

ÉTAT DES LIEUX DES DUNES DOMANIALES

En vue d'une adaptation des stratégies de gestion au changement climatique

Mathilde CHIARADIA

Le rapport initial, intitulé « État des lieux des dunes domaniales, en vue d'une adaptation des stratégies de gestion au changement climatique », plus explicite et détaillé sur la méthodologie utilisée et les résultats obtenus, est disponible à la diffusion sur demande (mathilde.chiaradia@gmail.com). Il a été réalisé dans le cadre d'un stage de fin d'études au sein du département des risques naturels de l'Office national des forêts.

RÉSUMÉ

Les dunes littorales sont des milieux naturels complexes et évolutifs, modelés par les actions humaines. Les effets du changement climatique sont susceptibles d'accélérer les processus d'évolution tels que les érosions marines et éoliennes. Soucieux d'y répondre par une gestion locale adaptée, les gestionnaires de l'Office national des forêts (ONF) ont souhaité disposer d'un état des lieux de l'ensemble des dunes domaniales selon les enjeux identifiés. Cette étude expose à la fois les caractéristiques morphologiques des dunes, les aléas littoraux auxquelles elles sont confrontées et les enjeux anthropiques et naturels qu'elles représentent. Les critères de description, sélectionnés selon leur pertinence pour représenter l'état et les évolutions des dunes, ont été analysés à l'aide de données externes et internes disponibles sur l'ensemble du domaine géré par l'ONF, du Finistère au sud des Landes. Afin de synthétiser les résultats qualitatifs de cet état des lieux, la création d'indices de sensibilité a mené à une définition de grands types de dunes domaniales. Une majorité de dunes relativement étroites et basses, modérément exposées aux aléas et concernées par des enjeux socio-économiques sont observées de la Bretagne à la Charente-Maritime. Elles sont distinguées des dunes larges et hautes, sans artificialisation majeure observées en Gironde et dans les Landes. La typologie obtenue est conforme à la réalité du terrain et illustre synthétiquement la grande diversité des dunes domaniales. Elle peut être enrichie par une acquisition de données plus fines issues de méthodes de télédétection spatiale ou aérienne.

Mots-clés : dunes littorales, gestion des milieux dunaires, aléas littoraux, changement climatique, littoral, indicateurs, typologie.

ABSTRACT

Coastal dunes are complex and evolving natural environments, shaped by human actions. The effects of climate change are likely to accelerate evolutionary processes such as marine and wind erosion. To respond to these issues through appropriate local management, the managers of the Office National des Forêts (French National Forestry Office) would like to have an inventory of all the state-owned dunes, which was carried out in this study. It presents the morphological characteristics of the dunes as well as the coastal hazards and the anthropic and natural challenges they face. The description criteria, selected according to their relevance to represent the state and evolution of the dunes, were analysed using external and internal data available from Finistère to the south of the Landes. To synthesize the qualitative results of this inventory, the creation of sensitivity indices led to a definition of four main types of state dunes. Relatively narrow and low dunes, moderately exposed to hazards and concerned by anthropic issues are observed from Brittany to Charente-Maritime. They are distinguished from wide and high dunes, without major artificialization observed in Gironde and Landes. This typology is in accordance with the reality of the field and illustrates synthetically the great diversity of state-owned dunes. It can be enriched by acquiring finer data from space or airborne remote sensing methods.

Keywords : coastal dunes, management of dune environments, coastal hazards, climate change, coastline, indicators, typology.

INTRODUCTION

Les dunes littorales sont des accumulations sableuses éoliennes, généralement parallèles à la côte. Elles sont sculptées par les dynamiques marines (vagues et courants) et éoliennes, et fixées par la végétation (Paskoff 1994). Elles forment un écosystème remarquable accueillant des espèces endémiques et adaptées aux conditions particulières de ce milieu. Les dunes littorales françaises sont très diversifiées à la fois régionalement selon les conditions de formation et d'évolution, mais aussi plus localement selon la présence, l'absence ou la largeur des différents compartiments dunaires. Ceux-ci se dessinent de la côte vers l'intérieur des terres avec la présence de dune embryonnaire, de dune mobile (présence d'*Ammophila arenaria* ou oyat), de dune fixée par une végétation rase et dense (dune grise) ou encore de dune boisée (Gouguet 2018). Mobiles par essence, les dunes sont le support de dynamiques naturelles importantes rythmées par des jeux d'érosions éoliennes ou marines et d'accumulations.

En France et plus particulièrement sur la côte atlantique, la majorité de ces dunes littorales relèvent de la propriété de l'État. Leur gestion est menée par l'Office national des forêts (ONF) depuis 1964, dans le cadre d'une mission d'intérêt général confiée par le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. L'ONF gère ainsi 380 km de dunes littorales, en privilégiant depuis les années 1980 des méthodes de gestion dites de « contrôle souple ». Elles favorisent l'utilisation des processus naturels (piégeage du sable, dynamique végétale...) et la protection de la végétation dunaire en intégrant un accueil du public raisonné (Gouguet 2018). Cette gestion se veut adaptative à une échelle locale selon les événements : les actions de gestion vont de méthodes très naturelles de reconstruction dunaire, par exemple via l'accumulation de sable par des ganivelles, à des actions anthropiques plus imposantes comme des plantations d'Oyat ou une stabilisation renforcée. La stratégie de gestion est dite de libre évolution lorsque les interventions anthropiques sont absentes ou très limitées : la dune évolue au gré des dynamiques naturelles (Paskoff 2003). Ces méthodes de gestion visent notamment à améliorer leur résilience, c'est-à-dire leur « aptitude à revenir à l'état d'équilibre après une perturbation » (Dauphiné, Provitolo 2007). Bien que les érosions marines et éoliennes soient naturelles et fréquentes, elles sont susceptibles de participer aux aléas littoraux auxquels sont confrontées les dunes domaniales, selon leur intensité et leur fréquence.

CONTEXTE

Les dunes littorales sont concernées par trois aléas littoraux principaux : le recul du trait de côte, qui consiste en un déplacement de la limite entre le domaine marin et le domaine continental vers l'intérieur des terres (observable sur plusieurs décennies) (Gouguet 2018), l'aléa submersion marine qui correspond à des inondations pérennes de la zone côtière, provoquées par un franchissement par des paquets de mers, une rupture du cordon dunaire (brèche) ou enfin par un niveau d'eau extrême supérieur à la hauteur de la dune. Le troisième aléa concerne migration dunaire qui consiste en un déplacement de sable vers les terres (ensablement) lors de phénomènes de déflation intenses et pour des dunes non stabilisées par la végétation (ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie 2014). Ces différents aléas sont susceptibles d'évoluer avec le changement climatique, tant dans leur fréquence que dans leur intensité. Au vu des prévisions du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), une élévation du niveau de la mer de 44 à 76 cm d'ici 2100 sous un scénario intermédiaire d'émissions de CO₂ (SSP2-4.5) et jusqu'à 1 m pour le scénario pessimiste est prévue (IPCC 2021). Les analyses alertent sur la rapidité de l'élévation au cours des dernières années : alors que le taux d'élévation était de 1,3 mm/an entre 1901 et 1971, il a augmenté entre 1971 et 2006 avec une moyenne de 1,9 mm/an et a atteint un taux de 3,7 mm/an entre 2006 et 2018 (augmentation du taux sur des périodes plus courtes) (IPCC 2021). D'après G. Le Cozannet (2016), l'élévation du niveau de la mer semble favoriser le recul du trait de côte bien que les effets sont très divers selon les sites étudiés. Sa contribution au recul du trait de côte reste difficile à estimer, en raison de l'intervention de facteurs multiples (érosion directe, dérive littorale, couverture végétale, bilan sédimentaire) (Planton et al. 2015). L'élévation rapide du niveau de la mer va possiblement rendre les submersions temporaires plus fréquentes, voire les rendre permanentes (Le Cozannet et al. 2016). D'autres facteurs hydrodynamiques locaux (surcotes ou décotes marines) peuvent de plus exacerber ou modérer les tendances observées (Planton et al. 2015).

Les dunes littorales étant diverses du fait de leur taille, leur forme, de la végétation présente, mais aussi de leurs contextes naturels et anthropiques différents, les gestionnaires de l'ONF mènent une réflexion sur l'adaptation de la gestion des dunes à l'évolution de ces aléas littoraux et s'interrogent sur les modes de gestion à appliquer selon les différents types de dunes. En prévision de l'élaboration d'un plan de gestion stratégique des dunes domaniales, l'ONF, missionné par le ministère de l'Agriculture, souhaite donc établir un état des lieux national des dunes littorales domaniales en s'appuyant sur des données descriptives précises et objectives. Une première approche typologique est attendue. En France métropolitaine, il existe déjà des « modèles » de typologie de dunes, basés sur des critères plutôt morphologiques liés à la géographie de la zone et exclusivement descriptifs (dunes flamandes, atlantiques, méditerranéennes) (Paskoff 1996; Gouguet 2018). Une approche intégrant les enjeux anthropiques et naturels des dunes est effective dans des études locales (Favennec 1996; Battiau-Queney, Favennec 2015). Cependant, il n'existe actuellement pas d'état des lieux national des dunes françaises (domaniales ou non) intégrant leurs différentes caractéristiques propres ou indirectes (morphologie, aléas, enjeux anthropiques et naturels).

Cette étude répond donc au besoin de capitalisation et d'analyse de données concernant les dunes domaniales afin d'illustrer les possibles disparités et similitudes au sein du patrimoine dunaire géré par l'ONF. Cet article présente tout d'abord la méthodologie mise en œuvre pour la réalisation de l'état des lieux puis les résultats et leur synthèse, ainsi que les limites de ces travaux et les perspectives d'améliorations.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Démarche

L'état des lieux est segmenté selon différentes thématiques (morphologie, niveau d'exposition aux aléas, dominance des enjeux anthropiques et naturels) afin d'être le plus complet (**Figure 1**). Chacune d'entre elles est décrite finement à l'aide de plusieurs critères représentatifs, présentés ultérieurement. Afin de les synthétiser quantitativement, des indices de sensibilité ont été élaborés. Ils ont été inspirés des études bibliographiques évaluant la vulnérabilité des rivages aux aléas littoraux menées au Canada (Shaw et al. 1998), en Australie (Abuodha, Woodroffe 2010) ou encore des dunes méditerranéennes (Ciccarelli et al. 2017). Dans cette étude, il a été choisi de formaliser des indices de sensibilité permettant d'illustrer les disparités et les similitudes entre les différentes dunes domaniales selon quatre types de sensibilité, qu'elle soit morphologique, liée aux aléas, socio-économique ou encore environnementale. Ici, la notion de *sensibilité morphologique* peut être interprétée comme la prédisposition d'une dune à être résiliente à la suite d'événements ponctuels ou continus (érosions éoliennes et marines, submersions), selon ses dimensions (hauteur, largeur). La *sensibilité aux aléas* reflète quant à elle le degré d'exposition réelle ou supposée aux différents aléas littoraux. La *sensibilité socio-économique* et la *sensibilité environnementale* traduisent le niveau d'enjeux concernés par de possibles aléas (enjeux liés au bâti, aux ouvrages et enjeux liés à la biodiversité et la patrimonialité des habitats dunaires).

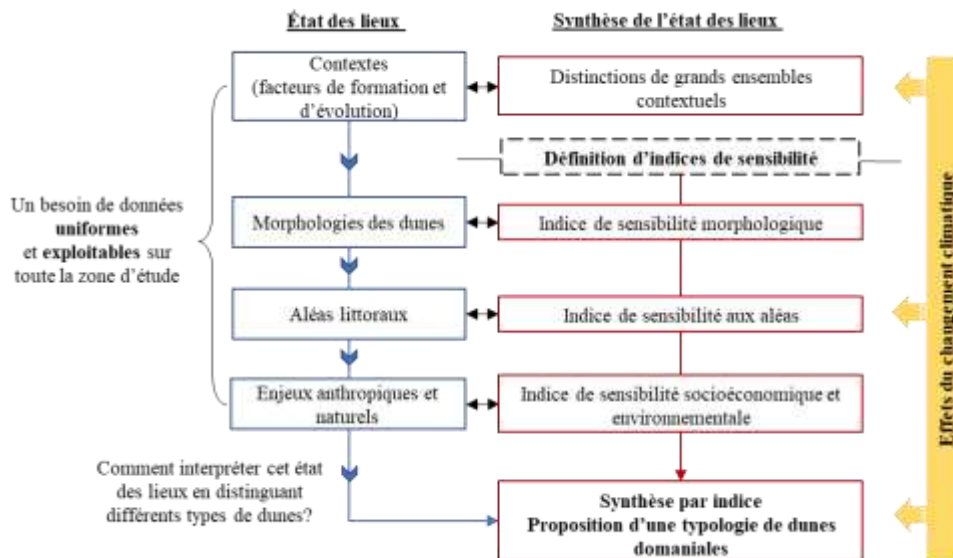


Figure 1. — Démarche d'élaboration d'un état des lieux synthétique des dunes domaniales.

Source : Mathilde Chiaradia.

Zone d'étude

L'ONF est gestionnaire de dunes domaniales situées sur la façade atlantique, auxquelles s'ajoutent les dunes de Santec (Finistère) et celles de Merlimont (Pas-de-Calais) situées toutes les deux sur la façade Manche. Ce dernier site étant très isolé par rapport aux autres et très bien étudié localement, il a été décidé de l'exclure de nos analyses cartographiques. La zone d'étude est donc délimitée par les dunes domaniales de « Santec » dans le Finistère nord (29) et le site des « Dunes du sud » à Tarnos dans les Landes (40), à la limite de l'embouchure de l'Adour. Un nombre de 26 sites dunaires administratifs est considéré pour l'étude (**Figure 2**). Afin de procéder à l'étude de la zone d'étude à une échelle fine mais synthétisable, celle-ci est segmentée en « boîtes dunaires ». Ces unités spatiales sont déjà utilisées dans certaines études de caractérisation du littoral (Juigner 2017; Juigner et al. 2021; Debaine et al. 2007). En effet, elles respectent la morphologie des lieux, leur orientation étant adaptée à la forme concave ou convexe de la côte et elles prennent en compte les différents faciès observables de la plage vers la forêt (dune blanche, dune grise, frange forestière). Déjà utilisées par l'ONF, les boîtes sont de bons outils d'analyse car l'intégration et la combinaison de tout type d'information géographique y est possible (linéaire, polygone, points), tout comme la visualisation d'éléments

dynamiques telles que les variations de position du trait de côte (Juigner 2017). Les dimensions des boîtes dunaires devant être adaptées au fonctionnement de la dune mais devant aussi minimiser la perte d'informations, une largeur commune de 500 m a été privilégiée. Cette dimension est convenable à une échelle locale pour estimer les évolutions sédimentaires mais aussi pour intégrer des observations de terrains dans des analyses ou des vérifications futures. La profondeur des boîtes est variable, conditionnée par la largeur comprise entre le trait de côte et la limite de l'unité de gestion dunaire (**Figure 3**). À l'arrière de celle-ci peut se trouver du foncier domanial faisant l'objet d'actions sylvicoles. Après un tri de nettoyage (orientation des transects, élimination ou fusion de compartiments), le nombre de boîtes dunaires ainsi créées s'élève à 662.

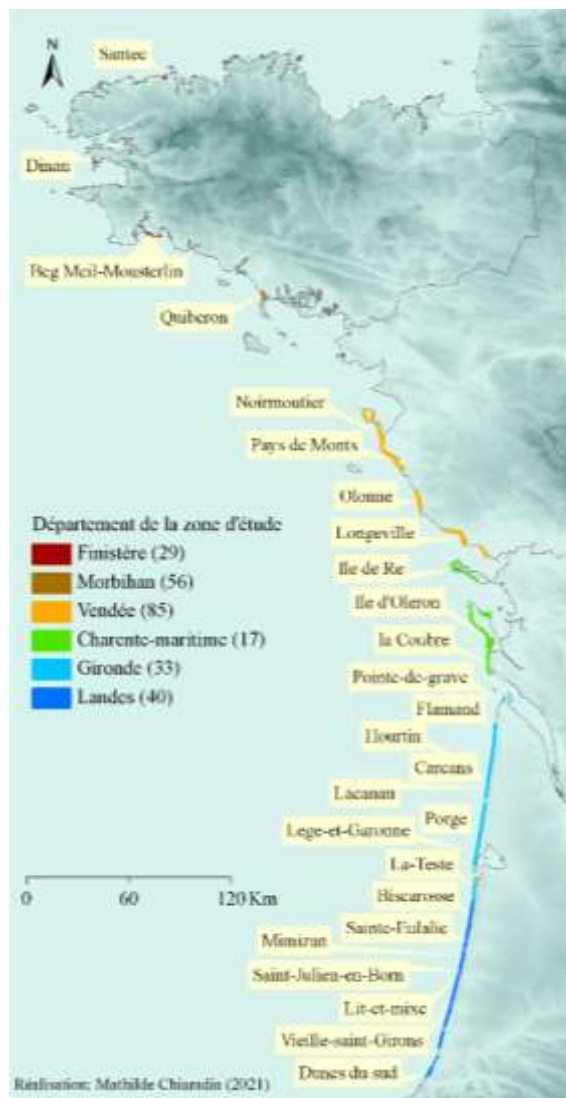


Figure 2. — Délimitation de la zone d'étude et nom des sites dunaires domaniaux considérés. Source : ONF. Réalisation : Mathilde Chiaradia.

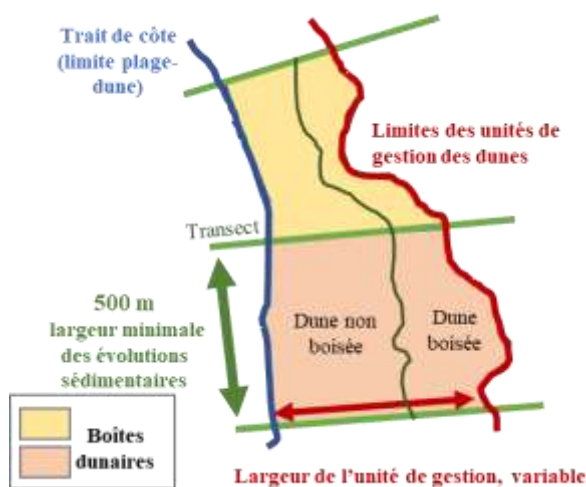


Figure 3. — Schéma de boîtes dunaires. Source : Mathilde Chiaradia.

Choix des critères et des données associées

Afin de décrire les dunes sur l'ensemble de la zone d'étude, plusieurs critères ont été sélectionnés. Ils sont issus de sources bibliographiques ou proposés à dire d'experts, et disponibles sur l'entièreté de la zone d'étude. Les critères utilisés dans les indices de sensibilité répondent à plusieurs conditions : ils doivent être spécifiques (représentation claire), mesurables (possibilité de les quantifier), réalisables (possibilité d'extraction), pertinents (par rapport à l'indicateur et à la problématique) et enfin temporels (disponibilité à un instant donné et pour des évolutions dans le temps) (Juigner 2017). Le choix des critères de description a été fortement influencé par la disponibilité et l'uniformité des données sur toute la zone d'étude ainsi que leur accessibilité. De plus, les données de forme cartographique ont été privilégiées afin de pouvoir croiser les différentes

informations géographiques au niveau des boîtes dunaires. Des données issues de structures nationales sont utilisées, comme celles de la plateforme Géolittoral (Ministère de la transition écologique / Cerema), mais aussi des données internes à l'Office national des forêts ou plus spécifiques (IGN - Référentiel grande échelle, BD Bâti / Cartes géologiques du BRGM, SHOM - marnage). Le choix final des critères utilisés dans cet état des lieux est énoncé dans le **Tableau 1**.

Tableau 1. — Critères utilisés dans l'état des lieux des dunes domaniales. Source : Mathilde Chiaradia.

Élément de l'état des lieux		Critères sélectionnés et analysés à l'échelle de la zone d'étude
Contextes	Géologique et morphologique	Régions géologiques et lithologie simplifiée (BD million geol, BRGM), nature du trait de côte (EUROSION et Cerema)
	Climatique	Températures maximales moyennes et hauteurs de précipitations moyennes (Modèle Aurelhy (1981-2010), Météo France), vitesse moyenne du vent (Ministère en charge de l'environnement 2013)
	Hydrodynamique	Direction de la houle (Candhis), orientation de la côte, hauteurs de houle (Dodet et al. 2019), marnage (SHOM)
	Anthropique	Données générales sur les occupations et les dynamiques des communes littorales (Ministère de la Transition écologique 2020), somme des activités socio-économiques du littoral (POLMAR-Terre 2018)
Morphologie des dunes		Occupation des massifs dunaires (forêt, végétation continue, végétation clairsemée) (Cerema), largeur des dunes non boisées (ONF), largeur du foncier domanial (ONF), altitude des dunes domaniales (RGE Alti, IGN), continuité morphologique (ONF)
Aléas		Tendance de l'évolution du trait de côte (taux moyen, taux de recul ou d'avancée maximal) (Cerema 2018), localisation des zones basses (Ministère en charge de l'environnement 2011), espace d'accommodation dunaire ¹ (ONF)
Enjeux anthropiques		Ouvrages et aménagements littoraux et artificialisation du trait de côte (Cerema/Ministère en charge de l'environnement 2017), occupation anthropique des unités de gestion (Cerema 2019), distance au bâti (BD Topo, IGN 2019), occupation anthropique de l'arrière-dune (Corine Land Cover 2012)
Enjeux de biodiversité		Somme de protections environnementales (POLMAR-Terre 2018), type de protections environnementales (MNHN), présence probable et avérée de flore dunaire endémique protégée nationalement, présence probable et avérée de faune dunaire protégée (ONF, INPN, Telabotanica)

Indices de sensibilité et typologie

Les différents indices de sensibilité regroupent plusieurs des critères cités, exceptés ceux relatifs aux différents contextes dans lesquels se situent les dunes domaniales. Pour chaque valeur ou classe de valeurs associées, le niveau de sensibilité est illustré par une note (faible : 0, moyenne : 1, élevée : 2) (**Tableau 2**). Dans cette étude, une note équivalente à 0 ne traduit pas une sensibilité nulle mais une sensibilité moindre. Afin de prioriser les critères les plus pertinents à observer pour moduler les objectifs de gestion, des coefficients de pondération ont été appliqués à chaque critère. Ils ont été estimés à dire d'experts, après discussion avec les gestionnaires. Plus la pondération considérée est importante, plus le critère associé participe à la définition de la sensibilité. Par exemple, il a été estimé que la largeur d'une dune et son espace d'accommodation étaient des critères prédominants dans la caractérisation de la *sensibilité morphologique* : une dune étroite et ne pouvant pas se déplacer vers l'arrière sera plus susceptible d'être fortement impactée

¹ Celui-ci a été défini dans cette étude comme l'espace entre la limite interne de la dune non boisée (susceptible de bouger) et la limite externe du foncier domanial. Il représente l'espace théorique dédié à la mobilité de la dune sur des terrains domaniaux.

par des érosions marines et éoliennes. Les critères relatifs au recul du trait de côte possèdent une plus forte pondération, car ils identifient les dunes où de fortes tendances érosives sont constatées. De même, la présence d'ouvrages sur le trait de côte attenant à la dune signifie que celle-ci supporte des enjeux socio-économiques importants. Enfin, il a été considéré que les enjeux naturels des dunes sont bien représentés par le nombre et le type de protections environnementales auxquelles elles sont associées.

Tableau 2. — Notes attribuées aux différents indices de sensibilité selon les critères descriptifs et les modalités de valeurs. Source : Mathilde Chiaradia.

Sensibilité	Faible (0)	Moyenne (1)	Elevée (2)	Pondération
Morphologique				
Largeur dune non boisée	Plus de 100 m	Entre 50 et 100 m	Moins de 50 m	40%
Espace d'accommodation	Plus de 1000 m	Entre 250 et 1000 m	Moins de 250 m	30%
Hauteur maximale	Plus de 20 m	Entre 10 et 20 m	Moins de 10 m	20%
Intégration à un cordon dunaire	Grand cordon (plus de 20 km)	Petit cordon (entre 4 et 20 km)	Site isolé (moins de 4 km)	10%
Vis-à-vis des aléas				
Déplacement du trait de côte	Avancée (de 0,5 à plus de 3 m/an)	Stabilité (avancée ou recul jusqu'à 0,5 m/an)	Recul (de 0,5 à plus de 3 m/an)	30%
Recul maximal du trait de côte	Entre 0 et 0,5 m/an	Entre 0,5 et 1,5 m/an	Plus de 1,5 m/an	20%
Présence de zones basses (2 km)	Non	Oui dans l'unité de gestion OU la zone de 2 km autour	Oui dans l'unité de gestion ET la zone de 2 km autour	20%
Présence de zones basses sous le niveau marin centennal - 1 m	Non	Oui dans l'unité de gestion OU la zone de 2 km autour (0.5)	Oui dans l'unité de gestion ET la zone de 2 km autour (1)	10%
Nature de l'estran	Sableux	Rocheux		10%
Ouvrage « de défense contre la mer »	Absence	Présence		10%
Socio-économique				
Artificialisation du trait de côte	Non		Oui	40%
Présence d'une surface anthropisée dans l'unité de gestion	Non	Oui, camping ou golf	Oui, bâti ou camping ou golf	20%
Distance au bâti dans l'arrière-dune	Supérieure à 200m	Dans une zone de 200m à partir de l'unité de gestion	Dès l'unité de gestion	30%
Artificialisation de l'arrière-dune (2 km) (pourcentage surfacique)	Inférieure à 10%	Entre 10 et 30%	Plus de 30%	10%
Environnementale				
Somme maximale des protections environnementales	1-2	3-5	Plus de 5	40 %
Type de protection et inventaire patrimonial	Absence	Protection conventionnelle (N200, PNR, PNM) Et/Ou Inventaire (ZNIEFF)	Protection réglementaire : PNN, RNN, RNR, RB, RNCFS, Arrêté biotope, site classé/inscrit	30%
Présence probable ou avérée d'une flore endémique protégée nationalement *	Non	Oui, estimée	Oui, estimée et relevée	15%
Présence probable ou avérée d'une faune protégée **	Non	Oui, estimée	Oui, estimée et relevée	15%

* Parmi *Alyssum loiseleurii*, *Astragalus baionensis*, *Dianthus hyssopifolius subsp. Gallicus*, *Hieracium eriophorum*, *Linaria thymifolia* et *Omphalodes littoralis*.

** Parmi *Pelobates cultripes* et *Timon lepidus*

Chaque indice de sensibilité a une note maximale commune (2), permettant une comparaison aisée. Comme synthétisé sur la **Figure 4**, plus les valeurs des différentes sensibilités s’approchent de 2, plus les dunes considérées sont basses et étroites, exposées à un recul du trait de côte et supportent une artificialisation du trait de côte importante ainsi que des enjeux patrimoniaux conséquents.

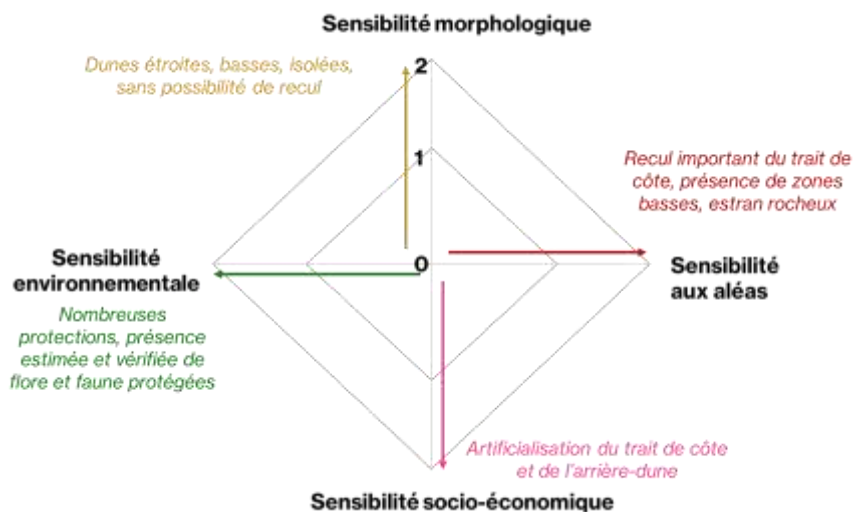


Figure 2. — Représentation et interprétation des différents indices de sensibilité.
Source : Mathilde Chiaradia.

La typologie des dunes doit être représentative des différences en termes de prédispositions morphologiques, d’exposition aux aléas mais aussi de niveaux d’enjeux anthropiques et environnementaux. La définition de la typologie s’est basée sur l’analyse des différentes boîtes dunaires selon les valeurs attribuées à leurs indices de sensibilité. À l’aide du logiciel de traitement statistique Rstudio et de son interface graphique R commander, une classification ascendante hiérarchique est réalisée, selon la méthode de Ward. Elle consiste à agréger les éléments les plus proches au fur et à mesure des itérations, conduisant à un dendrogramme. Les classes ainsi dégagées sont ensuite interprétées à l’aide des valeurs des barycentres des classes pour chaque sensibilité et par l’identification de boîtes dunaires représentatives et illustratives. Ainsi, chaque boîte dunaire est associée à une description de critères (valeurs ou classes de valeurs), à des indices de sensibilité et enfin à un type de dune.

RÉSULTATS

Les résultats de cet état des lieux sont disponibles à une échelle très fine au niveau de la boîte dunaire ainsi qu’à une échelle plus large en synthétisant les différents critères en termes de proportions ou en visualisant les indices de sensibilité par site dunaire administratif, par département ou encore région.

À une échelle fine, au niveau de la boîte dunaire

La segmentation de la zone d’étude en boîtes dunaires permet de croiser les différentes couches d’informations. Celles-ci sont contenues dans une table de travail, associant pour chaque boîte dunaire :

- Les valeurs ou classes de valeurs de chaque critère,
- Les notes obtenues pour chaque critère selon ses valeurs et le coefficient de pondération,
- Les notes de chaque indice de sensibilité,
- Le type de dune associé à la boîte dunaire.

Ainsi, localement, toutes les données contenues ou rattachées à une boîte sont consultables et cartographiables. Les informations relatives à chaque critère étudié mais aussi le niveau de sensibilité estimé y sont inscrites.

Cette disponibilité de données intervient ainsi comme un outil d'aide à la connaissance voire à la gestion locale, utile aux techniciens (traduction des observations générales de terrain) et aux gestionnaires (regroupement des caractéristiques du site). L'étude cartographique d'un ensemble de boîtes dunaires permet quant à elle une visualisation globale des similitudes ou disparités entre les différentes boîtes dunaires, à l'échelle d'un site administratif, d'un département voire d'une région.

À l'échelle de la zone d'étude

La segmentation de la zone d'étude en boîtes dunaires permet l'analyse de chaque critère de description (cf. **Tableau 1**) en termes de proportions selon les différentes valeurs ou classes de valeur. Ces analyses permettent notamment d'estimer les caractéristiques générales des dunes mais aussi d'identifier les territoires nécessitant une attention particulière vis-à-vis de la gestion. La représentation cartographique des critères sur l'ensemble de la zone d'étude permet de plus une visualisation globale des différents critères, afin de repérer des similitudes ou des disparités régionales. Enfin, l'étude des indices de sensibilité autorise une synthèse visuelle des caractéristiques dunaires étudiées. Les différents critères utilisés par sensibilité se rapportent aux critères énoncés dans le **Tableau 2**, les notes obtenues pour chaque boîte dunaire sont ensuite moyennées par site dunaire (**Figure 5**) ou encore par département.

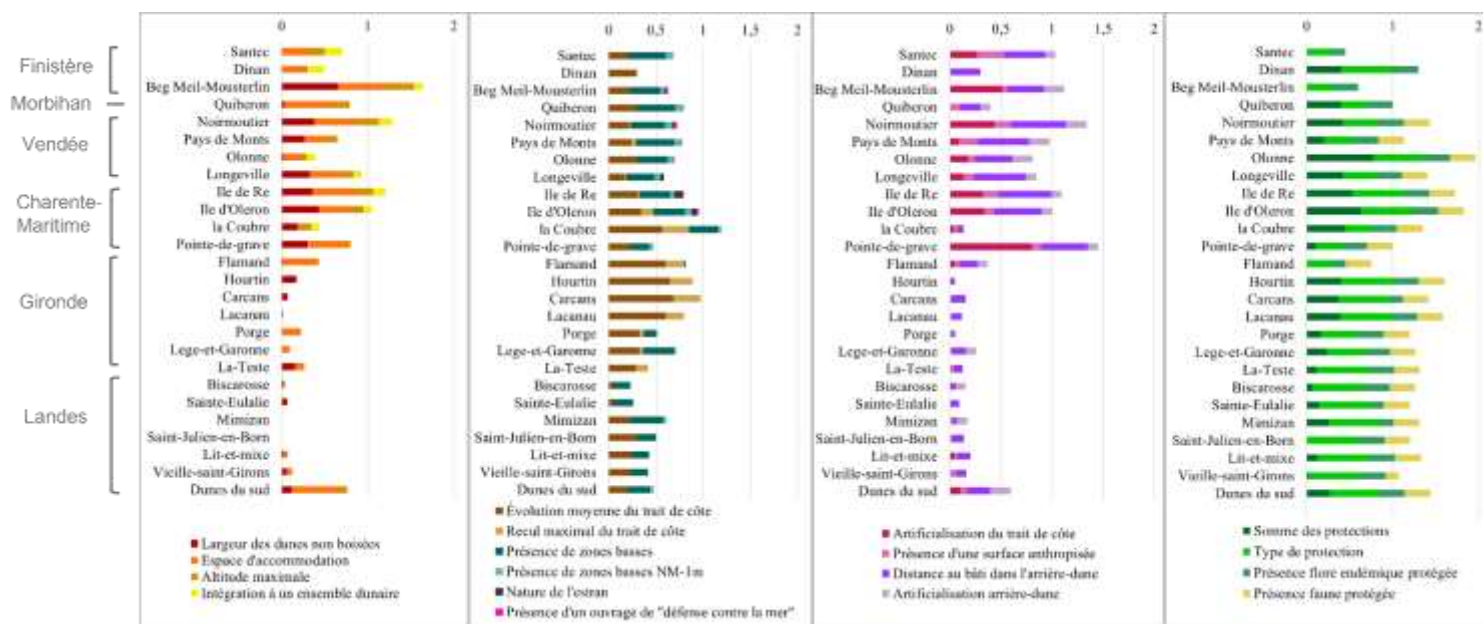


Figure 3. — De gauche à droite : Indices de sensibilité morphologique, aux aléas, socio-économique et environnementale moyennés par site dunaire domaniale. Source : Mathilde Chiaradia.

L'indice de *sensibilité morphologique* met en lumière des disparités régionales morphologiques assez marquées entre le nord de la zone d'étude, qui comprend les dunes bretonnes, vendéennes et de Charente-Maritime avec le sud de la zone d'étude (dunes girondines et landaises). En effet, des dunes larges (plus de 100 m), hautes (altitude maximale de plus de 20 m) et intégrées à un cordon dunaire conséquent (plus de 20 km) sont majoritairement présentes dans les Landes et en Gironde. Les dunes de Charente-Maritime, de Vendée et de Bretagne sont plutôt étroites (entre 50 et 100 m) et basses (moins de 20 m), incluses dans un petit cordon dunaire ou bien isolées. Par ailleurs, des disparités locales importantes et fréquentes sont observées.

Concernant la confrontation des dunes aux différents aléas littoraux, un fort recul du trait de côte est constaté au niveau des dunes de nord Gironde (dunes du Flamand, Hourtin, Carcans et Lacanau) et de la dune de la Coubre (Charente-Maritime). Environ 20 % des dunes sont confrontées à un recul du trait de côte, alors que 13 % d'entre elles sont plutôt concernées par une avancée. Presque la moitié des dunes domaniales sont

quant à elles concernées par un recul ou une avancée de faible amplitude (moins de 50 cm par an). Enfin, notre étude précise que localement et au sein d'un même site, un recul et une avancée peuvent être constatés, selon les différents contextes hydrodynamiques (contextes estuariens) et anthropiques (présence d'ouvrages). Les submersions marines sont plus probables au niveau des dunes vendéennes et des îles de Ré et Oléron, au vu de la présence de zones basses inférieures à 1 m par rapport au niveau moyen de la mer, mais aussi par la présence d'ouvrages de « défense contre la mer » (digues, épis) et de dunes plutôt basses et étroites.

Non intégrée dans l'indice de *sensibilité aux aléas*, la migration dunaire est étudiée sous l'angle de l'estimation spatiale des possibilités de recul de la dune vers les terres (qu'elle soit naturelle ou amorcée par des interventions anthropiques) via l'espace d'accommodation des sites domaniaux. Celui-ci est considéré comme très faible pour une distance de moins de 250 m, concernant tout de même 30 % des dunes domaniales (majoritairement en Bretagne, sur les îles charentaises et à Noirmoutier). Environ 45 % des dunes domaniales, localisées majoritairement en Gironde en Aquitaine, ont un espace d'accommodation de plus de 1000 m : un recul de la dune peut être envisagé sur ces territoires.

Deux régions peuvent être distinguées concernant les enjeux anthropiques des dunes. Les dunes girondines (sauf la dune de Pointe-de-grave) et landaises (sauf les dunes du Sud) sont principalement peu artificialisées, tant au niveau du trait de côte qu'au niveau de l'arrière-dune. Au contraire, la majorité des dunes vendéennes et les dunes de l'île d'Oléron et de Ré peuvent être considérées comme des dunes « urbaines ». Elles présentent souvent une artificialisation du trait de côte (ouvrages de protection forte), des espaces spécifiques (campings, golfs) démontrant des activités économiques fortes et des zones urbaines étendues à proximité.

L'indice de *sensibilité environnementale* ne distingue pas suffisamment les disparités d'enjeux environnementaux au sein de la zone d'étude. La majorité des dunes sont incluses dans plus de deux types de protections environnementales, qui sont plutôt de type réglementaire, où la gestion et les activités humaines y sont limitées. Cet indice confirme que toutes les dunes domaniales présentent de forts enjeux environnementaux et accueillent une flore et une faune remarquables et protégées. Ainsi, les objectifs de gestion doivent s'accorder avec une préservation forte de la biodiversité et de la diversité des paysages dunaires.

Afin de mettre en lumière les différentes caractéristiques de dunes, celles-ci ont été synthétisées en quatre grand types de dunes, selon leurs caractéristiques générales illustrées dans l'état des lieux.

Typologie des dunes domaniales

Une classification ascendante hiérarchique sur les différents indices de sensibilité a été réalisée. Le dendrogramme obtenu (**Figure 6**) est coupé au niveau de quatre classes : c'est un nombre acceptable de types dunaires à distinguer, mais c'est aussi le dernier niveau envisageable avant une forte perte d'inertie (réduction des hauteurs des branches du dendrogramme). Les valeurs des barycentres des classes variant très peu pour la *sensibilité environnementale* (de 1,13 à 1,60) et n'étant pas un paramètre de distinction probant, cette dernière n'a pas été considérée dans l'interprétation de la classification. Ainsi, les classes sont distinguées les unes des

autres selon leurs valeurs de *sensibilité morphologique*, de *sensibilité aux aléas* et de *sensibilité socio-économique*. Les barycentres de chaque sensibilité selon les classes obtenues sont représentés en **Figure 7**.

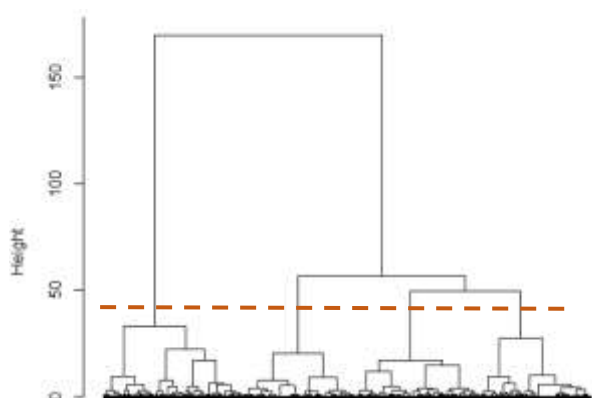


Figure 6. — Dendrogramme obtenu après la classification ascendante hiérarchique.
Source : Mathilde Chiaradia.

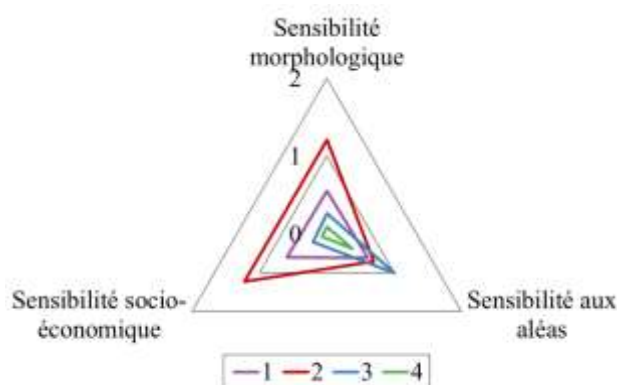


Figure 7. — Position des barycentres des classes obtenues sur le graphe radar des sensibilités.
Source : Mathilde Chiaradia.

Les classes sont tout d'abord interprétées en termes de morphologie des dunes (**Tableau 3**). Ce paramètre, basé sur des critères d'état (dimensions dunaires), a montré une variabilité régionale importante et influence les perspectives potentielles de gestion (capacité de remobilisation, élévation d'un cordon étroit). La *sensibilité aux aléas* est définie comme le deuxième élément de typologie, permettant de relever le degré d'exposition des dunes face aux aléas. Enfin, la *sensibilité socio-économique* (troisième élément de typologie), illustre la présence et le degré d'enjeux socio-économiques sur et à proximité des dunes (artificialisation). Celle-ci conditionne les perspectives effectives de gestion vis-à-vis des aléas (capacité de recul dunaire, niveau de résilience) mais aussi les objectifs de protection et d'accueil que supportent les dunes vis-à-vis des populations et du public. Bien que l'homogénéité n'ait pas été recherchée, les différents types de dunes sont présents en proportions assez similaires au sein de la zone d'étude.

Tableau 3. — Classification des dunes domaniales selon les indices de sensibilité. Source : Mathilde Chiaradia.

Classe	Type	Type interprété	Proportion
2	A	Dunes très sensibles morphologiquement, modérément exposées aux aléas mais comprenant de forts enjeux socio-économiques.	29 %
1	B	Dunes assez sensibles morphologiquement et modérément exposées aux aléas, avec quelques enjeux socio-économiques.	25 %
3	C	Dunes peu sensibles morphologiquement mais fortement exposées aux aléas, avec peu d'enjeux socio-économiques.	23 %
4	D	Dunes très peu sensibles morphologiquement, peu exposées aux aléas et sans enjeu socio-économique.	23 %

Afin de constater si des disparités ou similitudes régionales existent selon les différents types de dunes, une interprétation visuelle de la typologie sur la zone d'étude ainsi qu'en termes de proportions des différents sites dunaires domaniaux est proposée en **Figure 8**.

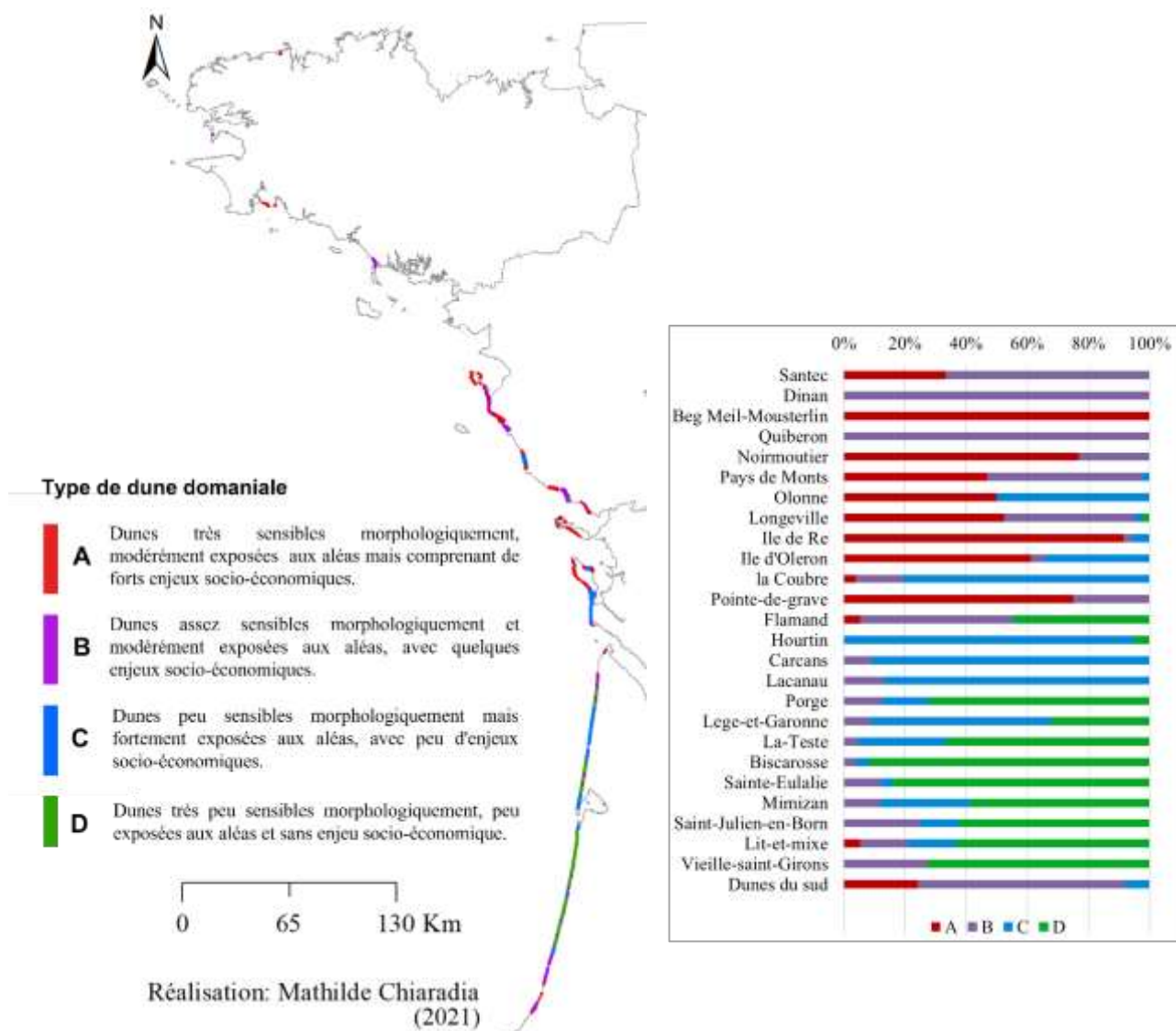


Figure 8. — Typologie des dunes domaniales appliquée à la zone d'étude et proportion de chaque type par site dunaire domaniaux Source : Mathilde Chiaradia.

Des disparités géographiques sont constatées et confirment les visualisations de l'état des lieux. Deux régions sont tout d'abord distinguées : les dunes bretonnes et de centre-atlantique (Vendée et Charente-Maritime) qui regroupent une majorité de dunes de type A ou B, évoquant des dunes assez voire très sensibles morphologiquement (dunes étroites, basses, isolées ou intégrées à un petit cordon dunaire), modérément exposées aux aléas mais comprenant une artificialisation conséquente sur ou à proximité de la dune. Plus localement, les dunes considérées comme les plus « critiques » en termes de morphologie, d'aléas et d'enjeux sont les dunes des territoires insulaires : les dunes de Noirmoutier, de l'île d'Oléron et de l'île de Ré. Ces territoires de surfaces restreintes sont très attractifs et morphologiquement très sensibles (dunes basses, zones urbanisées). La totalité des dunes de Pointe-de-grave (33) et la majorité des boîtes du site des Dunes du Sud (40) se rapportent aussi à ces deux types de dunes. En dehors de ces spécificités, la majorité des dunes domaniales girondines et landaises se rattachent aux types de dunes C ou D. Ceux-ci évoquent des dunes peu voire très peu sensibles morphologiquement (dunes larges, hautes, intégrées à un large cordon dunaire) et sans enjeu socio-économique probant (très peu d'artificialisation). Les dunes landaises de Biscarosse, Saint Eulalie ou Saint-Julien-en-Born (majorité de type D) sont apparentées à des dunes naturelles où de faibles problématiques liées aux aléas ou à l'anthropisation sont à considérer. Certaines dunes sont par ailleurs

concernées par des aléas littoraux parfois intenses (recul du trait de côte), particulièrement en Gironde (Hourtin, Carcans, Lacanau).

Cette typologie par boîte duniaire permet de montrer la multitude de profils de dunes sur toute la zone d'étude mais aussi au sein d'un même site duniaire administratif. L'élaboration de stratégies de gestion adaptée à chaque dune pourra donc s'établir selon la typologie proposée, bien que les actions de gestion devront être réalisées selon les spécificités locales de chaque dune.

DISCUSSION

Cet état des lieux des dunes domaniales, du Finistère au sud des Landes, apparaît comme un outil favorisant une approche systématique et apporte une plus-value qualitative et quantitative par rapport à des observations de terrain plus ponctuelles et localisées. Les différents types dunaire et caractéristiques relevées pourront notamment être utilisés dans l'élaboration de stratégies de gestion adaptées. Après discussion avec les gestionnaires, les principales disparités et similitudes des caractéristiques sont bien exposées et les différents types dunaire semblent pertinents. Une validation de la typologie établie et des notes d'indices de sensibilité pourrait être envisagée sur quelques sites dunaire, afin de relever la concordance entre les données utilisées et les données de terrain. Par ailleurs, une réactualisation de cet état des lieux pourra être considérée lorsque des mises à jour des données seront disponibles.

Certains critères de description visibles et extractibles sur le terrain n'ont quant à eux pas pu être intégrés à cet état des lieux, du fait de leur difficulté de reproductibilité ou de disponibilité sur toute la zone d'étude. C'est notamment le cas pour quelques critères intrinsèques aux dunes, comme ceux relatifs à la morphologie et à la biodiversité des dunes. En effet, l'intégration de critères plus locaux, comme la présence de formes d'érosions (caoudeyres, falaises dunaire) pourrait rendre l'indice de *sensibilité morphologique* plus robuste. De même, l'indice de *sensibilité environnementale* pourrait être plus pertinent et discriminatoire si des données concernant la largeur et la surface de dune grise (grande valeur patrimoniale) y étaient intégrées, ou encore le degré de fermeture des milieux dunaire. Ces critères pourraient être récoltés grâce à des outils de télédétection, afin d'avoir une disponibilité automatisée sur toute l'étendue de la zone d'étude. De plus, les données naturalistes issues de différents suivis pourraient être collectées et uniformisées sur l'ensemble de la zone d'étude, afin d'obtenir un inventaire assez exhaustif des différentes espèces dunaire. Les critères illustrant les menaces pesant sur les dunes domaniales seraient à compléter avec la caractérisation locale du risque de submersion marine et l'évaluation du rôle du cordon duniaire face à ce risque. En effet, le cordon duniaire peut jouer un rôle de barrière face aux inondations de l'arrière-dune, selon ses dimensions et son état. Enfin, la pression anthropique pourrait être estimée par l'analyse de la fréquentation des dunes, au niveau des cheminements ou des parkings par exemple.

L'intégration du changement climatique à l'état des lieux s'est avérée complexe pour avoir une visualisation ou une prédiction de ses effets, bien que l'utilisation des indices de sensibilité propose une visualisation des dunes les plus vulnérables aux effets du changement climatique. Ceux-ci pourraient tout d'abord être estimés par diverses modélisations des évolutions des différents critères utilisés, en particulier au niveau des aléas littoraux ou des enjeux environnementaux (changement dans les aires de répartitions des espèces floristiques dunaire par exemple). L'élaboration de scénarii prenant en compte les facteurs d'évolutions les plus probables (températures, niveau de la mer) à différents horizons permettrait l'identification des territoires les plus exposés aux risques littoraux et la définition de stratégies de gestion adaptées. Enfin, plus généralement, la mise en commun de données, de protocoles d'analyses et de résultats avec les différentes agences de l'ONF, mais aussi avec d'autres structures gestionnaires du littoral engagerait une meilleure connaissance des caractéristiques et des enjeux du littoral métropolitain.

CONCLUSION

Cette étude a mis en exergue un état des lieux qui illustre la grande diversité des dunes domaniales. Du Finistère au sud des Landes, elle reflète les disparités et similitudes majeures des dunes domaniales selon leur morphologie, les aléas auxquels elles sont confrontées et les enjeux qu'elles supportent. Cet état des lieux est reproductible et destiné à évoluer à plus ou moins long terme, selon les modifications constatées des paramètres analysés et la mise à jour des données utilisées (évolution des largeurs des dunes non boisées, recul du trait de côte, ouvrages de protection, *etc.*).

L'étendue considérée pour la réalisation de cette étude mais aussi l'intégration de données fines et consultables par les gestionnaires ont constitué un enjeu particulier. Plusieurs questions ont été soulevées concernant les critères à sélectionner, les données à utiliser et la méthode à entreprendre pour réaliser une synthèse pertinente de cet état des lieux. Pour affiner et enrichir ces observations, une acquisition de données issues de méthodes de télédétection et un partage plus fluide des données nationales seraient à considérer, en particulier concernant la caractérisation des aléas littoraux et l'état des milieux dunaires et de la biodiversité associée. Des outils de modélisation pourraient rendre compte des conséquences du changement climatique à moyen et long terme.

Comme outil d'aide à la décision, cet état des lieux appuie la réalisation d'un plan de gestion stratégique des dunes domaniales. Les orientations de gestion actuelles misent sur l'adaptation naturelle ou assistée des dunes face aux conséquences du changement climatique. Il ne s'agit plus de résister ou de lutter contre un aléa naturel inexorable, mais d'anticiper sa répétition à long terme et de protéger les enjeux menacés. La gestion souple des dunes pour répondre aux défis anthropiques et environnementaux est un savoir-faire historique qui fait d'elle un modèle de « solution fondée sur la nature »². Cette adaptation nécessite des concessions : un recul stratégique de la dune peut entraîner plus ou moins temporairement une modification des paysages dunaires et des habitats floristiques (dune grise).

La gestion intégrée des dunes est aussi une réponse à l'adaptation plus générale de tous les espaces littoraux aux événements actuels et futurs, notamment les villes côtières qui font face à des menaces grandissantes d'érosions du trait de côte ou d'inondations par submersions marines. En août 2021, la promulgation de la loi « Climat et résilience »³ intègre ces problématiques. Elle prévoit entre autres une délégation plus importante de la gestion de l'érosion côtière aux collectivités locales littorales. Celle-ci sera à présent intégrée dans les documents de planification comme les Plans locaux d'urbanisme (PLU) pour encadrer la gestion de constructions au niveau de zones où le recul du trait de côte est observé et prévu. Ainsi, les initiatives de gestion mais aussi l'utilisation d'outils d'analyse gagneront à être réfléchies et partagées entre les différents gestionnaires et structures d'accompagnement afin de tendre vers un objectif commun d'adaptation des territoires littoraux au changement climatique.

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier Loïc Gouguet, responsable technique national littoral à l'Office national des forêts, pour son soutien perpétuel et son aide précieuse dans la rédaction de cet article. Je remercie également Madame Catherine Meur-Ferec, professeure en géographie littorale et gestion intégrée des zones côtières à l'Université de Bretagne Occidentale, ainsi que Monsieur Stéphane Costa, professeur à l'université de Caen Normandie, pour la pertinence et la qualité de leur relecture.

² « Actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité » (Comité français de l'Union internationale pour la conservation de la nature 2016)

³ Loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant sur la lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets (République française 2021)

SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABUODHA, Pamela A. O. et WOODROFFE, Colin D., 2010. Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: a case study from southeast Australia. *Journal of Coastal Conservation*. 1 septembre 2010. Vol. 14, n° 3, pp. 189-205. DOI 10.1007/s11852-010-0097-0.

BATTIAU-QUENEY, Yvonne et FAVENNEC, Jean, 2015. *Coastal dunes management strategies and practices : Perspectives and case studies - Dynamiques Environnementales 33*. Presses universitaires de Bordeaux. ISBN 979-10-300-0014-6.

CICCARELLI, D., PINNA, M. S., ALQUINI, F., COGONI, D., RUOCCO, M., BACCHETTA, G., SARTI, G. et FENU, G., 2017. Development of a coastal dune vulnerability index for Mediterranean ecosystems: A useful tool for coastal managers? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 5 mars 2017. Vol. 187, pp. 84-95. DOI 10.1016/j.ecss.2016.12.008.

COMITÉ FRANÇAIS DE L'UNION INTERNATIONALE POUR LA CONSERVATION DE LA NATURE, 2016. *Des solutions fondées sur la nature pour lutter contre les changements climatiques*.

DAUPHINÉ, André et PROVITOLLO, Damienne, 2007. La résilience : un concept pour la gestion des risques. *Annales de géographie*. 2007. Vol. n° 654, n° 2, pp. 115-125.

DEBAINE, Françoise, ROBIN, Marc, ROZE, Françoise, FAVENNEC, Jean, GOUGUET, Loïc et PRAT, Marie-Claire, 2007. *Aide à la gestion multifonctionnelle des dunes littorales atlantiques par l'évaluation cartographiée de leur état de conservation. Programme « Multidune »*.

DODET, Guillaume, BERTIN, Xavier, BOUCHETTE, Frédéric, GRAVELLE, Médéric, TESTUT, Laurent et WOPPELMANN, Guy, 2019. Characterization of Sea-level Variations Along the Metropolitan Coasts of France: Waves, Tides, Storm Surges and Long-term Changes. *Journal of Coastal Research*. décembre 2019. Vol. 88, n° sp1, pp. 10. DOI 10.2112/SI88-003.1.

FAVENNEC, Jean, 1996. Gestion conservatoire des dunes littorales non boisées. In : *Biodiversité et protection dunaire*. Lavoisier.

GOUGUET, Loïc, 2018. *Guide de gestion des dunes et des plages associées*. [en ligne]. Quae. Quae. [Consulté le 20 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.quae.com/produit/1367/9782759224838/guide-de-gestion-des-dunes-et-des-plages-associees>

IPCC, 2021. *Summary for Policymakers*. [en ligne]. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [MassonDelmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Disponible à l'adresse : https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf

JUIGNER, Martin, 2017. *La géomatique au service de l'observation du trait de côte : contribution à l'étude des aléas côtiers sur les littoraux dunaires de la région Pays de la Loire (France)* [en ligne]. Thèse de doctorat. Nantes. [Consulté le 10 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.theses.fr/2017NANT2023>

JUIGNER, Martin, ROBIN, Marc, AUDÈRE, Morgane, FATTAL, Paul, HERVY, Benjamin, KERGUILLEC, Riwan, SUZANNE, Jean-Baptiste, COSTA, Stéphane, LOPIN, Maëlys, MAQUAIRE, Olivier, MEDJKANE, Mohand, PAGNY, Julie et THULIE, Arnaud, 2021. Un nouvel indicateur de prédisposition au risque d'érosion côtière, application en Manche et en Vendée (France). *Cybergeo : European Journal of Geography* [en ligne]. 21 juillet 2021. [Consulté le 18 août 2021]. DOI 10.4000/cybergeo.37114. Disponible à l'adresse : <https://journals.openedition.org/cybergeo/37114>

LE COZANNET, Gonéri, 2016. *Les conséquences de l'élévation du niveau marin pour le recul du trait de côte* [en ligne]. phdthesis. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I. [Consulté le 22 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01661291>

LE COZANNET, Gonéri, BULTEAU, T, BAILLS, A et GARCIN, M, 2016. RP-66465-FR : *Conséquences du changement climatique sur les risques côtiers en Nouvelle-Aquitaine : état des connaissances* [en ligne]. BRGM. [Consulté le 16 mars 2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.observatoire-cote-aquitaine.fr/Quelles-connaissances-de-l-impact-potentiel-du-changement-climatique-sur-les>

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE, 2014. *Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux*.

PASKOFF, Roland, 1996. Typologie géomorphologique des milieux dunaires européens. In : *Biodiversité et protection dunaire*. Bordeaux : Lavoisier. 1996. pp. 198-219.

PASKOFF, Roland, 2003. La conservation des dunes littorales implique-t-elle leur stabilisation ? L'exemple de la côte atlantique. *Nature Sciences Sociétés*. 1 juillet 2003. Vol. 11, n° 3, pp. 288-294. DOI 10.1016/S1240-1307(03)00086-4.

PLANTON, Serge, LE COZANNET, Gonéri, CAZENAVE, Anny, COSTA, Stéphane, DOUEZ, Olivier, GAUFRÈS, Pierre, HISSEL, François, IDIER, Déborah, LABORIE, Vannessa, PETIT, Vincent et SERGENT, Philippe, 2015. *Le climat de la France au XXIe siècle. Vol 5 : Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises* [en ligne]. Research Report. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. [Consulté le 16 septembre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01288453>

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE, 2021. *LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets*. [en ligne]. 22 août 2021. 2021-1104. [Consulté le 25 septembre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>

SHAW, J., TAYLOR, R. B., FORBES, D. L., SOLOMON, S. et RUZ, M. H., 1998. Sensitivity of the coasts of Canada to sea-level rise. [en ligne]. 31 décembre 1998. [Consulté le 22 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/311656>