

Aide à la gestion multifonctionnelle des dunes littorales atlantiques par l'évaluation cartographiée de leur état de conservation

Ecosystem service based mapping of Atlantic Coastal dunes conservation state for management

Programme « Multidune »

Rapport final

Université de Nantes – LETG - UMR 6554 / Géolittomer
BP 81227, 44312 NANTES cedex 3
Tél. : 33 (0)2 40 14 13 08 - Fax : 33 (0)2 40 74 60 69
<http://letg.univ-nantes.fr>

DEBAINE Françoise, Maître de conférences
Tél. : 33 (0)2 40 14 13 81 - Courriel : francoise.debaine@univ-nantes.fr

N° de contrat : 001127
Date du contrat : 12/12/2007

« MULTIDUNE » : Aide à la gestion multifonctionnelle des dunes littorales atlantiques par l'évaluation cartographiée de leur état de conservation

Sommaire

Résumé exécutif	4
Rapport scientifique	6
Problématique	7
A. Contexte et objectifs du projet	7
B. Multidune : des outils pour une évaluation cartographiée de l'état de conservation des dunes littorales atlantiques	9
C. Sites test	12
I – EVALUATION CARTOGRAPHIEE DE L'ETAT DE CONSERVATION DES DUNES LITTORALES ATLANTIQUES AU REGARD DU SERVICE PROTECTION	13
1. Evaluation du Service Protection contre les aléas naturels	13
1.1. Service protection : principe général	14
1.2. Service protection : détail de la méthodologie. Exemple des caoudeyre	15
1.3. article paru dans OCM	17
2. Développement de la méthode vers les Pays de Monts (Vendée)	29
II – EVALUATION CARTOGRAPHIEE DE L'ETAT DE CONSERVATION DES DUNES LITTORALES ATLANTIQUES AU REGARD DU SERVICE BIODIVERSITE	30
1. Cartographie et évaluation des habitats : une nécessité	30
2. Segmentation multiscale de l'espace dunaire pour un diagnostic	31
2.1. Biodiversité	32
2.2. Naturalité	36
3. Matériel, méthodes et résultats	38
3.1. Biodiversité	38
3.2. Naturalité	43
3.3. Intégration dans un SIG	43
3.4. Déroulé du protocole sur le massif dunaire de Noirmoutier (Vendée)	43
1) Variable « Naturalité » - évaluée à travers le degré d'artificialisation du massif dunaire	43
2) Variable « Biodiversité »	50
Biodiversité – Niveau I – Variable Habitats	50
Biodiversité – Niveau II – Variable Faciès	55
Biodiversité – Niveau III – Variable Espèces	58
Conclusion générale et perspectives	60
Eléments de valorisation	60
Bilan financier	64
Table des figures	65

Résumé exécutif

Enjeux du programme multidune

Le suivi et l'évaluation de l'état des milieux dunaires sont actuellement au cœur des démarches visant à la gestion, la conservation et la protection des milieux naturels, qu'elles s'expriment au niveau local ou régional, national, international et européen. Le diagnostic d'état est donc un préalable indispensable à la prise de décision.

La prise en compte de deux des trois services rendus par les dunes littorales (protection contre les aléas météorologiques et biodiversité, le service culturel n'ayant pas été pris en compte) sous-tend l'ensemble de la méthodologie proposée, les objectifs à long terme de la gestion tels que définis avec les gestionnaires partenaires (ONF) visant au maintien ou à la restauration de ces services.

Chaque service fait l'objet d'une méthodologie propre intégrant des données sources et des indicateurs pertinents et spécifiques. Mais au final, les services étant inter reliés, ils interagissent (à chaque état de la dune par exemple correspond un type de végétation qui contribue à maintenir sa stabilité. Tout changement dans la végétation est le reflet de la modification de l'état géomorphologique de la dune et vice versa), et un choix en matière de gestion qui affecte l'un des services a un impact sur la qualité des autres services identifiés. Ainsi, la prise de décision et les propositions d'actions qui peuvent découler du diagnostic supposent qu'ait été établie en amont une hiérarchie des enjeux, que l'on ait fixé le degré de priorité des objectifs et surtout que l'on s'accorde sur la définition de ce qu'est un bon état, en regard des services protection et biodiversité.

Multidune se veut ainsi un outil d'analyse qui porte à connaissance à travers la combinaison d'un certain nombre d'indicateurs les différentes modalités de l'état d'un écosystème. Par la prise en compte d'un grand nombre de critères, il échappe aux implications d'une analyse sectorielle et donc partielle et aide à définir les enjeux propres à chaque site.

Résultats principaux

L'objet soumis au diagnostic est l'écosystème dunaire délimité sur le plan géologique en tant que « formation sableuse ». L'hétérogénéité de nature des massifs dunaires, tout comme la très grande diversité des pressions auxquelles ils sont soumis, imposent une évaluation spatialisée selon une grille adaptée dont les mailles doivent couvrir de façon exhaustive et régulière l'objet analysé. L'objet Dune est donc décomposé en unités d'observations que nous avons appelées « boîtes », au sein desquelles les mesures relatives aux indicateurs sélectionnés et issues du traitement des données du référentiel (orthophotographies, LIDAR) et des données de terrain sont intégrées (traitements faisant en grande partie appel à l'approche Orientée Objet et aux géotraitement SIG). Les boîtes sont des unités de 50 m de large sur 500 m (maximum) de profondeur à partir du trait de côte.

Le découpage par boîtes rend possible la comparaison des états de différents tronçons à l'intérieur d'un massif dunaire et autorise des comparaisons objectives d'un massif à un autre du littoral atlantique. Multidune est donc en cela un système opérationnel de description et d'analyse multiscalair : a) l'échelle locale de l'indicateur (niveau intra-boîte), b) l'échelle du massif qui est celle de l'évaluation par intégration dans les boîtes des valeurs associées aux différents indicateurs et de l'analyse multicritère, c) l'échelle régionale de la comparaison entre différents massifs.

Service Protection : afin de préciser la vulnérabilité des cordons, nous avons intégré 10 variables dans les boîtes (altitude moyenne, volume de sable, entropie, cuvettes de déflation actives, rides et pics, évolution du trait de côte depuis 50 ans, présence de défenses côtières, taux de recouvrement végétal, largeur de la dune blanche) et deux variables d'enjeux (distance urbanisation – trait de côte, surfaces urbanisées). Ces variables sont mises en relation les unes avec les autres afin d'assurer, par leur densité de présence et la densité de la combinaison (occurrence) de variables, une évaluation fiable du niveau de service rendu. La démarche est entreprise pour les 3 volets du service Protection (érosion marine, déflation éolienne, submersion). L'addition de ces 3 volets amène à l'identification d'un service Protection global, mesurant pour chaque unité d'observation leur niveau de service par volet et globalement. Une fois identifiées les unités d'observation à

risque, un zoom à une échelle fine (second niveau scalaire) est effectué pour cibler les formes responsables de la dégradation du service et adopter une stratégie de gestion afin d'en minimiser la portée. A noter qu'un raffinement des variables a été effectué suite à l'évènement Xynthia en intégrant la cote 4.20 dans les boites et en introduisant la typologie du contact plage/dune qui reste un bon marqueur de la dynamique du système. Les résurgences de nappes sur les plages seront aussi intégrées. Le déploiement sur le secteur Pays de Monts prend en compte ce raffinement.

Service biodiversité : la démarche d'intégration dans les mêmes boites que le service protection permet la mise en relation des deux services. Dans le cas du service biodiversité, les différents paramètres qui fondent le diagnostic d'état du milieu sont classés en deux catégories : Biodiversité et Naturalité. Concernant la biodiversité, l'évaluation du service est menée à travers la caractérisation de la végétation qui est dans la majorité des cas le support des habitats et qui est aussi une composante inscrite spatialement et donc analysable par télédétection dans sa diversité. On la caractérise ici par trois niveaux spatialement emboîtés et intégrés dans les boites : le niveau supérieur « Habitat » (typologie retenue correspondant à la typologie EUR 15-27) ; le niveau intermédiaire « Faciès » (deux critères : recouvrement et composition floristique) ; et le dernier niveau le plus fin « Espèce » (Trois types d'espèces ont une valeur indicatrice sur ce plan : les espèces rares, les espèces envahissantes ou invasives, le cas particulier du Pin maritime). Concernant la naturalité, il s'agit d'un paramètre complémentaire de la biodiversité pour juger de la qualité écologique d'un milieu. On a pris donc en compte A1 : Artificialisation du substrat : surfaces recouvertes artificiellement (surfaces cimentées, goudronnées, asphaltées ou stabilisées : terre battue, par exemple), sans végétation occupant la majeure partie du sol ; A2 – Artificialisation du cortège floristique ; A3 – Artificialisation induite par la fréquentation. A ceci s'ajoute l'organisation spatiale de cette artificialisation qu'on appelle fragmentation, certaines organisations conduisant à des ruptures des processus écologiques, d'autres non. Cette configuration spatiale de l'artificialisation a donc aussi été intégrée dans les boites.

Au total, le traitement synthétique de ces variables permet de mettre en avant les critères simples permettant une vision synoptique des états de conservation et des écarts aux états, de produire de la statistique à différents niveaux scalaires et à différents niveaux d'intégration.

Nous avons retenus dans notre proposition de recherche 4 sites ou ensembles de sites pour mettre au point et tester la méthode (5 petits sites en Ille et Vilaine ; les dunes domaniales de Quiberon Plouharnel et les Dunes du site du Mat Fenoux (Morbihan) ; les dunes domaniales de Noirmoutier (Vendée) ; la Pointe d'Arçay (Vendée)). Des relevés de végétation ont été effectués sur l'ensemble des sites afin de caractériser la biodiversité par une analyse phytosociologique. Mais au final nous n'avons retenus qu'une zone test, pour l'ensemble de la méthodologie, Noirmoutier, massif sur lequel nous disposons dès le début de l'étude du plus grand nombre de données brutes (en particulier les données lidar puis les données de télédétection hyperspectrale). Ce site a fait l'objet de nombreuses études et d'un observatoire. La méthodologie Multidune est actuellement en cours de déploiement dans le cadre de l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts, produit d'une convention entre la communauté de communes Océan-Marais de Monts, l'Université de Nantes – IGARUN, le BRGM et l'ONF.

Valorisation

1 publication internationale parue, 1 soumise, 2 en préparation prévue au printemps 2013.

8 participations à des colloques/séminaires (dont l'atelier de restitution sur le terrain organisé dans le cadre des journées EUCC (European Union for Coastal Conservation))

5 rapports divers (dont 3 rapports de Master)

Rapport scientifique

Aide à la gestion multifonctionnelle des dunes littorales atlantiques par l'évaluation cartographiée de leur état de conservation

Membres de l'équipe :

Françoise DEBAINE (Université de Nantes, UMR 6554 LETG / GEOLITTOMER), **responsable scientifique du projet,**

Marc ROBIN (Université de Nantes, UMR 6554 LETG / GEOLITTOMER),

Françoise ROZE (Université de Rennes 1, UMR 6553 : ECOBIO)

Jean FAVENNEC et **Loïc GOUGUET** (Office National des Forêts)

Marie-Claire PRAT (EUCC France)

Problématique

A. Contexte et objectifs du projet

L'objectif du programme « Multidune » est de proposer une méthode de diagnostic opérationnelle et fiable d'évaluation de l'état des dunes littorales, au regard des divers services attendus de ces milieux.

Le suivi et l'évaluation de l'état des milieux naturels sont actuellement au cœur des démarches visant à la gestion, la conservation et la protection des milieux naturels, qu'elles s'expriment au niveau local ou régional (*Contrat Etat-ONF 2012-2016, Manuel d'aménagement forestier, ONF, élaboration des plans de gestion*), national (*Projet d'évaluation des fonctions écologiques des milieux en France - convention entre le Muséum d'Histoire Naturelle et le MEEDDAT sur la valorisation des fonctions écologiques des habitats naturels en France*), international et européen (*Guide méthodologique des documents d'objectifs Natura 2000 (Valentin-Smith 1998)*). Le diagnostic est un préalable indispensable à la prise de décision.

a) Les dunes littorales : un espace d'interface entre terre et mer

Les dunes littorales présentent une grande hétérogénéité à l'échelle du littoral français mais les spécificités de cet écosystème tiennent à un caractère commun, la nature sableuse du substrat. Par ailleurs, quelles que soient les configurations locales, leur structure et leur fonctionnement sont déterminés par leur position, à l'interface entre mer et terre.

Le lien avec la mer se fait par les échanges sédimentaires mer/terre via les dynamiques morpho-sédimentaires qui garantissent ou non leur stabilité. Ces dynamiques sont en effet susceptibles d'éroder la face marine des dunes littorales provoquant un repli côtier ou au contraire de l'engraisser par des dépôts sédimentaires et d'élargir ainsi le champ dunaire vers la mer. Le lien se fait aussi par une dynamique éolienne particulière provoquant, ici une migration vers la terre de dunes mobiles, là, en l'absence d'une bonne gestion, une érosion par le biais d'une fragilisation de la végétation dunaire sous la trop forte pression touristique. Le lien avec la mer se lit également sur le plan écologique à travers les différents faciès et habitats dunaires disposées le plus souvent en bandes plus ou moins parallèles au trait de côte et dont les caractères sont étroitement dépendants de l'influence décroissante, de la mer vers la terre, de deux facteurs, le vent et la salinité.

Le lien avec la terre est associé aux services rendus à la société par les dunes littorales et par là à leurs usages. Les dunes littorales procurent en effet des bénéfices récréatifs, touristiques, esthétiques et plus généralement, culturels. Sur le plan économique, la complémentarité entre dunes et arrière pays (attractivité du massif dunaire, impact au niveau du prix du foncier périphérique, rôle de l'intervisibilité etc.) est forte. Réservoirs de biodiversité, elles sont placées sous un ensemble de réglementations de protection et l'objet de programmes de restauration/conservation. Enfin, elles protègent l'arrière pays contre les agressions marines.

L'évaluation de l'état des dunes littorales est donc motivée par la prise en compte de la fragilité intrinsèque de cet écosystème d'une part, et d'autre part, des fortes pressions tant naturelles (aléas météo-marins) qu'anthropiques (cf. les différents usages des dunes) qui le menacent dans son intégrité et son fonctionnement. Les services qu'il rend à la société constituent autant d'enjeux (protection, biodiversité, « culture ») dont la vulnérabilité tend à s'accroître fortement, accentuant, de ce point de vue, le risque de déficience du système : un service protection qui ne serait plus ou moins fortement assuré, la perte ou la diminution de la biodiversité, la banalisation des paysages et au final un attrait culturel également amoindri.

b) Gestion, protection, conservation et prise en compte des services rendus par l'écosystème dunaire

La gestion est adaptée à la nature des enjeux dont la hiérarchie évolue au cours du temps. L'intervention de l'homme sur les dunes littorales est ancienne, tant sur leur couvert végétal que sur leur modelé. Elle a longtemps eu pour objectif la protection du territoire de l'avancée des sables. On s'est ainsi efforcé un peu partout de fixer les dunes mobiles. Avec l'évolution des attentes sociales, la mise en évidence de leur haute valeur patrimoniale, une meilleure connaissance des processus de fonctionnement, la recherche de la fixation des dunes a laissé place pour l'ONF, gestionnaire d'une grande partie des dunes littorales atlantiques (350 km dont 320 km de dunes domaniales, principalement entre la Loire et le sud des Landes) et partenaire du programme, à des principes et des pratiques de gestion « durable », à un « contrôle souple » visant seulement à modérer les processus sans les interrompre (Favennec, 2002, p. 205¹). Cette gestion se veut aujourd'hui dans la mesure du possible, multifonctionnelle, ou plutôt multi-services, les objectifs à long terme de la gestion visant au maintien ou à la restauration des services écosystémiques assurés par les dunes littorales.

b.1. Service de **PROTECTION** (qui est en référence au *Millenium Ecosystem Assessment* (2005) un service de régulation) :

- Protection contre le risque de submersion (dunes à rôle dominant de digue)
- Modération de l'érosion marine (dans le cadre des échanges plage/dune)
- Protection des biens et des personnes contre le risque d'ensablement

A la suite de la tempête Xynthia en février 2010, une prise de conscience aiguë s'est faite jour sur le rôle que peuvent jouer certains cordons dunaires face aux aléas météomarins et plus particulièrement face aux submersions dans les zones à risque et de fait, sur la nécessité de leur surveillance. Le service protection a donc été replacé en position centrale dans la vision sociale du rôle joué par les milieux dunaires dans les zones à forts enjeux humains et non humains. Ce service protection se décline en matière de lutte contre les risques d'érosion et surtout de submersion : les programmes d'action de prévention des inondations (PAPI) et de Plan Submersions Rapides (PSR) en témoignent.

Les pratiques de gestion opérées, notamment par l'ONF, doivent ainsi être adaptées à cette fonctionnalité et permettre aux dunes, selon une conception de flexibilité, d'amortir doucement l'énergie marine ; d'apporter un soutien au budget sédimentaire (réalimentation de la plage après les tempêtes, ce qui contribue aussi à dissiper l'énergie des vagues et diminuer leur pouvoir d'érosion). Les pratiques de gestion doivent favoriser ainsi l'expression de cette fonction naturelle de protection vis-à-vis des arrières pays de basse altitude.

La prise de conscience accrue de l'intérêt de la conservation des massifs dunaires apparaît également à travers la *stratégie nationale pour la gestion du trait de côte* qui s'exprime notamment dans le guide national sur la gestion durable du trait de côte, outil de diffusion des connaissances et des stratégies de gestion des rivages soumis à l'érosion (MEEDDM, 2010)². On retrouve certaines préconisations d'une bonne gestion dans le rapport d'A. Cousin³ notamment dans sa rubrique « Recommandations stratégiques ». Toutefois, malgré des recommandations d'action pertinente (en particulier l'action A « Développer les outils de l'observation du trait de côte et de la compréhension de son évolution à l'échelle nationale et au sein des régions pour prioriser l'action publique », il manque une dimension outil opérationnel pour un diagnostic efficace.

¹ FAVENNEC J., 2002. Contrôle souple et réhabilitation des dunes littorales non boisées de la côte atlantique. *Connaissance et gestion durable des dunes de la côte atlantique*. Les dossiers forestiers ONF n° 11, Octobre 2002, 205-223.

² MEEDDM, 2010, La gestion du trait de côte, Éditions Quae, Collection Savoir faire

³ Cousin A., 2011, RAPPORT présenté par Monsieur Alain COUSIN, Député de la Manche : Propositions pour une stratégie nationale de gestion du trait de côte, du recul stratégique et de la défense contre la mer, partagée entre l'État et les collectivités territoriales

b.2. Service **BIODIVERSITÉ**

- Biodiversité en termes d'habitats
- Biodiversité en termes d'espèces

Les services écosystémiques de la biodiversité touchent tous les domaines identifiés par le MEA (support, approvisionnement, régulation, service culturel et social). Actuellement protégées dans le cadre de la directive européenne « Habitats », les dunes littorales ont fait l'objet de nombreux inventaires (relevés phytosociologiques, ZNIEFF), qui révèlent leur intérêt majeur sur le plan écologique en termes de biodiversité tant au niveau des habitats que de celui des espèces puisque sur les quelques 400 taxons vasculaires exclusivement littoraux en France (environ 10% de la flore française totale) on peut considérer que quelques 150 espèces sont préférentiellement dunaires et quelques 60 le sont exclusivement. Sur ce nombre, plus d'une vingtaine sont rares, menacées ou en forte régression qu'il s'agisse de plantes endémiques ou non (*J.-M. Géhu, 1997*).

Les dunes constituent donc, un réservoir potentiel de biodiversité mais un réservoir menacé que les diverses réglementations, en particulier la Directive Habitats, cherchent à préserver.

Elles sont ainsi répertoriées dans le manuel d'interprétation des habitats de l'Union européenne (version EUR 15, 1999, actuellement version EUR 27, 2008) : (2110) Dunes mobiles embryonnaires, (2120) Dunes mobiles du cordon littoral à *Ammophila arenaria* (dunes blanches), (2130) Dunes côtières fixées à végétation herbacée (dunes grises) reconnues comme Habitat prioritaire, (2190) Dépressions humides intradunales, (2170) Dunes à *Salix repens* ssp. *argentea*.

Hier mobilisés autour des seuls aspects géomorphologiques de l'écosystème en réponse à des objectifs de fixation et de renforcement de son efficacité sur le plan de la protection, les gestionnaires intègrent aujourd'hui les préconisations issues des engagements de la convention *sur la diversité biologique*, qui se sont concrétisés en France à travers la *stratégie nationale pour la biodiversité* (2004) par laquelle la biodiversité devient un volet à part entière de la *stratégie nationale de développement durable*.

Connaissance, observation, suivi des caractères biologiques d'un site sont ainsi à la base de l'établissement des plans de gestion et autres DOCOB. L'objectif est la protection, le maintien de la biodiversité potentielle du site, sa valorisation, la limitation des pressions anthropiques qui le menacent. Il s'agit de maintenir des conditions favorables à la diversité, de les favoriser, voire de mettre en place un ensemble de mesures visant à la restauration d'un état favorable. La biodiversité est ainsi un enjeu majeur de la gestion des dunes littorales.

De nombreuses références existent concernant la composition, la structure ou le fonctionnement de cet écosystème ; les données foisonnent sous forme d'observations ou de relevés successifs mais dans ce domaine également les outils permettant d'établir un diagnostic spatialisé, précis et fiable préalable à l'action font défaut.

B. Multidune : des outils pour une évaluation cartographiée de l'état de conservation des dunes littorales atlantiques

La prise en compte des services rendus par les dunes littorales sous-tend l'ensemble de la méthodologie proposée, les objectifs à long terme de la gestion tels que définis avec les gestionnaires partenaires (ONF) visant au maintien ou à la restauration des services protection ou biodiversité. Le service culturel n'est pas explicitement pris en compte mais les analyses produites peuvent conduire à une réflexion sur les interactions entre ce service et les autres.

Chaque service fait l'objet d'une méthodologie propre intégrant des données sources et des indicateurs pertinents et spécifiques pour l'évaluation de l'état de la dune par rapport aux objectifs de Protection d'une part et de Biodiversité d'autre part. Mais au final, les services étant inter reliés, ils interagissent (à chaque état de la dune par exemple correspond un type de végétation qui contribue à maintenir sa stabilité. Tout changement dans la végétation est le reflet de la modification de l'état géomorphologique de la dune et vice versa), et un choix en matière de gestion qui affecte l'un des services a un impact sur la qualité des autres services identifiés. Ainsi, la prise de décision et les propositions d'actions qui peuvent découler du diagnostic supposent qu'ait été établie en amont une hiérarchie des enjeux par un système de pondération et que l'on ait fixé le degré de priorité des objectifs. Cette pondération doit reposer sur une analyse des enjeux propres à chaque site.

Multidune se veut un outil d'analyse qui porte à connaissance à travers la combinaison d'un certain nombre d'indicateurs les différentes modalités de l'état d'un écosystème au regard des objectifs fixés en matière de Biodiversité et de protection. Multidune ne choisit pas, c'est un outil d'analyse multicritères qui apporte des éléments d'aide à la décision.

Par la prise en compte d'un grand nombre de critères, il échappe aux implications d'une analyse sectorielle et donc partielle et aide à définir les enjeux propres à chaque site.

i. La question des données

L'accès aux données adéquates, nécessaires et suffisantes pour mener à bien l'évaluation sur l'ensemble du territoire concerné est une question centrale sur laquelle buttent nombre de procédures d'évaluation. Pas d'évaluation sans données. L'hétérogénéité des données (nature, source, date, saison, niveau de détail) limitent souvent la portée de la démarche de diagnostic, sa validité, sa reproductibilité.

Nous avons mis en évidence la nécessité de disposer, selon une périodicité définie, de données homogènes et spatialement continues, sur l'ensemble des objets soumis à l'évaluation, de prendre en compte les différents niveaux scalaires qui rendent compte des caractéristiques et de la dynamique des milieux étudiés et enfin de pouvoir mener à bien l'évaluation en un minimum de temps. Les données obtenues par télédétection aérienne et spatiale répondent à ces contraintes.

Multidune apporte des informations précises et spatialisées à différents niveaux d'échelle et d'intégration, s'appuyant sur des sources d'information classiques et couramment utilisées par les gestionnaires (orthophotographies, terrain) et sur des sources nouvelles (données lidar, télédétection hyperspectrale) dont il met clairement en évidence les apports.

ii. La question du suivi

A la question du diagnostic est associée celle du suivi dont une des bases est la comparaison d'états successifs. L'intérêt est d'exercer une surveillance régulière selon un intervalle de temps adéquat par rapport au type d'écosystème observé, c'est-à-dire qui permette de distinguer les réelles tendances dynamiques.

Le suivi implique de disposer de données-sources de même nature, donc comparables aux différents temps observés et homogènes sur l'ensemble de l'écosystème/habitat observé. Si l'obtention de ces données s'avère très lourde en temps de collecte ou trop coûteuse, la procédure d'évaluation risque d'être ralentie –son intérêt pour les gestionnaires devient alors limité–, ou de se contenter d'un nombre faible d'observations ou « pire » du recours systématique « aux dires de l'expert », méthode certes rapide mais très subjective et hétérogène –la fiabilité de la démarche surtout lorsqu'elle s'applique à l'ensemble des écosystèmes/habitats d'un même type et non plus seulement à un site particulier, peut dans ce cas être mise en doute. Cette question est donc abordée pour chaque approche relevant de l'analyse de services des massifs dunaires. En matière de couverture végétale par exemple des levés espacés de 3 à 5 ans sont considérés comme suffisant pour un suivi robuste de vastes zones.

iii. Limites spatiales de l'analyse et intégration spatiale des informations

L'objet soumis au diagnostic est l'écosystème dunaire délimité sur le plan géologique en tant que « formation sableuse ». Cette délimitation est celle de la carte géologique du BRGM (Carte vecteur harmonisée (Référentiel géologique *BD-Charm-50*) dont nous affinons les contours par superposition à la BD ORTHO de l'IGN (Fig. 1 exemple du massif dunaire de l'île de Noirmoutier)).



Figure 1 : Le massif dunaire de l'île de Noirmoutier (85) d'après le référentiel géologique BRGM

L'hétérogénéité de nature des massifs dunaires, tout comme la très grande diversité des pressions auxquelles ils sont soumis, imposent une évaluation spatialisée selon une grille adaptée dont les mailles doivent couvrir de façon exhaustive et régulière l'objet analysé. L'objet Dune est donc décomposé en unités d'observations que nous avons appelées « boîtes » au sein desquelles les mesures relatives aux indicateurs sélectionnés et issues du traitement des données brutes sont intégrées. Les boîtes sont des unités de 50 m de large sur 500 m (maximum) de profondeur mer-terre à partir du trait de côte (Fig. 2).

Le découpage par boîtes rend possible la comparaison des états de différents tronçons à l'intérieur d'un massif dunaire et autorise des comparaisons objectives d'un massif à un autre du littoral atlantique. Multidune est donc en cela **un système opérationnel de description et d'analyse multiscalaire** :

- l'échelle locale de l'indicateur (niveau intra-boîte),
- l'échelle du massif qui est celle de l'évaluation par intégration dans les boîtes des valeurs associées aux différents indicateurs et de l'analyse multicritère,
- l'échelle régionale de la comparaison entre différents massifs.

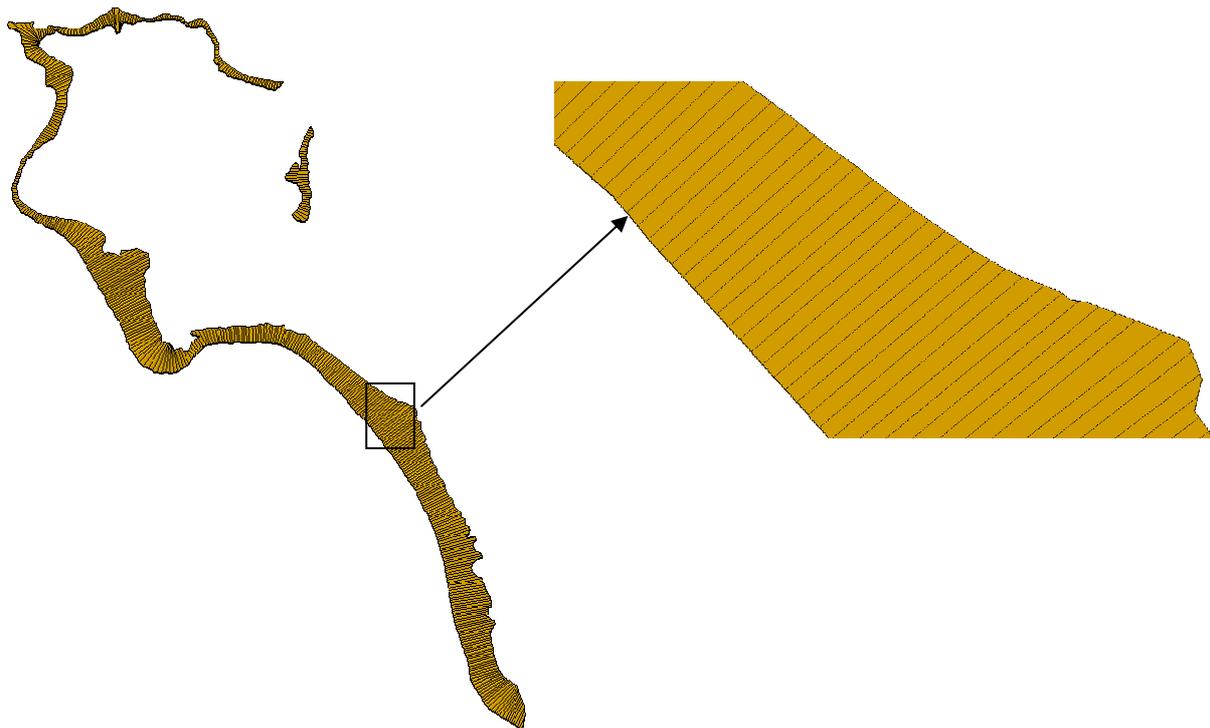


Figure 2 : Boites ou unités d'observation (50*500m maximum) : intégration et spatialisation de l'information

C. Sites test

Nous avons retenus dans notre proposition de recherche 4 sites ou ensembles de sites pour mettre au point et tester la méthode (Fig. 1).

1. les sites de l'anse du verger, de l'anse Duguesclin, de Roz Ven, de l'anse des Chevrets et de Saint Briac gérés par le Conseil général d'Ille et Vilaine,
2. les dunes domaniales de Quiberon Plouharnel (Morbihan) gérées ONF - Les Dunes du site du Mat Fenoux gérées par le CELRL,
3. les dunes domaniales de Noirmoutier (Vendée),
4. la Pointe d'Arçay (Vendée), RBD gérée par l'ONF – le Domaine Public Maritime dit de la « Pointe d'Arçay » géré par le CELRL.

Des relevés de végétation ont été effectués sur l'ensemble de sites afin de caractériser la biodiversité par une analyse phytosociologique (F. Rozé).

Mais au final nous n'avons retenus qu'une zone test, pour l'ensemble de la méthodologie, Noirmoutier, massif sur lequel nous disposons dès le début de l'étude du plus grand nombre de données brutes (en particulier les données lidar puis les données de télédétection hyperspectrale). Ce site a fait l'objet de nombreuses études et d'un observatoire.

La méthodologie Multidune est actuellement en cours de déploiement dans le cadre de l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts, produit d'une convention entre la communauté de communes Océan-Marais de Monts, l'Université de Nantes – IGARUN, le BRGM et l'ONF.

I – EVALUATION CARTOGRAPHIÉE DE L'ÉTAT DE CONSERVATION DES DUNES LITTORALES ATLANTIQUES AU REGARD DU SERVICE PROTECTION

Le protocole détaillé pour une évaluation de l'état des dunes littorales au regard du service protection a fait l'objet d'une publication dans la revue Ocean and Coastal Management. A noter que l'article a été proposé pour être aussi référencé par le site web EarthEmphasis (Center for Top Earth and Environmental Science Research) <http://earthemphasis.com/key-research-articles/a-new-gis-modelling-of-coastal-dune-protection-services-against-physical-coastal-hazards/>⁴. Nous la reproduisons ci-après (p. 17- 28) intégralement. Nous ne présentons donc ici qu'un résumé de la méthodologie.

1. Evaluation du Service Protection contre les aléas naturels

L'évaluation du **service Protection** est fondée sur l'analyse de variables discriminantes dérivées des données Lidar, aériennes et satellitaires. La combinaison de ces variables au sein des unités d'observation spatialisées (boîtes) permet la mise en évidence des niveaux de service offerts par l'écosystème dunaire face à :

- l'érosion marine,
- la submersion potentielle lors des surcotes
- et l'éolisation des massifs.

Le protocole a été appliqué sur le site de Noirmoutier et un soin particulier a été pris pour permettre la reproductibilité de la méthode d'une part et d'autre part le remplacement de chaque niveau de service dans un référentiel service plus large, au niveau du littoral français, à partir d'un minimum et d'un maximum de service potentiel propre au « bassin de risque » et propre à la façade atlantique de la France. Il faut entendre par bassin de risque la prise en compte par exemple dans un service protection contre les submersions, d'une cote d'aléa maximum homogène sur un secteur côtier appelé donc bassin de risque : la cote Xynthia retenue par exemple dans le PPRL de l'île de Noirmoutier est de 4.20, tandis que la cote centennale GIEC est de 4.80. Cette cote n'est bien évidemment pas la même dans un autre bassin de risque.

1.1. Service protection : principe général

Un résultat cartographié du service protection illustrant ce protocole est présenté (Fig.3).

Dix variables sont dérivées des données LIDAR, satellitaires et aériennes :

- altitude moyenne,
- volume de sable,
- entropie,
- cuvettes de déflation actives,
- rides et pics,
- évolution du trait de côte depuis 50 ans,
- présence de défenses côtières,
- taux de recouvrement végétal,
- largeur de la dune blanche,

ainsi que deux variables d'enjeux :

- distance urbanisation – trait de côte,
- surfaces urbanisées.

⁴ Debaine F., Robin M., 2012. A new GIS modelling of coastal dune protection services against physical coastal hazards. *Ocean and Coastal Management* 63 (2012), 43-54

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964569112000683>

<http://earthemphasis.com/key-research-articles/a-new-gis-modelling-of-coastal-dune-protection-services-against-physical-coastal-hazards/>

Ces variables sont intégrées dans les unités d'observation (boîtes) et mises en relation les unes avec les autres afin d'assurer, par leur densité de présence et la densité de la combinaison (occurrence) de variables, une évaluation fiable du niveau de service rendu.

La démarche est entreprise pour les 3 volets du service Protection (érosion marine, déflation éolienne, submersion). L'addition de ces 3 volets amène à l'identification d'un service Protection global, mesurant pour chaque unité d'observation leur niveau de service. Cette approche offre une

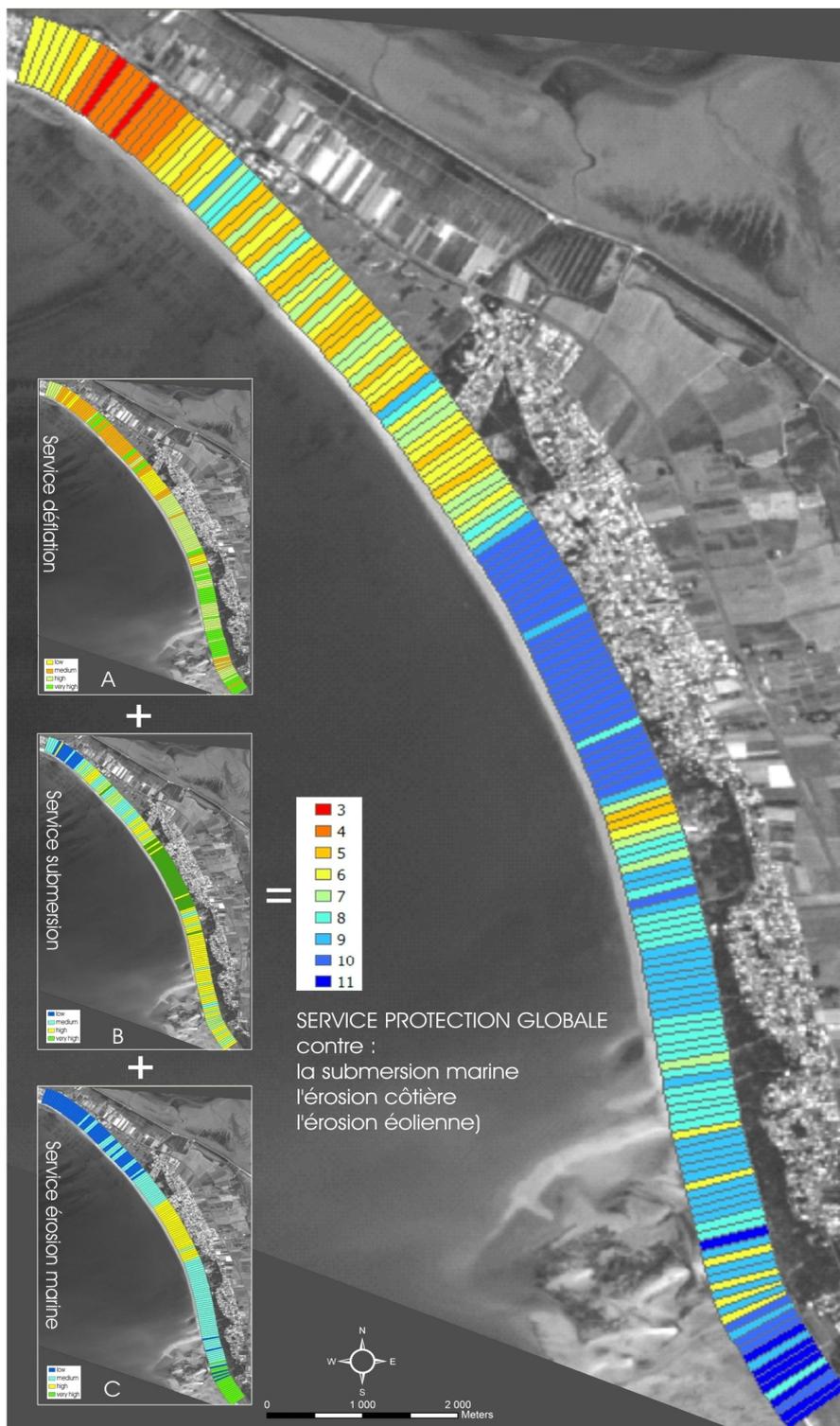


Figure 3 : Evaluation cartographiée du service Protection

vision précise de l'état de chaque segment dunaire et est conçue à un premier niveau scalaire «global» opérationnel pour le gestionnaire.

Le constat ainsi effectué sur cette partie de Noirmoutier met en évidence la faiblesse de la partie nord de la flèche en regard des aléas potentiels pour des raisons de structure de la dune barrière (épaisseur faible, faible volume de sable, configuration topographique optimale face à la submersion, érosion chronique malgré des défenses côtières, enjeux très élevés). Le rouge signale ainsi une déficience de service tandis que le bleu signale un service assuré. Le dégradé de couleur correspond à la dégradation du service.

L'intervention du gestionnaire est ainsi facilitée par cette vision synoptique de la déficience du service qui, mise en relation avec les degrés d'enjeux sociétaux, permet d'optimiser les interventions en les ciblant. Une fois identifiées les unités d'observation à risque, un zoom à une échelle fine (second niveau scalaire) est effectué pour cibler les formes responsables de la dégradation du service et adopter une stratégie de gestion afin d'en minimiser la portée.

1.2. Service protection : détail de la méthodologie. Exemple des caoudeyres.

La dimension, la densité et le degré de fonctionnalité des caoudeyres (ou cuvettes de déflation active) est un géoindicateur du degré d'éolisation du massif ainsi que du degré de fragilité au regard de l'érosion marine mais aussi un indicateur de la perméabilité du massif au regard de la submersion.

Exemple d'une variable dérivée du LIDAR et de Spot : cuvettes de déflation actives -caudeyres-
 (calculées à partir de la forme –LIDAR- et du taux de recouvrement végétal –indice de végétation tiré d'une image Spot-)

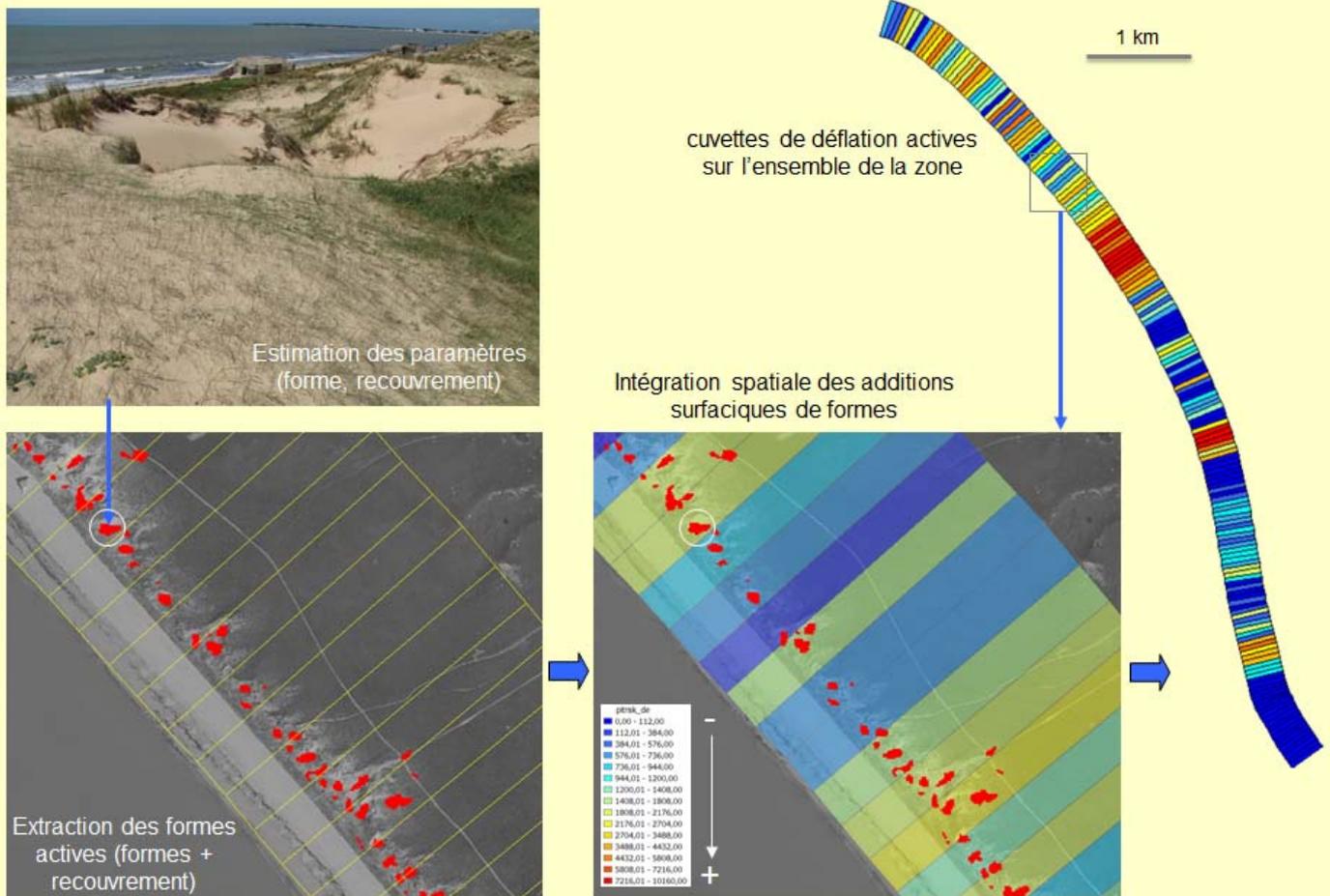


Figure 4 : Intégration de la variable « surfaces des caudeyres » (cuvettes de déflation active) au sein des boites

La dérivation des données LIDAR permet a) de cerner au plus près cette forme (dimension volumétrique), b) d'estimer la densité de caudeyres au sein d'une unité d'observation (surface cumulée en m² de caudeyres au sein d'une boite) et c) d'évaluer son degré d'activité (taux de recouvrement végétal de la forme à partir d'un indice de végétation) (Figure 4).

Au niveau du gestionnaire, ce géoindicateur dans sa dimension spatiale permet ainsi deux niveaux d'intervention : a) à une échelle plus globale : une vision synoptique de la présence/absence des caudeyres (densité) sur l'ensemble d'un massif dunaire de nature à attirer l'attention sur des secteurs fragiles ; b) à une échelle fine, au niveau de chaque forme : une aide au ciblage des caudeyres à traiter selon le critère forme (volume et degré d'activité). Le croisement de ce géoindicateur avec d'autres permet de hiérarchiser les priorités d'intervention : par exemple, la proximité d'une caudeyre avec le trait de côte ou encore la proximité rétro-littorale d'une zone à fort enjeu humain (urbanisation). Ce niveau de croisement repose sur la coïncidence spatiale des divers géoindicateurs pris en compte, ce qui est réalisé à l'intérieur des unités d'observation.



A new GIS modelling of coastal dune protection services against physical coastal hazards

Francoise Debaine, Marc Robin*

UMR 6554 LETG, Université de Nantes, France

ARTICLE INFO

Article history:

Available online 14 April 2012

ABSTRACT

Coastal dune management presents a unique problem to coastal scientists, not only because of the dynamic and complex nature of coastal dune systems but also because of the protection service against many coastal hazards such as storm surges in low and flat coastal countries, shoreline retreat, and aeolian erosion. In order to evaluate such a service, a new GIS modelling of a coastal dune protection service has been carried out on Noirmoutier Island. It is based upon geoinformation coming from LIDAR, Spot satellite and aerial photography data processing. This paper discusses the Geographic Information System (GIS) methodology used for data acquisition and analysis and presents a methodology developed (i) to characterise and map dune shapes using geoinformatics in order to highlight aeolian deflation, marine coastal erosion and marine submersion over the long-term and (ii) to set up a transferable and synthetic methodology. This methodology is based upon spatial syntheses computed in regular 50 m*400 m boxes built up landward from the shoreline. Each variable is integrated within each box. This allows to quantify (i) spatial occurrence of each variable and (ii) spatial coincidence of many variables within each box. Each protection service is underlying by a set of variables. The state of the protection service is then discussed and quantified and can be used by stakeholders to manage dunes in a safe way for society stakes.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Coastal dune systems are particularly fragile environments which are threatened by several potential dangers. A variety of factors can cause disturbance. Human activities in littoral areas are widespread and have been intensifying during the 20th century (Cori, 1999). Cattle grazing, farming, reforestation and urbanisation have eliminated many stretches of internal vegetation, while coast-bound tourism and especially coastal erosion endanger beach and embryo-dune communities (Taveira Pinto, 2004). Dunes serve many valuable purposes: as recreational areas, as a habitat for various species of birds, as shore protection and as temporary sources and sinks of sand in the coastal environment. One of the crucial roles of dune systems is to act as buffers, diminishing the impact of storms, hurricanes, floods and waves, and thereby contributing to the well-being of low-lying coastal area communities in both the developing and the industrial world (Millennium, 2005).

* Corresponding author.

E-mail addresses: Francoise.debaine@univ-nantes.fr (F. Debaine), Marc.robin@univ-nantes.fr (M. Robin).

Coastal dunes are difficult landforms to study and manage because of the complex interactions between their topography, their vegetation and the aeolian processes that move sand throughout the system (Barrère and Favennec, 1996). In addition, hydraulic processes may scarp, breach or wash over the dunes (Carter, 1988). For example, on February 28th 2010, the storm Xynthia occurred during a high water spring tide and caused a disaster: the conjunction of severe meteorological conditions and a high sea level led to severe flooding on the south coast of the department of Vendée (France), due to breaches and overwashes of many levees and a few wide breaches in the coastal dune (Verger, 2010). This storm swamped several thousand hectares and killed 29 residents. The mapping of coastal dunes and their vegetation cover is a necessary element in the definition of the strength of the dune belt against hydraulic processes like breakthroughs (Boucheron, 1987). Moreover, these systems have been managed in such a way that a huge rise in risk can be observed: urban areas have spread through the dunes, almost reaching the coastline and requiring numerous coastal defences. Potential breakthroughs are threatening not only low polders situated inland from the dunes but also urbanisation on low coastal dunes (Ministère de l'Écologie, 2010).

The evaluation of the state of ecosystems at a given time and place is the basis of any planning process for the management of natural

resources. Many methods for the assessment of conservation status based on vegetation analysis have been proposed, both in local and regional contexts, but these have generally focused on either the community or the landscape level, independently of the spatial extent considered. A recent paper proposed a review and a scientifically sound and practical method for the assessment of conservation status in sandy coastal environments, based on the multiscale

concept of biodiversity and focussing on the vegetation aspect (Carboni et al., 2009). Bush et al. (1999) proposed a design for the use of geoindicators at a variety of scales: coastal geomorphology is controlled by a wide range of geological and climatic factors and processes operating at different scales. The frequency, intensity, and location of active physical processes are controlled by regional factors (such as seismic setting and latitude), local factors (such as

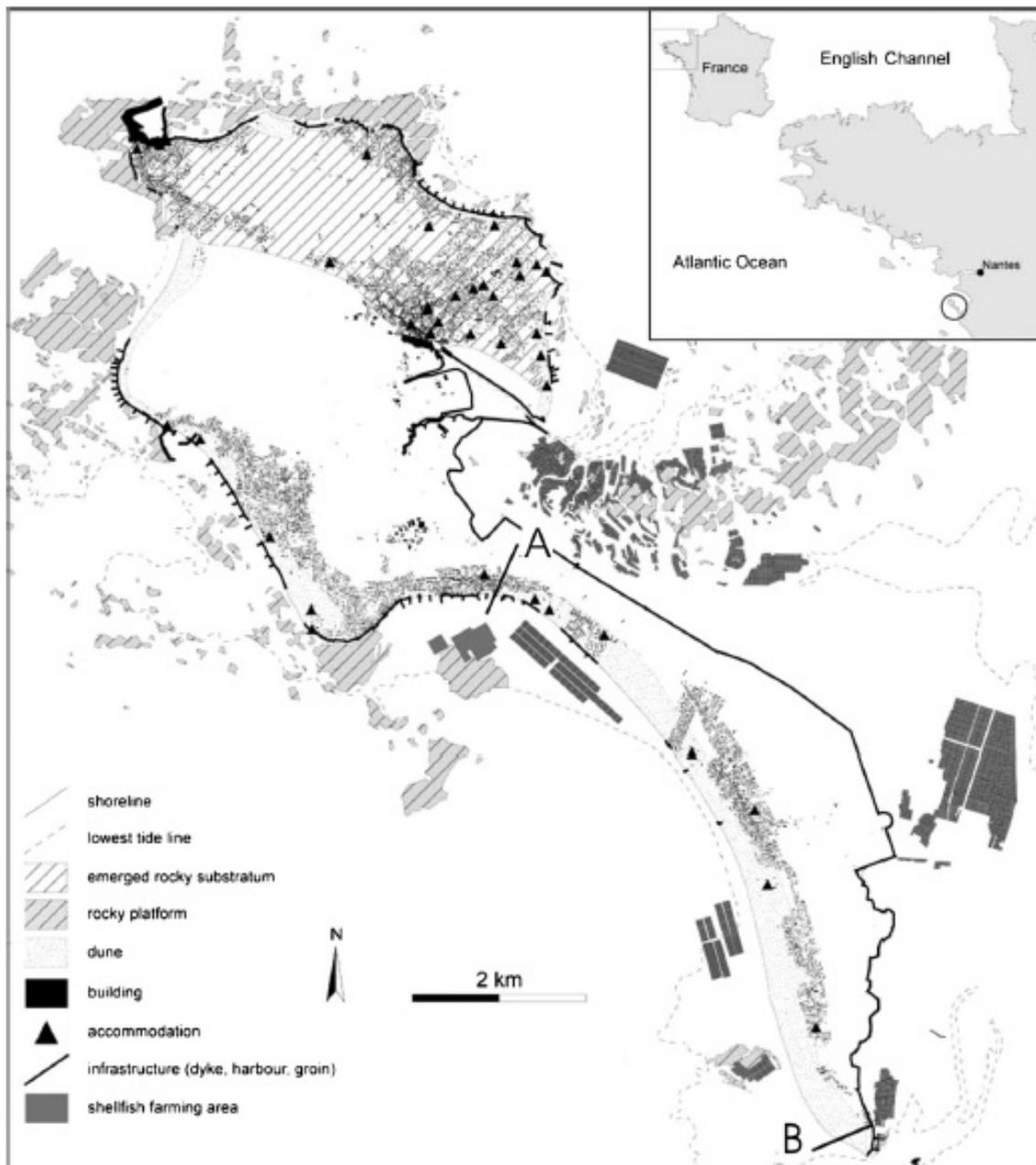


Fig. 1. General view of the island with location of the study site (south-west part of the island between lines A and B).



Fig. 2. Southward view (left) and northward view (right) of the study area. The position of the bunks indicates a 50 m coastal retreat since World War II in this part of the island.

protective offshore barriers and coastal configuration), and site-specific factors (such as site elevation and vegetation). Geoindicators tend to focus on the local and site-specific factors, which show a less than 100-year variation (Berger, 1996). The ideal way to gather information (and provide immediate management guidance) about the current state, rate of change, and management policy of the global environment is to carry out detailed, long-term monitoring.

In order to evaluate the role of coastal dunes as a natural form of coastal protection, a Geographic Information System (GIS) application has been constructed in such a way that stakeholders can easily use it because of the simplicity of the processes and the genericity of the results as far as possible. Such a multi criteria methodology can be found in the field of risk analysis when intersecting numerous data to build up geoindicators and combining them into an index in order to rank vulnerability and determine those underlying factors that increase or decrease it (Boruff et al., 2005; Fattal et al., 2010a). A combination of spatial data has been used in many applications in coastal management and many studies have shown that geoinformation technology can be very useful to support integrated coastal zone management (Douven et al., 2003).

The purpose of this paper is therefore to propose a new, scientifically sound and practical method for the assessment of conservation/protection status in sandy coastal environments by building up geoindicators, based on the multiscale concept of landscape integration within regular spatial units, and focussing on a set of variables managed in a GIS.

2. Description of the study area

Noirmoutier Island, 19 km long and 0.9–6 km wide with 60 km of shoreline, is located off the French Atlantic coast (Fig. 1). The island is characterised by a temperate oceanic climate, flowing generally from the west. The coast of the island can be described as semidiurnal macrotidal with a mean tidal range of 3.4 m. Most of the time, the wave height ranges from 1.25 to 2.5 m [CANDHIS measurement network (CETMEF, 2009)]. The western exposed shoreline of Noirmoutier Island is mainly composed of sandy beaches beside dunes. The north coast of the island is defined by sandy beaches beside narrow sandy dunes or low rocky cliffs. The eastern part of its shoreline is mainly constituted by a continuous dyke along the Bay of Bourgneuf mudflats. It should be noted that about 35% of the shoreline is artificial. Dykes and other longitudinal sea defence infrastructures stretch for more than 21 km. There are also many transversal infrastructures like groynes. The study site is located along the sandy south-western part of the island.

Dune patterns can be classified on the basis of physical description (external form and internal bedding) or genetic origin (mode of formation). Moreover, the presence of vegetation results in very different types of dune pattern such as hummocks, fore-dunes, parabolic dunes and blowouts. Smith (1954) devised a comprehensive descriptive classification system that has been widely used. It includes fore-dunes, parabolic dunes, bar-dunes, transverse dune ridges, longitudinal dunes, blowouts, and attached dunes. The study zone presents a fore-dune along the beach while

Table 1

Relevant coastal geoindicators: each is explained by the quantity of a variable within a given spatial unit (for example, the dune height can be explained in many ways: it can be the maximum height over the coastal dune or it can be a mean computed over the coastal dune within a spatial unit).

classes	Relevant coastal geoindicators (quantity in a spatial unit)	Geoindicator unit within a spatial unit	Usage for protection service	Source of data
Topographic	Dune height	Metre	Wave/storm surge/overwash	Field (GPS)/aerial photography 1950 – 2010/LIDAR 2008
Topographic	Dune volume above the mean sea level	Cubic metre	Wave/storm surge/overwash/sand store for beach	Field (GPS)/LIDAR 2008
Topographic	Dune width	Metre	Wave/storm surge/overwash/sand store for beach	2008 aerial photography
Morphometric	White dune/grey dune ratio	Percentage	Dune capacity to face erosion	2010 aerial photography
Morphometric	Dune shape	Dimensionless number	Aeolian erosion/shape motion	LIDAR 2008
Morphometric	Morphometric features	Square metre	Dune capacity to face erosion	LIDAR 2008
Vegetation	Dune vegetation cover	Square metre	Aeolian erosion/shape motion	Field (samples), 2009 Spot image
Land cover	Land cover (urbanisation)	Square metre	Social vulnerability	2010 aerial photography/ 2009 Spot image
Land cover	Coastal defences (seawall, aeolian defences)	Metre	Coastal erosion mitigation (marine/aeolian)	2010 aerial photography
Land cover	Coastal defences (groynes)	Number	Marine erosion mitigation	2010 aerial photography
Risk	Shoreline erosion between two dates	Square metre	Erosion rate	Aerial photography 1950 – 2010
Risk	Distance shoreline–urbanisation	Metre	Social vulnerability	2010 aerial photography

a narrow transverse dune field (250 m) occurs in the northern part of this zone. A combination of a narrow inactive parabolic dune, active blowouts and a flat dune field behind (500 m) occurs in the central part of the study area. The southern part of the zone is characterised by a wide transverse dune field composed of precipitation ridges over a distance of 1 km (Fig. 2). Overall, it is a retentive system (Rust and Illenberger, 1996) including coastal dune types where sand accumulation within vegetation is dominant over other processes. Retentive dune forms grow mostly by accretion and are nearly static. The eastern landward boundary of this transgressive dune field is the low area of polders.

Dune and beach dynamics over a long-term period (e.g. 100-years) along the southern part of the island are not uniform: a northern segment is in erosion and a southern segment is in accretion because of a dominant southward littoral drift. Risks come from both urban land cover located near the shoreline and the low altitude of the dune unable to protect urbanisation from shoreline erosion, storm surges and overwash events (Fig. 1).

3. Methodology

3.1. Geoinformatics for an assessment of a protection service at a local scale

The International Union of Geological Sciences (IUGS) defines geoinformatics as “measures of surface or near-surface geological processes and phenomena that vary significantly over periods of less than 100-years and that provide information that is meaningful

for environmental assessment” (Berger, 1996). The geoinformatics identify a minimum set of parameters that describe short-term environmental dynamics and are proxies representing all the parameters on which processes depend. They can provide managers with simple, qualitative tools for rapid identification of vulnerability that is scientifically valid (Bush et al., 1999). Coastal geoinformatics are features that influence coastal processes and determine how a community will respond to, and recover from, different coastal changes. Most geoinformatics are best evaluated in the field, although much information may be drawn from other existing sources such as maps, orthophotographs, videos and erosion rate documentation (Duke, 2001). Bush et al. (1999) gives several geoinformatics of coastal risks and classifies them as high, moderate, or low. For example, for the site-specific property damage risk category for coastal areas in unconsolidated erodible material elevation: general parameters (elevation, vegetation), shoreline parameters (erosion rate, beach width, slope and thickness, dune configuration, overwash, engineering structures), interior parameter (dune configuration). The main issue is the ability of such indicators to quantify coastal risks. For example, regarding the dune configuration for the shoreline parameters: a low risk occurs when the dune has “high, wide, continuous, unbreached ridges”. Hence, a moderate risk occurs when there are “low, or discontinuous dunes; bulldozed dunes”. The boundary between low and moderate risk is not easy to draw and questions remain unanswered when looking for a better scale and for the optimal size of the spatial unit within which notions of “continuous” or “discontinuous” are stated. In order to be of generic and far-reaching

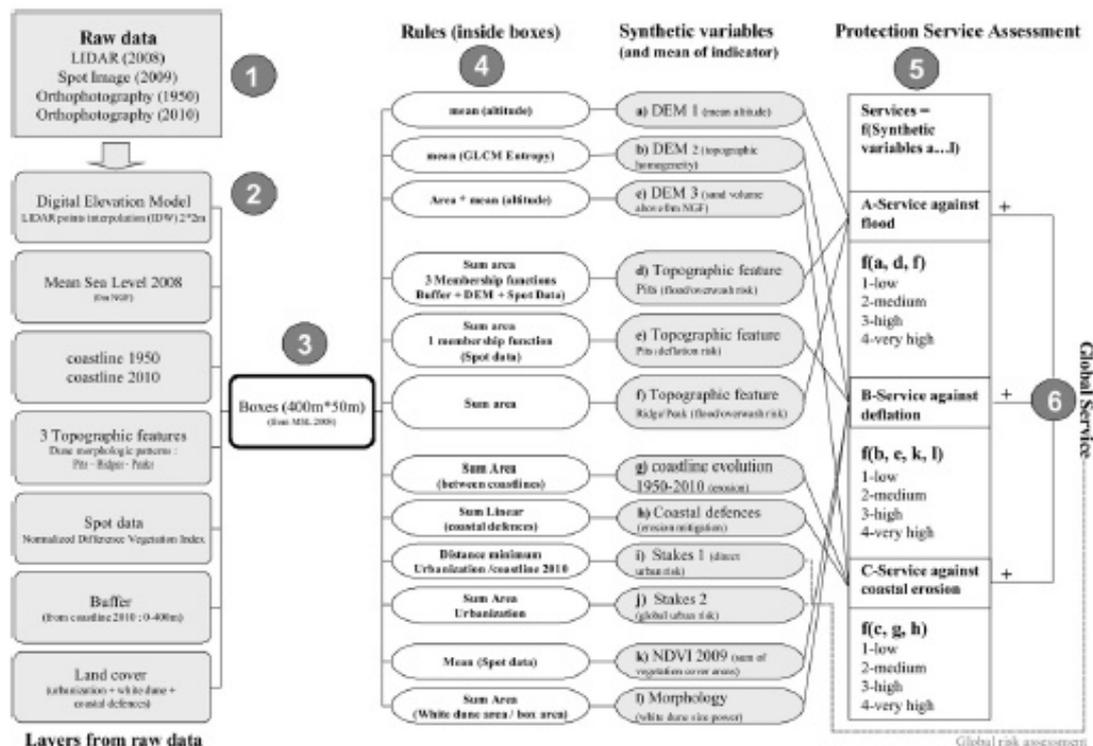


Fig. 3. Methodological chart and the step-by-step procedure (numbers 1–6).

significance, each geindicator should if possible (i) be quantifiable (ii) range over a scale with a minimum and a maximum value of intensity and (iii) relate to a spatial unit in order to allow (iv) a relevant spatial combination of variables within the spatial unit. Table 1 gives the relevant coastal geindicators used in this study.

Geindicators are examined locally and site-specifically. As shown in Table 1, they are grouped into five classes: a topographic class, including dune height, volume, and width; a morphometric class, containing white dune/grey dune ratio, dune shape, and morphometric features; a vegetation class with only vegetation cover indicator; a risk class, comprising distance shoreline-urbanisation and shoreline erosion between two dates; and a land cover class containing urban land cover and coastal defences.

3.2. Raw data acquisition and pre-processing

Fig. 3 gives the step-by-step procedure and details for each step (data and methodology). In order to promote an efficient methodology usable by stakeholders and managers of coastal dunes, accurate available data and a spatial methodology must be used, enabling an awareness of the conservation stakes. This kind of study involves the use of a great deal of data. Hence, as a preliminary step, it was essential to devote a long period to collecting and preparing the geographical and statistical information in order to compute geindicators. It was also crucial to pick the necessary field survey sampling points to control the quality of information and to be able to interpret aerial and satellite data (mainly

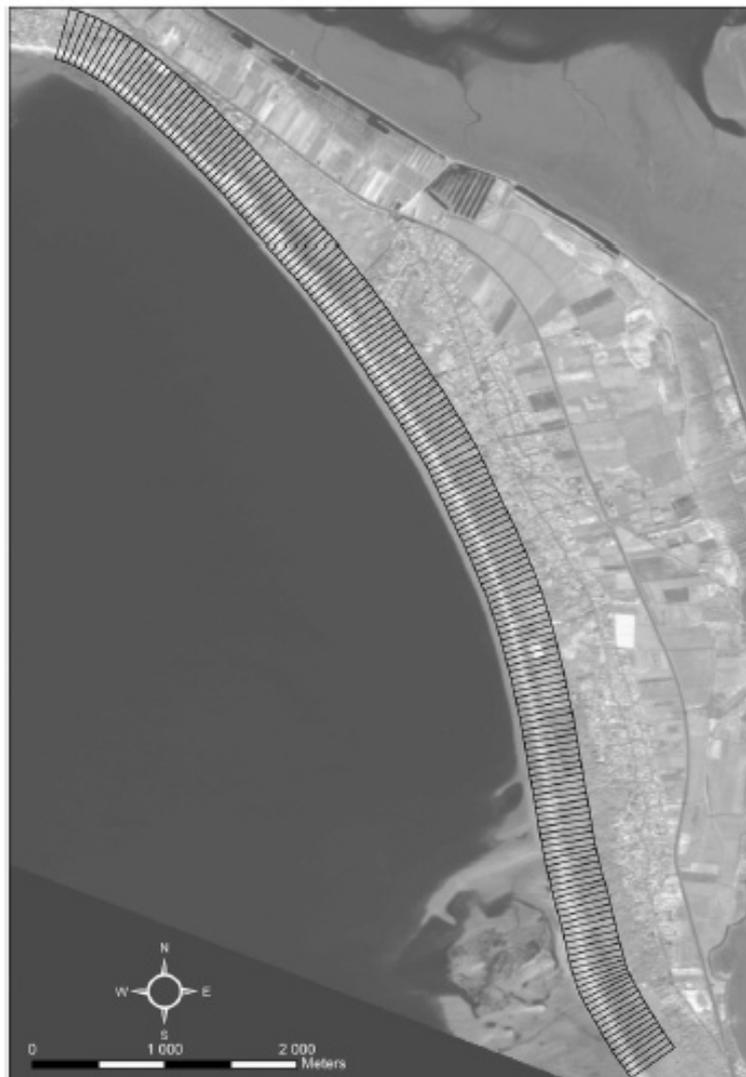


Fig. 4. Boxes ($n = 183$), around $400 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ in size, constructed along a 10 km coastline and 400 m from the 0 m NGF landward. Each box is hooked onto the 0 m NGF line. Background: Spot Image (2009) – near infrared band.

vegetation cover) (Step 1, Fig. 3). The advent of Geographic Information System (GIS) technology has enabled such integration and analysis. This approach has been refined in recent years through technological improvements in computer system hardware and in GIS software.

Four raw data layers (LIDAR (2008), Spot Image (2009), Orthophotography (1950) and Orthophotography (2010)) were mainly used and each was first pre-processed (Step 2, Fig. 3).

First of all, aerial photographs and satellite images still represent the best visual sources of information for mesoscale changes. Horizontal dimensions of coastal landforms and land covers can be measured from the photos (Dolan et al., 1978; DeKimppe et al., 1991). The use of satellite images is also of great interest concerning vegetation cover (Robin et al., 2011). Many geoindicators can be derived from such a dataset (Table 1).

The referential data are aerial photos from the IGN (French National Geographic Institute) recorded in 1950 and 2010. The 2010 aerial photographs had already been georeferenced by the IGN. The 1950 aerial photographs were georeferenced in a Lambert 93 projection using the 2010 aerial photographs as a reference. They were then mosaiced. The satellite image from the Spot Image Company was recorded on September 22, 2009. Atmospheric scattering and absorption effects were removed from remotely-sensed satellite data to gain reflectance from at-sensor radiance (Robin et al., 2011).

Light detection and ranging (LIDAR) data were obtained with a grant from the Regional Council (Région Pays de Loire). LIDAR systems deployed on low-level aircraft have been proven to give accurate horizontal and vertical measurements at both the meso- and microscale (Woolard and Colby, 2002). Topography can be mapped in Digital Elevation Models (DEMs) (Hodgson and Bresnahan, 2004). On the Noirmoutier Island coastal dunes, where there is no high vegetation cover, there is no need to remove the part due to vegetation from the LIDAR data: it has been shown that low vegetation cover does not interfere with elevation. There is a lack of correlation between LIDAR and field heights below 20 cm. This represents an operational lower limit for height determination (Streuker and Genn, 2006) or, in our case, the use of such data without any correction. Nevertheless, there is still the problem of a probable underestimation of vegetation height (Bork and Su, 2007). Comparisons between ground transects with a D-Global Positioning System and transects from interpolated LIDAR data from beach to dune have shown a bias at lower than 20 cm. LIDAR data was acquired over the study area in 2008 and presents an average spot density of around 1 point per m^2 . The 19 tiles of the LIDAR point data were first appended then interpolated using an Inverse Distance Weighted interpolation which suits to a complex terrain at high scale and high LIDAR data density (Liu et al., 2009) and after comparison with a GPS profile across different shapes (blowout, ridge, peak) -best RMS errors criterion between profile from LIDAR interpolated data and GPS profile-. The result is an elevation dataset with a very fine spatial (x and y) resolution of 2*2 m and a fine vertical (z) resolution of 0.15 m.

Field sample and control points were gathered from surveys and consist of GPS-based measurements of vegetation cover (we have a database of 45 field samples with description of vegetation cover within quadrats).

3.3. Geoindicator layers from pre-processed layers

This corresponds to the second step (Fig. 3). DEMs were computed from the LIDAR layer. First, they allowed the Mean Sea Level corresponding to the altitude 0 m NGF (French 0 m reference for topographic measurements) to be extracted. Then, three terrain morphometric features were extracted from the DEM (pits, ridges

and peaks) using ENVI software, which provides a set of tools that describes the general geomorphometry of a surface. It is relatively common to use topographic derivatives from the DEMs. Drăguț and Blaschke (2006) describe the theoretical approach underlying the design of such a use. The most widely used set of morphometric

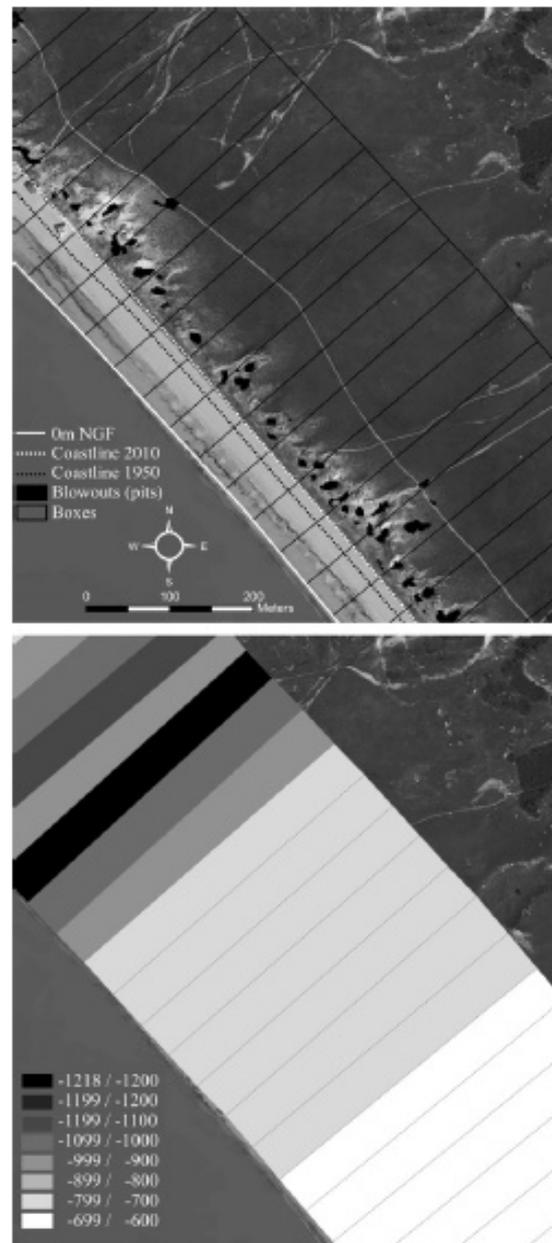


Fig. 5. Integration of variables within boxes. Top: zoom on La Tresse dune inside the study site; on an aerial photograph, box boundaries and examples of a few variables (0 m NGF, 1950 coastline, 2010 coastline, blowouts (pits)). Bottom: integration within each box of the area between each coastline, in square metres.

Table 2
Descriptive statistics of boxes integrating the 12 variables (one per column) computed over all the boxes (n = 183). (Min value – minimum value, Max value – maximum value, mean value, standard deviation value) with regard to Fig. 4.

	Mean (altitude) (m NGF)	Mean (entropy)	Sediment volume (m3)	White dune area (m2)	Pits (flood risk) (m2)	Pits (deflation risk) (m2)	Ridges/Peaks (flood risk) (m2)	Coastline change 1950–2010 (m2)	Coastline defences (m)	Stakes (dist urb-coastline) (m)	Stakes (urban area) (m2)	Mean (NDVI)
Min Value	2.75	3.91	55,050	184	0	0	1647	-1218	0	25	0	0.26
Max value	9.47	7.77	180,495	4664	10,629	9798	6379	10,407	50	300	3800	0.62
Mean Value	5.66	6.9	113,249	1408	622	1617	4694	1209	1.79	233	464	0.43
Standard Deviation	1.35	0.44	27,081	827	1756	2110	836	2243	9.06	102	892	0.06
Flood serv max (box no. 173)	5.83	7.01	116,525	1225	0	410	5366	2559	0	300	0	0.53
Flood serv min (box no. 4)	3.56	6.68	71,224	876	4574	1758	3907	-324	0	25	2000	0.45
Marine erosion serv max (box no. 108)	8.34	6.41	166,744	1171	0	0	5642	1266	0	274	50	0.47
Marine erosion serv min (box no. 30)	5.31	7.26	106,250	405	751	1753	3623	-330	19	45	2600	0.43
Aeolian erosion serv max (box no. 152)	5.38	6.62	107,651	1200	0	771	4738	1209	0	300	0	0.46
Aeolian erosion serv min (box no. 77)	5.92	7.28	118,494	969	956	9804	5837	437	0	53	200	0.31

characteristics is the subdivision of all points on a surface into one of pits, peaks, channels, ridges, passes and planes (Wood, 1996). Our choice consists of using one indicator of the weakness of the protection service against marine submersion (pit), and an indicator of the barrier against such a submersion (peak plus ridge). Pits are points that lie on a local concavity in all directions (all neighbours higher), peaks are points that lie on a local convexity in all directions (all neighbours lower) while ridges are points that lie on a local convexity that is orthogonal to a line with no convexity/concavity. All these morphometric features are described by second derivatives (Wood, 1996). Due to DEM XYZ resolution, after numerous attempts and in order to be as close to reality as possible, values were fixed at a slope tolerance of 18, a curvature of 0.001, and a kernel of 9*9.

Concerning the Spot layer, a vegetation index was then computed (Normalised Difference Vegetation Index (Tucker, 1979)). The NDM is the most common and widely applied vegetation index (Robin et al., 2011). It employs the normalised difference between the near-infrared (NIR: 780–890 nm) and red (R: 610–680 nm) bands of Spot Image $NDVI = \frac{r(XS3) - r(XS2)}{r(XS3) + r(XS2)}$ and was originally created to assess green biomass (Rouse et al., 1973).

For the two dates of aerial photographs, a manual digitalisation of the contact between the beach and the foredune, which corresponds to the geomorphologic coastline, was carried out. Two lines

were obtained: the first from 1950 photography and the second from 2010 photography. Then, a landward 400 m buffer was made from the 0 m NGF line. This buffer includes about 80 m between the 0 m NGF line and the 2010 coastline and about 320 m landward from the 2010 coastline. The value of 300 m from the coastline corresponds to a management unit based upon a safe margin in the case of high coastal erosion (over a 100-year period, (Bush et al., 1999)). It allows no action in the case of urbanisation beyond this value but this is no longer true for urbanisation less than 300 m from the coastline. On the French Atlantic coast, the maximum coastal erosion rate along the Aquitaine coast is about 2.5 m/year (IFEN, 2006). On Noirmoutier Island, the maximum erosion rate is found to the north of the study area with a value of about 0.7 m/year during the 20th century (Fattal et al., 2010b). The value chosen in this study allows a safe margin of more than 100-years if very high erosion occurs during a century along the coast. This remains compatible with a sustainable management (Berger, 1996). The minimum distance between urbanisation and the 2010 coastline was then extracted.

3.4. Spatial analysis within boxes and construction of synthetic variables

All these layers are put into an ArcGIS shape format and then integrated within 400 m*50 m boxes which are polygons (Fig. 4).

Table 3
Matrix of similarity/dissimilarity (Pearson's correlation coefficient –r–) between each variable.

	ALTT	FLOOD	BARRI	DEFLA	ENTRO	WHITEDUN	NDVI	VOLLIM	COAST	COAST_DEF	STAKE1	STAKE2
ALTT	1											
FLOOD	-0.341	1										
BARRI	0.492	-0.197	1									
DEFLA	0.059	0.033	-0.165	1								
ENTRO	-0.333	0.304	-0.119	0.232	1							
WHITEDUN	-0.048	-0.267	-0.186	0.076	0.323	1						
NDVI	0.026	-0.335	0.217	-0.569	-0.131	0.042	1					
VOLLIM	0.985	-0.342	0.402	0.059	-0.333	-0.048	0.026	1				
COAST	-0.212	-0.117	0.227	-0.270	-0.027	-0.177	0.225	-0.212	1			
COAST_DEF	-0.040	0.014	0.017	-0.047	0.172	-0.111	0.152	-0.089	-0.132	1		
STAKE1	0.192	-0.573	0.179	-0.519	-0.258	0.353	0.512	0.192	0.342	-0.310	1	
STAKE2	-0.044	0.141	-0.133	0.283	0.012	-0.260	-0.239	-0.044	-0.287	0.310	-0.707	1

Table 4

Variables used for the three protection services and for the urban stakes. Each level of protection is grouped into classes ranging from a low-level to a very high level of service. Numbers are barycentres of each class in each variable.

Class of service	Variables	Level 1 (low)	Level 2 (Medium)	Level 3 (high)	Level 4 (very high)
Service against marine erosion	Sediment volume (m ³)	107,889	103,327	153,048	86,284
	Coastline change 1950–2010 (m ²)	–265	509	820	6890
Service against flood/overwash	Coastline defences (m)	50.3	0.2	0	0
	Mean (altitude) (m NGF)	4.3	4.7	5.5	7.8
	Pits (flood risk) (m ²)	7050	355	219	0
	Ridges/Peaks (flood risk) (m ²)	4239	3724	5067	5262
Service against aeolian erosion	Mean (NDVI)	32.8	47.4	44.7	44.9
	Pits (deflation risk) (m ²)	9908	1023	1889	663
	Mean (entropy)	7.0	7.0	7.2	6.4
	White dune area (m ²)	1165	1160	3387	1125
Urban stakes	Stakes (dist urb-coastline) (m)	277.5	147.4	116.6	58.8
	Stakes (urban area) (m ²)	10.6	700.0	1740.0	2946.7

Spatial analysis within boxes is carried out using Definiens software (Step 3, Fig. 3).

First of all, information from LIDAR is computed within boxes: mean, sediment cubature above 0 m NGF, entropy feature to explain topographic heterogeneity or homogeneity (a, b and c, Fig. 3). Next, topographic features are classified using two other variables and membership functions: elevation above 0 m NGF, distance to coastline (buffer) and vegetation cover (NDVI). Risk of overwash/submersion in the case of storm surge is characterised by pits with a low mean altitude and a short distance to coastline (d, Fig. 3) or by a lack of ridges and peaks in the boxes (f, Fig. 3). Pits with no vegetation cover and close to the coastline are considered to be at risk of aeolian erosion (deflation) (e, Fig. 3). Other pits are not at risk. Pits classified in this way within each box are summed so that a box with a high value of summed areas of potential flooded pits is considered a box with a high risk.

Other layers are also integrated in each box: the area between each coastline in a box is computed and the mean shoreline change as an advance or a retreat (g, Figs. 3 and 5); coastal defence devices are taken into account (h, Fig. 3); the distance between the seaward urbanisation border and the coastline is also computed, as is the urbanisation area (i and j, Fig. 3); and the mean NDVI value inside each box is then computed (i, Fig. 3). Finally, the white dune area is calculated within each box.

3.5. Multicriteria indexes and protection service assessment

Twelve variables are then synthesised in boxes (Step 4, Fig. 3). Each is computed within the box boundaries, is part of a global risk assessment and can be seen as one vector coordinate in a multi-variate space. Table 2 gives the main indicators of global risk integrated within boxes using a minimum value, a maximum value, a mean value and a standard deviation value. Risk may increase with a low value or with a high value, depending on the variable. For example, flooding risk increases with a decrease in sediment volume but also with a decrease in the distance between urban stakes and the coastline (Table 2).

The maximum risk pattern against coastal erosion can be fixed. A risk maximum occurs when a coastal segment is faced with: a low topographic elevation, a low sediment volume, a high surface covered by pits (flood risk and deflation risk), a low surface covered by ridges and peaks, and a negative coastal evolution (see box no. 4, Table 2). Moreover, a location of coastal stakes close to the shoreline increases risk because of human exposure (Table 3). Inversely, a high quality of service is gained with opposite trends over the variable.

In order to determine the lowest and the highest service for each of the three services, we have used a multi criteria method with conditional queries upon the variables taken together, each set of

variables underlying one of the three services. For example, when meeting the lowest possible value inside each variable taking together (i.e. lowest value for variable 1 AND lowest value for variable 2 AND lowest value for variable 3) – which means that it may not be the true lowest value of one of these variables taking apart –, we state that we have the box representative of the lowest level of service. Six boxes are found to be representative of the minimum and the maximum service for each of the three services provided by the coastal dune. A map can then be produced of the maximum theoretical risk against coastal erosion, marine submersion and aeolian erosion, using the maximum value of each variable which occurs simultaneously in boxes (Table 2). Because of the non-linearity of the variables (Table 3), each of the 183 boxes is classified using a classification algorithm (K-means algorithm upon standardised variables without any ponderation) running on a set of variables as shown in Table 4.

The Table 4 gives an overview of the variables used for each protection service. Four classes of service level ranging from low to very high are provided for the three services. The urban stakes are also sorted into four classes following the same process.

It is now possible to synthesise these 3 services into a global and synthetic service (Step 6, Fig. 3). The global service is given by the sum of the three levels of service. For example, the theoretical minimum global service will be given by the sum of the minimum level of the three services (1 + 1 + 1 = 3) and the maximum theoretical service will be given by the sum of the maximum of the three services (4 + 4 + 4 = 12). Each intermediate case can be found.

The level of stakes is then computed by classification of the variable distance between the urban limit and the coastline and the variable urban area. Table 3 gives the barycentres of the four classes.

Next, a map of risk is produced by multiplying the global service by the level of stakes. Table 5 gives the crossing of the two variables: global service versus stakes. Because the global service has

Table 5

Codification of the crossing of two variables: global service and global stakes.

GS sum/stakes	Low (1)	Medium (2)	High (3)	Very high (4)
3	No data	6	9	12
4	4	8	12	16
5	5	10	15	20
6	6	12	18	24
7	7	14	21	28
8	8	16	24	32
9	9	18	27	36
10	10	20	30	40
11	11	22	33	No data
12	12	24	36	No data

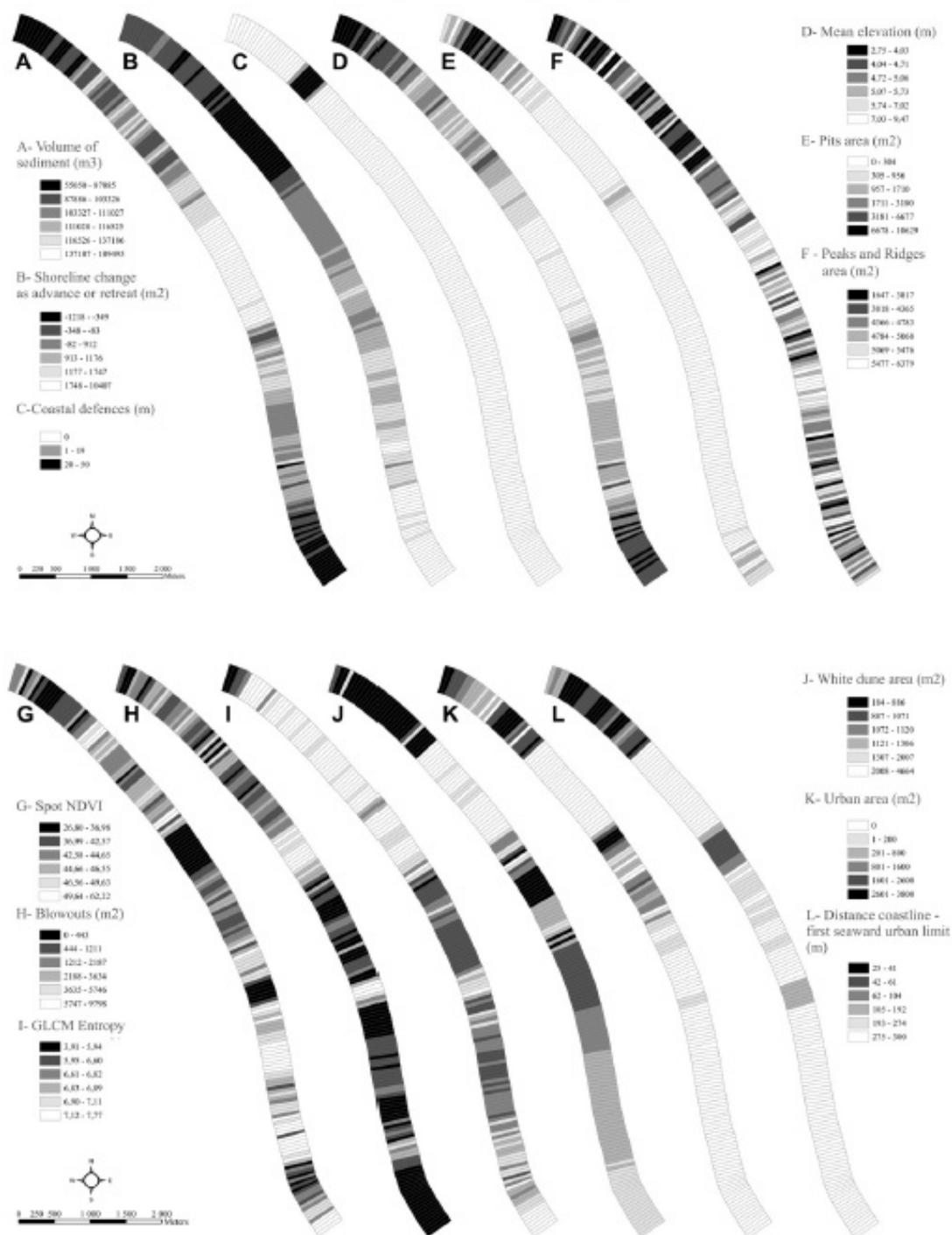


Fig. 6. Ten geospatial indicators (from A to J) and the two variables for the states (urban area and distance of urban area to the coastline).

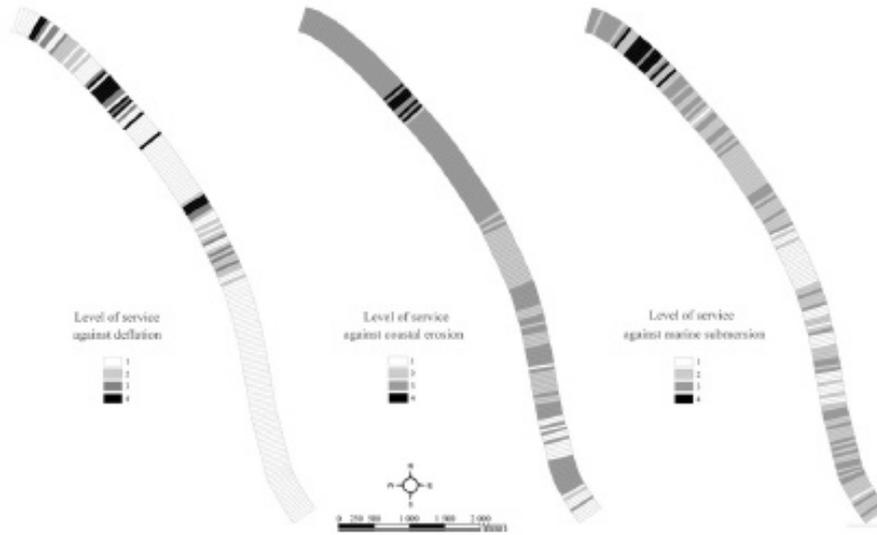


Fig. 7. Level of service provided by the dune system against hazards: aeolian erosion (left), marine erosion (centre) and marine submersion (right).

12 theoretical levels and the global stakes have 4 levels, their multiplication gives a maximum range of $12 \times 4 = 48$ levels. No value exceeds 40. The representation of these values by different shades of grey is given in Table 5.

4. Results

The way to gather information about the current state of the coastal environment, its rate of change, and how to manage it is to perform detailed, long-term monitoring of reliable indicators (Bush et al., 1999). Nevertheless, the complex nature of reality involves taking into account a combination of indicators in order to reach

a reliable overview of this complexity. This is done by using a regular integration scale within a spatial unit of $20,000 \text{ m}^2$ where geoindicators are combined. This integration scale enables the genericity of the methodology. Fig. 6 shows the ten geoindicators and the two variables of stakes used in this study. Each geoindicator ranges in grey colour in such a way that the darker the shade of grey, the lower the service of protection against any hazard (flood/overwash, marine erosion, aeolian erosion). For example, the volume geoindicator (Fig. 6A) ranges between $55,050 \text{ m}^3$ and $189,495 \text{ m}^3$. The lower value corresponds to the minimum service against marine erosion, the overwash process and the aeolian process. Hence, when there is a low availability of sand inside a box,

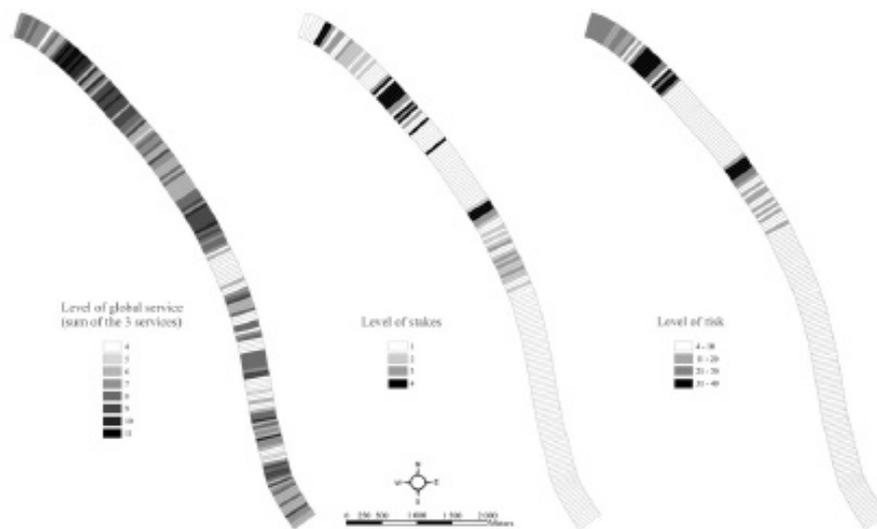


Fig. 8. Level of global service provided by the dune system against the three hazards (left), level of stakes (centre) and level of risk obtained by crossing the global service and the level of stakes (right).

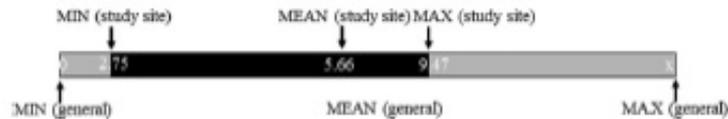


Fig. 9. Each geoindicator is located over a range for the study site. It can also be placed over a range at a global scale: regional, national or international. The example concerns the mean altitude variable. The box with the lowest mean altitude has the value 2.75 m while the highest mean altitude is 9.47 m. The mean for this variable throughout all the 183 boxes is 5.66.

this means a weak resilience of the system when marine hazards occur. This geoindicator is well correlated with mean elevation (Fig. 6D) where the dune is based upon sediment substrate. When cliff-top dunes occur where the coast becomes rocky, there is no correlation. This is the case in the northern part of the study area where there is a subhorizontal low tide shore platform. The central study area is much higher than in the northern and southern parts. Quick shoreline retreat (Fig. 6B) is found in the northern part of the study area. The shoreline advances southward which means a decrease in risk and a contribution to a protection service. The pits area (Fig. 6E) is widely extended in the northern part, which increases the risk of submersion and provides a lower service against flooding and wash over. The white dune area (Fig. 6J) is critically narrow in the northern part and entropy (Fig. 6I) is very low while blowouts (Fig. 6H) occur widely in the northern and middle part of the study area; this emphasises the decrease in the protection service while the stakes increase (Fig. 6K and L).

Three classes of hazard have been taken into account concerning the unconsolidated erodible materials of the coastal zone. With the use of the accurate geoindicators, the level of service against these hazards given by the dunes on the study site can be quantified.

First of all, the protection against flooding when a storm surge occurs is given by four variables inside each box: the mean altitude, the mean entropy, the pits/blowouts, and the ridges/peaks (right map, Fig. 7). The northern sector provides the lowest protection service against marine submersion. Such a hazard has already occurred in the past. Segments are also denoted where this service is not optimal. The central part of the study area provides the highest service.

Secondly, the risk of coastal erosion is high in the northern part of the study site and low in the southern part (central map, Fig. 7).

The last service against deflation is low over three main segments in the northern part of the study area (left map, Fig. 7).

When the three services are added, the left map (Fig. 8) shows a global deficit of service in the northern part of the study area while the southern part seems to have a more efficient global service. The computation of the global stakes shows a few boxes critically exposed to a global risk because of the short distance between the urban area and the shoreline and the wide urban area inside these boxes (Fig. 8, centre). When the two maps are crossed (Fig. 8, right), the two main segments which critically show a very high risk are highlighted; several boxes in the northern and central parts of the study area are the most exposed to risk.

5. Discussion and conclusions

Coastal protection aims to protect the hinterland against flooding and prevent erosion of the shoreline. The threat of flooding generally acts on large spatial and temporal scales, as the whole coastline needs to be safe during occasional short storm events. In contrast, threats related to the erosion of the shoreline are site-specific, and can therefore act on both limited spatial and temporal scales affecting small stretches of the coastline, or impact entire coastlines on large spatial and temporal scales. Aeolian dynamics can affect the stability of a dune system at a local scale if

they involve too many blowouts and a breach in a narrow dune barrier. Several traditional coastal protection measures are available to coastal engineers (i.e. groynes, revetments, breakwaters or dams) to mitigate the threats of flooding, coastal erosion and aeolian erosion, with each of them typically located to resolve a problem at a specific scale. Nevertheless, the best protection against these hazards is the quality of the dune system. An accurate assessment of a quality service is a critical need for managers of coastal dune areas where human stakes occur. For this purpose and in order to provide synthetic information allowing efficient management, we have decomposed the protection service into its three components: service against flooding risk, service against shoreline retreat, service against aeolian erosion. The service can range between two extremes: the best available against one hazard and the lowest service against one hazard. The definition of a service needs to meet four conditions as described below.

First condition: the variables used must be easy to collect, which is the case of the raw data used in this study. The method consists in extracting new information from these raw data at a low cost and this can be extended elsewhere at a low cost. This is the guarantee of an easy, strong, usable and reproducible approach for the managers of coastal areas. Moreover, this methodology aims to provide a decision-support system with regard to environmental management problems and risk assessment for society, in order to answer questions such as: What is the level of dune service against marine erosion in box x? What is the level of dune service against aeolian erosion in box x? What is the level of dune service against marine submersion in box x? This approach could be part of a software extension tool or a specific open-access-based tool providing data usable for this task (Chapman, 1996).

Second condition: the combination of variables must, if possible, be generic. This means that service assessment must range over a generic scale from a minimum to a maximum value (Fig. 9). In this way, the level of service from a minimum to a maximum can be indicated at a national, regional or local scale.

For example, if the study site becomes the total coast of the island of Noirmoutier, the minimum value is 0 m NGF on the east coast of the island where polders occur and the maximum value is 7.16 m. If the study site becomes the 368 km of coast along the French region of Pays de Loire, the maximum value is 32 m (cliff-top dune near Saint Brévin les Pins) whereas along the Atlantic west coast of France, the maximum value is up to 100 m, on the famous dune of Pilat (region of Aquitaine) which is also the highest dune in Europe. This last value must thus be taken into account if the study is at a European level. Each of the other variables can be ranged following the same method.

Third condition: the choice of variables must be based upon a relevant combination of variables which highlights the service: for example, in order to provide a high level of service against flooding when occurs a storm surge, coastal dune needs to have an enough mean elevation, not too many blowouts behind the coastline -which can be an easy way of overwash- and presence of a barrier (ridge and peak) seaward to increase resistance against submersion process. Combination of these 3 variables allows a good assessment of the level of this service. Moreover, these variables

must not be correlated in order to avoid redundancy and a weak service assessment. Inside each box, a few of these variables are interdependent (for example, the lack of shoreline platform and/or cliff-top dune involves mean elevation and sediment volume above the 0 m NGF line to be interdependent), and many are independent of one another (for example, the Normalised Difference Vegetation Index and sediment volume, Table 3).

Last condition: from the risk point of view, it is necessary to integrate the spatial relation between variables, which is not easy when the variables occur in an area without a linear relation between them and spatially apart; this means no superposition of variables and no spatial interaction in terms of natural processes: for example features like blowouts, coastline shift and mean elevation can be spatially near which not necessarily means functional relation in terms of natural processes. Nevertheless, when such variables are found in a small area, the service against marine erosion is clearly not high. The risk occurs with emergence of a spatial coincidence or occurrence. This spatial argument can be solved by the use of the spatial aggregation of variables in spatial units such as boxes in order to be able to quantify spatial occurrence of variables. This enables the spatial proximity between variables to be taken into account on which risk emergence and lack of service are based. Moreover, because of numerous spatiotemporal processes triggering each variable expression and because of the spatial integration of variables within boxes, this methodology provides a scale factor given by the area of the integration boxes (in this study 50*400 m). Thereby the coastal dune system is different from many typical geomorphic systems in that the rates of change are relatively fast, and substantial changes can occur over periods of hours. However, the general form of a dune system may persist for centuries. The protection service assessment can be undertaken at different temporal and spatial scales: microscale is defined as comprising time and space scales of seconds to months, and millimetres to hundreds of metres, respectively. Mesoscale spans months to decades and hundreds of metres to tens of kilometres. Macroscales are longer than decadal and larger than tens of kilometres. Many of the scale-induced problems seem to be intractable (Sherman, 1995). However, the aim of this synthetic approach is to provide and manage a set of data from a variety of sources, representing process and response systems at micro-, meso- and macroscales, appropriate for management decision-making.

Managing the marine erosion of dunes requires an understanding of (i) the physical and ecological processes active both at the site and in the wider coastal environment, (ii) the risks to the human and natural environment, (iii) the effectiveness and consequences of management decisions and (iv) the short- and longer-term management objectives for the site. This synthetic method offers a simple way to put together the necessary knowledge and provide a practical overview in order to initiate management operations which avoid unforeseen impacts, both locally and on sites further away, either immediately or, potentially, years later.

Acknowledgements

Thanks go to the Department of Geography of the University of Nantes and UMR 6554 LETG for providing research facilities during this study. This work was partially supported by a grant from the French Ministry of Ecology and Sustainable Development (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable) through the LITEAU programme.

References

Barrière, P., Favennec, J., 1996. Biodiversité et protection dunaire. Office National des Forêts; édition Lavoisier Tec & Doc, p. 307.

Berger, A.R., 1996. The geoinicator concept and its application: an introduction. In: Berger, A.R., Iams, W.J. (Eds.), *Geoinicators: Assessing Rapid Environmental Changes in Earth Systems*. AA Balkema, Rotterdam, pp. 1–14.

Bork, E.W., Su, J.C., 2007. Integrating LIDAR data and multispectral imagery for enhanced classification of rangeland vegetation: a meta analysis. *RSE* 111, 11–24.

Boruff, B.J., Emrich, C., Cutter, S.L., 2005. Erosion hazard vulnerability of US coastal counties. *Journal of Coastal Research* 21 (5), 932–942.

Boucheron, C., 1987. Aménagement et gestion des dunes littorales Ministère de l'environnement, délégation à la qualité de la vie, p. 330.

Bush, D., Neal, W.J., Young, R.S., Pilkey, O.H., 1999. Utilization of geoinicators for rapid assessment of coastal-hazard risk and mitigation. *Ocean & Coastal Management* 42, 647–670.

Carboni, M., Caranza, M.L., Acosta, A., 2009. Assessing conservation status on coastal dunes: a multiscale approach. *Landscape and Urban Planning* 91, 17–25.

Carte, R.W.G., 1988. *Coastal Environments: An Introduction to the Physical, Ecological, and Cultural Systems of Coastlines*. Academic Press, London, UK.

CETMEF (French Centre for Maritime and Fluvial Technical Studies), 2009. L'île d'Yeu station (Accessed 2007.03). <http://cahdhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>.

Chapman, D.M., 1996. DUNIBASE: information management for dune management. *Landscape and Urban Planning* 34, 351–359.

Cori, B., 1999. Spatial dynamics of Mediterranean coastal regions. *Journal of Coastal Conservation* 5, 105–112.

DeKimppe, N.M., Dolan, R., Hayden, B.P., 1991. Predicted dune recession on the outer banks of north Carolina, USA. *Journal of Coastal Research* 7, 451–463.

Dolan, R., Hayden, B.P., Heywood, J., 1978. A new photogrammetric method for determining shoreline erosion. *Coastal Engineering* 2, 21–39.

Douven, W.J.A.M., Buuman, J.J.C., Kiswara, W., 2003. Spatial information for coastal zone management: the example of the Banten Bay seagrass ecosystem. *Indonesia Ocean & Coastal Management* 46, 615–634.

Dragut, L., Blaschke, T., 2006. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology* 81, 330–344.

Duke University Program for the Study of Developed Shorelines, 2001. *Reducing Vulnerability in Five North Carolina Coastal Communities: a model approach for identifying, mapping and mitigating coastal hazards*, p. 121.

Fatral, P., Maanan, M., Tillier, L., Rolfo, N., Robin, M., Pontier, P., 2010a. Coastal system vulnerability to oil spills pollution: Noirmoutier Island. *Journal of Coastal Research* 28 (5), 879–887.

Fatral, P., Robin, M., Palliat, M., Maanan, M., Mercier, D., Lamberts, C., Costa, S., 2010b. Effets des tempêtes sur une plage aménagée et à forte protection côtière: la plage des Éloux (côte de Noirmoutier, Vendée, France). *Norois* 215 (2010/2), 101–114.

Hodgson, M.E., Bessaban, P., 2004. Accuracy of airborne LIDAR derived elevation: empirical assessment and error budget. *PER* 570, 331–340.

IFEN, 2006. Un quart du littoral reculé du fait de l'érosion. le quatre page, no. 113.

Liu, X., Zhang, Z., Peterson, J., 2009. Evaluation of the Performance of DEM Interpolation Algorithms for Biennial International Conference. In: Ostendorf, B., Baldock, P., Bruce, D., Burdett, M., Coorcoran, P. (Eds.), *Proceedings of the Surveying & Spatial Sciences Institute 0-9781366-8-6*. Surveying & Spatial Sciences Institute, Adelaide 2009, pp. 771–780. ISBN: 978-1366-8-6.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water Synthesis*. World Resources Institute, Washington, DC.

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, 2010. *La gestion du trait de côte: Savoir faire*, Quae, p. 290.

Robin, M., Chapuis, J.L., Lehouvter, M., 2011. Remote sensing of vegetation cover change in islands of the Kerguelen archipelago. *Polar Biol.* doi: 10.1007/s00300-011-1069-z.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: *Proceedings of the Third ERTS Symposium*, U.S. Gov. Printing Office, Washington, DC, pp. 309–317.

Rust, L.C., Illenberger, W.K., 1996. Coastal dunes: sensitive or not? *Landscape and Urban Planning* 34, 165–169.

Sherman, D.J., 1995. Problems of scale in the modeling and interpretation of coastal dunes. *Marine Geology* 124, 339–349.

Smith, H.T.II, 1954. *Coastal Dunes*. Proceedings of the Coastal Geography Conference, Office of Naval Research, Department of the Navy, Washington, DC, pp. 51–56.

Streuler, D.R., Ginn, N.F., 2006. LIDAR measurement of sagebrush steppe vegetation heights. *RSE* 102, 1135–1145.

Taveira Pinto, F., 2004. The practice of coastal zone management in Portugal. *J. Coast. Conserv* 10, 147–158.

Tucker, C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ* 8, 127–150.

Verger, F., 2010. À propos des inondations récentes de la région de l'Agailillon-sur-Mer, en Vendée, *EchoGéo*, p. 4. <http://echogeo.revues.org/11890>.

Wood, J., 1996. The geomorphological characterisation of digital elevation models. Unpublished Ph.D. thesis, Department of Geography, University of Leicester, Leicester, UK. URL: http://www.geog.le.ac.uk/jwo/research/ldem_cha/thesis/index.html (Accessed 01.05.09.).

Wolard, J.W., Colby, J.D., 2002. Spatial characterization, resolution, and volumetric change of coastal dunes using airborne LIDAR: cape Hatteras, North Carolina. *Geomorphology* 48 (1–3), 269–287.

2. Développement de la méthode vers les Pays de Monts (Vendée)

La méthode Multidune (partie Evaluation du service Protection) est en cours de développement vers le sud de la Vendée, dans le cadre de l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts, sur le territoire de la communauté de communes Océan-Marais de Monts. Des boîtes de 500 m*50 m ont été déployées et les variables introduites dans ces boîtes y ont été intégrées avec quelques ajouts. Plus précisément, trois raffinements ont enrichi la méthode :

- **utilisation de transects** pour évaluer la dynamique non linéaire du trait de côte depuis 1920 (et non plus l'intersection de lignes créatrices de surfaces dynamiques). Pour ce faire, nous avons utilisé l'extension DSAS V3.0 (*Digital Shoreline Analysis System*) qui permet de recouper les diverses lignes de côte à l'aide de transects espacés de 50 m, afin de disposer d'un transect par boîte. Les valeurs obtenues ont ensuite été transférées dans les boîtes (donc un transect par boîte). La figure ci-après représente ces valeurs pour divers pas de temps, pour illustration : 1950-1971 (à gauche) ; 1971-2000 (au centre) ; 2000-2010 (à droite).

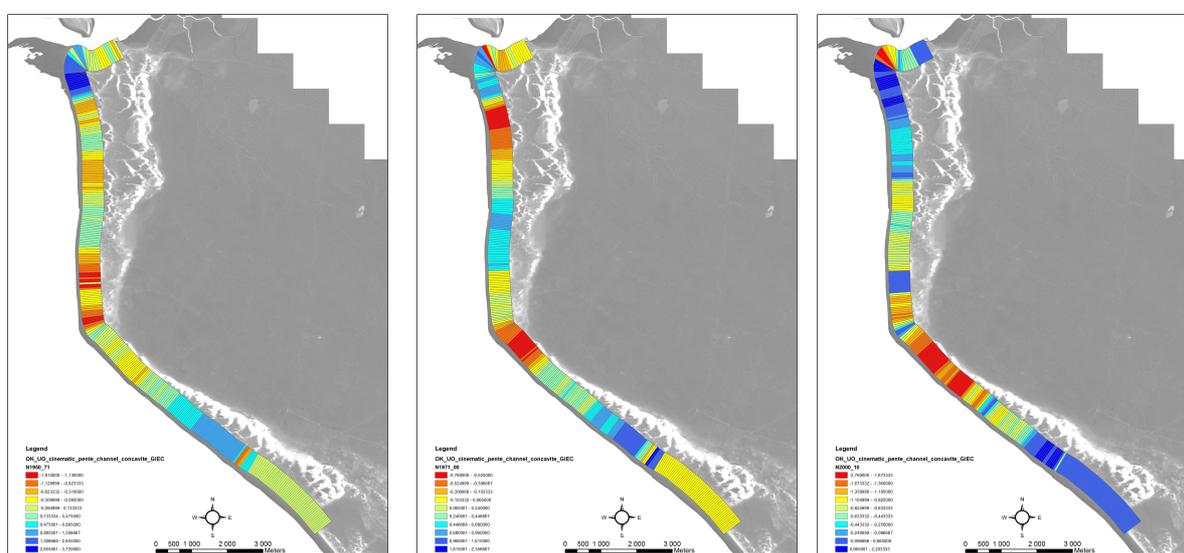


Figure 5 : Evolution du trait de côte du Pays de Mont à divers pas de temps : intégration des valeurs calculées par le DSAS dans les boîtes (1950-1971 à gauche, 1971-2000 au milieu, 2000-2010 à droite)

- **Ajustement du secteur côtier au bassin de risque** correspondant à la nouvelle cote Xynthia (4,20 m) et à la projection centennale suivant les estimations du GIEC (cote à 4,80 m). A noter que la figure 6 (à gauche) représente, sur une largeur de 25 m calculée à partir du trait de cote 2010, la quantité de surface supérieure à la cote GIEC 4,80 extraite d'un seuillage sur le LIDAR Litto3D, le tout intégré dans les boîtes. Nous avons souhaité introduire cette cote de façon à être en phase avec le déploiement des Plans de Prévention des Risques Littoraux sur la zone qui retiennent ces cotes pour le zonage du risque maximum.

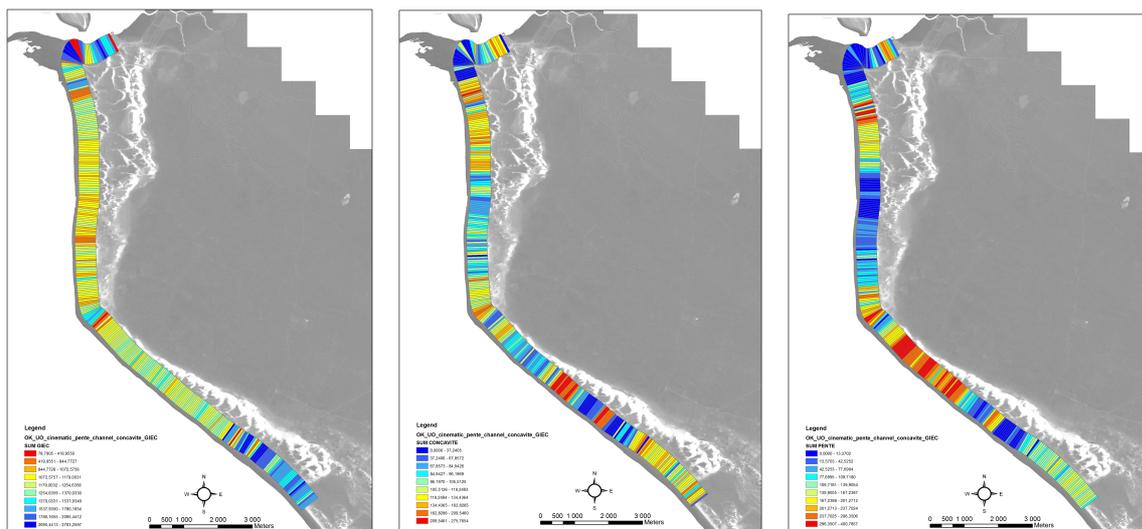


Figure 6 : Surfaces cumulées au dessus de la cote GIEC sur 25m à partir du trait de côte à droite, surfaces de concavité prononcée du contact plage/dune au milieu, surface des fortes pentes du contact plage/dune à droite

- Intégrer **deux nouvelles variables tenant compte a) de la typologie du contact plage/dune** : pour créer cette nouvelle variable, nous avons calculé les dérivées premières et secondes du contact plage/dune à partir des données litto3D (10 m de part et d'autre du trait de côte 2010) et nous en avons déduit une typologie en 12 classes. La carte ci-dessus (au centre) représente l'intégration des formes du contact plage/dune dans les boîtes avec un indicateur concavité du contact. La carte à droite représente la pente du contact plage/dune. **b) La seconde variable correspond à la piézométrie** au niveau du contact plage/dune : l'utilisation de relevés piézométriques nous permet d'envisager la connaissance précise des résurgences sur les plages, de nature à contribuer à la déstabilisation par perte de cohérence du sédiment au droit des résurgences. Nous sommes en train de terminer ce travail qui sera très prochainement intégré dans les boîtes.

An final, nous aurons un raisonnement spatialisé étoffé par rapport aux premiers tests déjà concluants sur Noirmoutier.

II – EVALUATION CARTOGRAPHIÉE DE L'ÉTAT DE CONSERVATION DES DUNES LITTORALES ATLANTIQUES AU REGARD DU SERVICE BIODIVERSITÉ

1. Cartographie et évaluation des habitats : une nécessité

La prise en compte des habitats naturels et semi-naturels est aujourd'hui perçue comme une nécessité dans la mise en place des politiques de conservation de la biodiversité. Cette évolution est perceptible à tous les niveaux : politiques européennes, nationales et régionales, opérations locales de gestion des sites naturels, diagnostics dans les sites Natura 2000, les ZNIEFF, les ENS en vue de l'élaboration des plans de gestions et autres DOCOB, études d'impacts.

Quel que soit le niveau d'intervention, il devient donc indispensable de disposer d'outils d'aide à la décision, fondés sur une estimation systématique, et homogène, régulière dans le temps et dans l'espace, la plus objective et la plus fiable possible permettant d'évaluer la pertinence des choix

d'action, de prévoir les effets des mesures de gestion engagées, d'améliorer ainsi les actions, la planification et les décisions futures.

Cependant, force est de constater que malgré de fortes prétentions en matière de protection et de conservation des habitats, perceptible à travers la multiplicité et la superposition sur le plan spatial des réglementations, on ne dispose pas d'outil de diagnostic et de mesure des enjeux permettant des évaluations objectives, quantifiables, et comparables à l'échelle des habitats. Les connaissances restent ainsi lacunaires et fragmentées. On en veut pour illustration la tentative d'évaluation de l'état de conservation des habitats d'intérêt communautaire en France, qui n'a pu être établie dans la très grande majorité des cas qu'à « dire d'experts », faute de données objectives et quantifiables disponibles.

Des outils de suivi existent déjà :

Sur un certain nombre de sites du littoral français on dispose de bases de données, numériques ou non, contenant des inventaires périodiques des caractères floristiques et éco-dynamiques effectués le long de transects ou/et sur des stations précisément délimités. Le « Sommier des dunes » par exemple mis en place par l'ONF, récapitule sur SIG l'ensemble des travaux réalisés sur les dunes domaniales.

Mais les outils permettant des suivis et évaluations objectives et quantifiables ne sont pas au point...

La question n'est pas tant celle des connaissances sur la végétation qui, du moins pour les sites dont la gestion ou le suivi scientifique sont anciens, est souvent -grâce à de nombreux relevés phytosociologiques- très précise. La question est celle de l'accessibilité et du format de stockage de l'information collectée : quel pourcentage des données accumulées depuis beaucoup d'années est effectivement exploité et mis au service d'une meilleure connaissance de l'évolution du site ? Quel pourcentage est exploitable ? La question est donc celle de la structuration et de la gestion des données mais pas uniquement.

La question est celle de la pertinence du relevé comme élément de base du diagnostic. Le relevé est un outil de connaissance de la végétation au niveau le plus fin perceptible par l'œil, celui de la plante. Sur le plan spatial il peut être assimilé à une information ponctuelle même si les quadrats ont une surface, celle-ci en milieu herbacé est très souvent inférieure ou égale à 1m². Il peut s'agir aussi d'une information linéaire dans le cas de relevés le long d'un transect dont la largeur est également le plus souvent très faible voir réduite au contact avec la ligne. Le transfert d'échelle entre ces informations très fines sur le plan sémantique comme sur le plan spatial et une information sur l'état de conservation des habitats qu'elles décrivent n'est pas maîtrisé.

Par ailleurs, la comparaison des relevés successifs, souvent effectués par des observateurs différents, en fonction d'objectifs particuliers et sur des espaces qui ne sont pas toujours repérés précisément, est toujours délicate. La mise en place de tels suivis est par ailleurs longue et coûteuse et peut difficilement être appliquée de façon homogène et régulière à l'ensemble des habitats dunaires.

L'information obtenue par l'analyse phytosociologique des relevés doit donc être intégrée à des niveaux d'échelle plus petits. Le relevé est l'unité de base de la connaissance de la végétation du site, mais il ne peut être l'unité de base du diagnostic d'évaluation.

2. Segmentation multiscalaire de l'espace dunaire pour un diagnostic

Le protocole méthodologique développé dans Multidune s'appuie sur une stratégie de segmentation de l'espace dunaire en unités de base ou objets à plusieurs niveaux d'échelle ou de résolution. Ces informations de base peuvent ensuite être pondérées et combinées au sein des unités d'observation ou boîtes.

La difficulté est de définir les niveaux de segmentation pertinents pour rendre compte des différents paramètres qui peuvent fonder le diagnostic d'état du milieu. Ces paramètres sont classés en deux catégories : Biodiversité et Naturalité.

2.1. Biodiversité

L'évaluation du service Biodiversité est menée à travers la caractérisation de la végétation. Nous ne prenons pas en compte la composition faunistique des habitats. La végétation est dans la majorité des cas le support des habitats. La végétation est un révélateur très précis des conditions du milieu en particulier dans les milieux à très fortes contraintes comme les dunes littorales. C'est enfin une composante inscrite spatialement, il est donc possible de l'analyser par télédétection et de mesurer ainsi les caractères spatiaux (surface, structure) de sa dynamique à différents niveaux, habitat, intra-habitat ou faciès et espèce.

La Diversité est sur le plan écologique un critère de bon état quel que soit le niveau d'analyse paysage, habitat, population. On la caractérise ici au niveau Habitat, Faciès, Espèce.

a) Variable « Habitats »

La végétation des dunes littorales atlantiques est organisée en bandes parallèles à la côte selon un gradient décroissant de l'influence du vent, de la salinité et des mouvements sableux. L'importance relative d'un habitat ou d'un caractère du paysage végétal (faciès), sa progression aux dépens d'un autre et la rapidité de ce changement sont des indicateurs biologiques d'évolution progressive ou régressive selon que la stabilité du milieu augmente ou diminue.

■ Ainsi, un premier niveau de segmentation nommé variable Habitat répond aux questions :

- Quelle est la composition de l'espace dunaire en termes d'habitats
- Quelle est la surface couverte par chaque habitat ?
- Quelles est la surface relative de chaque habitat au sein de l'habitat Dune littorale non boisée ?
- Où se situe le site par rapport à la référence en termes de diversité des habitats dunaires ?

Répondre à ces questions selon un pas de temps régulier (par exemple un pas de 3 à 5 ans semble pertinent pour juger de la dynamique du milieu observé) est un objectif majeur. On rappellera que l'aire de répartition de l'habitat et la superficie recouverte par l'habitat au sein de cette aire sont deux paramètres retenus par la Commission européenne⁵ pour l'évaluation de l'état de conservation des sites Natura 2000.

■ Le référentiel choisi est la typologie définie dans le Manuel d'Interprétation des Habitats de l'Union européenne EUR27 (2008)

Il fallait choisir en effet une typologie des habitats couramment utilisée dans les documents relatifs à la gestion ou la protection de l'environnement. Cependant l'analyse de la végétation au sol, observations et relevés phytosociologiques, met en évidence des habitats non répertoriés ou faciès de transition entre les différents habitats qu'il est pertinent de délimiter dans la mesure où ces écotones sont souvent très riches sur le plan spécifique et constituent des zones clés en termes de dynamique.

⁵ European Commission 2005. *Assessment, monitoring and reporting of conservation status – Preparing the 2001-2007 report under Article 17 of the Habitats Directives (DocHab-04-03 rev.3)*, Note to the Habitats Committee, European Commission, DG Environment, Brussels.

■ Variable Habitat : typologie retenue (les codes et les définitions sont celles de la typologie EUR 15- 27)

- Dunes mobiles embryonnaires (2110) : Formation des côtes représentant les premiers stades initiaux dunaires se manifestant en rides ou en élévations de la surface sableuse de l'arrière plage ou comme une frange à la base du versant maritime des hautes dunes.
- Dunes mobiles du cordon littoral à *Ammophila arenaria* (dunes blanches) (2120) : Dune mobile constituant le cordon, ou les cordons les plus proches de la mer, des systèmes dunaires des côtes, caractérisées par l'*Ammophilion arenariae*.
- Dunes côtières fixées à végétation herbacée (dunes grises) : (2130) Dunes fixées, stabilisées et plus ou moins colonisées par des pelouses riches en espèces herbacées et d'abondants tapis de bryophytes et/ou lichens des rivages de l'Atlantique
- Dunes à *Salix repens* ssp. *Argentea* (2170) : Communautés à *Salix repens* (*Salicion arenariae*), colonisant les dépressions dunaires humides (...).
- Dépressions humides intradunales (2190) : Dépressions humides des systèmes dunaires. Les pannes humides (...).

Faciès de transition :

- Ourlet pré-forestier (frange forestière) : le passage progressif de la pelouse de dune grise à la forêt est très important pour la richesse biologique et paysagère de cette limite externe des dunes non boisées. Dans l'«ourlet», la végétation basse de dune grise s'enrichit en espèce préforestières, semi-ligneux puis buissons bas⁶.
- Dunes boisées littorales : elles ne sont pas étudiées en tant que telles mais nous les avons délimitées.

b) Variable « Faciès »

La variable Habitat est un niveau nécessaire mais souvent insuffisant pour rendre compte de l'état de conservation d'un massif dunaire et des modalités qu'y revêt la biodiversité. La variable intitulée « Faciès » correspond donc à un second niveau de segmentation emboîté dans le précédent. Il s'agit à ce niveau de caractériser la végétation selon deux critères : le recouvrement et la composition floristique.

- Le **recouvrement végétal** est une information pertinente en termes d'état, en particulier dans les situations extrêmes, il caractérise la stabilité du substrat : un couvert absent, rare ou peu dense (taux de recouvrement entre 0 et 25 %) signale des zones de déflation actives, et l'existence de pressions naturelles ou anthropiques. Ce sont donc des zones dont il faut mesurer la surface et la densité au sein d'un habitat afin d'établir le niveau de la menace et d'adapter les actions de gestion (surveillance, action légère ou plus lourde). Les forts taux de recouvrement (supérieurs à 75 %) indiquent au contraire la stabilité du système, quel que soit le type de végétation et sans préjuger de sa valeur sur le plan de la biodiversité.
- La **composition floristique** est un paramètre incontournable pour caractériser les habitats sur le plan de la biodiversité. L'objectif n'est pas ici l'inventaire mais l'inventaire fondé sur les relevés phytosociologiques doit précéder la cartographie de ce paramètre de façon à fixer la composition de référence (locale ou régionale) ou composition potentielle. Par le terme de composition il faut surtout mettre l'accent sur la présence des espèces caractéristiques d'un point de vue

⁶ Favennec J. éd. 1998. *Guide de la flore des dunes littorales non Boisées. De la Bretagne au sud des Landes*. ONF Editions Sud ouest.

phytogéographique (ou espèces clé de voûte)⁷ de l'habitat comme *Tortula ruraliformis*, *Ephedra distachya*, *Rosa pimpinellifolia* par exemple. L'objectif est de caractériser la diversité de composition au sein des habitats en les situant par rapport à la composition de référence (identifiée comme telle pour un site ou un ensemble de sites). Ce sont en effet les écarts importants à une référence qu'il est intéressant de mettre en évidence : faciès indicateur d'un stade dynamique progressif ou régressif notamment.

■ Ainsi, un second niveau de segmentation nommé variable **Faciès** répond aux questions :

- Quelles sont les variantes de la mosaïque végétale intra dunaire ?
- Quels est le degré de stabilité du système ?
- Quelles sont les tendances dynamiques ?
- Quels sont les enjeux de la gestion et de la conservation ?

■ Typologie retenue au niveau **Faciès** :

○ Dunes mobiles du cordon littoral à *Ammophila arenaria* (dunes blanches) :

- **Couvert absent, rare ou peu dense (taux de recouvrement entre 0 et 25 %) :** délimitation des zones de déflation active ; zones de départ du sable qui se dépose par saupoudrage ou accumulation épaisse (pourrières) ailleurs vers l'intérieur. L'existence de ces surfaces à nu ou faiblement végétalisées influence, par les dépôts qu'elle occasionne, l'état de la végétation voisine. Elle génère des micro-habitats dont la composition floristique témoigne de la résistance ou non aux transits sableux. L'instabilité est donc mesurée à travers la surface relative de ces zones au sein de la dune mobile. La corrélation peut être ainsi établie avec les caractères de la végétation impactée de façon à juger évaluer positivement ou négativement cette instabilité. En effet l'instabilité peut générer davantage de biodiversité quand elle est limitée, elle peut aussi être responsable du dépérissement de couverts de dune grise si les dépôts sableux les atteignent et les recouvrent pendant longtemps. Le gestionnaire prend en considération ce paramètre dans la définition des actions menées sur le cordon de dune mobile.
- **Couvert dense d'*Ammophila arenaria* (Oyat) et *Elymus farctus* (Chiendent des dunes) :** responsables de l'édification et du maintien du cordon dunaire signal de la stabilité du cordon avec des taux de recouvrement supérieurs à 75%.
- **Faciès de transition (dune semi fixée) :** la végétation de dune semi-fixée se développe à l'abri du cordon de dune blanche où les phénomènes d'accumulation et de transit sont atténués. La physionomie de ce faciès est très marquée par les « moquettes » à Fétuque (*Festuca juncifolia*) et Gaillet (*Galium arenarium*), sortes de petites prairies d'aspect clairsemé, mais à systèmes racinaires en réseaux dense et efficace contre l'érosion éolienne⁶. L'Armoise maritime (*Artemisia campestris* ssp. *maritima*) se développe sur l'ensemble de la dune de transition. La face interne de ce faciès, zone à proprement parler, de transition entre dune mobile et dune fixée, voit se côtoyer espèces de dune grise et de dune blanche ; elle peut être considérée comme un faciès jeune de dune grise.

○ Dunes côtières fixées à végétation herbacée (dunes grises) :

- **Faciès caractéristique de dune grise (référence locale ou attendue) :** surfaces non perturbées dont les caractères du point de vue de la structure verticale (pelouse basse), horizontale (recouvrement fort ou complet) et floristique (forte représentation des espèces clés de voûte

⁷ Rozé F. 2002 : Dynamique, analyse et typologie des dunes grises. Connaissance et gestions durables de dunes de la côte atlantique, ONF, *Les Dossiers Forestiers* n°11, p. 122-127.

et part importante des mousses et lichens) la placent à proximité de la référence. Ce faciès signale les zones les mieux et les plus anciennement stabilisées, le couvert de lichens étant un indicateur de bon état (Jun, 2005)⁸.

- **Faciès perturbé de dune grise** : le recouvrement de la végétation n'est pas total. Le substrat est moins fixé compte tenu d'une faible présence du tapis bryolichénique. La richesse spécifique est sensiblement plus faible. Ce faciès n'est pas conforme à la référence mais seul un suivi sur le long terme permet de connaître sa trajectoire : éloignement ou rapprochement de la référence. Ce faciès est à mettre en relation avec des perturbations anthropiques anciennes ou récentes comme le piétinement, la circulation d'engins à moteur, ou un quelconque usage ayant exercé une pression supérieure à la résistance de la végétation.
- **Faciès de transition ensablé** : les transits sableux sont caractéristiques du milieu dunaire et font partie de son fonctionnement naturel. Cependant, l'érosion éolienne en dune mobile qui est à l'origine des dépôts sableux sur la dune grise est très souvent favorisée par la surfréquentation en particulier la multiplication des passages vers la plage. L'ampleur des dépôts sableux sur la dune grise peut donc être dans une certaine mesure maîtrisée par des actions de gestion dans les zones de déflation actives (limitation du nombre d'accès à la plage, plantations d'oyats, dépôts de branchages par exemple). Il est donc important de mesurer la pression qui s'exerce ainsi sur la végétation de dune grise -qui au mieux résiste à un faible saupoudrage mais n'est pas adaptée pour supporter un recouvrement total- afin d'adapter les actions. Là encore tout est en effet question de seuil et de choix car ce type de perturbation peut aussi avoir des effets positifs sur la biodiversité.

c) Variable « Espèces »

La variable « Espèces » correspond à un troisième niveau de segmentation de l'espace dunaire, niveau nécessaire pour compléter la caractérisation du service Biodiversité et l'état de conservation. Trois types d'espèces ont une valeur indicatrice sur ce plan : les espèces rares, les espèces envahissantes ou invasives, le cas particulier du Pin maritime.

- **Espèces rares** : la présence d'espèces rares et protégées à différents niveaux, européen (Directive Habitats, annexes II et IV), national (liste nationale annexe I ou II, livre rouge de la flore menacée en France, tome I) ou régional (arrêtés) n'est pas en soi un critère de bon état de l'habitat ou du site dans son ensemble. Mais elle confère au site un rôle de conservation de la biodiversité et une valeur patrimoniale supplémentaire. Le suivi des populations de ces espèces remarquables dont l'état de conservation est directement lié à celui de certains habitats (dune grise en particulier mais aussi dépressions humides intradunales) est donc une également une priorité en termes de gestion.
- **Espèces végétales invasives** : la présence d'espèces végétales envahissantes ou invasives sur un site, les surfaces qu'elles couvrent sont des critères d'évaluation de son état de conservation car elles sont interprétées comme des agents de perturbation nuisibles à la biodiversité. La limitation de leur extension spatiale ou leur éradication sont des priorités de gestion (Le Yucca (*Yucca gloriosa*), l'herbe de la Pampa (*Cortaderia solloana*),

⁸ JUN R., 2005. *Les mousses et lichens des dunes grises atlantiques : caractéristiques structurales, dynamique et typologie fonctionnelle des communautés*. Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes 1, 179 p.

le Sénéçon en arbre (*Baccharis halimifolia*), la Griffes de sorcière (*Carpobrotus edulis*), le Peuplier blanc (*Populus alba*), Robinier faux-acacia (*Robinia pseudoacacia*)).

- **Le Pin maritime** : espèce pionnière indigène sur le sud du littoral atlantique mais aussi largement favorisée par les forestiers depuis le début du XIX^e siècle, le Pin maritime (*Pinus pinaster*) a une dynamique très vigoureuse de colonisation de la dune grise et des dépressions humides. La dispersion de cette espèce depuis les boisements vers la dune grise à une influence négative sur l'état de conservation de l'habitat prioritaire et sur les dunes à *Salix repens*. Cette dissémination peut entraîner le boisement de la dune grise et une perte en termes d'habitat et de biodiversité. Il est donc nécessaire de surveiller cette propagation et de la mesurer afin de prévoir les actions adaptées.

2.2. Naturalité

La naturalité est un paramètre complémentaire de la biodiversité pour juger de la qualité écologique d'un milieu. Selon Lecomte (1999), « la naturalité d'un système écologique s'apprécie le long d'un gradient. La variable « naturalité » peut être estimée en fonction de l'influence des activités humaines sur l'évolution du système considéré ». Il s'agit ici d'apporter des éléments objectifs et quantifiés à la caractérisation d'un massif dunaire comme milieu naturel, de le situer sur une échelle allant de l'artificialisation complète (naturalité = 0) à la naturalité (artificialisation = 0). Etant donnée l'ampleur des pressions qui s'exercent sur les littoraux de nos jours, les milieux dunaires peuvent difficilement prétendre à la naturalité, tout au plus à une semi-naturalité. La cartographie des différentes modalités de l'artificialisation permet de comparer les situations à l'échelle du littoral français. Elle permet de mesurer les enjeux en matière de conservation à l'échelle d'un massif, de mettre en évidence l'origine des perturbations, d'anticiper leurs effets.

a) Modalités de l'artificialisation

Les activités humaines responsables de l'artificialisation du milieu dunaire sont classées en trois catégories en fonction du type d'influence qu'elles peuvent exercer. Ces indicateurs sont mesurés (surface couverte) sur l'ensemble du massif dunaire puis intégrés dans les unités d'observation (boîtes).

A1 – Artificialisation du substrat : surfaces recouvertes artificiellement (surfaces cimentées, goudronnées, asphaltées ou stabilisées : terre battue, par exemple), sans végétation occupant la majeure partie du sol. Ces surfaces comprennent :

- les bâtiments,
- les blockhaus et forts,
- le réseau routier (y compris voirie),
- les parkings hors tissu urbain,
- les espaces verts artificialisés non agricoles :
 - Terrains de campings,
 - Terrains de sport
 - Terrains militaires,
 - Golfs
 - Hippodromes

A2 – Artificialisation du cortège floristique :

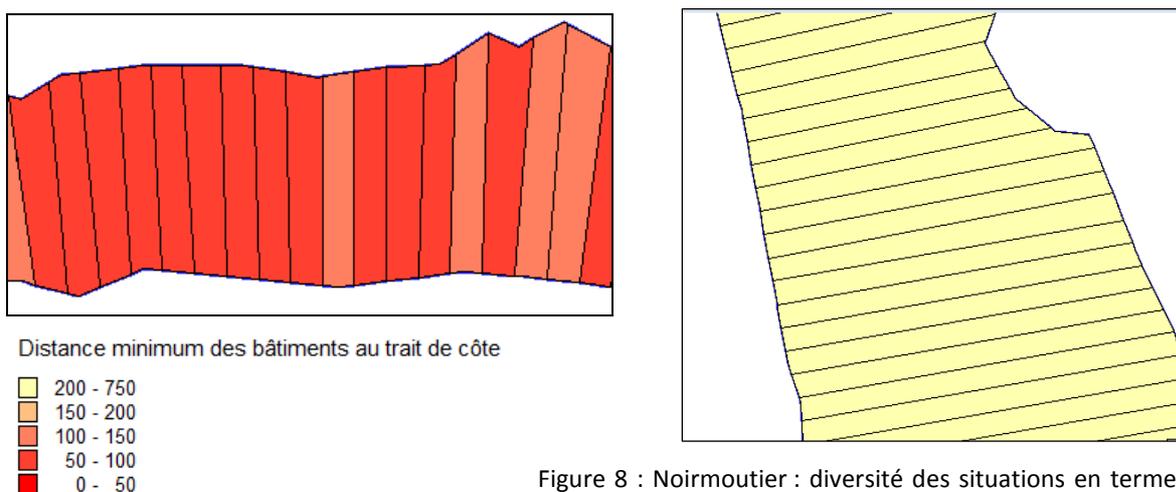
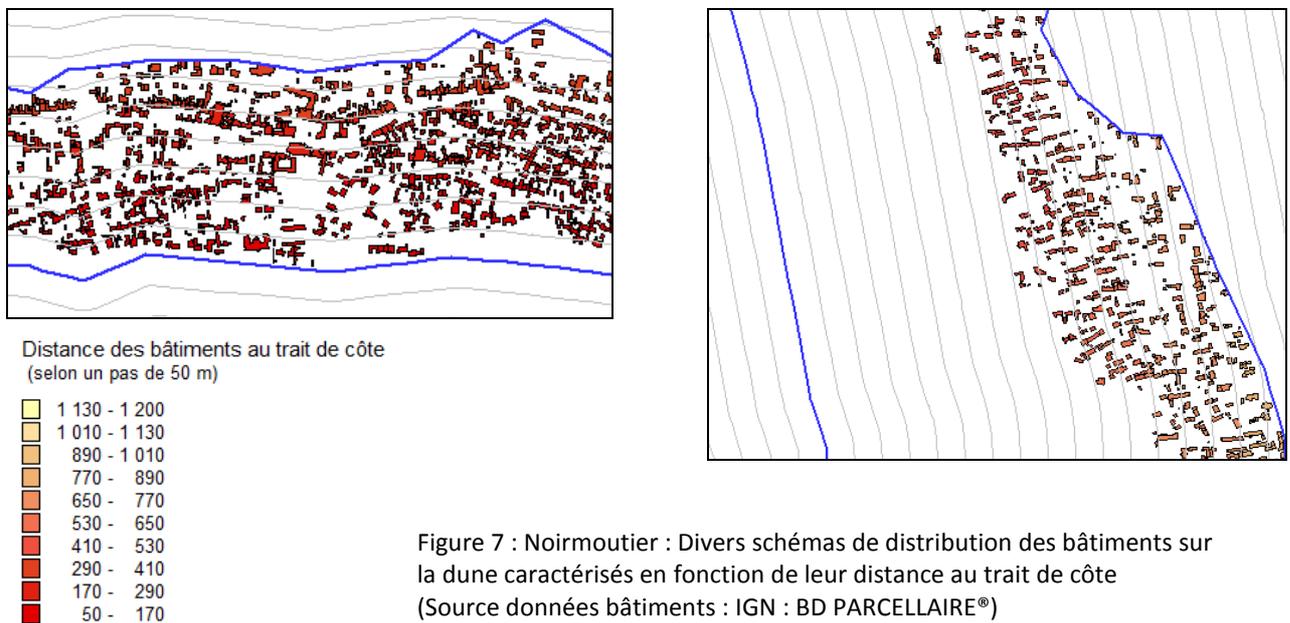
- Surfaces agricoles
- Forêts issues majoritairement de la plantation
- les espaces verts urbains (espaces végétalisés inclus dans le tissu urbain. Y compris parcs urbains et cimetières avec végétation)

A3 – Artificialisation induite par la fréquentation

- Chemins
- Circuits de moto-cross

b) Quand l'artificialisation conduit à la fragmentation

La fragmentation du milieu dunaire induite par les différentes modalités de l'artificialisation en particulier celles de la catégorie A1, en ce qu'elle a un impact sur les fonctions écopaysagères des éléments qu'elle isole, doit également être prise en compte dans le diagnostic. Il s'agit ici de situer les objets artificialisés sur la dune, l'impact n'étant pas le même selon leur distribution spatiale. La rupture de la continuité écologique est d'autant plus néfaste qu'elle intervient à proximité du trait de côte. Ainsi, au critère « surface couverte par les objets de type A1 » qui exprime le niveau d'artificialisation est ajouté le critère « fragmentation » correspondant à la distance minimale des bâtiments à au sein de l'unité d'observation ou boîte.



3. Matériel, méthodes et résultats

L'utilisation des données d'observation de la terre pour le contrôle de la conservation de la nature a été limitée du fait d'un décalage, jusqu'à une période récente, entre la résolution spatiale et thématique de ces données et les besoins de l'utilisateur, scientifique et gestionnaire. Ainsi, la plupart des applications en matière de cartographie des habitats reposent sur l'interprétation visuelle des images satellitaires, la photo interprétation des photographies aériennes ou, on l'a dit, sur des relevés de terrain. Or, ces méthodes traditionnelles ne s'accordent pas avec les exigences d'une demande croissante en données spatialement explicites sur la qualité écologique de sites protégés et sur les menaces qui pèsent sur eux. Pour s'adapter aux exigences scientifiques mais aussi à celle des politiques européennes, le développement de stratégies de contrôle plus efficaces en termes de temps et de coût est obligatoire. Le développement de la commercialisation des données satellitaires très haute résolution d'une part, les évolutions en matière d'analyse de ces images, des photographies aériennes numérisées et d'intégration de données d'origine et de nature diverse (cf. approche orientée-objet) permettent d'envisager le recours systématique aux données de télédétection pour l'évaluation des états de conservation. C'est ce que nous avons démontré dans Multidune.

3.1. Biodiversité

a) Sources

a.1. Pour une cartographie opérationnelle : les orthophotographies

Deux types de données nous paraissent pertinents pour l'obtention des différents niveaux d'informations nécessaires au diagnostic du service Biodiversité. La très haute résolution spatiale est le critère privilégié. Nous avons donc décidé d'utiliser comme source d'information de base les orthophotographies aériennes : BD ORTHO® de l'IGN visible et infrarouge. Cette composante du RGE est aujourd'hui facilement accessible (Directive Inspire), renouvelée selon une périodicité qui dans la majorité des cas permet un suivi à un pas de temps pertinent de 5 ans. Elle est par ailleurs déjà l'outil de base des gestionnaires qui y délimitent leurs actions. Sa résolution spatiale de 50 x 50 cm (20 x 20 cm pour l'ORTHO HR de l'IGN) permet d'accéder à la l'individualisation d'objets de faible étendue (arbres isolés par exemple). La méthode pourra être ultérieurement testée sur des données satellitaires offrant une finesse spatiale comparable mais de meilleure qualité sur le plan spectral (données Pléiades par exemple).

L'acquisition d'un drone *Sensefly* va permettre, par la facilité de mise en œuvre, la qualité des photographies à basse altitude (150 m) mosaïquées, dont on peut extraire par autocorrélation la dimension 3D, une mise à jour des données plus rapide et un suivi plus précis à la fois de la phénologie végétale dans le massif dunaire, de l'état du contact plage /dune et de l'état de la dune blanche, en constante évolution. Cet outil nous permettra enfin une lecture plus directe du saupoudrage lors des tempêtes hivernales nous permettant de mieux caractériser le fonctionnement de la dune de transition.

a.2. La télédétection hyperspectrale : démarche scientifique exploratoire

En marge de ce choix guidé par la nécessité de produire un outil accessible et opérationnel, nous avons entrepris une analyse exploratoire des potentialités de la télédétection hyperspectrale pour la cartographie de la végétation. Cette orientation non prévue dans la proposition de recherche initiale a pu être développée grâce à la réalisation de plusieurs campagnes aéroportées avec caméra Hypex

(financées par la région Pays de Loire dans le cadre de l'OSUNA) qui ont fourni des images d'une résolution spatiale de 1 X 1m avec une précision de 3.4 nanomètres dans les parties visible et proche infrarouge du spectre électromagnétique (Figure 7 : exemple du survol du 22 septembre 2009).

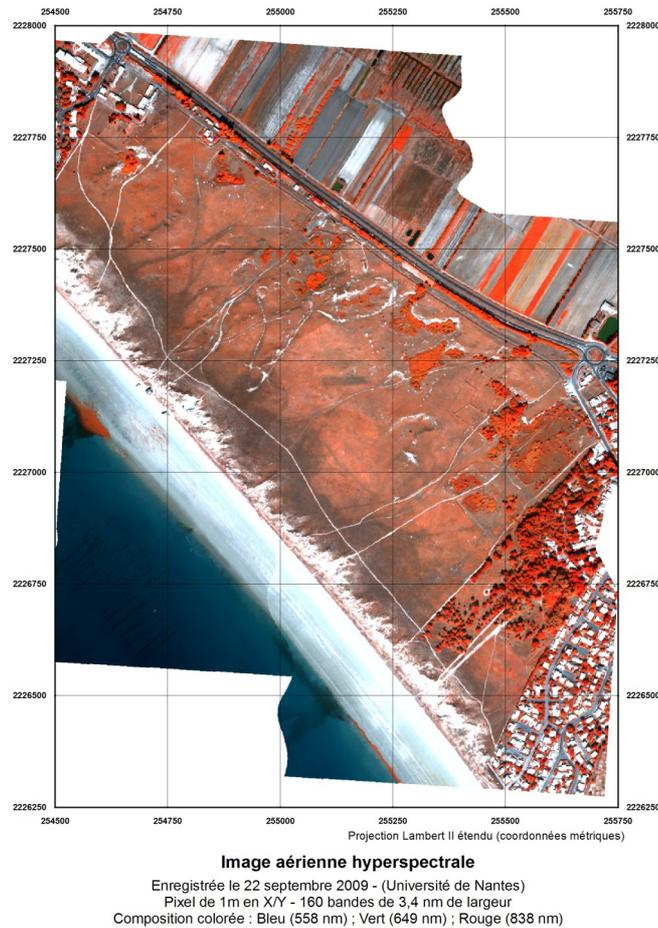


Figure 9 : Image aérienne hyperspectrale - Dune de la Tresson (Noirmoutier - Vendée) – 22/11/2009

L'objectif est, grâce à la constitution de bibliothèques spectrales (mesures spectrométriques sur le terrain et en laboratoire), d'accéder sur les images à l'identification et la délimitation précise des couverts d'espèces clés de voûte ou bio-indicateurs comme les lichens. C'est une direction dans laquelle nous continuons de travailler considérant qu'une cartographie précise et fiable de la distribution des espèces et leur suivi saisonnier, annuel ou pluriannuel serait d'un très grand intérêt sur le plan scientifique (accès à une meilleure connaissance du fonctionnement écologique et des principes de répartition des espèces) et renforcerait le diagnostic d'état.

Nous n'avons pas intégré pour l'instant ces données dans les boîtes car elles sont encore très localisées, d'un traitement complexe et non reproductible en l'état. Cette entrée télédétection va de plus au-delà du strict programme LITEAU et participe plus d'une opportunité au cours du programme. D'autre part, la méthodologie nécessite encore des ajustements techniques. Plus précisément, nous sommes dans l'attente des données super spectrales satellitaires pour envisager l'estimation de la généralité de ce type de données et leur utilisation future en routine.

Toutefois, nous avons étudié les potentialités de reconnaissance des espèces végétales et plus particulièrement des espèces caractéristiques de la dune grise (mousses et lichens en particulier). Nous avons pour ce faire procédé en 3 temps :

- développement d'une bibliothèque de signatures spectrales précises par espèces sur le terrain à l'aide d'un spectromètre de terrain Ocean Optics@.

- Au laboratoire, passage des espèces de mousses et lichens en chromatographie liquide haute pression (HPLC) de façon à cerner les pigments, puis à interpréter les spectres et ainsi autoriser leur reconnaissance sur les images hyperspectrales.
- Utilisation de ces spectres pour la spatialisation par classification : nous avons comparé les pixels des images avec les signatures de la bibliothèque selon des distances angulaires (*Spectral Angle mapping*).

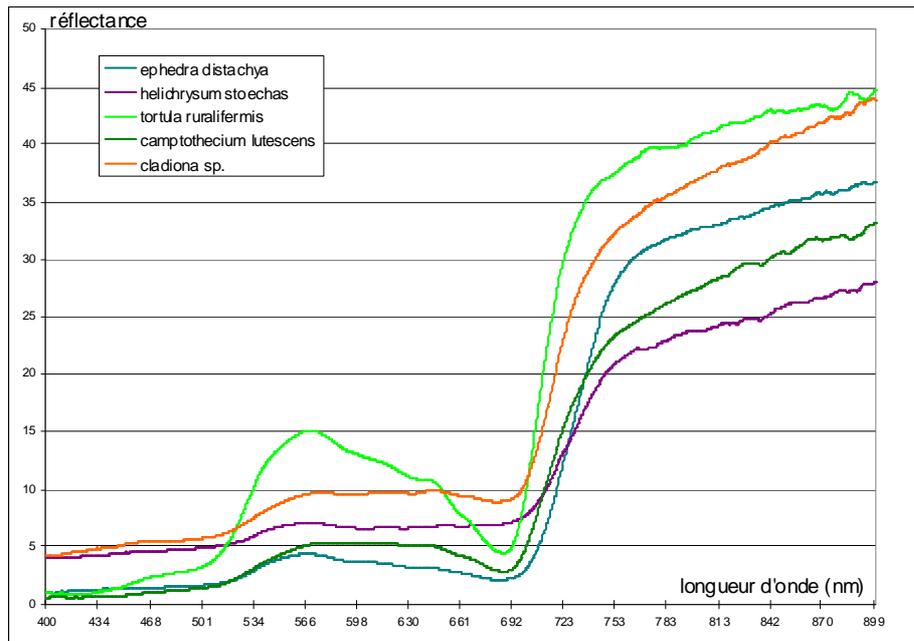


Figure 10 : Signature spectrale de quelques espèces de mousses et lichens

Sur la figure 10, extraite de cette bibliothèque, la discrimination entre 5 espèces par un travail sur les bandes d'absorption est très satisfaisante. Des indices de végétation hyperspectraux sont en cours de finalisation de façon à déboucher sur une méthode reproductible. La difficulté de démixage nécessite toutefois de poursuivre l'expérimentation. Cette dernière a pu être mise au point sur d'autres types de surfaces en baie de Bourgneuf par certains membres de l'équipe (par exemple BARGAIN A., ROBIN M., LE MEN, HUETE A., BARILLÉ L., 2011, Spectral response of the seagrass *Zostera noltii* with different sediment backgrounds, *Aquatic Botany*, Vol. 98, April 2012, Pages 45–56) théoriquement moins complexes du point de vue du mixage du signal mais la structure dunaire est encore plus hétérogène et une adaptation de la méthodologie est en cours d'où des résultats différés de quelques mois. Enfin, nous avons rencontré lors de la phase chromatographique un problème de reconnaissance d'un pigment dans les lichens (non répertorié) qui nécessite une détermination plus approfondie.

Les résultats préliminaires de reconnaissance des tapis bryolychéniques suite à de premiers essais de classification par Spectral Angle Mapping sont toutefois assez satisfaisants et ouvrent des perspectives très intéressantes aussi bien pour la caractérisation du service protection que pour celle du service biodiversité. Cette démarche est en cours de finalisation et fera prochainement l'objet d'une publication dans une revue adéquate.

a.3. Les relevés de végétation pour une analyse phytosociologique

Au total 316 relevés de végétation, sur des quadrats d'1 x 1 m ont été réalisés par Françoise Rozé en avril et mai 2009 sur les différents sites test : Noirmoutier (dune de Luzérone et de la Tresson (Fig. 9), la Réserve de la Pointe d'Arçay (Vendée), les sites de l'anse du Verger et de l'anse des Chevrets en Ille et Vilaine et les dunes domaniales de Quiberon - Plouharnel (Morbihan). L'analyse phytosociologique a mis en évidence les caractères floristiques de ces différents sites et détecté des variantes locales des différents habitats.



Figure 11 : Relevés de végétation sur la dune de la Tresson (Noirmoutier)

b) L'analyse d'image-orientée-objet

Nous avons utilisé l'approche orientée-objet pour délimiter et classer les habitats dunaires. L'applicabilité des approches semi-automatisées et orientées-objet pour la cartographie et le contrôle des habitats fondés sur les données d'observation de la terre, ne sont sujet de recherche que depuis peu de temps. L'approche orientée-objet, également connue dans la terminologie anglo-saxonne sous le nom OBIA (*Object-based Image Analysis*) est une discipline émergente en analyse d'image qui a déjà fait l'objet d'un colloque international en 2006.⁹ Cette approche qui diffère de l'approche aujourd'hui classique dite « pixel » est parfaitement adaptée aux objectifs définis en termes de niveaux d'information et de segmentation.

Elle répond à une série d'évolutions qui ont marqué la dernière décennie 1) un spectaculaire développement de la mise à disposition commerciale de l'imagerie très haute résolution (<1m), 2) une augmentation constante des besoins des utilisateurs et leurs attentes en matière de produits de l'information géographique 3) la reconnaissance des limitations des approches fondées sur le pixel (les pixels ne sont pas de véritables objets géographiques, la topologie du pixel est limitée, l'analyse

⁹ 1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA 2006), Salzburg University, Austria, July4-5, 2006 coorganisée par ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) et l'ESA European Space Agency.

courante des images de télédétection néglige les éléments de photo-interprétation spatiale -c'est-à-dire la texture, le contexte et la forme- ; l'augmentation de la variabilité, implicite dans les images à haute résolution embrouille les procédures de classifications fondées sur le pixel, produisant des classifications de faible précision).

b.1. Segmentation de l'image

Un pré requis de l'analyse d'image orientée-objet est l'utilisation d'une segmentation assistée par ordinateur pour diviser l'image en régions plus ou moins homogènes de pixels spatialement connectés qui doivent se référer à des objets significatifs du monde réel. Plusieurs algorithmes de segmentation multiscalaire ont été développés qui dépendent de méthodes fondées sur les limites, les régions ou la texture. Nous avons utilisé le logiciel *Definiens Professional* – Ecognition.

La segmentation multiscalaire permet la construction des objets-image à différentes résolutions. Un réseau hiérarchique d'objets-image est construit dans lequel chaque objet est caractérisé par un certain nombre de variables spectrales, spatiales, contextuelles uni-scalaires –relations de voisinage- ou pluriscalaire –relations aux super-objets englobant et aux sous-objets constituants. Il devient ainsi possible de modéliser les règles de construction d'un objet et de mettre en relation ces règles de construction avec les règles de construction des objets du monde réel. Un véritable formalisme sémantique est ainsi construit par un va et vient entre les règles de composition des objets des images avec les règles de composition des objets dunaires à partir des données du terrain. Ces règles de composition ne sont pas les mêmes pour chaque élément des typologies définies. Il faut donc bâtir autant de règles de composition qu'il existe de types identifiés dans les milieux dunaires.

b.2. Classification

La classification des objets dans *Definiens Professional* est fondée sur des fonctions d'appartenance floues ou sur une réalisation floue de l'algorithme standardisé du plus proche voisin. Les classifications floues (*fuzzy classifications*) traduisent les données de rang arbitraire en valeurs floues standardisées entre 0 et 1 indiquant l'appartenance à une classe spécifique. Un avantage de la classification floue est d'exprimer l'incertitude de l'appartenance et de la connaissance. L'appartenance d'un objet à plus d'une classe est définie par plusieurs degrés d'appartenance. Ce concept s'adapte très bien à la composition souvent hétérogène des habitats semi-naturels et des espaces de transitions entre eux.

Les variables utilisées pour la classification sont la valeur spectrale, des indices (brillance, végétation), la forme (par exemple le rapport largeur/longueur pour différencier objets linéaires ou surfaciques), la surface (séparation arbres isolés / bosquets) et la distance à certains objets (trait de côte, ou autres classes).

b.3. Validation

Les résultats de l'analyse des images ont été validés sur le terrain à de nombreuses reprises selon différents protocoles dont le plus efficace et le plus fiable consiste à utiliser un GPS différentiel de précision centimétrique permettant de visualiser sur l'écran intégré la correspondance image ou carte et terrain au fur et à mesure des déplacements.



Figure 12 : Observations sur le terrain pré et post traitements :
localisation des points (Dune de la Tresson).

3.2. Naturalité

Les données nécessaires à la caractérisation de la naturalité soit les différentes modalités de l'artificialisation des milieux dunaires sont obtenues à partir des sources suivantes :

- **A1** : Données du RGE : BD PARCELLAIRE® (parcelles, bâtiments,), BD TOPO® (routes, bâtiments remarquables, aménagements sportifs et de loisir) et photo-interprétation à partir de la BD ORTHO® (Parkings, campings)
- **A2** : BD ORTHO® (analyse d'images)
- **A3** : BD ORTHO® (analyse d'images)

3.3. Intégration dans un SIG

Les informations extraites des images sont intégrées dans un SIG (ArcGIS) où elles sont stockées sous format vecteur. C'est au sein du SIG que sont effectuées les différentes analyses (mesures de surfaces, analyse multicritère et intégration de l'information dans les boîtes).

3.4. Déroulé du protocole sur le massif dunaire de Noirmoutier (Vendée)

Les pages suivantes présentent les différentes phases de l'analyse du service Biodiversité sur le massif dunaire de Noirmoutier 1) caractérisation du massif en termes de Naturalité 2) puis caractérisation de la Biodiversité au niveau Habitat et au niveau Faciès sur le site de la Tresson. 3) Le niveau Espèce est présenté à travers le traitement de la question de l'enrésinement de la dune grise de la Pointe d'Arcay (Vendée).

1) Variable « Naturalité » - évaluée à travers le degré d'artificialisation du massif dunaire

figure 13 : Type A1



Figure 14 : Fragmentation

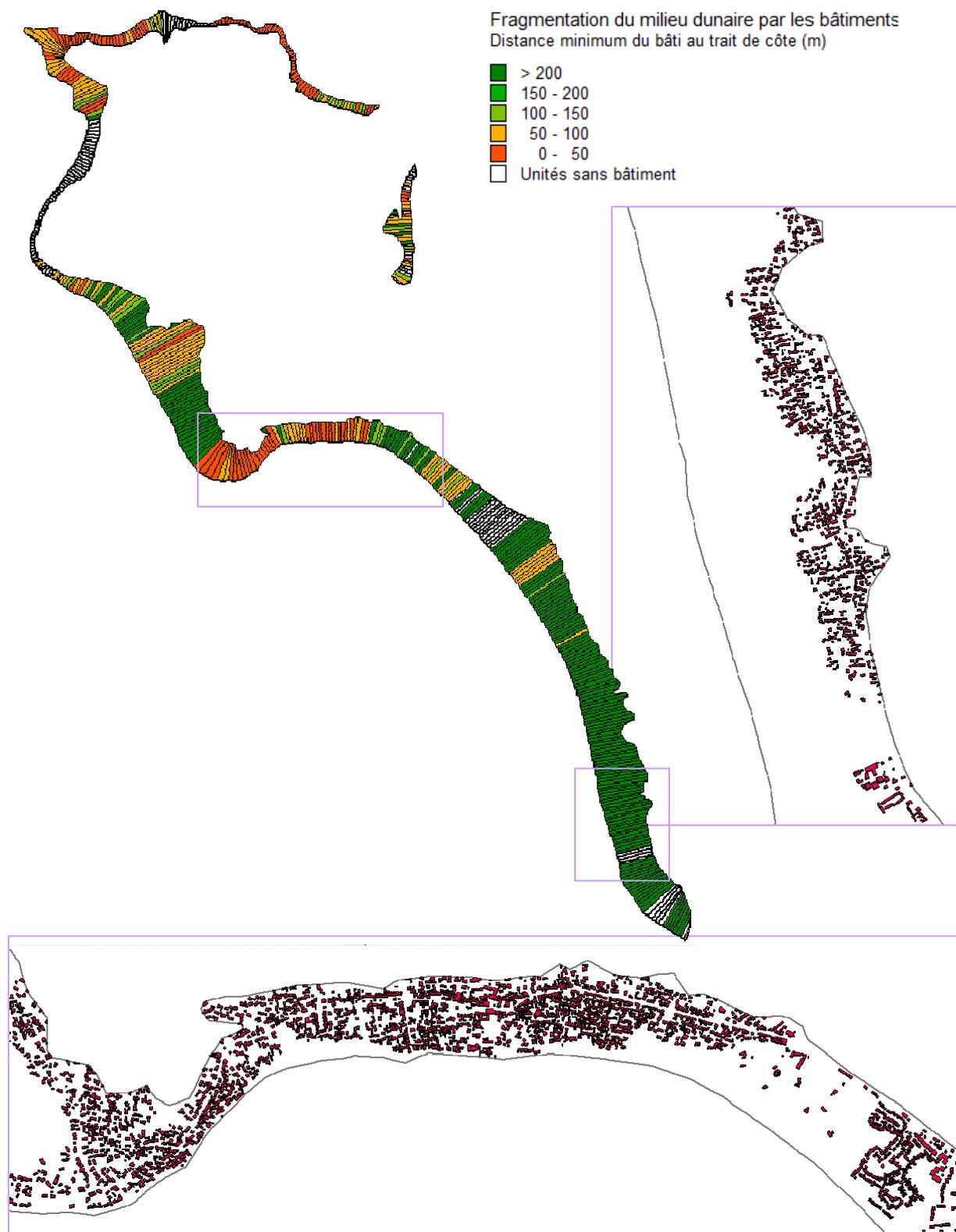


Figure 15 : Type A2

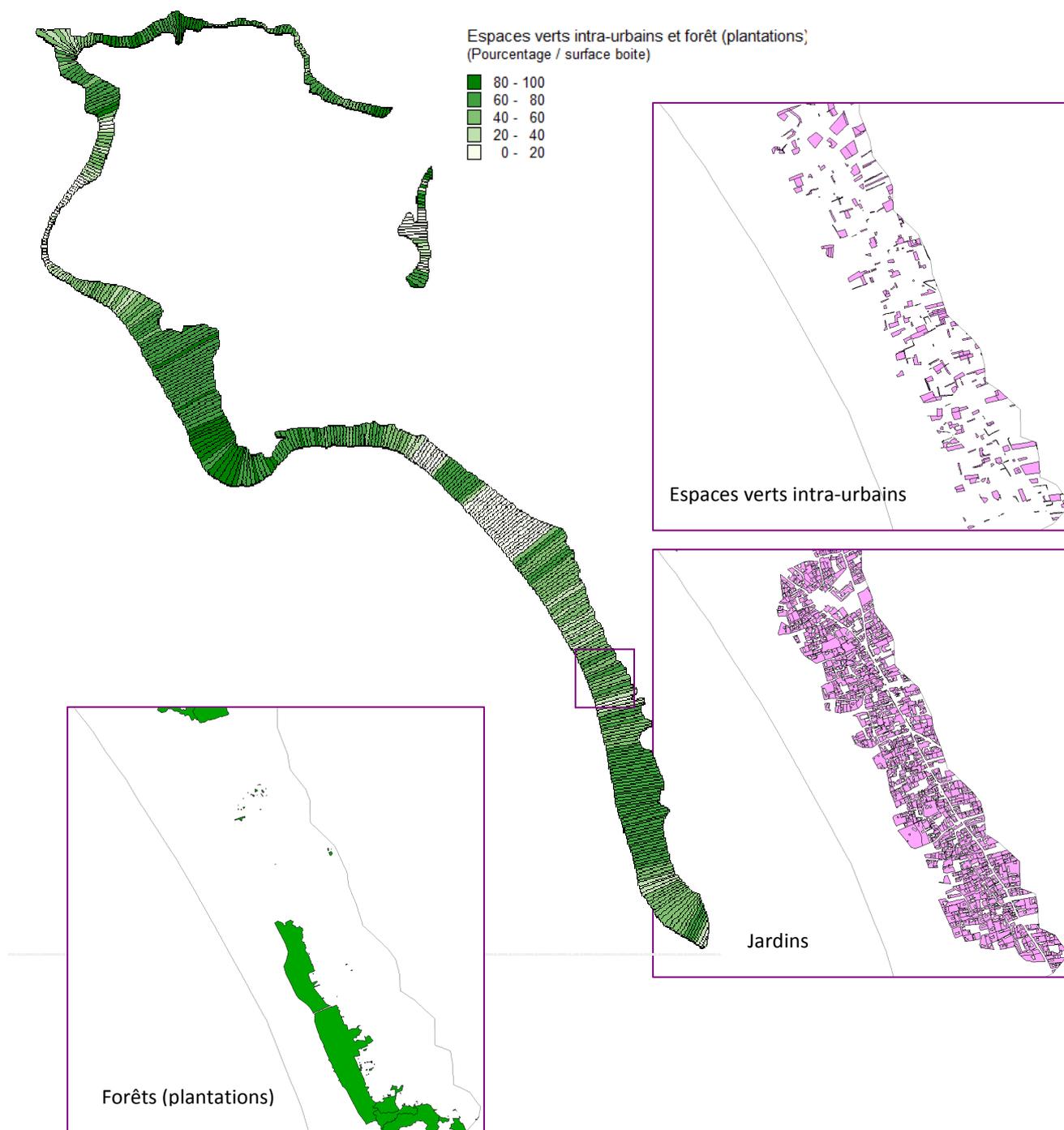
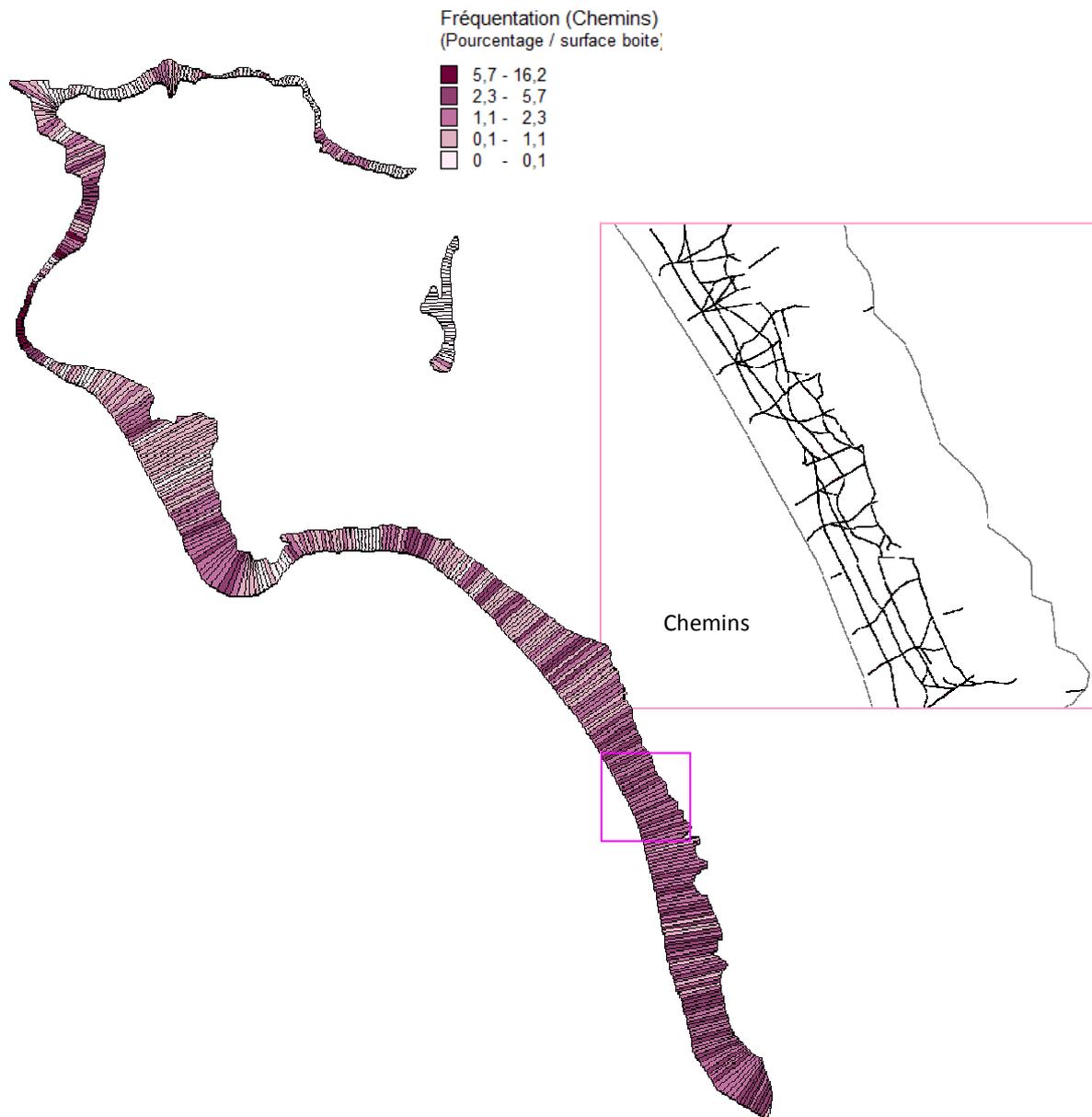


Figure 16 : Type A3



La base de données construite intègre les informations recueillies et traitées en vue de la caractérisation de la variable naturalité. On dispose ainsi d'une information objective, précise localisée et quantifiée 1) à l'échelle de l'objet élémentaire et 2) à l'échelle du massif dunaire (intégration de l'information dans les boîtes). Il est ainsi possible de répondre à différentes questions relatives à l'état de conservation de l'écosystème : 1) **où** ? s'exercent les pressions anthropiques 2) **combien** ? dans quelle mesure ? par le calcul des surfaces affectées et enfin 3) **comment** ? c'est-à-dire, quelle est la nature de ces pressions (Fig. 17) ? Les plus durables (les surfaces recouvertes artificiellement, comme les surfaces bâties) conduisent à une réaffectation complète de l'écosystème, et à la perte de ses caractères naturels (en termes de composition et de fonctionnement). Ecosystème détruit, transformé, dégradé ou simplement perturbé, selon les

diverses modalités de l'anthropisation, il est ainsi possible de classer finement les unités de territoire observées.

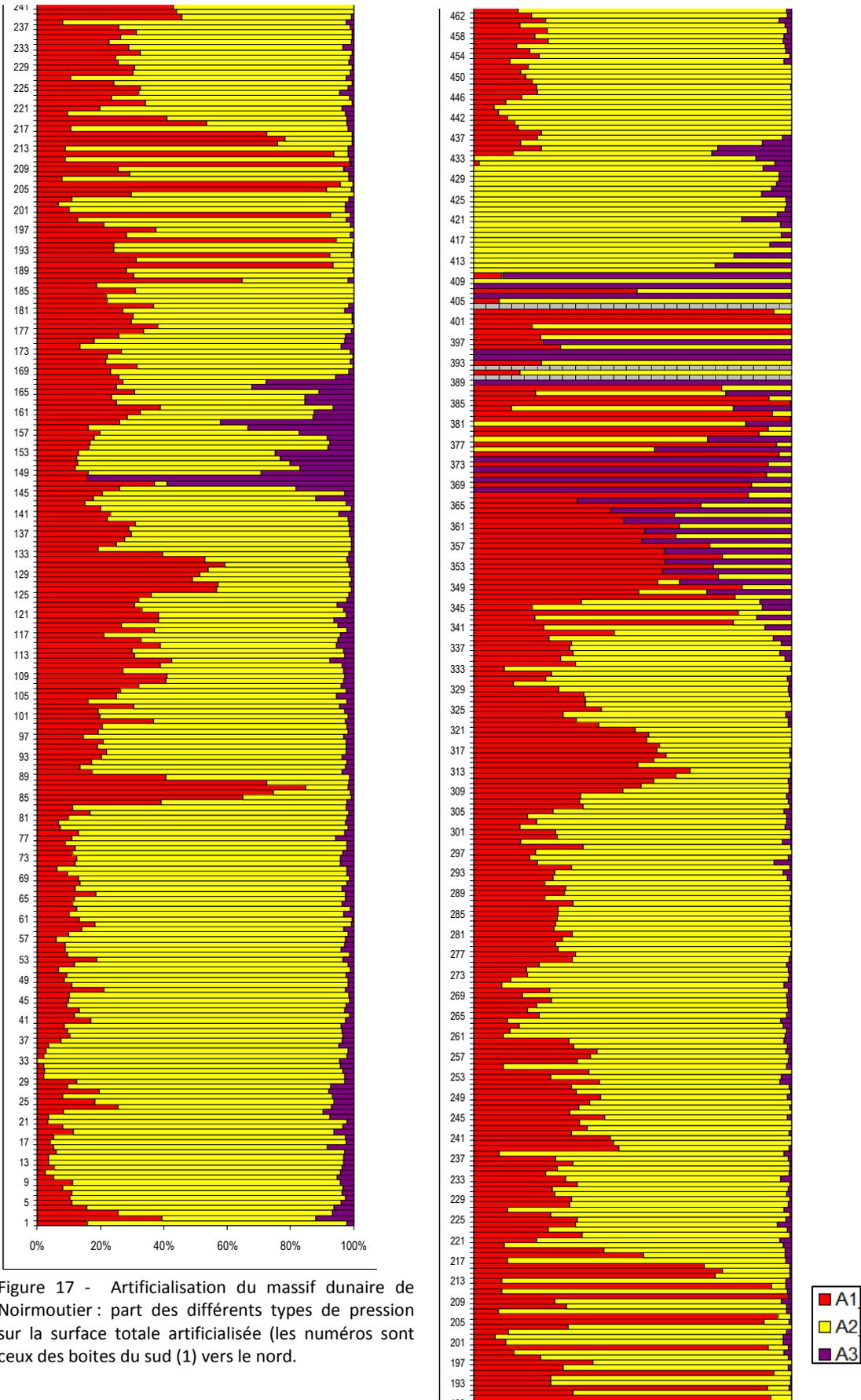


Figure 17 - Artificialisation du massif dunaire de Noirmoutier : part des différents types de pression sur la surface totale artificialisée (les numéros sont ceux des boîtes du sud (1) vers le nord).

L'addition des différents types d'artificialisation (somme des surfaces affectées tous types confondus représentée en valeur brute ou rapportée à la surface de la boîte) met en évidence un gradient de naturalité. Il est bien sûr possible de donner un poids différent à chaque type. La figure ci-dessous met en évidence deux secteurs à forte naturalité relative celui de Luzéronde au nord et de la Tresson au centre-sud de l'île. Nous avons mené l'analyse de la variable Biodiversité sur ce dernier secteur. Mais il serait également intéressant sur le plan scientifique d'inverser la représentation et de s'intéresser aux caractères de la biodiversité des espaces fortement artificialisés afin de préciser l'impact de ces différentes pressions sur la végétation : quelle est par exemple la composition et la dynamique des îlots de dune grise qui subsistent au sein d'un espace fortement artificialisé ?

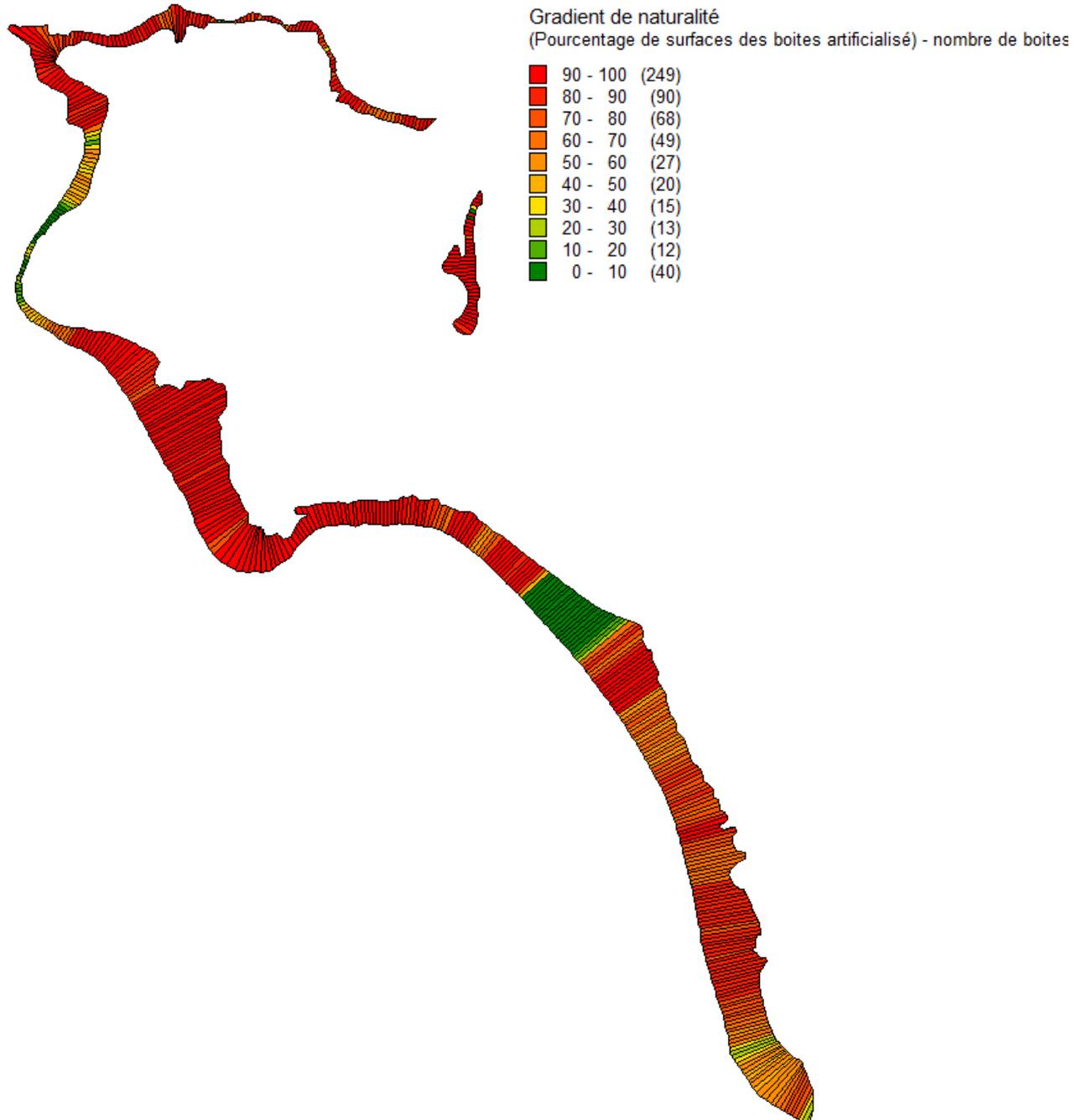


Figure 18 : Gradient de naturalité

2) Variable « Biodiversité »

Pour tester la méthode, nous avons choisi la dune de la Tresson, située sur les communes de Barbâtre et de la Guérinière. Propriété du Conseil Général de la Vendée, elle a été classée Espace Naturel Sensible en 2008. Le site est géré par le service des ENS du CG85. Ponctuellement, l'ONF intervient pour y effectuer des travaux.

Biodiversité – Niveau I – Variable Habitats

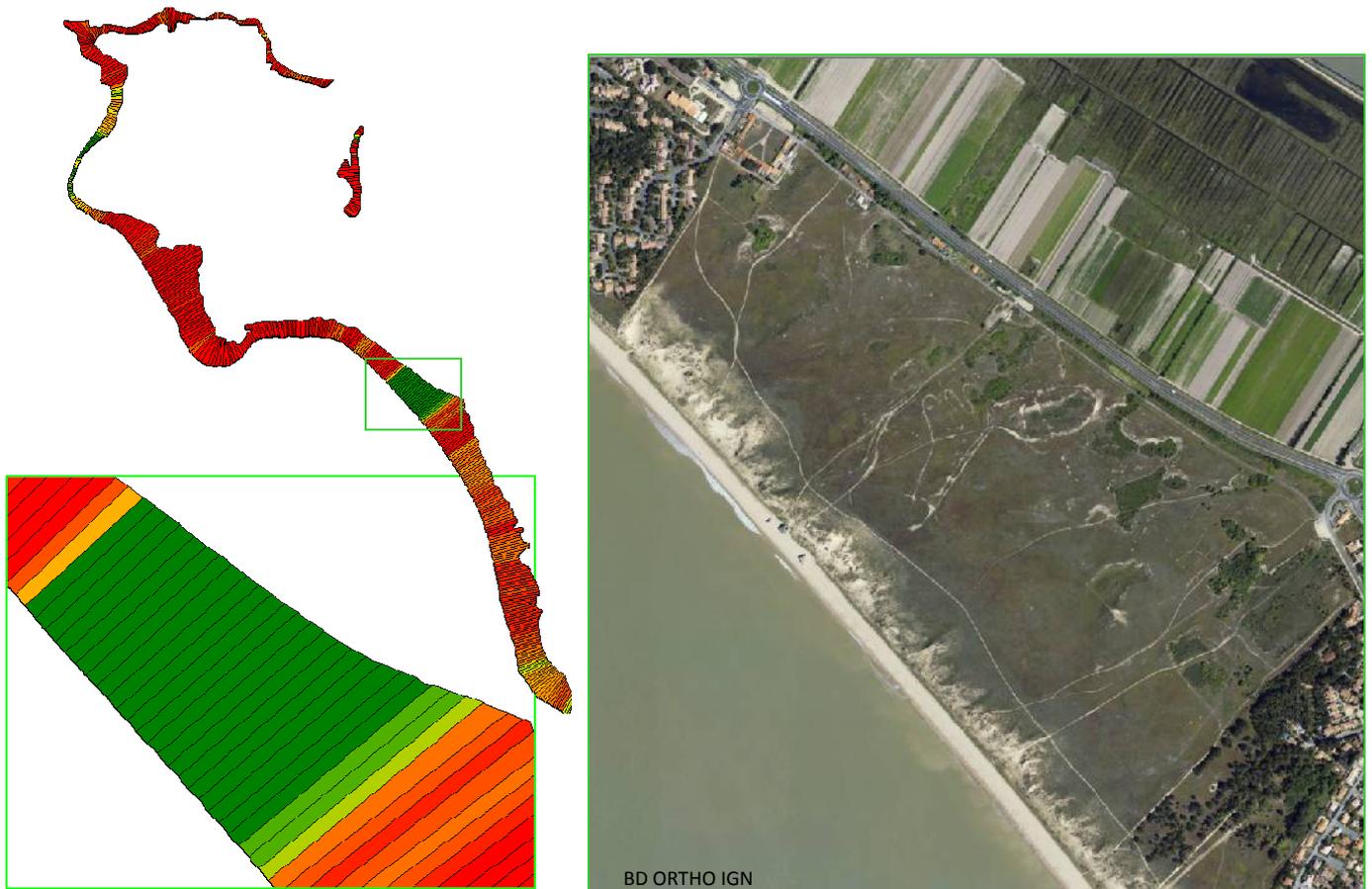


Figure 19 : La dune de la Tresson : un secteur à forte naturalité

1. Cartographie des habitats

Le premier niveau d'analyse de la biodiversité repose sur la cartographie des habitats. La tâche est très complexe, raison pour laquelle très peu de méthodes reproductibles sont actuellement disponibles. La principale difficulté tient à la nécessité de tracer des limites là où il y a un continuum. Il s'agit donc de trouver quelles sont les variables discriminantes pour caractériser chaque type.



Figure 20 : La dune à *Salix repens*

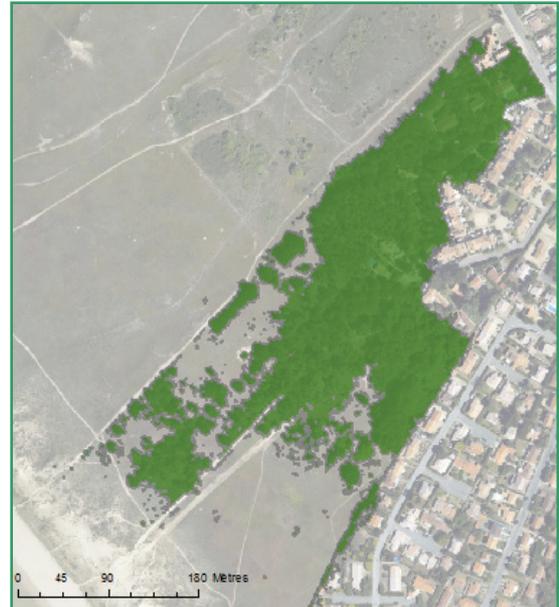


Figure 21 : La Dune boisée



Figure 22 : La dune fixée (dune grise)



Figure 23 : L'ourlet

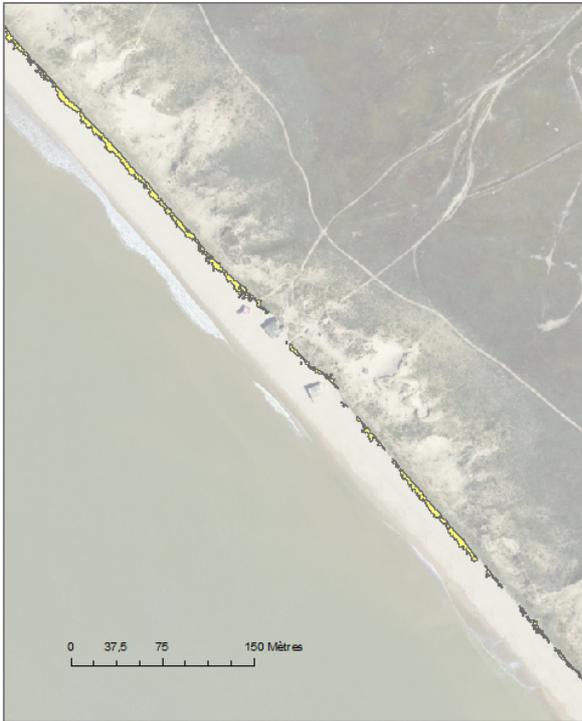


Figure 24 : Dune embryonnaire



Figure 25 : Dune mobile

La délimitation des habitats apporte des réponses quantifiées à la question de leur surface et de l'évolution de cette surface dans le temps. L'intégration de cette information dans les boîtes permet diverses représentations et comparaisons. La figure 26 représente ainsi la surface de chaque habitat rapportée à la surface de chaque boîte.

La surface n'est pas le seul critère d'évaluation de bon état, le nombre d'habitats, la diversité des habitats, la proportion relative de chacun d'eux au sein de la dune témoignent de la diversité des conditions écologiques, des réponses de la végétation et du fonctionnement de l'ensemble du système. La diversité des habitats au sein d'un site devient ainsi grâce à cette méthode un paramètre quantifiable et comparable d'un site à un autre, d'un massif dunaire à un autre.

La figure 27 : représente cette diversité : sous la forme d'un diagramme en barres empilées elle compare la contribution en pourcentage de chaque habitat par rapport à la surface totale des habitats identifiés (y) pour chaque boîte composant le site (x). On dispose ainsi du profil type de la dune de la Tresson qui peut être comparé à d'autres profils types sur l'île de Noirmoutier ou sur d'autres massifs dunaires du littoral atlantique. On peut ainsi caractériser la dynamique du système en comparant les profils d'un même site à plusieurs dates et ainsi mettre en évidence sa trajectoire.

2. Intégration de l'information habitat dans les boîtes

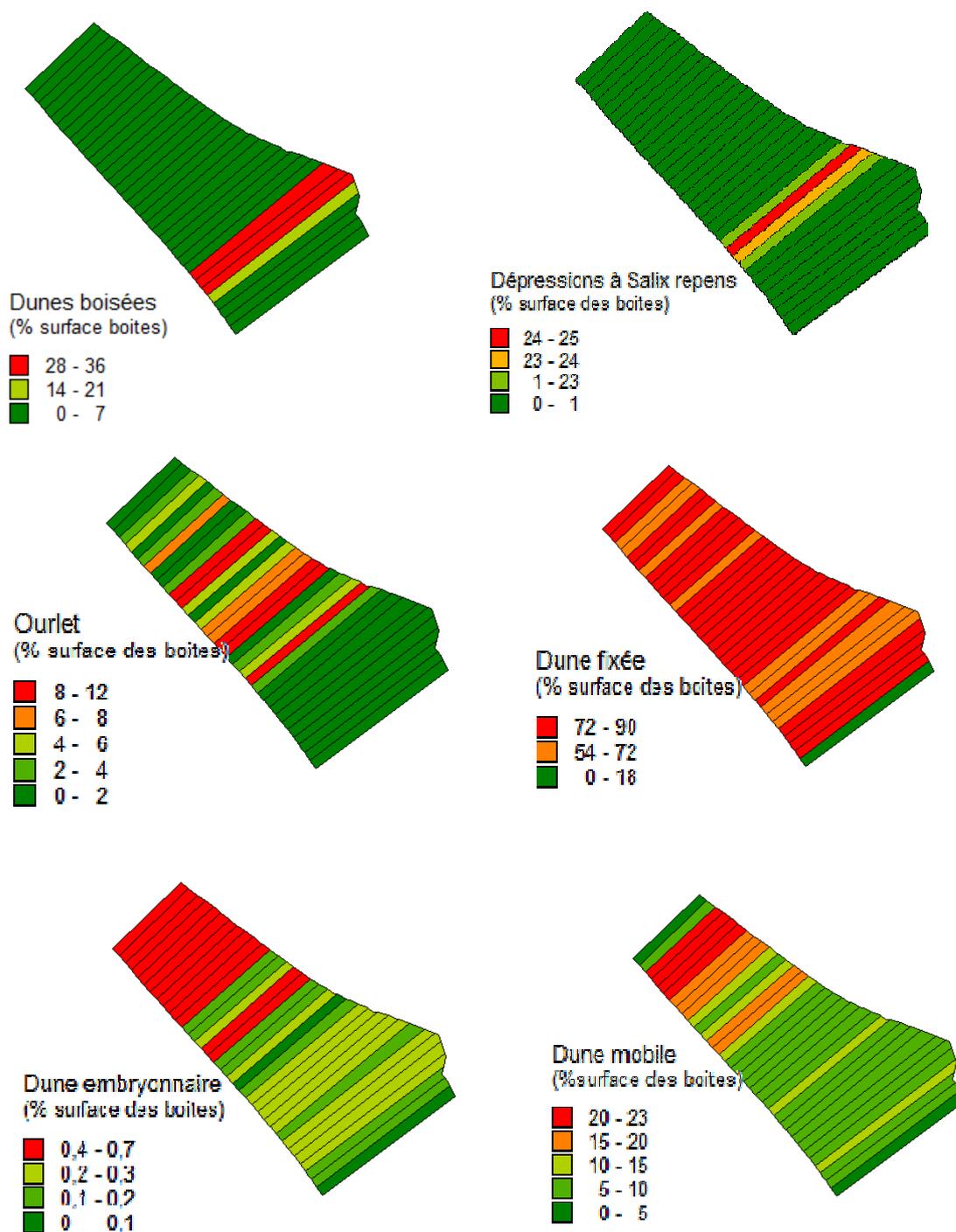


Figure 26 : Information « surface couverte par l'habitat » (en % de la surface de la boîte)

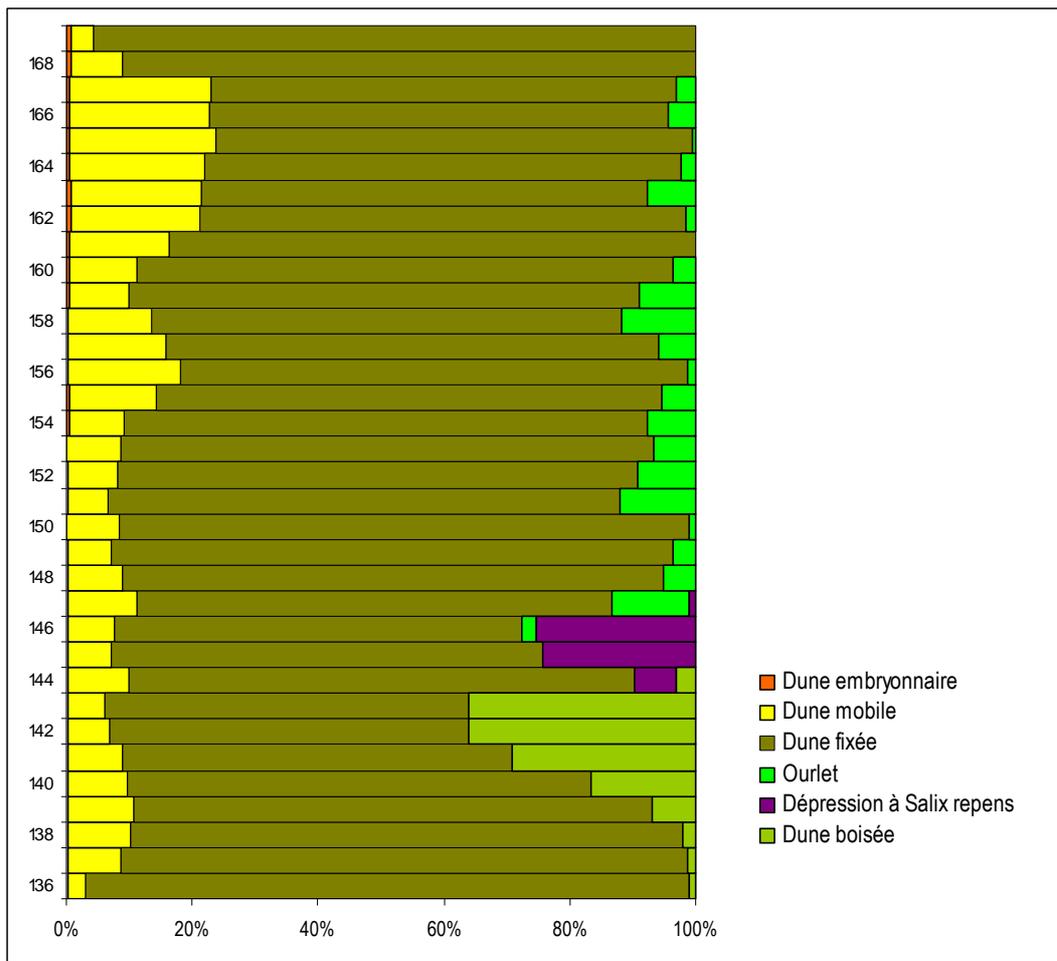
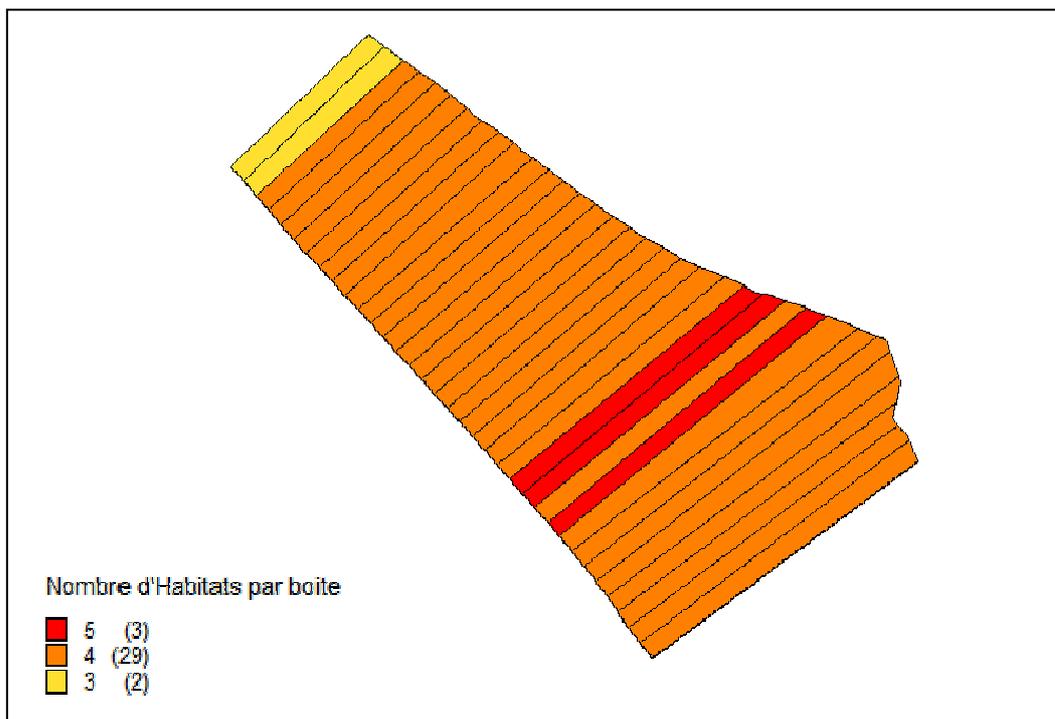


Figure 27 : "Profil" de la diversité de la dune au niveau Habitat



1. Faciès de Dune Mobile : cartographie et intégration dans les boîtes

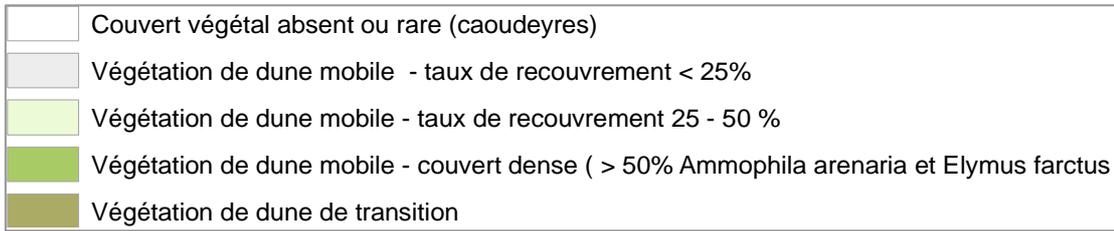


Figure 28 : Cartographie des faciès de dune mobile

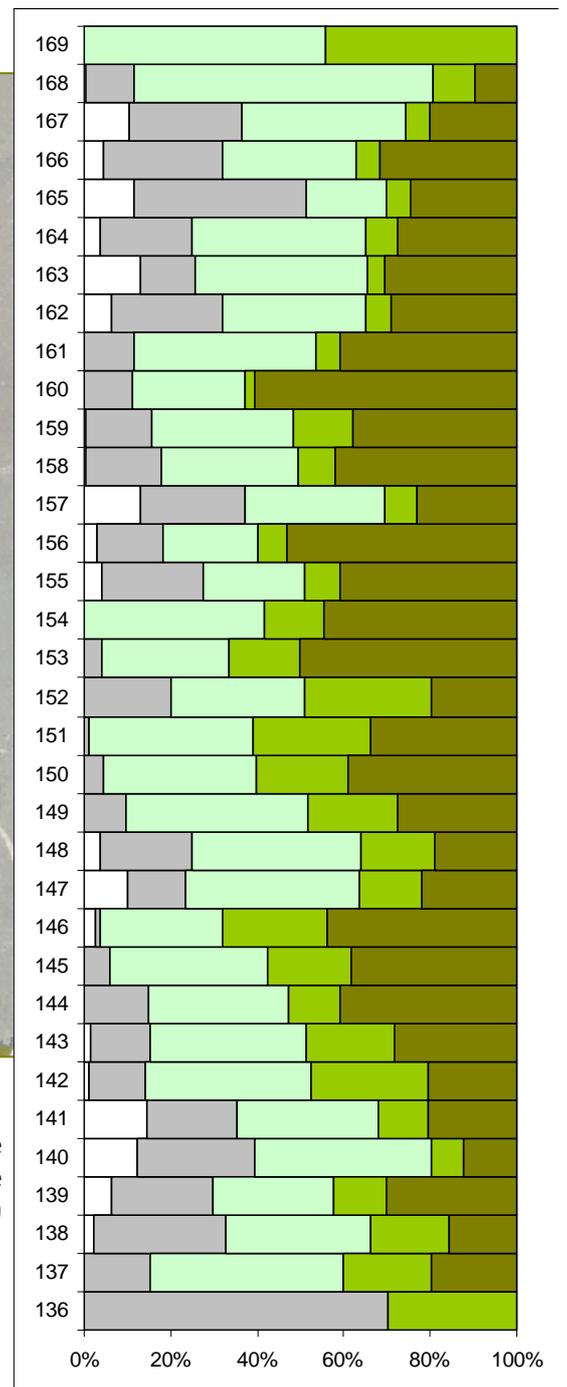


Figure 29 : Diversité des faciès de dune mobile (surface des faciès en % de la surface totale de l'habitat Dune Mobile)

2. Faciès de Dune Fixée : cartographie et intégration dans les boîtes

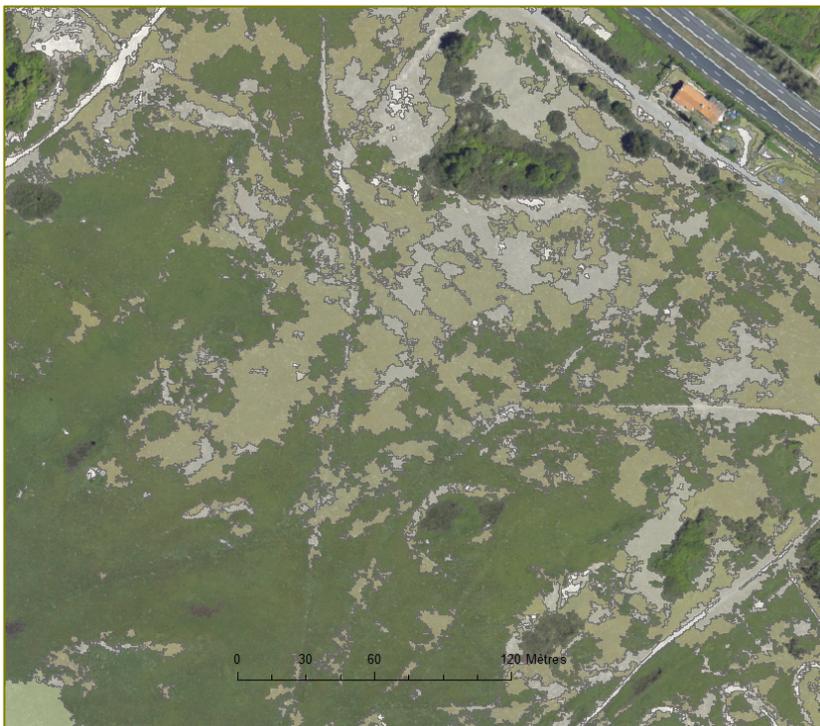
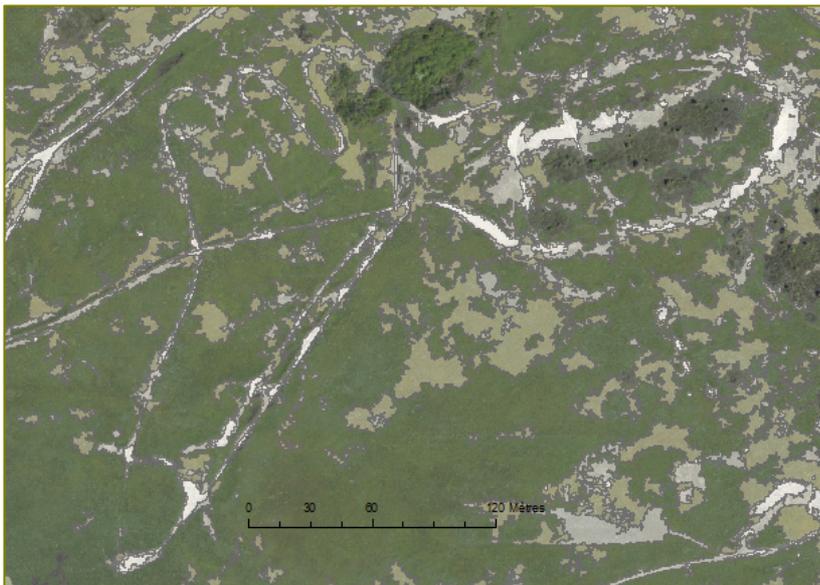
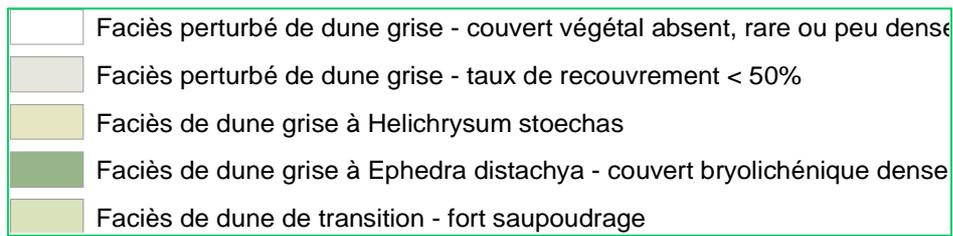


Figure 30 : Cartographie des faciès de dune fixée (dune grise)

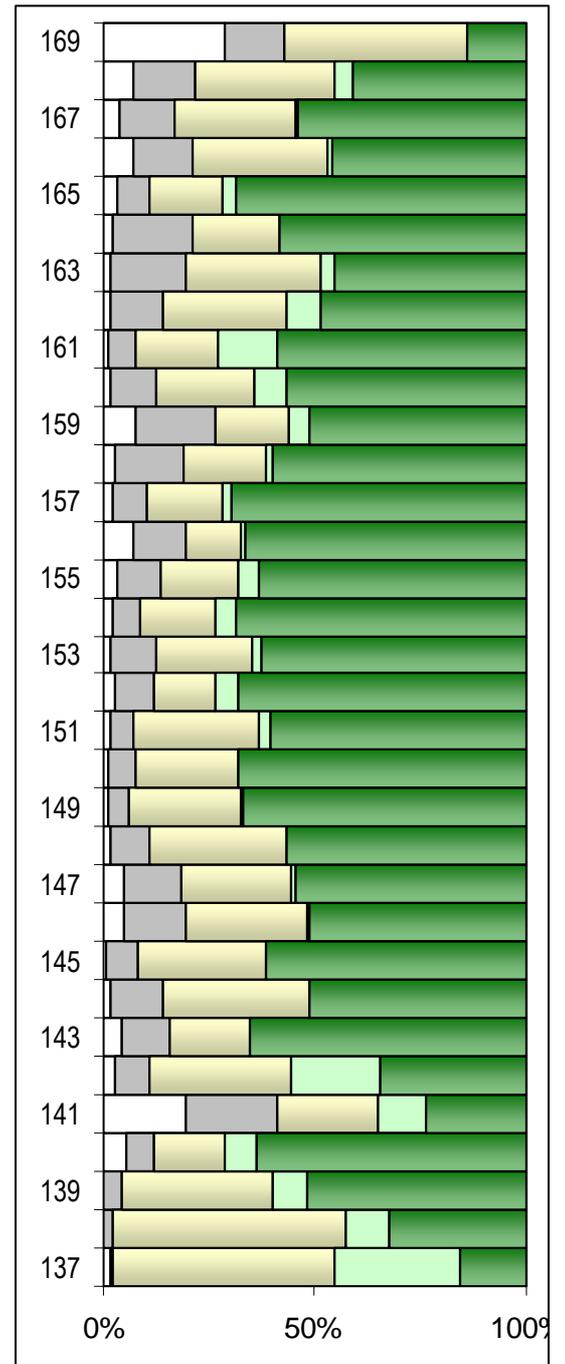
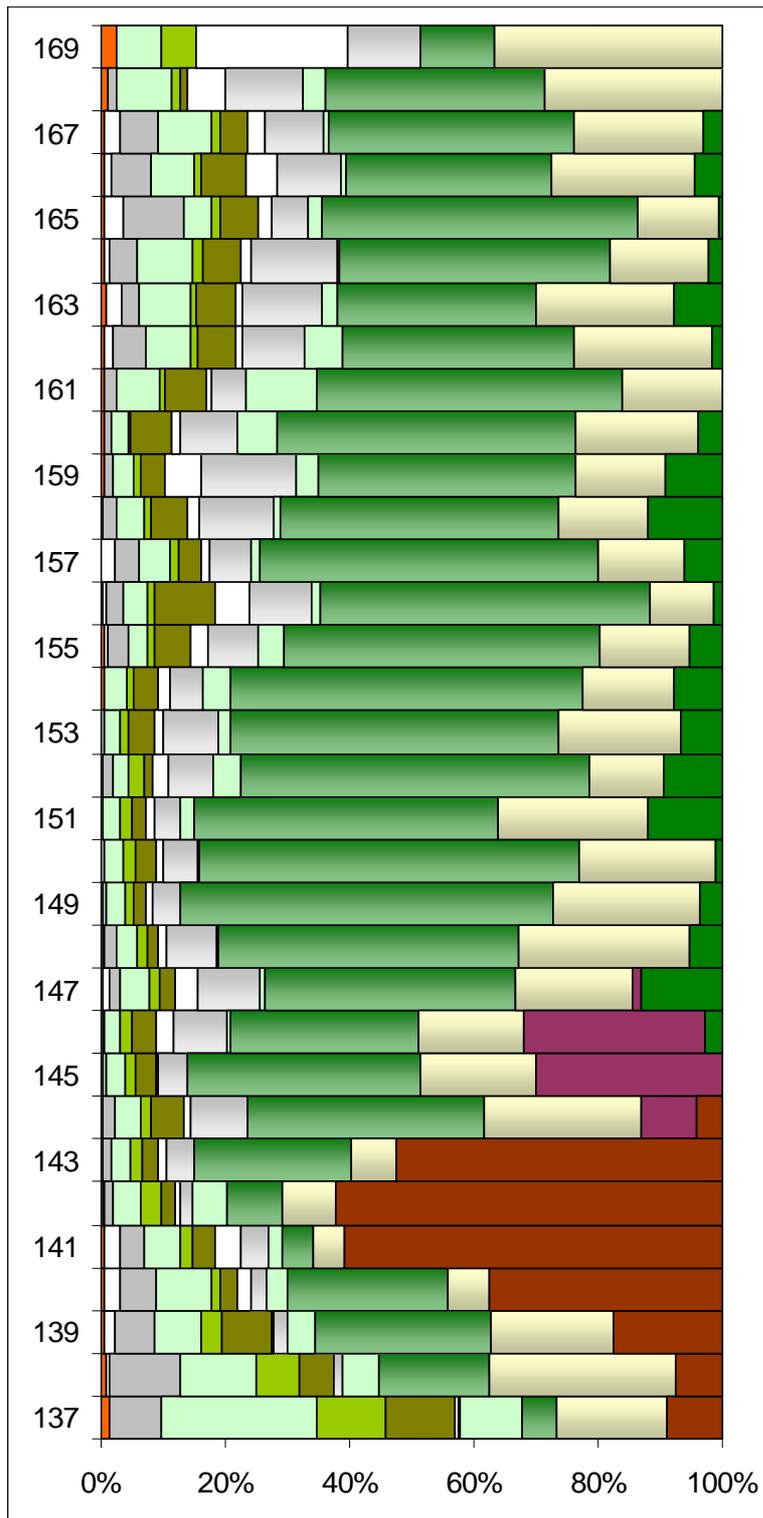


Figure 31 : Diversité des faciès de dune fixée (dune grise) : surface des faciès en % de la surface totale de l'habitat Dune fixée



Si le niveau Habitats est celui de l'évaluation à l'échelle du massif ou à l'échelle régionale et nationale, le niveau d'information Faciès est celui de la gestion, du diagnostic local et des actions. L'intérêt est de mettre en évidence et de mesurer de façon fine les faciès à surveiller (outil de gestion) mais surtout la cartographie permet de mieux cerner les interrelations spatiales entre les différents faciès (mosaïque intra-habitat) et d'anticiper l'impact de telle ou telle pression et de telle ou telle action de gestion (outil de connaissance du fonctionnement du système). La figure 32 présente le profil Diversité de la dune de la Tresson au niveau Faciès pour les dunes mobile et fixée et au niveau Habitat pour la dune embryonnaire, les fourrés et bosquets qui composent l'ourlet, la dépression à *Salix repens* et la dune boisée. On peut en déduire la composition précise et quantifiée de la mosaïque intradunaire, visualiser le degré d'hétérogénéité de la structure et apporter des éléments de réflexion à l'analyse des relations entre diversité et état de conservation : l'hétérogénéité doit-elle être favorisée ? Dans quels cas est-elle au contraire synonyme de fragmentation et indique un état dégradé ? Quelle est la part des facteurs naturels et anthropiques dans cette mosaïque ? À quel niveau et où intervenir ?

Figure 32 : Diversité du site de la Tresson (surface des faciès en % de la surface totale des habitats Dune embryonnaire (orange), Dune mobile, Dune fixée, Dépression à *Salix repens* (violet), Ourlet (vert foncé), Dune boisée (marron))

1) les espèces rares ou menacées

Un certain nombre d'espèces patrimoniales sont suivies par les gestionnaires. Cette information sous forme de relevés ou d'observation présence / absence de l'espèce devra être formalisée pour être intégrée dans la base de données Multidune au même niveau de couverture spatiale, en d'autres termes cette donnée doit être connue de façon continue, pour contribuer au diagnostic et enrichir la

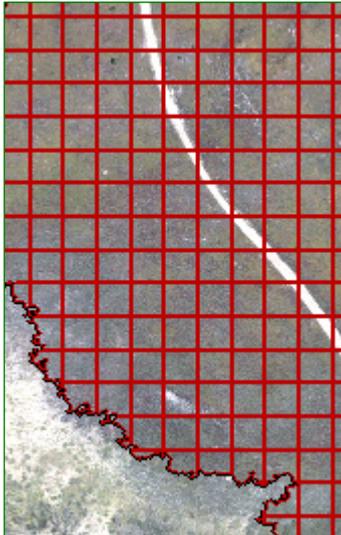


Figure 33 : Segmentation de l'habitat dune grise (extrait) en mailles carrées de 100 m²

connaissance sur les populations d'espèces. Nous préconisons des relevés systématiques selon une maille d'échantillonnage à définir en fonction du type d'espèce et de la taille de l'habitat. Il s'agit de segmenter l'image selon une maille carrée en s'appuyant sur les segmentations aux niveaux supérieurs (habitat ou faciès en fonction de l'aire de répartition de l'espèce). La figure 33 montre la segmentation d'un secteur de l'habitat dune grise en mailles carrées de 100 m². Chaque cellule est un sous-objet emboîté dans les niveaux précédents, il peut ou non être renseigné avec l'information présence/absence de telle ou telle espèce. L'avantage est double : les espaces observés sont précisément délimités, le vide de la carte quand il indique l'absence de données devant être différencié du vide qui indique l'absence de la plante. Par ailleurs, la résolution de l'information est homogène sur l'ensemble du territoire potentiellement couvert par la plante. Le suivi peut être ainsi quantifié.

La même méthode peut être utilisée pour la cartographie et la quantification des espèces invasives.

2) Le Pin maritime

L'enrésinement est la présence de résineux sur les dunes grises. Comme on l'a dit plus haut, la dissémination naturelle du Pin maritime notamment à partir des peuplements de la dune boisée constitue un risque de dégradation des propriétés de la dune grise dont l'enjeu en matière de conservation est considéré comme majeur (Habitat prioritaire au sens de la Directive européenne Habitats) : dégradation par modification des sols, simplification de l'habitat et à terme, succession, modification du paysage, uniformisation, perte des caractères originaux du paysage de dune grise.

Nous illustrons la méthode par l'exemple de la Pointe d'Arçay (La Faute-sur-Mer, 85), réserve de Chasse et de Faune sauvage dont un des enjeux majeurs est la conservation de sa biodiversité.

Nous avons réalisé la cartographie du couvert de pins maritimes sur la dune grise à partir de la photographie aérienne de 2006 (BD ORTHO IGN) et réalisé une étude diachronique de l'évolution de l'enrésinement depuis 1945 à partir de photographies aériennes anciennes, que nous avons numérisées puis corrigées en géométrie. Ce document ainsi que les données dérivées de la cartographie sont intégrés au Plan de Gestion élaboré par l'ONF, gestionnaire de la Réserve.

Figure 34 : La pointe d'Arçay : évolution du couvert de Pins maritimes 1945-2006



Conception et réalisation : Françoise Debaine, Université de Nantes - UMR 6554 Géolittomer

Année d'observation / mesure (d'après les photographies aériennes)	Extension nette de la surface terrestre mesurée / date (ha)	Extension cumulée de la surface terrestre entre limite du boisement en 1945 et TC /date (ha)	Extension nette de la surface couverte par les Pins au-delà de la limite du boisement en 1945 / date (ha)	Extension cumulée de la surface couverte par les Pins au-delà de la limite du boisement en 1945 / date (ha)
1945	0	12.1	0	0
1987	7.4	19.5	2.7	2.7
2006	16.5	36	2.3	5

La cartographie des modalités de l'avancée du Pin sur la dune grise et la quantification du phénomène - surfaces de dune grise affectées et rythme d'évolution, permettent de fonder les actions de gestion sur des données objectives et de les moduler spatialement en fonction de l'ampleur du risque.

	Progression surfaces couvertes par les pins m ² /an
Période 1945-1987 (42 ans)	642
Période 1987-2006 (19 ans)	1210.5

4. Conclusion générale et perspectives

Les divers objectifs du programme Multidune ont été en grande partie atteints :

Sur le plan de l'exhaustivité de la démarche, une proposition méthodologique pour un diagnostic opérationnel de l'état des dunes littorales atlantiques au regard des services rendus par cet écosystème a été formulée et validée. Qu'il s'agisse du service Protection contre les aléas météorologiques ou du Service Biodiversité, l'approche par unité spatiale a permis de lever les problèmes sur lesquels butaient nombres de démarches antérieures, et de proposer une solution simple pour spatialiser des interactions complexes, effectuer des comparaisons entre différents espaces, pour créer de la statistique à une échelle unique, pour rendre possible l'intégration scalaire et ainsi adapter l'information à la demande en respectant des critères de reproductibilité, de généralité et donc d'harmonisation sémantique.

Le système Multidune ne se veut en aucun cas un système figé, et un outil de décision rigide, mais plutôt un terrain d'expérimentation qui allie recherche scientifique et développement opérationnel. La recherche méthodologique pour l'évaluation du service Protection et pour celle du service Biodiversité ont été menées en parallèle pour prendre en compte les spécificités de chaque service. Mais l'approche n'est pas sectorielle -les deux démarches passent par l'agrégation de l'information dans les boîtes- ; au contraire, elle offre les bases d'une réflexion globale, multi-services, objective et spatialisée à partir de l'analyse quantifiée d'un certain nombre de critères choisis.

La conservation et la gestion des milieux naturels est une affaire de choix et repose sur une hiérarchisation des enjeux, qui évolue dans le temps. Nous n'avons pas voulu aboutir à la formulation d'une seule et unique valeur d'état, combinaison des valeurs des différents critères retenus. Délimitation des objectifs à long terme, mesure des enjeux, évaluation des effets des actions et mesures de gestion ou de conservation engagées, alerte sur des situations à risque, Multidune se positionne à ces différents stades de l'analyse et donne matière à réflexion.

La méthodologie mise en avant dans Multidune n'a pas encore à proprement parler fait l'objet d'un transfert vers la sphère décisionnelle dans la mesure où il a été nécessaire de raffiner précisément les divers protocoles complexes et d'arriver à faire émerger des solutions simples et facilement transférables. Ceci dit, les protocoles ont été discutés au cours des diverses réunions et des mises au point ont été effectuées sur le terrain.

Le temps accordé à la mise au point des divers protocoles a empêché son déploiement sur l'ensemble des sites initialement prévus. Il nous est apparu toutefois que ces sites relèvent d'une même variabilité systémique et qu'il faudrait mieux reproduire la méthode sur des dunes relevant d'autres bassins de risque (un site en Manche/Mer du nord, un site en Méditerranée par exemple, afin de prendre en compte la variabilité métropolitaine, voire de prendre en compte un site outre-mer).

Mutidune a donc jeté les bases d'une collaboration solide entre scientifiques et gestionnaires qui trouve déjà des prolongements dans divers programmes :

- Perspective 1 : l'ONF s'est associé à l'UMR 6554 LETG qui coordonne une réponse à l'appel d'offre de la Fondation de France 2012 « *Quels littoraux pour demain ?* » dont l'objectif est de poursuivre le programme Liteau Multidune et de développer un véritable outil informatique dédié à l'appréhension des niveaux de services rendus par les dunes. Ce programme s'intitule « *Outil de Diagnostic multiscalair du service protection DUNairE (Didune)* ».
- Perspective 2 : Mutidune se déploie dans le cadre l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts : elle offre un cadre à l'exploitation des données collectées.

- Enfin, Perspective 3, nous avons l'ambition de développer ce cadre d'analyse de l'information à un niveau national par l'intermédiaire du SOERE TC dans lequel l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts vient d'entrer.

5- Eléments de Valorisation

Les résultats scientifiques ont été validés tardivement et les premières valorisations dans des revues impactées devraient s'accélérer en 2013.

Publications

- ✓ DEBAINE F. and ROBIN M., 2012, A new GIS modelling of coastal dune protection services against physical coastal hazards, *Ocean & Coastal Management* 63 (2012) 43-54 doi:10.1016/j.ocecoaman.2012.03.012
- ✓ DEBAINE F. and ROBIN M., 2013 (soumis), Quantifying landscape-ecological succession using an Object Based image analysis and an integrated Spatial Unit system : towards a global decision support system for the coastal dune conservation. (Landscape and Urban Planning)
- ✓ DEBAINE F. and ROBIN M., 2013 (en préparation - soumission fin janvier 2013) : Méthodologie pour l'évaluation des services protection et biodiversité rendus par les dunes littorales : l'agrégation multiscalaire au sein d'unités spatiales de référence. Vertigo-revue électronique en sciences de l'environnement.
- ✓ DEBAINE F. et ROBIN M., 2013 (juin) : Etat des services rendus par un cordon dunaire (planche de l'Atlas Permanent de la Mer et du Littoral), à paraître en juin 2013.

Colloques / séminaires :

- 2008 – Colloque Liteau 2 et 3 – Oléron ; participation F. Debaine et Loïc Gouguet (ONF).
- 2009 – Colloque Liteau – Montpellier ; participation F. Debaine - Poster
- Tournée MULTIDUNE aux Pays-bas et en Belgique (26-29 mai 2009). Comparaison problématiques de gestion et entrée scientifique en France / Pays Bas. Présentation du programme multidune auprès des gestionnaires des dunes (Agence Flamande Nature et Forêt, Instituut voor Natuur, Staatsbosbeheer, Amsterdam Water Supply). Visite de 6 sites, communication (mapping of atlantic Coastal Dunes conservation level for management taking into account several functions : coastal defence, biodiversity conservation, recreation and cultural value, F. Debaine (LETG), M. Robin (LETG), F. Rozé (ECOBIO), L. Gouguet (ONF), J. Favennec (ONF), and MC Pratt (EUCC).
- 2010 - Séminaire LETG « Géomatique et Occupation du sol » - Rennes, 30 mars 2010 – Cartographie des habitats dunaires atlantiques – F. Debaine, M. Robin, F. Rozé.
- 2010 – Assemblée Générale de l'Observatoire des Sciences de l'Univers Nantes-Atlantique (INSU – CNRS) – présentation du programme multidune – F. Debaine et M. Robin 30 novembre 2010 – Nantes.
- 2011 – Colloque Liteau Bordeaux F. Debaine, M. Robin.
- 2011 – Journée des observatoires du Trait de Côte, Paris - Poster Observatoire du littoral des Pays de Monts, participation du groupe Multidune.

- 2012 (4-5 avril) Journée EUCC France (*European Union for Coastal Conservation*) : restitution du programme avec atelier et visite terrain (70 participants).



Rapports divers :

- ✓ SELLIN Vanessa, 2008, *Contribution à la cartographie de l'état des dunes littorales atlantiques*, Master 2 pro « Cartographie et Gestion des Espaces à Fortes contraintes, Université de Nantes (resp. F. Debaine).
- ✓ DEBAINE Françoise, 2009, *Aide à la gestion multifonctionnelle des dunes littorales atlantiques par l'évaluation cartographiée de leur état de conservation*, Rapport intermédiaire, 15 octobre 2009, 24 p.
- ✓ RAMONT Nicolas, 2010 : *Caractérisation du service de protection du cordon dunaire domanial en centre-Atlantique*, Master 2 pro « Cartographie et Gestion de l'Environnement », Université de Nantes (resp. Loïc Gouguet, ONF, et F. Debaine, Université de Nantes)
- ✓ JUIGNER Martin, 2011 : *Cinématique du trait de côte du Pays de monts de 1920 à 2009 (Vendée)*, Master 1 Recherche « Géographie et Aménagement des Territoires », Université de Nantes (resp. M. Robin et M. Maanan)
- ✓ Livret Guide des journées EUCC-France, 2012 (4 et 5 avril) : *Connaissance et gestion des dunes littorales / Risques d'érosion et de submersion*, Noirmoutier, 59 p.

6 - Suivi du programme

Multidune a été l'occasion d'une interaction constante entre la sphère scientifique et la sphère de la gestion avec notamment le partenaire principal : l'Office national des Forêts. Les nombreux déplacements sur le terrain ont permis des échanges fructueux autour de l'objet dune et une compréhension mutuelle de nos approches, méthodes, échelles de travail, et attentes. Nous nous sommes ainsi à plusieurs reprises retrouvés autour de questions particulières ou étapes du programme :

- Participation de F. Debaine et V. Sellin (stagiaire M2) à une tournée d'observation des dunes de Vendée organisée par l'ONF (J. Favennec, L. Gouguet et les techniciens chargés du suivi et de l'entretien des dunes) : dunes de Noirmoutier (10 mars 2008) et Dunes d'Olonne (12 mars 2008)
- La Pointe d'Arçay, Réserve de Chasse et de Faune sauvage (La Faute sur Mer, 85) : 27 juin 2008. Echanges sur le terrain : F. Debaine, F. Rozé, L. Gouguet, V. Sellin

- Suivi systématique du contact plage/dune,
- Caractères de la végétation,
- Comparaison avec d'autres pratiques en Europe à l'occasion de la tournée Multidune au Pays-Bas et en Belgique.
- Relevés de végétation : 10 jours de terrain pour effectuer des relevés de végétation sur les 4 sites d'étude en mai 2009. F. Rozé et F. Debaine.

En parallèle de ces nombreux échanges le comité de suivi du programme s'est réuni de façon plus formelle, régulièrement (F. Debaine, M. Robin, F. Rozé, J. Favennec, L. Gouguet, M.-C. Prat), très fréquemment la première année de façon à fixer les objectifs et les termes de la collaboration :

- 10 janvier 2008 à Nantes – Laboratoire Géolittomer – Lancement du programme
- 31 mars 2008 Noirmoutier (Réunion en salle et échanges sur le terrain) -Marie-Claire Prat (Directrice EUCC France), Jade Isidore (Conservatoire du Littoral), X. Lafon (Ministère Ecologie) et Y. Henocque (CS du programme Liteau)
- 12 juin 2008 Quiberon-Erdeven : réunion en salle et échanges sur le terrain en présence de : Jade Isidore, Emmanuelle ELOUARD (responsable Natura 2000 Quiberon-Plouharnel), Armelle HELOU (Syndicat Mixte Grand Site Gâvres Quiberon), Sylvie MAGNANON (Directrice scientifique Missions Conservatoire Botanique National de Brest)
- 16 décembre 2008 à Nantes – laboratoire Géolittomer- point sur l'état d'avancement du programme

Puis selon un rythme d'une réunion par an.

Autre réunion

Réunion de différents acteurs du littoral à l'initiative de l'ONF/CETMEF 2 juillet 2012 – ONF-Nantes. M. Robin, présentation du programme Multidune. (représentant des : MEDdE-DGPR, MAAF-BFTC,CETMEF, DREAL PdL, DREAL PC , ONF)

Bilan Financier

1. Données sources

- 1.1. Campagne télédétection hyperspectrale aéroportée (participation financière pour OSUNA)
10 000,00 €

2. Terrain

- 2.1. Observations avec les gestionnaires partenaires
- 2.2. Relevés de végétation (analyse phytosociologique)
- 2.3. Mesures spectrométriques (constitution d'une bibliothèque de spectres)
- 2.4. Contrôles post-traitement

3. Equipement en matériel de mesures et de traitement de l'information

3.1. Matériel informatique

- 3.1.1. 3 ordinateurs portables (6 300, 00 €)
- 3.1.2. Unités de stockage externes et petit matériel (677, 00 €)
- 3.1.3. Licences de logiciels de traitement d'images ou SIG (19 595,00 €)
 - 3.1.3.1. Licence Imagine pro 2 932,50 €
 - 3.1.3.2. Licence Ecognition server 5 075,00 €
 - 3.1.3.3. Licence ArcInfo + spatial analyst + 3D Analyst + maintenance
800,00 €
 - 3.1.3.4. Maintenance Licence ArcInfo + Spatial analyst + 3D analyst
725,00 €
 - 3.1.3.5. Envi + IDL + module corrections atmosphériques 3 971,00 €
 - 3.1.3.6. Definiens developper 4 017,00 €
 - 3.1.3.7. Ecognition server 5 075,00€

3.2. Spectroradiomètres de terrain

- 3.2.1. Spectroradiomètre Jaz 350-1000nm : 3 701.62 €
- 3.2.2. Spectroradiomètre NIR 900-1700 nm : 16 944.93 €
- 3.2.3. Fibres optiques et petit matériel - maintenance : 3582,00€

3.3. Appareil photo : 679,52 €

3.4. Drone photos à grande échelle

3.5. GPS

- 3.5.1. Colorado 500 : 570,51 €
- 3.5.2. Trimble Solution GPS GEOXH 60001 10 410,00 €
- 3.5.3. Maintenance GPS GEOXH 60001 et mises à jour logiciels
- 3.5.4. Trimpix Pro system + Carte Mémoire 8Go 195,50 €

3.6. Télémètre laser 662,00 €

4. Valorisation

4.1. Liteau

- 4.1.1. Oléron 2008
- 4.1.2. Montpellier 2009
- 4.1.3. Bordeaux 2011

4.2. Pays-Bas Belgique : échanges avec gestionnaires et scientifiques (2009 / 2010)

4.3. Atelier EUCC – France Noirmoutier 2012 : 2 570,00 €

4.4. Earth Emphasis 27,94 €

5. Stages 1 819,20 €

Table des figures

Figure 1 : Le massif dunaire de l'Île de Noirmoutier (85) d'après le référentiel géologique BRGM	11
Figure 2 : Boîtes ou unités d'observation (50*500m maximum) : intégration et spatialisation de l'information	12
Figure 3 : Evaluation cartographiée du service Protection	14
Figure 4 : Intégration de la variable « surfaces des caoudeyres » (cuvettes de déflation active) au sein des boîtes	15
Figure 5 : Evolution du trait de côte du Pays de Mont à divers pas de temps : intégration des valeurs calculées par le DSAS dans les boîtes (1950-1971 à gauche, 1971-2000 au milieu, 2000-2010 à droite)	29
Figure 6 : Surfaces cumulées au dessus de la cote GIEC sur 25m à partir du trait de côte à droite, surfaces de concavité prononcée du contact plage/dune au milieu, surface des fortes pentes du contact plage/dune à droite	30
Figure 7 : Noirmoutier : Divers schémas de distribution des bâtiments sur la dune caractérisés en fonction de leur distance au trait de côte	37
Figure 8 : Noirmoutier : diversité des situations en termes de fragmentation du milieu dunaire par les bâtiments (distance minimum des bâtiments au trait de côte par unité d'observation)	37
Figure 9 : Image aérienne hyperspectrale - Dune de la Tresson (Noirmoutier - Vendée) – 22/11/2009	39
Figure 10 : Signature spectrale de quelques espèces de mousses et lichens	40
Figure 11 : Relevés de végétation sur la dune de la Tresson (Noirmoutier)	41
Figure 12 : Observations sur le terrain pré et post traitements:localisation des points (Dune de la Tresson)	43
Figure 13 : Type A1 - surfaces recouvertes artificiellement	44
Figure 14 : Fragmentation du milieu dunaire par les bâtiments	45
Figure 15 : Type A2 - Espaces verts intra-urbains et forêts	46
Figure 16 : Type A3 - Fréquentation (chemins)	47
Figure 17 : Artificialisation du massif dunaire de Noirmoutier : part des différents types de pression sur la surface totale artificialisée	48
Figure 18 : Gradient de naturalité	49
Figure 19 : La dune de la Tresson : un secteur à forte naturalité	50
Figure 20 : La dune à <i>Salix repens</i>	51
Figure 21 : La Dune boisée	51
Figure 22 : La dune fixée	51
Figure 23 : L'ourlet	51
Figure 24 : Dune embryonnaire	52
Figure 25 : Dune mobile	52
Figure 26 : Information « surface couverte par l'habitat (en % de la surface de la boîte)	53
Figure 27 : "Profil" de la diversité de la dune au niveau Habitat	54
Figure 28 : Cartographie des faciès de dune mobile	55
Figure 29 : Diversité des faciès de dune mobile (surface des faciès en % de la surface totale de l'habitat Dune Mobile)	55
Figure 30 : Cartographie des faciès de dune fixée (dune grise)	56
Figure 31 : Diversité des faciès de dune fixée (dune grise) : surface des faciès en % de la surface totale de l'habitat Dune fixée	56
Figure 32 : Diversité du site de la Tresson (surface des faciès en % de la surface totale des habitats Dune embryonnaire (orange), Dune mobile, Dune fixée, Dépression à <i>Salix repens</i> (violet), Ourlet (vert foncé), Dune boisée (marron)	57
Figure 33 : Segmentation de l'habitat dune grise (extrait) en mailles carrées de 100 m ²	58
Figure 34 : La pointe d'Arcay : évolution du couvert de Pins maritimes 1945-2006	59