



PATRIMOINE
NATUREL

CENTRE D'EXPERTISE ET DE DONNÉES
OFB • CNRS • MNHN

Développement d'un indicateur
de qualité écologique
dans le cadre du *Life*
ADAPTO

– Rapport final –
Site des Vieux Salins d'Hyères

Novembre 2022



Conservatoire du
littoral



Avec le soutien de Union européenne, Office français pour la biodiversité,
Agences de l'eau, Fondation de France, Fondation Total

PATRINAT

Centre d'expertise et de données sur le patrimoine naturel

Un service commun de
l'Office français de la biodiversité,
du Centre national de la recherche scientifique
et du Muséum national d'Histoire naturelle



www.ofb.gouv.fr



www.cnrs.fr



www.mnhn.fr

Nom du Programme : *Life Adapto*

Convention : Conservatoire du Littoral / Muséum national d'Histoire naturelle

Chargée de mission : Marianne Debue

Experts mobilisés : Lucille Billon, Rémy Poncet, Yorick Reyjol

Référence du rapport conseillée : Debue M., Billon L., Poncet R., Reyjol Y. (2022). Développement d'un indicateur de qualité écologique dans le cadre du *Life Adapto*. Rapport final – Site des Vieux Salins d'Hyères, PatriNat (OFB-MNHN-CNRS)

PatriNat

Centre d'expertise et de données sur le patrimoine naturel



Depuis janvier 2017, PatriNat assure des missions d'expertise et de gestion des connaissances pour ses trois tutelles, que sont l'Office français de la biodiversité (OFB), le Centre national de la recherche scientifique (CNRS), et le Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN).

Son objectif est de fournir une expertise fondée, d'une part, sur la collecte et l'analyse de données de la biodiversité marine et terrestre et de la géodiversité présentes sur le territoire français, en métropole comme en outre-mer, et, d'autre part, sur la maîtrise et l'apport de nouvelles connaissances en écologie, sciences de l'évolution et anthropologie. Cette expertise, établie sur une approche scientifique, doit contribuer à faire émerger les questions et à proposer les réponses permettant d'améliorer les politiques publiques portant sur la biodiversité, la géodiversité et leurs relations avec les sociétés et les humains.

En savoir plus : patrinat.fr

Co-directeurs :

Laurent PONCET et Julien TOUROULT

Inventaire national du patrimoine naturel



Porté par PatriNat, cet inventaire est l'aboutissement d'une démarche qui associe scientifiques, collectivités territoriales, naturalistes et associations de protection de la nature, en vue d'établir une synthèse sur le patrimoine naturel en France. Les données fournies par les partenaires sont organisées, gérées, validées et diffusées par le MNHN. L'INPN est un dispositif clé du Système d'information de l'inventaire du patrimoine naturel (SINP) et de l'Observatoire national de la biodiversité (ONB).

Afin de gérer cette importante source d'informations, le MNHN a construit une base de données permettant d'unifier les données à l'aide de référentiels taxonomiques, géographiques et administratifs. Il est ainsi possible d'accéder à des listes d'espèces par commune, par espace protégé ou par maille de 10x10 km. Grâce à ces systèmes de référence, il est possible de produire des synthèses, quelle que soit la source d'information.

Ce système d'information permet de consolider des informations qui étaient jusqu'à présent dispersées. Il concerne la métropole et l'outre-mer, aussi bien sur la partie terrestre que marine. C'est une contribution majeure pour la connaissance naturaliste, l'expertise, la recherche en macroécologie et l'élaboration de stratégies de conservation efficaces du patrimoine naturel.

En savoir plus : inpn.mnhn.fr

SOMMAIRE

Liste des figures	3
Liste des tableaux	3
Introduction	4
1. Présentation du site	5
2. Cartographie des habitats	6
2.1. Typologie des habitats	6
2.2. Cartographie des habitats par télédétection	7
2.2.1. Etape 1 : Choix de l'image à modéliser	7
2.2.2. Etape 2 : Création d'une première couche de polygones	7
2.2.3. Etape 3 : Réalisation d'une première modélisation	8
2.2.4. Etape 4 : Création d'une seconde couche de polygones	8
2.2.5. Etape 5 : Phase de vérification « terrain » des prédictions du modèle et réalisation de relevés complémentaires	9
2.2.6. Etape 6 : Réalisation d'une seconde modélisation	9
2.2.7. Etape 7 : Evaluation de la modélisation	11
3. Indicateur : présentation et mise en œuvre	12
3.1. Objectifs et principes	12
3.2. Interprétation du diagramme radar	12
3.3. Limites de l'indicateur	13
3.4. En savoir plus... ..	13
3.5. Mise en œuvre de l'indicateur sur le site des Vieux Salins	14
3.5.1. Cartographies utilisées	14
3.5.2. Matrice de capacité biologique	14
3.5.3. Calcul et interprétation de l'indicateur	16
Conclusion	19

Liste des figures

Figure 1 : LIFE Adapto : Sites d'études et Axes de travail	4
Figure 2 : Localisation du site des Vieux Salins d'Hyères.....	5
Figure 3 : Illustration des habitats des Vieux Salins (2019)	5
Figure 4 : Scénario étudié sur le site des Vieux Salins	5
Figure 5 : Image composite utilisée.....	7
Figure 6 : Première couche de polygones	8
Figure 7 : Résultat de la première modélisation	8
Figure 8 : Seconde couche de polygones	8
Figure 9 : Cartographie actuelle des habitats obtenue par télédétection	10
Figure 10 : Schéma de construction de l'indicateur	12
Figure 11 : Cartographie des habitats des Vieux Salins (situation actuelle et à 2100, scénario 1 et 2)	15
Figure 12 : Evolution des superficies et diagramme radar pour le site des Vieux Salins	18

Liste des tableaux

Tableau 1 : Matrice de confusion	11
Tableau 2 : Matrice de capacité biologique	17

Introduction

Le *Life Adapto* (www.lifeadapto.eu) est un programme de cinq ans (2017-2022) mené par le Conservatoire du Littoral, qui cherche à explorer des modes de gestion souple du trait de côte dans un contexte de changement climatique et de montée du niveau des mers. Ce projet s'appuie sur dix sites pilotes répartis sur les façades Manche, Atlantique et Méditerranée. Deux interventions principales sont étudiées : la dépoldérisation pour les sites Manche et Atlantique et la restauration dunaire pour les sites méditerranéens. Les travaux menés s'organisent autour de six axes : l'environnement, les risques naturels, les paysages, l'économie, les perceptions sociales et la pédagogie (Figure 1).

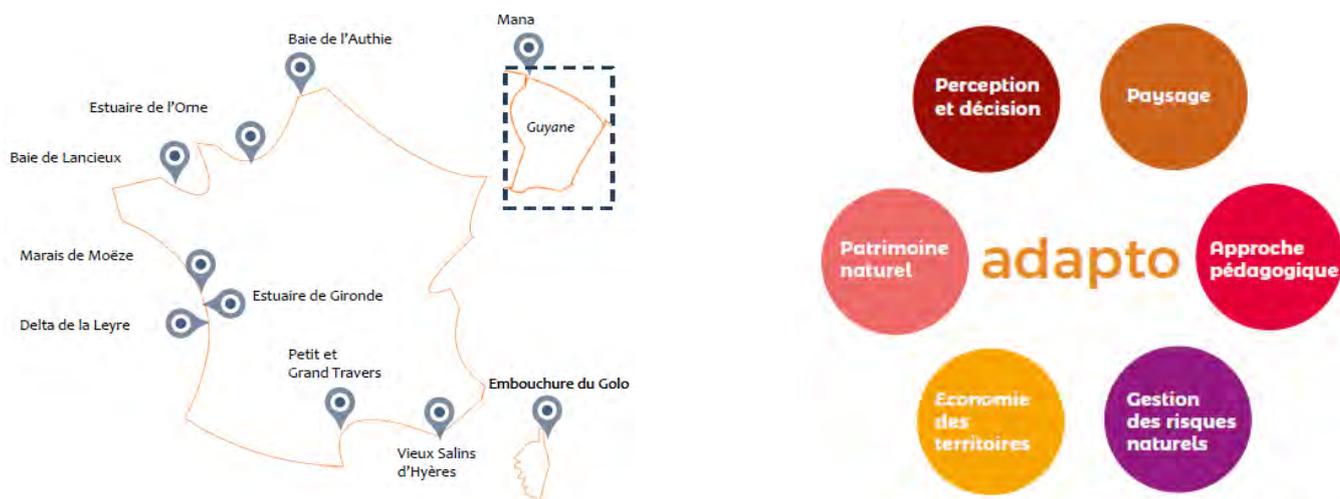


Figure 1 : Life Adapto : Sites d'études et Axes de travail

Dans le cadre de l'axe environnemental, le Muséum national d'Histoire naturelle a été sollicité afin de créer un indicateur de suivi de la biodiversité s'inspirant de l'Indicateur de Qualité Ecologique (IQE) existant précédemment développé par le MNHN mais adapté aux problématiques et milieux littoraux. Le travail réalisé s'est articulé autour de deux axes principaux :

- La réalisation d'une revue systématique sur les conséquences de la dépoldérisation sur la biodiversité ;
- Le développement d'un indicateur de qualité écologique littoral et son application à l'ensemble des sites Adapto métropolitains.

Le présent document constitue le rapport final relatif au travail du Muséum dans le cadre du *Life* sur le site des Vieux Salins d'Hyères. Il est constitué de trois parties : la première décrit rapidement le site et le scénario d'intervention étudié dans ce rapport ; la seconde porte sur la réalisation d'une cartographie des habitats par télédétection ; la dernière partie concerne l'indicateur et présente notamment son principe, son interprétation, ses limites et sa mise en œuvre sur des Vieux Salins d'Hyères.

1. Présentation du site

Le site des Vieux Salins d'Hyères se situe dans le Var, à l'est de Toulon, sur le littoral méditerranéen (Figure 2). La superficie étudiée s'élève à 400ha. Le front de mer est constitué d'un cordon dunaire prolongé à l'est par un enrochement. En arrière, le site est composé d'une succession de bassins, témoins d'une activité salicole en cours jusqu'au XX^e siècle, ainsi que d'un étang (l'étang de l'Anglais) et d'une pinède. Un réseau de canaux permet de gérer les niveaux d'eau et de contrôler l'alimentation des bassins en eau de mer (Figure 3). Une partie du cordon dunaire fait l'objet d'une érosion marquée, renforcée par les submersions et le piétinement. Une éventuelle rupture du cordon entraînerait une connexion permanente entre le canal d'alimentation des bassins et la mer, ce qui modifierait l'ensemble du fonctionnement hydraulique du site et impacterait notamment son rôle d'accueil de l'avifaune.



Figure 2 : Localisation du site des Vieux Salins d'Hyères



Figure 3 : Illustration des habitats des Vieux Salins (2019)

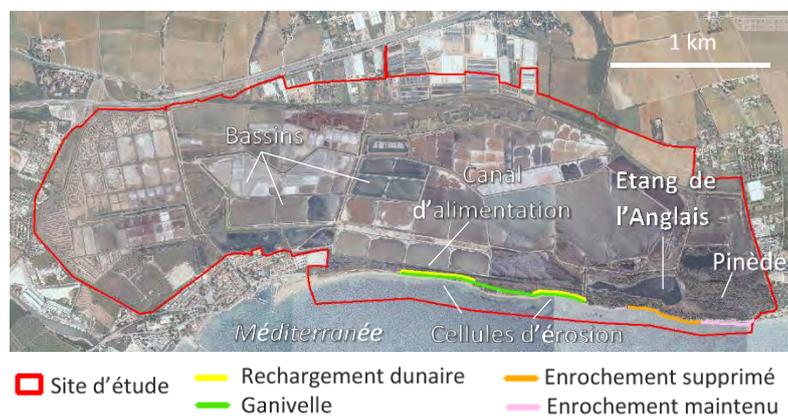


Figure 4 : Scénario étudié sur le site des Vieux Salins
Fond cartographique : BD ORTHO® IGN

Le scénario étudié est présenté en Figure 4, correspondant à une suppression d'une partie de l'enrochement au droit de l'Etang de l'Anglais afin de décaler les cellules d'érosion à l'est du canal d'alimentation, et à un rechargement dunaire associé à la mise en place de ganivelles au niveau des zones de fragilité du cordon. Ces mesures ont été réalisées pendant le Life.

2. Cartographie des habitats

2.1. Typologie des habitats

Une cartographie des habitats par télédétection a été réalisée. Elle a été faite dans une typologie définie qui est la suivante :

- **1 Eau** : Milieu aquatique salé ou saumâtre, végétalisé ou non
- **2 Sédiment intertidal** : Milieu sableux ou vaseux, dépourvu de plantes vasculaires, soumis au balancement des marées (zone intertidale)
- **3 Roselières** : Milieu occupé par de larges hélophytes (phragmitaie, typhaie, scirpaie...)
- **7 Pré-salé** : Marais salé périodiquement inondé (avec *Juncus acutus*, *Juncus maritimus*, *Arthrocnemum*, *Sarcocornia*, *Salicornia*...)
- **8 Dunes blanches** : Milieu sableux mobile, nus ou occupés par des pelouses ouvertes, non submergés ou seulement à marée haute (haut de l'estran, dune mobile, dune blanche)
- **9 Dunes grises** : Milieu sableux fixé, stabilisé et colonisé par des pelouses pérennes plus ou moins fermées
- **10 Boisements humides** : Boisement fortement marqué par la présence d'eau, qui peut saturer le sol (formation riveraine de saules, aulnaie...)
- **11 Boisements mésophiles** : Autres boisements (chênaies, pinèdes...)
- **12 Fourrés** : Milieu de transition dominé par une strate arbustive (pruneliers, ronces...)
- **13 Prairies humides** : Milieu avec une végétation herbacée pérenne fortement marquée par la présence d'eau qui peut saturer le sol
- **14 Prairies mésophiles** : Milieu avec une végétation herbacée pérenne non marquée par la présence d'eau, souvent pâturé ou fauché (avec *Poa* spp., *Festuca* spp., *Trifolium* spp...)
- **15 Prairies artificielles** : Prairie permanente semée ou fortement fertilisée (Prairie avec *Lolium perenne*...)
- **16 Cultures** : Champs cultivé (blé, maïs, tournesol...)
- **17 Bâti** : Infrastructure artificielle (bâtiments, parkings, routes...)
- **18 Herbiers aquatiques** : Herbiers de posidonie

Cette typologie a été construite à partir des habitats présents sur les sites Adapto, l'objectif étant d'avoir pour tous ces sites une typologie commune, représentative des habitats présents, simple d'utilisation et avec un nombre limité d'entrées. Les entrées typologiques ont été définies sur la base de deux critères principaux :

- Elles regroupent des habitats ayant des caractéristiques écologiques proches, afin de pouvoir construire une matrice de capacité biologique donnant pour chaque entrée typologique une note (nulle/faible/moyenne/élevée) quant à son importance en matière de diversité, de patrimonialité et de fonctionnalité ;
- Elles regroupent des habitats partageant une réponse spectrale similaire, c'est-à-dire interagissant de manière similaire avec la lumière, afin de pouvoir réaliser des cartographies par télédétection de bonne précision.

2.2. Cartographie des habitats par télédétection

La réalisation d'une cartographie par télédétection a été faite en plusieurs étapes, selon un procédé développé de manière commune aux différents sites Adapto :

1. Construction d'une image composite à modéliser (§2.2.1) ;
2. Création d'une couche d'apprentissage C1 (§2.2.2) ;
3. Réalisation d'une première modélisation à l'aide d'un algorithme et de C1, permettant d'associer à l'ensemble des pixels de l'image un habitat (§2.2.3) ;
4. Création d'une seconde couche de polygones C2 (§2.2.4) ;
5. Vérification lors d'une phase de terrain de la précision de la première modélisation à l'aide de C2 (§2.2.5) ;
6. Réalisation d'une deuxième et dernière modélisation (§2.2.6) à l'aide du même algorithme et de la même image que la première, et d'une combinaison de C1 et de C2 après prise en compte des observations terrain ;
7. Evaluation de la précision de la modélisation (§2.2.7).

2.2.1. Etape 1 : Choix de l'image à modéliser

L'image utilisée est composite et correspond à un empilement de deux types de raster :

- Quatre orthophotographies du site prises en août et octobre 2017, avril 2018 et mai 2019. Ces orthophotographies correspondent à la fusion d'images multispectrales à quatre bandes (rouge, vert, bleu, proche infrarouge), de 6m de résolution spatiale, et d'images panchromatiques, d'1,5m de résolution, toutes acquises par le satellite SPOT6. Elles ont été choisies parmi un nombre limité de vues aériennes du site disponibles sur le site <https://ids.equipex-geosud.fr/> car elles recouvraient l'ensemble du site, étaient relativement récentes et proches dans le temps entre elles, tout en étant acquises à des mois différents, ce qui permet d'améliorer l'apprentissage du modèle ;
- Des indices radiométriques : pour chaque orthophotographie, six indices radiométriques ont été calculés : le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), le Ratio Vegetation Index (RVI), le Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), le Redness Index (RI), le Brightness Index (BI) et le Normalized Difference Water Index (NDWI).

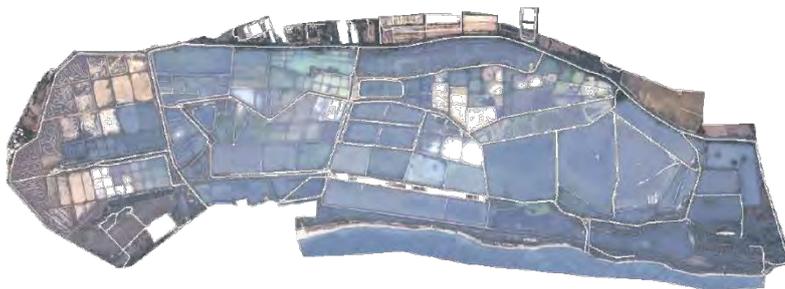


Figure 5 : Image composite utilisée
Il s'agit de la superposition de quatre orthophotographies prises en avril, mai, août et octobre et de leurs six indices radiométriques respectifs.

L'image donnée en entrée au modèle est donc un raster de 40 bandes (Figure 5). Un masque pour le bâti, construit à partir de la base de données TOPO® de l'IGN, a été appliqué à cette image composite pour que les zones de bâti ne soient pas modélisées.

2.2.2. Etape 2 : Création d'une première couche de polygones

A partir de la cartographie d'habitats déjà existante mais un peu ancienne et ayant certaines zones du site non cartographiées (réalisée par le Conservatoire Botanique National Méditerranéen en 2015), une correspondance entre la typologie utilisée et celle présentée précédemment a été réalisée, afin d'obtenir une cartographie selon la typologie définie. Pour chacun des habitats présents, la superficie a été calculée et un nombre de polygones d'apprentissage fonction de cette superficie a été déterminé selon les règles suivantes :

- Une relation linéaire entre la superficie et le nombre de polygones a été établie de telle sorte que l'habitat le moins présent mais recouvrant plus d'un hectare ait 10 polygones d'apprentissage et que l'habitat le plus présent mais recouvrant moins de 20% du site ait 30 polygones d'apprentissage ;

- Un habitat n'a été conservé pour l'apprentissage que si la relation de proportionnalité définie au point précédent lui permettait d'avoir au moins 5 polygones d'apprentissage ;
- 30 polygones d'apprentissage ont été attribués aux habitats recouvrant plus de 20% du site, ainsi qu'aux habitats « Eau » et « Sédiment intertidal » ;
- Aucun polygone d'apprentissage n'a été attribué pour la catégorie « Bâti ».

Les polygones correspondent à des cercles de 5m de rayon. Ils ont été répartis aléatoirement sur l'ensemble du site, distants d'au moins 15m, et entièrement inclus dans les polygones d'habitats correspondants de la cartographie. Cela a permis la création d'une première couche C1 de polygones d'apprentissage (Figure 6).

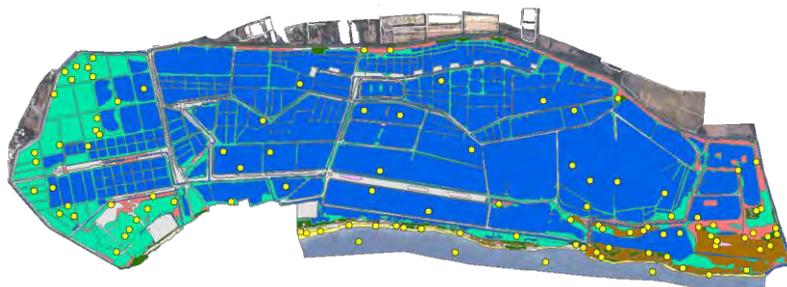


Figure 6 : Première couche de polygones
Les grands polygones correspondent à la cartographie initiale des habitats fournie, ne couvrant qu'une partie du site. Chaque point jaune correspond à un polygone de C1.

2.2.3. Etape 3 : Réalisation d'une première modélisation

Une première modélisation a été réalisée à l'aide du module OrfeoToolBox de QGis, utilisant en entrée l'image composite définie précédemment et la couche d'apprentissage C1.

Une classification par l'algorithme RandomForest a été appliquée avec les paramètres suivants : nombre d'arbres = 100 ; profondeur des arbres = 50 ; nombre d'échantillons minimal à chaque nœud = 10 ; ratio entraînement/validation = 0,2.

Une première cartographie des habitats a été obtenue (Figure 7).

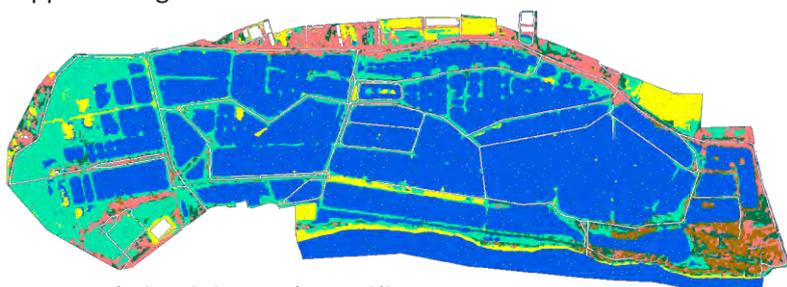


Figure 7 : Résultat de la première modélisation
Chaque couleur correspond à un habitat.

2.2.4. Etape 4 : Création d'une seconde couche de polygones

A partir du résultat de la modélisation, la superficie de chacun des habitats a été à nouveau calculée. Selon le même principe que C1, un échantillonnage aléatoire stratifié a été réalisé pour créer une seconde couche de polygones C2. Le nombre de polygones par catégorie d'habitats a été défini comme suit :

- Une relation linéaire entre la superficie et le nombre de polygones a été établie de telle sorte que l'habitat le moins présent ait 5 polygones de validation et que l'habitat le plus présent en ait 10 ;
- 10 polygones de validation ont été attribués à l'eau et au sédiment intertidal.

Les polygones correspondent à des cercles de 5m de rayon. Ils ont été répartis aléatoirement sur l'ensemble du site, distants d'au moins 15m, et entièrement inclus dans les polygones d'habitats correspondants de la cartographie. Ils diffèrent des polygones de C1 et en sont distants d'au moins 15m. (Figure 8)

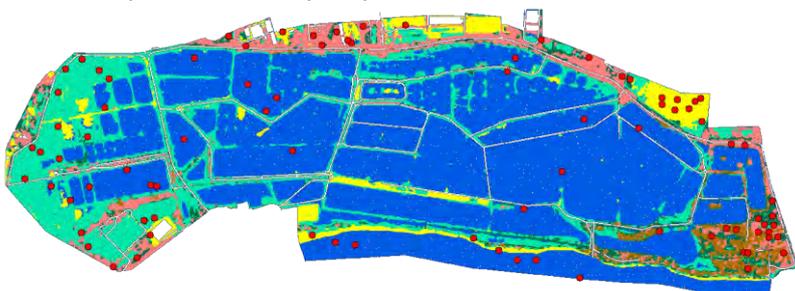


Figure 8 : Seconde couche de polygones
Le fond de carte est le résultat de la première modélisation. Chaque point rouge correspond à un polygone de C2.

2.2.5. Etape 5 : Phase de vérification « terrain » des prédictions du modèle et réalisation de relevés complémentaires

La phase de terrain a consisté à vérifier les prédictions du modèle. Pour cela, un observateur s'est rendu en chacun des polygones de C2 et a relevé l'habitat dominant. Selon la configuration du site, et la localisation et l'habitat du polygone à identifier, l'observation a pu se faire à distance, mais a été faite au point précis en cas de doute. Elle a également pu se faire par photo-interprétation pour des habitats évidents comme l'eau.

La phase de terrain a pu être l'occasion de faire des relevés complémentaires :

- La cartographie initiale des habitats a pu être vérifiée, au moins dans ses grandes lignes, afin de corriger toute erreur manifeste, par exemple liée à un changement d'habitats entre le moment de réalisation de la cartographie et la phase de terrain ;
- Des tracés complémentaires d'habitats ont été effectués sur une orthophotographie du site, en vue de créer du matériel d'apprentissage pour la deuxième étape de la modélisation si besoin.

Le nombre de points de C2 a été multiplié par deux pour chaque habitat, afin d'avoir des points supplémentaires à vérifier si certains étaient inaccessibles, et afin de garder, pour chaque habitat, le nombre de points défini au §2.2.4, en cas d'erreur de la modélisation pour certains d'entre eux.

2.2.6. Etape 6 : Réalisation d'une seconde modélisation

Afin de diluer les éventuelles erreurs de la cartographie initiale, de prendre en compte les corrections qui y ont été faites lors de la phase terrain et d'obtenir une modélisation avec tous les habitats présents au niveau défini par la typologie, une deuxième modélisation a été effectuée. Elle a pris en entrée la même image composite et un nouveau jeu de polygones C3, construit de la manière suivante :

- Tous les polygones de C1 et tous les polygones de C2 qui ont été vérifiés sur le terrain ont été regroupés dans une même couche, avec leur habitat soit défini par la cartographie initiale soit observé sur le terrain ;
- Les changements d'habitats faits à la cartographie initiale ont été reportés aux polygones de C1 concernés ;
- Le nombre total de polygones par habitat dans cette nouvelle couche devait être égal à la somme du nombre de polygones de cet habitat dans C1 et du nombre de polygones de cet habitat dans C2. Ce nombre a pu être différents pour certains habitats du fait des erreurs de modélisation. A ce moment-là, s'il y en avait plus, certains polygones ont été supprimés, soit de manière aléatoire, soit en choisissant les points les plus susceptibles d'être erronés ; s'il en manquait, des polygones ont été ajoutés grâce aux relevés supplémentaires effectués ou aux tracés d'habitats réalisés lors du terrain ;
- De manière aléatoire, pour chaque habitat, X points ont été mis de côté dans une nouvelle couche : C3, X étant le nombre de points défini pour cet habitat pour C1. Les points restant ont constitué la couche de validation C4.

La modélisation a été réalisée avec le même algorithme et les mêmes paramètres que la première. La cartographie obtenue est la cartographie finale, utilisée pour le calcul de l'indicateur (Figure 9).



Figure 9 : Cartographie actuelle des habitats obtenue par télédétection
 Cartographie réalisée à partir d'orthophotographies prises en août et octobre 2017, avril 2018 et mai 2019

2.2.7. Etape 7 : Evaluation de la modélisation

La cartographie des habitats obtenues a été évaluée grâce à C4, par le calcul du nombre global de pixels bien classés et d'une matrice de confusion, matrice indiquant pour chaque habitat le nombre de pixels bien classés, et avec quel(s) habitat(s) il a été confondu (Tableau 1). En pratique, à chaque pixel de C4 est associé un habitat dit de référence (de la cartographie initiale ou observé sur le terrain), qui est comparé à l'habitat obtenu par modélisation. Plusieurs métriques peuvent être utilisées pour évaluer la précision de modélisation :

- La précision générale, qui correspond à la somme des pixels pour lesquels l'habitat de référence est le même que l'habitat modélisé (« pixels bien classés ») divisée par la somme des pixels de C4, ici 83% ;
- La précision par habitat, qui peut être mesurée de deux façons :
 - o la précision réalisateur (PR), qui correspond au nombre de pixels bien classés pour un habitat divisé par le nombre total de pixels référence de cet habitat ; elle correspond à la proportion de pixels de l'habitat qui ont bien été modélisés ;
 - o la précision utilisateur (PU), qui correspond au nombre de pixels bien classés pour un habitat divisé par le nombre total de pixels modélisés en cet habitat ; elle correspond à la probabilité qu'un pixel d'un habitat donné sur la carte modélisée soit exact.

De manière générale, la carte restitue bien la structure du site et ses habitats. La précision de modélisation est variable selon les habitats. L'eau et les herbiers sont très bien modélisés. Les autres habitats à l'exception des roselières sont également bien identifiés, avec des confusions entre boisements, fourrés et prés-salé et entre prairies et culture. Les roselières sont le plus sujettes à erreur. Plusieurs facteurs peuvent expliquer les confusions observées :

- Le procédé de modélisation suivi a été développé pour être commun à tous les sites Adapto, voire à d'autres sites ; il n'est donc pas propre au site des Vieux Salins, ce qui peut limiter la précision de modélisation ;
- Bien que des orthophotographies relativement récentes aient été choisies, les habitats ont pu être modifiés entre les moments de prise de vue et la phase de terrain. Les habitats peuvent également évoluer entre les différentes années des orthophotographies utilisées, en particulier les habitats de transition comme les fourrés, et ainsi donner des réponses spectrales différentes ;
- Il peut y avoir des erreurs dans le matériel d'apprentissage : une partie des polygones utilisés (ceux de C1) n'ont pas été vérifiés sur le terrain ; il peut également y avoir des différences d'interprétation des habitats (frontière fourrés / boisements par exemple) ;
- Des confusions peuvent être faites entre habitats du fait d'une structure atypique ou de la présence d'une mosaïque d'habitats sur une surface inférieure à la résolution de l'image ;
- Il peut également y avoir des confusions du fait de réponses spectrales similaires, par exemple entre les boisements, les fourrés et certains prés-salés arbustifs, qui sont des milieux ligneux, ou entre cultures et prairies qui sont des habitats herbacés ;
- Le manque de précision des roselières peut être lié au fait que c'est un habitat peu présent sur le site, et donc qui dispose de peu de matériel d'apprentissage, et qui se développe en partie sous la strate arborée.

Tableau 1 : Matrice de confusion

En ligne : habitats de référence ; En colonne : habitats modélisés. Les nombres en vert correspondent aux pixels bien classés.

Exemple : Parmi les 205+3+1 pixels dont l'habitat de référence est la dune blanche, 205 ont bien été modélisés comme tel, 3 ont été modélisés comme de pré-salé et 1 comme de la prairie mésophile, d'où $PR = 205/(205+3+1) = 98,09\%$. De manière similaire, $PU = 205/(205+37+3) = 83,67\%$.

Modélisation Référence	Eau	Roselières	Pré-salé	Dunes blanches	Boisements mésophiles	Fourrés	Prairies mésophiles	Cultures	Herbiers	Précision du réalisateur
Eau	347	0	0	0	0	0	0	0	0	100,00%
Roselières	0	46	26	0	60	48	0	0	0	25,56%
Pré-salé	5	26	291	0	22	13	0	0	0	81,51%
Dunes blanches	0	0	3	205	0	0	1	0	0	98,09%
Boisements mésophiles	0	0	0	0	171	0	0	0	0	100,00%
Fourrés	0	6	35	0	13	156	0	0	0	74,29%
Prairies mésophiles	0	0	1	37	0	2	131	1	0	76,16%
Cultures	0	1	15	3	0	0	31	116	0	69,88%
Herbiers	0	0	0	0	0	0	0	0	247	100,00%
Précision de l'utilisateur	98,58%	58,23%	78,44%	83,67%	64,29%	71,23%	80,37%	99,15%	100,00%	Précision générale : 83%

3. Indicateur : présentation et mise en œuvre

3.1. Objectifs et principes

L'objectif de l'indicateur de qualité écologique littoral est d'évaluer le changement de qualité écologique potentielle d'un site littoral entre deux instants. Il peut être utilisé pour avoir un aperçu des éventuelles conséquences écologiques d'un aménagement ou de l'évolution temporelle d'un site, par exemple dans le cas d'une montée du niveau des mers.

Pour mettre au point cet indicateur, une approche par habitat est développée. L'indicateur repose sur la connaissance de la superficie des habitats d'un site à deux instants et sur une matrice dite de capacité biologique. Les superficies d'habitats peuvent provenir de cartographies, réalisées dans une typologie donnée (présentée au §2.1). La matrice est un tableau qui associe à chaque habitat de la typologie définie une note d'importance vis-à-vis d'un ensemble de paramètres écologiques répartis en trois catégories : diversité, patrimonialité et fonctionnalité. L'indicateur est obtenu en calculant pour chacun des paramètres et chaque instant, une moyenne des notes pondérée par la superficie des habitats. Il est représenté par un diagramme radar, dont chaque axe correspond à un paramètre, et avec au moins deux courbes, chaque courbe correspondant à un instant. Le schéma de conception de l'indicateur est présenté en Figure 10.

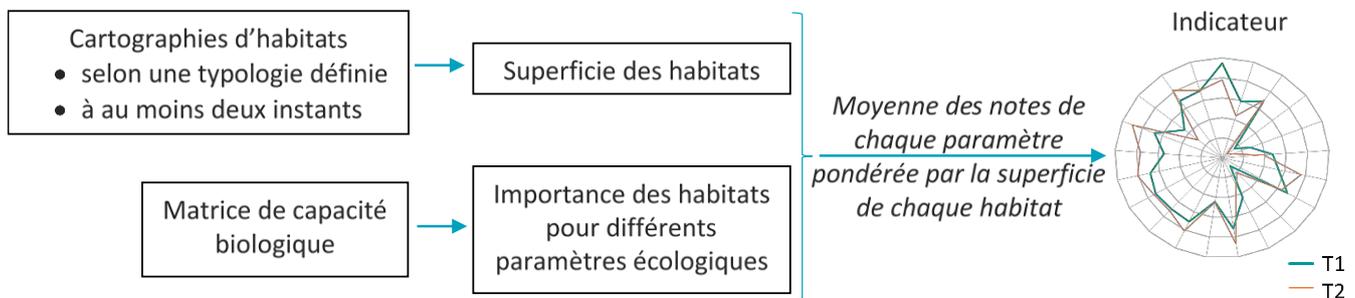


Figure 10 : Schéma de construction de l'indicateur

3.2. Interprétation du diagramme radar

Le diagramme radar représentant l'indicateur attribue à chaque paramètre une note comprise entre 0 et 3, fonction de la superficie des habitats et de leur importance respective pour le paramètre considéré. Plus la courbe du diagramme est en périphérie du cercle, plus la note est élevée, traduisant une diversité, une patrimonialité ou une importance pour la fonctionnalité considérée, potentiellement élevée à l'échelle du site. L'interprétation de la note obtenue doit cependant être effectuée avec précaution. Elle doit être faite :

- *au sein d'un site défini* : l'indicateur dépend directement de la superficie des habitats et de la délimitation de la zone d'étude ; plus la zone où s'opère le changement d'habitats occupe une grande partie du site, plus la différence entre les courbes avant et après changement est contrastée ;
- *en prenant en compte le contexte du site* : selon la définition de la zone d'étude, certains habitats peuvent disparaître au profit d'autres, pouvant impacter négativement un paramètre. Il est important de garder à l'esprit que le site s'inscrit dans un ensemble plus vaste, dans lequel ces habitats peuvent se maintenir et continuer d'abriter une espèce ou de remplir une fonction ;
- *de manière relative* : la note seule associée à un paramètre n'a pas de sens, c'est son évolution entre deux instants qui doit être interprétée, permettant de comparer l'avant / après changement, différents scénarios ou horizons temporels ; de plus, une augmentation (resp. une diminution) d'une note n'est pas nécessairement positive (resp. négative), mais dépend de l'état initial et des objectifs poursuivis (par exemple, le développement de zones en eau peut entraîner une diminution de la note liée à la fonction de pollinisation, ce qui n'est pas problématique si l'objectif du territoire est de favoriser la faune piscicole) ;

- *en prenant en compte les objectifs de gestion* : certains habitats sont plus favorables à certains taxons ou certaines fonctionnalités que d'autres, il n'est donc pas possible de maximiser l'ensemble des paramètres. Selon les objectifs de gestion, il peut être préférable de favoriser un habitat, entraînant une augmentation de la note d'un paramètre qui lui est associé, ou au contraire d'en maintenir plusieurs, auquel cas la note peut rester plafonnée du fait de la présence d'habitats qui ne jouent pas de rôle pour ce paramètre ;
- *en prenant en compte le fait que l'indicateur met en évidence des changements de diversité mais pas de composition des communautés* : deux habitats différents peuvent avoir une diversité similaire pour un même taxon mais des cortèges d'espèces différents.

Il résulte de ces multiples points que les diagrammes radars de différents sites sont difficilement comparables. Si une comparaison inter-site est envisagée, elle ne doit pas porter sur l'allure des courbes à un instant donné (ce qui reviendrait à comparer les notes) mais sur l'évolution des courbes entre deux instants (ce qui revient à comparer la différence des notes).

L'indicateur n'est volontairement pas associé à une note globale unique, afin de privilégier une approche intégrée et multidimensionnelle, indispensable lorsque l'on parle de « potentialités écologiques » d'un site.

3.3. Limites de l'indicateur

L'indicateur développé est un indicateur d'évolution des potentialités écologiques, caractérisé par certaines limites :

- il ne repose pas sur des échantillonnages de terrain des espèces présentes mais sur des liens entre habitats et espèces ou entre habitats et fonctions écosystémiques qui peuvent s'y réaliser, d'où la notion de potentialités écologiques ; ces liens sont parfois difficiles à évaluer et à quantifier, par manque de données dans la bibliographie ou du fait de leur variation spatio-temporelle (variation intra-habitat, variation selon le stade du cycle de vie d'une espèce...) ;
- il ne prend pas en compte des caractéristiques propres à un site telles que sa gestion ou la fragmentation de ses habitats ;
- si les cartographies d'habitats sont obtenues par modélisation, elles peuvent contenir des erreurs, et l'indicateur peut, comme tout indicateur basé sur une phase de modélisation, présenter des incertitudes statistiques ;
- le calcul de l'indicateur, *via* la moyenne pondérée, fait l'hypothèse d'une relation linéaire entre l'importance d'un paramètre et la superficie d'un habitat, ce qui peut être discuté selon les paramètres considérés.

3.4. En savoir plus...

Pour en savoir plus sur la méthodologie suivie pour la construction de l'indicateur, se référer aux documents suivants :

- Article scientifique dans le journal *Ecological Indicators* :
Debue et al., 2022. Assessing and forecasting the effects of submersion on biodiversity. A method to implement an ecological-quality indicator in a context of coastal realignment and rising sea levels. *Ecol. Indicat.*, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109216>.
- Rapport final du travail du Muséum dans le cadre du *Life Adapto* :
Debue M., Billon L., Ouédraogo D-Y., Poncet R., Sordello R., Reyjol Y. (2022). Développement d'un indicateur de qualité écologique dans le cadre du *Life Adapto*. Rapport final, PatriNat (OFB-MNHN-CNRS)
- Guide méthodologique :
Debue M. (2022). Indicateur d'évaluation et de prédiction des potentialités écologiques d'un site littoral dans un contexte de dépoldérisation. Guide méthodologique, PatriNat (OFB-MNHN-CNRS)

3.5. Mise en œuvre de l'indicateur sur le site des Vieux Salins

3.5.1. Cartographies utilisées

L'indicateur a été calculé à deux instants : au temps présent et à l'horizon 2100, afin de modéliser le recul du trait de côte et une éventuelle reconnexion de l'Etang de l'Anglais à la mer. Plusieurs cartographies étaient déjà existantes :

- Une cartographie des habitats actuels faite par le Conservatoire Botanique National (CBN) méditerranéen en 2021 à l'échelle du site ;
- Une cartographie des habitats actuels et à l'horizon 2100 autour de l'Etang de l'Anglais faite par Biotope (disponible dans le rapport : *Projection de l'évolution des habitats naturels et du paysage – Rapport de phase 2 (2019)*) ;
- Une cartographie du trait de côte actuel sur l'ensemble du site faite par Galatée (disponible dans le rapport : *Simulation de l'évolution de la topo-bathymétrie (2019)*) ;
- Une modélisation du trait de côte à 2100 sur l'ensemble du site faite par Artelia (disponible dans le rapport : *Modélisation complémentaires de modélisation de l'évolution du trait de côte (2019)* ; utilisation du scénario 2).

Pour le calcul de l'indicateur, la cartographie des habitats actuels faite par le CBN a été utilisée, sauf pour la partie sud-est au niveau de l'Etang de l'Anglais (*zone 1 sur la Figure 11*) où la cartographie de Biotope a été reprise afin d'avoir une même origine cartographique pour la comparaison à 2100. La cartographie prédictive des habitats à 2100 a été réalisée comme suit :

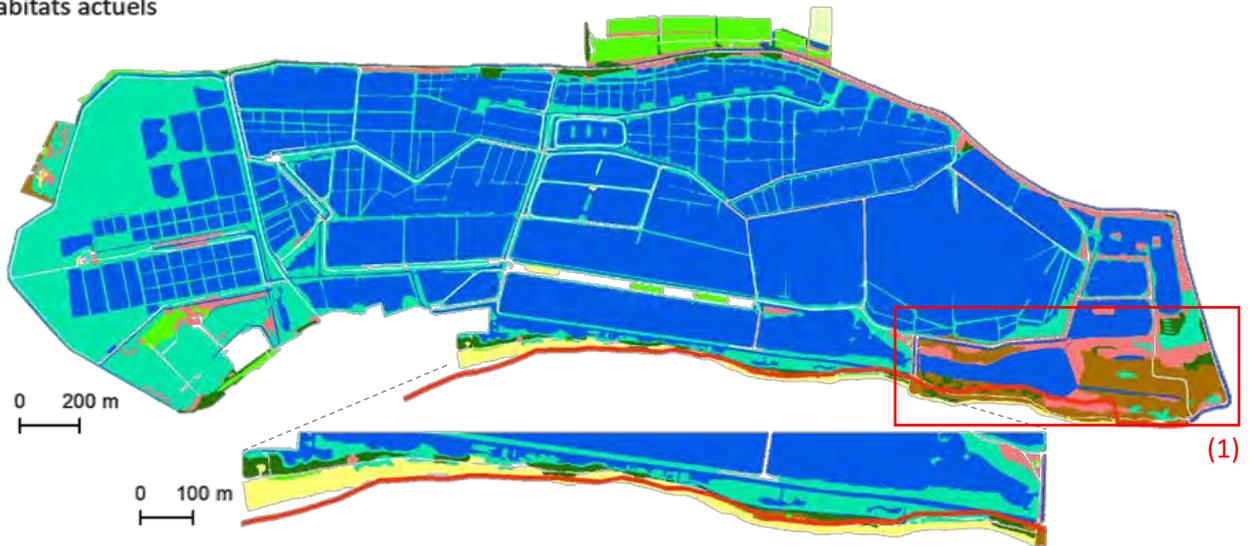
- les habitats ont été supposés identiques à ceux actuels pour la plus grande part du site
- la partie sud-est au niveau de l'Etang de l'Anglais a repris la cartographie de Biotope à l'horizon 2100 (*zone 2 sur la Figure 11*)
- les terres au sud du trait de côte à 2100 modélisé par Artelia ont été supposées sous l'eau (*zone 3 sur la Figure 11*)
- deux scénarios ont été envisagés pour les terres juste au nord du trait de côte (*zone 3 sur la Figure 11*) :
 - o scénario 1 : les habitats sont supposés identiques à la situation actuelle
 - o scénario 2 : les habitats sont remplacées par de la dune blanche sur une largeur de 14,4m, qui correspond à la largeur moyenne actuelle de dune blanche calculée à partir du trait de côte actuel fourni par l'étude de Galatée et de la cartographie actuelle des habitats du CBN ; les canaux dans cette bande de 14,4m et les terres en arrière des canaux sont supposés se maintenir et ne sont pas remplacés par de la dune blanche.

Les cartographies ont ensuite été converties dans la typologie définie au paragraphe 2.1. Elles mettent en évidence une régression plus ou moins importante des dunes blanches dans la zone 3 selon le scénario considéré. Au niveau de l'Etang de l'Anglais, les dunes blanches se développent aux dépens des fourrés et des boisements. Une transformation des fourrés en boisements est également modélisée.

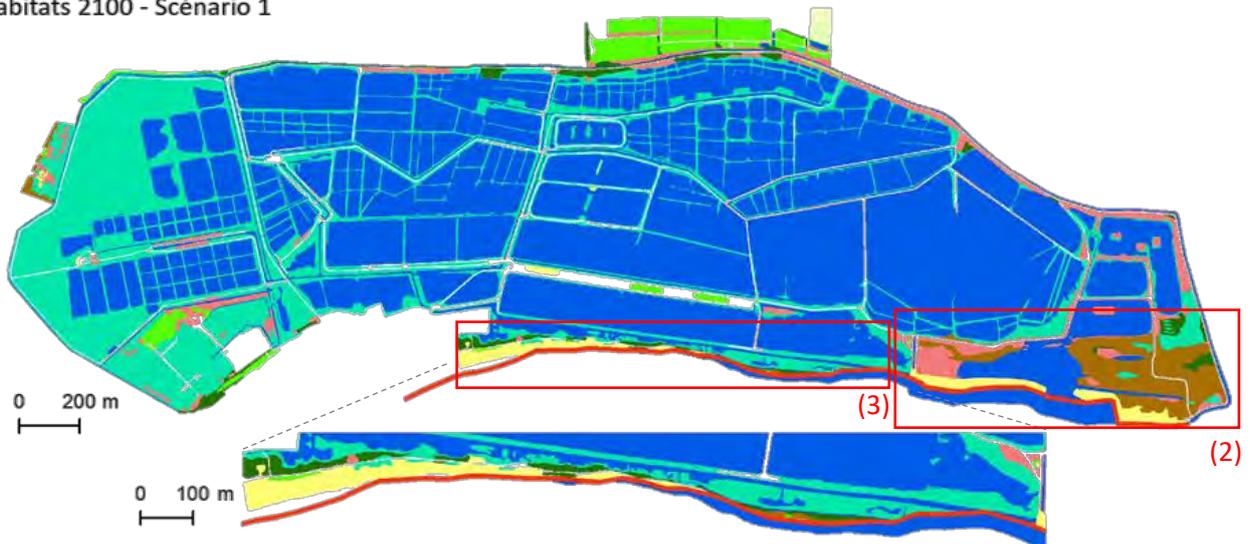
3.5.2. Matrice de capacité biologique

Le deuxième outil nécessaire au calcul de l'indicateur est une matrice de capacité biologique (Tableau 2). Il s'agit d'un tableau ayant en ligne les différents habitats de la typologie et en colonne un ensemble de paramètres de diversité, de patrimonialité et de fonctionnalité. A l'intersection de chaque ligne et chaque colonne, une note entre 0 et 3 indique l'importance de l'habitat pour le paramètre considéré (0 = nulle ; 3 = forte). Cette matrice a été construite à dire d'experts pour les données relatives à la diversité et à la patrimonialité et à partir de recherches bibliographiques pour les paramètres relatifs à la fonctionnalité. La construction à dire d'experts s'est faite par la sollicitation de 9 experts de l'unité PatriNat, compétents pour un ou plusieurs taxons de la matrice. Il a été demandé à chacun de remplir la matrice de manière individuelle puis les résultats ont été mis en commun et discutés lors d'une table ronde pour échanger sur les éventuels désaccords. La partie bibliographique repose sur 230 références,

Habitats actuels



Habitats 2100 - Scénario 1



Habitats 2100 - Scénario 2

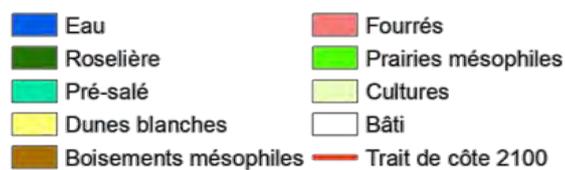
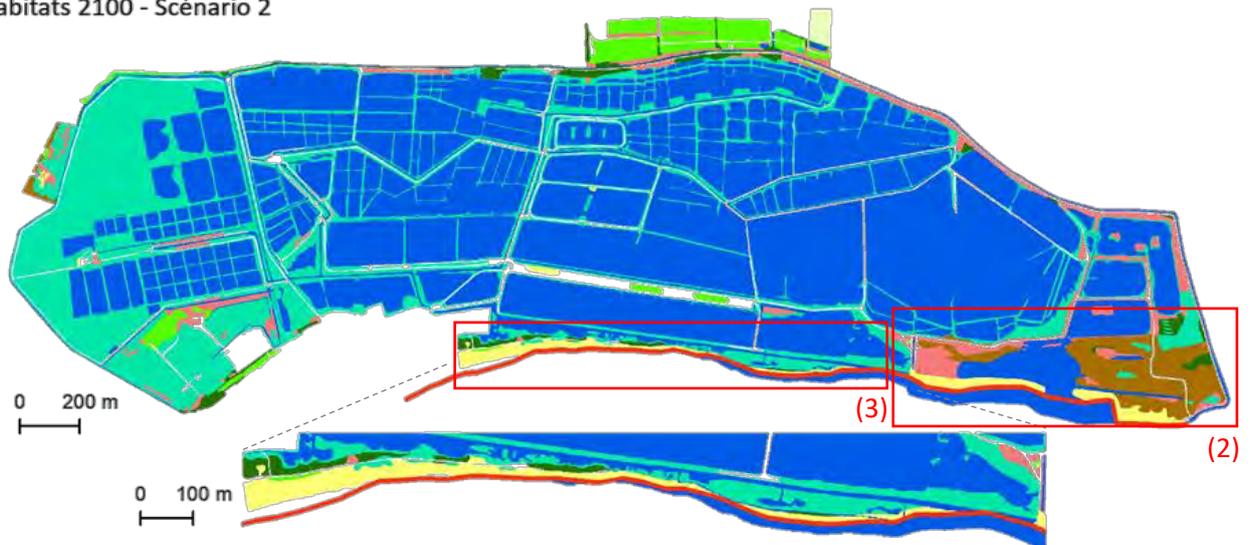


Figure 11 : Cartographie des habitats des Vieux Salins (situation actuelle et à 2100, scénario 1 et 2)
Sources : CBN (2021) et Biotope (2019) pour la cartographie des habitats actuels, Artelia (2019) pour le trait de côte à 2100

évaluant de manière qualitative ou quantitative (données chiffrées, notation par expertise, valeur monétaire de services écosystémiques) les fonctionnalités des habitats. Du fait du manque de distinction des différents niveaux de prés-salés dans les références bibliographiques relatives aux fonctionnalités, ils ont été regroupés en un même habitat dans la matrice.

Afin d'être généralisable aux différents sites Adapto, la matrice de capacité biologique ne prend pas en compte les caractéristiques écologiques des habitats (âge des boisements, connectivité et fragmentation des habitats...) ni la gestion du site (prairie pâturée, fauchée ou non-gérée, cultures intensives ou extensives...). Certaines notes ont de plus été difficiles à évaluer par manque de données ou par difficulté à attribuer une note unique (variation selon l'espèce considérée, l'étape du cycle de vie, le sous-habitat...).

3.5.3. Calcul et interprétation de l'indicateur

A partir des superficies des habitats à une date donnée, extraites des cartographies, et de la matrice de capacité biologique, l'indicateur a pu être calculé (Figure 12). Pour cela, pour chaque paramètre, chaque date et chaque scénario (2021 et 2100, scénario 1 et 2), une moyenne des notes de ce paramètre pondérée par la superficie des habitats a été calculée. Un paramètre supplémentaire, l'« Equitabilité des habitats », correspondant à l'indice de Piélou, indice qui prend en compte le nombre d'habitats présents et leur proportion surfacique et qui a été multiplié par un facteur 3 pour varier sur la même gamme de valeurs que les autres notes, a été ajouté afin d'évaluer la répartition des habitats (il tend vers 0 si un habitat domine, vers 3 si les habitats recouvrent des superficies similaires). L'indicateur a finalement été représenté sous forme d'un diagramme radar, dont chaque axe correspond à un paramètre et chaque courbe, à une date donnée. Plus la courbe est en périphérie, plus la note est élevée.

L'histogramme d'évolution surfacique des habitats à l'échelle du site ne met en évidence que très peu de changements. Ils sont plus marqués à l'échelle de l'étang de l'Anglais. Dans les deux cas, la plupart des habitats voient leur superficie diminuer, à l'exception des dunes blanches et des zones en eau. Malgré le retrait de la dune blanche du fait du recul du trait de côte, cet habitat présente une augmentation de sa surface de par son développement au sud de l'étang de l'Anglais. La submersion et le remplacement des boisements mésophiles au niveau de l'étang entraîne une diminution de leur superficie, mais qui est atténuée par le remplacement de fourrés par des boisements selon la modélisation de Biotope.

A l'échelle du site, les changements d'habitats étant modestes, les écarts entre les courbes sont peu marqués. En s'intéressant au diagramme radar réalisé à l'échelle de l'étang de l'Anglais, différentes évolutions peuvent être attendues. L'ensemble des taxons pourrait voir leur diversité diminuer à l'exception du nécton, les zones en eau et les dunes blanches abritant une faune et une flore moins diversifiées que les habitats qu'elles remplacent. La connexion de l'étang de l'Anglais à la mer pourrait s'accompagner d'un changement des espèces en place. La note associée à la patrimonialité devrait rester stable, les dunes blanches étant des habitats patrimoniaux. La plupart des paramètres de fonctionnalité voient leur note diminuer, à l'exception de la régulation du climat, du cycle de l'eau et des nutriments et du stockage des polluants dont les notes restent stables, les océans ayant un fort pouvoir de stockage du carbone et les dunes blanches intervenant dans le stockage et la filtration de l'eau. On aurait pu s'attendre à une augmentation de la note associée à l'atténuation des perturbations physiques, les dunes blanches jouant un rôle important vis-à-vis de la submersion, mais cet effet est masqué par l'augmentation plus importante des superficies en eau, qui à l'inverse n'ont qu'une influence limitée sur ce paramètre. La diminution est plus marquée pour la pollinisation du fait de la régression des fourrés, liée au recul du trait de côte et à leur transformation en boisements.

L'analyse du diagramme radar doit être faite avec précaution. En plus des différents facteurs détaillés au paragraphe 3.2, et des limites déjà mentionnées concernant les cartographies (§3.5.1) et la matrice de capacité biologique (§3.5.2), il est important de garder à l'esprit que le calcul lui-même de l'indicateur présente des limites. Il fait en effet l'hypothèse d'une relation linéaire entre l'importance d'un paramètre et la superficie d'un habitat *via* l'utilisation d'une moyenne pondérée, ce qui peut être discutable selon les paramètres considérés, notamment les paramètres de diversité pour lesquels une relation plafonnée peut être plus adaptée.

Tableau 2 : Matrice de capacité biologique
 Gradient des notes de 0 (importance nulle) à 3 (importance forte)

	Diversité									Patrimoine	Fonctionnalité									
	Végétation	Oiseaux	Amphibiens	Reptiles	Mammifères	Necton	Mollusques	Odonates	Lépidoptères		Potential en habitats patrimoniaux	Halte migratoire pour les oiseaux	Productivité primaire	Cycle des nutriments	Cycle de l'eau	Formation et rétention des sols	Stockage des polluants	Régulation du climat	Pollinisation	Atténuation des perturbations physiques
Eau	1	1	0	0	1	3	3	0	0	1	1	1	2	2	1	1	2	0	1	1
Sédiment intertidal	1	3	0	0	0	2	1	0	0	3	2	1	1	1	1	1	2	0	1	3
Roselières	1	2	2	1	1	1	2	3	2	2	3	3	2	3	3	3	3	0	3	2
Pré-salé	1	2	0	0	1	2	1	1	1	3	1	3	2	2	3	3	3	1	3	2
Dunes blanches	1	1	0	1	0	0	1	0	0	3	0	1	1	2	2	2	1	0	3	1
Dunes grises	2	1	1	2	1	0	2	0	2	3	1	1	1	2	2	2	1	1	2	1
Boisements humides	2	2	2	1	2	0	3	2	2	3	1	3	3	3	3	2	2	1	3	2
Boisements mésophiles	3	2	2	1	3	0	3	0	3	2	1	2	2	3	3	2	2	1	3	3
Fourrés	1	2	1	2	2	0	2	1	2	1	2	2	2	2	2	1	1	3	2	2
Prairies humides	3	2	3	1	2	0	3	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3
Prairies mésophiles	3	2	1	2	2	0	2	0	3	2	1	2	2	2	2	1	1	3	2	2
Prairies artificielles	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	2	1	1	1	1	1	0	1	1
Cultures	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	1	1	1	0	0	1	1	2
Bâti	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Herbiers aquatiques	2	0	0	1	0	2	2	0	0	3	0	3	2	2	2	2	3	0	3	3

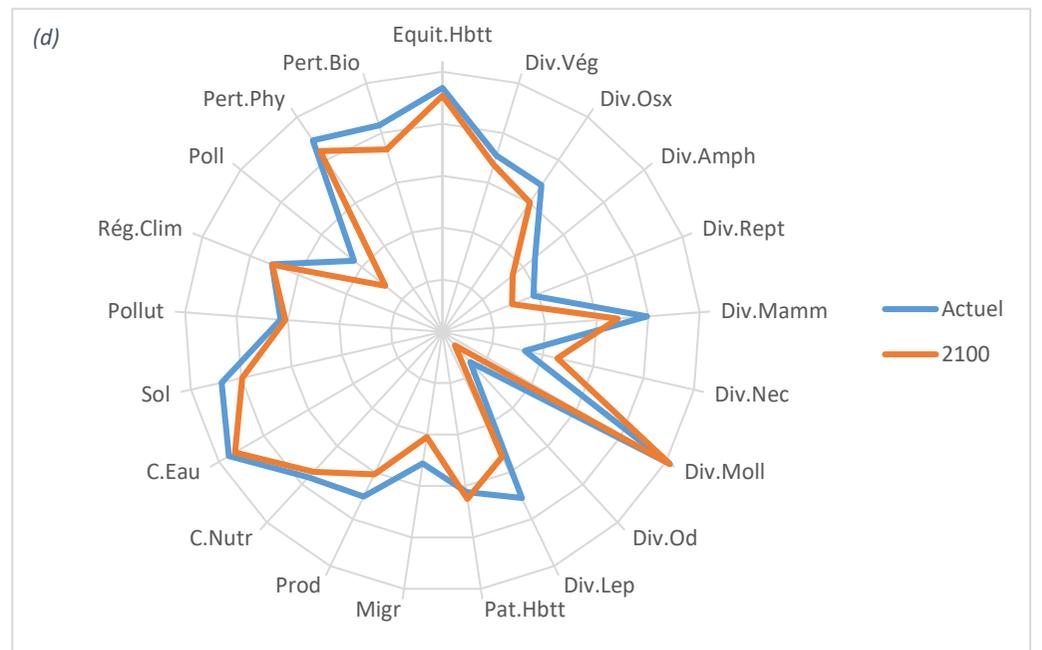
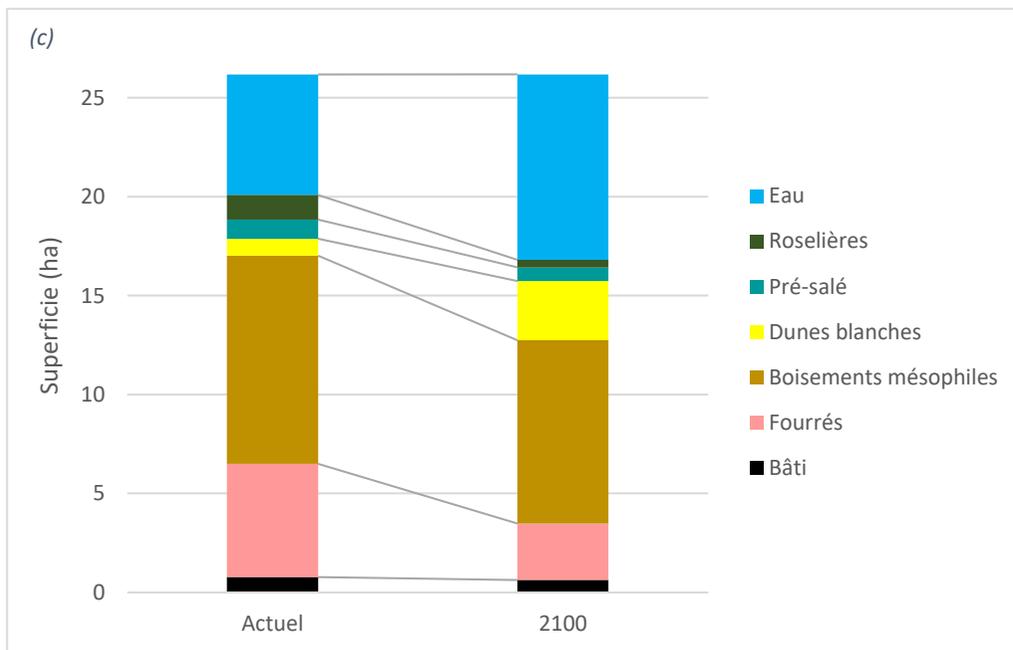
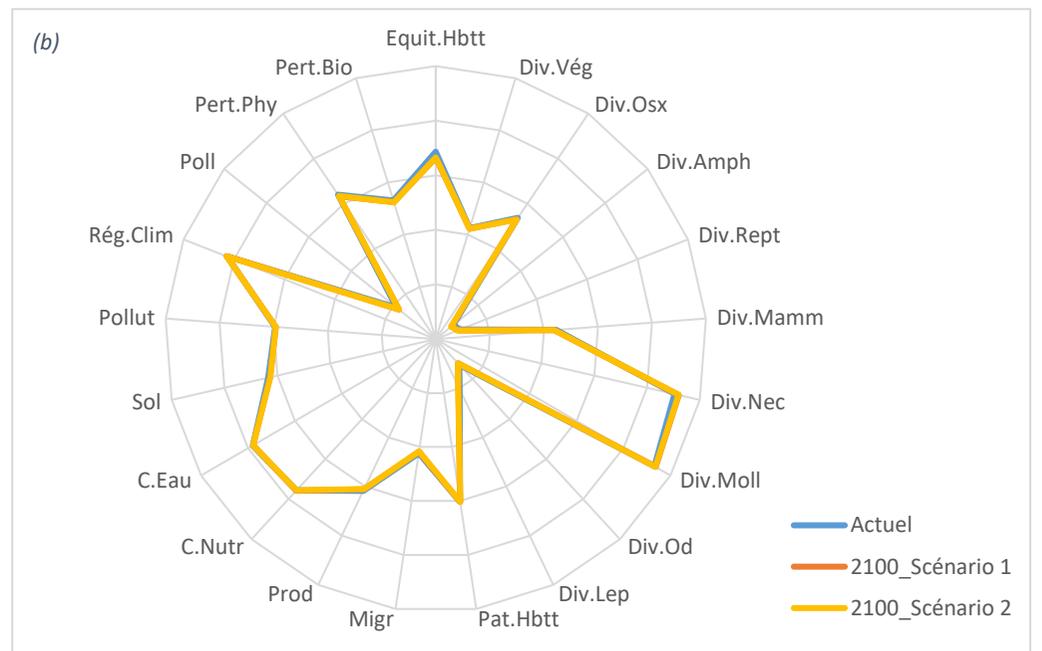
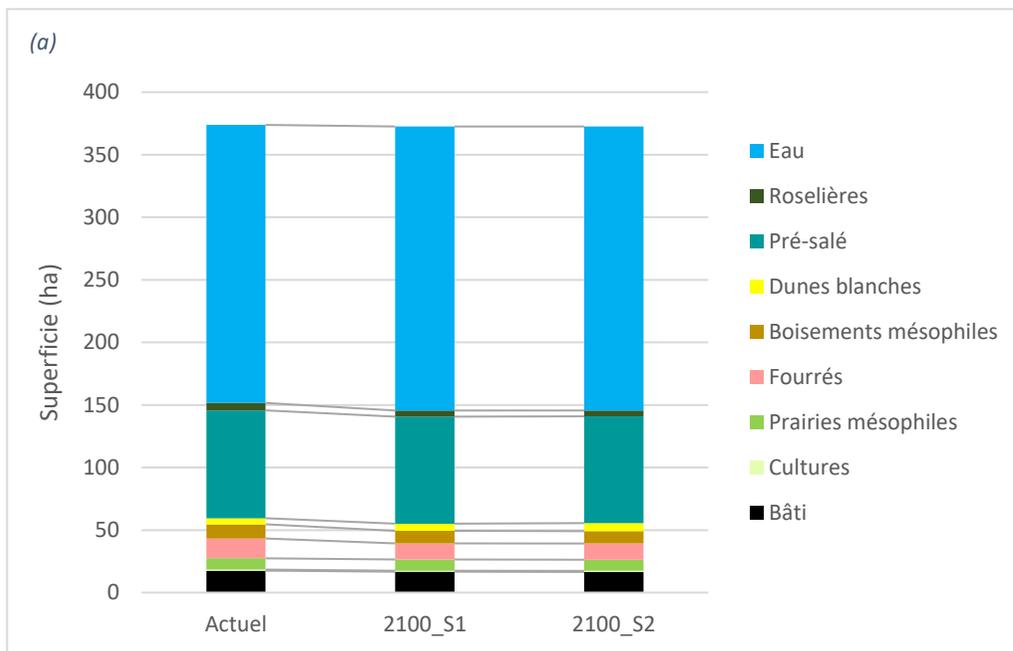


Figure 12 : Evolution des superficies et diagramme radar pour le site des Vieux Salins

En haut (a et b) : à l'échelle du site ; En bas (c et d) : à l'échelle de l'Etang de l'Anglais (zone 2 de la Figure 11)

Equit.Hbtt : Equitabilité des habitats ; Div.Vég : Diversité végétale ; Div.Osx : Diversité oiseaux ; Div.Amph : Diversité amphibiens ; Div.Rept : Diversité reptiles ; Div.Mamm : Diversité mammifères ; Div.Nec : Diversité necton ; Div.Moll : Diversité mollusques ; Div.Od : Diversité odonates ; Div.Lep : Diversité lépidoptères ; Pat.Hbtt : Potentiel en habitats patrimoniaux ; Migr : Halte migratoire pour les oiseaux ; Prod : Productivité primaire ; C.Nutr : Cycle des nutriments ; C.Eau : Cycle de l'eau ; Sol : Formation et rétention des sols ; Pollut : Stockage des polluants ; Rég.Clim : Régulation du climat ; Poll : Pollinisation ; Pert.Phy : Atténuation des perturbations physiques ; Pert.Bio : Atténuation des perturbations biologiques

Conclusion

La mise en œuvre de l'indicateur sur le site des Vieux Salins d'Hyères a mis en évidence qu'un développement des zones en eau et des dunes blanches peut être attendu d'ici 2100. Un tel changement d'habitats pourrait s'accompagner de modifications de biodiversité. La richesse spécifique pourrait diminuer pour la plupart des groupes taxonomiques à l'exception du necton, dont le cortège d'espèces pourrait être modifié au niveau de l'étang de l'Anglais du fait de sa connexion à la mer. La valeur patrimoniale du site devrait rester stable en raison du développement des dunes blanches. Enfin, sa fonctionnalité pourrait également évoluer, avec une stabilité des notes associées à la régulation du climat, au cycle de l'eau et des nutriments et au stockage des polluants, mais une diminution des notes relatives aux autres fonctions.

Ces évolutions sont des résultats de modélisation qui s'accompagnent d'un ensemble de limites à chaque étape de construction de l'indicateur (cartographies, matrice de capacité biologique, calcul de l'indicateur) et qui doivent donc être considérées lors de son interprétation.

RÉSUMÉ

Le présent document constitue le rapport final des travaux réalisés par le Muséum national d'Histoire naturelle sur le site des Vieux Salins d'Hyères dans le cadre du programme *Life Adapto*, au cours des années 2019 à 2022. Il est constitué de trois parties. La première décrit rapidement le site et le scénario d'aménagement étudié. La seconde porte sur la réalisation d'une cartographie des habitats par télédétection. La dernière présente l'indicateur de qualité écologique développé et sa mise en œuvre sur le site des Vieux Salins d'Hyères.



PatriNat (OFB-CNRS-MNHN)

Centre d'expertise et de données sur le patrimoine naturel

Muséum national d'Histoire naturelle

CP41 – 36 rue Geoffroy Saint-Hilaire

75005 Paris

www.patrinat.fr

