



Dynamiques environnementales

Journal international de géosciences et de l'environnement

42 | 2018

Du glint baltique au lac Peïpous

Risques naturels et fragilités des paysages dynamiques de dunes côtiers

Études de cas de la côte ouest d'Estonie

Agnes Anderson, Tiiu Koff, Are Kont et Reimo Rivis



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/dynenviron/1700>

DOI : 10.4000/dynenviron.1700

ISSN : 2534-4358

Éditeur

Presses universitaires de Bordeaux

Édition imprimée

Date de publication : 1 juillet 2018

Pagination : 68-81

ISSN : 1968-469X

Référence électronique

Agnes Anderson, Tiiu Koff, Are Kont et Reimo Rivis, « Risques naturels et fragilités des paysages dynamiques de dunes côtiers », *Dynamiques environnementales* [En ligne], 42 | 2018, mis en ligne le 01 juin 2019, consulté le 02 mai 2021. URL : <http://journals.openedition.org/dynenviron/1700> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/dynenviron.1700>



La revue *Dynamiques environnementales* est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.



Risques naturels et fragilités des paysages dynamiques de dunes côtières

Études de cas de la côte ouest d'Estonie

Agnes Anderson¹, Tiiu Koff², Are Kont², Reimo Riviš²

1. Tallinn University, School of Natural Sciences and Health,
Narva Road 29, 10120 Tallinn, Estonie
agnes.anderson@tlu.ee

2. Institut d'Écologie de l'Université de Tallinn,
Uus-Sadama 5, 10120 Tallinn, Estonie.
tiiu.koff@tlu.ee

English text p. 300

Résumé

Définies dans la Directive Habitats comme habitat prioritaire, des dunes fixées à végétation herbacée (dunes grises) apparaissent autour des côtes européennes. Faisant partie de nombreux systèmes de dunes côtières, ces habitats sont particulièrement complexes, ont une faible résilience et nécessitent une attention particulière du point de vue de la conservation et de la gestion. Pendant près d'une décennie, nous avons étudié des exemples représentatifs de dunes fixées en Estonie. En raison de la pression anthropique croissante et des changements globaux actuels, il est essentiel de distinguer ces changements et d'analyser les tendances générales du développement des dunes grises. Les sites sélectionnés, Keibu (situé sur la côte NO de l'Estonie continentale) et Ruhnu (située sur la côte est de l'île de Ruhnu), sont des exemples représentatifs de l'Estonie, avec une couverture de portée géographique et de variation écologique. Les deux sites font partie de zones de conservation et de surveillance. Sur chaque site, nous avons compilé un profil de paysage pour visualiser la topographie, la végétation et les sols. Cette étude a été réalisée sur des profils de paysages perpendiculaires



au rivage afin d'exprimer tout le spectre des communautés végétales de dunes côtières et des dépôts de surface des rivages vers l'arrière-pays. Les impacts naturels et humains ont été pris en compte dans l'évaluation des modifications de la structure et du fonctionnement des dunes grises en Estonie. Les résultats montrent que les changements dans les paysages de dunes peuvent être rapides, en particulier sur les plages de sable, en raison des fortes ondes de tempête des dernières décennies. Les zones intérieures sont plus touchées par l'activité humaine et les changements y sont bien reflétés. La perte progressive d'habitats sableux ouverts sur les sites est évidente au cours des 100 dernières années et montre les tendances globales de développement des paysages dynamiques de dunes côtières. Cette étude a prouvé que ces zones nécessitent une observation permanente pour évaluer le niveau de changement. Il est essentiel de contribuer aux processus de prise de décision concernant leur utilisation optimale et leurs besoins en matière de conservation afin de préserver leur résilience.

Mots-clés

Dunes grises, plages de sable, directive habitats, surveillance, conservation, gestion.



Figure 1 : Distribution de l'habitat de type 2130 en Europe. Habitat marqué en couleur bleue. Basé sur Natura 2000 Network Viewer. <http://natura2000.eea.europa.eu/>



gestion (Doody, 1991, 2005 ; Martínez *et al.*, 2004). La Directive Habitats sur la conservation des habitats naturels et des espèces a été adoptée afin de garantir la biodiversité à long terme des espèces et des habitats les plus précieux et les plus menacés d'Europe. L'un de ces habitats est constitué par les dunes grises, réparties sur les côtes des pays européens, y compris la France et l'Estonie (figure 1). En raison de conditions dangereuses (tempêtes accrues, élévation du niveau de la mer, ondes de tempête), il est essentiel de mettre en place une surveillance et de fournir une compréhension de ces habitats (figure 2).

Introduction

Dans le monde entier, les écosystèmes côtiers sont soumis à une pression anthropique croissante due au développement immobilier, au tourisme, ... Les changements naturels ont joué un rôle important comme par exemple l'élévation du niveau de la mer entraînant également l'érosion côtière (Vestergaard, 1997 ; Carboni *et al.*, 2009 ; Provoost *et al.*, 2011 ; Ciccarelli *et al.*, 2012). Ces écosystèmes ont une grande valeur, en particulier pour la société qui en tire de nombreux avantages vis-à-vis des loisirs, de la conservation et de l'esthétique. Malheureusement, l'économie actuelle favorise la surexploitation de ces zones, en particulier des plages et des dunes côtières, et il incombe à la société d'en assumer les conséquences (Ciccarelli, 2014).

Les paysages côtiers sont des écosystèmes attrayants et dynamiques, mais aussi menacés en Europe et ailleurs. Les dunes côtières peuvent constituer une protection naturelle contre les ondes de tempête (Tõnisson *et al.*, 2018). Depuis la publication de l'inventaire des dunes de sable, l'accent a été mis sur les dunes de sable d'Europe afin d'améliorer leur diversité écologique par la conservation et la

Les dunes grises sont un type d'habitat prioritaire et ont besoin de recommandations pour la conservation et la gestion. Par conséquent, leur statut est observé par le Programme National Estonien de Surveillance de l'Environnement et communiqué à l'Agence Européenne pour l'Environnement. Initialement, le Programme National de Surveillance de l'Environnement (1996-2012) visait à analyser les structures du paysage dans leur ensemble. Aucune attention particulière n'a été accordée à chaque type d'habitat en raison de l'absence de critères favorables pour le statut de conservation (Development of relevant criteria and monitoring methodology of favourable conservation status of the coastal habitats, 2016). Avec la nouvelle loi sur la surveillance de l'environnement, l'objectif de la surveillance est axé sur des habitats spécifiques en évaluant et en analysant leur statut, en plus des changements dans la biodiversité, des relations avec les activités humaines et les processus naturels, de l'impact de l'utilisation des terres, de la surveillance des changements du paysage et de la prévision des tendances. Les résultats de la surveillance contribuent aux décisions concernant leur utilisation

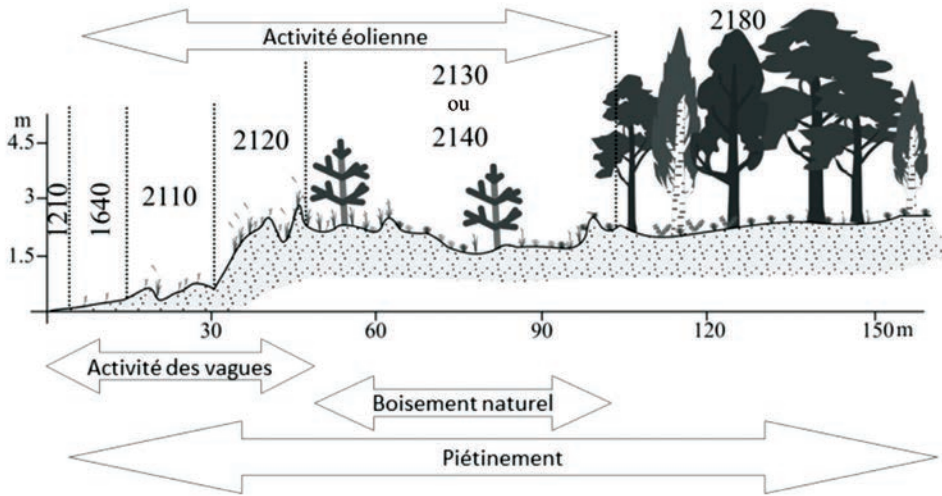


Figure 2 : Principales influences du paysage de dunes côtières estoniennes et des principaux types d'habitat (1210 - végétation annuelle de lignes de dérive ; 1640 - plages de sable boréales à végétation pérenne ; 2110 - dunes en mutation embryonnaire ; 2120 - dunes blanches ; 2130 - dunes grises ; 2140 - dunes fixées décalcifiées avec *Empetrum nigrum* ; 2180 - dunes boisées).

optimale et leurs besoins en matière de conservation.

Les dunes grises se caractérisent par des formes de dunes ondulantes. Lors des premiers stades de développement, les dunes grises sont riches en herbacées. Au stade de succession ultérieur, elles se caractérisent par des prairies pérennes et une abondance de lichens et de mousses. Les processus de développement de la végétation et de formation des sols souffrent souvent de différents impacts environnementaux comme la sécheresse qui est l'un des facteurs les plus défavorables (Provoost *et al.*, 2004 ; Psuty, 2004 ; Wiedemann et Pickart, 2004 ; Isermann, 2005).

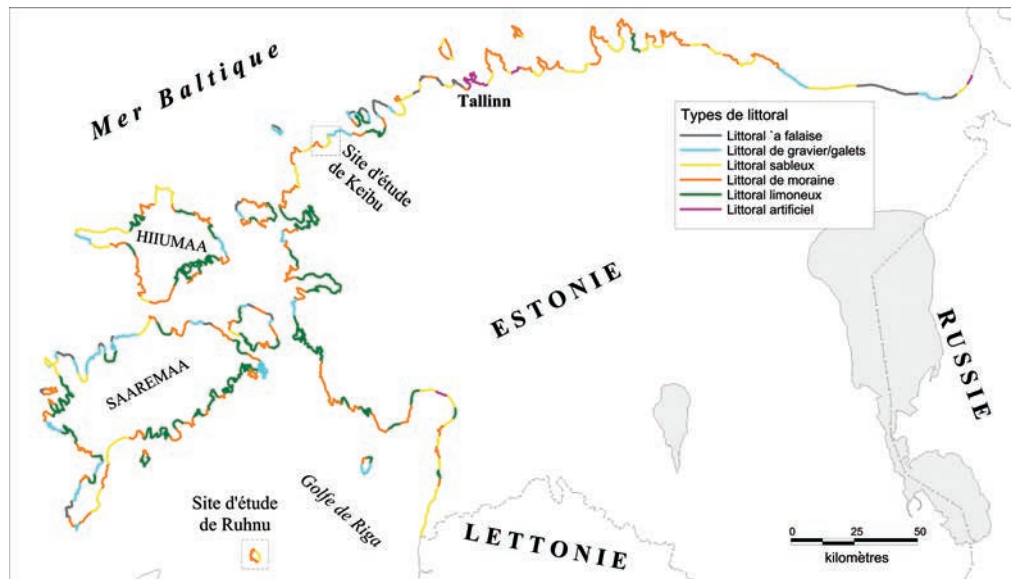
L'Estonie est située sur la côte est de la mer Baltique et l'influence maritime sur le climat y est plus visible à l'ouest qu'à l'est. Or, l'Estonie a connu des changements climatiques apparents depuis quelques décennies. Ainsi, sur la côte exposée à l'ouest, les changements observables dans les conditions climatiques sont évidents en raison des modifications dans la circulation atmosphérique, qui se traduisent par des hivers plus chauds, une augmentation des fortes tempêtes d'ouest associées

à des niveaux de mer élevés dans des conditions de mer libre de glace (Orviku *et al.*, 2003 ; Jaagus, 2006 ; Kont *et al.*, 2007, 2011 ; Orviku *et al.*, 2009 ; Tõnisson *et al.*, 2011 ; Palginõmm *et al.*, 2018).

En Estonie, on distingue six grands types de rivages : les rivages sablonneux, les falaises, le till, les limons, les graviers et galets puis les rivages artificiels (Orviku, 1992). Les rives sablonneuses sont les plus dynamiques, fournissant environ 16 % du littoral total de l'Estonie, long d'environ 3800 km (figure 3). Les activités de la mer et de la glace sont clairement visibles sur les plages de sable situées dans les zones de soulèvement terrestre avec une vitesse maximale de 3 mm/an (Vallner *et al.*, 1988 ; Kall *et al.*, 2016). Bien qu'entourée par la mer Baltique aux eaux peu profondes et sans marées (<10 cm), les ondes de tempête et les fluctuations du niveau de l'eau façonnent les habitats proches du littoral et entravent leur développement. Par conséquent, la présence de végétation est très importante pour résister à tous les facteurs qui modifient la dynamique des paysages de dunes côtières. Dans le même temps, le vent joue un rôle important : en créant de nouveaux



Figure 3 : Types de rivages estoniens selon K. Orviku (1992) et localisation des sites d'étude.



habitats ou en éloignant les sédiments présents (Ratas *et al.*, 2011 ; Anderson *et al.*, 2012).

Plus à l'intérieur des terres, les changements dans les paysages de dunes côtières ont été principalement causés par des modifications dans l'utilisation des terres (principalement la fin des activités agricoles), ce qui a entraîné la surabondance d'anciens pâturages d'arbustes et de forêts. Lors de la période soviétique, les paysages de dunes côtières appartenaient à la zone frontalière restreinte non accessible à la population, laissant des traces encore visibles aujourd'hui. De nos jours, l'environnement est une ressource récréative importante, en particulier pour la cueillette de baies et de champignons, la randonnée, le cyclisme et l'éducation en plein air.

Le présent document a pour objectif d'analyser les tendances générales du développement des dunes grises, qui méritent une attention particulière du point de vue de la conservation et de la gestion. L'étude a été réalisée sur des profils de paysages perpendiculaires au rivage afin d'exprimer tout le spectre des communautés végétales de dunes

côtières et des dépôts de surface des rivages vers l'intérieur des terres. Les impacts naturels et humains ont été pris en compte dans l'évaluation des modifications de la structure et du fonctionnement des dunes grises en Estonie.

Sites d'étude

Nous avons sélectionné deux sites d'étude dans l'ouest de l'Estonie pour mettre en évidence les risques naturels et les vulnérabilités de la dynamique des paysages de dunes côtières (figure 3). À l'heure actuelle, les deux sites sont peu peuplés et couverts de forêts plantées. Keibu est situé sur la côte nord-ouest de l'Estonie, à environ 80 km de la capitale Tallinn. L'île de Ruhnu est un endroit isolé dans le golfe de Livonie, loin du continent (environ 70 km) en direction du sud-ouest. Quel que soit leur emplacement, les deux endroits sont extrêmement prisés des habitants et des touristes pendant la haute saison (de mai à septembre). La dynamique de ces paysages côtiers a été observée dans le cadre du Programme National de Surveillance de l'Environnement et les résultats sont utilisés dans les plans de gestion.

Le site d'étude de Keibu est bien exposé à la mer. La région de Keibu est l'une des plus grandes zones de dunes d'Estonie et est réputée pour ses plages de sable fin. Cette partie de la côte est constituée d'une plage de sable typique avec des dunes et des dépressions entre elles.

Le site d'étude de Ruhnu est situé sur la côte est de l'île de Ruhnu qui se caractérise par des formes de relief plus élevées comme des dunes couvertes de pinède. La plage la plus visitée de l'île se trouve à proximité du site d'étude et est soumise à des influences anthropiques plus importantes.

Matériel et méthodes

La présente étude est basée sur les résultats des travaux de terrain, des cartes existantes et des jeux de données. Nous avons comparé des cartes géomorphologiques et topographiques à des photographies aériennes et des orthophotos puis analysé les changements dans la couverture terrestre.

Le travail de terrain a eu lieu en septembre 2007 et juin 2013 à Keibu et en août 2012 à Ruhnu. Nous avons utilisé les mêmes positions de profils de paysage que dans le Programme National de Surveillance de l'Environnement, en nous concentrant sur des habitats spécifiques. Les relations entre les composantes du paysage et la diversité biologique sont illustrées dans les profils de paysage (Kont *et al.*, 2016). Les changements de la couverture terrestre peuvent être retracés jusqu'au début du siècle dernier, ce qui révèle l'évolution dans l'utilisation des terres ainsi que dans la structure du paysage (Rivis *et al.*, 2016).

Deux profils orthogonaux au rivage ont été sélectionnés afin d'étudier

la zonation des dunes. La longueur des profils varie en fonction de la morphologie du paysage de dunes côtières. La méthode du profil de paysage révèle les modèles de paysage et les relations entre les composants et exprime toute la structure spatiale. Les paysages de dunes côtières sont constitués d'habitats fortement exposés à des facteurs géographiquement limités et à la pression anthropique. Des points d'échantillonnage le long des profils de paysage ont été sélectionnés et étudiés, notamment l'échantillonnage de différents horizons pédologiques et la collecte de données géobotaniques. Le pourcentage de couverture de chaque espèce de plante vasculaire a été estimé visuellement dans des parcelles de 1 m x 1 m. La couverture des espèces de lichen et de mousse a également été déterminée.

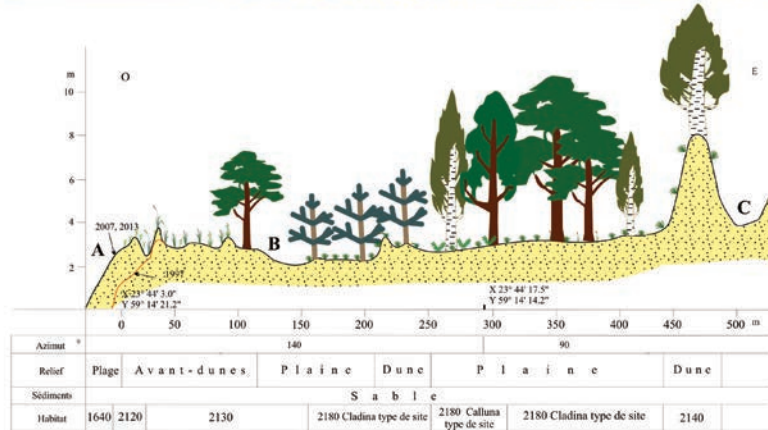
Des échantillons de sédiments ont été recueillis pour l'analyse des gisements minéraux et des sols le long des profils de paysages. Les échantillons ont été prélevés dans les couches supérieures proches de la surface (profondeur de 1 à 20 cm) car le matériau de base était plutôt homogène. La taille des grains a été déterminée par tamisage à sec des sédiments. Les échantillons de sédiments ont été séchés dans un four à 105 °C jusqu'à atteindre un poids constant. Les échantillons secs ont été tamisés pendant 15 minutes à l'aide de l'agitateur automatique Vibratory Sieve-Shaker « Analysette 3 » équipé d'un jeu de tamis standard sur une échelle d'intervalle de > 63, 63, 100, 250, 500, 1000 et 2000 µm. Les poids des sédiments retenus dans chaque tamis ont été convertis en pourcentage du total des sédiments tamisés.

Résultats et discussion

Le profil de paysage de Keibu est d'environ 500 m de long et la hauteur



Figure 4 : Profil de paysage de Keibu.
Types d'habitat :
1640 - plages de sable boréales à végétation pérenne ; 2120 - dunes blanches ; 2130 - dunes grises ; 2180 - dunes boisées.
A - Plage de Keibu.
B - Dunes grises avec traces de véhicules. C - Dunes fixées décalcifées avec *Empetrum nigrum*.



maximale est de 8 m au-dessus du niveau marin (figure 4). Le profil se caractérise par une plage de sable, des dunes blanches et grises, des plaines sablonneuses et des dunes boisées où une étude plus détaillée a eu lieu dans le but d'évaluer le caractère et les vulnérabilités de la végétation. La couverture totale des espèces de plantes vasculaires par rapport aux autres sites de surveillance est plutôt faible en raison des facteurs environnementaux (Ratas, 2007). L'élévation rapide du littoral est caractérisée par la présence de communautés végétales typiques dans la zone saline (zone d'influence des vagues et des éclaboussures). Des communautés végétales nitrophiles se sont développées sur les masses d'algues soumises à l'impact direct des vagues. Dans la zone saline des plages de sable fin, les espèces les plus courantes sont le pourpier de mer (*Honckenya peploides*), la salicorne (*Salsola kali*) et la roquette de mer (*Cakile maritima*), qui sont moins permanentes en raison de la proximité de la mer. Cependant, les communautés de la zone supra saline sont généralement bien développées et

riches en espèces (principalement des lichens et des mousses).

Le profil de paysage de Ruhnu est d'environ 250 m de long et la hauteur maximale est de 11 m au-dessus du niveau marin (figure 5). La zone de surveillance se caractérise par des avant-dunes, une plaine sablonneuse et des dunes distinctes (Ratas, 2003). Les espèces de plantes vasculaires caractéristiques sont le pourpier de mer (*Honckenya peploides*), le seigle de mer (*Leymus arenarius*), l'oyat (*Ammophila arenaria*), le gaillet jaune (*Galium verum*), la laîche des sables (*Carex arenaria*) et la koélerie bleue (*Koeleria glauca*). Les espèces de lichens dominantes sont le lichen des rennes (*Cladina arbuscula*) et le lichen à cornes lisses (*Cladonia gracilis*).

Habitats

À Keibu, les plages sablonneuses de la Baltique boréale à la végétation éparse et permanente (type d'habitat 1640) sont fortement influencées par des processus littoraux dynamiques. Une

Risques naturels et fragilités des paysages dynamiques de dunes côtières

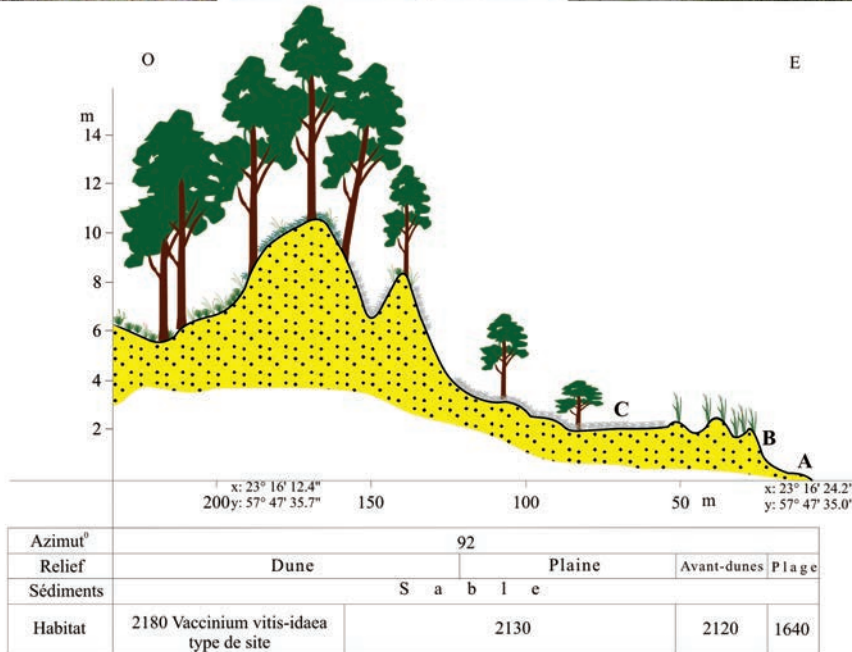


Figure 5 : Profil de paysage de Ruhnu.
Types d'habitat :
1640 - plages de sable boréales à végétation pérenne ;
2120 - dunes blanches ;
2130 - dunes grises ;
2180 - dunes boisées.
A- Plage de Ruhnu. B- Forte érosion des avant-dunes. C- Dunes grises avec mousses et lichens en abondance.

plage de sable est située à proximité immédiate de la bande côtière, elle est dominée par des parcelles de *Honckenia peploides* dont la couverture totale varie entre 10 à 35 %, accompagnées par des *Atriplex littoralis*, *Salsola kali* et des *Cakile maritima*. Les sédiments de la plage actuelle sont principalement des grains de sable moyens (250–500 µm) et fins (100–250 µm).

Les plantes avoisinant les dunes blanches (type d'habitat 2120) sont relativement faibles en espèces : *Honckenia peploides* (4–10 %), *Leymus arenarius* (2–5 %) et *Festuca arenarius* (2–3 %). Les dunes blanches sont composées de grains de sable moyens (250–500 µm) et fins (100–250 µm), les particules plus grossières étant rares. La végétation est exposée aux effets de l'activité humaine, principalement aux

piétinements. Des ondes de tempête causent des changements rapides à la couverture végétale puisque les vagues sont portées plus loin dans les terres. Les hivers sans gels contribuent également aux processus d'érosion.

Les dunes littorales fixes avec une végétation herbacée (type d'habitat 2130) sont aussi connues sous le nom de dunes grises et représentent l'étape suivante du complexe écologique. Les dunes littorales grises sont couvertes d'espèces caractéristiques telles que *Jasione montana* (5–20 %), *Honckenia peploides* (5–20 %) et *Ammophila arenaria* (5 %). Les espèces de lichens, et principalement celles des genres *Cladonia* et *Cladina* se développent partout sur les dunes grises. Les espèces de mousses dominantes sont les *Ceratodon purpureus* et *Polytrichum*



piliferum. Les *Cladonia cornuta*, *Cladina arbuscula*, *Cladonia rangiformis* et *Cladonia pyxidata* constituent la couche de lichen. Les portions de sable des dunes grises sont similaires à celles des plages et des dunes blanches. Les zones intérieures sont caractérisées par différentes dunes boisées (type d'habitat 2180) (type de milieu forestier *Cladina* et *Calluna*) typiques des zones côtières fortes en valeur récréative. La dune la plus haute à la fin du profil est couverte par le type d'habitat 2140, appelé dune fixée décalcifiée avec *Empetrum nigrum*.

Dans le site d'étude de Ruhnu, la plage sablonneuse est fortement influencée par la mer. L'érosion active a réduit le domaine d'espèces caractéristiques telles que les *Honckenya peploides*. La *Cakile maritima* avec une couverture totale de 2-6 % est l'espèce dominante de la plage. La plage actuelle est constituée de portions de sable moyen (250-500 µm) et fin (100-250 µm). Les dunes littorales blanches sont aussi affectées par une forte érosion. Les espèces dominantes sont avant tout l'*Ammophila arenaria* (25-30 %), suivie de *Hieracium umbellatum* L. (10-20 %) et de la *Carex arenaria* (1-5 %). La distribution des fractions de sédiments est similaire à celle de la plage. Les dunes grises sont couvertes d'espèces de lichens et de mousses avec une couverture totale atteignant 80 %. Les espèces dominantes de plantes vasculaires sont : *Hieracium umbellatum* L. (10-20 %), *Jasione montana* (5-10 %), *Koeleria glauca* (7-15 %) et *Festuca polesica* (5-10 %). Peu de jeunes pins poussent dans la zone ce qui démontre une tendance générale à l'afforestation dans ces paysages. Les particules de sable moyen (250-500 µm) dominent légèrement les grains fins (100-250 µm) dans les dunes grises. La zone intérieure est caractérisée par différentes dunes boisées (type d'habitat 2180) avec un

type de milieu forestier *Vaccinium vitis-idaea* typique des zones côtières aux conditions récréatives excellentes.

Changements dans l'occupation des sols

La fragmentation du paysage reflète la variation spatiale de l'occupation des sols. Des changements causés par les humains se reflètent dans l'occupation des sols et sont façonnés par elle. Une comparaison des sites de Keibu et de Ruhnu montre comment les paysages évoluent dans le temps sous l'effet des changements socio-économiques, y compris des transferts de propriété des terres, ... L'occupation des sols de Keibu est dominée par la forêt depuis le début du XX^e siècle (figure 6). Au cours du siècle dernier, plusieurs perturbations ont eu lieu, notamment des feux de forêt, des chablis causés par des tempêtes violentes, et la plantation de forêt avec de la machinerie lourde. De telles perturbations ont entraîné des changements conséquents dans la forêt (structure, âge du peuplement, composition des espèces) et dans le développement global du paysage. Les dunes littorales sont particulièrement vulnérables en raison de la sécheresse des dunes dans des conditions météorologiques favorisant les feux de forêt. La régénération est longue due aux conditions difficiles.

La part de forêt (figure 6) est restée plus ou moins stable ces dernières décennies, ce qui indique qu'il n'y a pas eu de changements majeurs dans les paysages protégés sur une courte période, sauf en cas d'exploitation forestière ou de feux de forêt. Par conséquent, des plans de protection et de gestion appropriés aident à préserver les forêts littorales. L'augmentation de la forêt diminue la part des paysages ouverts. De ce fait, le paysage devient plus homogène.

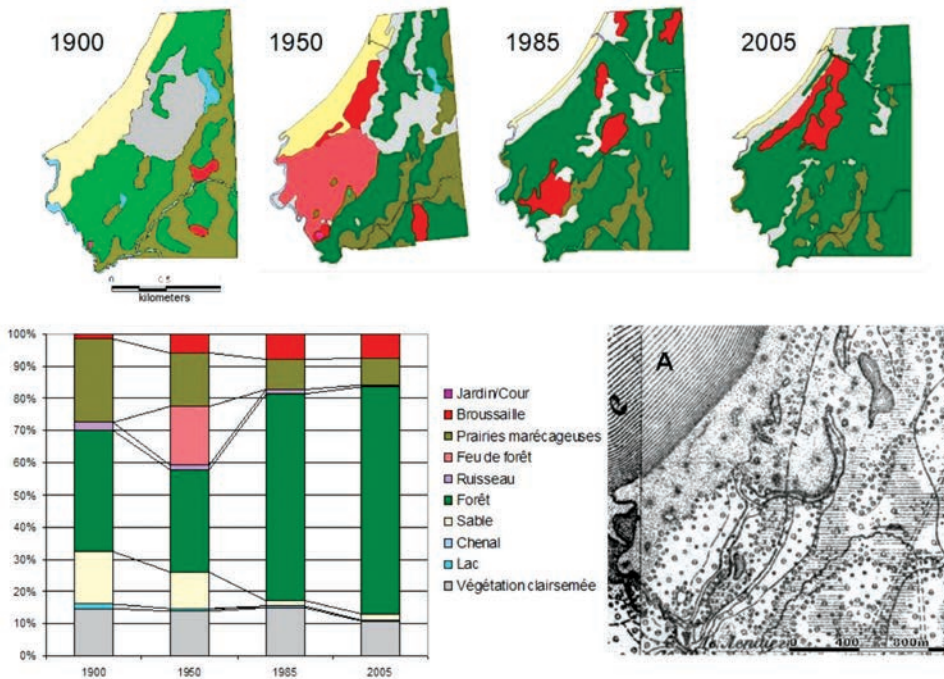


Figure 6 : Les changements dans l'occupation des sols de Keibu de 1900 à 2005
A- Exemple de la zone d'étude du site de Keibu sur 1 verste russe (1067 km) cartes de 1894 à 1922 (échelle 1/42 000).

Une tendance importante est celle de la baisse des zones de sable ouvertes (figure 6) due au développement de la végétation et au boisement. Des zones d'érosion sableuse ont été contrôlées en plantant des *Pinus sylvestris* et aussi des *Pinus mugo*. L'expansion des terrains forestiers a diminué la part des territoires à la végétation éparse, ce qui limite les différentes zones d'habitat et défavorise leur développement futur.

La tendance générale des changements dans l'occupation des sols de Keibu est la suivante : diminution des prés marécageux, des zones de sable ouvertes et à la végétation éparse, ainsi qu'une croissance de la forêt.

L'occupation des sols de Ruhnu montre des tendances similaires de développement. Au XX^e siècle, le territoire était couvert principalement de forêts de pins. Un changement majeur dans la structure des forêts a été causé par une tempête en 1969 qui a entraîné de nombreux chablis, ceux-ci survenant assez fréquemment dans les forêts de

dunes littorales. L'occupation des sols actuelle se caractérise donc par des zones de sable ouvertes et forestières qui sont les intérêts principaux.

La diversité du paysage a diminué en raison de la cessation de l'utilisation des sols par les humains et la prédominance des processus naturels. Les changements dans les paysages sont principalement provoqués par des phénomènes naturels par lesquels des agents environnementaux extrêmes agissent comme des facteurs limitatifs dans le développement de la végétation. À l'avenir, les principaux changements du paysage seront surtout dépendants de l'usage récréatif de l'île. Les possibilités d'utilisation de ces sols dépendent avant tout des couvertures végétales du sol ainsi que de la diversité du paysage.

Les milieux littoraux étaient plus variés durant des périodes d'utilisation modérée des sols. Ainsi, ce sont les zones côtières agricoles qui ont le plus changé en fonction des tendances socio-économiques. La disparition des



activités humaines habituelles comme par exemple la récolte, le fauchage et le pâturage, a entraîné une croissance démesurée des roselières, arbustes ou forêts dans les anciens milieux ouverts. Les zones littorales boisées ont été moins affectées en raison de la pauvreté des sols sablonneux en nutriments.

Les sites d'étude sont caractérisés par des sables avec une faible teneur en CaCO_3 , ce qui est courant dans cette région. Dans des paysages dynamiques de dunes littorales, la teneur initiale du sable en carbonate et les conditions météorologiques contrôlent le taux de décalcification. Les teneurs en matières organiques et en calcium mais également la taille des grains sont les facteurs principaux qui déterminent la capacité du sable à retenir l'eau. Le pH du sol affecte les processus de décomposition et le flux de nutriments. Du littoral à l'intérieur des terres, le pH s'atténue et passe de 6,2 à 4,3. Le sable bouillant des dunes grises a diminué en raison de la couverture végétale atteignant jusqu'à 95 % (surtout du recouvrement par les lichens et mousses). Les perturbations dans la couverture végétale directement impactée par des facteurs anthropogéniques (piétinements, véhicules) ont entraîné la mobilité du sable.

Gestion et conservation

Diverses études ont montré que la végétation des dunes est particulièrement sensible aux piétinements des humains (Stancheva *et al.*, 2011 ; Santoro *et al.*, 2012) qui conduit à une destruction partielle ou totale de la végétation mais également au compactage du sol. Cela augmente la densité du sol et diminue sa porosité, une condition défavorable avant tout pour les communautés végétales des dunes mobiles qui sont adaptées à l'instabilité du substrat et à l'ensablement (Maun, 2004). De plus, une hausse du niveau marin

pourrait affecter les systèmes de dunes en stimulant l'érosion des systèmes dunaires.

Une combinaison très diverse de forces motrices, de spécificités locales ou régionales, d'interactions entre les processus et les mécanismes de rétroaction pourrait indiquer une complexité insurmontable. Chaque site possède sa propre nature et la politique de gestion devrait incorporer cette spécificité. L'érosion est le facteur de perturbation le plus important, causant des altérations structurelles dans la distribution spatiale typique des communautés végétales dunaires. La conciliation des deux éléments que sont l'augmentation du développement de la fin des stades de la succession et la biodiversité menacée des habitats côtiers ouverts nécessitera une stratégie applicable pour préserver une mosaïque d'habitats. Cela peut se faire au sein de chaque site, mais il faudrait également prendre en compte la présence d'habitats sur d'autres échelles. L'étendue optimale dépend en partie des habitats présentant un intérêt, et devrait considérer et comporter certaines caractéristiques d'espèces telle que la capacité de dispersion mais aussi des questions à échelle plus locale comme le type de sol, la géomorphologie et les facteurs plus généraux du milieu tels que le climat (Provoost *et al.*, 2011).

Une meilleure coordination est nécessaire entre les administrations nationales, régionales et locales afin de s'assurer que les stratégies d'aménagement n'ignorent pas les valeurs naturelles des systèmes dunaires et du développement naturel.

Conclusions

Les environnements côtiers ont besoin d'un contrôle pour évaluer le niveau des changements afin de créer des plans

de conservation et des méthodes de gestion basés sur des connaissances pour entretenir ces milieux. En tenant compte des changements climatiques constants, des ondes de tempête plus hautes ..., les modifications des habitats dans ces écosystèmes sont évidentes. Par conséquent, pour comprendre les incertitudes des prévisions du développement paysager, il est essentiel d'introduire des outils complets et inédits dans les processus décisionnels liés à la gestion des zones côtières. L'un de ces outils est le *Systems Approach Framework* (SAF) qui fournit des lignes directrices structurées afin d'intégrer la science aux prises de décision dans la gestion des littoraux. Il faut impliquer des managers, législateurs, intervenants et scientifiques afin de gérer l'utilisation des systèmes côtiers de manière écologiquement durable, efficace économiquement et assurant l'équité sociale.

Remerciements

Cet article a été soutenu par le projet ciblé financé n°SF0280009s07, subventionné par le Ministère estonien de l'Éducation et de la Recherche ainsi que par les subventions n°7564, 8549, 9191 de la Fondation estonienne pour la Science, « Études des environnements naturels et artificiels » du centre d'excellence de l'université de Tallinn et du projet EstKliima du programme n°3.2.0802.11-0043 des Fonds européens régionaux.

Cette recherche a été soutenue par les Études doctorales du Fonds social européen et le programme d'internationalisation DoRa, mené par la Fondation Archimedes.



Bibliographie

- Anderson A., Ratas U., Rivis R., Palginõmm V., 2012.** Relationship between coastline changes and dynamics of coastal ecosystems of Tahkuna Peninsula, Estonia. Proceedings of IEEE/OES Baltic 2012 International Symposium, 1–6.
- Carboni M., Carranza M.L., Acosta A.T.R., 2009.** Assessing conservation status on coastal dunes: a multiscale approach. *Landscape and Urban Planning*, 91, 17–25.
- Ciccarelli D., Bacaro G., Chiarucci A., 2012.** Coastline dune vegetation dynamics: evidence of no stability. *Folia Geobotanica*, 47, 263–275.
- Ciccarelli D., 2014.** Mediterranean Coastal Sand Dune Vegetation: Influence of Natural and Anthropogenic Factors. *Environmental Management*, 54, 194–204.
- Development of relevant criteria and monitoring methodology of favourable conservation status of the coastal (terrestrial) habitats** (EU Nature Directive Annex 1: 1210, 1220, 1230, 1310, 1620, 1640, 2110, 2120, 2130, 2140, 2190 and 2320) in Estonia., 2016. Tallinn University Institute of Ecology.
- Doody J.P. (Ed.), 1991.** *Sand Dune Inventory of Europe*. Joint Nature Conservation Committee, Peterborough; the European Union for Coastal Conservation, Leiden, 80p.
- Doody J.P., 2005.** Sand Dune Inventory of Europe. In: Herrier, J.L., Mees, J., Salman, A., Seys, J., Van Nieuwenhuysse, H. and Dobbelaere, I. (Eds.), Proceedings "Dunes and Estuaries 2005" – International Conference on Nature Restoration Practices in European Coastal Habitats. Koksijde, Belgium, 19-23 September 2005. *VLIZ Special Publication* 19, 45-54.
- Isermann M., 2005.** Soil pH and species-diversity in coastal dunes. *Plant Ecology*, 178, 111–120.
- Jaagus J., 2006.** Climatic changes in Estonia during the second half of the 20th century in relationship with changes in large-scale atmospheric circulation. *Theoretical and Applied Climatology*, 83, 77-88.
- Kall T., Liibus A., Wan J., Raamat R., 2016.** Vertical crustal movements in Estonia determined from precise levellings and observations of the level of Lake Peipsi. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 65 (1), 27–47.
- Kont A., Endjärv E., Jaagus J., Lode E., Orviku K., Ratas U., Rivis R., Suursaar Ü., Tõnisson H., 2007.** Impact of climate change on Estonian coastal and inland wetlands — a summary with new results. *Boreal Environment Research*, 12, 653-671.
- Kont A., Jaagus J., Orviku K., Palginõmm V., Ratas U., Rivis R., Suursaar Ü., Tõnisson H., 2011.** Natural development and human activities on Saaremaa Island (Estonia) in the context of climate change and integrated coastal zone management. In: Schernewski, G., Hofstede, J., Neumann, T. (Eds.). *Global change and Baltic coastal zones*, Springer, 117-134.
- Kont A., Ratas U., Rivis R., Vilumaa K., Anderson A., Tõnisson H., 2016.** *Application of Complex Profile Method in Insular Landscape Studies in Estonia*. In: Halada, L., Baca, A., Boltziar, M. (Eds.), Proceedings of Landscape and Landscape Ecology: 17th International Symposium on Landscape Ecology - Landscape and Landscape Ecology, Nitra, SLOVAKIA, MAY 27-29, 2015. Slovak Acad Sci, Inst Landscape Ecol, Bratislava: Slovak Academy of Sciences, 83–93.
- Martinez M.L., Maun M.A., Psuty N.P., 2004.** *The fragility and conservation of the world's coastal dunes: Geomorphological, ecological, and socioeconomic perspectives*. In: Coastal Dunes Ecology and Conservation. Martínez, M.L., Psuty, N.P. (Eds.), Springer. Berlin. pp. 355-369.
- Maun M.A. 2004.** *Burial of Plants as a Selective Force in Sand Dunes*. In: Coastal Dunes Ecology and Conservation. Martínez, M.L., Psuty, N.P. (Eds.), Springer. Berlin. pp 119-135.
- Orviku K., 1992.** *Characterization and evolution of Estonian seashores*. Doctoral Thesis. University of Tartu.
- Orviku K., Jaagus J., Kont A., Ratas U., Rivis R., 2003.** Increasing activity of coastal processes associated with climate change in Estonia. *Journal of Coastal Research*, 19, 364-375.
- Orviku K., Suursaar Ü., Tõnisson H., Kullas T., Rivis R., Kont A., 2009.** Coastal changes in Saaremaa Island, Estonia, caused by winter storms in 1999, 2001, 2005 and 2007. *Journal of Coastal Research*, SI 56, 1651-1655.

- Palginõmm V., Orviku K., Suursaar Ü., Kont A., Tõnisson H., Rivis R., 2018.** Lessons Learned from Record-High Storm Surges and Associated Inundations in Pärnu, SW Estonia. *Journal of Coastal Research*, 1391–1395.
- Provoost S., Ampe C., Bonte D., Cosyns E., Hoffmann M., 2004.** Ecology, management and monitoring of grey dunes in Flanders. *Journal of Coastal Conservation*, 10, 33-42.
- Provoost S., Laurence M., Jones M., Edmondson S. E., 2011.** Changes in landscape and vegetation of coastal dunes in northwest Europe: a review. *Journal of Coastal Conservation*, 15, 207–226.
- Psuty N.P., 2004.** *The Coastal Fore-dune: A Morphological Basis for Regional Coastal Dune Development*. In: Coastal Dunes Ecology and Conservation. Martinez, M.L., Psuty, N.P. (Eds.), Springer. Berlin. Pp 11-27.
- Ratas U. 2003.** *Rannikumaastike seire aastaaruanne (Coastal landscape monitoring report)*. Tallinn. Tallinna Pedagoogikaülikool ökoloogia instituut, 25 p.
- Ratas U. 2007.** *Rannikumaastike seire aastaaruanne (Coastal landscape monitoring report)*. Tallinn. Tallinna Ülikool ökoloogia instituut, 27 p.
- Ratas U., Rivis R., Truus L., Vilumaa K., Multer L., Anderson A., 2011.** The aeolian coastal ecosystems of Estonia and their changes. *Journal of Coastal Research*, SI 64, 430 – 434.
- Rivis R., Kont A., Ratas U., Palginõmm V., Antso K., Tõnisson H., 2016.** Trends in the development of Estonian coastal land cover and landscapes caused by natural changes and human impact. *Journal of Coastal Conservation*, 20 (3), 199–209.
- Santoro R., Jucker T., Prisco I., Carboni M., Battisti C., Acosta A. T. R., 2012.** Effects of trampling limitation on coastal dune plant communities. *Environmental Management*, 49, 534–542.
- Stancheva M., Ratas U., Orviku K., Palazov A., Rivis R., Kont A., Peychev V., Tõnisson H., Stanchev H., 2011.** Sand dune destruction due to increased human impacts along the Bulgarian Black Sea and Estonian Baltic Sea coasts. *Journal of Coastal Research*, SI 64, 324-328.
- Tõnisson H., Suursaar Ü., Orviku K., Jaagus J., Kont A., Willis D.A., Rivis R., 2011.** Changes in coastal processes in relation to changes in large-scale atmospheric circulation, wave parameters and sea levels in Estonia. *Journal of Coastal Research*, SI64-1, 701-705.
- Tõnisson H., Kont A., Orviku K., Suursaar Ü., Rivis R., Palginõmm V., 2018.** Application of System Approach Framework for Coastal Zone Management in Pärnu, SW Estonia. *Journal of Coastal Conservation*, 1-12.
- Vallner L., Sildvee H., Torim A., 1988.** Recent crustal movements in Estonia. *Journal of Geodynamics*, 9, 215-223.
- Vestergaard P. 1997.** Possible impact of sea-level rise on some habitat types at the Baltic coast of Denmark. *Journal of Coastal Conservation*, 3, 103-112.
- Wiedemann A.M., Pickart A.J., 2004.** *Temperate Zone Coastal Dunes*. In: Coastal Dunes Ecology and Conservation. Martinez, M.L., Psuty, N.P. (Eds.), Springer. Berlin. pp. 53-65.