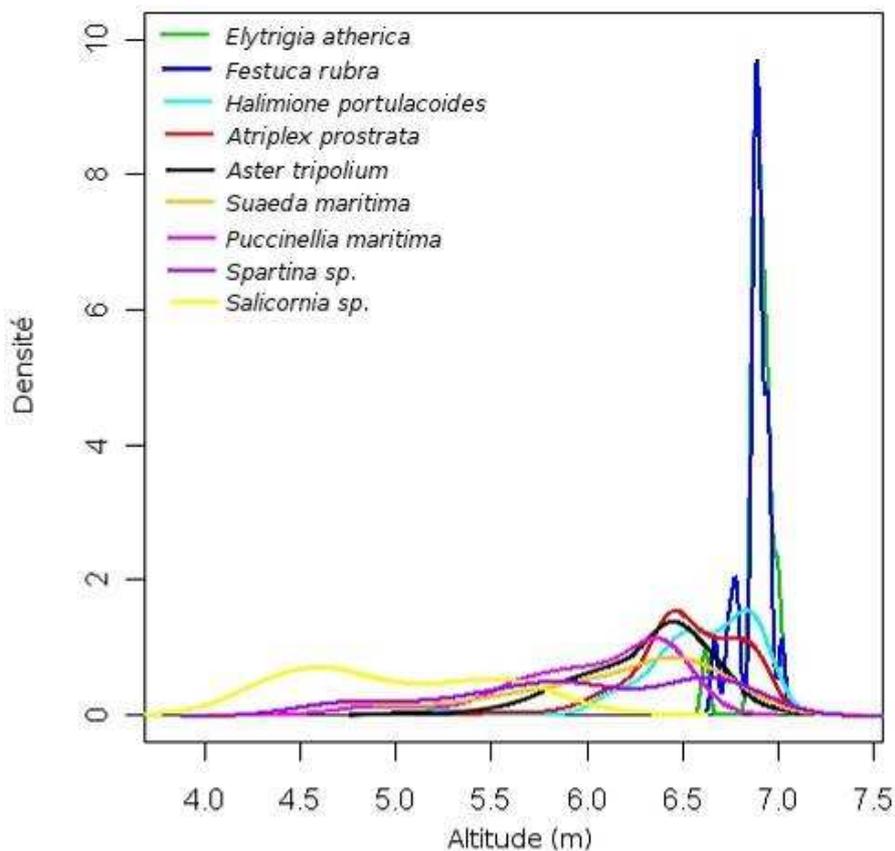


Figure 52 : Densité de la distribution des espèces selon l'altitude pour le transect Ouest JB03.

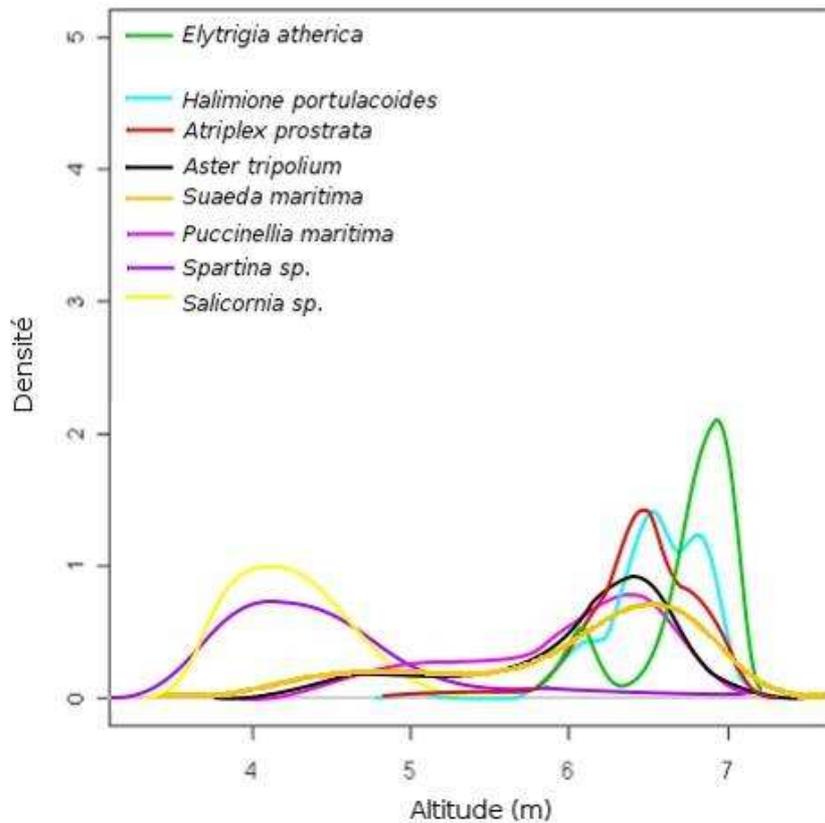


Figure 53 : Densité de la distribution des espèces selon l'altitude pour le transect Est Vi06.

On peut remarquer que la plupart des espèces présentent des distributions aplaties, preuve d'une certaine plasticité vis-à-vis de l'altitude. Certaines distributions apparaissent presque bimodales, ce qui pourrait être le signe de l'influence d'un autre facteur que l'altitude. D'autre part, on peut noter que certaines espèces présentent des courbes de densité de distributions très différentes d'un transect à l'autre. Ainsi *Elytrigia atherica* présente une distribution unimodale dans le transect Ouest, mais une courbe bimodale dans le transect Est, avec un pic vers 6,9 m correspondant aux points situés en début de transect sur le haut schorre, et un autre vers 6,1 m, correspondant aux points situés au bord d'un micro-chenal. La présence d'*Elytrigia atherica* à cette altitude pourrait être la conséquence d'un autre facteur écologique que l'altitude, comme la pente ou la géomorphologie. De même, *Spartina sp.* présente une densité de présence selon l'altitude différente d'un transect à l'autre (Figure 54) : sa distribution apparaît aplatie et bimodale dans le transect Ouest, alors qu'elle est unimodale dans le transect Est. Cette espèce est présente dans le transect Ouest en deux zones d'altitude différentes, une vers 6,7 m et l'autre vers 5,7 m. Si la deuxième correspond aux altitudes auxquelles on peut s'attendre pour une espèce halophile comme *Spartina sp.*, la première zone correspond à une altitude assez élevée pour cette espèce. Sa présence à cette altitude est probablement liée à une zone de micro-chenaux, visibles sur l'orthophotographie, qui

parcourent le marais perpendiculairement à la côte et maintiennent des zones humides permettant la présence d'espèces végétales de haute slikke sur le schorre. Cela montre l'influence des entités géomorphologiques sur la répartition spatiale de la végétation.

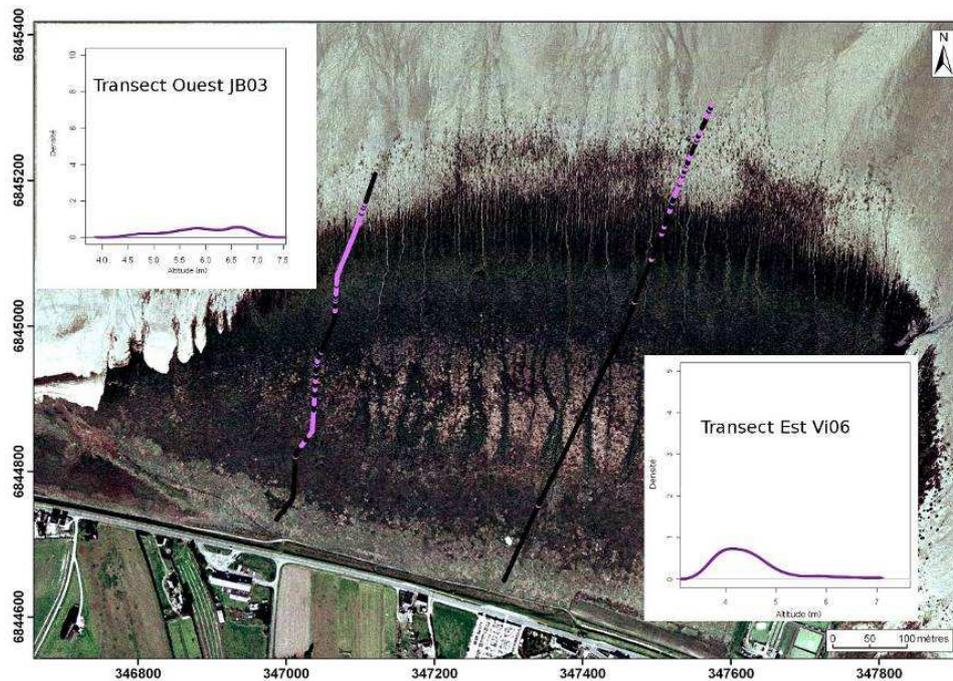


Figure 54 : Répartition de *Spartina sp.* sur les transects et courbe de densité selon l'altitude.

L'observation des courbes de densité du transect Ouest JB03 ne permet pas d'identifier de groupes d'espèces bien distincts. On ne peut donc pas avec cette méthode identifier d'association végétale. Cependant, on peut rapprocher les distributions unimodales et étroites, centrées sur l'altitude 6,9 m, de *Elytrigia atherica* et *Festuca rubra*, qui se superposent presque parfaitement, preuve que ces deux espèces présentent des préférences écologiques similaires pour ce facteur. A l'autre extrémité de l'échelle d'altitude, *Salicornia s.* présente une distribution aplatie autour de 4,9 m. Entre les deux, les autres espèces présentent des distributions aplaties, se superposant entre 6 m et 7 m. Dans le cas du transect Est Vi06, on peut distinguer deux groupes : d'une part l'ensemble *Elytrigia atherica*, *Halimione portulacoides*, *Atriplex prostrata*, *Aster tripolium*, *Puccinellia maritima*, et *Suaeda maritima*, qui présentent des distributions étalées de 6 à 7 m ; d'autre part *Spartina sp.* et *Salicornia sp.* dont les distributions se superposent autour de 4,2 m.

Afin de vérifier statistiquement ces regroupements, nous avons réalisé un test de comparaisons multiples non paramétrique de Wilcoxon-Mann-Whitney. Cela a permis d'identifier pour le transect Ouest JB03 cinq ensembles de distribution selon l'altitude identique (Figure 55) : *Elytrigia atherica* + *Festuca rubra*, *Halimione portulacoides* +

Atriplex prostrata, *Aster tripolium* seule, *Puccinellia maritima* + *Spartina sp.* + *Suaeda maritima*, et enfin *Salicornia sp.* seule. Si l'on tente de rapprocher ces cinq ensembles au schéma classique des marais salés, *Elytrigia atherica* + *Festuca rubra* peut être assimilé au haut schorre, *Halimione portulacoides* + *Atriplex prostrata* au moyen schorre, *Puccinellia maritima* + *Spartina sp.* + *Suaeda maritima* au bas schorre, et *Salicornia sp.* à la haute slikke. Cependant, *Spartina sp.*, espèce caractéristique de la haute slikke, est alors située dans le bas schorre, et *Aster tripolium* est à cheval sur le moyen et le bas schorre.

Pour le transect Est Vi06, on observe quatre ensembles (Figure 55) : *Elytrigia atherica* seule, *Halimione portulacoides* + *Atriplex prostrata*, *Aster tripolium* + *Puccinellia maritima* + *Suaeda maritima*, et *Spartina sp.* + *Salicornia sp.* Ici on observe donc bien le schéma classique des marais salés, avec *Elytrigia atherica* au haut schorre, *Halimione portulacoides* + *Atriplex prostrata* au moyen schorre, *Aster tripolium* + *Puccinellia maritima* + *Suaeda maritima* au bas schorre, et *Spartina sp.* + *Salicornia sp.* en haute slikke. Cependant les superpositions entre ces ensembles de répartitions altitudinales identiques sont parfois très importantes.

Ces regroupements ne peuvent pas être qualifiés d'association végétale, car ils sont réalisés uniquement à partir de la distribution des espèces selon un seul facteur. Cependant, ils permettent de tracer les premières lignes d'une vision synthétique de l'organisation de la végétation.

Nous avons pu remarquer que les deux transects présentent des différences. Le test non paramétrique de comparaison de moyenne de Kruskal-Wallis indique qu'il y a une égalité dans les distributions selon l'altitude entre les deux transects pour *Halimione portulacoides*, *Puccinellia maritima*, *Suaeda maritima*, et *Atriplex portulacoides*. Les autres espèces, c'est-à-dire *Elytrigia atherica*, *Festuca rubra*, *Aster Tripolium*, *Salicornia sp.* et *Spartina sp.*, présentent des distributions selon l'altitude différentes d'un transect à l'autre. Il serait donc inexact de croire que les statistiques d'altitude obtenues sur un transect pour une espèce végétales peuvent être étendues à l'ensemble d'un marais salé.

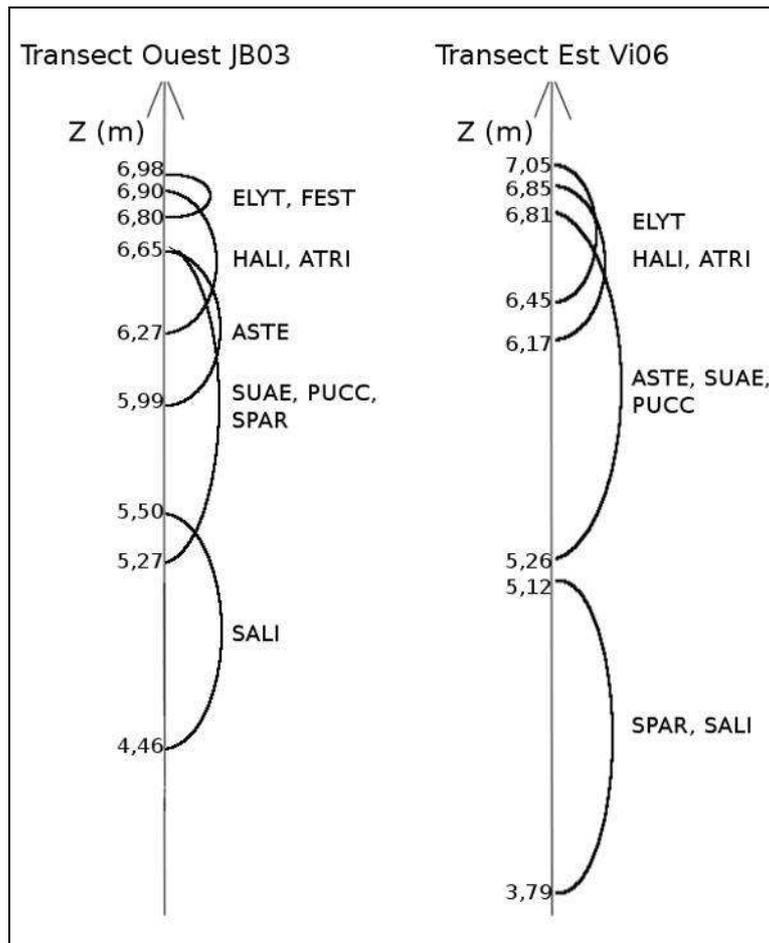


Figure 55 : Schéma de la répartition des espèces végétales selon l'altitude des transects Ouest JB03 et Est Vi06. Les regroupements d'espèces correspondent aux ensembles de répartition altitudinale identique ($p\text{-value} > 0,05$ au test de comparaisons multiples de Wilcoxon-Mann-Whitney.) Pour déterminer l'altitude d'un regroupement, la moyenne de l'altitude plus ou moins l'écart-type a été calculée pour chaque espèce et la valeur minimale et maximale au sein d'un regroupement.

Pour conclure, nous pouvons dire que la zonation altitudinale des espèces du marais salé existe bien, et que certains regroupements d'espèces végétales selon l'altitude peuvent être faits, et que leur ordre le long du gradient d'altitude correspond au schéma communément admis. Cependant, il existe une superposition importante des ceintures végétales, qui masque cette organisation. Nous avons vu également que la valence des espèces vis-à-vis du facteur altitude est variable, et que les objets géomorphologiques, même de petite taille, pouvaient perturber l'organisation de la végétation. Enfin, nous avons mis en évidence des différences entre les deux transects, ce qui montre que les observations de terrain ne peuvent pas forcément être étendue à l'ensemble d'un marais, même aussi peu large que celui de l'Ouest du Vivier.

4.1.1.3. Résultats de l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC)

Cette partie est tirée de l'article de Bilodeau C., Cohen M., Andrieu J., 2009. Comparaison de deux méthodes de cartographie de la végétation du schorre de la Baie du Mont-Saint-Michel : Photo-interprétation raisonnée et classification automatique par espèce. Photointerprétation, p. 12-23.

Les données de végétation des transects JB03 et VI06 ont été de soumis à une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC). Ceci a été fait dans le but d'identifier des portions de transect homogène et de déterminer leur composition floristique, afin de mieux comprendre l'organisation de la végétation le long des transects.

Les résultats de l'AFC montrent une forte structuration des données, les quatre premiers axes décrivant 75,7 % de la variance. L'axe 1, qui décrit 28,8 % de la variance, exprime les gradients d'altitude et de salinité. Il oppose en effet des espèces continentales (*Elytrigia atherica* et *Festuca rubra* au pôle négatif) à des espèces halophiles (*Salicornia sp.* au pôle positif). Un calcul de corrélation entre les moyennes mobiles des coordonnées des points sur l'axe 1 et l'altitude en ce point atteste d'une bonne relation statistique (le coefficient de corrélation est égal à 0,77 pour les moyennes mobiles à 2 valeurs). Ceci montre que l'altitude est bien le principal facteur d'influence de la végétation de ce secteur.

Les axes suivants permettent de repérer des nuances au sein de ce gradient halin. L'axe 2, qui décrit 23,2 % de la variance, oppose les espèces positionnées aux deux extrêmes sur le gradient de salinité à deux espèces du bas schorre (*Aster tripolium* et *Puccinellia maritima* au pôle négatif). Enfin, l'axe 3, qui décrit 13,4 % de la variance, oppose une espèce du bas schorre (*Puccinellia maritima* au pôle négatif), avec une espèce de moyen schorre (*Halimione portulacoides* au pôle positif).

L'analyse graphique des courbes des trois premiers axes factoriels met en évidence des segments relativement homogènes (Figure 56). Dans le Transect Ouest, 16 segments ont été définis et notés de A à P. Dans le Transect Est, 13 segments ont été déterminés et notés de A' à N'. 29 discontinuités (limites entre deux segments) ont ainsi été mises en évidence le long des deux transects.

Ces segments sont ensuite reportés sur les transects superposés à l'orthophotographie (Figure 57). La pertinence de ce découpage est vérifiée en comparant visuellement les discontinuités révélées par l'AFC et l'orthophotographie. La plupart des discontinuités coïncident avec des changements de couleur et/ou texture sur l'orthophotographie (Figure 58).

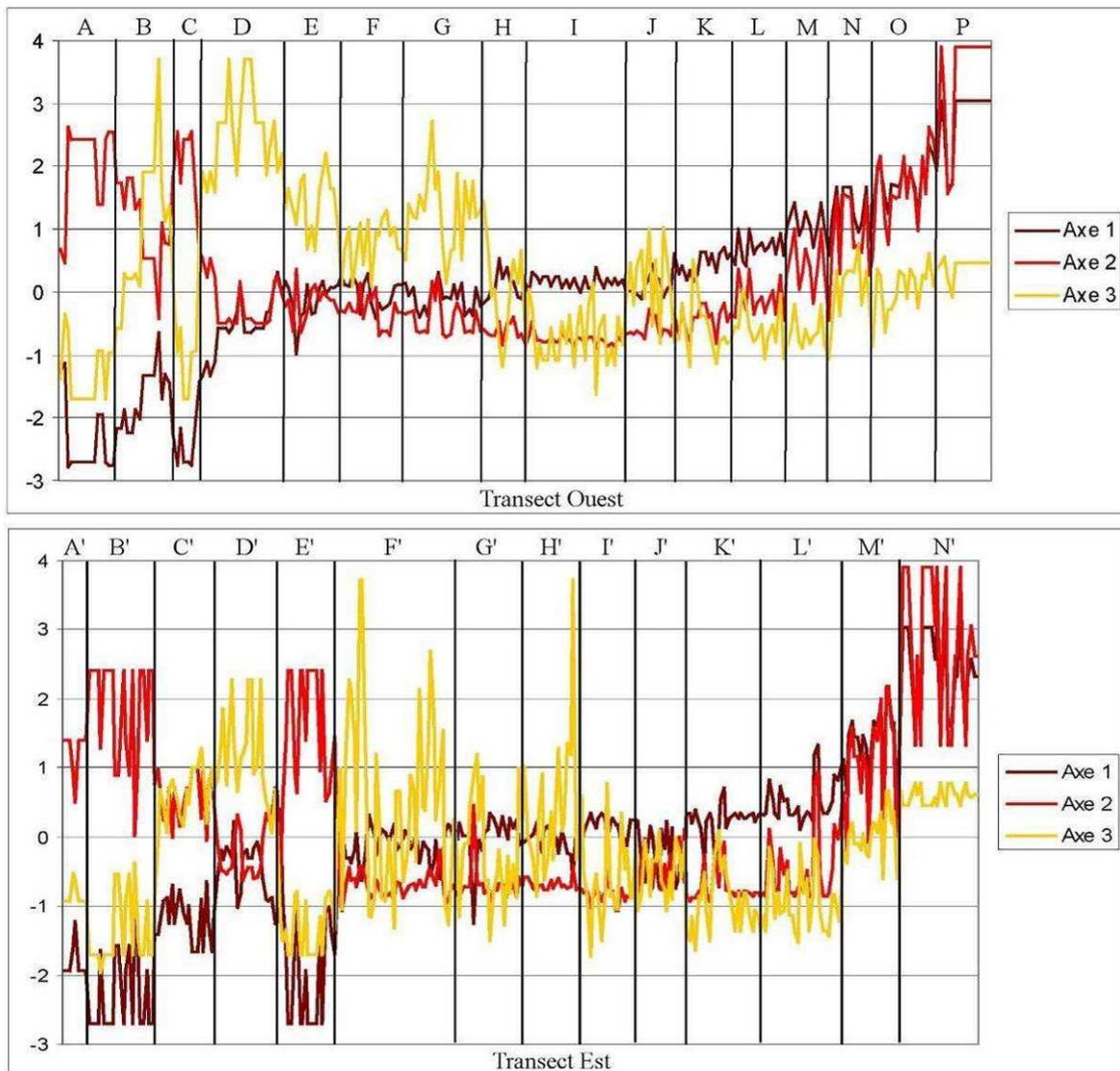


Figure 56 : Coordonnées des relevés des transects Ouest JB03 et Est Vi06 sur les trois premiers axes de l'AFC, en fonction de leur distance à la côte. Les lignes noires verticales indiquent les discontinuités entre les segments homogènes, notés de A à P et de A' à N'.

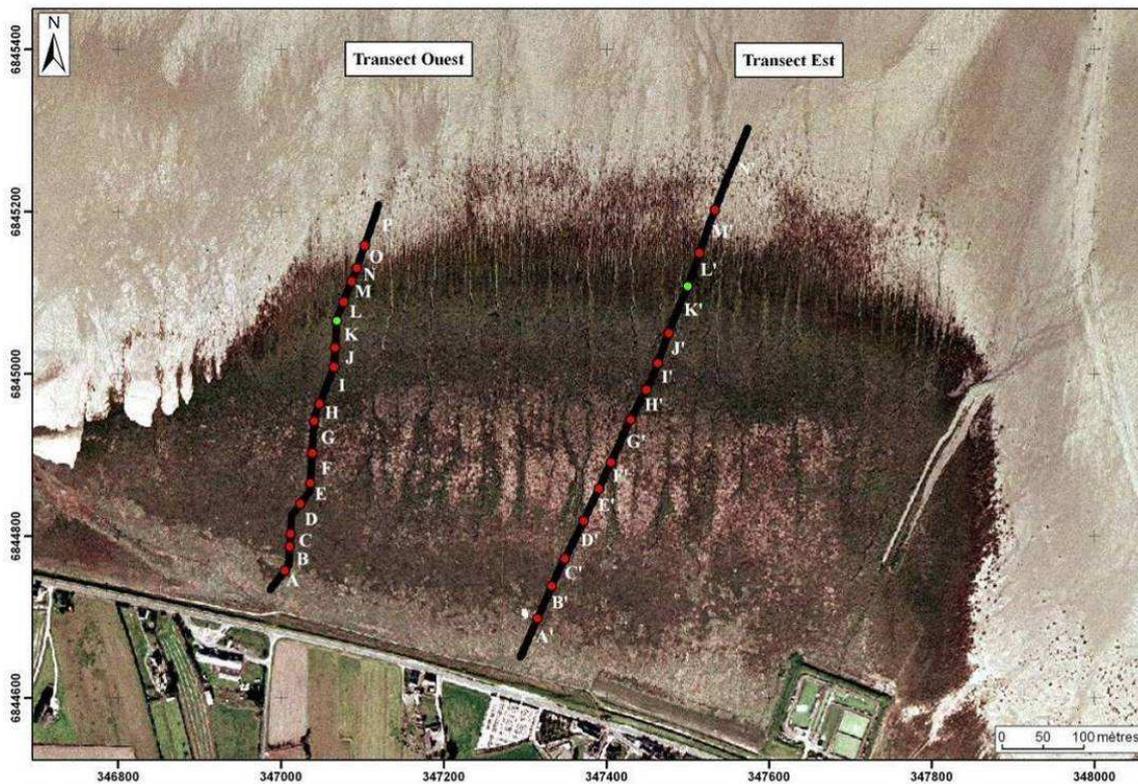


Figure 57: Orthophotographie et transects de végétation, les discontinuités déterminées par l'AFC étant en rouge. Le contenu floristique des segments est décrit dans les tableaux 12 et 13. On peut voir en vert les discontinuités révélées par L'AFC malgré une composition floristique similaires dans les segments adjacents.

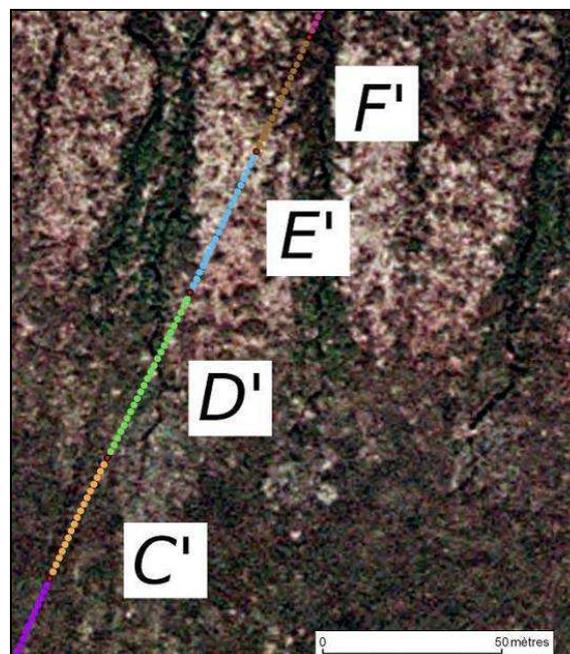


Figure 58 : Superposition de l'orthophotographie et des segments identifiés par l'AFC (en couleur), sur une portion du transect Vivier Est Vi06. On peut voir la correspondance entre les segments et les zones d'égaies apparences de l'orthophotographie.

La composition floristique de chacun des segments a ensuite été déterminée. Dans le Transect Ouest (Tableau 12), le découpage opéré se reflète dans la composition floristique distincte des différentes zones, à l'exception des segments K et L qui présentent la même composition floristique (segments en gris sur le Tableau 12 et discontinuité en vert sur la Figure 57). De même pour le Transect Est (Tableau 13), la définition des segments correspond à une réalité floristique, à part pour une discontinuité révélée par l'AFC entre les segments K' et L' malgré une composition floristique semblable.

Cette méthode permet de résumer les données de présence des espèces à chaque point d'observation en segment où les espèces sont classées selon leur importance. On peut alors avoir une visualisation plus aisée des données des transects, par exemple en ne faisant apparaître pour chaque segment que les espèces principales.

Tableau 12 : Composition floristique des segments déterminés par l'AFC, Transect Vivier Ouest. 2 : dominance, 1 : présence dans plus de la moitié des relevés du segment, * : présence dans moins de la moitié des relevés du segment, 0 : absence. En grisé : segments connexes ayant la même composition floristique simplifiée.

Segments déterminés par l'AFC	<i>Aster tripolium</i> (ASTE)	<i>Atriplex prostrata</i> (ATRI)	<i>Elytrigia atherica</i> (ELYT)	<i>Festuca rubra</i> (FEST)	<i>Halimione portulacoides</i> (HALI)	<i>Puccinellia maritima</i> (PUCC)	<i>Salicornia</i> sp. (SALI)	<i>Spartina</i> sp. (SPAR)	<i>Suaeda maritima</i> (SUAE)	Composition floristique simplifiée
A	*	*	2	*	*	0	0	0	0	ELYT
B	0	*	2	1	2	0	0	0	*	ELYT, HALI>FEST
C	0	1	2	*	1	0	0	0	0	ELYT>ATRI, HALI
D	*	1	*	0	2	0	0	*	0	HALI>ATRI
E	1	1	0	*	2	0	0	1	1	HALI>ASTE, ATRI, SPAR, SUAE
F	1	2	*	*	1	0	0	1	1	ATRI>ASTE, HALI, SPAR, SUAE
G	1	1	0	0	2	*	0	*	1	HALI>ASTE, ATRI, SUAE
H	1	1	0	0	1	1	0	1	2	SUAE>ASTE, ATRI, HALI, PUCC, SPAR
I	1	1	0	0	*	2	0	0	2	PUCC, SUAE>ASTE, ATRI
J	1	1	0	0	1	1	0	*	2	SUAE>ASTE, ATRI, HALI, PUCC
K	1	*	0	0	*	1	0	1	2	SUAE>ASTE, PUCC, SPAR
L	1	*	0	0	0	1	*	1	2	SUAE>ASTE, PUCC, SPAR
M	*	0	0	0	*	2	1	2	1	PUCC, SPAR>SALI, SUAE
N	*	0	0	0	0	0	1	2	2	SPAR, SUAE>SALI
O	0	0	0	0	0	*	2	2	1	SALI, SPAR>SUAE
P	0	0	0	0	0	0	2	*	*	SALI

Tableau 13 : Composition floristique des segments déterminés par l’AFC, Transect Vivier Est. 2 : dominance, 1 : présence dans plus de la moitié des relevés du segment, * : présence dans moins de la moitié des relevés du segment, 0 : absence. En grisé : segments connexes ayant la même composition floristique simplifiée.

Segments déterminés par l’AFC	<i>Aster tripolium</i> (ASTE)	<i>Atriplex prostrata</i> (ATRI)	<i>Elytrigia atherica</i> (ELYT)	<i>Festuca rubra</i> (FEST)	<i>Halimione portulacoides</i> (HALI)	<i>Puccinellia maritima</i> (PUCC)	<i>Salicornia sp.</i> (SALI)	<i>Spartina sp.</i> (SPAR)	<i>Suaeda maritima</i> (SUAE)	Composition floristique simplifiée
A'	*	1	2	0	0	*	0	0	0	ELYT
B'	*	*	2	0	2	0	0	0	1	ELYT, HALI>SUAE
C'	*	1	*	0	2	0	0	*	1	HALI>ATRI, SUAE
D'	*	0	2	0	*	*	0	0	1	ELYT>SUAE
E'	1	1	*	0	1	*	0	0	1	ASTE, ATRI, HALI, SUAE
F'	2	2	0	0	2	1	0	0	1	ASTE, ATRI, HALI>PUCC, SUAE
G'	2	2	*	0	1	1	0	0	1	ASTE, ATRI>HALI, PUCC, SUAE
H'	2	1	0	0	1	*	0	0	2	ASTE, SUAE>ATRI, HALI
I'	2	*	0	0	1	1	0	0	1	ASTE>HALI, PUCC, SUAE
J'	2	1	*	0	*	*	0	*	1	ASTE>ATRI, SUAE
K'	2	*	*	0	*	1	0	*	2	ASTE, SUAE>PUCC
L'	2	*	0	0	*	1	*	*	2	ASTE, SUAE>PUCC
M'	1	0	0	0	0	*	1	1	2	SUAE>ASTE, SALI, SPAR
N'	0	0	0	0	0	0	1	1	*	>SALI, SPAR

La mise en parallèle des segments et des profils altitudinaux (Figure 59) met en évidence le fait que les segments identifiés par l’AFC correspondent parfois à des portions du transect d’altitude constante, parfois à des obstacles topographiques tels que des chenaux (segment K, D', G', K') ou des pentes importantes (0, L'). Cela confirme l’influence de l’altitude, de la pente, et de la géomorphologie sur la végétation. Par exemple, dans le transect VI06, le segment D' présente en tant qu’espèce dominante *Elytrigia atherica*, espèce de haut schorre, alors que les segments adjacents présentent une végétation de type moyen schorre, avec en particulier la présence *Halimione portulacoides*. Or, le profil altitudinal montre que ce segment correspond à un micro-chenal. C’est donc la microtopographie qui explique la présence d’*Elytrigia atherica*, qui couvre ici les bords du micro-chenal.

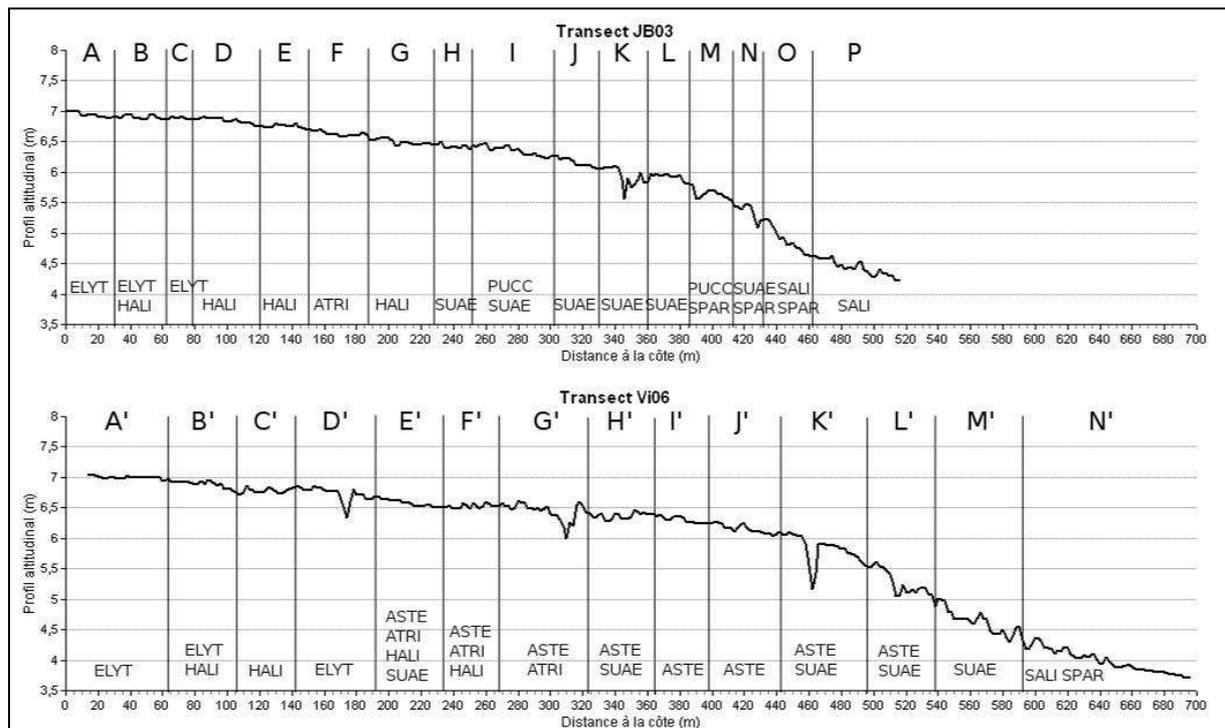


Figure 59: Profils altitudinaux des transects JB03 et Vi06 et segments identifiés par l'AFC. Les espèces dominantes de chaque segment sont indiquées.

Les segments les plus proches de la côte sont caractérisés par une dominance d'*Elytrigia atherica*, progressivement remplacée par *Halimione portulacoides* et *Atriplex prostrata*. Le transect Ouest est ensuite dominé par *Suaeda maritima* et *Puccinellia maritima*, tandis que le transect Est est caractérisé par la forte présence de *Aster tripolium*. On peut remarquer que cette différence est visible au niveau de l'orthophotographie, le transect Est traversant une zone apparaissant en beige rosé, couleur due à la présence d'*Aster tripolium* en fruit. Enfin, *Spartina sp.* et *Salicornia sp.* sont majoritaires en fin de transect. Une organisation de la végétation conforme au schéma communément admis des marais salés apparaît donc si l'on s'en tient aux espèces dominantes.

Cependant, si l'on considère la composition floristique telle que définie dans les tableaux 12 et 13, prenant en compte les espèces dominantes, présentes, et minoritaires, l'organisation de la végétation de cette zone d'étude s'avère en fait complexe. Les neuf espèces se combinent en 27 configurations différentes, soit bien davantage que les groupements de haut, moyen, bas schorre, et haute slikke.

On peut remarquer de plus que la composition floristique des segments n'obéit pas strictement aux préférences écologiques connues des espèces. Ainsi, il n'est pas rare que des

espèces continentales soient associées à des espèces halophiles. Cette plasticité est partiellement expliquée par la progression de certaines espèces hors de leur optimum écologique, comme *Elytrigia atherica* et *Aster tripolium* (Valéry *et al.*, 2004). On peut retrouver *Halimione portulacoides* en compagnie de chacune des huit autres espèces, de même que *Spartina sp.*, *Atriplex prostrata*, *Aster tripolium*, et *Suaeda maritima*. *Elytrigia atherica* n'est jamais observé avec *Salicornia sp.*, mais peut l'être avec les sept autres espèces. De même, *Festuca rubra* peut être observée en présence de toutes les autres espèces, à l'exception de *Puccinellia maritima*.

Il semblerait donc que chaque espèce est répartie indépendamment des autres espèces pouvant coexister avec elle. Devant le grand nombre de contenu floristique identifié par l'AFC, nous pouvons donc nous demander si la végétation est réellement organisée en associations végétales sur les marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel.

4.1.1.4. Résultats de l'analyse fréquentielle

Les données de végétation des deux transects réalisés au Vivier-sur-Mer ont été soumises à une analyse fréquentielle, afin de regrouper les espèces vivant fréquemment ensemble. C'est donc dans un premier temps uniquement à partir des données de présence / absence que nous travaillons, et non pas sur l'influence des facteurs, analyse qui sera réalisée dans un deuxième temps. Puisque nous cherchons à définir des associations végétales, une association étant définie comme « un groupement végétale stable en équilibre avec le milieu ambiant, caractérisé par une composition floristique déterminée, dans laquelle certains éléments exclusifs ou à peu près (espèces caractéristiques) révèlent, par leur présence, une écologie particulière et autonome » (Braun-Blanquet, 1925), nous allons nous intéressés seulement aux liaisons entre espèces les plus fortes. Nous ne conservons ainsi que les relations entre espèces les plus fidèles.

Trois associations végétales ont été identifiées dans chacun des transects. Elles sont classées par valeur d'information (notée à droite entre deux espèces), chaque espèce n'apparaissant qu'une fois, avec sa liaison la plus forte.

Diagramme 1 : Associations végétales identifiées par analyse fréquentielle sur le transect Vivier Ouest JB03 (seules les liaisons les plus fortes sont conservées).

Association végétale 1	
PUCC <i>Puccinellia maritima</i>	-----* 95
SUAE <i>Suaeda maritima</i>	-----* 73
ASTE <i>Aster tripolium</i>	-----* 58
SPAR <i>Spartina x townsendii</i>	-----* 40
SALI <i>Salicornia sp.</i>	-----*
Association végétale 2	
ATRI <i>Atriplex prostrata</i>	-----* 63
HALI <i>Halimione portulacoides</i>	-----*
Association végétale 3	
ELYT <i>Elytrigia atherica</i>	-----* 39
FEST <i>Festuca rubra</i>	-----*

Diagramme 2 : Associations végétales identifiées par analyse fréquentielle sur le transect Vivier Est Vi06 (seules les liaisons les plus fortes sont conservées).

Association végétale 1	
ASTE <i>Aster tripolium</i>	-----* 95
PUCC <i>Puccinellia maritima</i>	-----* 87
SUAE <i>Suaeda maritima</i>	-----*
TRIG <i>Triglochin maritimum</i>	-* 1
Association végétale 2	
SALI <i>Salicornia sp.</i>	-----* 70
SPAR <i>Spartina x townsendii</i>	-----*
Association végétale 3	
ATRI <i>Atriplex prostrata</i>	-----* 44
HALI <i>Halimione portulacoides</i>	-----*
ELYT <i>Elytrigia atherica</i>	-----* 33

On peut rapprocher ces associations végétales au schéma classiquement admis des marais salés (Tableau 14).

Tableau 14 : Résumé des associations végétales identifiées par analyse fréquentielle.

	Vivier Ouest JBO3	Vivier Est Vi06
Haut schorre	<i>Elytrigia atherica</i> <i>Festuca rubra</i>	<i>Elytrigia atherica</i> <i>Halimione portulacoides</i>
Moyen schorre	<i>Atriplex prostrata</i> <i>Halimione portulacoides</i>	<i>Atriplex prostrata</i>
Bas schorre	<i>Puccinellia maritima</i> <i>Suaeda maritima</i> <i>Aster tripolium</i>	<i>Puccinellia maritima</i> <i>Suaeda maritima</i> <i>Aster tripolium</i>
Haute slikke	<i>Spartina</i> <i>Salicornia</i>	<i>Salicornia sp.</i> <i>Spartina sp.</i>

On retrouve donc bien les regroupements d'espèces qu'on a pu identifier précédemment. On peut remarquer que pour le transect Vivier Ouest JB03, il n'y a pas de distinction entre le bas schorre et la haute slikke. De même sur Vivier Est Vi06, le haut schorre et le moyen schorre sont confondus, car les valeurs de liaisons indiquent que *Elytrigia atherica* se trouve fréquemment en présence d'*Halimione portulacoides* et de *Atriplex prostrata*. On ne peut donc pas définir pour Vivier Ouest JB03 d'associations de bas schorre et de haute slikke, ni d'associations de haut schorre et de bas schorre pour Vi06 : nous sommes dans le cas où le passage de l'une à l'autre des ceintures de végétations se fait de façon continue.

Si on ne se limite pas aux liaisons les plus fortes, on obtient les groupes suivants (ces groupes ne pouvant maintenant plus être qualifiés d'association végétale) :

Diagramme 3 : Groupes identifiés par analyse fréquentielle sur le transect Vivier Ouest JB03 (toutes les liaisons sont indiquées).

Groupe n° 1			
PUCC	<i>Puccinellia maritima</i>	-----*	
			95
SUAE	<i>Suaeda maritima</i>	-----*	
			73
ASTE	<i>Aster tripolium</i>	-----*	
			2
SPAR	<i>Spartina x townsendii</i>	-----*	
			58
			3
ATRI	<i>Atriplex prostrata</i>	-----*	
			24
			2
Groupe n° 2			
ATRI	<i>Atriplex prostrata</i>	-----*	
			63
HALI	<i>Halimione portulacoides</i>	-----*	
			51
ASTE	<i>Aster tripolium</i>	-----*	
			1
Groupe n° 3			
SALI	<i>Salicornia sp.</i>	-----*	
			40
SPAR	<i>Spartina x townsendii</i>	-----*	
			14
SUAE	<i>Suaeda maritima</i>	-----*	
			1
Groupe n° 4			
ELYT	<i>Elytrigia atherica</i>	-----*	
			39
FEST	<i>Festuca rubra</i>	-----*	
Groupe n° 5			
FEST	<i>Festuca rubra</i>	-----*	
			9
HALI	<i>Halimione portulacoides</i>	-----*	

Diagramme 4 : Groupes identifiés par analyse fréquentielle sur le transect Vivier Vivier Est Vi06 (toutes les liaisons sont indiquées).



Les chiffres à droite des lignes indiquent le numéro de groupe dont l'espèce considérée fait également partie. En effet lorsque l'on ne limite pas l'analyse aux liaisons les plus fortes, on peut voir que les espèces végétales ne sont pas toujours « fidèles » et peuvent faire partie de plusieurs groupes. Par exemple, dans le transect Vivier Ouest JB03, *Aster tripolium*, qui définit le groupe 1 (bas schorre), entre également dans la composition du groupe 2 (moyen schorre). De la même façon *Atriplex prostrata* qui définit le groupe 2 (moyen schorre) entre dans la composition du groupe 1 (bas schorre). On peut également voir que *Festuca rubra* qui définit le groupe 4 avec *Elytrigia atherica* (haut schorre) est également associé avec *Halimione portulacoides* en groupe 5. Pour le transect Est Vi06, on peut voir que *Suaeda maritima* entre dans le groupe 3 (haut et moyen schorre) alors que c'est une halophile.

Cette méthode permet donc de dégager d'une part, grâce aux liaisons les plus fortes, les associations caractéristiques d'un secteur, d'autre part grâce aux liaisons faibles, les associations moins fréquentes, qu'on peut appeler sous-associations, qui révèlent des nuances dans l'organisation spatiale de la végétation ou des secteurs de transition entre les associations végétales.

La présence ou l'absence d'une espèce selon les modalités d'un facteur écologique peut également être étudiée grâce à une table de contingence et au calcul de sa probabilité. Nous avons étudié ici plusieurs facteurs issus des données altimétriques LiDAR : l'altitude, la pente, la direction de la pente, la géomorphologie. De la même façon, l'influence du type de pâturage et du contexte sédimentaire ont été étudiés.

Voici les résultats pour l'altitude (Tableau 15 et 16). Les espèces ont été classées selon les altitudes avec lesquelles elles présentent des liaisons positives.

Tableau 15 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur altitude pour le transect Vivier Ouest JB03.

Altitude (m)	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0
<i>Elytrigia atherica</i>	.	-	-	-	-	--	--	---	--	+++	+++
<i>Festuca rubra</i>	-	.	+++	+++
<i>Halimione portulacoides</i>	-	---	---	--	.	.	--	---	---	---	.	.	+++	+++	-
<i>Atriplex prostrata</i>	.	---	---	--	.	-	-	--	---	--	.	+++	+++	.	--
<i>Aster tripolium</i>	.	---	---	-	.	-	-	.	.	++	+++	+++	+++	---	---
<i>Puccinellia maritima</i>	.	---	---	+++	+++	+	+++	+++	---	---	---
<i>Suaeda maritima</i>	--	---	+	+++	+++	+++	+++	.	---	---
<i>Spartina x townsendii</i>	.	---	.	+++	.	++	+++	+++	++	++	--	---	+	--	---
<i>Salicornia sp.</i>	++	++	+++	+++	+++	+++	+	++	.	.	--	---	---	---	---

Tableau 16 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur altitude pour le transect Vivier Est Vi06.

Altitude (m)	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0
<i>Elytrigia atherica</i>	---	---	---	--	--	-	-	--	.	--	-	.	--	---	-	+++	+++
<i>Halimione portulacoides</i>	---	---	---	--	---	-	.	---	.	--	-	.	--	+++	+++	+++	.
<i>Atriplex prostrata</i>	---	---	---	--	---	-	-	--	.	-	--	.	+	+++	+++	.	.
<i>Aster tripolium</i>	---	---	---	.	.	.	+	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+	---	---
<i>Puccinellia maritima</i>	---	--	--	--	++	.	.	+++	++	++	.	+++	.	.	++	---	---
<i>Suaeda maritima</i>	---	---	-	.	++	++	++	+++	.	++	+++	+	++	+	-	+	---
<i>Spartina x townsendii</i>	++	+++	+++	+++	++	+++	--	---	---	--	---
<i>Salicornia sp.</i>	+++	+++	+++	+++	+	++	--	---	---	---	--

La zonation selon l'altitude apparaît clairement ici. En comparant les résultats des deux transects, on peut voir que la succession des espèces végétales le long du gradient d'altitude se fait de façon continue sur le transect Vivier Ouest JB03, alors que sur le transect Vivier Est Vi06 on peut distinguer les différentes associations végétales et leur zone de transition. Ceci pourrait être dû au fait que le transect Vivier Ouest JB03 est situé plus près de la limite du marais que le transect Vivier Est Vi06, qui est situé au centre du marais de Vivier. Le transect JB03 pourrait ainsi être soumis à plus de remaniement que Vi06, qui est protégé de l'action de la houle. De plus, le transect JB03 a été réalisé en 2003, tandis que Vivier Est Vi06 a été réalisé en 2006. Il se peut que le marais salé du Vivier ait évolué entre ces deux dates car ce secteur est en perpétuelle évolution (Figure 60). L'organisation de la végétation de Vi06 en associations végétales distinctes pourrait révéler une certaine stabilité, et un stade avancé dans la succession temporelle des séries de végétation des marais salés. Sur le transect JB03 qui au contraire correspondrait à un secteur instable ou en cours de stabilisation, les

espèces végétales ne seraient pas encore organisées, c'est pourquoi leur distribution selon l'altitude apparaît comme continue.

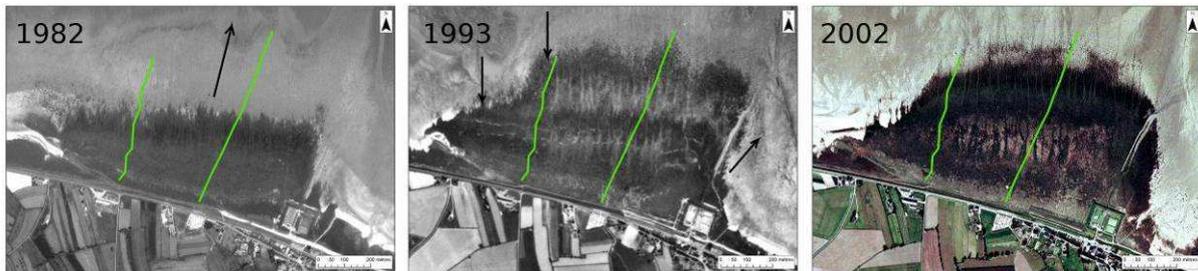


Figure 60 : Comparaison de trois photographies aériennes datant de 1982, 1993, et 2002, montrant l'évolution du marais salé situé à l'Ouest du Vivier-sur-Mer.

L'influence de la pente (Tableau 17 et 18) et de sa direction en degré par rapport au Nord (Tableau 19 et 20) a également été étudiée par analyse fréquentielle. L'étude de la pente permet de voir que les espèces de haut et moyen schorre sont présentes sur des terrains relativement plats (pente <4%). Les plantes de bas schorre et de haute slikke au contraire sont présentes sur des terrains de pente plus importante (entre 5% et 30%), qui correspondent aux bords de chenaux ou aux pentes élevées situées en bordure de marais.

Les résultats obtenus pour ce facteur direction de la pente par rapport au Nord ne sont pas clairs. On peut cependant voir sur le transect Ouest JBO3 une tendance de *Puccinellia maritima*, *Suaeda maritima*, *Salicornia sp.* et *Spartina sp.* à se développer sur des terrains dont la pente est dirigée vers l'Ouest ou l'Est (autour de 90° ou 270°). Les chenaux étant dirigés sur ce secteur de façon Nord-Sud, ces pentes dirigées vers l'Ouest ou vers l'Est pourraient correspondre aux bords des chenaux. Dans le transect Ouest Vi06, la présence d'*Elytrigia atherica*, *Halimione portulacoides*, et *Atriplex prostrata* sur des pentes de direction 150° (Sud-Sud-Est) reste à expliquer.

Tableau 17 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur pente pour le transect Vivier Ouest JB03.

Pente (%)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	2	3	4	5	10
<i>Elytrigia atherica</i>	.	.	.	+	+++	+	+	.	.	-	--	.
<i>Halimione portulacoides</i>	.	.	+	+++	++	+	+	-	-	---	--
<i>Atriplex prostrata</i>	+	+	.	.	---	-
<i>Aster tripolium</i>	+	-	.	+
<i>Puccinellia maritima</i>	-	+	.	.	+	.
<i>Suaeda maritima</i>	-	.	.	--	--	+	.	.	++	+++
<i>Spartina x townsendii</i>	-	.	.	-	.	---	.	.	.	+++	+++
<i>Salicornia sp.</i>	-	++	+

Tableau 18 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur pente pour le transect Vivier Est Vi06.

Pente (%)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	2	3	4	5	10	20	30
<i>Elytrigia atherica</i>	+	.	+	.	.	.	++	.	+	--	.	.	.
<i>Halimione portulacoides</i>	.	.	.	+	-	+++	.	+++	--	-	.	.
<i>Atriplex prostrata</i>	.	-	.	.	.	-	+	.	.	--	+	.	.
<i>Puccinellia maritima</i>	-	.	-	.	+	+++	++	+
<i>Suaeda maritima</i>	.	.	--	.	-	--	+	+	.	+	+++	.	.
<i>Aster tripolium</i>	.	.	--	.	-	-	-	+	.	+	+++	+	.
<i>Spartina x townsendii</i>	-	.	.	+++	.	.	.
<i>Salicornia sp.</i>	+++	.	.	.
<i>Triglochin maritimum</i>	.	+++

Tableau 19 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur direction de la pente pour le transect Vivier Ouest JB03.

Direction de la pente (°)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
<i>Elytrigia atherica</i>	.	+	.	--	.	-	+	.	+	-	.	.	.
<i>Halimione portulacoides</i>	.	.	-	.	+	.	.	++	.	++	-	-	-	+
<i>Atriplex prostrata</i>	+	.	.	+	++
<i>Aster tripolium</i>	+	.	.	+
<i>Puccinellia maritima</i>	--	+	-	.	+	.	.	.
<i>Suaeda maritima</i>	.	-	+	-	+	+++	.	.	.
<i>Spartina x townsendii</i>	+	-	--	-	+	.	.	.
<i>Salicornia sp.</i>	.	.	+	.	-	+	-	.	.	+	+	.

Tableau 20 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur direction de la pente pour le transect Vivier Est Vi06.

Direction de la pente (°)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
<i>Elytrigia atherica</i>	+	++	+++	++	.	.	-	.	.	---	.	.	--	.
<i>Halimione portulacoides</i>	.	-	.	-	.	.	++	++	-
<i>Atriplex prostrata</i>	.	.	-	.	+	.	+++	.	++	-
<i>Puccinellia maritima</i>	+	--	.
<i>Suaeda maritima</i>	+	.	+	.	.	.	-
<i>Aster tripolium</i>	+	+	.	-	.	.	.	-	+	-	.
<i>Spartina x townsendii</i>	.	+
<i>Salicornia sp.</i>	.	.	.	-	+	+
<i>Triglochin maritimum</i>	.	.	++

L'influence de la géomorphologie a également été étudiée (Tableau 21 et 22).

Tableau 21 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Géomorphologie pour le transect Vivier Ouest JB03.

Géomorphologie détaillée	2	3a	3b	6d	7a	7c	10b	10c
<i>Elytrigia atherica</i>	+++	---	--	-	+	+++	.	-
<i>Halimione portulacoides</i>	+++	---	---	---	+	+	--	---
<i>Atriplex prostrata</i>	+++	.	---	-	-	.	-	---
<i>Aster tripolium</i>	.	+++	--	++	-	-	-	--
<i>Puccinellia maritima</i>	---	+++	++	+	.	---	.	.
<i>Suaeda maritima</i>	---	+++	++	+++	---	---	.	+
<i>Spartina x townsendii</i>	---	-	+++	+	-	.	.	+++
<i>Salicornia sp.</i>	---	-	+++	.	.	--	.	+++

Tableau 22 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur géomorphologie pour le transect Vivier Est Vi06.

Géomorphologie détaillée	2	3a	3b	6d	7a	7c	10a	10c
<i>Elytrigia atherica</i>	---	.	+	+	.	--	+++	+++
<i>Halimione portulacoides</i>	+++	+++	---	---	.	+++	.	---
<i>Atriplex prostrata</i>	++	+	---	.	+	.	.	.
<i>Puccinellia maritima</i>	---	+	++	+	.	--	.	++
<i>Suaeda maritima</i>	--	---	+	+++
<i>Aster tripolium</i>	---	.	+	+	.	--	+++	+++
<i>Spartina x townsendii</i>	---	-	++	+++
<i>Salicornia sp.</i>	---	-	+++	+++

Les espèces qui ne sont pas présentes dans ces tableaux, comme *Festuca rubra* dans le transect JB03, ne montrent de liaisons avec aucun des états du facteur considéré.

Les deux transects présentent les mêmes objets géomorphologiques : des terrains plats (2), des pentes normales (c'est-à-dire dirigées vers la mer) faibles (3a) ou fortes (3b), des micro-chenaux (6d), des dépressions peu étendues (7a) ou étendues (7c), et des buttes arrondies dans le schorre (10a) ou en limite de la slikke (10b), ou allongées (10c).

Pour le transect Ouest JB03, les espèces de haut et moyen schorre (*Elytrigia atherica*, *Halimione portulacoides*, et *Atriplex prostrata*) semblent liées aux terrains plats, ainsi qu'aux dépressions peu profondes, étendues ou non. La présence d'*Elytrigia atherica* dans ces dépressions peut être étonnante pour cette espèce continentale, mais cela peut montrer que cette partie du schorre n'est quasiment jamais atteint par la mer, et ces dépressions ne sont donc presque jamais inondées. Sur l'autre transect, *Elytrigia atherica* est associée aux pentes fortes, aux micro-chenaux, et aux buttes. C'est ainsi sur le bord des micro-chenaux et sur les buttes allongées qui les entourent que cette espèce glycophile « descend » vers la haute slikke. *Halimione portulacoides* et *Atriplex prostrata* sont présentes sur ce transect sur les terrains plats et les dépressions qui constituent le moyen schorre. Les espèces de bas schorre et haute slikke sont associées quand à elles aux pentes faibles ou fortes, aux micro-chenaux, ainsi qu'aux buttes. C'est en effet par les micro-chenaux que les espèces halophiles « montent » vers le haut schorre.

L'analyse fréquentielle du facteur sédiment (Tableau 23 et 24) montre que les espèces végétales dépendent fortement du type de sédiment. Trois types de sédiments se rencontrent sur ce secteur : les sables très fins (S), la Tangue silto-argileuse (Tf), et la Tangue de schorres récents (FMz).

Tableau 23 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Sédiment pour le transect Vivier Ouest JB03.

Sédiment	Tf	FMz
<i>Elytrigia atherica</i>	---	+++
<i>Halimione portulacoides</i>	---	+++
<i>Atriplex prostrata</i>	---	+++
<i>Aster tripolium</i>	---	+++
<i>Puccinellia maritima</i>	---	+++
<i>Suaeda maritima</i>	---	+++
<i>Spartina x townsendii</i>	+	-
<i>Salicornia sp.</i>	+++	---

Tableau 24 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Sédiment pour le transect Vivier Est Vi06.

Sédiment	S	Tf	FMz
<i>Elytrigia atherica</i>	---	---	+++
<i>Halimione portulacoides</i>	---	---	+++
<i>Atriplex prostrata</i>	---	---	+++
<i>Puccinellia maritima</i>	---	++	.
<i>Suaeda maritima</i>	---	+++	+
<i>Aster tripolium</i>	---	+	+++
<i>Spartina x townsendii</i>	+++	+++	---
<i>Salicornia sp.</i>	+++	+++	---

On peut voir que les espèces du haut schorre et moyen schorre sont liées à la présence de Tangue de schorres récents. Les espèces de bas schorre sont associées soit à la Tangue de schorres récents, soit à la Tangue silto-argileuse. Les espèces de haute slikke sont quand à elles liées positivement à la présence de Tangue silto-argileuse et de sables. Ces préférences correspondent au gradient de granulométrie croissant entre le haut schorre et la haute slikke, qui est dû à la diminution de la force du courant quand l'eau se rapproche des côtes.

Nous avons ensuite cherché à connaître les relations entre les facteurs altitude, géomorphologie et sédiment. Ceci a été possible en calculant la probabilité des tables de contingence entre chaque état des facteurs pris deux à deux.

Tableau 25 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect Vivier Ouest JB03.

	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
2	0	3	-11	-26	-15	35	12
3a	5	-8	-5	7	40	-9	-30
3b	0	2	22	12	-7	-6	-8
6d	0	0	0	3	11	0	-5
7a	4	0	0	2	0	0	7
7c	0	0	0	0	-6	0	23
10b	2	13	0	0	0	0	0
10c	0	5	17	3	-5	0	-5

Tableau 26 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Sédiment (à la verticale) sur le transect Vivier Ouest JB03.

	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
Tf	45	48	15	-9	-18	-15	-21
FMz	-45	-48	-15	9	18	15	21

Tableau 27 : Relation entre le facteur Sédiment (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect Vivier Ouest JB03.

	Tf	FMz
2	0	4
3a	0	4
3b	6	-6
6d	0	3
7a	0	2
7c	-4	4
10b	13	-13
10c	8	-8

Tableau 28 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect Vivier Est Vi06.

	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
2	-6	-20	-10	-6	-13	3	3	57
3a	0	8	-13	-9	7	0	12	-14
3b	24	3	5	2	10	0	-22	-17
6d	0	0	2	3	0	8	0	-5
7a	0	0	0	0	0	16	0	0
7c	0	0	0	0	0	0	-4	28
10a	0	0	0	0	4	6	0	0
10c	0	8	19	17	-8	-13	4	-18

Tableau 29 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Sédiment (à la verticale) sur le transect Vivier Est Vi06.

	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
S	25	57	0	0	-5	-12	-15	-11
Tf	3	15	56	26	4	-25	-30	-23
FMz	-25	-90	-41	-18	3	41	50	37

Tableau 30 : Relation entre le facteur Sédiment (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect Vivier Est Vi06.

	S	Tf	FMz
2	-16	-32	53
3a	21	-43	6
3b	6	33	-43
6d	0	0	4
7a	0	0	4
7c	0	0	6
10a	0	0	3
10c	-10	55	-30

Ces résultats montrent que les facteurs altitude, géomorphologie, et sédiment sont fortement liés. Ainsi les sables sont liés avec les altitudes basses, la Tangue silto-argileuse avec les altitudes moyennes, et la Tangue de schorres récents avec les altitudes les plus hautes. De même, on retrouve les terrains plats et les dépressions étendues sur les altitudes élevées, les pentes faibles, les chenaux, les petites dépressions et les buttes sur les altitudes

moyennes, et enfin les pentes fortes et les buttes allongées sur les altitudes faibles. Les liaisons positives entre les trois facteurs ont été résumées dans le tableau suivant (Tableau 25).

Tableau 25 : Résumé des relations entre les facteurs Altitudes, Géomorphologie, et Sédiment (S : sables très fins; Tf : Tangué silto-argileuse; FMz : Tangué de schorres récents).

Géomorphologie	Altitude (m)							
	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
2: Terrain plat						FMz	FMz	FMz
3a: Pente faible		S			FMz	FMz	FMz	
3b: Pente forte	S	S	Tf	Tf	Tf			
6d: Micro-chenal					FMz	FMz		
7a: Dépression peu étendue					FMz	FMz		FMz
7c: Dépression étendue								FMz
10a: Buttes arrondies du schorre					FMz	FMz		
10b: Buttes arrondies de slikke		Tf						
10c: Buttes allongées		Tf	Tf	Tf				

Cette analyse nous permet de dégager un schéma nuancé de l'organisation végétale du marais salé du Vivier (Tableau 26).

Tableau 26 : Résumé des résultats obtenus par analyse fréquentielle sur JB03 et Vi06.

Altitude	Géomorphologie	Sédiment	Flore
7,5 m	Terrain plat ou pente faible, sol régulier (pentes ≤ 2 %), avec quelques dépressions	Tangué de schorres récents	<i>Elytrigia atherica</i> (<i>Festuca rubra</i>) (<i>Halimione portulacoides</i>) (<i>Atriplex prostrata</i>)
7 m	Terrain plat ou pente faible, sol ondulé (pentes ≤ 10 %)	Tangué de schorres récents	(<i>Elytrigia atherica</i>) <i>Halimione portulacoides</i> <i>Atriplex prostrata</i> (<i>Aster tripolium</i>)
6,5 m	Terrain plat ou pente faible à sol irrégulier (pentes ≤ 20 %), avec des micro-chenaux, des dépressions, et des buttes	Tangué de schorres récents	(<i>Atriplex prostrata</i>) <i>Aster tripolium</i> <i>Suaeda maritima</i> (<i>Puccinellia maritima</i>)
6 m	Sol de pente faible à forte, extrêmement irrégulier (pentes ≤ 30 %), avec des micro-chenaux, quelques petites buttes arrondies	Tangué de schorres récents (parfois Tangué silto-argileuse)	(<i>Aster tripolium</i>) <i>Suaeda maritima</i> <i>Puccinellia maritima</i> (<i>Spartina sp.</i>)
5,5 m	Pente forte, sol ondulé (pentes ≤ 10 %), quelques micro-chenaux et petites buttes allongées	Tangué silto-argileuse	<i>Aster tripolium</i> <i>Suaeda maritima</i> <i>Puccinellia maritima</i> <i>Spartina sp.</i> <i>Salicornia sp.</i>
5 m	Terrain plat ou pente forte, sol ondulé (pentes ≤ 10 %), buttes allongées ou arrondies	Tangué silto-argileuse	(<i>Aster tripolium</i>) (<i>Suaeda maritima</i>) (<i>Puccinellia maritima</i>) <i>Spartina sp.</i> <i>Salicornia sp.</i>
4,5 m	Pente faible ou forte, sol ondulé (pentes ≤ 10 %) avec un microchenal et avec quelques petites buttes allongées	Tangué silto-argileuse ou sables très fins	(<i>Spartina sp.</i>) <i>Salicornia sp.</i>
4 m	Pente forte	sables très fins	<i>Spartina sp.</i> <i>Salicornia sp.</i>

Pour conclure l'analyse des transects du Vivier par analyse fréquentielle, nous pouvons dire que cette méthode permet de nuancer le schéma traditionnellement accepté de la zonation des marais salés en haut, moyen, bas schorre et haute slikke, en d'identifiant d'une part des associations végétales homogènes, d'autre part des zones de transition entre ces associations. Elle permet également voir avec précision comment les espèces végétales des marais salés de la baie du Mont-Saint-Michel se placent dans le schéma schorre/slikke en tenant compte des facteurs écologiques tels que l'altitude, la géomorphologie, et le contexte sédimentaire.

4.1.1.5. Synthèse sur l'analyse des transects de l'Ouest du Vivier-sur-Mer

L'exemple du marais salés situé à l'Ouest du Vivier-sur-Mer montre qu'il existe bien des associations végétales sur les marais salés du Mont-Saint-Michel. Ces associations sont des communautés ouvertes, c'est-à-dire composées d'espèces distribuées indépendamment les unes des autres. La distribution de la végétation est fortement liée aux facteurs écologiques, en particulier l'altitude. La géomorphologie joue également un rôle important, en particulier la présence de chenaux. Nous avons vu également qu'il existe de fortes liaisons entre l'altitude, le type de sédiment, et la géomorphologie.

Les deux transects détaillés dans cet exemple présentent des résultats différents pour les analyses effectuées. Pourtant 350 m en moyenne seulement les séparent. Ceci montre que les résultats d'un transect ne peuvent pas être étendus à l'ensemble d'un marais.

4.1.2. Chemin Dolais : un marais salé sous l'influence de cordon coquillier

4.1.2.1. Présentation du secteur

Ce secteur se situe à l'Ouest de la Baie du Mont-Saint-Michel, à proximité de Chemin Dolais. C'est un marais salé peu étendu, dont l'évolution dépend de l'avancée de cordons coquilliers vers la côte. Une partie de ce secteur est soumise à un faible pâturage ovin. Un transect a été réalisé en 2007 (Figure 61), mesurant 424 mètres de long. Les altitudes sont comprises entre 5,55 m et 7,92 m. La pente générale est faible (0,45%). Le transect traverse deux cordons coquilliers, le premier d'environ un mètre de haut, le second de 50 cm de haut. Limitant le retrait de l'eau lors du jusant, les cordons coquilliers isolent deux zones humides, appelées vasières (Figure 62).

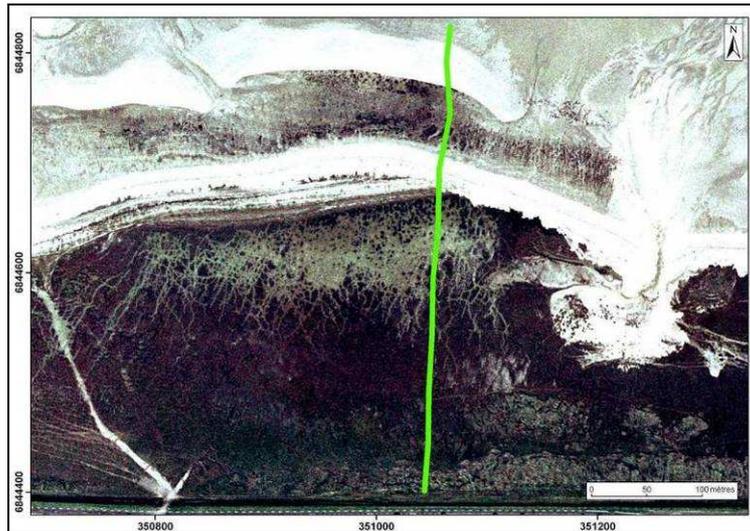


Figure 61: Superposition des points d'observation du transect CD07, en vert, et de l'orthophotographie. Les coordonnées sont en Lambert 93.



Figure 62 : Vue du transect CD07 et de la vasière située entre les deux cordons coquilliers. Photo Marianne Cohen.

4.1.2.2. Analyse descriptive de l'organisation spatiale de la végétation

14 espèces ont été rencontrées sur ce transect. Trois espèces végétales sont observées en moyenne pour chaque point, avec un maximum de six espèces. Comme dans les transects précédents, on retrouve *Aster tripolium* (rencontrée sur 16% des points d'observation), *Atriplex prostrata* (3%), *Elytrigia atherica* (11%), *Festuca rubra* (8%), *Halimione portulacoides* (14%), *Puccinellia maritima* (38%), *Salicornia sp.* (42%), *Spartina sp.* (13%), et *Suaeda maritima* (25%). Cinq autres espèces, qui n'étaient pas présentes sur le marais du Vivier-sur-Mer, ont été rencontrées : *Hordeum marinum* (8%), *Agrostis stolonifera* (13%), *Glaux maritima* (6%), *Triglochin maritimum* (10%), et *Spergularia maritima* (15%). Dans ce secteur *Salicornia sp.* et *Puccinellia maritima* sont très présentes, couvrant près de la moitié du transect.

Les données Lidar permettent de tracer le profil altitudinal de chaque transect, et le rapprocher à la répartition de chaque espèce (Figure 63).

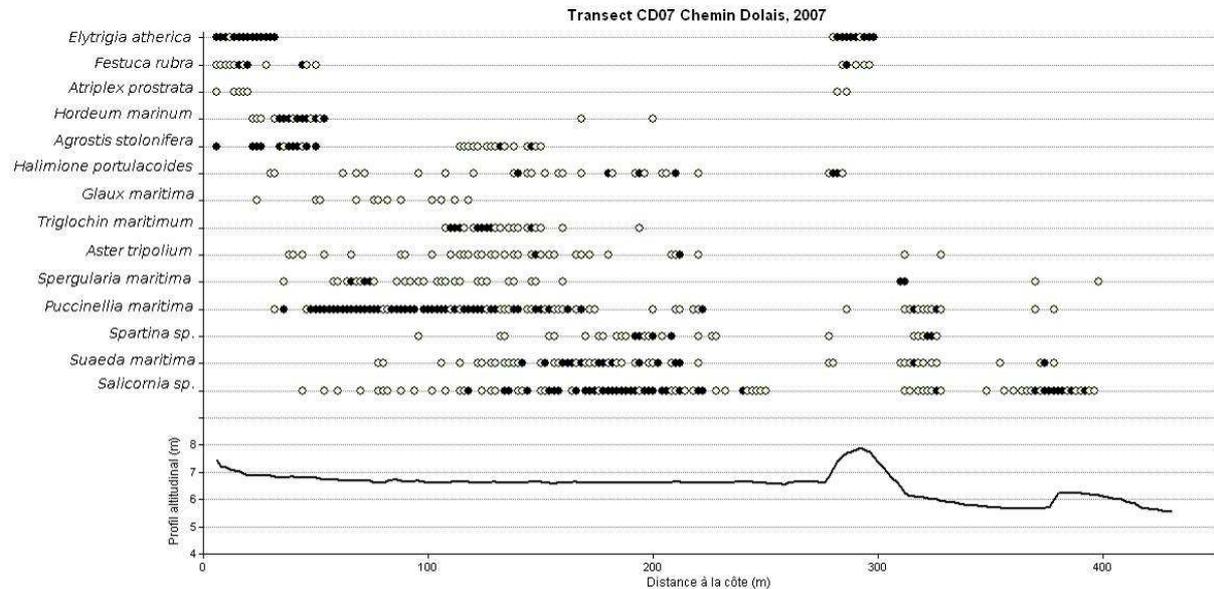


Figure 63 : Profil altitudinal du transect CD07 et répartition de chaque espèce végétale le long du transect (point noir = dominance, point blanc = présence).

Les deux cordons coquilliers sont nettement visibles sur le profil altitudinal, à 300 et 400 m de la côte. On peut voir que l'organisation de la végétation est perturbée par la présence des cordons : la position du premier cordon coïncide avec la présence de *Elytrigia atherica*, *Festuca rubra*, *Atriplex prostrata*, et *Halimione portulacoides*, des espèces caractérisant normalement le haut et moyen schorre. De plus, on peut remarquer l'absence de végétation en deux zones situées en arrière de cordons, zones probablement inondées où aucune végétation ne peut s'installer. Les données de végétation ont été acquises en 2007, tandis que les données LiDAR sont de 2002. Or, les cordons coquilliers ont tendance à avancer vers la côte sous l'action des courants et de la houle. Il y a donc probablement un décalage entre la distribution de la végétation de 2007 et la position des cordons de 2002. Cependant, la migration des cordons ralentit lorsqu'ils atteignent la végétation des marais salés, leur progression ne se faisant plus que pendant les marées de vives-eaux, à une vitesse inférieure à quelques mètres par an. On peut donc penser que le décalage entre les données est de l'ordre d'une dizaine de mètres seulement. Les cinq espèces qui n'étaient pas présentes sur le secteur du Vivier (*Hordeum marinum*, *Agrostis stolonifera*, *Glaux maritima*, *Triglochin maritimum*, et *Spergularia maritima*) se rencontrent ici sur l'ensemble du marais salé, à l'exception des vasières et des cordons coquilliers. Leur présence ne semble donc pas due à la géomorphologie, et l'on peut se demander si ces espèces dépendent du pâturage ovin.

Nous avons ensuite calculé la moyenne d'altitude à laquelle chaque espèce a été rencontrée grâce aux données LiDAR (Tableau 27, Figure 64).

Tableau 27 : Statistiques des altitudes (m, IGN69) pour chaque espèce végétale sur CD07.

Espèce	Altitude			
	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type
<i>Elytrigia atherica</i>	6,84	7,28	7,92	0,38
<i>Festuca rubra</i>	6,80	7,23	7,84	0,39
<i>Atriplex prostrata</i>	6,89	7,22	7,72	0,32
<i>Hordeum marinum</i>	6,62	6,80	6,92	0,08
<i>Agrostis stolonifera</i>	6,60	6,75	7,45	0,18
<i>Halimione portulacoides</i>	6,60	6,73	7,60	0,25
<i>Glaux maritima</i>	6,61	6,69	6,92	0,09
<i>Triglochin maritimum</i>	6,60	6,63	6,68	0,02
<i>Aster tripolium</i>	5,94	6,62	6,85	0,15
<i>Spergularia maritima</i>	5,68	6,60	6,80	0,21
<i>Puccinellia maritima</i>	5,68	6,59	7,72	0,26
<i>Spartina sp.</i>	6,01	6,50	6,84	0,24
<i>Suaeda maritima</i>	5,68	6,50	7,13	0,29
<i>Salicornia sp.</i>	5,66	6,43	6,81	0,33

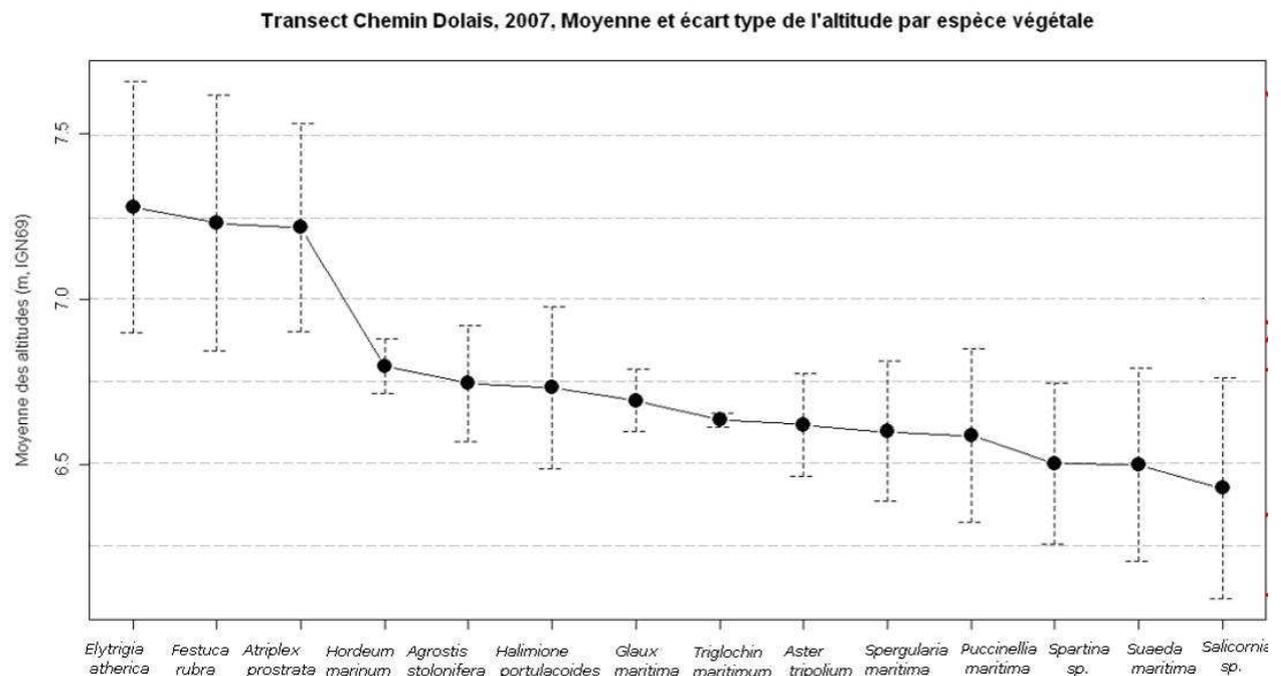


Figure 64 : Altitude moyenne et écart-type des espèces végétales rencontrées sur CD07.

Une zonation est bien visible sur la figure. On distingue tout d'abord trois espèces présentes à des altitudes proches de 7,25 m : *Elytrigia atherica*, *Festuca rubra*, et *Atriplex prostrata*. Ces espèces présentent des écarts-type élevés, de l'ordre de 30 cm, ce qui est probablement due à leur présence à la fois sur la pente de la digue en début de transect et sur le premier cordon coquillier. Les autres espèces présentent des altitudes moyennes proches,

comprises entre 6,8 et 6,4 m. On peut remarquer que les espèces de haute slikke se rencontrent à des altitudes moyennes assez élevées par rapport aux transects précédents : *Salicornia sp.* par exemple présentait une altitude moyenne de 4,98 et 4,23 m sur les marais salés proche du Vivier, alors qu'elle se rencontre ici vers 6,43 m, soit près de 1,5 m plus haut. On peut rapprocher cela au fait que les cordons coquilliers isolent des vasières qui restent humides à marées basses, permettant le développement d'espèces végétales de haute slikke à des altitudes plus hautes que d'habitude.

L'observation des courbes de densité des espèces selon l'altitude (Figure 65) permet de retrouver le groupe de trois espèces comprenant *Elytrigia atherica*, *Festuca rubra*, et *Atriplex prostrata* : leur distributions étalées se superposent entre 8 m et 6,5 m. On peut voir que les distributions de *Hordeum marinum* et *Agrostis stolonifera* se superposent vers 6,8 m. Les distributions des autres espèces se confondent ensuite vers 6,6m.

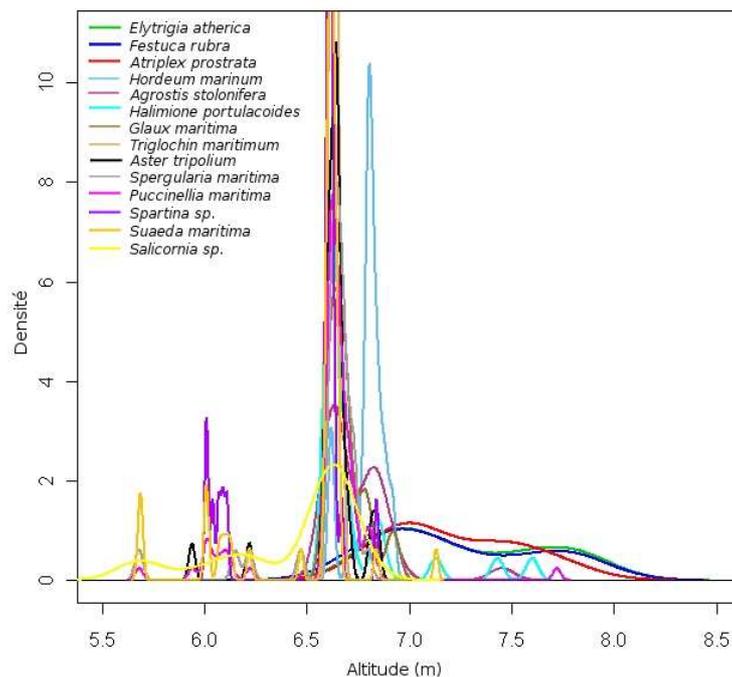


Figure 65: Courbes de densité de la distribution des espèces du transect CD07 selon l'altitude.

On peut constater que *Spartina sp.*, *Suaeda maritima*, et *Salicornia sp.* se rencontrent d'une part à des altitudes proches de 6,6 m, où leurs distributions se superposent avec celles des autres espèces, d'autre part vers 6,1 m. On peut expliquer cela par le fait que ces espèces sont présentes d'une part sur la vasière en arrière du premier cordon, à la même altitude que les espèces du schorre, d'autre part entre les deux cordons (Figure 66).



Figure 66: répartition de *Salicornia sp.* sur le transect CD07.

Quatre groupes (Figure 67) de répartition altitudinale identique ont été identifiés grâce à un test de comparaisons multiples de Wilcoxon-Mann-Whitney ($p\text{-value} > 0,05$).

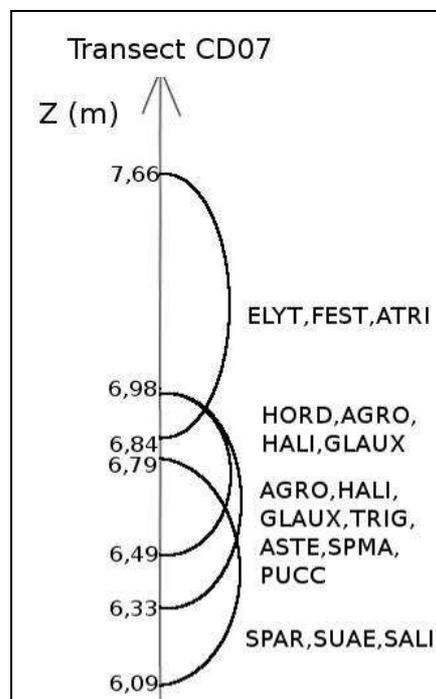


Figure 67 : Schéma de la répartition des espèces végétales selon l'altitude du transect CD07. Les regroupements d'espèces correspondent aux ensembles de répartition altitudinale identique ($p\text{-value} > 0,05$ au test de comparaisons multiples de Wilcoxon-Mann-Whitney.)

Ici *Atriplex prostrata* se trouve associée avec les espèces du haut schorre, alors qu'elle caractérisait le moyen schorre avec *Halimione portulacoides* sur le marais du Vivier-sur-mer. On peut émettre l'hypothèse que *Halimione portulacoides* est peu présente ici à cause du pâturage. *Suaeda maritima* est quant à elle associée à des espèces de haute slikke, *Spartina sp.* et *Salicornia sp.*, alors qu'elle caractérisait le bas schorre dans les transects précédents. Le moyen schorre et le bas schorre sont mal différenciés, puisque trois espèces se trouvent dans les deux regroupements : *Agrostis stolonifera*, *Halimione portulacoides*, et *Glaux maritima*.

On retrouve donc bien ici une zonation de la végétation par l'altitude, mais elle est perturbée par la présence de cordons coquilliers. Les zones humides isolées en arrière de cordon permettent le développement d'espèces halophiles à des hauteurs où l'on trouve habituellement des espèces glycophiles. Les altitudes moyennes de ces espèces sont donc ici plus élevées que dans les transects précédents. D'autre part, on rencontre sur ce secteur cinq espèces végétales qui n'étaient pas présentes sur le marais salés du Vivier. On peut émettre l'hypothèse que ces espèces sont favorisées par le pâturage ovin pratiqué sur ce secteur.

4.1.2.3. Résultats de l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC)

Le graphique des trois premiers axes de l'AFC permet l'identification de 18 segments notés de A à R (Figure 68 et 69). Leur composition floristique est résumée dans le Tableau 28.

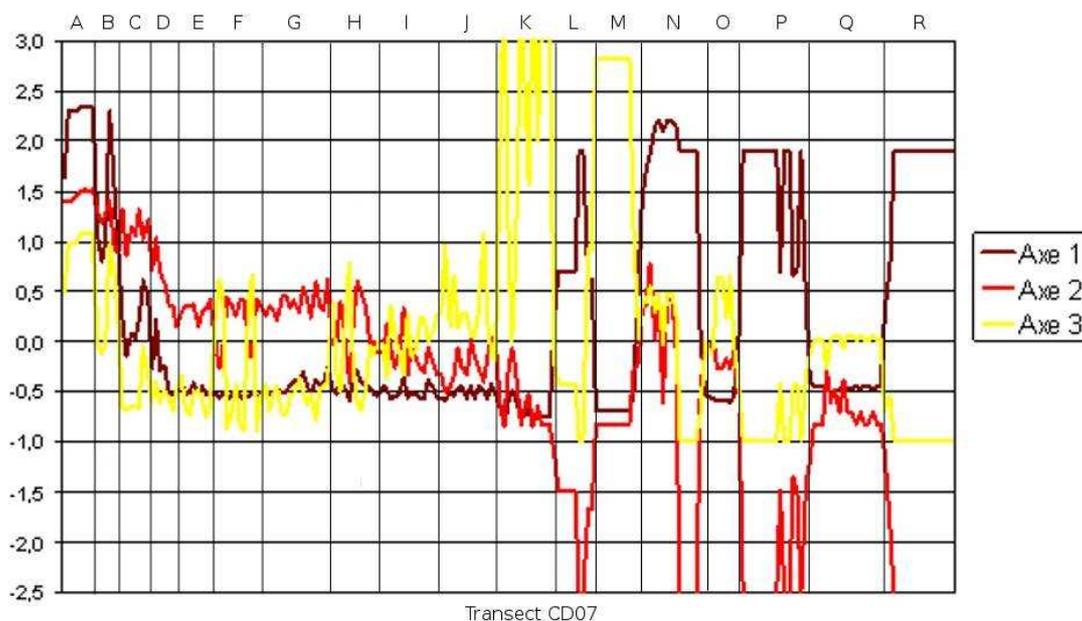


Figure 68 : Coordonnées des relevées du transect CD07 sur les trois premiers axes de l'AFC.

Tableau 28: Composition floristique des segments déterminés par l'AFC, Transect CD07 : dominance, 1 : présence dans plus de la moitié des relevés du segment, * : présence dans moins de la moitié des relevés du segment, 0 : absence.

Segments déterminés par l'AFC	<i>Agrostis stolonifera</i> (AGRO)	<i>Aster tripolium</i> (ASTE)	<i>Arriplex prostrata</i> (ATRI)	<i>Elytrigia atherica</i> (ELYT)	<i>Festuca rubra</i> (FEST)	<i>Halimione portulacoides</i> (HALI)	<i>Puccinellia maritima</i> (PUCC)	<i>Salicornia sp.</i> (SALI)	<i>Spartina sp.</i> (SPAR)	<i>Suaeda maritima</i> (SUAE)	<i>Hordeum maritimum</i> (HORD)	<i>Glaux maritima</i> (GLAU)	<i>Spergularia maritima</i> (SPMA)	<i>Triglochin maritimum</i> (TRIG)	Composition floristique simplifiée
A	*	0	1	2	1	0	0	0	0	0	*	*	0	0	ELYT>ATRI, FEST >>AGRO, HORD, GLAU
B	*	0	0	2	*	1	*	0	0	0	1	0	0	0	ELYT>HALI, HORD >>AGRO, FEST, PUCC
C	2	*	0	0	*	0	*	*	0	0	2	0	*	0	AGRO, HORD>>ASTE, FEST, PUCC, SALI, SPMA
D	*	*	0	0	*	0	2	*	0	0	1	*	*	0	PUCC>HORD>>AGRO, ASTE, FEST, SALI, GLAU, SPMA
E	0	*	0	0	0	*	2	*	0	0	0	*	1	0	PUCC>SPMA>>ASTE, HALI, SALI, GLAU
F	0	*	0	0	0	*	2	*	*	*	0	*	*	0	PUCC>>ASTE, HALI, SALI, SPAR, SUAE, GLAU, SPMA
G	1	1	0	0	0	*	2	*	*	*	0	*	*	2	PUCC, TRIG>AGRO, ASTE >>HALI, SALI, SPAR, SUAE, GLAU, SPMA
H	1	1	0	0	0	1	2	1	*	1	0	0	*	1	PUCC>AGRO, ASTE, HALI, SALI, SUAE>>SPAR, SPMA
I	0	*	0	0	0	*	1	2	*	1	*	0	*	*	SALI>PUCC, SUAE>>ASTE, HALI, SPAR, HORD, SPMA, TRIG
J	0	*	0	0	0	*	*	2	1	1	*	0	0	*	SALI>SPAR,SUAE>>ASTE, HALI, PUCC, HORD, TRIG
K	0	*	0	0	0	*	*	1	*	*	0	0	0	0	>SALI>>ASTE, HALI, PUCC, SPAR, SUAE
L	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	>SALI
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
N	0	0	*	2	*	*	*	0	0	*	0	0	0	0	ELYT>>ATRI, FEST, HALI, PUCC, SUAE
O	0	*	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	*	0	>PUCC, SALI, SPAR, SUAE> ASTE, SPMA
P	0	*	0	0	0	0	*	*	0	*	0	0	0	0	
Q	0	0	0	0	0	0	*	1	0	*	0	0	*	0	>SALI>>PUCC, SUAE, SPMA
R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	



Figure 69 : Superposition des discontinuités déterminées par l’AFC (en rouge) et des points des transects de végétation du transect CD07.

Si l’on ne considère que les espèces dominantes, quatre types de végétation sont dégagés par l’AFC et peuvent être mis en parallèle avec le profil altitudinal (Figure 70): *Elytrigia atherica* sur la pente de la digue (segment A, B), et sur le cordon coquillier (N), *Agrostis stolonifera* et *Hordeum marinum* en bas de ma digue (C), *Puccinellia maritima* sur la zone de pente faible (D, E, F, G, H) et l’avant du premier cordon (O) ; enfin *Salicornia sp.* sur les vasières en arrière du premier (I, J, K) et du deuxième cordon (Q).

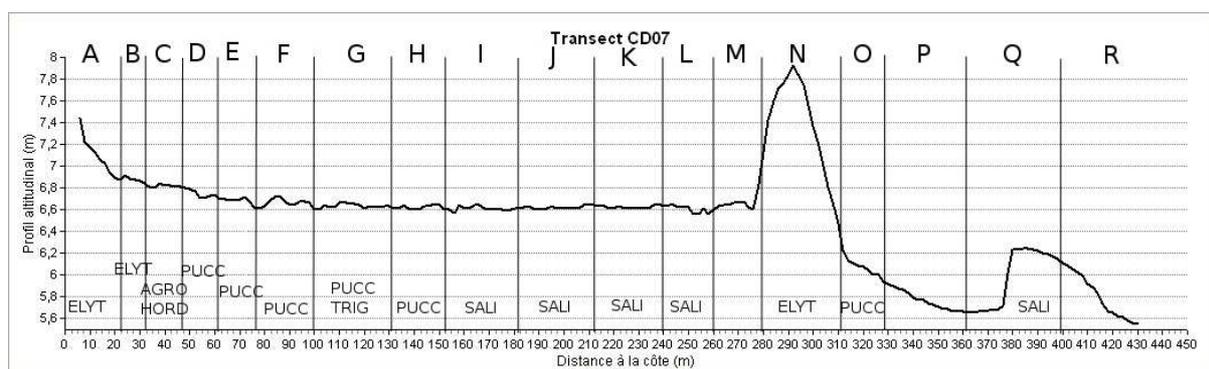


Figure 70 : Profils altitudinaux du transect CD07 et segments identifiés par l’AFC. Les espèces dominantes de chaque segment sont indiquées.

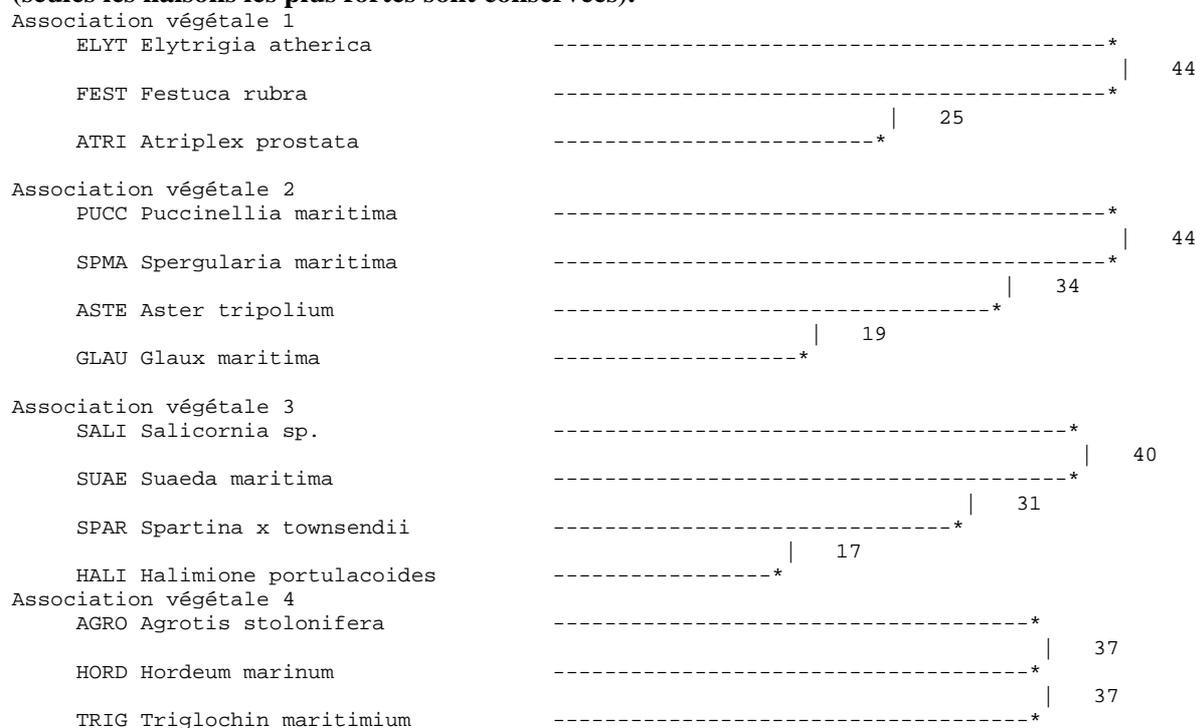
Cette méthode nous permet de réaliser un découpage du transect que l’on peut rapprocher au schéma classique des marais salés : on distingue un haut schorre à *Elytrigia*

atherica, un moyen schorre à *Agrostis stolonifera* et *Hordeum marinum*, un bas schorre à *Puccinellia maritima*, et une haute slikke à *Salicornia sp.* Ces associations se succèdent entre la digue et le premier cordon, puis cette zonation est répétée entre les deux cordons coquilliers. Ceci montre la forte influence de la géomorphologie dans le cas de cordon coquillier.

4.1.2.4. Résultats de l'analyse fréquentielle

La recherche de groupement végétal par analyse fréquentielle met en évidence quatre associations végétales :

Diagramme 5 : Associations végétales identifiées par analyse fréquentielle sur le transect CD07 (seules les liaisons les plus fortes sont conservées).



Ces quatre groupements correspondent à ceux trouvés par l'AFC : on retrouve un haut schorre à *Elytrigia atherica*, *Festuca rubra*, *Atriplex prostrata*, un moyen schorre à *Agrostis stolonifera*, *Hordeum marinum*, et *Triglochin maritimum*, un bas schorre à *Puccinellia maritima*, *Spergularia maritima*, *Aster tripolium*, et *Glaux maritima*, et enfin une association pouvant être assimilée à la haute slikke, probablement présente en arrière de cordon, à *Salicornia sp.* *Suaeda maritima*, *Spartina sp.* et *Halimione portulacoides*.

Si l'on ne se limite pas aux liaisons les plus fortes, on trouve les groupements suivants :

Diagramme 6 : Groupes identifiés par analyse fréquentielle sur le transect CD07 (toutes les liaisons sont indiquées).

Groupe n° 1			
ELYT	Elytrigia atherica	-----*	
FEST	Festuca rubra	-----*	44
ATRI	Atriplex prostrata	-----*	25
AGRO	Agrostis stolonifera	-----*	9 2 4
HORD	Hordeum marinum	-----*	9 2 4
HALI	Halimione portulacoides	-----*	8 2 3 5 6
Groupe n° 2			
PUCC	Puccinellia maritima	-----*	
SPER	Spergularia media subsp. media	-----*	44
ASTE	Aster tripolium	-----*	34 3 4 5
SUAE	Suaeda maritima	-----*	31 3 5
TRIG	Triglochin maritimum	-----*	31 4 5
AGRO	Agrostis stolonifera	-----*	25 1 4
GLAU	Glaux maritima	-----*	19 4
HALI	Halimione portulacoides	-----*	11 1 3 5 6
HORD	Hordeum marinum	-----*	8 1 4
PUCR	Puccinellia rupestris	-----*	5 3 6
Groupe n° 3			
SALI	Salicornia sp.	-----*	
SUAE	Suaeda maritima	-----*	40
SPAR	Spartina x townsendii	-----*	31 6
PUCC	Puccinellia maritima	-----*	27 2
ASTE	Aster tripolium	-----*	22 2 4 5
HALI	Halimione portulacoides	-----*	17 1 2 5 6
PUCR	Puccinellia rupestris	-----*	5 2 6
Groupe n° 4			
AGRO	Agrostis stolonifera	-----*	
HORD	Hordeum marinum	-----*	37
TRIG	Triglochin maritimum	-----*	37 2 5
ASTE	Aster tripolium	-----*	26 2 3 5
GLAU	Glaux maritima	-----*	6 2
Groupe n° 5			
ASTE	Aster tripolium	-----*	
TRIG	Triglochin maritimum	-----*	23
HALI	Halimione portulacoides	-----*	15 1 2 3 6
SUAE	Suaeda maritima	-----*	13 2 3
Groupe n° 6			
HALI	Halimione portulacoides	-----*	
SPAR	Spartina x townsendii	-----*	9
PUCR	Puccinellia rupestris	-----*	6 2 3

On peut voir que les espèces apparaissent dans de nombreux groupes à la fois (chiffres indiqués à droite des lignes). Ainsi *Halimione portulacoides* apparaît dans cinq groupes sur six. Cela montre que les limites d'association végétales sont ici très floues.

L'étude de l'influence des facteurs écologiques tels que l'altitude, la pente, la géomorphologie, et les sédiments permettent de clarifier cette organisation. On peut voir tout d'abord (Tableau 29) que toutes les espèces, même les halophiles strictes comme *Salicornia sp.* et *Spartina sp.* sont associées positivement avec des altitudes élevées, supérieur à 6 m. On retrouve notamment à l'altitude 6,6 m, qui est l'altitude de la vasière présente derrière le premier cordon, toutes les espèces du moyen et bas schorre et de la haute slikke. Les différentes ceintures de végétation qui étaient présentes dans les transects précédents entre 4 et 7 m d'altitude se retrouvent ici entre 6 et 7 m. Ceci montre que la présence de cordons coquilliers augmente l'altitude moyenne à laquelle on trouve les espèces du marais salé, en particulier les espèces halophiles.

Tableau 29 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Altitude pour le transect CD07.

Altitude (m)	5.6	5.8	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0	7.2	7.4	7.6	7.8	8.0
<i>Elytrigia atherica</i>	-	-	-	-	.	---	++	+++	+++	++	+++	+++	.
<i>Festuca rubra</i>	---	++	+++	++	.	.	+++	.
<i>Atriplex prostrata</i>	--	.	+++	.	++	.	.	.
<i>Hordeum marinum</i>	---	+++
<i>Agrostis stolonifera</i>	-	+++
<i>Triglochin maritimum</i>	+++	-
<i>Puccinellia maritima</i>	---	---	.	-	.	+++	+++	-	-
<i>Spergularia media</i>	++	+
<i>Aster tripolium</i>	-	+++
<i>Halimione portulacoides</i>	-	++
<i>Suaeda maritima</i>	.	--	.	.	.	+++	---
<i>Salicornia sp.</i>	.	-	.	++	.	+++	---	-	-	.	.	-	.
<i>Spartina x townsendii</i>	-	.	++	.	.	++	-

D'autre part, les résultats de l'analyse fréquentielle pour le facteur Pente (Tableau 30) montre qu'*Elytrigia atherica*, *Festuca rubra*, *Atriplex prostrata*, et *Halimione portulacoides* sont associées aux pentes élevées (>3%). Ce qui peut être expliqué en analysant les résultats du facteur Géomorphologie (Tableau 31) : *Festuca rubra* est associée à la pente de la digue (1), *Atriplex prostrata* et *Halimione portulacoides* sont associés aux versants des cordons (9), tandis que *Elytrigia atherica* est associée à la fois à la digue et aux cordons. On peut voir également que *Spartina sp.* et *Salicornia sp.* sont associées à la présence de vasières en arrière de cordons (7d).

Enfin, les résultats de l'analyse fréquentielle du facteur Sédiment (Tableau 32) montrent que la plupart des espèces sont associées à la Tangué de schorres récents (FMz), mis à part *Salicornia sp.* associée au type de sédiment « Sables mêlés à des galets, facies coquillier » (SCb). Le type de sédiment « Sablons et tangués sablo-argileuses » (Tg) n'est associé positivement avec aucune espèce.

Tableau 30 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Pente pour le transect CD07.

Pente (%)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	10.0
<i>Elytrigia atherica</i>	-	-	+	+	+++	+++
<i>Festuca rubra</i>	++	.	+++	.
<i>Atriplex prostrata</i>	++	.
<i>Agrostis stolonifera</i>	+	+	-
<i>Triglochin maritimum</i>	.	.	.	++
<i>Puccinellia maritima</i>	-	++	--	-
<i>Halimione portulacoides</i>	+	-	++
<i>Salicornia sp.</i>	.	++	++	+++	.	.	--	.	.	.	--	.
<i>Spartina x townsendii</i>	-

Tableau 31 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Géomorphologie pour le transect CD07.

Géomorphologie	1	2	3a	3b	7a	7d	9a	9b	9c	9d
<i>Elytrigia atherica</i>	+++	.	+	+++	.	---	+++	++	.	-
<i>Festuca rubra</i>	+	.	++	+++	.	---
<i>Atriplex prostrata</i>	.	-	+	+++	.	.	+	.	.	.
<i>Hordeum marinum</i>	.	+++	.	.	.	---
<i>Agrostis stolonifera</i>	+	+++	.	.	.	---	.	.	-	-
<i>Triglochin maritimum</i>	.	+++	.	.	.	---
<i>Puccinellia maritima</i>	.	+++	.	-	++	---	-	---	---	.
<i>Spergularia media subsp. media</i>	.	+++	.	.	+	---	.	.	.	-
<i>Aster tripolium</i>	.	+++	.	.	.	--
<i>Halimione portulacoides</i>	.	++	++	.	-	-
<i>Suaeda maritima</i>	.	++	-	-	.
<i>Salicornia sp.</i>	.	.	.	-	.	++	.	+	---	.
<i>Spartina x townsendii</i>	++	.	.	-	++
<i>Glaux maritima</i>	.	++	.	.	++	--

Tableau 32 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Sédiment pour le transect CD07.

Sédiment	Tg	FMz	SCb
<i>Elytrigia atherica</i>	-	+++	---
<i>Festuca rubra</i>	.	++	-
<i>Hordeum marinum</i>	.	++	--
<i>Agrostis stolonifera</i>	.	+++	---
<i>Triglochin maritimum</i>	.	+++	--
<i>Puccinellia maritima</i>	---	+++	---
<i>Spergularia media subsp. media</i>	.	++	-
<i>Aster tripolium</i>	.	+++	--
<i>Halimione portulacoides</i>	.	+++	--
<i>Suaeda maritima</i>	--	+++	--
<i>Salicornia sp.</i>	---	.	+
<i>Spartina x townsendii</i>	.	+++	--
<i>Glaux maritima</i>	.	+	.

Les interactions entre les facteurs ont également été analysées :

Tableau 33 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Sédiment (à la verticale) sur le transect CD07.

	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5
Tg	18	4	-17	0	0	0
FMz	-52	-35	72	10	2	2
SCb	26	28	-48	-7	0	0

Tableau 34 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect CD07.

	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5
1	0	0	0	2	5	0
2	-25	-16	21	10	0	0
3a	0	0	0	3	0	0
3b	0	0	2	3	0	0
7a	0	0	4	0	0	0
7d	4	0	9	-15	0	0
9a	2	0	-6	2	6	2
9b	0	18	-15	0	0	15
9c	4	7	-12	2	2	0
9d	26	4	-21	0	0	0

Tableau 35 : Relation entre le facteur Sédiment (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect CD07.

	Tg	FMz	SCb
1	0	1	0
2	-9	36	-24
3a	0	0	0
3b	0	2	0
7a	0	2	0
7d	-8	-5	11
9a	0	0	3
9b	0	-10	14
9c	19	-11	0
9d	12	-4	0

Les liaisons positives entre les trois facteurs ont été résumées (Tableau 33).

Tableau 36 : Résumé des relations entre les facteurs Altitudes, Géomorphologie, et Sédiment (SCb : Sables mêlés à des galets, facies coquillier ; Tg : Sablons et tangues sablo-argileuses ; FMz : Tangue de schorres récents).

Géomorphologie	Altitude (m)					
	6	6,5	7	7,5	8	8,5
1 : Pente de la digue				FMz	FMz	
2: Terrain plat			FMz	FMz		
3a: Pente faible			FMz	FMz		
3b: Pente forte				FMz		
7a: Dépression peu étendue	SCb		FMz			
7d: vasière de cordon coquillier			SCb			
9a: Versant interne de cordon	SCb			FMz	FMz	FMz
9b: Sommet		SCb		FMz		FMz
9c: Versant externe	Tg	Tg			FMz	
9d Avant-cordon	Tg	Tg				

L'analyse fréquentielle nous permet ainsi de dégager un schéma de l'organisation végétale du marais salé du Chemin Dolais (Tableau 33).

Tableau 33: Résumé des résultats obtenus par analyse fréquentielle sur CD07.

Altitude	Géomorphologie	Sédiment	Flore
8,5 m	Sommet ou versant de cordons coquilliers	Tangue de schorres récents	<i>Elytrigia atherica</i> <i>Festuca rubra</i>
8 m	Pente de la digue	Tangue de schorres récents	<i>Elytrigia atherica</i> <i>Festuca rubra</i> <i>Atriplex prostrata</i>
	Versant de cordons coquilliers		
7,5 m	Pente de la digue, terrain à pente faible ou forte	Tangue de schorres récents	<i>Elytrigia atherica</i> <i>Festuca rubra</i> <i>Atriplex prostrata</i>
	Terrain plat		<i>Hordeum marinum</i> <i>Agrostis stolonifera</i>
	Sommet ou versant de cordons coquilliers		<i>Elytrigia atherica</i> <i>Festuca rubra</i> <i>Atriplex prostrata</i>
7 m	Terrain plat	Tangue de schorres récents	<i>Triglochin maritimum</i> <i>Puccinellia maritima</i> <i>Spergularia media</i> <i>Aster tripolium</i> <i>Halimione portulacoides</i> <i>Suaeda maritima</i>
	Dépression	Tangue de schorres récents	<i>Puccinellia maritima</i> <i>Spergularia media</i>
	Vasière	Sables mêlés à des galets, facies coquillier	<i>Salicornia sp.</i> <i>Spartina x townsendii</i>
6,5 m	Sommet de cordon	Sables mêlés à des galets, facies coquillier	
	Versant externe ou avant cordon	Sablons et tangues sablo-argileuses	
6 m	Dépression Versant interne de cordons	Sables mêlés à des galets, facies coquillier	
	Versant externe ou avant cordon	Sablons et tangues sablo-argileuses	

4.1.2.5. Synthèse du transect de Chemin Dolais

Les marais salés de Chemin Dolais sont marqués par la présence de deux cordons coquilliers. On retrouve la zonation de la végétation, mais celle-ci est répétée deux fois à cause de la présence des cordons et des vasières qu'ils isolent. On a donc ici une interaction importante entre l'altitude et la géomorphologie. Ceci a pour conséquence des valeurs d'altitude moyenne plus élevées par rapport aux transects précédents.

4.1.3. Vains : effet du pâturage et des sédiments

4.1.3.1. Présentation du secteur et des données

Ces analyses ont fait l'objet de l'encadrement d'un stagiaire, Antoine Boulay, du Master 1 BioGeoMedia (2008/2009).

Le secteur étudié se situe à l'Est de la Baie du Mont-Saint-Michel, à proximité de Vains, au bord de l'estuaire de la Sée. C'est un marais salé subissant un fort pâturage ovin et bovin. Il est bordé par la Sée, dont les fréquentes divagations modifient le tracé de ses limites. Deux transects ont été réalisés en 2008 (Figure 71) : le transect V108 à l'Est, qui est sous pâturage ovin, et le transect V208 à l'Ouest, sous pâturage bovin. Ils mesurent respectivement 444 m et 504 m de long. Les altitudes sont comprises entre 7,12 m et 7,88 m pour V108, et 6,93 m et 7,74 m pour V208. La pente générale est très faible, et égale à 0,16% pour V108 et -0,04% pour V208. C'est donc un secteur où le terrain est quasiment plat, avec une faible pente inverse pour le transect de l'Ouest. Au niveau sédimentaire, le transect de l'Est, qui suit le tracé de la Sée, traverse trois types de sédiments : la Tangue de schorres récents (FMz), les Sables à débris des chenaux (S-Sm), et Sablons et tangues sablo-argileuses (Tg). Les deux derniers types de sédiments ont été déposés par la Sée lors de ses divagations. Le transect de l'Ouest ne traverse que les sédiments de type Tangue de schorres récents.

Lors de l'acquisition des données de végétation, en 2008, une micro-falaise de 2 m de haut limitait le marais. Les deux transects ont été réalisés jusqu'au bord de cette micro-falaise. On peut voir sur la figure que lors de la prise de vue de l'orthophotographie, en 2002, le marais était plus étendu, et que les berges ont été érodées par le passage de la Sée.



Figure 71 : Superposition des points d'observation des transects de Vains V108 et V208, en vert, et de l'orthophotographie. Les coordonnées sont en Lambert 93.

4.1.3.2. Analyse descriptive de l'organisation spatiale de la végétation

13 espèces végétales ont été rencontrées sur le transect V108, qui est sous pâturage ovin, et 15 espèces sur le transect V208, qui est sous pâturage bovin. Certaines espèces végétales se rencontrent dans les deux transects : *Aster tripolium* (présente sur 1% des points d'observation du transect V108 et 5% sur V208), *Trifolium sp.* (5% et 29%), *Elytrigia atherica* (68% et 69%), *Taraxacum sp* (3% et 4%), *Festuca rubra* (63% et 22%), *Agrostis stolonifera* (81% et 93%), *Puccinellia maritima* (53% et 51%), *Spergularia media* (14% et 45%), et *Atriplex prostrata* (<1% et 12%). *Agrostis stolonifera*, espèce qui n'était pas présente sur le secteur non pâturé du Vivier, couvre ici presque la totalité des deux transects. Cette espèce est favorisée par le pâturage et l'eau douce (V. Bouchard *et al.*, 2003). *Puccinellia maritima*, espèce favorisée par le pâturage, est également très présente.

On peut également remarquer sur les deux transects l'absence de *Halimione portulacoides*, *Suaeda maritima*, *Salicornia sp.*, et *Spartina sp.*.

Il faut aussi noter la présence d'espèces continentales telles que *Beta vulgaris* (<1%), *Convolvulus sp.* (2%) sur le transect V108 et *Cerastium sp.* (<1%), *Plantago mayor* (2%), et *Lolium perenne* (6%) sur le transect V208. La présence de ces espèces s'explique par le fait que le taux de salinité de ce secteur bordé par la Sée et peu fréquemment inondé par la marée du fait de son altitude élevée (7,5 m) et de la présence d'une micro-falaise de deux mètres, est moins élevé que sur d'autres marais de la Baie.

D'autre part *Cerastium sp.*, *Plantago mayor*, et *Lolium perenne*, présente sur V208 sous pâturage bovin sont des espèces de prairies. Leurs graines peuvent avoir été transportées par les vaches qui pâturent alternativement sur les marais et les prairies.

Sur ces transect sont également rencontrées : *Puccinellia rupestris* (3%) et *Carex sp.* (1%) sur V108, et *Spergularia maritima* (6%), *Plantago maritima* (35%), *Polygonum maritima* (19%) sur le transect V208.

L'observation du terrain du marais de Vains (Figure 72) permet de voir que la végétation est plus rase dans la zone bovine que dans la zone ovine, où la végétation est de taille hétérogène. Ceci pourrait provenir du fait que les moutons et les vaches ne se nourrissent pas des mêmes espèces végétales, ou bien que la pression due au pâturage sur le transect de l'Ouest soit plus importante, à cause du nombre de bête ou du temps passé sur le marais.



Figure 72: Vue du marais salés de Vains. On voit nettement une différence dans la hauteur de la végétation, la zone à pâturage bovin étant à gauche sur la photo, et la zone à pâturage ovin à droite.

Les données Lidar permettent de tracer le profil altitudinal de chaque transect, et le rapprocher à la répartition de chaque espèce (Figures 73 et 74).

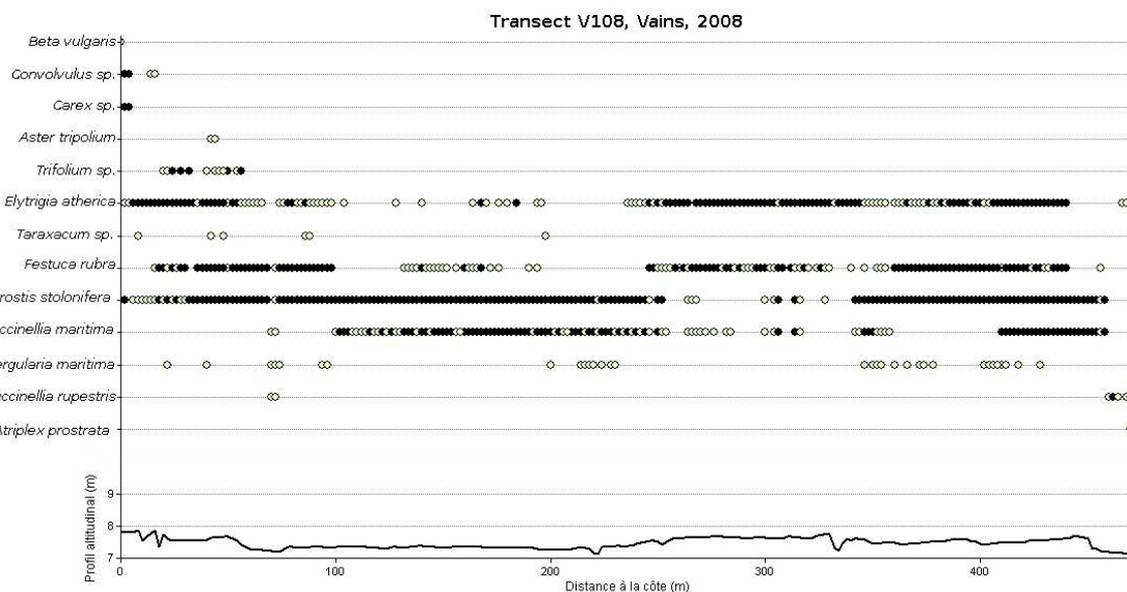


Figure 73: Profil altitudinal du transect V108 et répartition de chaque espèce végétale le long du transect (point noir = dominance, point blanc = présence).

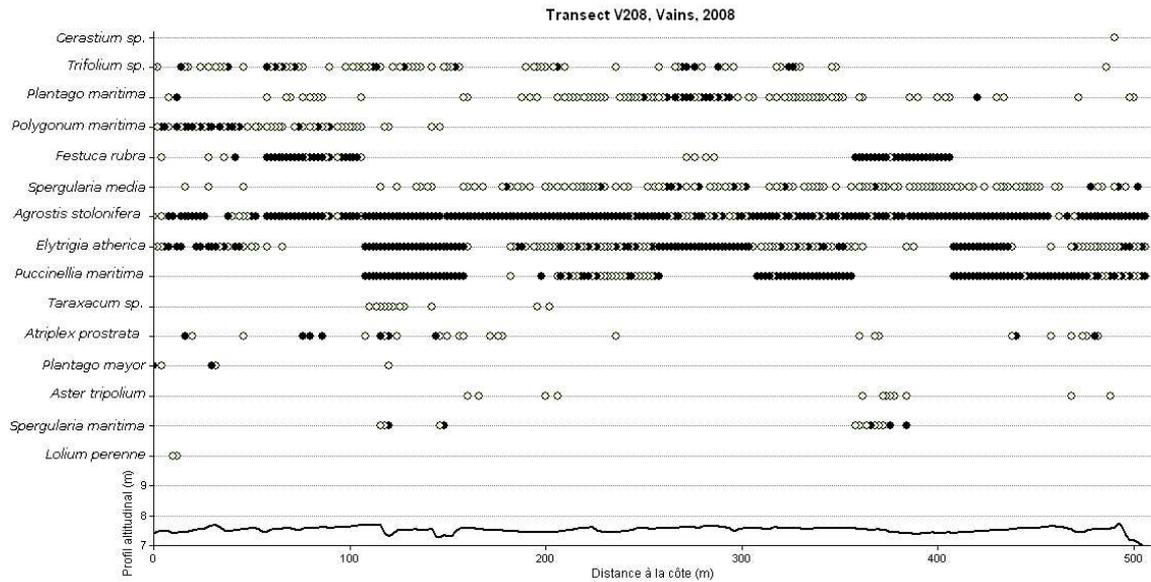


Figure 74: Profil altitudinal du transect V208 et répartition de chaque espèce végétale le long du transect (point noir = dominance, point blanc = présence).

Ces figures permettent de constater que *Agrostis stolonifera* est dominante sur la quasi totalité des transects, mis à part une zone plus élevée couverte d'*Elytrigia atherica* et de *Festuca rubra* sur le transect V108 à environ 300 m de la côte. *Puccinellia maritima* est également très présente, notamment lorsque le terrain est peu élevé.

On peut voir également que *Beta vulgaris*, *Convolvulus sp.*, *Carex sp.*, *Trifolium sp.* et *Lolium perenne* sont présentes uniquement en début de transect, ce qui confirme le caractère continentale de ces espèces. *Puccinellia rupestris* est présente uniquement dans une dépression et en fin de transect, et son altitude préférentielle semble moins élevée que celle de *Puccinellia maritima*. De même la présence de *Spargularia maritima* coïncide avec les dépressions du terrain, alors que *Spargularia media* est répartie assez uniformément sur les deux transects.

L'altitude moyenne à laquelle chaque espèce a été rencontrée a ensuite été calculée grâce aux données LiDAR (Tableaux 34 et 35, Figures 75 et 76).

Tableau 34: Statistiques des altitudes (m, IGN69) des espèces végétales sur V108: altitude minimale (Min), moyenne, maximale (Max), et écart-type (Sd).

Espèce	Transect V108			
	Min	Moyenne	Max	Sd
<i>Beta vulgaris</i>	7,84	7,84	7,84	NA
<i>Convolvulus sp.</i>	7,78	7,82	7,88	0,04
<i>Carex sp.</i>	7,81	7,82	7,84	0,02
<i>Aster tripolium</i>	7,63	7,63	7,63	0,00
<i>Trifolium sp.</i>	7,42	7,60	7,74	0,09
<i>Elytrigia atherica</i>	7,12	7,52	7,88	0,15
<i>Taraxacum sp.</i>	7,26	7,52	7,86	0,24
<i>Festuca rubra</i>	7,20	7,50	7,88	0,14
<i>Agrostis stolonifera</i>	7,13	7,44	7,88	0,15
<i>Puccinellia maritima</i>	7,13	7,42	7,72	0,14
<i>Spergularia media</i>	7,17	7,41	7,61	0,12
<i>Puccinellia rupestris</i>	7,12	7,16	7,22	0,04
<i>Atriplex prostrata</i>	7,12	7,12	7,12	NA

Tableau 35: Statistiques des altitudes (m, IGN69) des espèces végétales sur V208: altitude minimale (Min), moyenne, maximale (Max), et écart-type (Sd).

Espèce	Transect V208			
	Min	Moyenne	Max	Sd
<i>Cerastium sp.</i>	7,61	7,61	7,61	0,00
<i>Trifolium sp.</i>	7,31	7,54	7,70	0,09
<i>Plantago maritima</i>	7,16	7,54	7,68	0,09
<i>Polygonum maritima</i>	7,26	7,54	7,69	0,09
<i>Festuca rubra</i>	7,37	7,53	7,69	0,08
<i>Spergularia media</i>	7,11	7,53	7,74	0,08
<i>Agrostis stolonifera</i>	6,93	7,52	7,74	0,10
<i>Elytrigia atherica</i>	6,93	7,52	7,74	0,11
<i>Puccinellia maritima</i>	6,93	7,52	7,74	0,12
<i>Taraxacum sp.</i>	7,31	7,52	7,70	0,13
<i>Atriplex prostrata</i>	7,26	7,51	7,68	0,10
<i>Plantago mayor</i>	7,31	7,51	7,68	0,14
<i>Aster tripolium</i>	7,42	7,50	7,59	0,06
<i>Spergularia maritima</i>	7,26	7,48	7,68	0,11
<i>Lolium perenne</i>	7,42	7,43	7,43	0,01

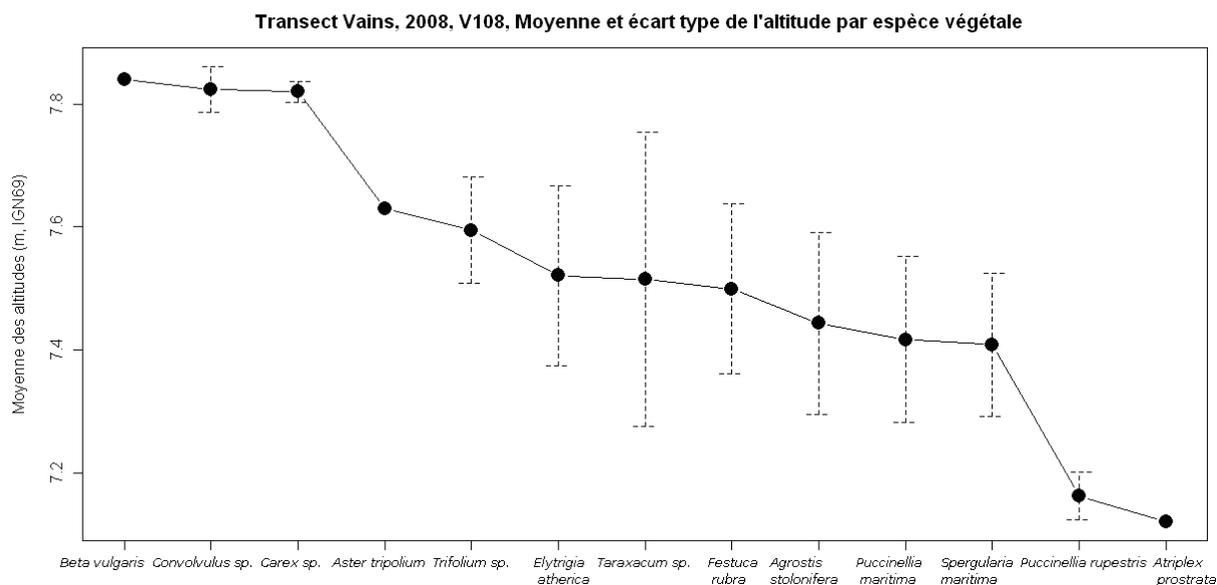


Figure 75: Altitude moyenne et écart-type de chaque espèce végétale rencontrée sur V108.

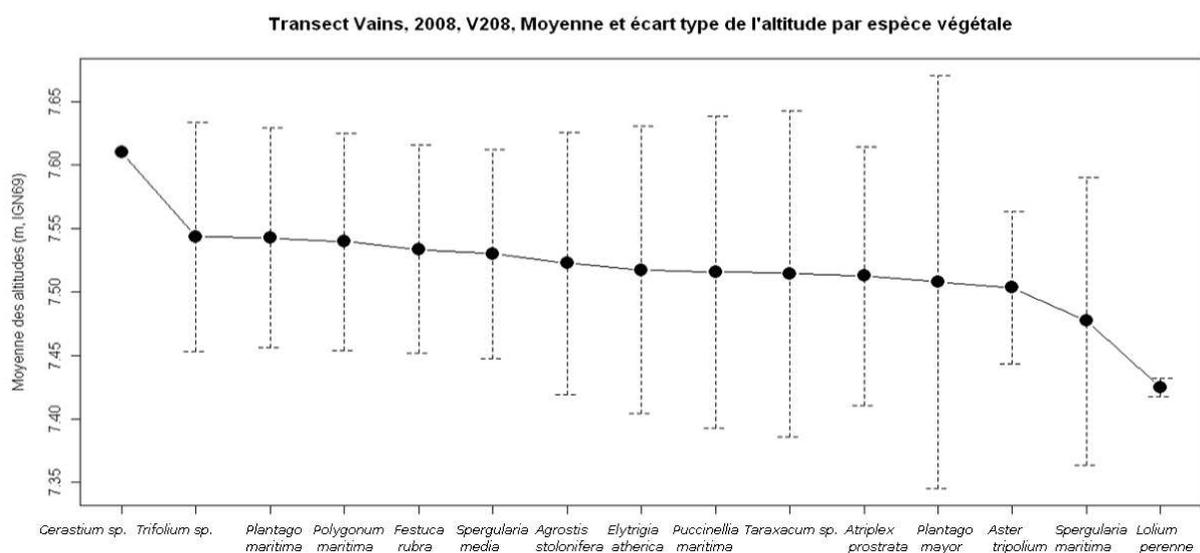


Figure 76: Altitude moyenne et écart-type de chaque espèce végétale rencontrée sur V208.

La zonation par l'altitude est ici beaucoup moins marquée que dans les transects précédents, notamment parce que les deux transects présentent des écarts d'altitude de moins de un mètre.

Sur le transect V108 où les écarts d'altitude sont plus importants, on peut noter que *Beta vulgaris*, *Convolvulus sp.*, et *Carex sp.* présentent des altitudes préférentielles plus élevées (autour de 7,8 m) que le reste des espèces (autour de 7,5 m), alors que *Puccinellia rupestris* et *Atriplex prostrata* présentent des altitudes plus faibles (autour de 7,1 m). Sur le transect

V208, toutes les espèces présentent une altitude moyenne d'environ 7,5 m, à part *Cerastium sp.* (7,6 m) et *Lolium perenne* (7,4 m).

Pour conclure, nous pouvons dire qu'ici l'analyse descriptive des altitudes moyennes n'apporte que peu d'information puisque les espèces présentent des altitudes moyennes très proches. Il semblerait cependant que le transect V108 présente des situations plus contrastées, avec des écarts d'altitudes plus importants. Il apparaît tout de même une certaine organisation de la végétation, qui n'est donc pas due uniquement au facteur altitude.

4.1.3.3. Résultats de l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC)

L'analyse graphique des courbes des trois premiers axes factoriels de l'AFC (Figure 77) permet de définir 18 segments notés de A à R dans le transect V108, et 18 segments notés de A' à R' dans le transect V208 (Figure 78).

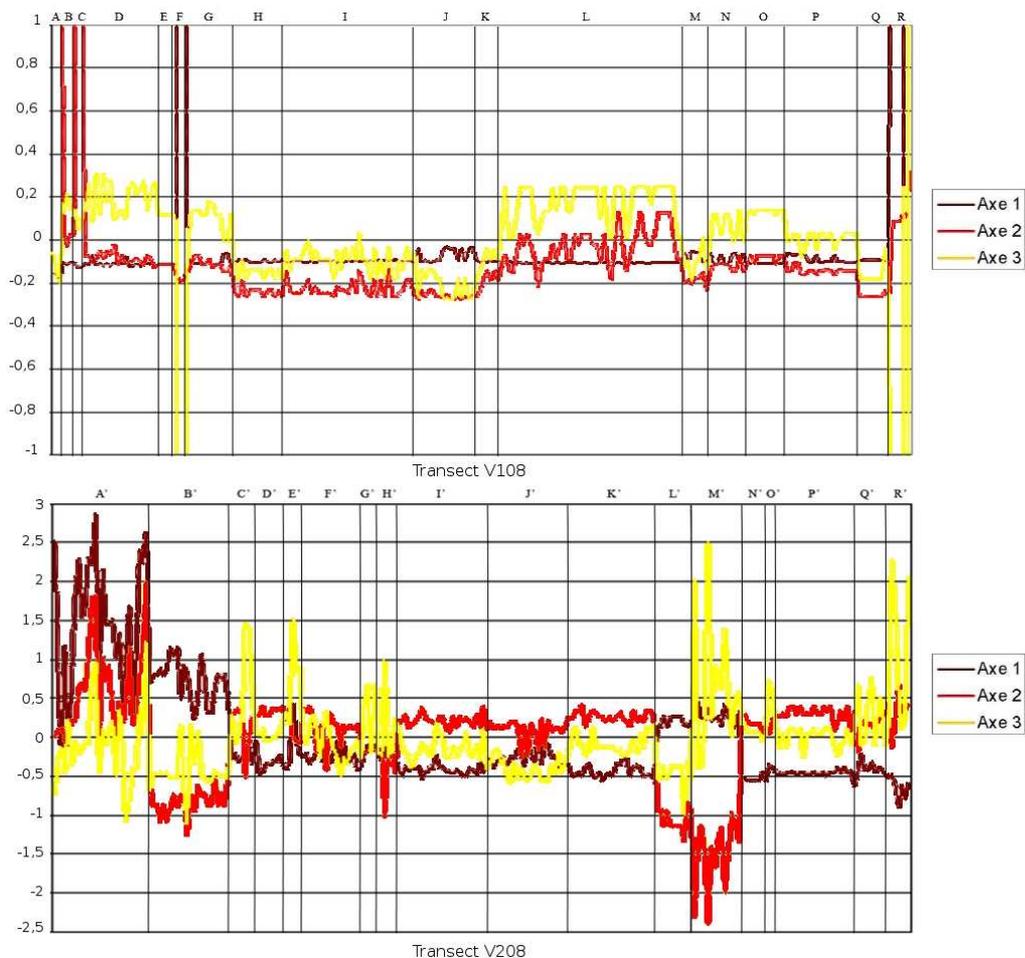


Figure 77: Coordonnées des relevés de V108 et V208 sur les trois premiers axes de l'AFC. .

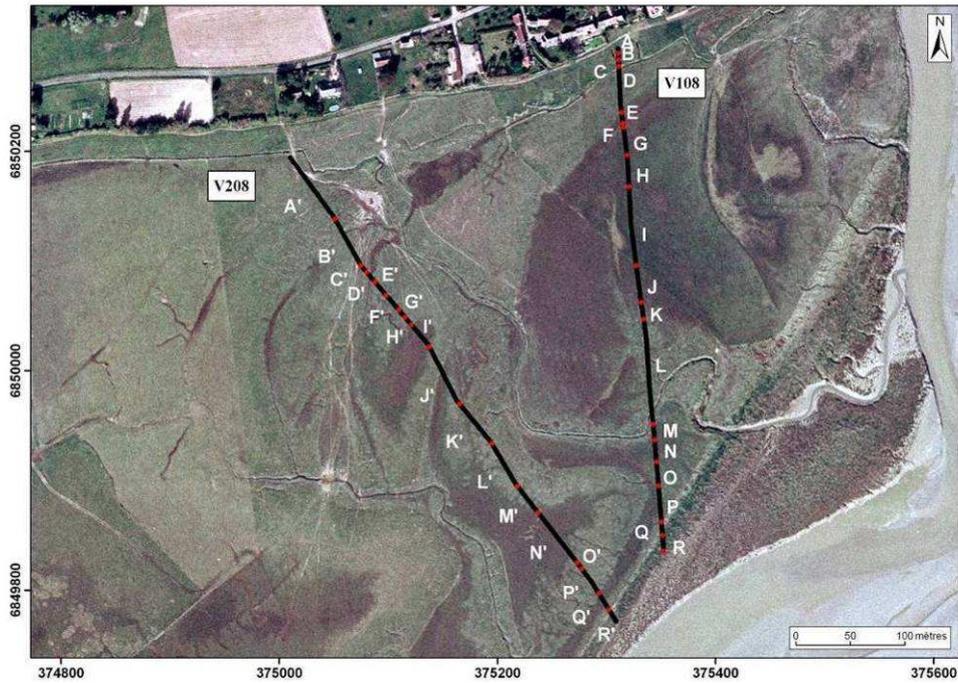


Figure 78: Superposition des discontinuités déterminées par l'AFC (en rouge) et des points des transects de végétation du transect CD07.

Les segments coïncident avec les changements de couleur et de texture de l'orthophotographie (Figure 79), ce qui montre la pertinence de ce découpage.



Figure 79: Superposition de l'orthophotographie et des segments identifiées par l'AFC (en couleur), sur une portion du transect V108. On peut voir la correspondance entre les segments et les zones d'égalité d'apparence en couleur et de texture de l'orthophotographie.

La composition floristique des différents segments a été déterminée (Tableaux 36 et 37).

Tableau 36: Composition floristique des segments déterminés par l'AFC, Transect V108. 2 : dominance, 1 : présence dans plus de la moitié des relevés du segment, * : présence dans moins de la moitié des relevés du segment, 0 : absence.

Segments déterminés par l'AFC	<i>Agrostis stolonifera</i> (AGRO)	<i>Aster tripolium</i> (ASTE)	<i>Elytrigia atherica</i> (ELYT)	<i>Festuca rubra</i> (FEST)	<i>Atriplex prostrata</i> (ATRI)	<i>Puccinellia maritima</i> (PUCC.)	<i>Spergularia media</i> (SPER)	<i>Taraxacum sp.</i> (TARA)	<i>Trifolium sp.</i> (TRIF)	<i>Puccinellia rupestris</i> (PUCR)	<i>Beta vulgaris</i> (BETA)	<i>Convolvulus sp.</i> (CONV)	<i>Carex sp.</i> (CARE)	Composition floristique simplifiée
A	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	*	2	2	CARE, CONV > ELYT, AGRO >> BETA
B	1	0	2	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	ELYT > AGRO >>> TARA
C	1	0	2	*	0	0	0	0	0	0	0	1	0	ELYT > AGRO, CONV >>> FEST
D	2	*	2	2	0	0	*	*	*	0	0	0	0	AGRO, ELYT, FEST >>>> ASTE, SPER, TARA, TRIF
E	2	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	AGRO, FEST > ELYT
F	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	>AGRO, FEST, SPER, PUCC, PUCC>>
G	2	0	1	2	0	0	*	*	0	0	0	0	0	AGRO, FEST > ELYT >>> SPER, TARA
H	2	0	*	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	AGRO > PUCC >>> ELYT
I	2	0	*	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	AGRO, PUCC > FEST
J	2	0	0	0	0	2	*	0	0	0	0	0	0	AGRO, PUCC >>>> SPER
K	2	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	AGRO, PUCC > ELYT
L	*	0	2	2	0	*	0	0	0	0	0	0	0	ELYT, FEST >>> AGRO, PUCC
M	2	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	AGRO > ELYT, PUCC, FEST, SPER
N	2	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	AGRO, FEST > ELYT, SPER
O	2	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	AGRO, ELYT, FEST>
P	2	0	2	2	0	2	*	0	0	0	0	0	0	AGRO, ELYT, FEST, PUCC >> SPER
Q	2	0	0	*	0	2	0	0	0	0	0	0	0	AGRO, PUCC >>>> FEST
R	*	0	*	0	*	*	0	0	0	1	0	0	0	>PUCC >> AGRO, ELYT, ATRI, PUCC

Tableau 37: Composition floristique des segments déterminés par l'AFC, Transect V208. 2 : dominance, 1 : présence dans plus de la moitié des relevés du segment, * : présence dans moins de la moitié des relevés du segment, 0 : absence.

Segments déterminés par l'AFC	<i>Agrostis stolonifera</i> (AGRO)	<i>Aster tripolium</i> (ASTE)	<i>Elytrigia atherica</i> (ELYT)	<i>Festuca rubra</i> (FEST)	<i>Atriplex prostrata</i> (ATRI)	<i>Puccinellia maritima</i> (PUCC)	<i>Spergularia media</i> (SPER)	<i>Spergularia maritima</i> (SPMA)	<i>Plantago maritima</i> (PLAN)	<i>Taraxacum sp.</i> (TARA)	<i>Trifolium sp.</i> (TRIF)	<i>Cerastium sp.</i> (CERA)	<i>Polygonum maritima</i> (POLY)	<i>Plantago mayor</i> (PMAY)	<i>Lolium perenne</i> (LOLI)	Composition floristique simplifiée
A'	2	0	2	*	*	0	*	0	*	0	*	0	2	*	*	AGRO, ELYT, POLY >>> FEST, ATRI, SPER, PLAN, TRIF, PMAY, FEST, LOLI
B'	2	0	*	2	*	0	0	0	*	0	1	0	1	0	0	AGRO, FEST > TRIF, POLY >> ELYT, ATRI, PLAN
C'	2	0	2	0	*	2	*	*	0	*	1	0	*	0	0	AGRO, ELYT, PUCC > TRIF >> ATRI, SPER, SPMA, TARA, POLY
D'	2	0	2	0	*	2	*	0	0	*	1	0	0	0	0	AGRO, ELYT, PUCC > TRIF >> ATRI, SPER, TARA
E'	2	0	2	0	*	2	*	*	0	1	*	0	*	*	0	AGRO, ELYT, PUCC > TARA >> ATRI, SPER, SPMA, TRIF, POLY, PMAY
F'	2	*	1	0	*	*	*	0	*	*	1	0	0	0	0	AGRO > ELYT, TRIF >> ASTE, ATRI, PUCC, SPER, PLAN, TARA
G'	2	0	0	0	1	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	AGRO > ATRI >> SPER
H'	2	*	*	0	0	0	1	0	*	0	0	0	0	0	0	AGRO > SPER >> ASTE, ELYT, PLAN
I'	2	0	1	0	*	1	1	0	1	0	*	0	0	0	0	AGRO > ELY, PUCC, SPER, PLAN >> ATRI, TRIF
J'	2	0	2	*	0	0	1	0	2	0	*	0	0	0	0	AGRO, ELYT, PLAN > SPER >> FEST, TRIF
K'	2	0	1	0	0	2	1	0	1	0	*	0	0	0	0	AGRO, PUCC > ELYT, SPER >> TRIF
L'	2	0	*	2	0	0	1	0	*	0	0	0	0	0	0	AGRO, FEST > SPER >> ELYT, PLAN
M'	2	*	*	2	*	0	1	1	*	0	0	0	0	0	0	AGRO, FEST > SPER >> ASTE, ELYT, ATRI, PLAN
N'	2	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	AGRO, PUCC > SPER
O'	2	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	AGRO, PUCC > ATRI, SPER
P'	2	0	2	0	0	2	*	0	*	0	0	0	0	0	0	AGRO, ELYT, PUCC >>> SPER, PLAN
Q'	2	*	1	0	*	2	*	0	*	0	*	*	0	0	0	AGRO, PUCC > ELYT >> ASTE, ATRI, SPER, PLAN, TRIF, CERA
R'	*	*	*	0	*	2	*	0	0	0	0	0	0	0	0	PUCC >>> AGRO, ASTE, ELYT, ATRI, SPER

Sur les deux transects la couverture végétale la plus fréquente est composée d'*Agrostis stolonifera*, accompagnée d'*Elytrigia atherica*, *Festuca rubra*, ou *Puccinellia maritima*. On peut voir sur le profil altitudinal du transect VI08 (Figure 80) qu'*Elytrigia atherica* et *Festuca rubra* sont dominantes sur les terrains plus élevés et *Puccinellia maritima* sur les terrains plus

bas. Dans le transect V208, les relations avec l'altitude apparaissent moins clairement puisqu'il y a peu d'écart d'altitude.

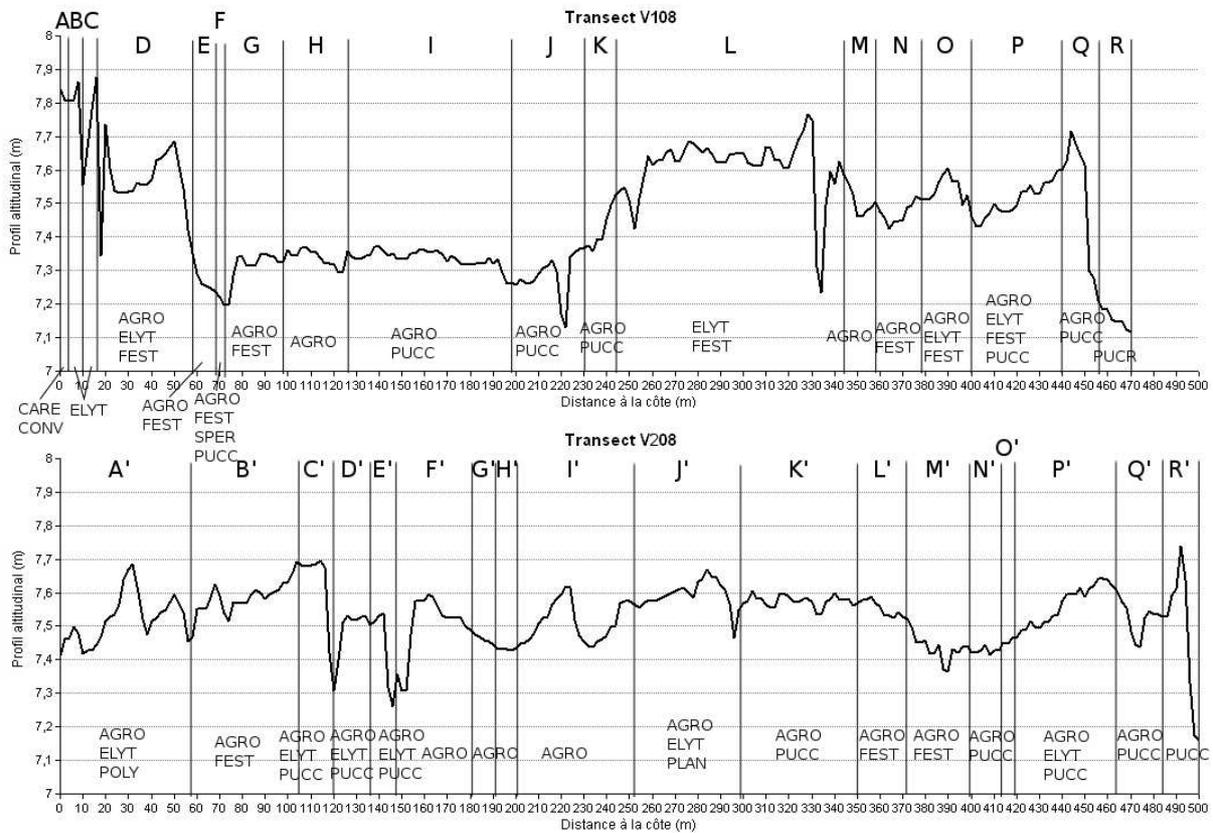


Figure 80: Profils altitudinaux des transects V108 et V208 et segments identifiés par l'AFC. Les espèces dominantes des segments sont indiquées.

Nous avons vu sur le terrain que le transect V108 sous pâturage ovin était très hétérogène en hauteur de végétation. On peut rapprocher cela du fait que les bovins broutent toutes les pousses sans distinction, alors que les moutons sont plus attirés par les jeunes pousses, et laissent les pousses les plus robustes, sauf en cas de surpâturage. Or, nous pouvons voir *Elytrigia atherica* semble atteindre son optimum écologique sur les terrains d'altitude les plus élevées. C'est donc là que les pousses de ces herbacées sont les plus robustes, et ne seront donc pas pâturées par les moutons, alors qu'elles le seront par les vaches. Sur les terrains plus bas, *Elytrigia atherica* s'éloigne de son optimum écologique et entre en compétition avec les espèces plus adaptées aux altitudes basses, telles que *Puccinellia maritima*. Les pousses plus tendres sont alors broutées par les moutons. On aura donc sur le secteur ovins des graminées hautes sur les terrains élevés et rases sur les terrains de faibles altitudes, tandis que la hauteur de la végétation sera homogène sur le secteur de pâturage bovin. Il existe donc ici une interaction entre les facteurs pâturage et le facteur altitude.

D'autre part le type de sédiment pourrait également jouer un rôle important. En effet lorsque l'on met en parallèle l'orthophotographie, la carte des sédiments, et les segments identifiés par AFC (Figure 81), on peut voir que les zones d'égale apparence en couleur et texture de l'orthophotographie correspondent à des types de sédiment différents, et que les discontinuités des transects coïncident avec les limites de ces zones. Ainsi sur le transect V108, les segments de A à G sont situés sur des Tangues de schorres récents, ceux allant de H à K puis de M à R sont sur les Sables à débris des chenaux, et enfin le segment L correspond au Sablons et tangues sablo-argileuses. On peut voir que la composition floristique des segments situés sur les Tangues de schorres récents et sur les Sablons et tangues sablo-argileuses est dominée par *Elytrigia atherica* et *Festuca rubra*, tandis que les Sables à débris des chenaux sont caractérisés par la présence d'*Agrostis stolonifera* et *Puccinellia maritima*. Il y a donc bien une influence importante du contexte sédimentaire sur l'organisation de la végétation.

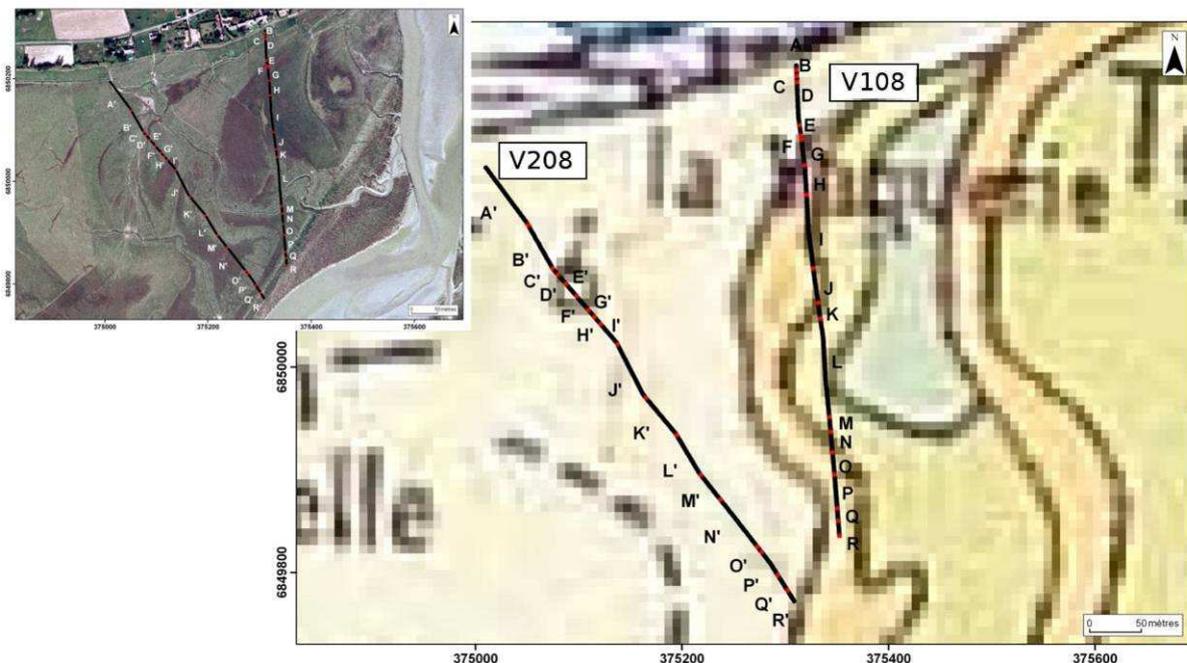


Figure 81 : Mise en parallèle de l'orthophotographie, de la carte des sédiments, et des segments identifiés par l'AFC.

4.1.3.4. Résultats de l'analyse fréquentielle

Afin de préciser ces résultats, les données de végétation de V108 et V208 ont été soumises à une analyse fréquentielle. Cinq groupements végétaux ont été identifiés dans V108 et trois dans V208.

Diagramme 7 : Associations végétales identifiées par analyse fréquentielle sur le transect V108 (seules les liaisons les plus fortes sont conservées).

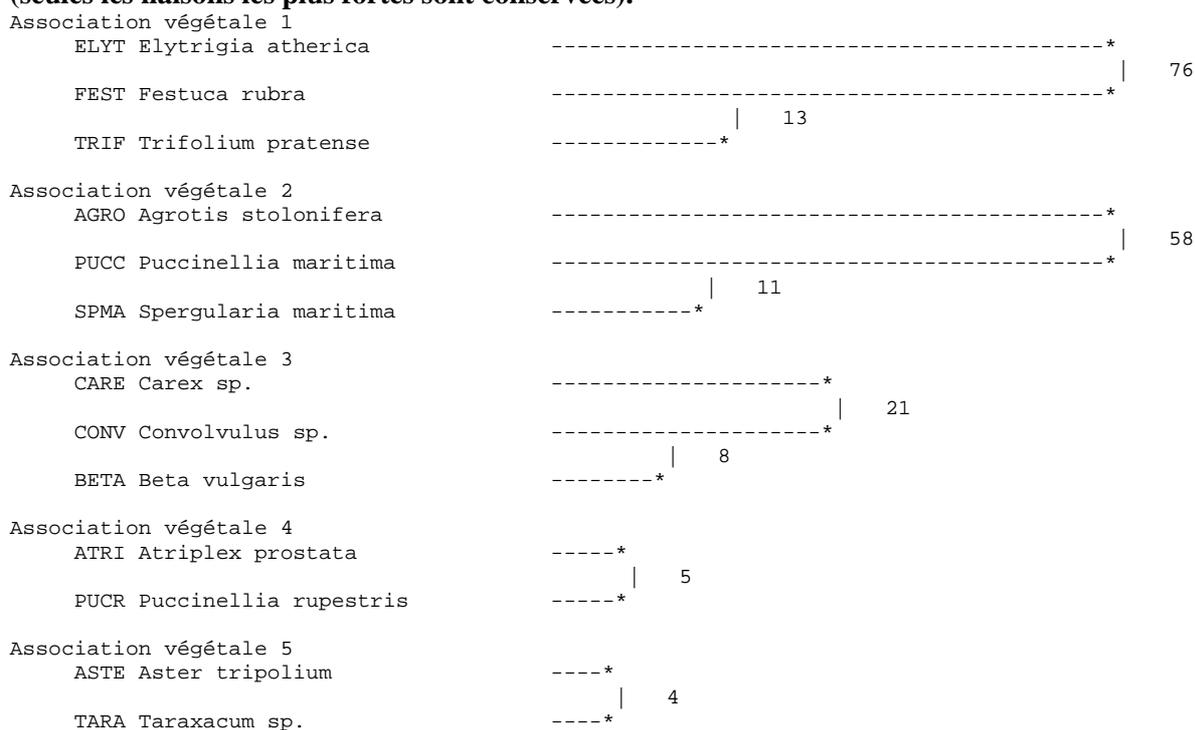
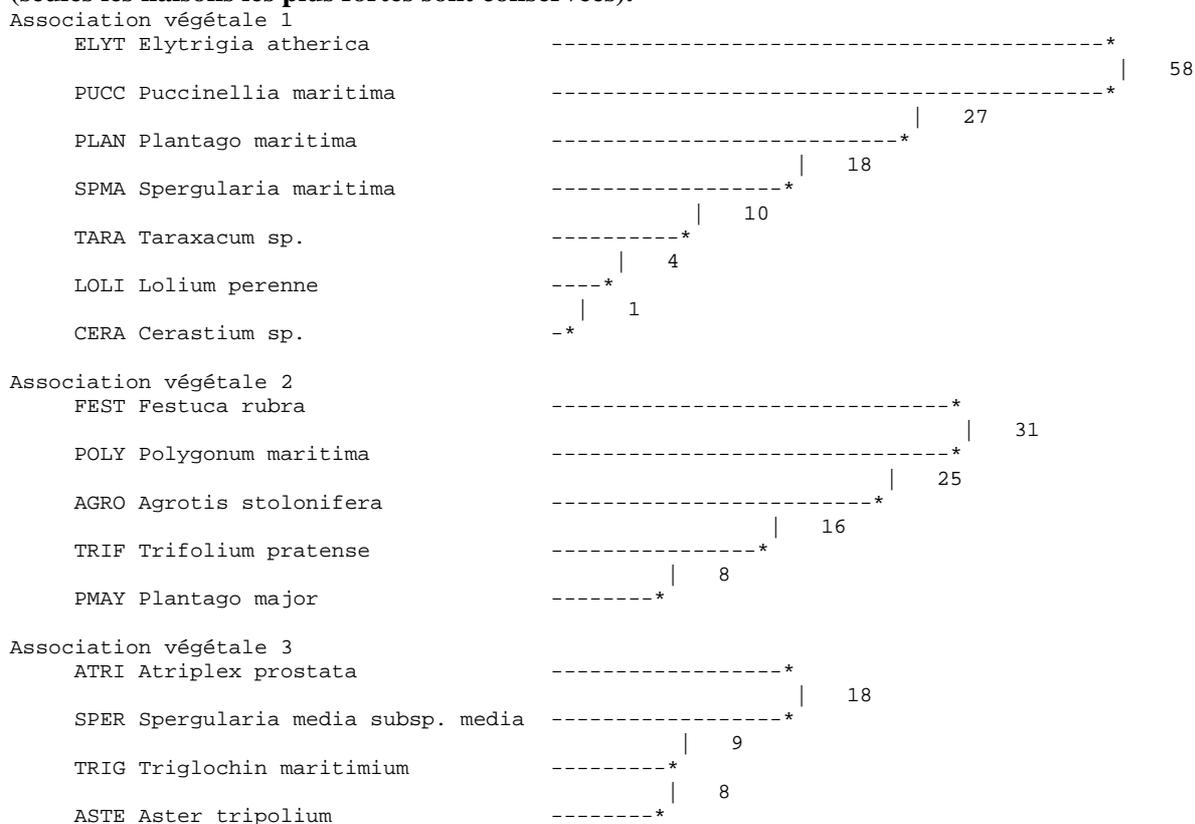


Diagramme 8 : Associations végétales identifiées par analyse fréquentielle sur le transect V208 (seules les liaisons les plus fortes sont conservées).



Dans le transect V108, on trouve associées dans le même groupe d'une part *Elytrigia atherica* et *Festuca rubra*, d'autre part *Agrostis stolonifera* et *Puccinellia maritima*. On a la

situation contraire pour le transect V208, où *Elytrigia atherica* est associé à *Puccinellia maritima*, et *Festuca rubra* à *Agrostis stolonifera*. Ce rapprochement entre une espèce de haut schorre, *Elytrigia atherica*, et une espèce de bas schorre, *Puccinellia maritima* montre la plasticité de ces espèces.

Les résultats de l'analyse fréquentielle du transect V108 pour le facteur Altitude (Tableau 38) permettent de classer les groupements végétaux selon l'altitude : Le groupement *Carex sp.*, et *Convolvulus sp* correspond à l'altitude 7,8 m, le groupement *Elytrigia atherica*, *Festuca rubra*, et *Trifolium pratense* à l'altitude 7,6 m, le groupement *Agrostis stolonifera*, *Puccinellia maritima*, et *Spergularia maritima* à l'altitude 7,4 m, et enfin l'espèce *Puccinellia rupestris* est lié positivement à l'altitude 7,2 m. Le groupement 5 composé de *Aster tripolium* et *Taraxacum sp.* ne semble pas dépendre de l'altitude puisqu'on ne le retrouve pas dans le tableau. Dans le transect V208 (Tableau 39), la moitié des espèces ne dépendent pas de l'altitude. On peut voir cependant que *Plantago maritima* est liée à l'altitude 7,6 m, tandis que *Festuca rubra* et *Spergularia media* sont associées à l'altitude 7,4 m. *Agrostis stolonifera* et *Elytrigia atherica* ne présentent de liaisons positives avec aucunes altitudes, mais présentent une liaison négative avec l'altitude 7,6, où pousse *Plantago maritima*. Il se pourrait que ce soit le signe d'une compétition entre ces espèces. *Puccinellia maritima* quand à elle présente une liaison positive avec les altitudes 7 m et 7,6 m.

Tableau 38 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Altitude pour le transect V108.

Altitude (m)	7.2	7.4	7.6	7.8
<i>Carex sp.</i>	.	.	.	+++
<i>Convolvulus sp.</i>	.	-	-	+++
<i>Elytrigia atherica</i>	---	---	+++	++
<i>Festuca rubra</i>	---	--	+++	-
<i>Trifolium pratense</i>	.	--	+++	.
<i>Spergularia maritima</i>	.	++	-	.
<i>Agrostis stolonifera</i>	-	+++	---	---
<i>Puccinellia maritima</i>	.	+++	---	---
<i>Puccinellia rupestris</i>	+++	-	-	.

Tableau 39 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Altitude pour le transect V208.

Altitude	7.0	7.2	7.4	7.6	7.8
<i>Agrostis stolonifera</i>	.	.	.	-	.
<i>Elytrigia atherica</i>	.	.	.	-	.
<i>Plantago maritima</i>	.	.	--	++	.
<i>Festuca rubra</i>	.	.	+	.	.
<i>Spergularia media</i>	.	.	+	-	.
<i>Puccinellia maritima</i>	+	.	--	+	.

Les résultats du facteur Pente (Tableaux 40 et 41) montrent que dans les deux transects *Elytrigia atherica* est associée aux pentes élevées (> 5%).

Tableau 40 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Pente pour le transect V108.

Pente (%)	0	0.1	0.3	0.5	0.7	1	1.3	1.6	1.9	2.1	2.4	2.7	3	3.5	4	7	10	15	20
<i>Carex sp.</i>	++
<i>Convolvulus sp.</i>	+
<i>Elytrigia atherica</i>	.	--	-	---	---	+	.	.	+	.	+	.	.	++	.	++	.	.	++
<i>Festuca rubra</i>	.	.	.	-	.	+	.	.	+	.	++	-
<i>Puccinellia maritima</i>	.	++	.	++	++	-	.	--
<i>Agrostis stolonifera</i>	.	.	++	+	++	-	-	---
<i>Spergularia maritima</i>	+
<i>Trifolium pratense</i>	-	+

Tableau 41 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Pente pour le transect V208.

Pente	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	10.0
<i>Plantago maritima</i>	+	-	.
<i>Polygonum maritima</i>	-	.	+	+	.	.	.
<i>Elytrigia atherica</i>	.	.	-	.	.	.	+	.	.	.	-	-	.	.	+++	.
<i>Festuca rubra</i>	+	--	.	.	.	+	--	.
<i>Spergularia media subsp. media</i>	+
<i>Agrostis stolonifera</i>	-	.	.	.	-	.	.	--	.	.	.
<i>Lolium perenne</i>	+
<i>Spergularia maritima</i>	-	.	.	.	+
<i>Taraxacum sp.</i>	+	.	-
<i>Trifolium pratense</i>	+	++	--	.	.	+	.	.
<i>Atriplex prostrata</i>	+	.	.	+
<i>Puccinellia maritima</i>	.	++	-	.	.	+++	+

Ceci peut être relié au fait que les résultats du facteur Géomorphologie (Tableaux 42 et 43) montrent qu'*Elytrigia atherica* est liée à la présence de chenaux (6), de dépressions (7), et de buttes (10). *Agrostis stolonifera* et *Puccinellia maritima* sont associées aux terrains plats (2) et aux dépressions (7). *Festuca rubra* est associée dans le transect V108 aux levées de chenaux et aux surélévations, et dans le transect V208 aux terrains plats et aux dépressions. Cette inversion de type de géomorphologie préférentielle reste à expliquer.

Tableau 42 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Géomorphologie pour le transect V108.

Géomorphologie	2	3a	3b	6a	6b	6c	7a	7b	8a	8c	8d	10d
<i>Carex sp.</i>	+
<i>Elytrigia atherica</i>	---	---	.	++	.	+++	---	--	--	-	.	+
<i>Festuca rubra</i>	+	---	++	.	.	+	-	--	-	.	.	+++
<i>Trifolium pratense</i>	.	.	+++
<i>Agrostis stolonifera</i>	+++	---	+	-	-	---	++	++
<i>Puccinellia maritima</i>	+++	-	---	.	-	---	+	+	++	+	.	---
<i>Puccinellia rupestris</i>	--	+++
<i>Atriplex prostrata</i>	.	+
<i>Spergularia maritima</i>	+	--	+	++

Tableau 43 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Géomorphologie pour le transect V208.

Géomorphologie	2	3b	5a	6b	6c	7a	7b	7c	8a	8c	8d	10d
<i>Plantago maritima</i>	++	-	-
<i>Polygonum maritima</i>	+	.	---	.	.	.	+++
<i>Festuca rubra</i>	+	--	+
<i>Spergularia media subsp. media</i>	.	.	.	+++	.	.	+
<i>Agrostis stolonifera</i>	---	.	+++	.	.	.	---
<i>Lolium perenne</i>	++
<i>Spergularia maritima</i>	--	++	.	.	.	-
<i>Aster tripolium</i>	.	.	+
<i>Atriplex prostrata</i>	.	.	.	++	.	.	+++	--
<i>Cerastium sp.</i>	+	.	.	.
<i>Elytrigia atherica</i>	---	.	.	+	.	.	++
<i>Plantago major</i>	++
<i>Puccinellia maritima</i>	-	.	.	++	+	---	+++	---
<i>Taraxacum sp.</i>	-	.	.	+++	++
<i>Trifolium pratense</i>	+++	.	.	---
<i>Triglochin maritimum</i>	++

Enfin, le transect V108 traverse trois types de sédiment (Tableau 44): Sables à débris des chenaux (S-Sm), Tangue de schorres récents (FMz), et Sablons et tangues sablo-argileuses (Tg). *Carex sp.*, *Convolvulus sp.*, et *Aster tripolium* sont associées à la présence de Tangue de schorres récents. *Elytrigia atherica*, *Festuca rubra*, et *Trifolium pratense* sont liées à la fois aux Sablons et tangues sablo-argileuses et aux Tangue de schorres récents. Enfin, *Agrostis stolonifera* et *Puccinellia maritima* sont associées aux Sables à débris des chenaux. Ceci confirme les observations faites plus haut à partir de la carte des sédiments et des segments identifiés par AFC..

Le transect V208 ne traversant qu'un type de sédiment (Tangue de schorres récents), il n'était pas possible de faire une analyse fréquentielle sur ce facteur.

Tableau 44 : Résultat de l'analyse fréquentielle entre les espèces végétales et le facteur Sédiment pour le transect V108.

Sédiment	Tg	FMz	S-Sm
<i>Carex sp.</i>	.	+++	-
<i>Convolvulus sp.</i>	.	+++	--
<i>Elytrigia atherica</i>	+++	+++	---
<i>Festuca rubra</i>	+	+++	---
<i>Trifolium pratense</i>	--	+++	---
<i>Agrostis stolonifera</i>	---	.	+++
<i>Puccinellia maritima</i>	---	---	+++
<i>Aster tripolium</i>	.	+	.

Les interactions entre les facteurs Altitude, Géomorphologie, et Sédiment été analysées pour le transect V108 :

Tableau 45 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Sédiment (à la verticale) sur le transect V108.

	7.0	7.5	8.0	8.5
Tg	0	-43	45	0
FMz	0	0	0	13
S-Sm	3	44	-33	-10

Tableau 25 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect V108.

	7.0	7.5	8.0	8.5
2	0	13	-10	0
3a	8	4	-8	0
3b	0	2	0	0
6a	0	0	4	0
6b	0	3	0	0
6c	0	-56	40	5
7a	0	25	-21	0
7b	4	2	0	0
8a	0	0	3	0
8c	0	1	0	0
8d	0	1	0	0
10d	0	-8	9	0

Tableau 25 : Relation entre le facteur Sédiment (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect V108.

	Tg	FMz	S-Sm
2	-34	0	31
3a	0	0	7
3b	0	15	-7
6a	4	1	-5
6b	3	3	-6
6c	96	-5	-74
7a	-10	7	3
7b	0	0	4
8a	0	0	3
8c	0	0	2
8d	0	0	1
10d	-4	0	8

Pour V208, le facteur sédiment ne présente qu'un état (FMz : Tange de schorres récents), nous ne présentons donc que les liaisons entre l'altitude et la Géomorphologie.

Tableau 25 : Relation entre le facteur Altitude (à l'horizontale) et le facteur Géomorphologie (à la verticale) sur le transect V208.

	7.0	7.5	8.0
2	0	-56	57
3b	6	4	-8
5a	0	0	0
6b	0	8	-8
6c	0	0	2
7a	0	3	0
7b	0	11	-11
7c	0	23	-22
8a	0	0	1
8c	0	3	0
8d	0	5	-5
10d	0	0	3

Il est possible de résumer les liaisons entre les trois facteurs (Tableau 45). Cependant les relations entre les facteurs ne sont pas identiques dans les deux transects, et il est difficile de distinguer des tendances.

Tableau 45: Résumé des relations entre les facteurs Altitudes, Géomorphologie, et Sédiment (S-Sm : Sables à débris des chenaux ; Tg : Sablons et tangues sablo-argileuses ; FMz : Tangue de schorres récents) pour les transects V108 et V208.

Géomorphologie	Altitude (m)		
	7.0	7.5	8.0
2: Terrain plat		S-Sm	FMz
3a: Pente faible	S-Sm	S-Sm	
3b: Pente forte	FMz	FMz	
6a: Bord du chenal			FMz/Tg
6b: Fond du chenal		FMz	
6c: Levée de chenal			Tg
7a: Dépression peu étendue		S-Sm/ FMz	
7b: Dépression profonde	S-Sm	S-Sm/ FMz	
8a: Levée de talus			FMz
8c: Pente du talus		S-Sm/ FMz	
8d: Pied de talus		S-Sm/ FMz	
10d: Surélévation			FMz

L'analyse fréquentielle nous permet ainsi de dégager un schéma de l'organisation végétale du marais salé de Vains (Tableau 46).

Tableau 46: Résumé des résultats obtenus par analyse fréquentielle sur CD07.

Altitude	Géomorphologie	Sédiment	Flore
8 m	Terrain plat, Bords de chenaux et de talus, surélévation	Tangue de schorres récents	<i>Polygonum maritima</i> <i>Plantago maritima</i> <i>Trifolium pratense</i> <i>Elytrigia atherica</i> <i>Festuca rubra</i>
	Bords et levées de chenaux	Sablons et tangues sablo-argileuses	<i>Elytrigia atherica</i> <i>Festuca rubra</i>
7,5 m	Pente forte, fond de chenaux, dépressions, pente ou pied de talus	Tangue de schorres récents	<i>Elytrigia atherica</i> <i>Festuca rubra</i> <i>Agrostis stolonifera</i> <i>Puccinellia maritima</i> <i>Spergularia media</i> <i>Lolium perenne</i>
	Terrain plat et pente faible, dépressions, pente ou pied de talus	Sables à débris des chenaux	<i>Agrostis stolonifera</i> <i>Puccinellia maritima</i> <i>Spergularia maritima</i>
7 m	Pente forte	Tangue de schorres récents	<i>Puccinellia maritima</i>
	Pente faible et dépressions profondes	Sables à débris des chenaux	<i>Puccinellia rupestris</i> <i>Atriplex prostrata</i>

4.1.3.5. Synthèse des transects de Vains

Du fait du pâturage, de la proximité de la Sée, et de l'altitude élevée du marais, le secteur de Vains présente une situation originale par rapport aux autres secteurs de la Baie du Mont-Saint-Michel. Les espèces rencontrées sont soit des espèces favorisées par le pâturage (*Agrostis stolonifera*, *Puccinellia maritima*), soit des espèces continentales (*Beta vulgaris*, *Convolvulus sp.*), voire des espèces de prairies transportées par le déplacement des troupeaux (*Cerastium sp.*, *Plantago mayor*, et *Lolium perenne*). On a noté l'absence d'espèce sensible au pâturage comme *Halimione portulacoides*. Nous avons pu voir certaines différences entre les transects selon le type de pâturage, notamment parce que les moutons semblent plus sélectifs que les vaches. Enfin, l'influence du contexte sédimentaire est particulièrement visible au niveau du transect V108, et on a montré que *Agrostis stolonifera* et *Puccinellia maritima* sont associées à des Sables à débris des chenaux, tandis que *Festuca rubra* et *Elytrigia atherica* sont associées aux Tangue de schorres récents et Sablons et aux tangues sablo-argileuses. Les premières sont donc liées à la présence de sédiments de granulométrie plus importante que les secondes.

4.1.4. Comparaison des trois situations : Vivier, Chemin Dolais, et Vains

Ces méthodes nous ont permis de voir que les trois secteurs étudiés présentent des situations assez différentes (Figure 82).

Le secteur où la zonation de la végétation apparaît le plus clairement est le marais à l'Ouest du Vivier. On observe après la digue, vers 7,5 m d'altitude, un haut schorre peu étendu de pente nulle ou faible caractérisé par la présence d'*Elytrigia atherica* et parfois *Festuca rubra*. En se dirigeant vers la mer, on passe rapidement à un moyen schorre à sol plus irrégulier, à *Atriplex prostrata* et *Halimione portulacoides*, situé vers 7 m d'altitude. Un peu plus bas, le bas schorre est parcouru de chenaux et de buttes allongées. Situé entre 6,5 m et 5,5 m, il est couvert d'*Aster tripolium*, *Suaeda maritima*, et *Puccinellia maritima*. Enfin, la haute slikke, constituée de pente plus forte et située entre 5,5 m et 4 m d'altitude, est couverte par *Spartina sp.* et *Salicornia sp.*.

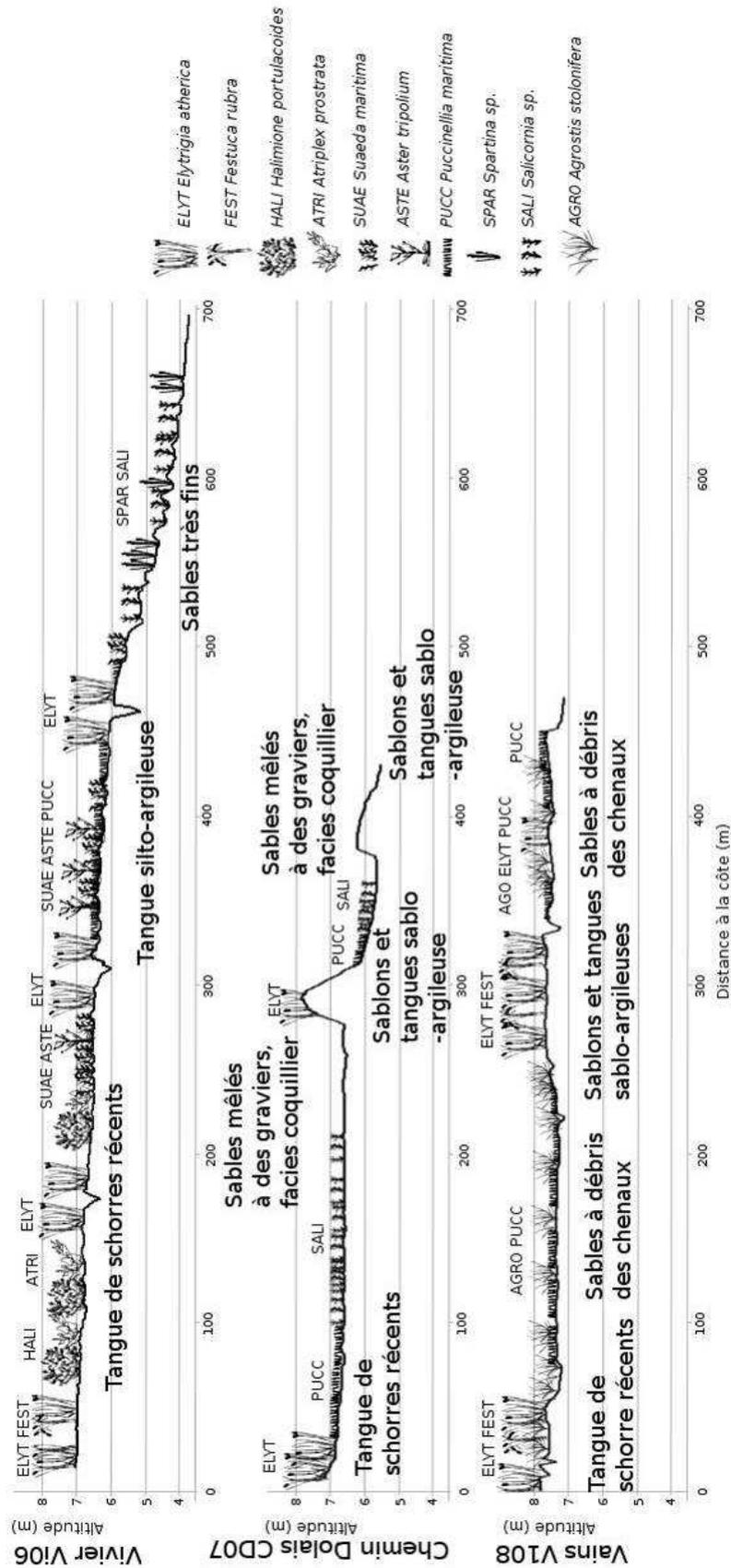


Figure 82 : Schéma récapitulatif de l'organisation de la végétation par rapport aux facteurs altitude et Sédiment sur trois des transects étudiés.

Dans ce marais, le facteur déterminant l'organisation de la végétation est bien l'altitude. Le contexte sédimentaire semble également jouer un rôle, puisque toutes les espèces ont montré une relation significative à l'un des trois types de sédiments rencontrés dans ce secteur. Par ailleurs, le moyen et le bas schorre sont parcourus de chenaux étroits et peu profonds, dont le fond inondé permet la remontée vers le haut schorre d'espèces halophiles telles que *Salicornia maritima* et *Suaeda maritima*. Au contraire, les bords de ces chenaux, légèrement surélevés, sont recouverts d'*Elytrigia atherica* qui descend ainsi vers le bas schorre. La géomorphologie est donc un facteur influençant l'organisation de la végétation sur ce secteur.

Sur le secteur de Chemin Dolais, la zonation est perturbée par la présence de deux cordons coquilliers. Ceux-ci retiennent l'eau à marée descendante sur le schorre, créant ainsi deux vasières constamment inondées, à des altitudes élevées où le schorre est habituellement peu fréquemment immergé. On trouve *Elytrigia atherica* entre 8,5 m et 7,5 m, puis vers 7 m une dominance de *Puccinellia maritima*, et enfin une vasière couverte en majorité de *Salicornia maritima*. Après le premier cordon coquillier cette zonation se répète, avec *Elytrigia atherica* sur les versants du cordon, puis *Puccinellia maritima* au pied du cordon, et enfin *Salicornia maritima* dans la deuxième vasière entre les deux cordons. On ne peut donc pas parler ici de haut, moyen, et bas schorre à proprement parlé. *Salicornia maritima* qui se rencontrait en moyenne vers 4,5 m d'altitude sur le marais du Vivier-sur-Mer se trouve ici vers 6,5 m. La géomorphologie a donc ici un rôle prédominant, et a pour conséquence l'augmentation de l'altitude moyenne où se rencontre chaque espèce. La présence d'une plante n'est donc pas un critère suffisant pour indiquer l'altitude du terrain.

Enfin, le secteur de Vains semble très marqué par le pâturage. On n'y rencontre pas certaines espèces caractéristiques des marais salés telles que *Halimione portulacoides* ou *Suaeda maritima*. On peut y voir par contre une dominance de graminées telles que *Agrostis stolonifera*, *Puccinellia maritima*, *Elytrigia atherica*, et *Festuca rubra*. Des espèces continentales y ont également été rencontrées, ainsi que des espèces de prairies. Ce secteur est un terrain quasiment plat, situé entre 7 m et 8 m d'altitude, et la relation entre l'altitude et les espèces végétales n'apparaît pas clairement. On a pu voir cependant dans le transect V108 une tendance de *Agrostis stolonifera* et *Puccinellia maritima* à se développer sur les terrains plats de basses altitudes (7 m), composés de sables, tandis que *Elytrigia atherica*, et *Festuca rubra* seraient liés aux terrains pentus et de plus hautes altitudes (8 m), comme les bords de chenaux, composés de Tangue.

La comparaison de ces trois secteurs montre que la végétation de la Baie du Mont-Saint-Michel est loin d'être homogène. L'altitude est bien un facteur déterminant l'organisation spatiale de la végétation. Cependant la succession haut, moyen, bas schorre et haute slikke n'apparaît pas toujours, pour peu que l'influence de facteur autre que l'altitude, tels que le pâturage ou la géomorphologie, soit importante. L'altitude ne saurait donc suffire pour réaliser une carte de la végétation potentielle de la Baie. Il faudrait pour cela utiliser des cartes des autres facteurs influençant la végétation, comme une carte de la géomorphologie, ou plus simplement de la pente, une carte du pâturage et une carte des sédiments.

D'un point de vue méthodologique, les méthodes utilisées pour analyser ces données de végétation apportent chacune une vision différente de la situation et se révèlent tout à fait complémentaires (Tableau 47).

Tableau 47 : Résumé des apports des différentes méthodes utilisées pour analyser les données de végétation et les données écologiques sur les trois secteurs.

Méthode	Apport
Analyse descriptive (1) Profils altitudinaux et répartition des points	Permet d'analyser la répartition de la végétation sur le transect : l'espèce se concentre-elle en début, en fin de transect? La répartition est-elle homogène ? Peut-on mettre en évidence un lien avec la géomorphologie, identifiable ici sur le profil altitudinal ?
(2) Graphique des altitudes moyennes et écart-types	Permet de mettre en évidence une zonation dans la végétation. Les écarts-type donnent une indication sur la valence des espèces par rapport à l'altitude.
(3) Courbe de densité	Précise la valence des espèces pour l'altitude, en offrant plus de détail que les écarts-type: parfois deux pics sont visibles, et on peut alors penser qu'un autre facteur que l'altitude entre en jeu dans la répartition de l'espèce considérée. La comparaison des répartitions des différentes espèces permet également de savoir si l'on a à faire à une communauté ouverte ou fermée.
(4) Test de comparaison de moyenne	Rapproche les espèces selon leur répartition selon l'altitude. A ce stade, on ne peut pas encore parler d'association végétale, mais cette méthode offre une première vue synthétique. Une comparaison entre transects est également possible afin de savoir si une espèce présente la même répartition selon l'altitude dans les différents secteurs étudiés.
Analyse Factorielle des Correspondances	Permet d'identifier des portions de transect homogène et de déterminer leur composition floristique, afin de mieux comprendre l'organisation de la végétation le long des transects. Cette méthode permet ainsi une visualisation plus simple des données des transects, résumant l'information de tous les points et toutes les espèces à une série de segments pour lesquels on connaît les espèces principales. Une mise en parallèle des segments et des profils altitudinaux permet d'analyser le rôle de la géomorphologie dans la succession des espèces le long du transect.
Analyse fréquentielle	Permet de dégager les associations caractéristiques des transects grâce aux liaisons fortes, mais également d'identifier les transitions entre les associations, ou des nuances dans la composition des associations, grâce aux liaisons faibles : cette méthode réconcilie en quelque sorte les méthodes sigmatistes et continuistes. Enfin, si les méthodes utilisées précédemment ont y en évidence de façon qualitative des liens entre les facteurs écologiques et les espèces végétales, l'analyse fréquentielle les montre ici de façon statistique.

4.2. Organisation de la végétation à l'échelle de la Baie du Mont-Saint-Michel

4.2.1. Observation de l'organisation de la végétation des marais salés

Nous nous sommes servis de la carte de végétation de 2002 (ref) pour analyser qualitativement l'organisation de la végétation à l'échelle de la Baie du Mont-Saint-Michel.

Cette carte comporte à l'origine 28 types de végétation, pouvant chacun être présent seul ou en combinaison avec les autres types. Nous avons simplifié la carte en ne prenant en compte que les huit espèces caractéristiques d'un type de végétation (les codes de la carte d'origine sont entre parenthèses): *Salicornia sp.* (1a), *Suaeda maritima* (1b), *Spartina sp.* (2), *Puccinellia maritima* (3), *Halimione portulacoides* (4), *Festuca rubra* (5), *Elytrigia atherica* (6), et *Agrostis stolonifera* (7). Nous avons considéré deux niveaux de présence. Lorsqu'un polygone est caractérisé par un seul type de végétation, l'espèce correspondant à ce type de végétation y est dite dominante. C'est également le cas quand le type de végétation est présent en combinaison avec d'autres types, et qu'il est indiqué en premier dans la légende (cela signifie qu'il couvre au moins 50% de la surface étudiée). Lorsque le type de végétation est indiqué en deuxième ou en troisième dans la légende d'un polygone, l'espèce correspondante est dite présente. Par exemple, l'espèce *Halimione portulacoides* (4a et 4b) est dominante dans un polygone dont la légende est 4a / 6b, mais seulement présente pour un polygone dont la légende est 3c / 4a. On obtient ainsi une carte de présence et dominance pour les huit espèces considérées (Figures 83 à 90). Dans une première approche, on peut analyser visuellement ces cartes et observer la position sur le marais de l'espèce considérée : est-elle présente vers la côte, vers la limite du marais ? On peut également voir si une espèce présente une répartition homogène sur la Baie, où si elle se concentre dans un secteur. Il est alors intéressant de comparer visuellement sa répartition aux cartes des facteurs écologiques pouvant influencer la présence de la végétation, notamment la carte du pâturage.

On peut ainsi observer le fait que *Salicornia sp.* (Figure 83), *Suaeda maritima* (Figure 84), et *Spartina sp.* (Figure 85) se rencontrent en limite de marais, sur les zones de faible altitude, mais que *Salicornia sp.* et *Suaeda maritima* peuvent également être présentes à l'intérieur du marais. *Salicornia sp.* et *Suaeda maritima* sont réparties sur l'ensemble de la Baie, tandis que *Spartina sp.* n'est présente qu'à l'Ouest du Mont-Saint-Michel. En ce qui concerne le pâturage, *Suaeda maritima* et *Spartina sp.* ne se rencontrent pas sur les zones pâturées. Pour *Spartina sp.*, ceci pourrait être dû au fait que l'espèce pousse seulement en limites de marais, sur des terrains que les troupeaux n'atteignent pas. Pour *Suaeda maritima* cela pourrait être le signe d'une certaine sensibilité au pâturage. *Salicornia sp.* peut au

contraire se rencontrer sur des terrains pâturés, comme c'est le cas à l'Est dans la zone des estuaires. Elle serait donc moins sensible au pâturage que *Suaeda maritima*.

Festuca rubra, *Elytrigia atherica*, et *Agrostis stolonifera* se rencontrent principalement le long de la côte, donc aux altitudes les plus élevées. Cependant, leur répartition n'est pas limitée au haut schorre et on peut voir qu'elles couvrent une large partie des marais salés. *Elytrigia atherica* notamment est observée presque jusqu'aux limites des marais, en particulier dans les grands herbous entourant le Mont-Saint-Michel. Les répartitions de *Festuca rubra* et *Elytrigia atherica* sont assez homogènes sur l'ensemble de la Baie, alors que *Agrostis stolonifera* ne se retrouve qu'à l'Est, dans le secteur des estuaires : on peut se demander si cela est dû à la granulométrie plus élevée dans ce secteur, à la présence de l'eau douce, ou au pâturage. En effet, les secteurs couverts d'*Agrostis stolonifera* sont pâturés pour leur grande majorité. Ceci est également vrai pour *Festuca rubra*. Ces deux espèces sont donc favorisées par le pâturage, qui semble nécessaire à leur présence. *Elytrigia atherica* est présente à la fois sur des terrains pâturés et non pâturés, et les relations entre cette espèce et le facteur Pâturage restent encore à préciser.

Enfin, les espèces *Puccinellia maritima* (Figure 89) et *Halimione portulacoides* (Figure 90) se rencontrent sur des secteurs intermédiaires entre la côte et la limite des marais, à des altitudes moyennes. *Puccinellia maritima* présente une répartition homogène sur toute la Baie, et est majoritairement présente sur des secteurs pâturés, mais pas uniquement. Cette espèce est favorisée par le pâturage, mais celui-ci ne semble pas indispensable à son développement. Au contraire, *Halimione portulacoides* n'est rencontrée que sur des secteurs non pâturés. Elle est notamment absente du secteur des estuaires à l'Est, où le pâturage est le plus intensif. Ceci serait un signe d'une grande sensibilité au pâturage.

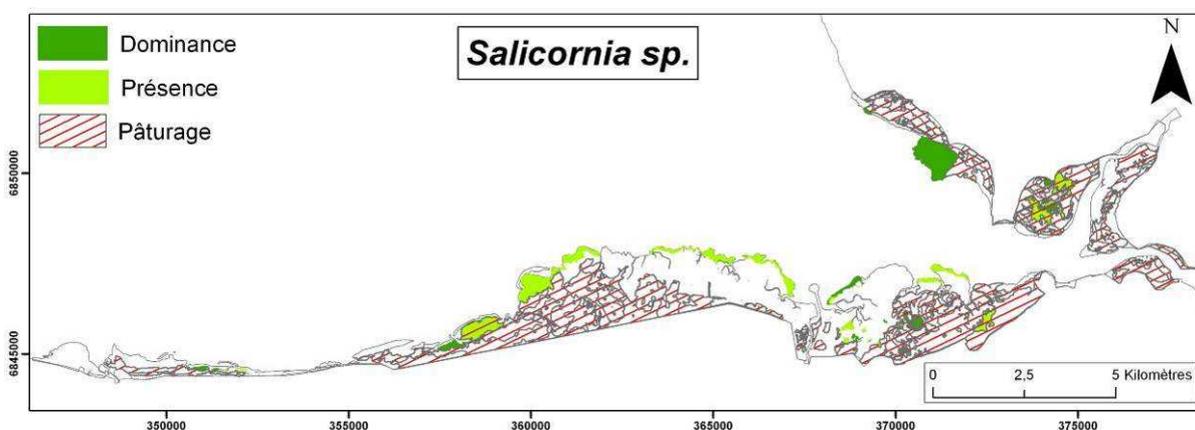


Figure 83 : Répartition de *Salicornia sp.* (1a) en Baie du Mont-Saint-Michel, obtenue à partir de la carte de végétation de 2002 (ref). Les zones pâturées sont indiquées en rouge hachuré.

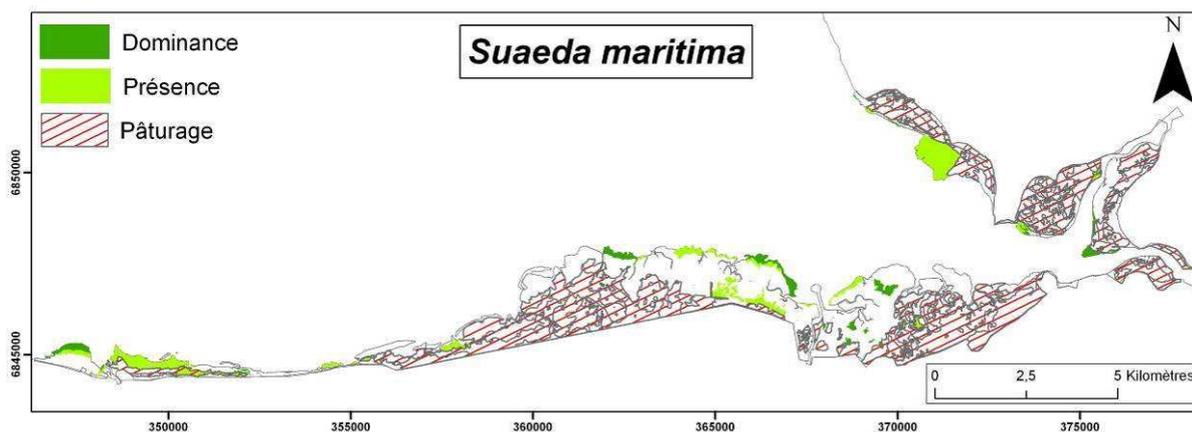


Figure 84 : Répartition de *Suaeda maritima* (1b) en Baie du Mont-Saint-Michel, obtenue à partir de la carte de végétation de 2002 (ref). Les zones pâturées sont indiquées en rouge hachuré.

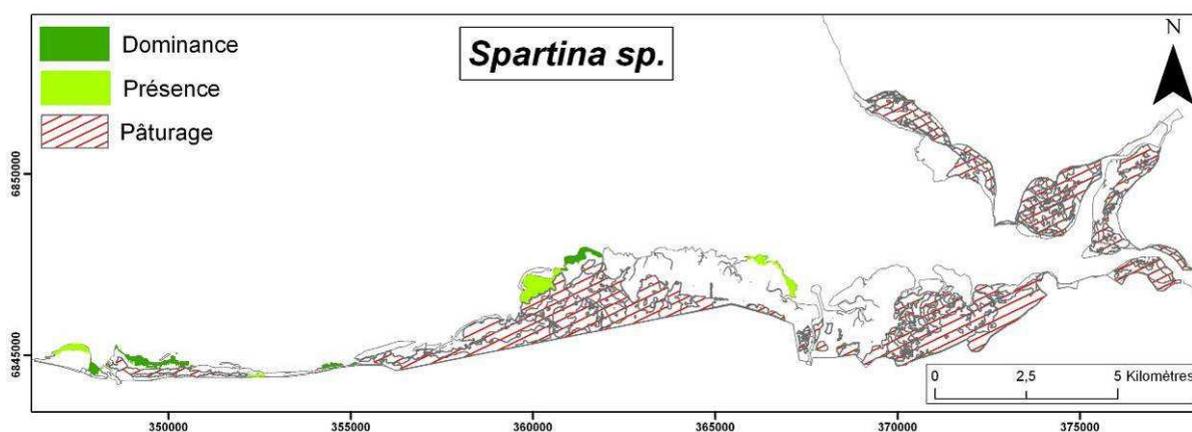


Figure 85 : Répartition de *Spartina sp.* (2) en Baie du Mont-Saint-Michel, obtenue à partir de la carte de végétation de 2002 (ref). Les zones pâturées sont indiquées en rouge hachuré.

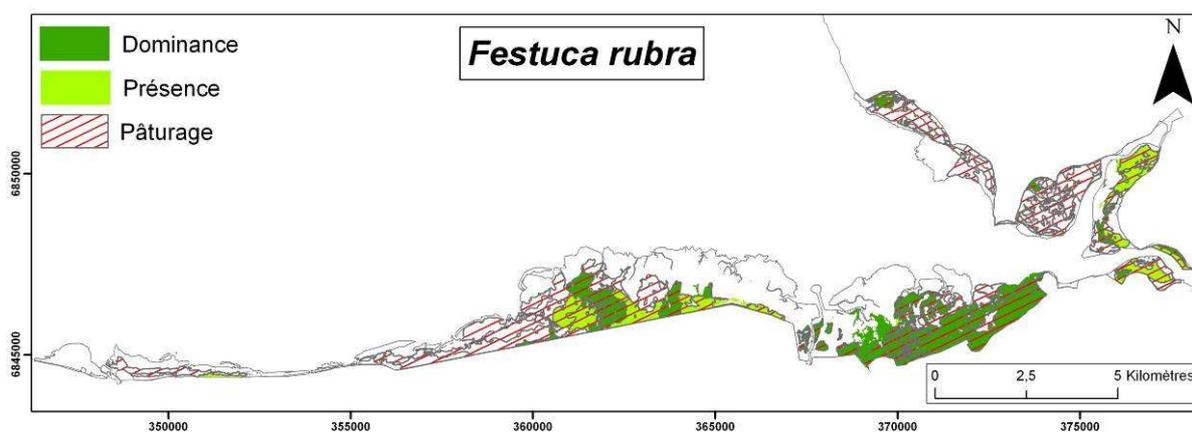


Figure 86 : Répartition de *Festuca rubra* (5) en Baie du Mont-Saint-Michel, obtenue à partir de la carte de végétation de 2002 (ref). Les zones pâturées sont indiquées en rouge hachuré.

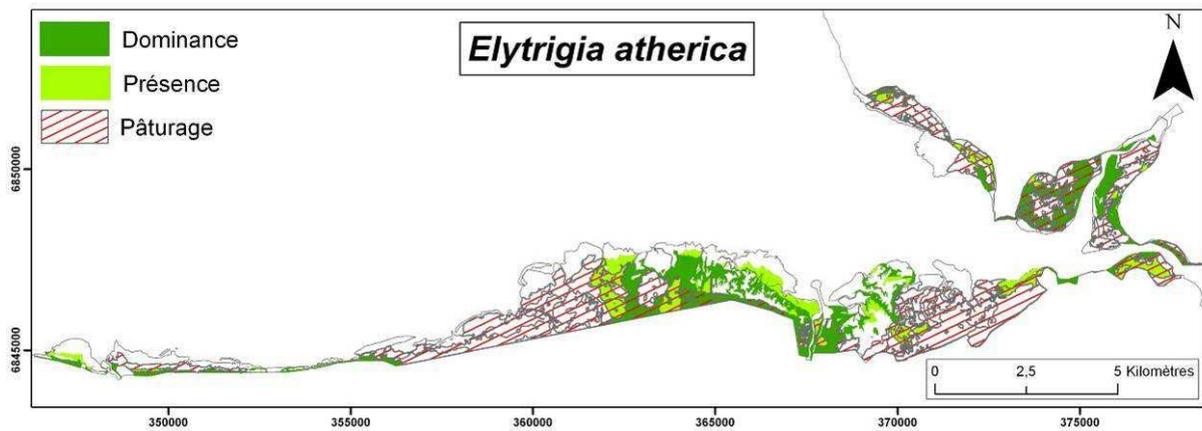


Figure 87 : Répartition d'*Elytrigia atherica* (6) en Baie du Mont-Saint-Michel, obtenue à partir de la carte de végétation de 2002 (ref). Les zones pâturées sont indiquées en rouge hachuré.

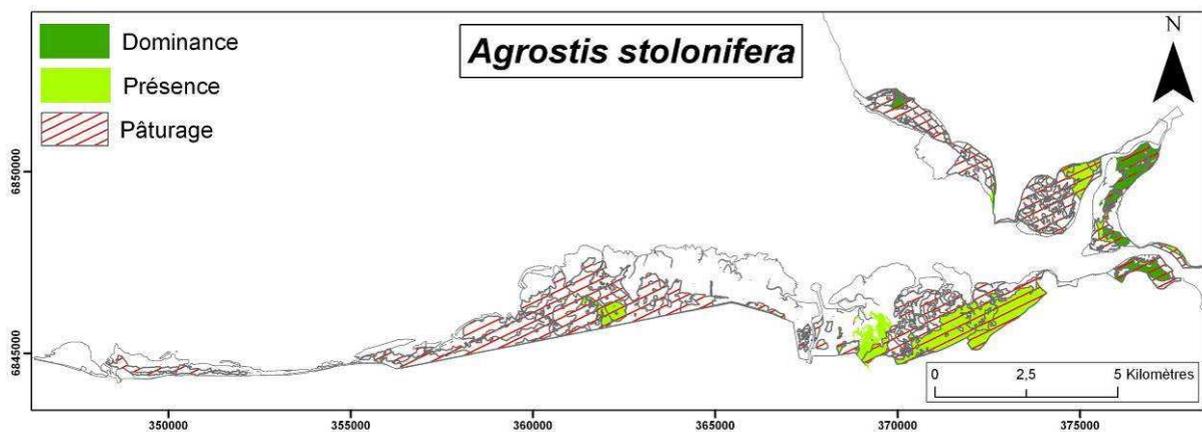


Figure 88 : Répartition d'*Agrostis stolonifera* (7) en Baie du Mont-Saint-Michel, obtenue à partir de la carte de végétation de 2002 (ref). Les zones pâturées sont indiquées en rouge hachuré.

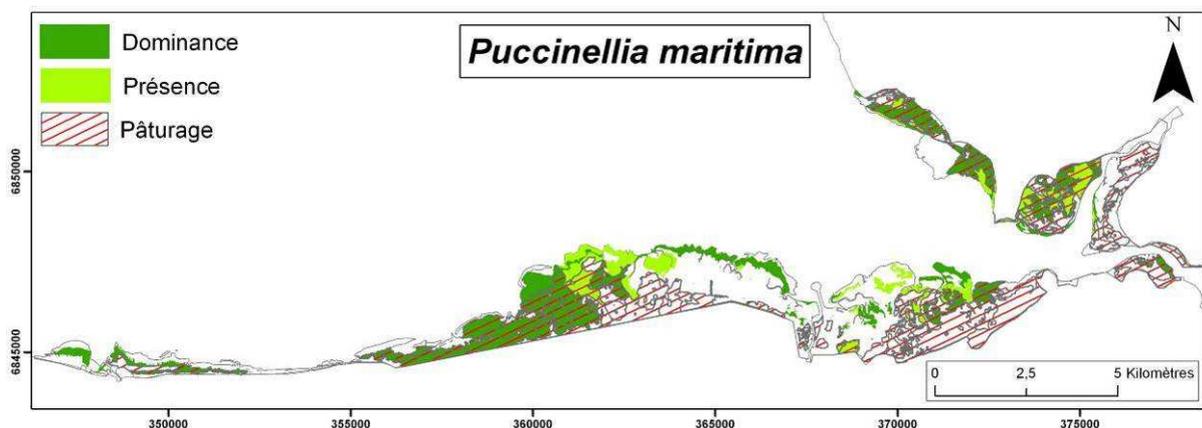


Figure 89 : Répartition de *Puccinellia maritima* (3) en Baie du Mont-Saint-Michel, obtenue à partir de la carte de végétation de 2002 (ref). Les zones pâturées sont indiquées en rouge hachuré.

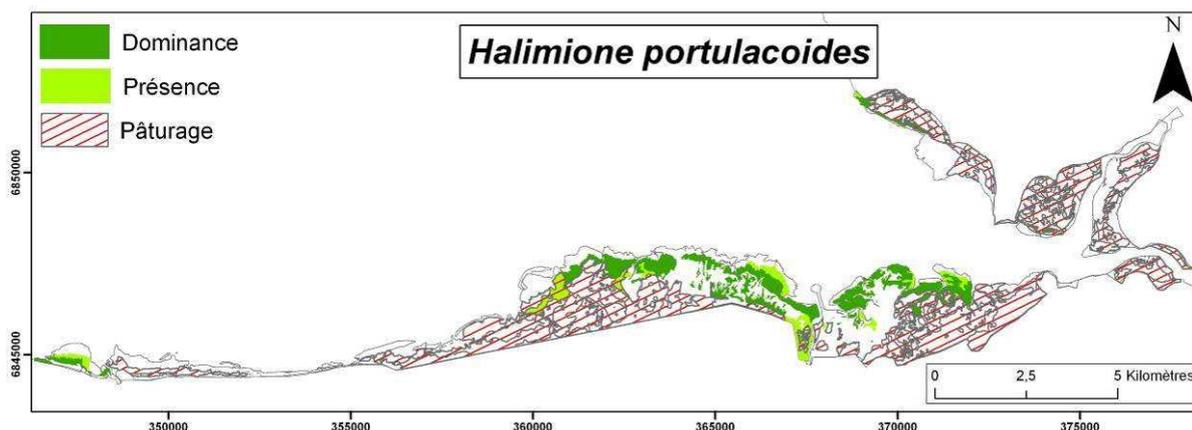


Figure 90 : Répartition de *Halimione portulacoides* (4) en Baie du Mont-Saint-Michel, obtenue à partir de la carte de végétation de 2002 (ref). Les zones pâturées sont indiquées en rouge hachuré.

L'ensemble de ces conclusions peut être résumé sous forme d'un tableau (Tableau 48).

Tableau 48 : Répartition simplifiée des espèces végétales sur la Baie du Mont-Saint-Michel selon l'altitude et le pâturage.

Altitude	Secteur non pâturé	Secteur pâturé
Altitude basse	<i>Spartina sp.</i> <i>Suaeda maritima</i> <i>Salicornia sp.</i>	<i>Salicornia sp.</i>
Altitude intermédiaire	<i>Halimione portulacoides</i> <i>Puccinellia maritima</i>	<i>Puccinellia maritima</i>
Altitude élevée	<i>Elytrigia atherica</i>	<i>Elytrigia atherica</i> <i>Festuca rubra</i> <i>Agrostis stolonifera</i>

Les relations entre les espèces végétales et les facteurs écologiques sont ici simplifiées et il convient maintenant d'analyser en détail l'influence de chaque facteur.

4.2.2. Influence de l'altitude sur l'organisation de la végétation

4.2.2.1. Résultats de l'analyse fréquentielle

Afin d'analyser la relation entre l'altitude et les espèces végétales des marais salés, nous avons réalisé une analyse fréquentielle à partir de l'ensemble des transects (Tableau 50). Les espèces sont classées selon la valeur de l'altitude minimale avec laquelle elles présentent une liaison positive. Toutes les espèces présentent une liaison positive avec au moins un des états du facteur Altitude.

Spartina sp. est l'espèce que l'on rencontre aux altitudes les plus faibles, à partir de 3,2 m. Présente jusqu'à 6,4 m d'altitude, c'est également la seule espèce à présenter un écart-type d'altitude aussi élevé (3,2 m). Dans un ordre d'altitude croissante, viennent ensuite *Salicornia sp.* présente entre 3,8 m et 6,6 m, et *Suaeda maritima* présente entre 4,6 et 6,6 m. Il

est étonnant de voir que ces espèces halophiles se rencontrent à des altitudes aussi élevées. 6,6 m est la dernière classe d'altitude à présenter une liaison positive avec *Salicornia sp.* et *Suaeda maritima*, et on peut remarquer que la classe d'altitude immédiatement supérieure, 6,8 m, est la première à présenter une liaison positive avec *Elytrigia atherica*. Le passage entre 6,6 m et 6,8 m correspondrait donc à une rupture importante entre un secteur couvert de végétaux adaptés à l'immersion fréquente tels que *Salicornia sp.* et *Suaeda maritima*, et un secteur couvert de végétaux plus continentaux tel que *Elytrigia atherica*. Or, 6,8 m correspond à un coefficient de marée de 100, qui est atteint lors des hautes mers moyennes de vives-eaux (Bonnot-Courtois & Lefeuvre, 2000). Les terrains situés à une altitude égale ou supérieure à 6,8 m sont donc atteints seulement quelques jours par an. Il y a donc ici une réponse claire de la végétation à la fréquence d'immersion, à travers le facteur Altitude. *Elytrigia atherica* est donc présente majoritairement sur les terrains d'altitude comprise entre 6,8 m et 8,4 m. Sur ces terrains peu fréquemment immergés se rencontrent également *Festuca rubra* (présente entre 7 m et 10 m) et *Agrostis stolonifera* (présente entre 7,2 m et 9,4 m).

Nous avons vu que certaines espèces vivent uniquement à des altitudes inférieures à 6,8 m, d'autres uniquement à des altitudes supérieures à cette valeur. Il existe également des espèces végétales vivant de part et d'autre de cette limite. C'est le cas de *Atriplex prostrata* (présente entre 6 m et 7 m), *Halimione portulacoides* (présente entre 6 m et 7,2 m) et *Puccinellia maritima* (présente entre 6,2 m et 7,6 m). Ces espèces se développent donc sous des taux d'immersion intermédiaires. On peut remarquer que *Aster tripolium* présente une distribution selon l'altitude non continue : elle se rencontre principalement entre 6 m et 7m, mais présente également une liaison positive avec la classe d'altitude 5 m. Il serait intéressant de voir si la présence de cette espèce à des altitudes faibles peut être dû à un autre facteur que l'altitude.

La méthode des analyses fréquentielles montre donc que les espèces végétales présentent une relation forte avec l'altitude, et permet de préciser pour chaque espèce les altitudes où elle est le plus fréquemment rencontrée. Nous pouvons voir également qu'il est difficile de dégager des associations végétales distinctes car les espèces se succèdent de façon continue le long du gradient d'altitude. Il faut cependant rapeler que ces altitudes sont une moyenne sur l'ensemble de la Baie, et selon l'échelle à laquelle on travaille, il peut être intéressant de comparer les valeurs obtenues localement pour chaque secteur de la Baie.

Tableau 50 (page suivante) : Résultats de l'analyse fréquentielle du facteur Altitude pour l'ensemble des points d'observation des 28 transects.

Altitude (m)	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2	8,4	8,8	9,0	9,4	9,6	10,0	10,4	
<i>Spartina townsendii</i>	+++	+++	+	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	.	+++	+++	+++	+++	+++	+++	---	---	---	---	---	---	---	
<i>Salicornia sp</i>	.	--	.	+	+	+++	+++	+++	+++	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	---	---	---	---	---	---	---	-	
<i>Suaeda maritima</i>	.	---	-	---	---	.	.	+++	+++	+	-	--	+++	+++	+++	+++	+++	+++	---	---	---	---	---	---	---	---	
<i>Aster tripolium</i>	.	--	.	--	-	--	.	.	.	+	.	---	---	-	+++	+++	+++	+++	---	+++	---	---	---	---	---	-	
<i>Spergularia maritima</i>	.	--	.	--	-	--	--	--	-	---	---	+++	+++	-	++	+	++	+++	---	---	---	---	---	---	---	
<i>Puccinellia rupestris</i>	-	--	---	+++	+++	+++	.	++	+++	---	---	---	---	---	---	---	+	+	
<i>Atriplex prostrata</i>	-	-	.	-	---	---	---	---	++	++	+++	+++	---	+++	---	---	---	---	---	
<i>Halimione portulacoides</i>	-	---	-	---	---	---	---	---	---	-	---	---	---	---	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	+++	---	---	---	---
<i>Parapholis incurva</i>	--	--	.	+	.	+++	+++	-	---	---	---	-	
<i>Puccinellia maritima</i>	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-	+	+++	+++	+++	+++	---	---	---	---	---	---
<i>Atriplex glabriuscula</i>	+	.	+++	++	-	-
<i>Phragmites australis</i>	+++
<i>Spergularia media</i>	+++	-	---	-	+	++
<i>Triglochin maritimum</i>	-	--	---	--	--	.	--	++	++	---	+++	---	---	---	---	---	
<i>Elytrigia atherica</i>	--	---	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	+++	+++	++	+	+++	+++	+++	.	+	
<i>Glaux maritima</i>	-	-	---	---	---	---	-	-	+++	+++	+++	---	---	---	---	---
<i>Hordeum marinum</i>	--	---	---	---	---	--	.	---	---	+++	---	+++	+++	---	---	---	++	.	.	.	
<i>Juncus gerardii</i>	--	--	---	---	---	---	---	---	---	+++	+++	+++	+++	---	---	---	
<i>Festuca rubra</i>	.	---	.	---	--	---	---	---	---	-	---	---	---	---	---	---	---	---	---	++	+++	+++	+++	++	+++	+++	+++	.	+	+	+	+	.	
<i>Juncus maritima</i>	--	--	+	.	++	.	+++	
<i>Plantago maritima</i>	-	---	---	-	.	.	---	---	---	+++	---	.	+++	--	--	
<i>Scirpus maritimus</i>	--	+++
<i>Agrotis stolonifera</i>	---	.	---	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	.	---	---	+++	+++	+++	-	+++	+++	.	+	+	+	.	.	.	
<i>Cirsium vulgare</i>	-	-	.	.	-	---	---	---	+++	+++	-	
<i>Trifolium pratense</i>	-	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Lolium perenne</i>	++
<i>Plantago mayor</i>	+++	++	.	++
<i>Polygonum maritima</i>	---	---	---	-	+++	+++
<i>Taraxacum sp</i>	++	+++
<i>Plantago coronopus</i>	-	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	+++	+++	+++	+++	
<i>Beta vulgaris</i>	+
<i>Carex sp.</i>	+++
<i>Convolvulus sp.</i>	+++

4.2.2.2. Etude de la relation entre l'altitude et la coordonnée géographique X

Dans la première partie de ce travail, nous avons vu que les espèces végétales ne présentaient pas la même altitude moyenne selon les transects. Ainsi dans le tableau 51 qui compare les altitudes moyennes dans les différents transects étudiés pour trois espèces végétales, nous pouvons voir que la différence d'altitude moyenne peut être de 50 cm entre les transects du Vivier-sur-Mer et ceux de Vains. A partir de ces trois exemples, il apparaît que l'altitude moyenne augmente d'Ouest en Est.

Tableau 51: Altitude moyenne (m, IGN69) de trois espèces végétales pour les cinq transects.

Espèce	JB03	Vi06	CD07	V108	V208
<i>Elytrigia atherica</i>	6,90	6,75	7,28	7,52	7,52
<i>Aster tripolium</i>	6,32	6,03	6,62	7,63	7,50
<i>Puccinellia maritima</i>	6,03	5,96	6,59	7,42	7,52

Afin de vérifier que l'altitude moyenne des espèces végétales du marais salés dépend de leur position dans la Baie du Mont-Saint-Michel, nous avons cherché une corrélation entre l'altitude Z et la coordonnées géographique X (Tableau 52).

Tableau 52: Résultats des corrélations linéaires et non linéaires entre l'altitude et la coordonnée X pour l'ensemble des points d'observation des transects.

Espèce	Nombre de points	Corrélation linéaire			Corrélation non linéaire	
		Pente	R ²	p-value	R ²	p-value
Ensemble	9398	4,1e-05	0,34	<0,001	0,35	<0,001
<i>Agrotis stolonifera</i>	1898	4,1e-05	0,41	<0,001	0,49	<0,001
<i>Aster tripolium</i>	1765	2 ^e -05	0,17	<0,001	0,18	<0,001
<i>Atriplex glabriuscula</i>	45			0,79		0,76
<i>Atriplex prostrata</i>	763	1,5e-05	0,25	<0,001	0,29	<0,001
<i>Cirsium vulgare</i>	81			0,25		0,23
<i>Elytrigia atherica</i>	3830	3,2 e-05	0,35	<0,001	0,6	<0,001
<i>Festuca rubra</i>	2061	3,8 e-05	0,34	<0,001	0,5	<0,001
<i>Glaux maritima</i>	326	1,3 e-05	0,05	<0,001	0,06	<0,001
<i>Halimione portulacoides</i>	2883	2 ^e -05	0,23	<0,001	0,26	<0,001
<i>Hordeum marinum</i>	470	3 ^e -05	0,28	<0,001	0,38	<0,001
<i>Juncus maritima</i>	29	2,9 e-05	0,73	<0,001	0,94	<0,001
<i>Juncus gerardii</i>	441	2,2 e-05	0,28	<0,001	0,43	<0,001
<i>Parapholis incurva</i>	88			0,9		0,83
<i>Plantago coronopus</i>	372	6,6 e-05	0,83	<0,001	0,87	<0,001
<i>Plantago maritima</i>	183	4,2 e-05	0,76	<0,001	0,8	<0,001
<i>Polygonum maritima</i>	48			0,43		0,35
<i>Puccinellia maritima</i>	5038	3,7 e-05	0,40	<0,001	0,43	<0,001
<i>Puccinellia rupestris</i>	270	6,8 e-05	0,35	<0,001	0,48	<0,001
<i>Salicornia sp.</i>	1962	1,3 e-05	0,03	<0,001	0,12	<0,001
<i>Scirpus maritimus</i>	18	5,8 e-05	0,94	<0,001	0,94	<0,001
<i>Spartina townsendii</i>	1070	2,1 e-05	0,06	<0,001	0,18	<0,001
<i>Spergularia media media</i>	1656	2 e-05	0,08	<0,001	0,12	<0,001
<i>Spergularia maritima</i>	46	3,6 e-05	0,83	<0,001	0,84	<0,001
<i>Suaeda maritima</i>	3299	2,7 e-05	0,21	<0,001	0,21	<0,001
<i>Taraxacum sp.</i>	23	4,9 e-05	0,78	<0,001	0,78	<0,001
<i>Trifolium pratense</i>	620	7,3 e-05	0,83	<0,001	0,84	<0,001
<i>Triglochin maritimum</i>	355	2,1 e-05	0,29	<0,001	0,33	<0,001

Ceci a été fait dans un premier temps sur l'ensemble des points des transects présentant au moins une espèce végétale (les points de sol nu sont éliminés du calcul), puis pour chaque espèce végétale.

Les résultats montrent qu'il existe une corrélation significative entre l'altitude Z et la coordonnée X pour l'ensemble des points, ainsi que pour 23 espèces sur les 27 testées (les espèces rencontrées sur moins de 10 points ont été éliminées du test). Les espèces *Atriplex glabriuscula*, *Cirsium vulgare*, *Parapholis incurva*, et *Polygonum maritima* n'ont été rencontrées que dans un seul secteur de la Baie (dans le secteur des cordons coquilliers de Chapelle-Saint-Anne pour *Atriplex glabriuscula* et *Parapholis incurva*, et dans le secteur des estuaires pour *Cirsium vulgare* et *Polygonum maritima*), c'est pourquoi ces quatre espèces présentent des tests non significatifs. Mis à part ces cas particuliers, toutes les espèces présentent donc une liaison significative entre l'altitude Z et la coordonnée géographique X.

Les régressions linéaires et non linéaires entre Z et X ont été tracées pour l'ensemble des points (Figure 91), puis pour chacune des espèces (Figure 92). La coordonnée X explique 34% de la variation de l'altitude selon la régression linéaire, et 35% selon la régression du second degré. La droite de régression linéaire entre Z et X pour l'ensemble des points des transects montre une augmentation de l'altitude moyenne du marais salé de 5,83 m à l'Ouest de la Baie à 7,4 m à l'Est. Il existe donc un décalage de 1,5 m de part et d'autre de la Baie. La pente de la droite de régression linéaire est de $4,1 \cdot 10^{-5}$, c'est-à-dire qu'on observe une augmentation de l'altitude moyenne des marais salés de 41 cm tous les 10 km d'Ouest en Est. Nous pouvons voir également qu'au centre de la Baie, la végétation présente des altitudes plus élevées, qui s'expliquent par la présence de cordons coquilliers. Réalisée sur chaque espèce, cette analyse permet de voir que l'altitude moyenne d'une espèce végétale n'est pas constante dans la Baie du Mont-Saint-Michel. Ainsi *Halimione portulacoides* se trouve à des altitudes augmentant de 20 cm tous les 10 km d'Ouest en Est. Selon les espèces, cette augmentation peut être de 10 cm à 70 cm, avec une moyenne de 35 cm.

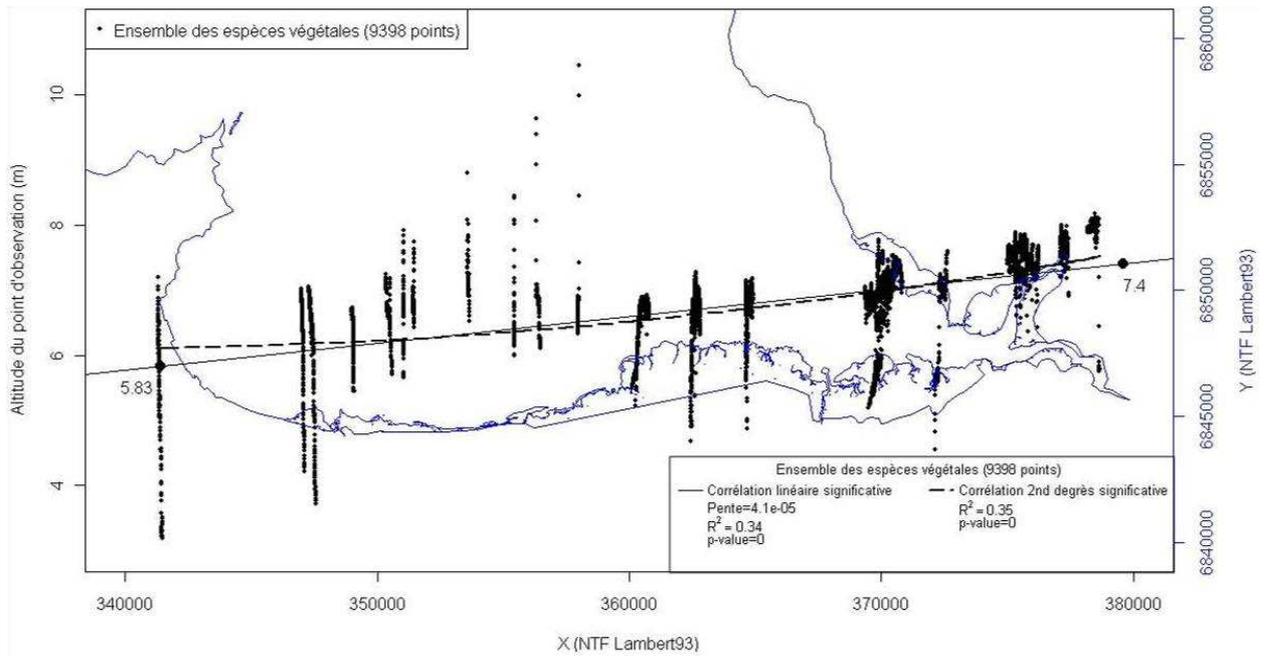


Figure 91: Graphique des régressions linéaires et non linéaires entre l'altitude Z et la coordonnée géographique X des points d'observation de la végétation de la Baie du Mont-Saint-Michel. Les résultats des tests de corrélation sont indiqués en bas à droite.

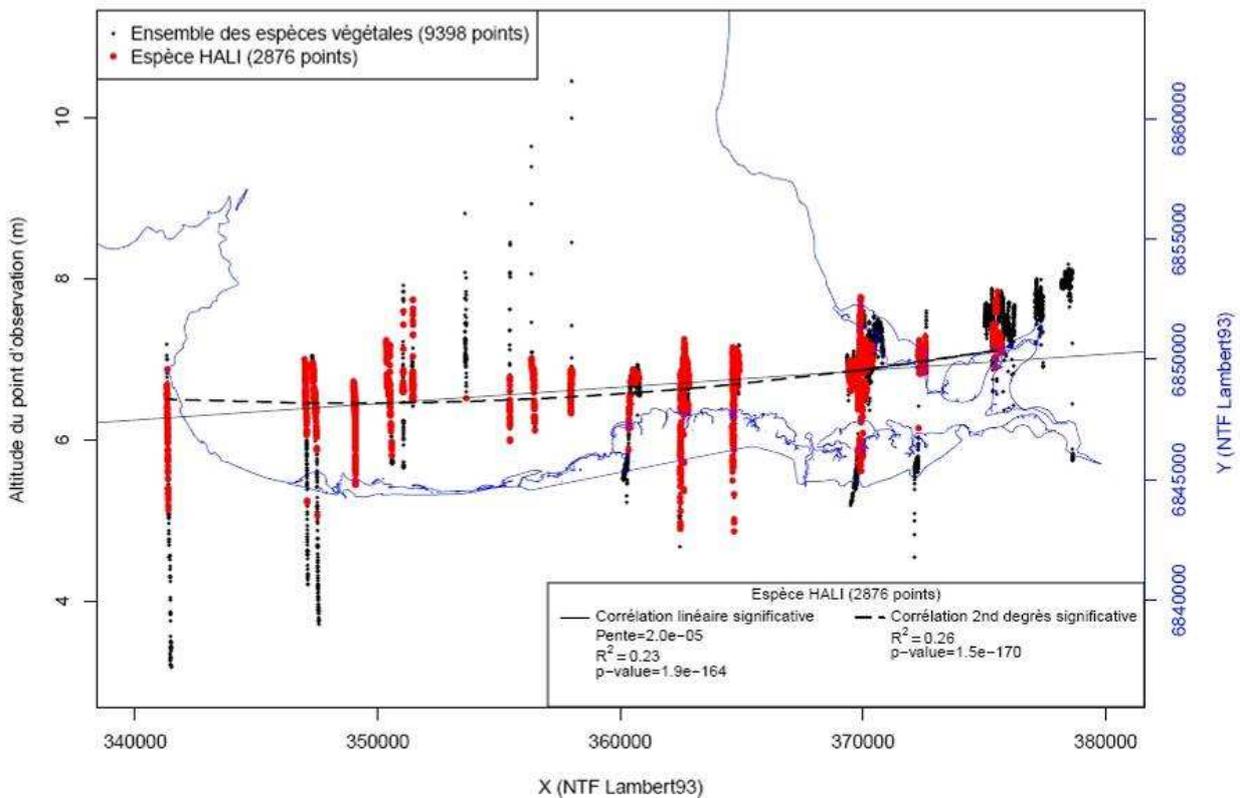


Figure 92: Régressions linéaires et non linéaires entre l'altitude Z et la coordonnée géographique X des points d'observation où a été rencontrée *Halimione portulacoides* (en rouge).

Ce travail a également été réalisé, sous le logiciel R, sur les données de la carte de végétation de 2002. La carte de végétation de 2002 est constituée d'un ensemble de polygones de composition végétale connue. La coordonnée géographique X et l'altitude Z de chaque pixel des polygones de végétation étant connues, on a pu tracer un point pour chaque pixel sur le graphique $Z=f(X)$, et tracer la droite de régression linéaire et la courbe de régression non linéaire (Figure 94). Les pixels situés à moins de 1 m des chenaux (vectorisés à partir d'une carte des pentes supérieures à 10%) ont été éliminés du calcul.

Lorsque l'on considère l'ensemble des pixels quelque soit le type de végétation, la droite de la régression linéaire de l'altitude présente une pente de $4,2 \cdot 10^{-5}$ (42 cm pour 10 km), allant de 5,83 m à l'Ouest de la Baie à 7,42 m à l'Est.

Nous avons ensuite considéré les espèces végétales indépendamment les unes des autres. Pour notre étude, les types de végétation ont été regroupés selon que l'espèce dominante soit *Suaeda maritima*, *Salicornia sp.*, *Spartina townsendii*, *Puccinellia maritima*, *Atriplex portulacoides*, *Festuca rubra*, *Elytrigia atherica*, ou *Agrostis stolonifera*. Par exemple, pour les espèces *Suaeda maritima* et *Salicornia sp* (Figure 95) la coordonnée X explique 25% et 34% de la variation de l'altitude selon le type de régression. Ces espèces sont présentes à une altitude moyenne augmentant de 46 cm par 10 km.

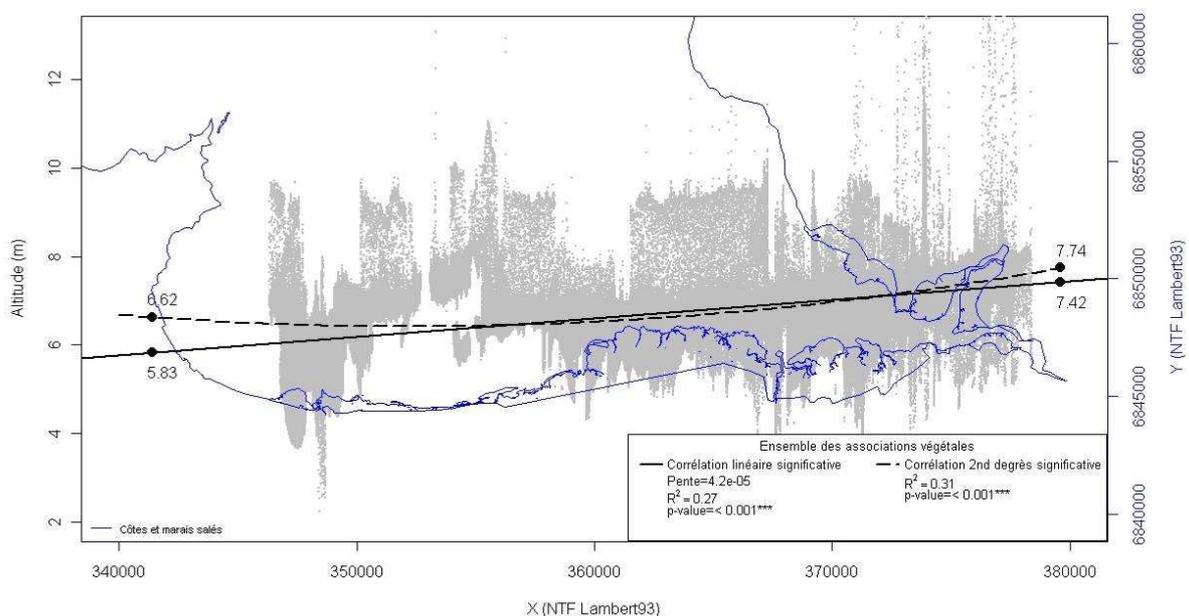


Figure 94: Test de corrélation entre l'altitude Z et la coordonnée X des polygones de la carte de végétation de 2002.

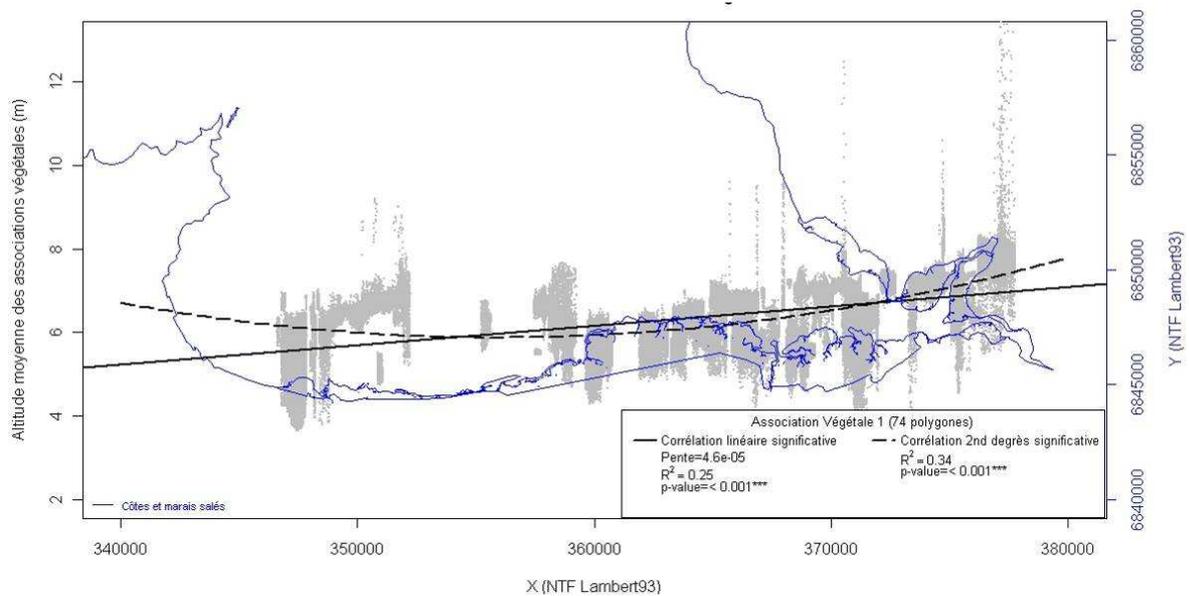


Figure 95: Test de corrélation entre l'altitude Z et la coordonnée X des polygones de la carte de végétation de 2002 où les espèces *Suaeda maritima* et *Salicornia sp* sont présentes.

Les courbes de régression du second degré des différentes espèces végétales ont été superposées sur la même figure (Figure 96). On a rassemblé dans un même groupe les espèces *Salicornia sp.*, *Suaeda maritima* et *Spartina sp.* pour avoir un nombre de polygones suffisant.

Les différentes espèces présentent des courbes similaires, mais d'altitudes différentes.

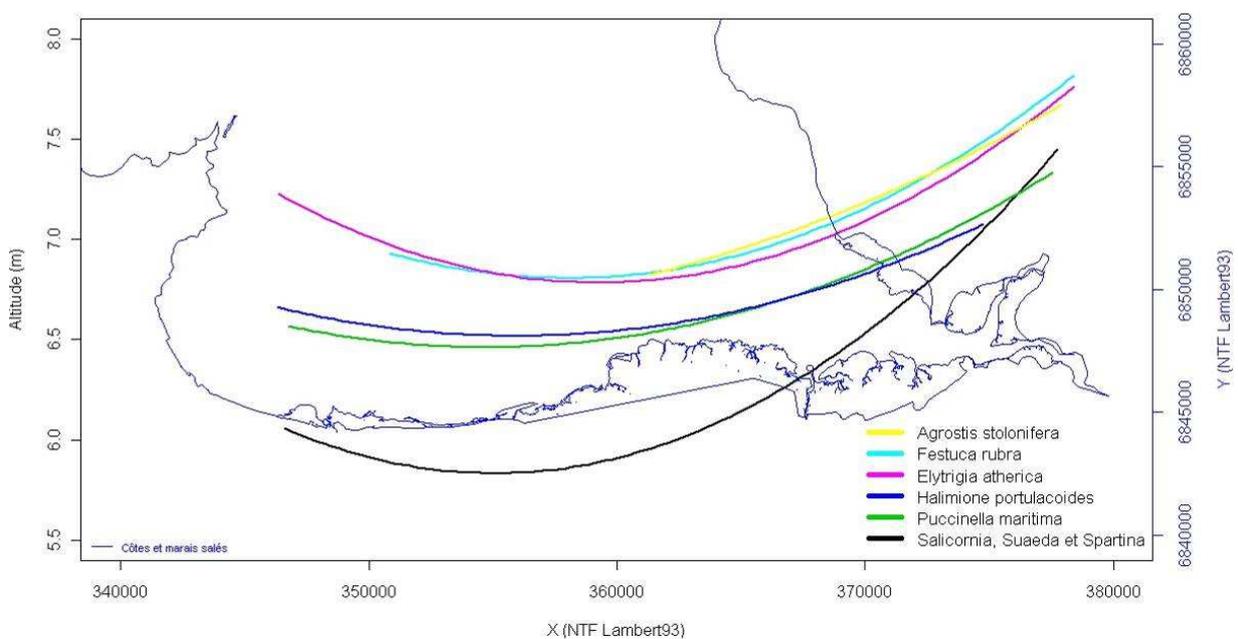


Figure 96: Superposition des courbes de régression du second degré entre la coordonnée X et l'altitude Z des polygones de la carte de végétation de 2002 pour les différentes espèces végétales.

Les altitudes des courbes de régressions varient à l'Ouest de 6 m à 7,2 m et à l'Est de 7,2 m à 7,8 m. La plage d'altitude sur laquelle l'estran est couvert par la végétation se réduit donc d'Ouest en Est. On peut expliquer ceci par le fait qu'à l'Ouest les marais forment des terrains de pentes faibles et régulières de la côte à l'estran, alors qu'à l'Est les marais salés se présentent sous la forme de terrains quasiment plats, d'altitude élevée (7 m), limités par des micro-falaises pouvant mesurer 2 m et au pied desquelles le passage de la Sée et de la Sélune empêche le développement de la végétation.

L'ordre des espèces selon l'altitude n'est pas constant sur l'ensemble de la Baie. A l'Ouest, l'ordre des espèces est similaire à celui observé dans les précédentes analyses : *Elytrigia atherica* et *Festuca rubra* aux altitudes les plus élevées, puis *Halimione portulacoides* et *Puccinellia maritima*, et enfin *Salicornia sp.*, *Suaeda maritima*, et *Spartina sp.*. On retrouve bien ici une organisation spatiale pouvant être rapprochée du schéma haut, moyen, bas schorre et haute slikke. Lorsque l'on se déplace vers l'Est, cette organisation change et une nouvelle espèce apparaît : *Agrostis stolonifera*. Il s'agit d'une espèce favorisée par le pâturage, et sa présence peut s'expliquer par le pâturage particulièrement intensif sur ces secteurs. On peut constater de plus l'inversion de l'ordre de *Puccinellia maritima* et *Halimione portulacoides* vers X= 365000, à l'Ouest du Mont-Saint-Michel. Cette inversion pourrait être également l'effet du pâturage. En effet, à l'Ouest où le pâturage est nul ou faible, *Halimione portulacoides* présente une altitude moyenne plus élevée que *Puccinellia maritima*. Au centre de la Baie le pâturage s'intensifie, et l'on retrouve *Puccinellia maritima*, espèce favorisée par le pâturage, là où la concentration des troupeaux est importante, c'est à dire vers les côtes, aux altitudes élevées. *Halimione portulacoides*, espèce sensible au pâturage, se rencontre au contraire sur des secteurs peu atteints par les troupeaux, plus loin de la côte et donc à des altitudes plus faibles. Cette espèce n'est d'ailleurs plus présente à l'Est au fond des estuaires, où la pression de pâturage doit être trop élevée pour permettre son développement.

Quelle est la raison de l'augmentation de l'Ouest à l'Est de l'altitude moyenne des espèces végétales du marais salés dans la Baie du Mont-Saint-Michel ? Pour répondre à cette question nous avons tracé la droite reliant les altitudes de la marée haute du 07/09/1979 (Le Rhun, 1982) en plusieurs points de la Baie (Figure 97). On peut voir que la marée monte à des altitudes plus élevées à l'Est qu'à l'Ouest : elle monte ainsi à l'Ouest de la Baie jusqu'à 7,60 m aux Nielles, tandis qu'elle atteint 8,27 m au fond de l'estuaire de la Sélune à Pontaubault. On constate donc ici une différence d'altitude de la marée haute de 0,67 m entre l'Ouest et l'Est de la Baie. En effet, lorsque la mer monte, l'eau s'engouffre dans la Baie et vient

s'accumuler contre les côtes. Ce phénomène atteint son maximum au niveau des estuaires qui font face aux courants les plus forts. La colonne d'eau est donc plus importante à ce niveau. Ceci a pour conséquence le fait que le niveau de la mer n'est pas plan : il définit une pente hydraulique.

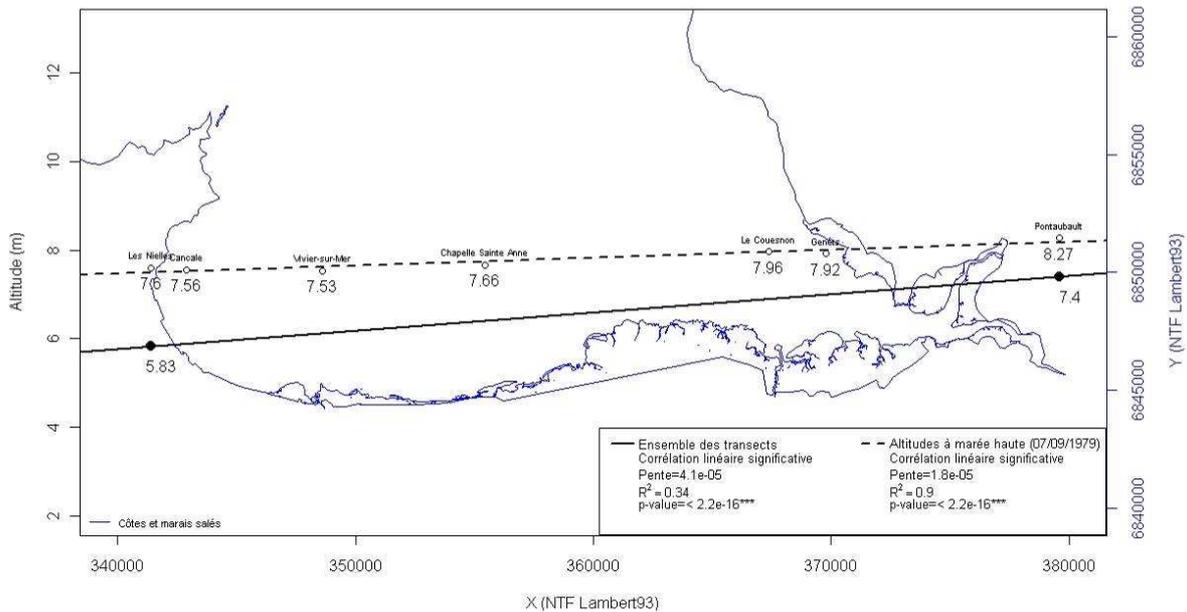


Figure 97: Droite de régression entre l'altitude Z et la coordonnée X des polygones de la carte de végétation de 2002, et droite reliant les cotes correspondant aux altitudes de la marée du 07/09/1979 (d'après des données de Le Rhun, 1982).

Ici la pente de la droite reliant les altitudes de la marée haute est de $1,8 \cdot 10^{-5}$ (18 cm pour 10 km). Bien que plus faible, elle est comparable à la pente de la droite de régression des attitudes par rapport à la coordonnée X de l'ensemble des espèces, qui est de $4,1 \cdot 10^{-5}$ (41 cm pour 10 km). On peut donc voir que la végétation suit l'augmentation de l'altitude de la marée et se développe de plus en plus haut sur l'estran au fur et à mesure que l'on va vers l'Est.

La pente hydraulique explique donc en partie pourquoi les espèces végétales ne présentent pas les mêmes altitudes moyennes dans les différents secteurs de la Baie du Mont-Saint-Michel. Il faudra prendre en compte ce phénomène lors de classifications automatiques réalisées sur l'ensemble de la Baie et basées sur les données d'altitude.

Nous allons maintenant étudier l'influence des autres facteurs écologiques : la géomorphologie, le contexte sédimentaire, et le pâturage.

4.2.3. Influence de la pente du terrain et de la géomorphologie

Des analyses fréquentielles ont été menées sur l'ensemble des transects pour le facteur Pente (Tableau 53). Pour être correctement interprétés, ces résultats doivent être mis en parallèle avec les tableaux de liaisons entre le facteur Altitude et le facteur Pente (Tableau 54 et 55).

On peut distinguer trois groupes d'espèces selon la force de la pente avec laquelle elles sont liées. Tout d'abord, 11 espèces présentent des liaisons positives avec les pentes faibles (<2%) : c'est le cas par exemple pour *Puccinellia maritima*, *Salicornia sp.*, et *Suaeda maritima*, espèce présentes sur les terrains à pente faible ou nulle du schorre. C'est également le cas de l'espèce *Agrostis stolonifera*, qu'on retrouve sur les secteurs pâturés à pente quasi-nulle.

D'autres espèces présentent des liaisons positives avec les pentes fortes (comprises entre 4% et 20%) comme *Aster tripolium* et *Atriplex prostrata*, présentes sur les terrains inégaux du schorre, voire des pentes très forte (de 4% à 40%) pour *Elytrigia atherica* et *Halimione portulacoides*. Ceci peut être dû pour *Elytrigia atherica* à sa présence au niveau de la digue et des cordons coquilliers, et pour *Halimione portulacoides* à sa présence autour des chenaux.

Enfin, certaines espèces présentent des liaisons positives à la fois avec les pentes faibles et des pentes fortes. C'est le cas par exemple pour *Spartina sp.* et *Festuca rubra*. Dans ce cas la relation entre la pente et la présence de ces espèces n'apparaît pas clairement. On peut imaginer que *Festuca rubra* est liée aux pentes élevées de la digue, aussi bien qu'aux terrains plat du haut schorre, et que sa présence sur l'un ou l'autre est plus liées à l'altitude qu'à la pente. On peut penser à la même situation pour *Spartina sp.* qu'on rencontre sur les terrains inondées, qu'ils soient pentus comme dans le cas des buttes allongées que l'on trouve parfois à la limite de la haute slikke, ou plats comme dans les vasière en arrière de cordon coquillier.

Tableau 53: Résultats de l'analyse fréquentielle du facteur Pente pour l'ensemble des points d'observation des 28 transects.

Pente (%)	0,10	0,20	0,30	0,40	0,60	0,80	1	2	4	6	10	20	30	40
<i>Agrotis stolonifera</i>	--	+	+	++	++	+++	+++	++	---	--	--	--	-	.
<i>Hordeum marinum</i>	-	+	+	+++	+	++	+	-	-	-	---	--	.	.
<i>Plantago coronopus</i>	-	.	+	-	+	.	+	+	-	.	.	.	-	.
<i>Puccinellia maritima</i>	+	-	+++	++	+++	+++	+++	+++	---	---	---	---	---	--
<i>Puccinellia rupestris</i>	++	.	.	+	+	++	++	+	-	---	---	---	-	.
<i>Salicornia sp.</i>	++	++	++	+	++	+++	+	-	--	-	---	-	---	--
<i>Spergularia maritima</i>	+++	+	++	+	+++	+++	+++	++	---	---	---	---	---	--
<i>Suaeda maritima</i>	++	+	++	+	++	+	-	+	++	-	-	--	---	-
<i>Trifolium pratense</i>	-	.	+	.	++	+	++	+	---	-	+	-	---	-
<i>Triglochin maritimum</i>	.	+++	.	.	++	++	.	++	---	-	--	-	--	.
<i>Cirsium vulgare</i>	++	.	.	.	-	.	-	-	.	.
<i>Aster tripolium</i>	+	-	-	--	-	-	---	+	+++	+	+	++	-	.
<i>Atriplex prostrata</i>	+	--	-	-	---	-	---	-	+++	+	-	+++	++	.
<i>Elytrigia atherica</i>	---	---	---	-	---	---	-	-	+++	+++	+++	+++	+++	+
<i>Halimione portulacoides</i>	+	---	---	-	---	---	---	-	+++	+++	++	+	+++	+++
<i>Juncus maritima</i>	-	-	.	.	+
<i>Lolium perenne</i>	+
<i>Phragmites australis</i>	++	.	+	.
<i>Polygonum maritima</i>	+++
<i>Scirpus maritimus</i>	++
<i>Taraxacum sp.</i>	++	.	.
<i>Festuca rubra</i>	-	+	+	-	--	++	+	++	---	-	+	+++	+	.
<i>Glaux maritima</i>	.	++	.	+	.	.	.	+	-	+	.	---	.	.
<i>Juncus gerardii</i>	.	+++	.	+	+	+	+	-	---	---	-	.	++	+
<i>Spartina townsendii</i>	++	.	.	.	++	+	-	--	+	+	++	-	---	-
<i>Atriplex glabriuscula</i>	+
<i>Parapholis incurva</i>	.	.	+	+++	---	-	-	-	.	.
<i>Plantago maritima</i>	++	.	.	+	.	.	---	-	.

Tableau 54 : Valeurs des liaisons entre les facteurs Altitude (à l'horizontale) et Pente (à la verticale).

	3.2	3.6	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1	5.4	5.7	6.0	6.3	6.5	6.7	6.9	7.1	7.4	7.7	8.0	8.5
0.1	0	1	0	2	0	0	4	19	0	0	-7	7	5	-6	0	-5	-5	0	0
0.2	0	0	0	0	0	0	0	18	7	-5	-7	-8	4	4	9	-5	-6	0	0
0.3	2	2	0	0	0	0	2	13	5	-4	-9	0	-4	4	0	5	0	3	0
0.4	0	0	1	0	0	0	0	15	3	-5	-8	5	-6	-5	10	4	0	0	0
0.6	0	2	0	0	-6	-7	5	23	13	-6	-11	-5	-19	-5	9	6	0	3	0
0.8	0	0	0	-6	0	0	4	7	0	0	-13	-5	-6	5	6	10	5	0	0
1	0	0	0	-5	0	-6	0	5	4	-16	-12	-7	5	5	12	7	4	3	0
2	4	3	0	-5	-4	0	-5	-24	-5	-6	-5	14	8	-7	6	-5	5	4	0
4	3	2	3	4	8	5	0	-30	-11	15	30	8	15	5	-27	-7	-7	-5	0
6	2	3	8	26	7	7	-6	-12	0	13	5	-10	6	7	-9	-8	0	0	0
10	0	3	5	6	9	7	3	-8	0	6	7	-13	-5	6	-4	-7	6	4	2
20	0	0	1	0	4	8	11	0	0	0	12	4	-16	0	-6	8	7	5	0
30	0	0	0	0	0	0	2	5	4	7	9	3	-6	-6	0	0	3	6	4
40	0	0	0	0	0	0	0	0	4	7	18	0	-6	0	3	-5	0	3	27

Tableau 55 : Résumé des relations entre les facteurs Altitude et Pente

Pente	Altitudes associées
≤1%	- 5,4 m : estran nu à pente très faible - 6,7 m-6,9 : schorre à pente très faible - 7,1m-7,4m : zones paturées à pente très faible
2%≤x≤10%	Répartitions sur l'ensemble des altitudes : inégalités du terrain.
20%≤x≤30%	- Altitudes moyennes (5,1 m – 6,3 m) : micro-falaises - Altitudes hautes (7.4 m – 8 m) : chenaux de haut schorre et digue
40%	- 6,3 m : cordons coquilliers - 8,5 m : digue

L'analyse fréquentielle du facteur Géomorphologie (Tableau 56) permet de lier chaque espèce aux entités géomorphologiques sur lesquelles on la rencontre le plus fréquemment. Les liaisons entre les facteurs Altitude et Géomorphologie sont indiquées dans les tableaux 57 et 58. Sur la pente de la digue (1), on rencontre *Agrostis stolonifera*, *Elytrigia atherica*, et *Festuca rubra*. La présence de ces espèces caractéristiques des altitudes élevées est logique sur cette entité géomorphologique concentrée à l'altitude 8,5 m. Par contre, on peut également voir que *Puccinellia rupestris*, *Salicornia sp.* et *Spartina sp.* présentent une relation positive avec ce type géomorphologique. On peut expliquer la présence de ces espèces d'altitude basse par le fait qu'il y a parfois au pied de la digue des dépressions créées par les tassements du terrain dus au passage répété des troupeaux. Présents entre 6,5 m et 7,1 m, les terrains plats (2) présentent des liaisons positives avec la plupart des espèces végétales. Les espèces telles que *Salicornia sp.*, *Spartina townsendii*, *Suaeda maritima*, *Atriplex prostrata*, *Halimione portulacoides*, et *Aster tripolium* sont associées aux pentes normales, c'est-à-dire dirigées vers la mer, faibles ou fortes (3a et 3b). *Agrostis stolonifera*, *Elytrigia atherica*, et *Festuca rubra* sont associées aux pentes inverses, c'est-à-dire dirigées vers la côte (4a et 4b). Ceci peut être dû au fait que ce type de pente se rencontre à des altitudes élevées, en contrebas de la digue (6,7 m – 7,1 m).

Tableau 54 : Résultats de l'analyse fréquentielle du facteur Géomorphologie pour l'ensemble des points d'observation des 28 transects.

Géomorphologie	Digue	Plat	Pente normale		Pente inverse		Microfalaise				Chenal				Dépression				Talus				Cordon coquillier				Butte				
	1	2	3a	3b	4a	4b	5a	5b	5c	5d	6a	6b	6c	6d	7a	7b	7c	7d	8a	8b	8c	8d	9a	9b	9c	9d	10a	10b	10c	10d	
<i>Agrotis stolonifera</i>	+++	+++	---	---	++	+++	+	+	+++	---	+++	+++	+	---	+++	.	+++	+++	---	---	---	---	---	---	---	---	
<i>Elytrigia atherica</i>	++	+	---	---	+++	++	+++	+++	+++	++	-	+++	++	---	+	.	.	.	+++	.	--	---	++	---	---	+++	
<i>Festuca rubra</i>	+	+++	---	---	---	++	++	.	.	.	+++	++	+++	---	+	-	+++	---	.	+	.	-	--	.	--	---	---	-	---	.	
<i>Puccinellia rupestris</i>	+++	+++	++	+++	---	---	---	.	--	-	--	-	---	
<i>Salicornia sp.</i>	++	---	+++	+++	---	.	.	.	+	---	---	---	---	---	---	+	+++	-	.	--	-	+	+++	.	+++	---	.	+++	.		
<i>Spartina townsendii</i>	+	---	+++	+++	--	---	-	---	+++	---	---	---	+++	++	.	.	+++	.	+++	+++	---	---	
<i>Suaeda maritima</i>	.	++	+++	+++	---	.	-	.	.	---	---	---	+++	---	-	-	+	--	.	.	-	.	.	.	+	.	.	+++	+		
<i>Atriplex glabriuscula</i>	.	++	++	-	.	.	.	-	+	
<i>Atriplex prostrata</i>	.	+	+++	---	-	++	---	.	+	---	.	+	-	-	.	.	+++	--	.	
<i>Parapholis incurva</i>	.	+++	+	-	.	---	.	-	.	---	+++	
<i>Halimione portulacoides</i>	---	+++	---	+++	+++	.	.	+	.	+++	++	+	.	---	--	---	.	.	+	++	.	.	.	-	--	+++	--	---	-	.	
<i>Juncus maritima</i>	.	+++
<i>Carex sp.</i>	.	+
<i>Polygonum maritima</i>	.	+	---	-	+++
<i>Cirsium vulgare</i>	.	+	---	-	.	+	+++	.	--	.	.	.	+
<i>Glaux maritima</i>	.	+++	---	---	--	-	--	-	++	.	++	-	++	.	.	+	.
<i>Hordeum marinum</i>	.	+++	---	---	---	-	-	.	+++	++	-	-	--	---	.
<i>Juncus gerardii</i>	.	+	-	---	.	+	-	+++	--	+	--	---	.	-	.	.
<i>Plantago maritima</i>	.	+++	---	--	---	.	.	.	+	+
<i>Spergularia maritima</i>	.	+++	---	---	---	.	.	++	.	---	---	---	--	---	-	+++	-	---	.	---	---	+++	
<i>Spergularia media</i>	.	+	--	+	+++
<i>Puccinellia maritima</i>	.	+++	---	---	--	-	--	+	.	---	---	+	-	---	+++	+++	---	+	.	.	+	---	--	---	.	+++	---	---	+++	+++	
<i>Plantago coronopus</i>	.	+	---	+++	++	+++	.	.	.	++	-	+++	.	+++	++	--	.	-	-	.	
<i>Trifolium pratense</i>	.	+++	---	---	-	+++	.	.	.	+	+	+++	.	+++	.	.	---	+++	.	+++	+++	+++	-	-	-	---	.	--	--	.	
<i>Triglochin maritimum</i>	.	+++	---	-	--	.	--	-	+++	.	--	+++	.	.	.	--	.	-	+++	.
<i>Aster tripolium</i>	.	---	+++	+++	--	.	+	.	.	---	---	---	+++	---	---	---	+	-	++	.	.	+++	.	+++	+++	+++	.
<i>Phragmites australis</i>	.	---	+++	+++
<i>Scirpus maritimus</i>	.	.	.	++	++
<i>Plantago mayor</i>	+++
<i>Taraxacum sp.</i>	+	+
<i>Cerastium sp.</i>	++
<i>Lolium perenne</i>	++

Les bords de microfalaises présentant des levées (5a), concentrés au fond des estuaires à l'altitude de 8 m, sont associées à *Festuca rubra* et *Aster tripolium*. Les bords de microfalaise sans levée (5b) sont liés à *Halimione portulacoides*, *Puccinellia maritima*, et *Spergularia maritima*. Ils sont liés à l'altitude 6,9 m, et se trouvent autour de l'embouchure de la Sée et de la Sélune. Les pentes de microfalaise (5c) sont au contraire associées à *Salicornia sp.*, ce qui est logique pour cette espèce de haute slikke.

Au niveau des micro-chenaux (6d), concentrés à l'altitude 5,7 m, on rencontre *Aster tripolium*, *Spartina townsendii*, *Suaeda maritima*, *Atriplex prostrata*. Sur les bords des chenaux de plus grande taille, ce sont *Agrostis stolonifera*, *Elytrigia atherica*, *Festuca rubra*, et *Halimione portulacoides* que l'on rencontre, qu'il y ait une levée (6c) ou non (6a), c'est deux types géomorphologiques n'étant pourtant pas présents aux même altitudes, les chenaux avec levées étant rencontrés à des altitudes plus élevées (7,4 m) que les chenaux sans levées (6,3 m). On peut remarquer que ces espèces sont également associées au fond de chenaux (6b). On peut se demander si la précision des coordonnées géographiques des points d'observation est suffisante pour qu'on puisse ici faire la différence entre le fond et le bord d'un chenal.

Salicornia sp., *Spartina townsendii*, *Suaeda maritima*, et *Puccinellia maritima* sont associées aux dépressions (7a, 7b, 7c), ce qui est logique pour ces espèces d'altitude faible. Cependant, on peut également voir que *Agrostis stolonifera*, *Elytrigia atherica*, et *Festuca rubra* sont associées avec la présence de dépressions, ce qui peut sembler contradictoire avec le fait que ces espèces soient associées aux altitudes élevées. Or, on peut voir que ces dépressions sont rencontrées en majorité aux altitudes élevées (6,9 m et 7,1 m). Selon la configuration du terrain, il se peut donc que ces dépressions soit rarement inondée. Ceci montre qu'il est important d'intégrer à la fois l'altitude et la géomorphologie pour expliquer l'organisation spatiale de la végétation.

On peut voir également que *Salicornia sp.*, *Spartina townsendii*, *Suaeda maritima*, et *Aster tripolium* sont associées aux vasières isolées par un cordon coquillier (7d).

Sur les talus (8), qui sont d'anciennes micro-falaises situées au milieu du schorre (entre 6,9 m et 7,7 m), se rencontrent principalement *Agrostis stolonifera*, *Plantago coronopus* et *Trifolium pratense*. Cependant ces espèces se trouvent aussi bien sur les levées (8a), la pente (8c) et le pied (8d) du talus, qui pourtant devraient présenter des conditions de vie distinctes à cause de la différence d'altitude et de pente. Il semblerait donc la présence de ces espèces sur les talus ne soit pas due à cette entité géomorphologique, mais aux autres facteurs tels que l'altitude.

Salicornia sp. est associée aux sommets de cordons (9b), ce qui est contradictoire avec le fait que cette espèce se développe sur les terrains de basses altitudes. Nous pouvons expliquer ce résultat par le fait que les cordons coquilliers sont des entités géomorphologiques mobiles, et qu'il existe un décalage entre l'acquisition des données de végétation et des données d'altitudes : ce décalage temporel peut être la cause d'un décalage spatiale entre les deux types de données, les espèces végétales n'étant plus alors associées avec les entités géomorphologiques sur lesquelles elles se trouvent réellement. Une autre explication est que la taille est la forme d'un cordon coquillier évolue avec le temps et que cette entité géomorphologique peut prendre des aspects très différents. Ceci peut être observé ici car les sommets des cordons sont associés avec deux altitudes très différentes : 7,7 m et 6 m. Ils peuvent être donc couverts de végétaux aux préférences écologiques distinctes. Les versants internes des cordons coquilliers (9a) sont d'ailleurs associés à la fois à la présence d'espèce d'altitude élevée telles que *Elytrigia atherica*, et d'espèces d'altitude basse telles que *Salicornia sp.*, *Spartina sp.*.

Au niveau des buttes du schorre (10a) et des surélévations (10c) se rencontrent *Elytrigia atherica*, *Halimione portulacoides*, *Puccinellia maritima*, et *Aster tripolium*. Les buttes allongées bordant les micro-chenaux sont associées à la présence d'*Elytrigia atherica*, *Suaeda maritima*, *Puccinellia maritima*, et *Aster tripolium*. Enfin, les buttes présentes à la limite slikke-schorre (10b) sont couvertes de *Spartina sp.*.

Tableau 55 : Liaisons entre l'Altitude (à l'horizontale) et la Géomorphologie (à la verticale).

	3.2	3.6	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1	5.4	5.7	6.0	6.3	6.5	6.7	6.9	7.1	7.4	7.7	8.0	8.5
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-5	0	2	5	1	9	54
2	5	-16	-27	-16	-9	-20	-111	-85	-11	-57	-55	27	245	10	6	-14	-13	4	-6
3a	3	49	2	3	0	12	181	302	20	72	11	-29	-82	-14	-61	-18	-54	-19	0
3b	3	6	85	18	36	7	7	30	114	22	0	-30	-49	-11	-27	-15	-7	0	0
4a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	14	9	-10	-7	0	0	0
4b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0
5a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	-9	2	0	0	9	27	0
5b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0
5c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	7	0	0	0	2	0	0	3	0
5d	0	0	0	0	0	0	0	0	10	15	0	0	0	2	0	0	0	0	0
6a	0	0	0	0	0	2	0	-5	5	20	38	0	-16	-6	0	-5	8	2	0
6b	0	0	0	0	6	23	5	8	17	3	3	-11	-6	0	4	-12	4	0	0
6c	0	0	0	0	-5	-5	-6	-19	-44	-16	-19	-85	-81	32	60	93	17	34	0
6d	0	0	0	0	0	4	0	3	16	3	6	6	4	-11	-17	-5	-4	0	0
7a	0	0	0	3	0	-5	-12	-13	-22	-8	14	-21	-5	-22	100	7	7	0	0
7b	0	0	0	0	0	0	0	-7	-7	-5	3	10	-12	-20	29	8	0	0	0
7c	0	0	0	0	-5	-5	-13	-47	-45	-35	11	5	7	27	-6	9	11	-7	0
7d	0	0	0	0	0	0	0	10	5	-5	0	131	-32	-19	-19	-14	-5	0	0
8a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-5	0	0	12	13	0	0
8b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0
8c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	-7	3	4	2	3	0	0
8d	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	3	-5	0	10	2	0	0	0
9a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	-8	6	0	11	5	0	0
9b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	-7	0	2	0	18	2	0
9c	0	0	0	0	0	0	0	0	4	12	2	3	0	3	0	0	0	0	0
9d	0	0	0	0	0	0	0	6	6	24	33	0	-16	-9	-9	-7	0	0	0
10a	0	0	0	0	0	0	0	-9	-8	10	7	9	11	4	-25	-8	0	0	0
10b	33	0	0	5	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10c	0	0	6	58	29	28	44	0	-5	0	4	4	-19	-9	-16	-11	0	0	0
10d	0	0	0	0	0	0	-4	-16	-15	-12	-10	28	-6	-4	-18	32	26	0	0

Tableau 56 : Résumé des relations entre les facteurs Altitude et Géomorphologie.

Code	Géomorphologie	Altitudes associées
1	Pente de la digue	Concentrée à l'altitude 8,5 m.
2	Terrain plat	Présent entre 6,5 m et 7,1 m, un maximum à 6,7 m.
3a	Pente normale faible (<1%)	Concentrée aux altitudes faibles et moyennes (3,2 m à 6,3 m), avec un maximum autour de 5,4 m correspondant à l'estran nu.
3b	Pente normale forte (>1%)	Concentrée aux basses altitudes (3,2 m à 6 m), avec un maximum autour de 5,7 m correspondant aux pentes fortes en limite slikke-schorre.
4a	Pente inverse faible (<1%)	Concentrée aux altitudes élevées (6,7 m).
4b	Pente inverse forte (>1%)	Concentrée aux altitudes élevées à (7,1 m).
5a	Levée de microfalaise	Concentrée à 8 m (microfalaise des estuaires).
5b	Bord de microfalaise sans levée	Concentré à 6,9 m.
5c	Pente de la microfalaise	Concentrée aux altitudes 6-6,3 m.
5d	Pied de la microfalaise	Autour de 6 m.
6a	Bord du chenal	Autour de 6,3 m.
6b	Fond du chenal	Autour de 4,8 m.
6c	Levée de chenal	Autour de 7,4 m.
6d	Micro-chenal	Autour de 5,7 m.
7a	Dépression peu étendue (< 10 m) et peu profonde (-10 cm)	Autour de 7,1 m.
7b	Dépression peu étendue (< 10 m) et profonde (-20 cm)	Autour de 7,1 m.
7c	Cuvette (étendue > 10 m)	Autour de 6,9 m.
7d	Dépression / vasière isolée par un cordon coquillier	Autour de 6,5 m.
8a	Levée de talus	Autour de 7,7 m.
8b	Bord de talus sans levée	Autour de 6,9 m.
8c	Pente du talus	Autour de 7,1 m.
8d	Pied de talus	Autour de 7,1 m et 6,5 m.
9a	Versant interne de cordon	Autour de 7,4 m.
9b	Sommet de cordon	Autour de 7,7 m et 6 m.
9c	Versant externe de cordon	Autour de 6 m.
9d	Avant-cordon	Autour de 6 m et 6,3 m.
10a	Petites buttes (étendue <10 m), arrondies, dans le schorre	Autour de 6 m et 6,7 m.
10b	Petites buttes, arrondies, en limite slikke-schorre	Autour de 3,2 m et 4,5 m.
10c	Petites buttes; allongées, limitées par des micro-chenaux	Entre 3,9 m et 5,1 m.
10d	Surélévation (étendue >10 m)	Autour de 7,7 m, 7,4 m et 6,5m.

Cette analyse montre que la pente et la géomorphologie ont bien une influence sur les espèces végétales des marais salés. Cependant, la connaissance de la nature d'une entité géomorphologique ne suffit pas à la détermination des espèces végétales qui la couvrent, il faut pour cela connaître au minimum l'altitude de cette entité. Les processus de cartographie automatique de la végétation des marais salés devraient intégrer à la fois les cartes d'altitude et les cartes de géomorphologie. En l'absence d'une telle carte, les images de la pente et de la direction de la pente obtenues à partir des données LiDAR pourraient être utilisées.

4.2.4. Influence du contexte sédimentaire

L'influence du contexte sédimentaire a également été étudiée par analyse fréquentielle (Tableau 57). Ces résultats sont complétés par l'analyse des liaisons entre les facteurs Altitude, Sédiment, et Géomorphologie (Tableaux 58, 59 et 60).

On peut voir qu'en générale les Tangues se rencontrent sur les terrains d'altitude élevée, tandis que les sables se retrouvent aux basses altitudes. Ceci est dû au gradient de granulométrie croissant de la côte vers le large, la mer perdant peu à peu son énergie en remontant le marais et déposant donc les sédiments les plus fins vers la côte. Ce schéma est perturbé par les cordons coquilliers. On trouve ainsi des sables bioclastiques aux altitudes élevées, au niveau des pentes de la digue de la Duchesse Anne, puisque celle-ci a été construite sur d'anciens cordons coquilliers. On trouve également des sédiments de facies coquilliers à des altitudes moyennes (6 m – 6,5 m). Ils correspondent à des cordons coquilliers progressant sur le marais. Ces sédiments sont accompagnés de vases, déposées dans les vasières situées à l'arrière des cordons.

Atriplex glabriuscula, *Elytrigia atherica*, *Festuca rubra*, *Hordeum marinum*, *Juncus maritima*, et *Plantago maritima* sont associées à la présence des Sables plus ou moins bioclastique des dunes récentes (Dz3), sédiment que l'on retrouve sur la pente de la digue ou en contrebas de celle-ci. La présence de ces espèces sur ce type de sédiment est probablement liée à l'altitude élevée entre 7,1 m et 8,5 m. *Elytrigia atherica* et *Festuca rubra* sont également associées aux Tangues de schorres récents (FMz) et aux Tangues de l'ancien estuaire du Couesnon, postérieures à 1858 (FMzp), sédiment avec lequel aucune autre espèce n'est rencontrée. *Festuca rubra*, contrairement à *Elytrigia atherica*, se rencontre également sur les Sablons et tangues sablo-argileuses (Tg), sédiment pourtant présent à des altitudes assez faibles. *Agrotis stolonifera* quand à elle se rencontre à la fois sur les Tangues de schorres récents et sur les Sables à débris des chenaux. *Aster tripolium*, *Puccinellia maritima*, et *Halimione portulacoides* sont présentes sur des sédiments de granulométrie variées, aussi bien fine (Tangues de schorres récents), que très fine (Vases très fines d'arrière-cordons coquilliers), ou au contraire grossière (Sables mêlés à des graviers, facies coquillier). Il semblerait que leur présence n'est pas liée au type de sédiment mais plus au contexte géomorphologique (notamment aux vasières en arrière de cordon coquillier). Enfin, On peut remarquer que *Salicornia sp.*, *Spartina townsendii* et *Suaeda maritima* ne se rencontrent jamais sur les Tangues de schorres récents contrairement à la plupart des autres espèces, mais sont au contraire associées avec les différents types de sables, sablons, tangues silto-argileuse, et vases.

Tableau 57 : Résultats de l'analyse fréquentielle du facteur Sédiment pour l'ensemble des points d'observation des 28 transects.

Sédiment	Dz3	FMz	FMzp	S	S-Sm	SCb	SGb	Sgb	Tf	Tg	Vc
<i>Atriplex glabriuscula</i>	+	---	+++	.	--	.	.
<i>Elytrigia atherica</i>	+++	+++	+++	---	.	---	---	---	---	---	---
<i>Festuca rubra</i>	+++	+++	+++	---	+++	---	-	.	---	+++	---
<i>Hordeum marinum</i>	++	+++	-	.	---	.	.	.	---	---	--
<i>Juncus maritima</i>	++	+	-	.	.
<i>Plantago maritima</i>	+	+++	.	.	-	.	+++	.	---	---	.
<i>Puccinellia rupestris</i>	.	+	+++	.	---	---	+++
<i>Aster tripolium</i>	---	+++	---	---	---	---	+++	+++	+	---	+++
<i>Puccinellia maritima</i>	---	+++	---	---	+++	---	+++	+++	---	++	+++
<i>Spergularia maritima</i>	---	+++	---	---	+	---	+++	+	---	+++	.
<i>Agrotis stolonifera</i>	.	+++	---	---	+++	---	---	---	---	-	---
<i>Triglochin maritimum</i>	.	+++	.	.	--	.	+++	+++	---	---	++
<i>Halimione portulacoides</i>	--	++	---	---	---	---	+++	+++	+	---	+++
<i>Spergularia media</i>	.	+++	.	.	.	+	.	.	---	-	.
<i>Trifolium pratense</i>	-	+++	--	.	---	-	---	.	---	---	--
<i>Atriplex prostrata</i>	-	+++	--	-	---	-	.	.	---	---	---
<i>Cirsium vulgare</i>	.	+++	---	--	.
<i>Glaux maritima</i>	.	+++	.	.	--	.	--	.	---	---	.
<i>Plantago coronopus</i>	.	+++	-	.	--	.	---	.	---	---	-
<i>Polygonum maritima</i>	.	+++	---	-	.
<i>Juncus gerardii</i>	.	+++	-	.	---	.	--	.	---	---	.
<i>Parapholis incurva</i>	.	+	+++	---	---	.
<i>Taraxacum sp.</i>	++
<i>Salicornia sp.</i>	-	---	---	+++	---	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Spartina townsendii</i>	.	---	---	+++	--	-	+	.	+++	+++	+++
<i>Suaeda maritima</i>	--	---	---	---	---	---	+++	+++	+	+++	+++
<i>Phragmites australis</i>	.	---	+++	.	.

Tableau 58 : Liaisons entre les facteurs Altitude (à l'horizontale) et Sédiment (à la verticale).

	3.2	3.6	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1	5.4	5.7	6.0	6.3	6.5	6.7	6.9	7.1	7.4	7.7	8.0	8.5
S	0	169	86	0	0	0	0	0	0	0	0	-7	-13	-7	-8	-5	0	0	0
Tf	118	6	19	136	125	62	315	396	113	45	5	-85	-201	-68	-217	-23	-10	-21	0
Tg	0	0	0	0	2	20	0	243	113	-16	-22	-85	-171	-24	22	24	-21	-9	0
Vc	0	0	0	0	0	0	0	-5	-5	0	22	93	-27	-12	-12	0	0	0	0
Dz3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-5	4	3	6	26	5
FMz	-80	-63	-55	-93	-106	-98	-234	-704	-188	-71	5	79	491	159	30	-8	10	18	1
Sgb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	19	-5	-5	0	0	0	0
SCb	0	0	0	0	0	0	0	19	15	35	0	-6	-13	-7	-5	-5	0	0	0
SGb	0	0	0	0	0	0	0	-11	-10	128	10	25	-19	-5	-10	-22	-8	0	0
FMzpb	0	0	0	0	0	0	0	-5	-5	0	0	-14	-25	-15	-11	74	68	0	0
S-Sm	0	0	0	0	2	5	0	0	-10	-8	-9	-27	-51	-29	132	32	-5	0	0

Tableau 59 : Liaisons entre les facteurs Sédiment (à l'horizontale) et Géomorphologie (à la verticale).

	S	Tf	Tg	Vc	Dz3	FMz	SCb	SGb	Sgb	FMzpb	S-Sm
1	0	0	0	0	39	0	0	0	0	0	0
2	-37	-176	7	-19	-6	138	-47	14	-19	-21	10
3a	54	299	4	0	-7	-217	-8	11	0	-12	-5
3b	21	102	-32	0	40	-51	0	-5	0	0	-8
4a	0	4	0	0	0	3	0	0	0	0	0
4b	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5a	0	3	0	0	0	2	0	0	0	0	0
5b	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5c	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
5d	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0
6a	0	14	33	0	0	-26	0	-7	0	0	3
6b	0	7	10	0	0	-6	0	-5	0	0	0
6c	0	4	72	-7	0	-15	0	-13	0	4	-12
6d	0	0	-7	0	0	11	0	0	0	0	0
7a	0	-7	-33	0	0	27	0	0	0	0	4
7b	0	-17	-8	0	0	21	0	0	0	0	5
7c	0	-115	-53	4	0	106	0	0	0	40	-13
7d	0	-16	-7	60	0	-14	98	0	0	0	0
8a	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	10
8b	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
8c	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	5
8d	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3
9a	0	-7	0	27	0	0	11	0	0	0	0
9b	0	0	0	7	0	-9	54	0	0	0	0
9c	0	-8	8	0	0	-10	61	0	0	0	0
9d	0	-8	5	0	0	4	3	0	0	0	0
10a	0	-21	-10	19	10	7	0	6	0	0	0
10b	0	31	0	0	0	-21	0	0	0	0	0
10c	0	72	-6	0	0	-35	0	0	0	0	0
10d	0	-4	-17	4	0	-15	0	-4	120	49	9

Cette analyse permet de connaître la composition floristique à laquelle on peut s'attendre pour chaque type de sédiment. Cependant, les différents types de sédiments correspondant à différentes altitudes et géomorphologies, il est difficile de dire si les espèces végétales sont effectivement influencées par le contexte sédimentaire, ou si leur présence n'est qu'une réponse aux facteurs Altitude et Géomorphologie. La carte des sédiments pourrait tout de même lever des incertitudes et aider à la détermination de la végétation dans le cadre d'une cartographie automatique. Un descripteur synthétique Altitude-Sédiment-Géomorphologie devrait être créé dans ce but.

Tableau 60 : Résumé des relations entre les facteurs Sédiment, Altitude et Géomorphologie.

Code	Sédiment	Altitudes associées	Géomorphologie associée
Dz3	Sables ± bioclastique des dunes récentes (postérieures aux 9-11 ^{èmes} siècles)	Concentré aux altitudes très élevées, entre 7,1 m et 8,5 m.	Pente de la digue (1)
FMzp	Tangues de l'ancien estuaire du Couesnon, postérieures à 1858 (polders)	Concentré à l'altitude 7,4 m et 7,7 m	Cuvette (7c) et Surélévation (10d)
FMz	Tangues de schorres récents	Concentré aux altitudes élevées, entre 6,3 m et 8,5 m avec un maximum à 6,7 m.	Terrain plat (2), Dépression (7a et 7b) et cuvette (7c)
Sgb	Sables bioclastiques grossiers (2mm à 500µm)	concentré aux altitudes moyennes, entre 6,5 m et 6,7 m	Surélévation (10d)
Vc	Vases très fines d'arrière-cordons coquilliers	Concentré aux altitudes moyennes : entre 6,3 m et 6,5 m.	Vasière (7d), Versant interne de cordon (9a), Petites buttes (10a).
SGb	Sables mêlés à des graviers, facies coquillier	Concentré entre 6 m et 6,5 m.	Plat (2) et pente faible (3a)
SCb	Sables mêlés à des galets, facies coquillier	Concentré aux altitudes 5,4 m et 6 m.	Vasière (7d), Versant interne de cordon (9a), Sommet de cordon (9b), Versant externe de cordon (9c)
Tf	Tangues silto-argileuses (dépôts finement rythmés de la haute slikke et du schorre)	Concentré aux altitudes faibles et moyennes, entre 3,2 m et 6,3 m, avec une liaison maximum avec l'altitude 5,4 m.	Pente faible (3a) ou forte (3b), chenaux (6a, 6b, 6c), buttes (10b, 10c)
Tg	Sablons et tangues sablo-argileuses	Concentré aux altitudes assez faibles, entre 4,5 m et 5,7 m avec un max à 5,4 m	Chenaux (6a, 6b, 6c), en particulier levée de chenaux (6c)
S	Sables très fins (lithobioclastiques)	Concentré aux altitudes les plus faibles 3,6 m et 3,9 m.	Pente faible (3a) ou forte (3b)
S-Sm	Sables à débris des chenaux (fins à moyens, mal classés, présence de micas, de débris végétaux, de tests coquilliers roulés et de galets de tangue)	Concentré entre 7,1 m et 7,4 m.	Plat(2), talus (8a) et surélévation (10d)

4.2.5. Influence de l'utilisation agricole

Si l'on considère l'ensemble des points d'observation des 28 transects, trois espèces sont rencontrées en moyenne par point, mais ce nombre varie en fonction de l'utilisation agricole du secteur (Tableau 61). La moyenne des points sans utilisation agricole est plus faible (2,6), tandis que celles des points sous utilisation agricole est plus élevées (3,4). Le nombre moyen d'espèce pour chaque type d'utilisation agricole apparaît plus élevé que la moyenne générale, sauf pour la fauche (2,5). Parmi les types de pâturage, le pâturage bovin présente le nombre moyen d'espèce le plus élevé (5,5). Il semblerait donc que le pâturage conduit à une augmentation du nombre d'espèces végétales présentes sur les marais salés.

Tableau 61 : Nombre moyen d'espèces par point d'observation selon l'utilisation agricole.

Utilisation	Nombre de point	Nombre moyen d'espèces par point
Ensemble des points	9811	3
Sans utilisation agricole	4935	2,6
Toutes utilisations agricoles	4876	3,4
Fauche (F)	138	2,5
Pâturage ovin (P/O)	3578	3,5
Pâturage ovin et fauche	299	2,3
Pâturage bovin (P/B)	89	5,5
Pâturage bovin et fauche	35	3,5
Pâturage ovin et bovin	211	3,4
Pâturage ovin, bovin, et equin	526	3,5

Il convient maintenant d'identifier qu'elles sont les espèces favorisées par l'utilisation agricole des marais, ce qui a été réalisé par analyse fréquentielle (Tableau 62). Les liaisons entre les facteurs Utilisation, Altitude, et Géomorphologie ont également été étudiées (Tableaux 63, 64, 65). L'étude des liaisons entre les facteurs Utilisation et Altitude permet tout d'abord de voir à quelle altitude moyenne se pratiquent les différents type d'utilisation agricole, afin de mieux comprendre les liens entre le pâturage et la végétation. Par exemple, la fauche se pratique majoritairement à l'altitude 6,9 m. L'absence d'espèces halophiles telles que *Salicornia sp.* ou *Spartina townsendii* sur les terrains fauchés ne vient donc pas de la sensibilité de ces plantes à cette activité agricole, mais bien de l'altitude des secteurs fauchés, trop élevée pour permettre le développement de ces espèces. Par ailleurs, les liaisons entre les facteurs Utilisation et Géomorphologie permettent de voir le pâturage, en particulier le pâturage ovin, est associé avec les terrains plats, ainsi que la présence de levée de chenaux ou de microfalaise. Les levées proviennent de l'accumulation de sédiments lorsque l'eau s'engouffre dans les chenaux à marais hautes (ref). On peut émettre l'hypothèse que sur les secteurs paturés, le tassement du terrain par les troupeaux qui évitent les bords des chenaux rend les levées plus saillantes et celle-ci sont alors plus visibles sur les données LiDAR.

Tableau 62 : Résultats de l'analyse fréquentielle du facteur Utilisation pour l'ensemble des points d'observation des 28 transects.

Utilisation	NP	F	P/O	P/O-F	P/B	P/B-F	P/O-P/B	P/O-P/B-P/ E
<i>Atriplex glabriuscula</i>	+
<i>Carex sp.</i>	+
<i>Convolvulus sp.</i>	++	.	-
<i>Juncus maritima</i>	+++	.	---
<i>Phragmites australis</i>	+++	.	--
<i>Scirpus maritimus</i>	+++	.	---
<i>Atriplex prostrata</i>	+++	---	---	---	.	+++	+++	---
<i>Elytrigia atherica</i>	+++	+++	---	+++	---	+	+++	+++
<i>Halimione portulacoides</i>	+++	---	---	---	+++	-	---	---
<i>Aster tripolium</i>	++	---	+++	---	.	.	+++	---
<i>Salicornia sp.</i>	+++	---	---	---	+++	--	+	---
<i>Spartina townsendii</i>	+++	---	---	---	--	--	+++	---
<i>Suaeda maritima</i>	+++	---	+++	---	+++	---	+++	---
<i>Agrotis stolonifera</i>	---	+++	+++	---	---	---	---	+++
<i>Cirsium vulgare</i>	---	.	+++	--
<i>Festuca rubra</i>	---	---	+++	-	++	-	+++	+++
<i>Glaux maritima</i>	---	--	+++	+++	-	.	---	---
<i>Hordeum marinum</i>	---	-	+++	-	.	.	---	---
<i>Juncus gerardii</i>	---	---	+++	+++	--	.	.	---
<i>Parapholis incurva</i>	---	.	+++	-	.	.	.	--
<i>Plantago maritima</i>	---	-	+++	+++	.	.	--	---
<i>Plantago mayor</i>	--	.	+++
<i>Polygonum maritima</i>	---	.	+++	-
<i>Puccinellia maritima</i>	---	+++	+++	---	+++	+++	+++	---
<i>Triglochin maritimum</i>	---	--	+++	---	+++	+++	--	---
<i>Spergularia maritima</i>	---	---	+++	---	+++	++	---	---
<i>Spergularia media</i>	---	.	+++	-
<i>Taraxacum sp.</i>	---	.	+++	+++
<i>Trifolium pratense</i>	---	---	+++	+	---	.	---	+++
<i>Puccinellia rupestris</i>	--	--	+++	---	-	.	---	---
<i>Plantago coronopus</i>	---	---	---	+++	-	+++	---	+++

Tableau 63 : Liaisons entre les facteurs Altitude (à l'horizontale) et Utilisation (à la verticale).

	3.2	3.6	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1	5.4	5.7	6.0	6.3	6.5	6.7	6.9	7.1	7.4	7.7	8.0	8.5
F	0	0	0	0	0	0	0	-10	-10	-8	-9	-15	-7	229	-19	-22	-8	0	0
NP	38	30	26	44	50	53	141	510	342	159	51	-6	8	-6	-496	-266	-107	-68	2
PB	0	0	0	0	0	0	0	-7	-6	-5	-6	-18	-11	200	-19	-14	-5	0	0
PO	-25	-20	-17	-29	-33	-35	-93	-335	-265	-72	-10	73	7	-168	800	177	-98	-67	0
PB-F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-7	-10	-7	50	6	0	0	0
PO-F	0	0	0	0	0	0	-6	-23	-22	-17	-19	-17	151	19	-65	-10	5	-5	0
POP	0	0	0	0	0	0	-4	-16	-15	-12	-13	-37	-23	377	-8	-33	-12	0	0
POPPE	0	0	0	0	0	0	-11	-41	-6	-30	-29	-108	-200	-116	-71	130	747	392	0

Tableau 64 : Liaisons entre les facteurs Utilisation (à l'horizontale) et Géomorphologie (à la verticale).

	F	NP	P/B	P/O	P/B-F	P/O-F	P/O-P/B	P/O-P/B-P/
1	0	5	0	0	0	0	0	0
2	0	-144	-47	220	-10	7	-6	-8
3a	-24	260	-15	-239	-6	-51	59	-9
3b	6	166	-5	-127	25	-17	-12	-30
4a	0	48	0	-31	0	0	0	0
4b	0	0	0	4	0	0	0	0
5a	0	0	0	-12	0	0	0	30
5b	0	2	0	0	0	0	0	0
5c	0	4	0	-7	0	0	0	6
5d	0	5	0	-7	0	0	0	3
6a	0	20	0	-23	0	-5	-11	14
6b	6	5	0	-9	1	0	-7	9
6c	17	-26	-8	18	3	-8	3	8
6d	0	24	0	-17	0	0	2	0
7a	8	-31	-8	26	0	-6	-10	17
7b	0	-8	0	12	0	0	0	4
7c	0	-162	196	16	15	49	12	5
7d	0	65	0	-39	0	0	0	-7
8a	0	-10	0	4	0	0	0	11
8b	0	0	0	3	0	0	0	0
8c	0	-9	0	5	0	0	0	9
8d	0	-8	0	3	0	0	0	11
9a	0	24	0	-14	0	0	0	0
9b	0	20	0	-13	0	0	0	0
9c	0	46	0	-30	0	0	0	0
9d	0	44	0	-29	0	0	0	0
10a	0	20	0	-6	0	-5	0	-9
10b	0	10	0	-7	0	0	0	0
10c	0	71	0	-47	0	0	0	-6
10d	0	-10	14	0	0	79	-7	-17

Tableau 65 : Résumé des relations entre les facteurs Sédiment, Altitude et Géomorphologie.

Code	Utilisation	Altitudes associées	Géomorphologie associée
NP	Non pâturé (ni fauché)	3,2 m et 6,7 m	Digue (1), Pente (3), micro-falaise (5) sauf celles avec levées, chenaux (6) sauf ceux avec levées, vasière (7d), cordons coquilliers (9), buttes (10)
F	Fauche	6,9 m	Levée de chenaux (6c), Pente forte (3b)
PB	Pâturage bovin	6,9 m	Cuvette (7c) et surélévation (10d)
PO	Pâturage ovin	entre 6,5 m et 6,7 m et entre 7,1 m et 7,4 m	Plat (2), levée de chenaux (6c), dépressions (7) sauf vasières, talus (8)
PB-F	Pâturage bovin et fauche	7,1-7,4	Pente forte (3b), Cuvette (7c)
PO-F	Pâturage ovin et fauche	entre 6,7 m et 6,9 m et à 7,7 m	Plat (2), Cuvette (7c), surélévation (10d)
PO-PB	Pâturage ovin et bovin	6,9 m	Pente faible (3a), Cuvette (7c)
PO-PB-PE	Pâturage ovin, bovin et équin	7,4 m et 8 m	Levée de microfalaise (5a), chenaux (6), dépressions peu étendues (7a), talus (8)

L'analyse fréquentielle permet de distinguer deux groupes d'espèces végétales : les espèces liées positivement à l'absence de pâturage (*Elytrigia atherica*, *Atriplex prostrata*, *Halimione portulacoides*, *Salicornia sp.*, *Spartina townsendii*, *Suaeda maritima...*), et les espèces liées négativement à l'absence de pâturage, (*Agrostis stolonifera*, *Festuca rubra*, *Hordeum marinum*, *Puccinellia maritima*, *Plantago sp.*, *Triglochin maritimum...*).

13 espèces sont liées positivement à l'absence de pâturage. Elles peuvent être présentes soit uniquement en l'absence de pâturage (*Atriplex glabriuscula*, *Juncus maritima*, *Phragmites australis*, *Scirpus maritimus...*), soit en l'absence de certain type de pâturage seulement. Par exemple, *Halimione portulacoides* n'est présente qu'en l'absence de pâturage ovin. On peut ainsi la rencontrer en présence de pâturage bovin. Cette espèce présente donc une sensibilité différente aux deux types de pâturage. Les relations entre *Elytrigia atherica* et l'utilisation agricole ne sont pas claires. En effet cette espèce présente une liaison négative avec les pâturages ovins et bovins pratiqués seul, mais une liaison positive avec les deux types de pâturage mélangé, ou un type de pâturage accompagné de fauche. Nous pouvons nous demander si le pâturage a une influence réelle sur cette espèce.

18 espèces sont liées négativement à l'absence de pâturage, c'est-à-dire favorisées par le pâturage. Elles sont donc présentes majoritairement à l'Est de la Baie, autour du Mont-Saint-Michel et dans la zone des estuaires où le pâturage est particulièrement intensif. Sur ces 18 espèces, sept ne sont pas des plantes caractéristiques de marais salés, il s'agit de : *Agrostis stolonifera*, *Festuca rubra*, *Cirsium vulgare*, *Plantago major*, *Taraxacum sp.*, *Trifolium pratense* et *Plantago coronopus*. L'augmentation du nombre d'espèces végétales sur les marais salés pâturés vient donc en partie du nombre d'espèces continentales que le pâturage favorise. Parmi ces espèces, nous avons vu que *Agrostis stolonifera* était omniprésente sur les secteurs pâturés d'altitude élevée. Cette espèce est liée positivement à la fauche et au pâturage ovin. *Puccinellia maritima* est également très favorisée par l'utilisation agricole du marais. Elle est liée quand à elle aussi bien à la fauche, au pâturage ovin, qu'au pâturage bovin. *Festuca rubra* est liée négativement à l'absence de pâturage. Cette espèce serait liée au pâturage ovin et bovin, mais pas à la fauche, ce qui est en désaccord avec les résultats selon lesquels la fauche favoriserait *Festuca rubra* par rapport à *Elytrigia atherica* (Tessier, 1999).

Le pâturage est donc une condition nécessaire au développement d'un certain nombre d'espèces, parmi lesquels se trouvent à la fois des espèces de marais salés et des espèces continentales. De même, l'absence de pâturage favorise le développement de certaines espèces. La carte de l'utilisation agricole peut donc lever des indecisions lors d'un processus de cartographie des marais salés.

L'ensemble des résultats concernant les facteurs Altitudes, Géomorphologie, Sédiment et Utilisation, a été rassemblé dans le Tableau 66.

Tableau 66 : Résumé des relations entre les espèces végétales des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel et les facteurs Altitude, Géomorphologie, Sédiment, et Utilisation.

Espèce	n	Altitudes(m)	Géomorphologie	Sédiment	Utilisation
<i>Agrotis stolonifera</i>	1898	7,2 - 9,4	1, 2, 4, 6(a,b,c), 7(a,b,c), 8(a,c,d)	FMz,S-Sm	F,PO,PB,P E
<i>Aster tripolium</i>	1765	(5,0) 6,0 - 7,0	3, 5a, 6d, 7d, 9(a,d), 10 (a,c,d)	FMz,SGb, Sgb,Vc	NP, PO,PB
<i>Atriplex glabriuscula</i>	45	6,6 - 7,2	2,3a,9a	Dz3, SGb	NP
<i>Atriplex prostrata</i>	763	6,0 - 7,0	2,3a,6d,7c,8b,10c	FMz	NP, PO,PB,F
<i>Beta vulgaris</i>	1	7,8			
<i>Carex sp.</i>	3	7,8	2		NP
<i>Cerastium sp.</i>	1		8a		
<i>Cirsium vulgare</i>	81	7,2 - 7,4	2,4b,7a,8c	FMz	PO
<i>Convolvulus sp.</i>	5	7,8			
<i>Elytrigia atherica</i>	3830	6,8 - 8,4	1,2,4,6,7(b,c),8a,9a,10(a,d)	Dz3,FMz,FMzp	NP F,PO,PB,P E
<i>Festuca rubra</i>	2061	7 - 10	1,2,4b,5a,6(a,b,c),7(a,c),8 b	Dz3,FMz,FMzp, S-Sm,Tg	PO,PB,PE
<i>Glaux maritima</i>	326	6,8 - 7	2,7(a,c),10(a,d)	FMz	F,PO
<i>Halimione portulacoides</i>	2883	6 - 7,2	2,3b,4a,5b,6(a,b,c),8(b,c), 10a	FMz,SGb,Sgb,Tf, Vc	NP,PB
<i>Hordeum marinum</i>	470	6,8 - 7,4 (9,4)	2,7(a,b)	Dz3,FMz	PO
<i>Juncus maritima</i>	29	7,2 - 8	2	Dz3,FMz	NP
<i>Juncus gerardii</i>	441	6,8 - 7,4	2,4b,7(a,c)	FMz	F,PO
<i>Lolium perenne</i>	2	7,4	7a		
<i>Parapholis incurva</i>	88	6,2 - 6,8	2,3a,10d	FMz ,Sgb	PO
<i>Phragmites australis</i>	10	6,6	3	Tf	NP
<i>Plantago coronopus</i>	372	7,6 - 8,2	2,6(a,b,c),7c,8(a,c,d)	FMz	F,PO,PB,P E
<i>Plantago maritima</i>	183	7 - 7,6	2,7c,8d	Dz3,FMz,SGb	F,PO
<i>Plantago mayor</i>	5	7,4 - 7,6	10d		PO
<i>Polygonum maritima</i>	48	7,4 - 7,6	2,10d		PO
<i>Puccinellia maritima</i>	5038	6,2 - 7,6	2,5b,6c,7(b,c),8(a,d),10(a, d)	FMz,S-Sm,SGb, Sgb,Tg,Vc	F,PO,PB,P E
<i>Puccinellia rupestris</i>	270	5,8 - 6,8	1,2,3	FMz,,SGb,Vc	PO
<i>Salicornia sp.</i>	1962	3,8 - 6,6	1,3,5c,7(c,d),9(a,b,d),10c	S,SCb,SGb, Sgb,Tf,Tg,Vc	NP,PB,PO
<i>Scirpus maritimus</i>	18	7	3b,7c		NP
<i>Spartina townsendii</i>	1070	3,2 - 6,4	1,3,6d,7d,9(a,d),10(b,c)	S, SGb,Tf,Tg,Vc	NP,PO,PB
<i>Spergularia media subsp media</i>	1656	6,6 - 7,6	2,7b,9c	FMz,SCb	PO
<i>Spergularia maritima</i>	46	5,6 - 6,8	2,5b,7c,10d	FMz,S-Sm,Sgb,Tg	F,PO,PB
<i>Suaeda maritima</i>	3299	4,6 - 6,6	2,3,6d,7d,9d,10(c,d)	SGb, Sgb,Tf,Tg,Vc	NP,PO,PB
<i>Taraxacum sp.</i>	23	7,4 - 7,6	6(b,c)	S-Sm	F,PO
<i>Trifolium pratense</i>	620	7,2 - 8,2	2,4b,6(a,b,c),7a,8(a,c,d),	FMz	F,PO,PB,P E
<i>Triglochin maritimum</i>	355	6,6 - 7,2	2,7a,9a,10d	FMz,SGb,Sgb,Vc	F,PO,PB

Ce tableau indique les états des facteurs Altitudes, Géomorphologie, Sédiment et Utilisation avec lesquels chaque espèce présente une liaison positive. On peut voir que généralement une espèce est présente sur une plage d'altitude importante (de 0,6 m en moyenne), et pour plusieurs types de sédiment, géomorphologie et d'utilisation agricole.

4.2.6. Etude de la réflectance dans le Rouge, le Vert, et le Bleu

L'orthophotographie a été utilisée pour connaître la quantité d'énergie réfléchie dans les canaux Rouge, Vert et Bleu, au niveau de chaque point d'observation. Cette quantité d'énergie, appelée luminance, est comprise entre 0 et 255. Ces valeurs ont été traitées par analyse fréquentielle (Tableaux 63, 64, 65) pour savoir à quelles luminances sont liées chacune des espèces végétales. On cherche ainsi à savoir s'il est possible de reconnaître les différentes espèces sur l'orthophotographie.

On peut voir que chaque espèce est liée à des valeurs de luminance similaires dans le Rouge, le Vert, et le Bleu. Chaque espèce présente donc une signature spectrale proche dans les trois canaux. Cela peut être dû aux différentes manipulations qu'a subies l'orthophotographie avant d'être utilisée dans ce travail, notamment l'homogénéisation des couleurs pendant le mosaïcage des dalles de 1 km de côté.

On peut distinguer trois comportements : les espèces présentant une luminance faible (inférieure à 100), celles présentant une luminance moyenne (entre 100 et 150), et enfin celles présentant d'une part des luminances faibles (inférieure à 60), d'autres part des luminances fortes (supérieure à 160). Dans une première approche, on peut remarquer que ces trois groupes correspondent respectivement aux espèces de moyenne altitude, haute altitude, et basse altitude.

Les espèces végétales présentant une luminance faible dans les trois canaux sont celles qui ressortent en sombre sur l'orthophotographie. Il s'agit notamment d'*Atriplex prostrata*, *Halimione portulacoides*, *Aster tripolium*, et *Puccinellia maritima*. Ces espèces sont toutes des espèces de moyenne altitude. On peut remarquer qu'*Halimione portulacoides* présentent également des liaisons positives avec certains valeurs de luminances élevées (>100). Il faut en effet considérer le fait que selon leur densité, les espèces peuvent avoir une influence plus ou moins importante sur la luminance d'un pixel. Ainsi, une zone monospécifique à *Halimione portulacoides* aura une couleur claire sur l'orthophotographie, donc des luminances élevées, à cause de la couleur vert argenté de cette espèce, alors qu'une zone présentant plusieurs espèces végétales dont *Halimione portulacoides* pourra être foncée si celle-ci est présente en faible densité. De même, *Aster tripolium* présente des liaisons positives avec des luminances

très élevées (>200). Ceci peut être dû à la couleur blanche ou rose claire des fruits de cette espèce, dont la densité peut être très élevée dans certaine zone de la Baie. Il faut également tenir compte du fait qu'une espèce peut présenter des valeurs de luminance ne correspondant pas à sa couleur sur le terrain mais aux valeurs de luminance des espèces dominant les secteurs où on la rencontre. C'est le cas par exemple de *Triglochin maritimum* dont la faible densité sur le terrain ne permet pas d'avoir une réelle influence sur la luminance d'un pixel, et qui présente ici des valeurs de luminances similaires à *Atriplex prostrata*, *Halimione portulacoides*, et *Puccinellia maritima*, espèces avec lesquelles on peut la rencontrer.

Les espèces présentant des valeurs de luminances moyennes ressortent en clair sur l'orthophotographie. Il s'agit par exemple d'*Agrotis stolonifera*, *Elytrigia atherica*, et *Festuca rubra*. Ces graminées apparaissent en effet en clair sur l'orthophotographie, et ces espèces dominant les secteurs pâturés déterminent les valeurs de luminance d'autres espèces moins denses telles que *Trifolium pratense*, *Plantago maritima* et *Plantago coronopus*.

Enfin, les espèces de basse altitude telles que *Salicornia sp.*, *Spartina townsendii* et *Suaeda maritima* présentent des valeurs de luminance à la fois basses et élevées. Nous pouvons émettre l'hypothèse que les valeurs de luminance basses, c'est-à-dire les zones sombres, correspondent aux secteurs où les plantes sont présentes en densité élevée, tandis que les valeurs de luminance élevées, donc les zones claires, correspondent aux zones de haute slikke où la végétation pousse de façon dispersée sur l'estran nu.

Cette analyse montre qu'il est possible de distinguer sur l'orthophotographie le haut schorre, le moyen et bas schorre, et la haute slikke. Le moyen et le bas schorre présentent les mêmes gammes de luminance dans les trois canaux, mais l'indécision peut être levée par l'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain, le moyen schorre correspondant à des altitudes plus élevées que le bas schorre. Une classification automatique de l'orthophotographie couplée au modèle numérique de terrain offre donc un bon potentiel pour la cartographie de la végétation des marais salés, mais ne permettra pas l'identification de chaque espèce. En effet selon leur taille et leur densité, les espèces peuvent avoir une influence plus ou moins importante sur la luminance d'un pixel. Ce sont les espèces dominantes que l'on reconnaîtra par photointerprétation ou classification, et on en déduira la présence des espèces accompagnatrices.

Tableau 63 : Résultats de l'analyse fréquentielle de la luminance dans le Rouge pour l'ensemble des points d'observation des 28 transects.

Rouge	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	255			
<i>Juncus maritima</i>	+++	+		
<i>Parapholis incurva</i>	+++	+++	+++	+++	++	.	+	-	.	--	-	---	---	---	-	--		
<i>Triglochin maritimum</i>	+	+++	++	+++	+++	+	+	.	.	-	.	+	.	-	.	--	---	---		
<i>Atriplex prostrata</i>	+++	+++	+++	+++	+++	++	++	.	.	--	--	---	---	---	---	-	--	-	---	---	-	-	-	-	-	-	-	---		
<i>Halimione portulacoides</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	---	+	--	---	---	+	+	-	--	--	--	---	-	.	-	-	.	-	.	.	.		
<i>Puccinellia maritima</i>	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	++	-	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-	-	.	--	---	---		
<i>Scirpus maritimus</i>	+++	+	.	++	
<i>Aster tripolium</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+	+	+	-	-	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-	.	-	.	+	.	.	++		
<i>Phragmites australis</i>	.	.	+	.	+++	
<i>Atriplex glabriuscula</i>	+	++	
<i>Agrotis stolonifera</i>	---	---	---	---	---	-	---	+	-	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	---	---	---	---	---	---	---	---	-	-	+	---	
<i>Elytrigia atherica</i>	---	---	---	---	---	---	+	-	+	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	+	---	---	---	---	---	---	---	---	-	-	+	---	
<i>Festuca rubra</i>	-	+	-	-	---	---	---	-	-	-	+++	+++	+++	+++	+++	+	+	---	---	---	.	--	-	-	-	-	-	-	---	
<i>Glaux maritima</i>	---	-	.	.	--	--	--	.	++	++	++	++	.	+	+++	-	.	.	-	--	---	
<i>Juncus gerardii</i>	+++	++	.	.	-	-	-	-	.	-	+	++	.	+++	++	+	.	.	-	---	--	.	--	-	---	
<i>Trifolium pratense</i>	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-	+	+++	+++	+++	+++	+++	-	--	---	---	---	---	---	---	-	-	.	.	---	
<i>Plantago coronopus</i>	---	--	---	---	---	.	.	.	+	.	.	+++	+++	+++	++	+	.	---	-	--	-	-	---	
<i>Plantago maritima</i>	+	+++	.	++	--	-	--	--	-	.	-	+++	++	+	+++	.	--	-	
<i>Polygonum maritima</i>	-	-	.	.	.	+++	++	+	+	.	.	
<i>Hordeum marinum</i>	.	-	-	-	-	-	++	+	+	+++	+	++	+	--	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	---	
<i>Plantago mayor</i>	++
<i>Carex sp.</i>	+
<i>Cirsium vulgare</i>	.	.	.	-	-	-	-	--	.	-	.	.	+++	++	+	+++
<i>Convolvulus sp.</i>	+
<i>Puccinellia rupestris</i>	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	.	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	+++
<i>Salicornia sp.</i>	+	++	+	+++	+++	+	--	-	---	---	---	---	---	---	--	+	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	+++	
<i>Spartina townsendii</i>	+++	+++	.	.	.	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	+	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	+	+++	
<i>Spergularia maritima</i>	+	+	+	.	-	--	-	-	+	+	+++	+	-	---	--	---	---	---	-	-	+	+++	+++	++	++	
<i>Spergularia media</i>	.	+	.	+++	-	.	.	-
<i>Suaeda maritima</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	++	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-	++	+	+++	+++	+++	+++	.	-	.	.	
<i>Lolium perenne</i>	+	.	.	++	.	.	.

Tableau 64 : Résultats de l'analyse fréquentielle de la luminance dans le Vert pour l'ensemble des points d'observation des 28 transects.

Vert	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	255	
<i>Juncus maritima</i>	+++	.	.	+
<i>Parapholis incurva</i>	+++	++	+++	+	.	-	.	-	--	---	---	---	--	--	--	-
<i>Triglochin maritimum</i>	+++	+++	+	+	.	.	.	-	-	-	-	-	-	-	.	--	---	-	-	-
<i>Atriplex prostrata</i>	+++	+++	+++	++	++	+	++	.	-	-	--	--	-	---	-	---	---	---	---	---	---	---	-	---
<i>Halimione portulacoides</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+	--	---	---	--	+	--	-	---	---	---	---	++	.	---	--	-	-
<i>Puccinellia maritima</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+++	++	+++	+++	++	-	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-	---
<i>Scirpus maritimus</i>	++	.	.	.	++
<i>Aster tripolium</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+	-	-	-	-	-	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	.	.	.	++	.	+++
<i>Phragmites australis</i>	.	+	.	++	.	+
<i>Atriplex glabriuscula</i>	++
<i>Agrotis stolonifera</i>	---	---	---	---	---	---	---	---	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	++	-	---	---	---	---	---	-	---	.	-	---	---
<i>Elytrigia atherica</i>	---	---	---	---	---	-	++	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	++	-	---	---	---	---	---	---	-	.	.	-	---	---
<i>Festuca rubra</i>	-	---	-	---	---	-	--	+	+++	++	+++	+++	+++	+++	-	-	+	--	---	---	---	---	.	-	-	.	.	-
<i>Glaux maritima</i>	---	--	--	.	-	-	+	+	++	++	+	.	+	-	---
<i>Juncus gerardii</i>	++	-	-	+++	++	+++	.	-	.	.	.	-	--
<i>Trifolium pratense</i>	---	---	---	---	---	---	---	--	.	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+	--	.	.	-	-	---	-	.	.	.	---
<i>Plantago coronopus</i>	---	---	---	---	---	---	.	++	+	+++	+++	+++	+++	+++	++	.	.	--	--	--	-	---
<i>Plantago maritima</i>	+	.	.	.	-	--	--	-	-	.	.	+	+++	+	++	.	--	+	.	.	.
<i>Polygonum maritima</i>	-	.	.	.	-	-	-	-	-	-	.	+	+++	.	+++	+	.	+	+	.	.	.
<i>Hordeum marinum</i>	.	.	+	.	.	+	+	+	.	+	.	.	.	--	-	---
<i>Plantago mayor</i>	++
<i>Carex sp.</i>	+	+
<i>Cirsium vulgare</i>	--	.	.	.	-	--	.	.	--	.	.	+++	+++	++	+	.	+	.	+
<i>Convolvulus sp.</i>	++
<i>Puccinellia rupestris</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+	.	--	---	---	-	---	---	---	---	--	--	---	.	.	.	-	.	++	.	+	+++	
<i>Salicornia sp.</i>	+++	+++	++	+++	+	-	--	---	---	---	---	---	---	--	+	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	+	+++	+++	++	+++
<i>Spartina townsendii</i>	+++	++	.	-	-	---	---	---	---	---	---	---	---	-	+	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Spergularia maritima</i>	+	-	++	.	+	++	+	+	+++	++	--	-	---	---	-	---	---	---	---	+	+	+	.	+	++	.	.	+
<i>Spergularia media</i>	+++	++	+++	+
<i>Suaeda maritima</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-	++	+	+++	.	+	++	++	.	.	
<i>Lolium perenne</i>	+	.	.	.	++	.	.	.

Tableau 65 : Résultats de l'analyse fréquentielle de la luminance dans le Bleu pour l'ensemble des points d'observation des 28 transects.

Bleu	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	255		
<i>Juncus maritima</i>	+++	.	.	+	.	+	.	.	-	-	
<i>Parapholis incurva</i>	+++	+++	++	+++	.	--	-	---	---	---	---	--	--	.	-	.	+	
<i>Triglochin maritimum</i>	+++	+++	+++	.	.	+	.	---	.	+	-	.	--	---	--	-	-	
<i>Atriplex prostrata</i>	+++	+++	+++	+++	++	--	-	---	-	---	-	.	-	-	-	-	-	.	.	.	-	-	---		
<i>Halimione portulacoides</i>	+++	+++	+++	+++	+	-	-	--	-	+	---	-	---	--	---	++	.	---	--	-	.	+	-	-	
<i>Puccinellia maritima</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	-	-	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-	-	---	---	
<i>Scirpus maritimus</i>	++	.	.	+++	
<i>Aster tripolium</i>	+++	+++	+++	+++	+++	---	--	---	---	--	---	--	---	---	---	---	.	--	--	.	.	+	+	.	++	.	++	.	
<i>Phragmites australis</i>	.	.	+++	.	.	++	
<i>Atriplex glabriuscula</i>	++	
<i>Agrotis stolonifera</i>	---	---	---	---	---	---	+	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	-	---	---	---	---	---	---	-	-	---	.	--	.	---	
<i>Elytrigia atherica</i>	---	---	---	--	-	-	++	+++	+++	+++	+++	+++	+	--	---	--	---	---	---	---	-	-	---
<i>Festuca rubra</i>	-	-	--	--	---	---	-	+	+++	+++	+++	+++	-	-	---	--	-	---	---	-	-	
<i>Glaux maritima</i>	---	-	.	--	.	+++	.	+++	++	+	++	-	.	.	-	--	
<i>Juncus gerardii</i>	+	-	.	.	--	+	+	.	+	.	+	+++	-	.	.	--	-	.	--	.	-	-	--	
<i>Trifolium pratense</i>	---	---	---	---	---	---	.	++	+++	+++	+++	+++	+++	.	.	---	---	-	-	--	--	-	---	
<i>Plantago coronopus</i>	---	---	---	---	---	.	++	+++	+++	+	+++	++	+	.	--	.	-	-	--	---	
<i>Plantago maritima</i>	.	.	.	--	--	.	-	-	+	+++	++	++	-	.	-	-	
<i>Polygonum maritima</i>	-	.	.	-	-	-	-	.	.	.	+++	+	++	+	++	.	.	
<i>Hordeum marinum</i>	---	++	+	.	+++	+	+	+	-	.	.	-	-	.	.	-	---	
<i>Plantago mayor</i>	++
<i>Taraxacum sp.</i>	+
<i>Cirsium vulgare</i>	--	-	-	.	--	--	.	.	+	++	+++	+++
<i>Convolvulus sp.</i>	+	+
<i>Puccinellia rupestris</i>	+++	+++	+++	+++	+++	.	.	---	---	--	---	---	---	--	--	---	---	---	---	---	++	+++	++	+++	.	++	.	+++	
<i>Salicornia sp.</i>	+++	+++	+	+	+	--	-	---	---	---	---	---	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	++	+++	++	+++	.	++	.	+++	
<i>Spartina townsendii</i>	+++	.	+	-	--	---	---	---	---	---	---	-	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	++	++	++	++	+++	
<i>Spergularia maritima</i>	-	-	-	+	++	++	+	+	+	-	---	--	---	-	.	.	+	+++	++	.	+	+	++	
<i>Spergularia media</i>	+	+	-	-	+	.	.	.	++	.	
<i>Suaeda maritima</i>	+++	+++	+++	+++	+++	++	--	---	---	---	---	---	---	---	-	-	++	++	+++	.	+	+	+	.	.	-	.	.	
<i>Lolium perenne</i>	+	.	.	.	++	.	.	.	

4.2.7. Identification des associations végétales de la Baie du Mont-Saint-Michel

Nous avons réalisé des analyses fréquentielle sur l'ensemble des données de végétation. Seules les données de composition floristique sont prises en compte ici, c'est-à-dire les espèces sont regroupées en tenant compte du fait qu'on les retrouve fréquemment ensemble, et non pas en fonction des facteurs écologiques. L'analyse fréquentielle des données de végétation de l'ensemble des transects permet d'identifier quatre groupements végétaux (Diagramme 9).

Diagramme 9 : Associations végétales identifiées par analyse fréquentielle sur l'ensemble des transects (seules les liaisons les plus fortes sont conservées).

Association végétale n° 1		
PLAC <i>Plantago coronopus</i>	-----*	1160
TRIF <i>Trifolium pratense</i>	-----*	954
AGRO <i>Agrostis stolonifera</i>	-----*	542
FEST <i>Festuca rubra</i>	-----*	416
ELYT <i>Elytrigia atherica</i>	-----*	330
CIRS <i>Cirsium vulgare</i>	-----*	153
PLAN <i>Plantago maritima</i>	-----*	139
HORD <i>Hordeum marinum</i>	-----*	126
JUNC <i>Juncus gerardii</i>	-----*	81
POLY <i>Polygonum maritima</i>	-----*	44
JUMA <i>Juncus maritima</i>	-----*	42
SCIR <i>Scirpus maritimus</i>	-----*	36
TARA <i>Taraxacum sp.</i>	-----*	23
PMAY <i>Plantago major</i>	-----*	
Association végétale n° 2		
ASTE <i>Aster tripolium</i>	-----*	1068
SUAE <i>Suaeda maritima</i>	-----*	1020
SALI <i>Salicornia sp.</i>	-----*	853
PUCC <i>Puccinellia maritima</i>	-----*	720
SPMA <i>Spergularia maritima</i>	-----*	690
SPAR <i>Spartina x townsendii</i>	-----*	575
PUCR <i>Puccinellia rupestris</i>	-----*	560
HALI <i>Halimione portulacoides</i>	-----*	527
ATRI <i>Atriplex prostata</i>	-----*	116
GLAU <i>Glaux maritima</i>	-----*	73
ATRG <i>Atriplex glabriuscula</i>	-----*	
Association végétale n° 3		
PARA <i>Parapholis incurva</i>	-----*	216
TRIG <i>Triglochin maritimum</i>	-----*	37
SPER <i>Spergularia media subsp. media</i>	-----*	

Association végétale n° 4	
CARE Carex sp.	-----*
CONV Convolvulus sp.	-----*
BETA Beta vulgaris	-----*
	37
	13

L'association végétale n°1 rassemble des espèces d'altitude élevée (7 m et plus) et pour la plupart la plupart défavorisées par l'absence de pâturage. L'association 2 correspond aux espèces de moyenne et basse altitude (autour de 6 m et jusqu'à 3,2) et presque toutes favorisées par l'absence de pâturage. L'association 3 rassemble trois espèces présentes autour de 6,8 m d'altitude et sous pâturage ovin. Enfin l'association 4 rassemble trois espèces rarement rencontrées sur le marais ($n \leq 5$), et toutes à l'altitude 7,8 m en l'absence de pâturage.

La présence ou l'absence de pâturage semble donc être un critère d'importance majeur pour définir les espèces vivant fréquemment ensemble. Afin préciser les relations entre les espèces, nous avons donc considéré séparément les secteurs sous pâturage ou fauche, et les secteurs sans utilisation agricole. Nous avons réalisé des analyses fréquentielles sur ces deux jeux de données afin d'identifier les espèces vivant fréquemment ensemble dans les deux conditions.

Cinq associations végétales ont été définies sur les zones non pâturées (Diagramme 10).

Diagramme 10 : Associations végétales identifiées par analyse fréquentielle sur les secteurs non pâturés ni fauchés (seules les liaisons les plus fortes sont conservées).

Association végétale n° 1	
ASTE Aster tripolium	-----*
SUAE Suaeda maritima	-----*
PUCC Puccinellia maritima	-----*
ATRI Atriplex prostrata	-----*
HALI Halimione portulacoides	-----*
TRIG Triglochin maritimum	-----*
GLAU Glaux maritima	-----*
PARA Parapholis incurva	-----*
PLAN Plantago maritima	-----*
ATRG Atriplex glabriuscula	-----*
SPER Spergularia media subsp. media	-----*
	38
	15
Association végétale n° 2	
SALI Salicornia sp.	-----*
SPAR Spartina x townsendii	-----*
SPMA Spergularia maritima	-----*
PUCR Puccinellia rupestris	-----*
	528
	407
	217

Association végétale n° 3			
ELYT <i>Elytrigia atherica</i>	-----*		198
FEST <i>Festuca rubra</i>	-----*		73
JUNC <i>Juncus gerardii</i>	-----*		53
JUMA <i>Juncus maritima</i>	-----*		37
SCIR <i>Scirpus maritimus</i>	-----*		
Association végétale n° 4			
AGRO <i>Agrostis stolonifera</i>	-----*		109
HORD <i>Hordeum marinum</i>	-----*		36
PLAC <i>Plantago coronopus</i>	-----*		
Association végétale n° 5			
CARE <i>Carex sp.</i>	-----*		34
CONV <i>Convolvulus sp.</i>	-----*		12
BETA <i>Beta vulgaris</i>	-----*		

Sur les zones non pâturées, l'association 1 correspond aux espèces de moyennes altitudes (6m - 7m), et peut être rapprochée du moyen et du bas schorre : on y trouve en particulier *Aster tripolium*, *Suaeda maritima*, *Puccinellia maritima*, *Atriplex prostrata*, et *Halimione portulacoides*. D'autres espèces la composent, avec des valeurs de liaison moins élevées. Ce sont des espèces correspondant à la borne supérieure de la plage d'altitude (6,5 m – 7 m) et qui sont liées positivement avec le pâturage, telles que *Triglochin maritimum*, *Glaux maritima*, et *Plantago maritima*. Ces espèces pourraient constituer des assemblages particuliers à proximité des zones de pâturage et subissant l'influence de ce facteur. Il est vrai que l'absence de barrière sur les marais salés permet aux troupeaux de circuler en liberté, ce qui fait que les limites des zones pâturées ne sont pas fixes. L'association 2 est caractérisée par la présence de *Salicornia sp.* et *Spartina townsendii*, deux espèces de basses altitudes. Elles sont également liées à *Spergularia maritima* et *Puccinellia rupestris*. Ces espèces définissent donc les zones situées à la limite de l'estran nu, et on peut penser que les assemblages comprenant *Spergularia maritima* et *Puccinellia rupestris* correspondent aux bords de marais des zones pâturées. L'association trois 3 typique du haut schorre avec des espèces d'altitude élevées (7 m – 8 m) telles que *Elytrigia atherica* et *Festuca rubra*. L'association peut également comprendre *Juncus maritima*, *Juncus gerardii*, et *Scirpus maritimus*. L'association 4 est composée de trois espèces d'altitude élevée (7 m – 8 m) et habituellement favorisée par le pâturage : *Agrostis stolonifera*, *Hordeum marinum* et *Plantago coronopus*. On peut également pensée qu'il s'agit ici de secteurs situées en limite de zones pâturées. Enfin, l'association 5 comprend trois espèces : *Carex sp.*, *Convolvulus sp.* et *Beta vulgaris*. Ces trois espèces n'ont été rencontrées respectivement que trois, cinq, et une fois sur

les transects, sur l'herbus de Vains, sur le premier point réalisé en partant de la côte. Il s'agit donc là d'espèces continentales qui ne sont pas spécifiques des marais salés.

Pour résumer, si l'on écarte les espèces de pâturage et les espèces continentales, quatre associations végétales peuvent être mises en évidence sur les marais salés non pâturés : *Elytrigia atherica* et *Festuca rubra* sur les altitudes élevées (7 m – 8 m), *Aster tripolium*, *Suaeda maritima*, *Puccinellia maritima*, *Atriplex prostrata*, et *Halimione portulacoides*, sur les altitudes moyennes (6m - 7m), et *Salicornia sp.* et *Spartina townsendii* sur les altitudes faibles (4 m – 6 m). Cette organisation qui correspond au schéma classique, n'est pas toujours observée à l'échelle locale, mais se retrouve bien ici à l'échelle de la Baie.

Quatre associations végétales ont été définies sur les zones pâturées ou fauchées (Diagramme 11).

Diagramme 11 : Associations végétales identifiées par analyse fréquentielle sur les secteurs pâturés ou fauchés (seules les liaisons les plus fortes sont conservées).

Association végétale n° 1		
PLAC <i>Plantago coronopus</i>	-----*	
		888
TRIF <i>Trifolium pratense</i>	-----*	597
AGRO <i>Agrostis stolonifera</i>	-----*	295
ELYT <i>Elytrigia atherica</i>	-----*	251
CIRS <i>Cirsium vulgare</i>	-----*	247
FEST <i>Festuca rubra</i>	-----*	93
PLAN <i>Plantago maritima</i>	-----*	87
JUNC <i>Juncus gerardii</i>	-----*	52
POLY <i>Polygonum maritima</i>	-----*	
		25
TARA <i>Taraxacum sp.</i>	-----*	
		20
PMAY <i>Plantago major</i>	-----*	
Association végétale n° 2		
SALI <i>Salicornia sp.</i>	-----*	705
SUAE <i>Suaeda maritima</i>	-----*	640
PUCC <i>Puccinellia maritima</i>	-----*	494
ASTE <i>Aster tripolium</i>	-----*	492
HALI <i>Halimione portulacoides</i>	-----*	409
PUCR <i>Puccinellia rupestris</i>	-----*	380
SPMA <i>Spergularia maritima</i>	-----*	296
ATRI <i>Atriplex prostrata</i>	-----*	220
SPAR <i>Spartina x townsendii</i>	-----*	46
ATRG <i>Atriplex glabriuscula</i>	-----*	

Association végétale n° 3		
PARA <i>Parapholis incurva</i>	-----*	132
TRIG <i>Triglochin maritimum</i>	-----*	
SPER <i>Spergularia media</i> subsp. <i>media</i>	-----*	
		23
Association végétale n° 4		
GLAU <i>Glaux maritima</i>	-----*	67
HORD <i>Hordeum marinum</i>	-----*	

L'association 1 est caractérisée par la présence de *Plantago coronopus*, *Trifolium pratense*, *Agrotis stolonifera*, *Elytrigra atherica*, *Festuca rubra*, et *Cirsium vulgare*. Ce sont des espèces favorisées par le pâturage et les altitudes élevées (7 m - 10 m). L'association 2 comprend quand à elle *Salicornia sp.*, *Suaeda maritima*, *Puccinellia maritima*, *Aster tripolium* et *Halimione portulacoides*. On retrouve ces espèces à des altitudes moyennes (6 m – 7 m). Ces espèces ne sont pas favorisées par le pâturage, mais supportent le pâturage modéré, à part *Puccinellia maritima* qui elle est fortement favorisée par le pâturage, même intensif. L'association 3 est caractérisée par *Parapholis incurva*, *Triglochin maritimum* et *Spergularia media*, que l'on retrouve sur des terrains de pâturage principalement ovin et d'altitude comprise entre 6,6 m et 6,8 m. Enfin, l'association 4 est composée de *Glaux maritima* et *Hordeum marinum*, espèces présentes sur des terrains de pâturage ovin et d'altitude comprise entre 6,8 m et 7 m.

Sur les terrains pâturés, on retrouve donc principalement deux associations : d'une part une association située sur les terrains d'altitudes comprises entre 7 m et 10 m, composée d'espèces très favorisées par le pâturage, telles que *Agrotis stolonifera*, *Elytrigra atherica*, et *Festuca rubra*, et comprenant des espèces continentales telles que *Plantago coronopus*, *Trifolium pratense*, et *Cirsium vulgare* ; d'autre part une association d'espèces plus caractéristiques des marais salés, et d'altitude plus faible (6 m - 7 m), composée notamment de *Puccinellia maritima* qui est très favorisée par le pâturage, mais aussi d'espèces tolérantes au pâturage, telles que *Salicornia sp.*, *Suaeda maritima*, *Aster tripolium* et *Halimione portulacoides*.

Lorsque l'on tient compte de toutes les liaisons, 15 groupes d'espèces sont identifiés pour les secteurs non pâturés, et 17 groupes pour les secteurs pâturés (Annexes). Ces diagrammes permettent de préciser les regroupements possibles d'espèces végétales sur la Baie. Le grand nombre de ces groupes et le fait que la plupart des espèces apparaissent dans plusieurs groupes en même temps (jusqu'à six) indiquent que la composition des regroupements d'espèces n'est pas fixe, et qu'on est dans le cas de communautés ouvertes.

Nous avons donc distingué grâce aux analyses fréquentielles un certain nombre d'associations végétales, correspondant à des conditions d'altitude et d'utilisation agricole différentes. Nous pouvons préciser le (Tableau 66). Cependant, ces associations mises en évidence à l'échelle de la Baie pourraient ne pas être utilisables si l'on travaille localement à l'échelle d'un secteur présentant des conditions particulières. Selon l'échelle à laquelle on travaille et la précision recherchée, ces associations seront donc amenées être redéfinies.

Tableau 66 : Répartition mise en évidence par analyses fréquentielles et simplifiée des espèces végétales sur la Baie du Mont-Saint-Michel selon l'altitude et le pâturage.

Altitude	Secteur non pâturé	Secteur pâturé
4 m – 6 m	<i>Spartina sp.</i> <i>Salicornia sp.</i>	
6m - 7m	<i>Aster tripolium</i> <i>Suaeda maritima</i> <i>Puccinellia maritima</i> <i>Atriplex prostrata</i> <i>Halimione portulacoides</i>	<i>Puccinellia maritima</i> <i>Salicornia sp</i> <i>Suaeda maritima</i> <i>Aster tripolium</i> <i>Halimione portulacoides</i>
> 7 m	<i>Elytrigia atherica</i> <i>Festuca rubra</i>	<i>Elytrigia atherica</i> <i>Festuca rubra</i> <i>Agrostis stolonifera</i> <i>Plantago coronopus</i> <i>Trifolium pratense</i> <i>Cirsium vulgare</i>

5. Discussion

5.1. Les espèces végétales des marais salés sont-elles de bons indicateurs de l'environnement ?

Nous avons vu dans ce travail que les espèces végétales s'organisent sur les marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel en fonction de l'altitude, de la géomorphologie, du contexte sédimentaire et du pâturage. Les analyses fréquentielles nous ont permis de déterminer les valeurs préférentielles de chaque espèce pour chacun des facteurs écologiques. Si les préférences de certaines espèces pour quelques facteurs avaient déjà été déterminées (Géhu, 1985), généralement de façon quantitative et à l'échelle d'un seul secteur, ce travail a permis de dresser la liste exhaustive des liaisons statistiques entre toutes les espèces végétales de la Baie du Mont-Saint-Michel et les quatre facteurs étudiés : l'altitude, la géomorphologie, le contexte sédimentaire et le pâturage.

Les résultats confirment que l'altitude est un facteur d'influence majeur, et les liaisons observées entre une espèce et une gamme d'altitude dépend de la tolérance de cette espèce à la salinité et à l'immersion. On observe ainsi de la côte à la mer une succession d'espèces de plus en plus halophiles. Les résultats confirment une rupture dans les facies végétaux autour de 6,8 m d'altitude, ce qui correspond à un coefficient de 100, qui est atteint seulement quelques jours par an aux marées de vives eaux d'équinoxe. Cette altitude correspond à la limite entre les secteurs où se développent les espèces halophiles strictes (*Spartina townsendii*, *Salicornia maritima*, et *Suaeda maritima*) et ceux où l'on rencontre les graminées du haut schorre telles que *Elytrigia atherica*. Si 6,8 m correspond à l'altitude inférieure de la répartition de cette espèce considérée comme invasive (Valéry, 2006), qui couvrait en 2002 33% de la surface des marais salés, il est possible qu'elle colonise dans un futur proche la totalité des terrains situés au dessus de cette altitude. Cela correspondrait à 60% de la surface des marais salés. Cette perspective est inquiétante pour l'avenir de la Baie, et notamment pour son rôle de nurserie de nombreuses espèces de poissons (Parlier, 2006).

L'altitude est donc un facteur déterminant pour la végétation. Cependant la connaissance de l'altitude d'un secteur ne permet pas de déterminer sa composition floristique. Les raisons mises en évidence dans ce travail sont d'une part l'existence d'une pente hydraulique dans la Baie, d'autre part l'influence des autres facteurs.

La géomorphologie a par exemple une grande influence sur la végétation : la présence de cordons coquilliers peut ainsi avoir pour conséquence une rétention d'eau, ce qui permet le développement d'espèces halophiles à des altitudes élevées. On voit dans cet exemple que la connaissance du contexte géomorphologique en un point donné est une information nécessaire mais non suffisante : il faut également tenir compte des entités géomorphologiques présentes autour de ce secteur, et de la façon dont elles sont disposées par rapport à la mer. Il est donc important de développer des techniques de cartographie de la géomorphologie, tenant compte à la fois des caractéristiques du relief en chaque point et du contexte à proximité.

Le contexte sédimentaire semble également avoir une influence sur la végétation. Cependant, les facteurs étant liés entre eux, et il est parfois difficile d'analyser l'influence d'un seul facteur. C'est le cas en particulier pour les sédiments, car la granulométrie augmente de la côte vers le large, et varie donc de façon inversement proportionnelle avec l'altitude. Cependant ce facteur varie également à l'échelle de la microtopographie, et cela peut avoir des conséquences sur la végétation. L'échelle des données utilisées ici n'est pas assez précise pour permettre d'étudier ce facteur en éliminant l'influence des autres. Cela nécessiterait des mesures de granulométrie à chaque point d'observation, ou au moins à chaque changement de géomorphologie. De telles mesures demandent beaucoup de temps, et il serait intéressant d'évaluer le potentiel des données RADAR pour obtenir des informations sur la granulométrie des marais salés.

Enfin, l'effet de l'Utilisation agricole du marais salé a été testé. Selon les cartes du pâturage de 2002, 55% de la surface des marais seraient pâturés ou fauchés. Les analyses fréquentielles ont montrés que le pâturage modifie profondément la composition floristique du marais. En effet certaines espèces se développent presque uniquement sous pâturage (*Agrostis stolonifera*, *Hordeum marinum*, *Plantago sp.*, *Triglochin maritimum*), tandis que d'autre y sont sensibles et donc liées négativement avec ce facteur (*Halimione portulacoides*). Il en résulte que les secteurs pâturés ou fauchés correspondent à des compositions floristiques particulières, composés soit d'espèces caractéristiques des marais, mais présentes en proportions originales par rapport au contexte non pâturés (dominance de *Puccinellia maritima* par rapport à *Halimione portulacoides*), soit d'espèces continentales, voire prairiales (*Agrostis stolonifera*, *Festuca rubra*, *Cirsium vulgare*, *Plantago mayor*, *Taraxacum sp.*, *Trifolium pratense* et *Plantago coronopus*). Le pâturage peut également modifier l'altitude moyenne des espèces végétales. Nous avons ainsi vu que sur des secteurs non pâturés,

Halimione portulacoides se développe à des altitudes plus élevées que *Puccinellia maritima* alors que cet ordre est inversé dans le cas de secteur pâturés. En effet *Halimione portulacoides*, qui est une espèce sensible au pâturage, voit sa répartition réduite aux secteurs les moins souvent atteints pas les troupeaux, ceux-ci étant les plus éloignées de la côte, et donc d'altitude plus faible. *Puccinellia maritima* au contraire est une espèce favorisée par le pâturage et se développe donc à des pressions de pâturage élevées, c'est-à-dire près des côtes, sur des terrains d'altitude élevée.

Par ailleurs, on peut remarquer que la carte du pâturage est composée de polygones appartenant aux différents types d'Utilisation agricole. Or, les troupeaux étant libres sur les marais, les secteurs pâturés n'ont pas de limites fixes. Les limites des polygones de la carte sont donc virtuelles, et il serait donc plus proche de la réalité de représenter la situation par un gradient de pression de pâturage.

Nous avons donc dans ce travail déterminé l'influence des facteurs Altitude, Géomorphologie, Sédiment, et Utilisation agricole. Généralement, un état d'un facteur considéré permet le développement de nombreuses espèces végétales. Par exemple, 13 espèces végétales sont liées positivement à l'altitude 6,6 m. L'altitude ne constitue donc pas une information suffisante pour déterminer la composition floristique d'un secteur. Par contre, des informations sur le type de pâturage ou la géomorphologie permettraient de lever dans une certaine mesure l'incertitude sur les espèces potentiellement présentes. Considérés séparément, ces facteurs ne permettent donc pas de déterminer la composition floristique d'un secteur, mais la combinaison de plusieurs facteurs pourrait apporter suffisamment d'information pour déterminer les espèces susceptibles d'être rencontrées à l'endroit considéré. En effet, les liaisons entre les espèces et l'altitude, la géomorphologie, ou le contexte sédimentaire correspondent en fait à la réponse des plantes à l'immersion. Ces trois facteurs déterminent combien de temps le site considéré reste immergé, à quelle fréquence, et en combien de temps se fait le réessuyage. Plusieurs indices d'immersion ont déjà été créés sur la Baie du Mont Saint Michel, mais ils ne prennent en compte que l'altitude. Il faudrait donc définir un descripteur synthétique correspondant à un indice d'immersion, et combinant l'altitude, la géomorphologie, le contexte sédimentaire, ainsi que l'existence de la pente hydraulique.

Si une combinaison de facteurs peut permettre la détermination de la composition floristique d'un site donné, est ce possible que la présence d'une espèce nous renseigne sur le

milieu environnant ? Généralement, une espèce végétale est liée avec une gamme d'altitude large, et on a montré que la plupart des espèces pouvait se rencontrer en dehors de leurs altitudes préférentielles. De même, les espèces ne sont généralement pas liées à un seul type de géomorphologie ou de sédiment. Par contre, certaines espèces n'ont été rencontrées quasiment uniquement sous pâturage (par exemple *Agrostis stolonifera*), et leur présence indique avec une forte probabilité que le secteur est pâturé. Mis à part ces cas, il est difficile d'avoir des informations sur le milieu à partir de la présence d'une seule espèce. Par contre, la présence de plusieurs espèces peut préciser les valeurs des facteurs. Ainsi, un terrain couvert de *Puccinellia maritima* a de forte chance de se situer entre 6,2 et 7,6 m. Mais si l'on sait également que sur ce terrain se développe *Polygonum maritimum*, on peut dire que le terrain a plus de chance de se trouver à une altitude comprise entre 7,4 et 7,6, et sur pâturage ovin. Il est donc intéressant de considérer des ensembles d'espèces, et donc de définir des associations végétales.

5.2. Les espèces végétales De l'existence d'associations végétales

Les analyses fréquentielles nous ont permis de calculer les liaisons entre les espèces végétales et ainsi de définir des ensembles d'espèces vivant fréquemment ensemble dans la Baie du Mont-Saint-michel. Nous avons identifié dans un premier temps les ensembles déterminées par les liaisons les plus fortes, qui correspondent aux ensembles d'espèces les plus caractéristiques et que nous appelons « associations végétales ». Au sein d'une association végétale, les liaisons les plus fortes indiquent les espèces ... et les moins fortes les espèces accompagnatrices. Dans un deuxième temps, nous avons considérés toutes les liaisons entre les espèces, quelle soit faibles ou fortes, pour définir des ensemble appelés « groupes d'espèces ». Ceci permet de déterminer des nuances dans l'organisation de la végétation, ou des secteurs de transition entre les associations végétales. Les résultats peuvent donc être lus sous différents niveau d'analyse, selon qu'on cherche à généraliser l'organisation de la végétation ou à en étudier les nuances. Ceci est permis grâce à l'utilisation de la méthode des analyses fréquentielles, qui montre ici tout son intérêt.

Ces associations végétales s'expliquent par les préférences écologiques des espèces qui les composent, en fonction des facteurs Altitude, Géomorphologie Sédiment, et Utilisation agricole. Au sein d'une association végétale, chaque espèce présente sa propre distribution par rapport aux variations du milieu : nous sommes dans le cas de communautés ouvertes (Gleason, 1926, 1969). Dans ce type d'organisation, les limites des associations ne sont pas contraintes par les distributions écologiques des espèces qui les composent, lesquelles peuvent

se retrouver indépendamment au sein d'autres associations. Nous avons vu en effet que la plupart des espèces peuvent se rencontrer en présence de toutes les espèces végétales. On distingue ainsi de nombreuses associations végétales, et on ne retrouve pas les mêmes d'un secteur à l'autre de la Baie. Cette organisation rend difficile la cartographie de la végétation en multipliant les types de végétation, et des cartes de distribution par espèce seraient plus proches de la situation observée.

Par ailleurs, la succession des espèces le long du gradient d'altitude apparaît continue dans certains secteurs, alors que dans d'autres les associations sont bien distinctes, et séparées par des ensembles d'espèces qu'on pourrait qualifier de transition. L'organisation de la végétation correspond donc à une situation intermédiaire entre un continuum et une suite de ceintures de végétations distinctes. Ce type d'organisation s'appelle un continuum à facette. Par ailleurs, nous avons remarqué que plus un secteur était stable, plus il présentait des ceintures de végétations distinctes les unes des autres. Ces résultats nous ont amenés à émettre l'hypothèse que l'évolution temporelle d'un marais se fait vers une plus grande distinction entre ces associations végétales. De nouvelles analyses sont nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

Les analyses fréquentielles ont été menées séparément sur les secteurs pâturés et les secteurs non pâturés. Le schéma classique (Bonnot-Courtois & Lefeuvre, 2000) des marais salés en haut schorre (>7 m) à *Elytrigia atherica* et *Festuca rubra*, moyen et bas schorre (6 m – 7 m) à *Aster tripolium*, *Suaeda maritima*, *Puccinellia maritima*, *Atriplex prostrata*, et *Halimione portulacoides* et haute slikke (4 m- 6 m) à *Salicornia sp.* et *Spartina townsendii* est bien retrouvé à l'échelle de la Baie, mais uniquement si on ne considère que les terrains non pâturés. Or cette situation ne correspond qu'à 45% de la surface des marais salés. De plus, on retrouve des espèces liées positivement aux pâturages au sein des groupes d'espèces observées sur les marais non pâturés. Les troupeaux étant libres sur les marais, et les limites des polygones de la carte étant virtuelles, une partie des secteurs qualifiés de non pâturés subissent en fait la pression de pâturage. Il faudrait donc recommencer cette analyse en ne tenant compte que des points d'observation situés à une certaine distance des secteurs pâturés. Cela réduit donc encore les secteurs où le schéma classique des marais salés peut être observé. Il faut de plus considérer le fait que la présence de cordon coquillier peut modifier ce schéma en inversant la succession schorre-slikke ou en la répétant à plusieurs reprises sur le marais. Ce travail montre donc que le schéma classique des marais salés n'est que rarement observé sur la Baie du Mont-Saint-Michel.

Les terrains pâturés présentent deux types de végétation : une végétation de type continentale, d'altitude élevée (> 7 m), comprenant entre autre *Agrotis stolonifera*, *Elytrigia atherica*, *Festuca rubra*, *Plantago coronopus*, *Trifolium pratense*, et *Cirsium vulgare* ; et une végétation plus typique de marais salés, caractéristique des terrains d'altitude moyenne (6 m - 7m), composée de *Puccinellia maritima* et d'espèces tolérantes au pâturage, telles que *Salicornia sp.*, *Suaeda maritima*, *Aster tripolium* et *Halimione portulacoides*. L'augmentation du nombre d'espèces observée sur le marais pâturés vient en partie du nombre d'espèces continentales que le pâturage favorise. Il est donc vrai que le pâturage augmente le nombre d'espèce sur les marais, mais cela ne veut pas dire que cela correspond à une amélioration de la qualité écologique de ce milieu. Cela dit, la suppression des troupeaux sur des terrains pâturés aboutirait à l'envahissement par *Elytrigia atherica* et donc à une baisse du nombre d'espèces. C'est pourquoi le maintien d'un pâturage modéré sur les secteurs déjà pâturés est recommandé par rapport à l'abandon de cette pratique.

Cette organisation simplifiée de la végétation mise en évidence à l'échelle de la Baie ne se retrouve pas toujours à l'échelle locale, et doit être redéfinie selon l'échelle de travail. Les analyses fréquentielles sont particulièrement adaptées pour dégager l'organisation de ces marais extrêmement changeant d'un secteur à l'autre. Contrairement à d'autres techniques statistiques (telles que les analyses multi-variées), cette méthode permet en effet de séparer les données de végétation et les facteurs écologiques, et de vérifier sans apriori si le regroupement des espèces correspond à des préférences écologiques.

Ce travail permet d'identifier les associations végétales de la Baie du Mont-Saint-Michel. Celles-ci n'avaient pas été redéfinies depuis la carte de Guillon de 1984. Or, la continentalisation des marais a beaucoup progressé depuis, et celle-ci s'accompagne de nombreux changements dans composition et l'organisation de la végétation.

6. Conclusion

Nous avons cherché dans ce travail de thèse à améliorer la connaissance de la végétation des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel en couplant des observations de terrain et des données de télédétection par LiDAR et orthophotographie. Nous avons notamment cherché à répondre à trois questions : Quels sont les facteurs influençant l'organisation spatiale de la végétation des marais salés ? Peut-on distinguer des associations végétales, c'est-à-dire des groupes d'espèces végétales vivant fréquemment ensemble et dont la présence révèle des conditions écologiques particulières ? Enfin, en quoi ces résultats peuvent-ils contribuer à l'amélioration des méthodes de cartographie de la végétation des marais salés ? Nous récapitulerons ici les avantages et les inconvénients des données et des méthodes utilisées, puis nous résumerons les résultats obtenus, avant de tracer plusieurs perspectives de travail.

Cette étude a demandé l'utilisation de plusieurs jeux de données : données altimétrique LiDAR, données géomorphologiques, carte du contexte sédimentaire, carte du pâturage et données de végétation sous forme de transect et de polygone.

L'essentiel de ce travail est basé sur une matrice à 1 m de résolution de données altimétriques LiDAR dont nous avons vérifié la qualité, et que nous avons corrigée. Le laser pouvant être arrêté par la végétation, les données LiDAR acquises sur des terrains couverts d'une végétation basse comme c'est le cas sur les marais salés présentent un biais systématique correspondant à une hauteur intermédiaire entre le sol et le sommet de la végétation. Nous avons ainsi mis en évidence que le biais des données LiDAR dépend de la hauteur de la végétation. Faisant l'hypothèse que le laser atteint le sol lorsque la densité de la végétation le permet, nous avons cherché à corriger ce biais en assignant à chaque pixel l'altitude la plus basse mesurée dans le carré de 3 x 3 m dans lequel il se trouve. Cette correction nous a permis d'obtenir des erreurs systématiques inférieures ou égales à 10 cm, précision qui nous était nécessaire pour répondre aux questions de cette thèse. Cependant, le fait que les données de premier écho présentent une altitude plus basse que les données de second écho n'est pas encore résolu, et il serait intéressant de comprendre ce phénomène, qui pourrait être dû aux variations du taux d'humidité du sol.

Ces données LiDAR nous ont donc permis de déterminer l'altitude de chaque point d'observation. Le profil altimétrique de chaque transect de végétation nous a également permis d'identifier le contexte géomorphologique de chaque point d'observation. Cette étape demande du temps et présente une certaine subjectivité, et il serait judicieux de développer des méthodes de cartographie automatique de la géomorphologie à partir des données LiDAR.

Les données de sédiment nous ont permis de déterminer le type de sédiment présent au niveau de chaque point d'observation, mais l'échelle des données utilisées ici n'était pas assez précise pour permettre d'étudier ce facteur en éliminant l'influence des autres. Des mesures de granulométrie en chaque point d'observation seraient nécessaires, mais cette opération demandant beaucoup de temps il serait intéressant d'évaluer le potentiel des données RADAR pour obtenir des informations sur la rugosité des marais salés.

Nous avons également utilisé la carte des secteurs pâturés ou fauchés de 2002. Cependant, les troupeaux étant libres sur les marais salés, une carte matricielle d'un gradient de pression du pâturage aurait été plus proche de la réalité. Cette carte nous a tout de même été très utile pour déterminer les modifications importantes de la végétation sous l'influence de l'utilisation agricole des marais salés.

Enfin, les données de végétation utilisées dans ce travail se présentent sous deux formes : d'une part un ensemble de 9811 points d'observation, d'autres une carte des associations végétales de la Baie. Les données des points d'observation présentent l'avantage de correspondre à un inventaire exhaustif de la flore mais l'inconvénient d'être limité dans l'espace. La carte des associations couvre au contraire l'ensemble des marais, mais ne signale que les espèces dominantes. Ces deux types de données présentent finalement une complémentarité intéressante et nous nous sommes servis des avantages de chacun pour répondre à des questions différentes.

La principale méthode utilisée dans cette thèse est la méthode des analyses fréquentielles. Cette méthode a été choisie car elle est particulièrement adaptée pour répondre aux questions posées dans cette thèse : quelles sont les espèces que l'on rencontre fréquemment ensemble et quelles sont les liaisons entre ces espèces et des facteurs de l'environnement. Contrairement à d'autres techniques statistiques (telles que les analyses multivariées), cette méthode permet de séparer les données de végétation et les facteurs écologiques. On peut donc d'une part identifier des groupes d'espèces ayant été rencontrées fréquemment ensemble, d'autre part identifier les liaisons entre chaque espèce et chaque facteur écologique, et enfin chercher à comprendre les groupes d'espèces à la lumière de leur préférence écologique. On peut ainsi vérifier sans a priori si le regroupement des espèces correspond à un type de milieu. Ceci est donc particulièrement adapté pour dégager l'organisation de ces marais salés qui sont extrêmement changeant d'un secteur à l'autre. La force de cette méthode vient également du fait que les résultats peuvent être lus sous différents niveaux d'analyse, selon qu'on cherche à généraliser l'organisation de la végétation ou à en étudier les nuances. Ceci permet de

déterminer, d'une part, les compositions des associations les plus caractéristiques des marais et, d'autre part, des nuances dans l'organisation de la végétation ou des secteurs de transition entre les associations végétales. Dans le cas d'une zone d'étude aussi étendue que la Baie du Mont-Saint-Michel, il est très intéressant de pouvoir avoir des résultats généraux et des résultats détaillés, afin de travailler à différentes échelles. L'analyse fréquentielle montre ici tout son intérêt.

Le premier objectif de ce travail a été d'étudier les liaisons entre les facteurs écologiques et les espèces végétales présentes sur la Baie du Mont-Saint-Michel. Si les préférences de certaines espèces pour quelques facteurs avaient déjà été déterminées, généralement de façon quantitative et à l'échelle d'un seul secteur, ce travail a permis de dresser la liste exhaustive des liaisons statistiques entre toutes les espèces végétales de la Baie du Mont-Saint-Michel et les quatre facteurs étudiés : l'altitude, la géomorphologie, le contexte sédimentaire et le pâturage.

Nous avons tout d'abord vérifié que l'altitude est un facteur d'importance majeure dans l'organisation spatiale de la végétation. En effet, dans le contexte de cette baie macrotidale, ce facteur détermine la fréquence d'immersion par l'eau de mer. Or, les espèces végétales de la Baie présentent différents degrés de sensibilité aux taux de salinité importants et à l'immersion. On observe ainsi une succession de ceintures de végétation de compositions floristiques distinctes de l'altitude la plus élevée à l'altitude la plus faible. Ce phénomène s'observe à plusieurs échelles : d'une part, à l'échelle d'un secteur, depuis la côte jusqu'à la limite du marais, d'autre part, à l'échelle de la microtopographie, par exemple au niveau des bords des chenaux ou des dépressions. La méthode des analyses fréquentielles a permis de vérifier statistiquement la relation entre les espèces végétales et l'altitude sur trois secteurs étudiés, ainsi que sur l'ensemble de la Baie. Dans le cadre d'un processus de cartographie automatique des marais salés, un modèle numérique de terrain peut ainsi constituer une première aide en venant compléter des données optiques.

Cependant, les espèces végétales ne sont pas toujours de bons indicateurs de l'altitude, et ce pour plusieurs raisons. La première est que l'altitude moyenne d'une espèce végétale varie le long de la Baie. Cette variation correspond à la réponse des espèces végétales à la double pente hydraulique existant dans la Baie. En effet, la mer s'engouffre et s'accumule au fond de la Baie, ce qui fait que la marée monte à des altitudes plus élevées, d'une part, à l'Est dans la zone des estuaires de la Sée et de la Sélune, et d'autre part, dans une moindre mesure, à

l'Ouest dans le golfe de Cancale. La même espèce se trouvera ainsi à une altitude plus élevée à l'Est et à l'Ouest qu'au centre de la Baie.

L'autre raison nous laissant penser que les espèces végétales ne sont pas de bons indicateurs de l'altitude est le fait que d'autres facteurs écologiques ont une grande influence sur la végétation, et peuvent perturber l'organisation de la végétation en fonction de l'altitude. Les liaisons entre les facteurs Pente, Géomorphologie, Sédiment, et Utilisation agricole ont en effet été vérifiées statistiquement par analyse fréquentielle pour chaque espèce végétale. La présence d'une entité géomorphologique empêchant l'écoulement de l'eau de mer sur les marais peut par exemple conduire au développement d'espèces halophiles à des altitudes inhabituellement élevées. Ainsi, la présence de vasières situées en arrière de cordons coquilliers est responsable de l'augmentation de l'altitude moyenne des espèces halophiles telles que *Salicornia sp.*. Le pâturage, concentré sur les altitudes les plus hautes, peut également modifier l'altitude moyenne des espèces végétales, comme c'est le cas pour *Halimione portulacoides*, espèce sensible au pâturage, qui voit son altitude moyenne diminuer sur les zones pâturées, alors que celle de *Puccinellia maritima*, espèce au contraire favorisée par le pâturage, augmente.

L'altitude moyenne d'une espèce varie donc selon la position du secteur sur la Baie, la géomorphologie, et la pression de pâturage. La présence d'une espèce végétale seule ne permet pas de connaître l'altitude du terrain, et inversement l'altitude d'un point d'observation ne permet pas de déterminer sa composition floristique. Par contre, la combinaison de plusieurs facteurs pourrait apporter suffisamment d'information pour déterminer les espèces susceptibles d'être rencontrées à l'endroit considéré. Il faudrait donc définir un descripteur synthétique combinant l'altitude, la géomorphologie, le contexte sédimentaire, ainsi que l'existence de la pente hydraulique. Dans le cas d'une classification automatique des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel faisant intervenir un Modèle Numérique de Terrain, nous recommandons donc d'incorporer aux couches utilisées une carte du pâturage, une carte de la géomorphologie (ou à défaut de la pente et de la direction de la pente), ainsi qu'une image matricielle de la coordonnée géographique X (permettant de prendre en compte l'existence de la pente hydraulique dans la Baie).

Le deuxième objectif de ce travail a été de chercher à comprendre comment les espèces végétales des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel s'organisent les unes par rapport aux autres. Nous avons mis en évidence que chaque espèce présente sa propre distribution par rapport aux variations du milieu. Cependant, du fait que certaines espèces présentent des

préférences similaires vis-à-vis des facteurs écologiques, elles se retrouvent fréquemment ensemble et définissent ainsi des associations végétales. La végétation s'organise donc en une succession d'associations végétales, pouvant présenter des variantes ou sous-associations, séparées par des zones de transition composées d'espèces présentes dans les associations végétales adjacentes. Il en résulte un grand nombre de compositions floristiques différentes, ce qui est difficilement représentable sur une carte. C'est pourquoi des cartes de distribution par espèce peuvent constituer une alternative intéressante aux cartes par associations végétales.

Le travail mené lors de cette thèse nous a permis d'identifier les associations végétales de la Baie du Mont-Saint-Michel, qui n'avaient pas été redéfinies depuis la carte de Guillon (1984). Or, la continentalisation des marais a beaucoup progressé depuis, et s'est accompagnée de nombreux changements dans la composition et l'organisation de la végétation.

Le schéma classique (Bonnot-Courtois & Lefeuvre, 2000) des marais salés en haut schorre (>7 m) à *Elytrigia atherica* et *Festuca rubra*, moyen et bas schorre (6 m – 7 m) à *Aster tripolium*, *Suaeda maritima*, *Puccinellia maritima*, *Atriplex prostrata*, et *Halimione portulacoides* et haute slikke (4 m- 6 m) à *Salicornia sp.* et *Spartina townsendii* est bien retrouvé à l'échelle de la Baie, mais uniquement si on ne considère que les terrains non pâturés. Il faut de plus considérer le fait que la présence de cordon coquillier peut modifier ce schéma en inversant la succession schorre-slikke ou en la répétant à plusieurs reprises sur le marais. Ceci montre que le schéma classique des marais salés n'est que rarement observé sur la Baie du Mont-Saint-Michel. Les terrains pâturés présentent quant à eux deux types de végétation : une végétation de type continentale, d'altitude élevée (> 7 m), comprenant entre autres *Agrotis stolonifera*, *Elytrigia atherica*, *Festuca rubra*, *Plantago coronopus*, *Trifolium pratense* et *Cirsium vulgare* ; et une végétation plus typique de marais salés, caractéristique des terrains d'altitude moyenne (6 m - 7m), composée de *Puccinellia maritima* et d'espèces tolérantes au pâturage, telles que *Salicornia sp.*, *Suaeda maritima*, *Aster tripolium* et *Halimione portulacoides*. Cette organisation simplifiée de la végétation de la Baie peut être redéfinie à l'échelle locale, selon l'échelle de travail.

La plupart des espèces présentent une certaine flexibilité vis-à-vis des facteurs écologiques. La présence d'une seule espèce ne donne donc pas beaucoup de renseignement sur le milieu. Cependant, tout comme la combinaison de plusieurs facteurs peut aider à la détermination de la composition floristique d'un secteur, la présence d'une combinaison d'espèce, c'est-à-dire d'une association végétale, peut nous renseigner sur le milieu. Il serait

intéressant de se servir des statistiques obtenues dans ce travail pour établir des cartes de milieu à partir d'anciennes cartes de la végétation.

Nous pouvons dégager trois perspectives majeures devant être développées à la suite de ce travail. Tout d'abord, cette thèse ayant vérifié statistiquement l'influence de l'Altitude, de la Géomorphologie, des Sédiments et de l'Utilisation agricole sur la végétation, des classifications automatiques de la végétation des marais salés de la Baie doivent être testées en combinant l'orthophotographie, le Modèle Numérique de Terrain LiDAR et des cartes de Géomorphologie, de Sédiment, et de Pâturage. Il pourrait s'agir de classifications automatiques supervisées, réalisées soit à partir des points d'observation, en élargissant chaque point en un polygone circulaire de deux ou trois mètres de rayon, soit à partir de la carte de végétation, en sélectionnant aléatoirement des polygones de quelques mètres de côté à l'intérieur de chaque association végétale. L'établissement d'une carte de la Géomorphologie est en cours, mais il serait envisageable d'utiliser en attendant des cartes de la pente et de la direction de la pente, facilement réalisables sous des logiciels SIG à partir des données LiDAR. De même, les cartes de Sédiment et de Pâturage dont il est question dans cette thèse peuvent être utilisées pour ces classifications, mais il serait intéressant de voir s'il est possible, d'une part, d'utiliser des données RADAR pour avoir des informations sur la rugosité, d'autre part, d'avoir une carte du pâturage plus détaillée, par exemple une carte matricielle représentant une pression de pâturage. Ces techniques permettraient d'accélérer grandement la cartographie des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel, et ainsi de mettre à jour fréquemment les données concernant cet espace dont l'évolution est rapide et préoccupante.

Par ailleurs, il serait intéressant de vérifier si la correspondance entre les espèces végétales et les valeurs des facteurs écologiques permet de tracer rétrospectivement des cartes du milieu à partir des cartes anciennes de la végétation de la Baie. Ceci pourrait être fait quelles que soient les associations végétales utilisées dans la carte considérée, puisque les valeurs des facteurs Altitude, Géomorphologie, Sédiment, et Utilisation agricole ont été définies indépendamment pour chaque espèce.

Enfin, toutes les potentialités de l'analyse fréquentielle n'ont pas été développées dans ce travail et il faudrait poursuivre cette étude dans ce sens. Il nous semble notamment intéressant de quantifier l'appartenance de chaque point d'observation à une association végétale. Ceci pourrait permettre de visualiser les aires de répartition de chaque association et aboutir à une autre technique de cartographie des marais salés.

Références

- Ackermann F., 1999. *Airborne laser scanning--present status and future expectations*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp.64-67.
- Ahokas E., Kaartinen H. & Hyyppä J., 2003. *A quality assessment of airborne laser scanner data*.
- Axelsson P., 1998. *Processing of laser scanner data--algorithms and applications*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp.138-147.
- Baltsavias E.P., 1999. *Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp.164-198.
- Barreau G., Populus J. & Fazilleau J., 2001. *Apport de l'altimétrie par laser aéroporté à la cartographie des estrans : expérimentation de l'anse de l'aiguillon*. Revue XYZ, 87, pp.31-36.
- Bergeon B., 2004. *L'altimétrie par laser scanner aéroporté*. Géomatique Expert, 35, pp.19-24.
- Bertness M.D., Gaines S.D. & Hay M.E., 2001. *Marine community ecology*. Sinauer Associates, 550 pp.
- Bonnot-Courtois C. & Levasseur J., 2000. *Etudes en environnement - Volume 5 - Contribution à la connaissance de la dynamique des herbues*. Projet de Rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel, 195 pp.
- Bonnot-Courtois C., Caline B., L'Homer A. & Le Vot M., 2002. *La baie du Mont-Saint-Michel et l'Estuaire de la Rance: Environnements sédimentaires, aménagements et évolution récente*. Bull. Centre Rech. Elf Explor. Prod., 256 pp.
- Bonnot-Courtois C., Fournier J. & Dréau A., 2004. *Recent morphodynamics of shell banks in the western part of Mont-Saint-Michel Bay (France)*. Géomorphologie : relief, processus, environnement, 1, pp.p. 65 à 79.
- Bonnot-Courtois C., Levasseur J.E. & Le Rhun J., 1999. *Morphodynamique du front des schorres en baie du Mont Saint-Michel*.
- Boorman L., 1967. *Limonium vulgare Mill. and L. humile Mill.*. Journal of Ecology, 55, pp.221–232.
- Boorman L., 1968. *Some aspects of the reproductive biology of Limonium vulgare Mill. and Limonium humile Mill.*. Ann. Bot., 32, pp.803-824.
- Bouchard V., Digaïre F., Lefeuvre J.C. & Guillon L., 1995. *Progression des marais salés à l'ouest du Mont-Saint-Michel entre 1984 et 1994*. Mappemonde, 40, pp.28-34.
- Bouchard V., Tessier M., Digaïre F., Vivier J., Valéry L., Gloaguen J. & Lefeuvre J., 2003. *Sheep grazing as management tool in western European saltmarshes*. Compte Rendu Biologie, 326 Suppl 1, pp.S148-157.

- Braun-Blanquet J., 1928. *Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde*. Biol. Studienbücher, 7, pp.330.
- CHAPMAN V.J., 1950. *Biological flora of the British Isles. Halimione Portulacoides (L.)*. Aell. Journal of Ecology, 38, pp.214-222.
- Caline B., 1982. Le secteur occidental de la baie du Mont-Saint-Michel : morphologie, sédimentologie et cartographie de l'estran. BRGM, 250pp.
- Chapman V., 1960. *Salt marshes and salt deserts of the world*. Leonard Hill Limited. London, UK. 392pp. In Ranwell D.S., 1972. Ecology of salt marshes and sand dunes. London, Chapman and Hall. Ratcliffe, D. A. (ed.), 258 pp.
- Clements F.E., 1916. *Plant succession: an analysis of the development of vegetation*. Publication 242. Carnegie Institute, Washington, 3-4 pp.
- Clements F.E., 1936. *Nature and Structure of the Climax*. Journal of Ecology, 24, pp.252-284.
- Cobby D.M., Mason D.C. & Davenport I.J., 2001. *Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modelling*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 56, pp.121-138.
- Collin A., Long B. & Archambault P., 2010. *Salt-marsh characterization, zonation assessment and mapping through a dual-wavelength LiDAR*. Remote Sensing of Environment, 114, pp.520-530.
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farberk S., Grasso† M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R., Paruelo J., Raskin R., Suttonk P. & van den Belt M., 1997. *The value of the world's ecosystem services and natural capital*. Nature, 387, pp.253-260.
- Davenport I.J., Bradbury R.B., Anderson G.Q.A., Hayman G.R.F., Krebs J.R., Mason D.C., WILSON J.D. & Veck N.J., 2000. *Improving bird population models using airborne remote sensing*. International Journal of Remote Sensing, 21, 13-14, pp.2705-2717.
- De Foucault B., 1986. *Fractals, géomorphologie et phytosociologie fondamentale*. Coll. phytosociol., 13, pp.85-100.
- De Joinville O., Ferrand B. & Roux M., 2002. *Levé laser aéroporté: état de l'art, traitement des données et comparaison avec des systèmes imageurs*. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 166, pp.72-81.
- De Joinville O., Ferrand B. & Roux M., 2002. *Levé laser aéroporté: état de l'art, traitement des données et comparaison avec des systèmes imageurs*. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 166, pp.72-81.
- Genç L., Dewitt B. & SMITH S., 2004. *Determination of Wetland Vegetation Height with LIDAR*. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 28, pp.63-71.

- Gibeaut J.C., Waldinger R., Hepner T., Tremblay T.A. & White W.A., 2003. *Changes in Bay Shoreline Position, West Bay System, Texas*. Bureau of Economic Geology, University of Texas at Austin. .
- Gleason H. & Cronquist A., 1964. *The natural geography of plants*. Columbia University Press, New York, 420 pp.
- Gleason H.A., 1926. *The individualistic concept of the plant association*. Bull Torrey Bot Club, 53, pp.7-26.
- Godron M., 1984. *Ecologie de la végétation terrestre*. Masson, Paris, 196 pp.
- Guenther G.C., Brooks M.W. & LaRocque P.E., 2000. *New Capabilities of the "SHOALS" Airborne Lidar Bathymeter*. Remote Sensing of Environment, 73, pp.247-255.
- Guillon L., 1984a. *Carte de végétation et notice explicative des schorres de la baie du Mont-Saint-Michel*. Rapport inédit CEE-Ministère de l'Environnement, Laboratoire d'évolution des systèmes naturels et modifiés, Museum national d'histoire naturelle et Université de Rennes. pp.8.
- Haala N. & Brenner C., 1999. *Extraction of buildings and trees in urban environments*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp.130-137.
- Harper J., 1977. *Population biology of plants*. Academic Press: New York, 892 pp.
- Hodgson M. & Bresnahan P., 2004. *Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation: Empirical Assessment and Error Budget*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 70, pp.331-340.
- Hopkinson C., Chasmer L., Lim K., Treitz P. & Creed I., 2006. *Towards a universal lidar canopy height indicator*. Canadian Journal of Remote Sensing, 32, n°2, pp.1-14.
- Huising E.J. & Gomes Pereira L.M., 1998. *Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 53, pp.245-261.
- Iversen J., 1954. *The zonation of the salt marsh vegetation of Skallingen in 1931-34 and in 1952*. Meddelelser fra Skalling-Laboratoriet, 14, pp.113-118.
- Kaveh F. & Deffontaines B., 2005. *Mise à jour de MNT intégré terre - mer et application au prisme mégatidal du Mont-Saint-Michel (France)*. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 177, pp.2-16.
- Kaveh H.F. & Deffontaines B., 2008. *La limite slikke/schorre dans la Baie du Mont-Saint-Michel (Golfe Normand Breton, NO France)*. Photo-interprétation, 44 n°3-4, pp.28-44.

- L'HOMER A., 1995. Les vestiges de la pêcherie en bois de Saint-Jean-le-Thomas datant de l'âge du Bronze. In *Baie du Mont-Saint-Michel et Marais de Dol*, Centre Régional d'Archéologie d'Alet, pp.111-118.
- Lefeuvre J., Laffaille P., Feunteun E., Bouchard V. & Radureau A., 2003. *Biodiversity in salt marshes: from patrimonial value to ecosystem functioning. The case study of the Mont-Saint-Michel bay..* *Compte Rendu Biologie*, 326 Suppl 1, pp.S125-131.
- Lohani B. & Mason D.C., 2001. *Application of airborne scanning laser altimetry to the study of tidal channel geomorphology.* *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56, pp.100-120.
- MacKinnon F., 2001. *Wetland Application of LIDAR Data: Analysis of Vegetation Types and Heights in Wetlands..* Applied Geomatics Research, Centre of Geographical Sciences, Nova Scotia Geomatics Centre. pp.45.
- Morris J.T., 2007. *Ecological engineering in intertidal saltmarshes..* *Hydrobiologia*, 577-1, pp.161-168.
- Morris J.T., Porter D., Neet M., Noble P.A., Schmidt L., Lapine L.A. & Jensen J.R., 2005. *Integrating LIDAR elevation data, multi-spectral imagery and neural network modelling for marsh characterization..* *International Journal of Remote Sensing*, 26-23, pp.5221-5234.
- Paine J.G., White W.A., Smyth R.C., Andrews J.R. & Gibeaut J.C., 2005. *Combining EM and LIDAR to map coastal wetlands: an example from Mustang Island, Texas..* *Proceedings, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems: Environmental and Engineering Geophysical Society*, pp.745-756.
- Paine J.G., White W.A., Smyth R.C., Andrews J.R., Gibeaut J.C., 2004. *Mapping coastal environments with lidar and EM on Mustang Island, Texas, U.S..* *The Leading edge*, 23, pp.894-898.
- Pfeifer N., Gorte B. & Oude Elberink S., 2004. *Influences of Vegetation on Laser Altimetry – Analysis and Correction Approaches.* . *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol XXXVI, part 8/W2, pp.pp 283-287.
- Populus J., Barreau G., Fazilleau J., Kerdreux M. & L'Yavanc J., 2001. *Assessment of the Lidar topographic technique over a coastal area..*
- Priestnall G., Jaafar J. & Duncan A., 2000. *Extracting urban features from LiDAR digital surface models.* *Computers, Environment and Urban Systems*, 24, pp.65-78.
- Rango A., Chopping M., Ritchie J., Havstad K., Kustas W. & Schmutge T., 2000. *Morphological Characteristics of Shrub Coppice Dunes in Desert Grasslands of Southern New Mexico derived from Scanning LIDAR.* *Remote Sensing of Environment*, 74, pp.26-44.

- Ranwell D.S., 1972. *Ecology of salt marshes and sand dunes*. London, Chapman and Hall. Ratcliffe, D. A. (ed.), 258 pp.
- Ritchie J., 1996. *Remote sensing applications to hydrology: Airborne laser altimeters*. Hydrological Sciences Journal, 41, pp.625-636.
- Rosso P., Ustin S. & Hastings A., 2006. *Use of lidar to study changes associated with Spartina invasion in San Francisco Bay marshes*. Remote Sensing of Environment, 100, pp.295-306.
- Saye S., van der Wal D., Pye K. & Blott S., 2005. *Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: An investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data*. Geomorphology, 72, pp.128-155.
- Silvestri S., Defina A. & Marani M., 2005. *Tidal regime, salinity and salt marsh plant zonation*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 62, pp.119-130.
- Tansley A.G., 1935. *The use and abuse of vegetational concepts and terms*. Ecology, 16, pp.284–307.
- Tessier M., 1999. Dynamique des communautés végétales sur un marais salé : importance de Suaeda maritima (Baie du Mont Saint-Michel). Thèse de l'Université de Rennes I, UMR CNRS Ecobio 6553, Laboratoire d'Ecologie Végétale (France), 131pp.
- Tilman D., 1988. *Plant Strategies and the Dynamics and Structure of Plant Communities*. Monographs in Population Biology 26. Princeton University Press, Princeton, NJ., 360 pp.
- Van Dyne G., 1969. *The ecosystem concept in natural resource management*. Illus. Academic Press: New York, N. Y., London, England, 383 pp.
- Verger F., 1989. L'évolution de la télédétection satellitaire concernant les milieux littoraux. In *Télédétection en Francophonie*, Éd. AUPELF-UREF John Libbey Eurotext. Paris, pp.111-115.
- Wagner W., Eberhöfer C., Hollaus M. & Summer G., 2004. *Robust Filtering of Airbone Laser Scanner Data For Vegetation Analysis*.
- Wagner W., Ullrich A., Ducic V., Melzer T. & Studnicka N., 2006. *Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60, pp.100-112.
- Wang C. & Philpot W.D., 2007. *Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters*. Remote Sensing of Environment, 106, pp.123-135.
- Wehr A. & Lohr U., 1999. *Airborne laser scanning--an introduction and overview*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp.68-82.