

Mémoire de deuxième année de Master mention Ecologie Biodiversité Evolution
Spécialité Ingénierie Ecologique et Gestion des Ecosystèmes
2006-2007

MODELISATION MULTI-AGENTS DE L'IMPACT DU TOURISME
SUR L'ILE D'OUESSANT



Soutenu le 18 juin 2007 par
Hélène DUPONT

Unité de Conservation des Espèces, Suivis et Restauration des Populations
UMR 5173 MNHN-CNRS-P6

Sous la direction de Harold LEVREL et Christian KERBIRIOU

Je tiens à remercier mes maîtres de stage, Harold Levrel et Christian Kerbiriou pour m'avoir permis de travailler sur un sujet qui dépasse les barrières érigées entre les disciplines. Merci Harold pour ton optimisme sans limites qui m'a redonné l'énergie nécessaire face aux difficultés rencontrées. Merci à Christian et Isabelle de leur dynamisme et bons conseils et bien sûr de m'avoir fait découvrir l'île d'Ouessant.

Un grand merci à Nicolas Becu qui m'a enseigné l'art de la modélisation sur Cormas.

Un autre grand merci à Mathias Rouan pour toutes ces heures passées à l'implémentation des cartes.

Merci à Louis Brigand et Ingrid Peuziat qui m'ont aidée à orienter l'enquête sociologique.

Merci à Yannick Garroy de l'Office du tourisme d'Ouessant.

SOMMAIRE

I	INTRODUCTION	5
II	SITE D'ETUDE	7
	1. Le contexte écologique	7
	2. Le contexte social et le développement du tourisme	7
III	PRESENTATION DU MODELE	9
	1. Les systèmes multi-agents	9
	2. Le modèle d'origine.....	9
	3. Construction du modèle.....	10
	3.1 Un environnement dynamique	11
	3.2 Les indicateurs de biodiversité	12
	3.2.1 La richesse spécifique.....	12
	3.2.2 Les populations de plantes rares.....	12
	3.2.3 Le crave à bec rouge.....	13
	3.3 L'agent « Touriste »	14
	3.4 Le modèle, aspect spatial et temporel	16
	4. Protocole de simulation.....	17
VI	RESULTATS	18
	1. Simulations sans agents sociaux.....	18
	1.1 Variabilité des indicateurs.....	18
	1.2 Dynamique de la pelouse écorchée.....	19
	2. Impact des différentes catégories de touristes.....	19
	2.1 Sur la richesse spécifique.....	19
	2.2 Sur les populations de plantes rares.....	20
	2.3 Sur le crave à bec rouge.....	21
	3. Impact de l'étrépage	22
	3.1 Sur la richesse spécifique	22
	3.2 Sur les populations de plantes rares.....	22
	3.3 Sur le crave à bec rouge.....	23
	4. Scénarios avec différentes proportions de catégories de touristes.....	23
V	DISCUSSION	25
	1. Dynamique de la végétation.....	25
	2. Les indicateurs	25
	3. Exemple d'un effet de répartition spatiale.....	26
	4. Exemple d'un effet émergent.....	27

5. Les scénarios	28
6. Limites et perspectives	28
6.1 Plantes rares	28
6.2 Touristes et piétinement.....	29
VI CONCLUSION.....	30
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	31
ANNEXES	34

« l'homme m'apparaît comme un facteur écologique nouveau
à prendre en considération au même titre que les autres »

M. Lamy

I INTRODUCTION

Réchauffement climatique, surexploitation des ressources, modification des paysages, introduction d'espèces invasives (Barbault et Chevassus-au-Louis, 2004), l'Homme est sans conteste le principal organisme ingénieur (Jones et al, 1994) sur la planète, et celui dont les impacts sont les plus variés et les plus complexes.

La question du lien entre la société humaine et son environnement se pose classiquement en terme de « système écologique sous pression anthropique » ou de « système social soumis aux contraintes naturelles » (Bousquet, 2004).

A cette vision s'oppose une « écologie de la réconciliation » prônant une restriction participative de l'activité humaine. (Weber, 2007). Par exemple, le programme sur l'Homme et la biosphère, lancé à la fin des années soixante par l'UNESCO, a pour objectif de mieux appréhender les interactions complexes qui existent entre les dynamiques socio-économiques et écologiques d'écosystèmes emblématiques. Il a ainsi très tôt affirmé l'importance d'asseoir les stratégies de conservation de la nature sur la connaissance d'une part, mais aussi sur le développement économique et social des populations, dans le respect des cultures locales (Cibien, Bioret, Génot, UNESCO, 2006).

L'ingénierie écologique, discipline relativement récente, se place également dans cette perspective : La conception ou la gestion durable d'écosystèmes passe par la prise en compte de la société humaine et de ses interactions avec l'environnement naturel (Mitsch, 1996).

Cette approche semble tout particulièrement adaptée pour appréhender les interactions qui existent entre la conservation de la biodiversité et la forte expansion des activités touristiques dans les zones protégées.

La création de zones protégées, légitimée par la présence d'espèces rares ou en danger, une grande biodiversité ou des écosystèmes à préserver mène parfois à une augmentation de l'éco-tourisme (Buckley, 2000) et contribue ainsi au développement des activités économiques (Buckley, 2003 ; Ceballos-Lascurain, 1991, Epler-Wood, 1996 ; Guerrero and Munoz, 2002 ;

U.S. Congress, 1992). Cet effet indirect lié à la création de zones protégées soulève de nouvelles questions pour la conservation des écosystèmes. En particulier, des rapports internationaux et nationaux ont souligné le manque de données à propos de l'impact du tourisme sur la biodiversité (Harriot, 2002 ; IUCN, DFID and European Commission, 2002 ; 1992 ; U.K. CEED ; U.S. Congress, 1992).

L'objet de cette étude est de développer un modèle représentant un système d'interactions société-nature, concernant le tourisme insulaire. Il s'appuie sur un cas d'étude particulier : l'île d'Ouessant. Il s'agit de définir ce système, le caractériser et le modéliser, en envisageant l'humain non plus comme une simple source de pression mais comme un ensemble d'acteurs hétérogènes qui entretiennent des interactions avec leur environnement nature. L'hypothèse de départ est qu'il existe différentes formes de tourisme. Elles renvoient à différents types comportementaux qui engendrent probablement des effets différents sur l'état de la biodiversité. Disposer de nouvelles informations sur ces paramètres pourrait permettre de développer des programmes de conservation qui prennent mieux en compte le contexte socio-économique des zones protégées.

En ce qui concerne la biodiversité, des indicateurs précis doivent permettre d'adopter des analyses multi-échelles, reflétant différents niveaux d'intégration :

Des indicateurs de viabilité d'une population avicole menacée à l'échelle individu-centré, le crabe à bec rouge, (*Pyrrhocorax pyrrhocorax*) ; des indices de présence-absence à l'échelle des populations d'espèces de plantes « liste rouge » (*Isoete histrix*, *Centaurium maritimum*, *Ophioglossum lusitanicum*, *Heterodermia leucomelos* et *Teloshistes flavicans*) ; un indicateur de richesse spécifique à l'échelle des communautés de plantes.

II SITE D'ETUDE

L'étude a été menée sur Ouessant, une petite île (1541 ha) située à 20 km de la pointe occidentale de la Bretagne (48°28' N, 5°5' W).



1. Le contexte écologique

Le cortège d'espèces végétales littorales et les colonies d'oiseaux marins (Brigand et Boulestreau, 1995) constituent un patrimoine naturel original, protégé par divers systèmes réglementaires qui se superposent : Parc Naturel Régional d'Armorique (PNRA) créé en 1969, Zone Natura 2000, Sites Classés depuis 1979, Réserve de Biosphère de la Mer d'Iroise depuis 1988 (annexe 1). Les habitats côtiers (pelouse côtière et lande sèche) sont classés comme Habitats d'Intérêt Communautaire de la directive Habitat puisqu'ils abritent de nombreuses espèces rares (Rodwell et al., 1991 ; Rodwell et al., 2000).

2. Le contexte social et le développement du tourisme

La population résidente est passée de 2 661 à 952 en 100 ans (recensements de 1900 et 1999) et a vieilli : en 1999, 43% de la population a plus de soixante ans.

Le manque d'opportunités d'emplois, le développement des transports, l'augmentation des prix des logements liée à l'accroissement du nombre de résidences secondaires, la disparition des emplois dans la marine marchande, le développement de la société de loisir sont autant de facteurs qui ont structuré une économie aujourd'hui tournée vers le tourisme (Levrel, 2006).

Le nombre de passagers annuel des compagnies de transport maritime est ainsi passé de 5000 en 1950 à pratiquement 150 000 en 2005 (annexe 2). Depuis vingt ans, l'augmentation est régulière avec 2500 passagers en plus chaque année (Kerbiriou, 2006) et un pic de fréquentation en été (annexe 2). Les années 1990 marquent, à la suite d'une décision politique, un tournant par rapport aux possibilités d'accès de l'île. La compagnie maritime « Finist'Mer » et le syndicat mixte « Penn Ar Bed » ont considérablement augmenté leur capacité de transport (annexe 3).

Ouessant est perçue comme une destination dépaysante et un espace « sauvage ». Les visiteurs viennent pour y découvrir un paysage varié, aux côtes rocheuses alternant avec des criques bordées d'imposants cordons de galets. Les chemins côtiers sont ainsi la principale attraction de l'île et les zones littorales sont les plus soumises à la fréquentation.

De nombreuses études portent sur l'impact du piétinement sur la végétation (Javier and De Lucio, 1995 ; Gallet, Lemauiel et Rozé, 2003 ; Roovers and al., 2004) mais peu d'entre elles concernent la végétation des côtes rocheuses (Gallet et Rozé, 2001). Or, ces écosystèmes sont particulièrement sensibles au piétinement du fait de leur faible productivité. La dégradation du tapis végétal, la mise à nu des sols et leur érosion sont des phénomènes qui se sont déjà produits à grande échelle du fait des activités touristiques, par exemple à la Pointe du Raz dans le Finistère. Leur réhabilitation est une source de dépenses importantes et leur restauration écologique peut prendre de nombreuses années.

Une autre conséquence directe de la fréquentation touristique est le dérangement de la faune (Buckley, 2000, 2003).

La dynamique de population du crave à bec rouge, espèce emblématique présente sur l'île, est influencée par le biais de la destruction de son habitat (les pelouses écorchées) et le dérangement occasionné pendant la prise de nourriture (Kerbiriou, 2006).



crave à bec rouge

Enfin, les activités touristiques peuvent également avoir des impacts sur l'environnement de manière indirecte : Par exemple, à Ouessant, le *ragoût dans les mottes* est un plat traditionnel apprécié par les touristes. Sa cuisson nécessite des « mottes » (touffes de pelouse et de lande littorale avec la partie superficielle du sol) utilisées comme combustible. Or, le prélèvement des mottes, dit « étrépage », s'effectue sur le littoral.



chemins créés par les visiteurs



zone étrépee

III PRESENTATION DU MODELE

1. Les systèmes multi-agents.

La modélisation est une voie d'accès à l'interdisciplinarité (Franc, Sanders, 1998). Les systèmes multi-agents (SMA) représentent une classe de modèles interdisciplinaires qui se focalisent sur les interactions entre les composantes écologiques et sociales ainsi que leur hétérogénéité (Bousquet, 2004). Ce type de modèle a pour origine les recherches en Intelligence Artificielle. Ils permettent de formaliser un environnement, des objets situés passifs, des agents actifs et les relations existantes entre ces entités. Les dynamiques d'interactions peuvent être pilotées de manière centralisée, par un pôle du système qui à accès à toutes les informations codées, ou au contraire de manière locale, au niveau d'une entité qui n'a accès qu'à un certain nombre d'informations. Ceci est rendu possible par un mécanisme d'organisation sur plusieurs niveaux qui permet d'offrir une perspective originale : résultant de règles locales, le bilan est émergent (Ramat and al..1998).

- Les entités possèdent des caractéristiques, décrites au moyen d' *attributs* et agissent ou réagissent par le biais de *méthodes*.
- Au niveau central, l' *ordonnanceur* est l'élément qui contrôle la séquence des évènements.
- La possibilité de couplage des SMA avec les systèmes d'informations géographiques (S.I.G.) permet de créer une interface spatiale à partir de cartes établies par GPS, sous forme d'automate cellulaire. Une *cellule* représente alors une unité de surface et des zones peuvent être définies par la constitution d'agrégats de cellules.

2. Le modèle d'origine.

Un modèle sur la question de la gestion de la friche sur l'île d'Ouessant a été réalisé par une équipe interdisciplinaire (Levrel et al., en révision) en utilisant la plateforme CORMAS, comme « outil d'aide à la recherche, d'aide à la décision et de communication entre la population locale et les gestionnaires » (Rouan, 2003). Le processus d'enfrichement étant principalement situé à l'intérieur de l'île, les dynamiques prenant place sur le littoral n'ont pas été conceptualisées de manière détaillée. La fréquentation touristique y est représentée simplement par un effectif global estimé pour quinze zones et seul le crabe à bec rouge fait état de la biodiversité.

Dans la même perspective et afin de garder une homogénéité entre ce modèle et celui développé au cours de ce stage, des éléments de base ont été réutilisés tels que les échelles spatiales et temporelles, les « zones touristes » et les « zones d'étrépage », et bien évidemment, la dynamique du crabe. La création d'un agent touriste selon diverses modalités

et son implémentation ont nécessité de retraduire la dynamique de la végétation et modéliser ses interactions avec les autres acteurs. Les autres indicateurs de biodiversité ont dû être intégrés.

Nous pouvons souligner l'aspect non générique de ce type de modèle. En effet il s'agit d'un modèle spécialisé sur un système socio-écologique particulier, ce qui le rend très adapté au contexte particulier de l'île mais aussi très peu généralisable. Cependant le modèle est évolutif et adaptable à d'autres problématiques.

3. Construction du modèle.

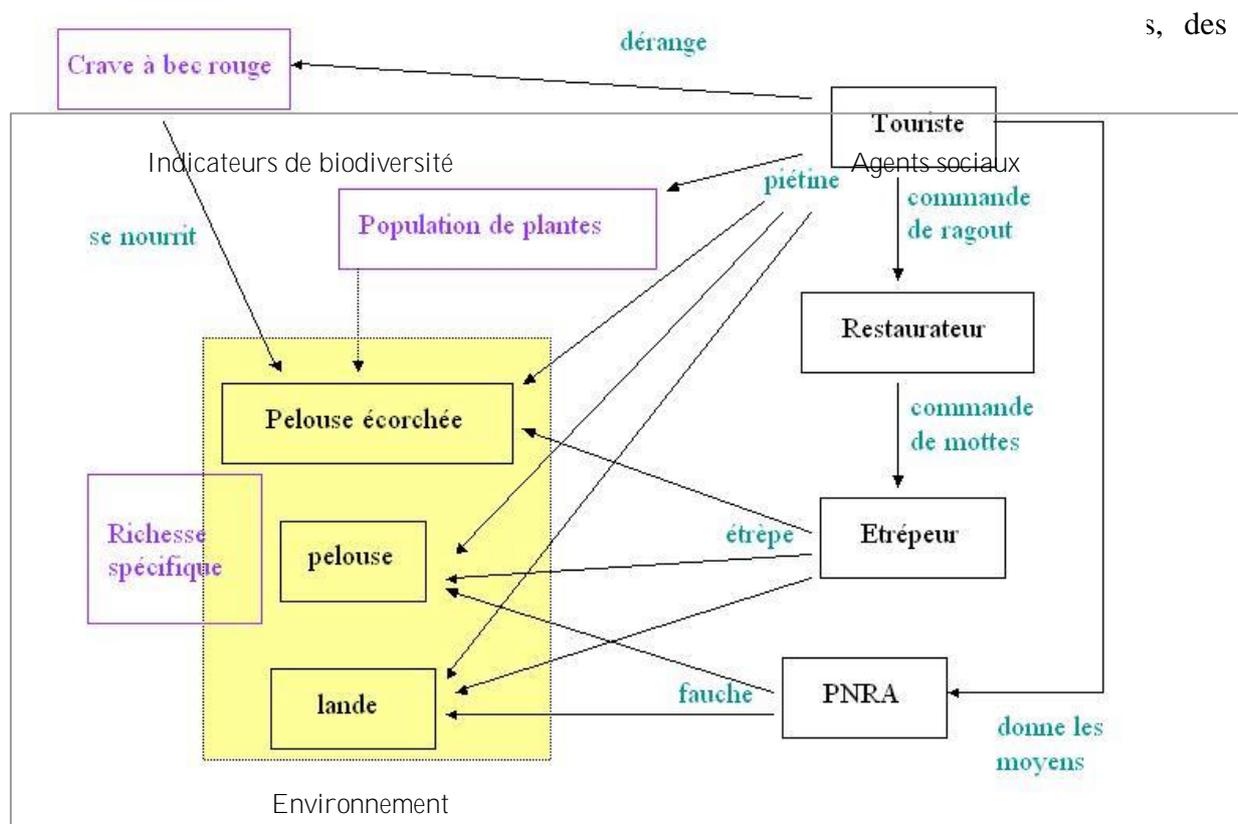


figure 1 : Cadre du système étudié

Chaque élément doit être ensuite décrit selon ses caractéristiques et ses comportements. Les paramètres écologiques sont tirés d'une étude préalable réalisée par C. Kerbiriou à propos de l'impact du piétinement sur la végétation de l'île d'Ouessant (Kerbiriou et al., sous presse). Une enquête sociologique concernant les comportements des touristes a été menée afin de construire l'entité « touriste ». La conception du modèle résulte de l'intégration des données de nature écologique et socio-économique.

3.1 Un environnement dynamique

La dynamique de la végétation est formalisée de manière :

- A respecter la progression naturelle du milieu ouvert au milieu fermé, selon le temps, représenté au moyen de l' « âge », qui est un attribut de cellule.
- A traduire les effets des acteurs qui l'influencent : la fauche régulière réalisée par les agents du Parc naturel régional d'Armorique (PNRA), le piétinement et la création de chemins par les touristes et l'étrépage.

En tant qu'habitat pour les plantes rares et pour le crabe à bec rouge, la pelouse écorchée (dont la hauteur est inférieure à 5 cm) constitue un compartiment qui mérite d'être décrit précisément. Il a été détaillé en 3 types de « pelouse rase » afin de leur affecter des taux d'érosion annuels du couvert végétal, déterminés expérimentalement selon deux facteurs discriminants : Le piétinement et la profondeur du sol. La pelouse de type 1 ne subit pas de piétinement en raison de sa répartition littorale. Lorsque la profondeur du sol est supérieure à 10 cm, la pelouse rase est de type 3.

A ce niveau, l'environnement est ainsi décrit par les attributs « type de végétation » (ou « sol nu ») et « type de pelouse rase » en ce qui concerne la pelouse écorchée.

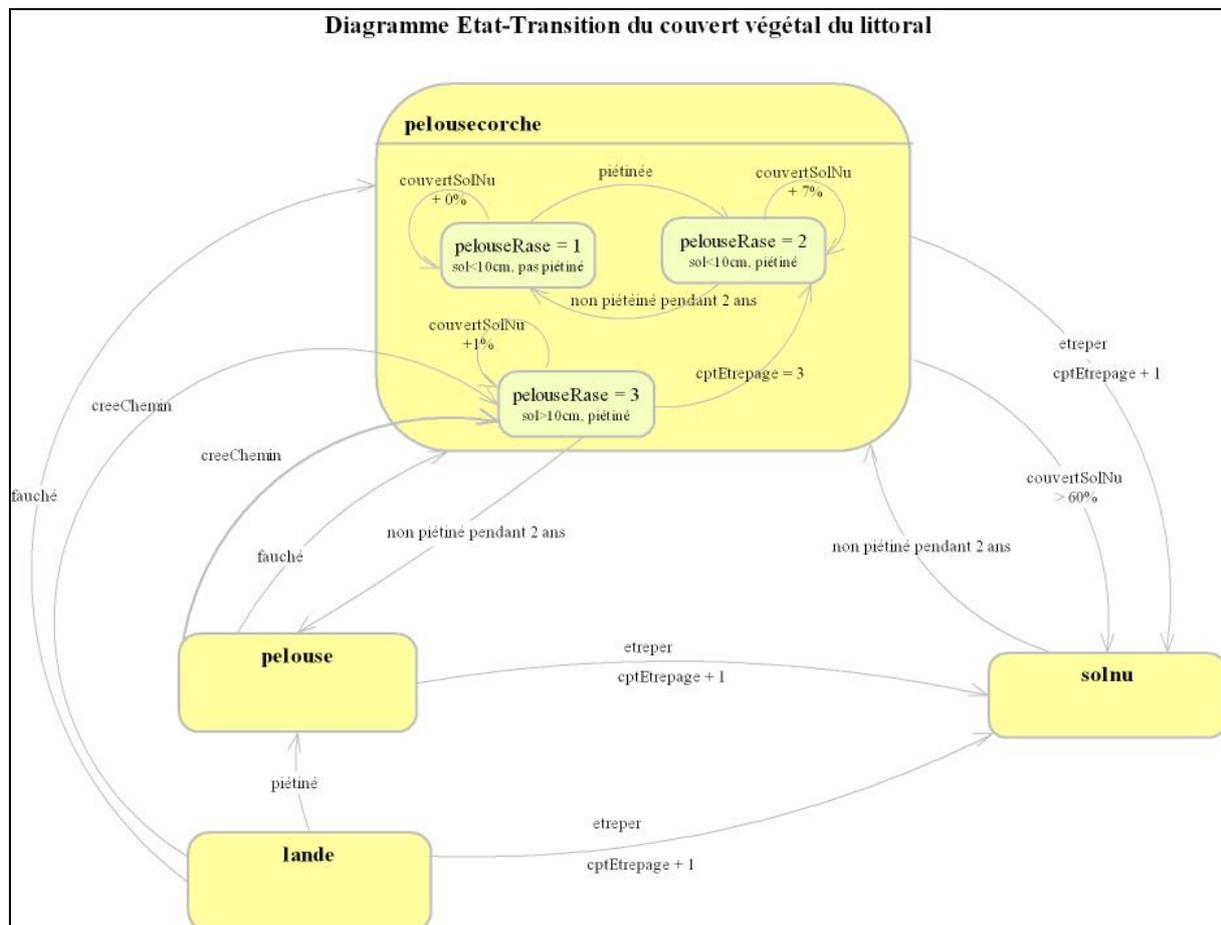


figure 2 : Diagramme d'état-transition de la végétation

3.2 Les indicateurs de biodiversité

3.2.1 La richesse spécifique.

A partir de relevés botaniques, la richesse spécifique a été estimée par grands groupements végétaux. Des correspondances ont été établies entre la richesse spécifique et une valeur du couvert. Ainsi cet indicateur a été implémenté en tant qu'attribut de cellule qui varie selon le type de végétation en premier lieu et le couvert en second lieu, ces deux éléments étant également des attributs de cellules.

Pelouse écorchée			Pelouse	Lande
Pelouse rase 1	Pelouse rase 2	Pelouse rase 3		
53,8 ± 8,2 94	49,6 ± 8,6 91	46,2 ± 8,1 93	23,7 ± 7,8	25,5 ± 2,6
	48,9 ± 12,2 84	25,5 ± 6,7 92		
	37,4 ± 8,1 67			

Tableau 1 : Correspondances entre les type de végétation, le % de couverture végétale (en gras) et la richesse spécifique

3.2.2 Les populations de plantes rares

Les taxa rares sont adaptés aux contraintes environnementales marines et sont trouvées essentiellement le long de la côte (annexe 4).



Isoète épineux
(*Isoetes histrix*)

Fougère
(ptérydophyte lycopode)

- protégée au niveau national

géophyte à bulbe
mars-juin

- liste rouge d'Armorique



Centauree maritime
(*Centaureum maritimum*)

Plante à fleur annuelle
(angiosperme gentianacée)

- liste rouge d'Armorique

hémicryptophyte
avril août



Ophioglosse du Portugal
(*Ophioglossum lusitanicum*)

fougère
(ptérydophyte)

- liste rouge d'Armorique

géophyte à rhizome
aout à décembre



Heterodermia leucomelos

Lichen buissonnant

- rare au niveau national.



Teloschistes flavicans

Lichen buissonnant

- rare au niveau national.

Les espèces rares retenues pour cette étude sont situées sur des zones soumises à la fréquentation humaine (hors des marais, grotte, falaise, cordon galets) et sont sensibles au piétinement (Kerbiriou, sous presse). Pour chacune d'entre elles, les stations ont été inventoriées et cartographiées sur des photographies aériennes (IGN 2002) et implémentées dans un Système d'Information Géographique (G.I.S. Arc-Info, Environmental Research System Institute Inc.). Les logiciels mapInfo et ArcView ont permis la création d'une carte comprenant toutes les stations répertoriées, compatible avec le logiciel Cormas. La différenciation entre les espèces est rendue possible au niveau de Cormas par un codage particulier.

Les relevés botaniques, répartis sur des zones soumises à différentes intensités de piétinement, ont permis de calculer des probabilités de présence par espèce (tableau 2) à partir du nombre de stations observées pondéré par une probabilité de détectabilité. La probabilité « toutes intensités confondues » est utilisée comme probabilité d'apparition pour une nouvelle population. L'intensité du piétinement* correspond à un effectif de touristes. Elle a été mise en place par un attribut de cellule « compteur touriste » qui varie lorsque l'entité touriste exécute la méthode « piétiner ».

	<i>T. flavicans</i>	<i>H.leucomelos</i>	<i>C. maritimum</i>	<i>I. histrix</i>	<i>O. lusitanicum</i>
intensité 1	0	0,8	0,84	0,28	1
intensité 2	0	0	0	0,29	1
intensité 3	0	0	0	0	0,21
toutes intensités confondues (Intensité 0 comprise)	0,06	0,11	0,125	0,19	0,02

Tableau 2 : probabilité de présence en fonction de l'intensité du piétinement.

*intensité 1 : < 4 000, intensité 2 : 4 000 -12 000, intensité 3 : > 12 000.

Ces plantes sont inféodées à la pelouse écorchée (Kerbiriou, sous presse). La présence ou l'absence d'une population dépend donc d'une part du type de végétation, d'autre part des caractéristiques propres à son espèce vis à vis du piétinement.

3.2.3 Le crave à bec rouge

La dynamique de population du crave à bec rouge est modélisée de manière individu-centré à partir du cycle de vie (annexe 5), paramétrée au moyen d'attributs correspondant aux taux de survie et au taux de reproduction. Elle est traduite par les méthodes suivantes :

« CraveChoisitNid » : affecte aux individus en âge de se reproduire un nid selon les disponibilités. Lorsqu'ils ont le choix, les individus choisissent celui qui apparaît le plus favorable en termes de surface de pelouse rase (habitat favorable) à proximité.

« CraveseReproduit » : Le succès reproducteur ou nombre de jeunes à l'envol dépend de l'âge de la femelle, de la qualité de l'habitat et de l'effectif de touristes au mois d'août.

« CraveMeurt » : fait disparaître les individus de manière aléatoire en tenant compte du taux de survie associé à leur âge.

« CraveVieillit » : actualise l'âge des survivants et les paramètres liés à l'âge qui leur sont associés, comme la fécondité des femelles.

3.3 L'agent « Touriste »

Afin de déterminer des catégories de touristes à partir de différents comportements, une enquête a été réalisée durant la période des vacances de Pâques (du 4 au 21 avril 2007). Du fait de la contrainte temporelle exigée par le stage et du manque de données complémentaires, cet agent a été construit à partir de cette seule enquête. Pour optimiser le temps d'enquête, la méthode des entretiens semi-directifs a permis de dégager des informations non seulement quantitatives mais aussi qualitatives. De plus, à chaque début d'entretien, une carte de l'île a été présentée à la personne interrogée pour reconstituer son itinéraire, ces reconstitutions favorisant l'échange et constituant une base solide pour mener les entretiens (Louis Brigand, Solenn Le Berr 2006).

Les 135 questionnaires (annexe 6) ont permis de déterminer la typologie : journalier, séjour court et vacancier, et leurs caractéristiques utilisées pour la modélisation (tableau 3). Les cartes ont servi de support pour établir la répartition pour chaque catégorie de touristes en fonction des zones touristiques. L'impact par catégorie de touriste est fonction de leur répartition, de leur consommation de ragoût et du temps qu'ils passent sur l'île.

catégorie	nombre de jours de visite moyen	probabilité de consommer du ragoût	dépense par personne et par jour (en euros)
Journalier (la journée) n=60	1	0,6	18,3 ±12,1
Séjour court (2 à 3 jours) n=52	2,2 ±0,6	0,27	39,9 ±28,7
Vacancier (4 jours et plus) n=23	6,38 ±2,6	0,3	177,7 ±18,1

Tableau 3 : Caractéristiques des catégories de touristes

Les comportements de réactivité face à l'environnement et aux autres catégories de touristes (évitement ou attraction de zones selon la végétation ou les zones de sol mis à nu, évitement des lieux à forte densité de visiteurs..) se sont révélés quasi inexistantes à cette époque de l'année et n'ont pas été modélisés.

Implémentation de l'agent « Touriste » au niveau du modèle :

Les effectifs et les proportions par pas de temps et catégories sont contrôlés au niveau de l'ordonnanceur. Ces informations sont reçues par l'entité « GroupDistribTour », qui gère la répartition par zones et la commande de ragoût toujours selon les catégories. L'agent touriste contrôle les méthodes de piétinement et de création de chemins qui ne sont pas différentes entre les catégories. Celles-ci ont été implémentées comme sous-classes de l'agent touriste avec leurs caractéristiques comme attributs (annexe 7).

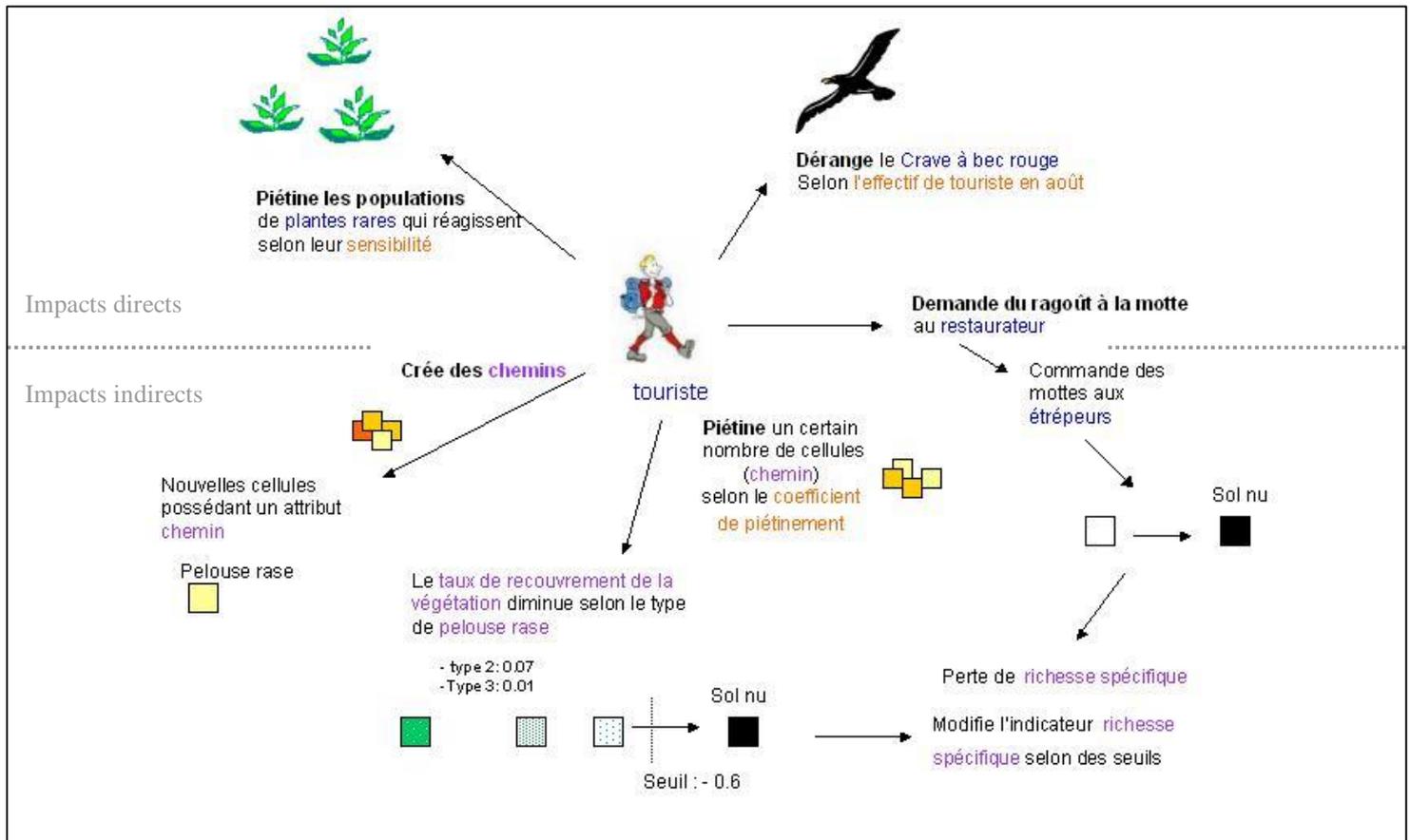


Figure 3 : Interactions autour de l'agent touriste

Les impacts directs sur les populations de plantes et sur le crave ont été décrits aux paragraphes 3.2.2. et 3.2.3.

Reste à préciser quelques points sur les impacts du tourisme sur l'environnement :

- Le restaurateur reçoit une demande de ragoût par catégorie de touriste et par pas de temps. Une fois dans l'année, il commande à l'étrépeur la quantité de « mottes » nécessaire pour y répondre. L'étrépeur évalue son stock, se rend sur un terrain accessible en voiture et à proximité d'une zone déjà étrépeée (les zones d'étrépage sont délimitées initialement), et les prélève. La cellule passe alors en état « sol nu ».
- Les « cellules piétinées » sont des chemins ou des cellules voisines. Leur nombre est fonction de l'effectif de touristes sur la zone concernée, du nombre moyen de jours de

promenade sur l'île, pondéré par le nombre de jours dans un pas de temps et du coefficient de piétinement. Ce coefficient est une approximation du nombre de touristes nécessaires pour piétiner une cellule en respectant le taux d'érosion du couvert végétal annuel.

- Le processus de création de chemin dépend des mêmes variables, localisé à partir des chemins déjà existants et est nuancé par le type de végétation : Un ratio de 1/20 permet de traduire le fait qu'il est plus fréquent sur de la pelouse que dans la lande. Il aboutit à la création d'habitat favorable, la pelouse écorchée de type 3.

3.4 Le modèle, aspect spatial et temporel.

La figure 4 rappelle le rôle de l'environnement et par conséquent l'importance de la spatialisation. L'unité, la cellule, représente une surface de 225 m² soit 15m x 15m.

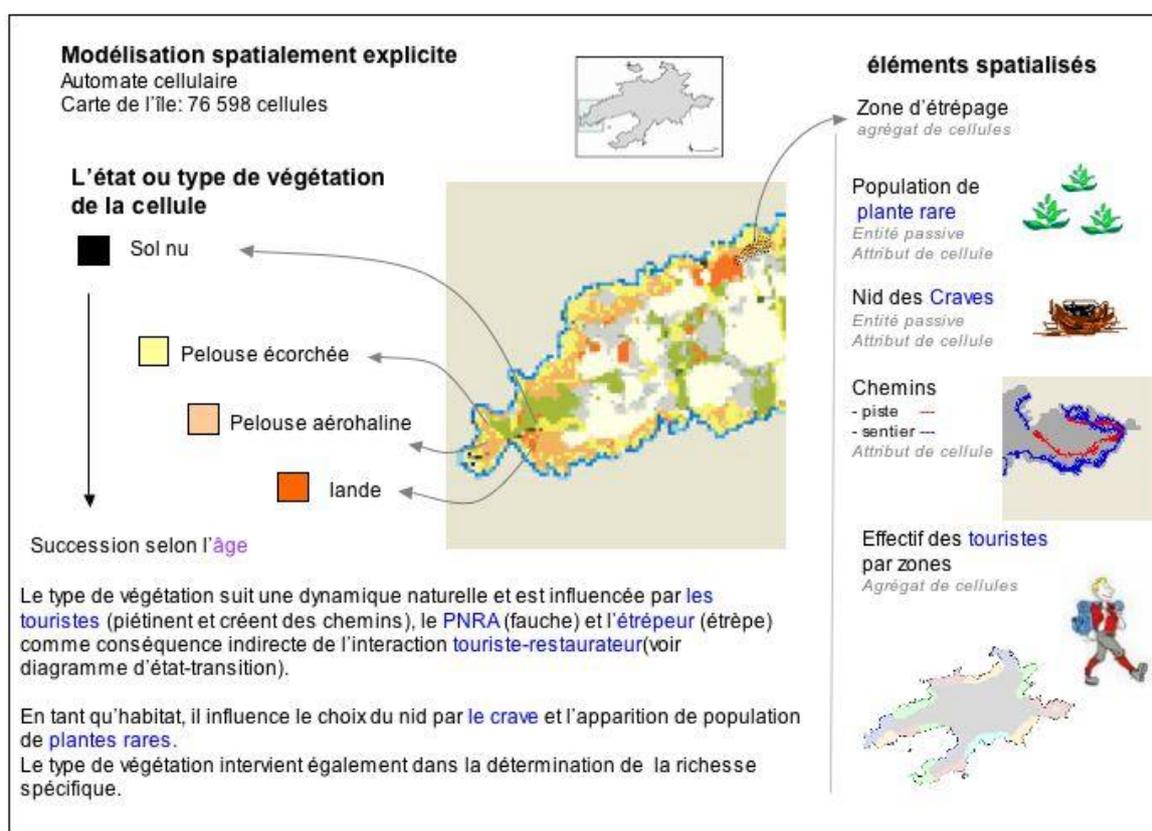


Figure 4 : Modélisation spatiale

L'année est découpée en trois pas de temps de quatre mois. Chaque pas de temps correspond à des périodes spécifiques pour le tourisme et les dynamiques écologiques. Ainsi, le second pas de temps – qui représente la période de juin à septembre – correspond à une période de forte fréquentation touristique et de reproduction des craves. Les événements se déroulent selon un ordre établi :

Séquence des évènements par pas de temps

<p>1er pas de temps : février - mai végétation pousse, mise à jour du type de végétation mise à zéro du compteur touriste* initialisation de l'effectif et des proportions de touristes chaque catégorie de touriste piétine, crée des chemins et commande des ragoûts Le PNRA restaure les pelouses écorchées Les restaurateurs commandent les mottes Les étrepeurs évaluent stock Les étrepeurs étrèpent mise à jour de la richesse spécifique mise à jour des populations de plantes rares</p>	<p>2nd pas de temps : juin -septembre végétation pousse, mise à jour pour le type de végétation initialisation de l'effectif et des proportions de touristes chaque catégorie de touriste piétine, crée des chemins et commande des ragoûts des Craves meurent mise à jour du nombre de Craves les Craves choisissent un nid les Craves se reproduisent les Craves vieillissent mise à jour du taux de survie des jeunes mise à jour du nombre de Craves mise à jour de la richesse spécifique mise à jour des populations de plantes rares</p>	<p>3ème pas de temps : octobre -décembre végétation pousse, mise à jour pour le type de végétation initialisation de l'effectif et des proportions de touristes par pas de temps Chaque catégorie de touriste piétine, crée des chemins et commande des ragoûts mise à jour de la richesse spécifique mise à jour des populations de plantes rares</p>
---	---	--

4. Protocole de simulation

Le temps de simulation est de dix ans soit trente pas de temps.

Pour les premières simulations, les agents anthropiques n'ont pas été pris en compte afin de déterminer les effets émergents possibles qui leur sont indépendants et d'évaluer la variabilité des indicateurs selon la stochasticité qui leur est propre.

La seconde série permet de comparer l'effet de chaque catégorie de touristes sur les indicateurs par des simulations de type « 100% de touristes d'une catégorie ». Le coefficient 'nombre de jours de promenade', qui différencie les efforts de piétinement par catégories de touristes à été retiré pour permettre d'observer des effets uniquement liés à la répartition et à l'étrépage (liée à la consommation de ragoût).

La consommation de ragoût et par conséquent l'étrépage ont ensuite été supprimés du modèle. La comparaison de cette troisième série avec la deuxième a permis d'identifier l'effet de l'étrépage sur les indicateurs de biodiversité.

Enfin, des variations de proportions (% dans le tableau ci-dessous) de catégories de touristes ont été testées en rétablissant l'effort de piétinement :

Scénario	Journalier (J)	Séjour court (SC)	Vacancier (V)
A	30	50	20
B	44,5	38,5	17
C	60	25	15
D	80	15	05

Tableau 4 . Proportions selon les scénarios

Le scénario B correspond aux proportions déterminées au cours de l'enquête.

VI RESULTATS

Plus de 200 simulations (chaque simulation dure 2 heures) ont permis d'évaluer différentes manières d'implémenter les données, d'apprécier les effets de certains paramètres du modèle tels que les coefficients, et finalement de construire le modèle de manière itérative.

Pour les résultats obtenus avec le modèle final, seulement un petit nombre d'itérations ($5 < n < 11$) pour chaque série de simulation (soit 84 simulations au total) a pu être réalisé. Les résultats que nous présentons sont donc plus de nature exploratoire mais ils permettent déjà d'ouvrir des pistes de réflexion qui pourront être approfondies avec des répétitions plus nombreuses.

1. Simulations sans agents sociaux

1.1 Variabilité des indicateurs

Parmi les indicateurs observés, le nombre de craves a le coefficient de variation le plus élevé, la richesse spécifique la plus faible, tandis que celui du nombre de stations par espèces de plantes est intermédiaire. *I. hystrix* et *O. lusitanicum* sont les espèces dont ce nombre varie le moins entre les différentes simulations au temps observé (tableau 5).

	Nombre initial	Moyenne t 30	Ecart-type	Coefficient de variation
Nombre d'espèces moyen /cellule	26,48	28,50211	0,0294	0,001
Richesse spécifique				
Nombre de populations : <i>H. leucomelos</i>	53	71,2	8,390	0,117
<i>I. hystrix</i>	138	209,5	16,091	0,076
<i>O. lusitanicum</i>	105	109	3,265	0,029
<i>T. flavicans</i>	46	53,1	5,586	0,105
<i>C. maritimum</i>	41	51	5,497	0,107
Nombre de d'individu : Craves	55	44	16,996	0,386

Tableau 5 : Variabilité des indicateurs. (n = 10)

1.2 Dynamique de la pelouse écorchée.

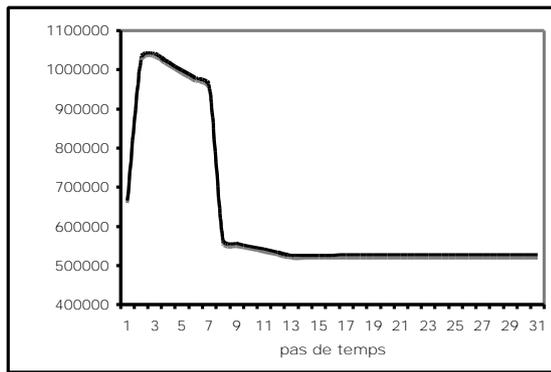


Figure 5 : surface totale de pelouse écorchée en m² au cours du temps. (n =10)

La courbe de la figure 5 indique une augmentation de plus 300 000 m² de pelouse écorchée. Cette surface diminue brusquement au 6^{ème} pas de temps, soit au bout de 2 ans, pour se stabiliser aux environs de 500 000 soit 2 km².

(A un pas de temps donné, la variabilité entre les simulations est en moyenne de 2301,61 m²).

2. Impact des différentes catégories de touristes.

2.1 Sur la richesse spécifique.

Après une augmentation équivalente selon les catégories de touristes, la richesse spécifique décroît et converge vers un total de 20 espèces à dix ans (figure 6). La courbe représentant l'impact de la catégorie 'journalier' est plus linéaire au cours du temps que celles des 'séjours courts' et 'vacanciers'. Ces dernières se révèlent très similaires et traduisent une perte d'espèces plus rapide à partir du 7^{ème} pas de temps, atteignant ainsi une moyenne de 23 espèces par unité spatiale dès le 10^{ème} pas de temps.

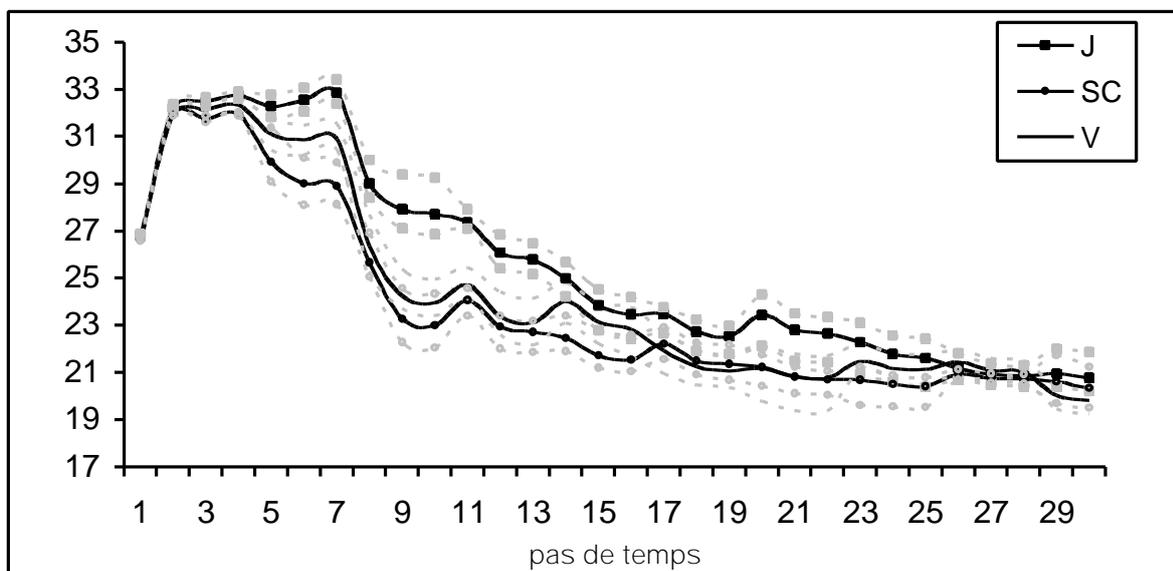


Figure 6 : richesse spécifique moyenne des zones littorales par unité de surface (225m²). (n = 5) en gris : valeur correspondant à 95% des valeurs extrêmes obtenues.

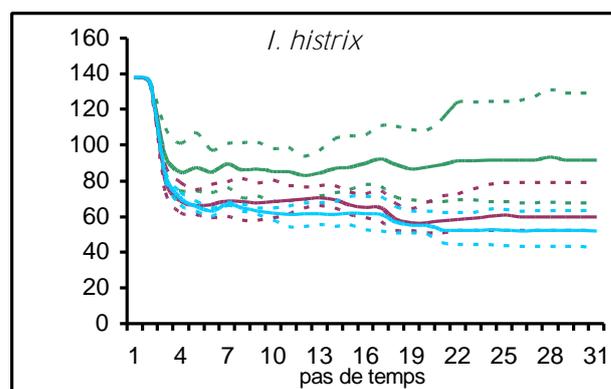
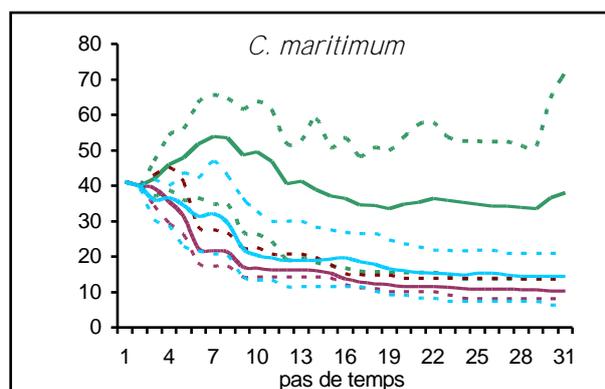
2.2 Sur les populations de plantes rares.

Les impacts des touristes sont généralement négatifs sur le nombre de populations de plantes rares à t=30 (tableau 6). L'impact moyen des 'journaliers' est moindre que celui des 'séjours courts' et des 'vacanciers' en ce qui concerne les espèces *C. maritimum*, *H. leucomelos* et *I. hystrix*, et est équivalente pour *O. lusitanicum* et *T. flavicans*. Par ailleurs, on observe que les espèces *C. maritimum* et *H. leucomelos* ont vu leur nombre de population être supérieur au nombre initial au bout de dix ans dans le cas des simulations avec 100% de touristes de type journalier. La variabilité observée est globalement toujours plus importante pour la catégorie 'journalier'.

	J	SC	V
<i>C. maritimum</i>	92,7 [33,2 ;175,4]	25 [19,7 ; 33,4]	34,7 [15,54 ; 50,8]
<i>H. leucomelos</i>	81,5 [56,8 ; 111,9]	55,6 [34,9 ; 86]	47,6 [35,2 ; 54,4]
<i>I. hystrix</i>	66,2 [48,9 ; 93,7]	43,5 [37,7 ; 57,2]	37,5 [30,6 ; 45,9]
<i>O. lusitanicum</i>	46,3 [41,3 ; 50,5]	49 [47,6 ; 51,3]	45 [43,8 ; 46,6]
<i>T. flavicans</i>	7,4 [10,9 ; 4,34]	8,7 [2,7 ; 14,7]	8,7 [2,7 ; 12,9]

Tableau 6 : Nombre moyen de populations présentes à 10 ans (t=30) exprimé en % du nombre de populations initialement présentes. (n = 5)
entre crochets : valeur correspondant à 95% des valeurs extrêmes obtenues.

Au cours du temps, les tendances et la variabilité des réponses sont différentes selon les espèces (figure 7) : Les trajectoires apparaissent similaires pour *C. maritimum* et *I. hystrix*, la courbe J se différenciant des autres dès le 3^{ème} pas de temps. Le pattern observé pour *T. Flavicans* montre que l'impact des touristes est équivalent pour chaque pas de temps alors que des différences sont observables seulement entre le 5^{ème} et le 11^{ème} pas de temps pour *O. lusitanicum*.



— J — SC — V

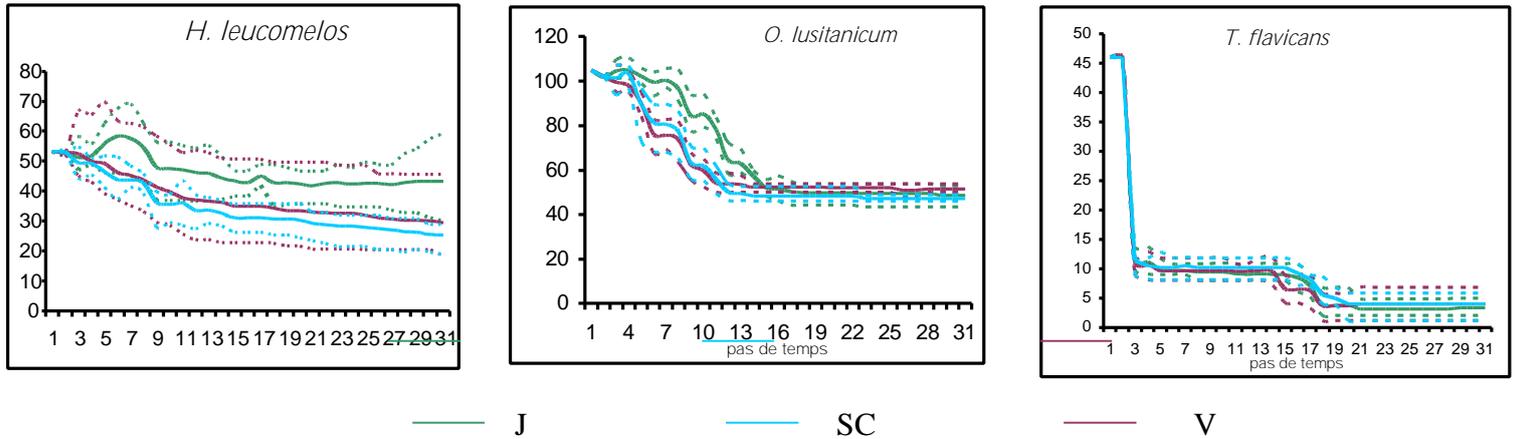


Figure 7 : Evolution des population de plantes rares en fonction des catégories de touristes (n = 5) en pointillé : valeur correspondant à 95% des valeurs extrêmes obtenues.

2.3 Sur le crave à bec rouge

La population de crave à bec rouge augmente légèrement jusqu'au 12^{ème} pas temps, reste stable jusqu'au 23^{ème} pas de temps et commence à décroître pour atteindre une moyenne de 50 individus au bout de 10 ans.

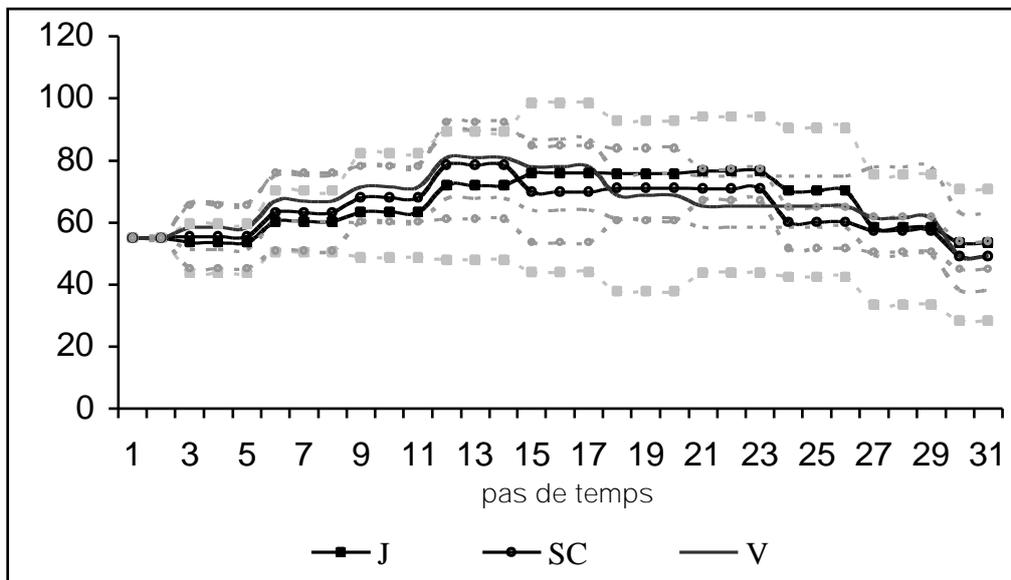
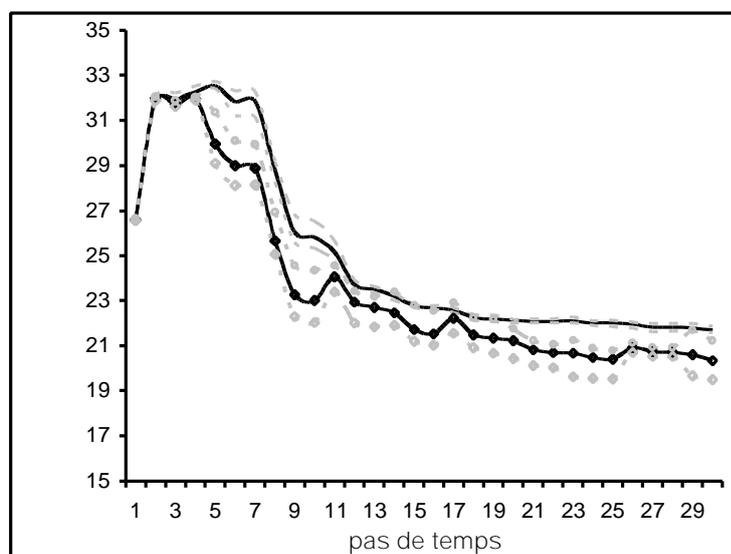


Figure 8 : Evolution de la population de craves à bec rouge en fonction du temps. (n = 5) en gris : valeur correspondant à 95% des valeurs extrêmes obtenues.

Il n'apparaît pas de différence selon les catégories de touristes. Ce résultat est également obtenu pour le nombre de nids occupé par des couples reproducteurs (annexe 8).

3. Impact de l'étrépage

3.1 Sur la richesse spécifique



Dans les deux cas, la diminution du nombre d'espèces suit le même pattern. Sans l'étrépage, il y a en moyenne une espèce en plus et la variabilité est réduite. Cet exemple provient des simulations '100% séjours courts'. Les résultats sont les mêmes avec '100% vacanciers' (annexe 9).

Figure 9 : Evolution de la richesse spécifique avec ou sans étrépage (exemple catégorie séjours courts) (n = 5) en gris : valeur correspondant à 95% des valeurs extrêmes obtenues.

3.2 Sur les populations de plantes rares.

De manière générale, l'étrépage n'apparaît pas avoir d'impact sur les populations de plantes rares (figure 10 et annexe 10). L'espèce *O. Lusitanicum* serait la seule susceptible de subir un effet négatif par cette pratique dans le cas de simulation '100% séjours courts'.

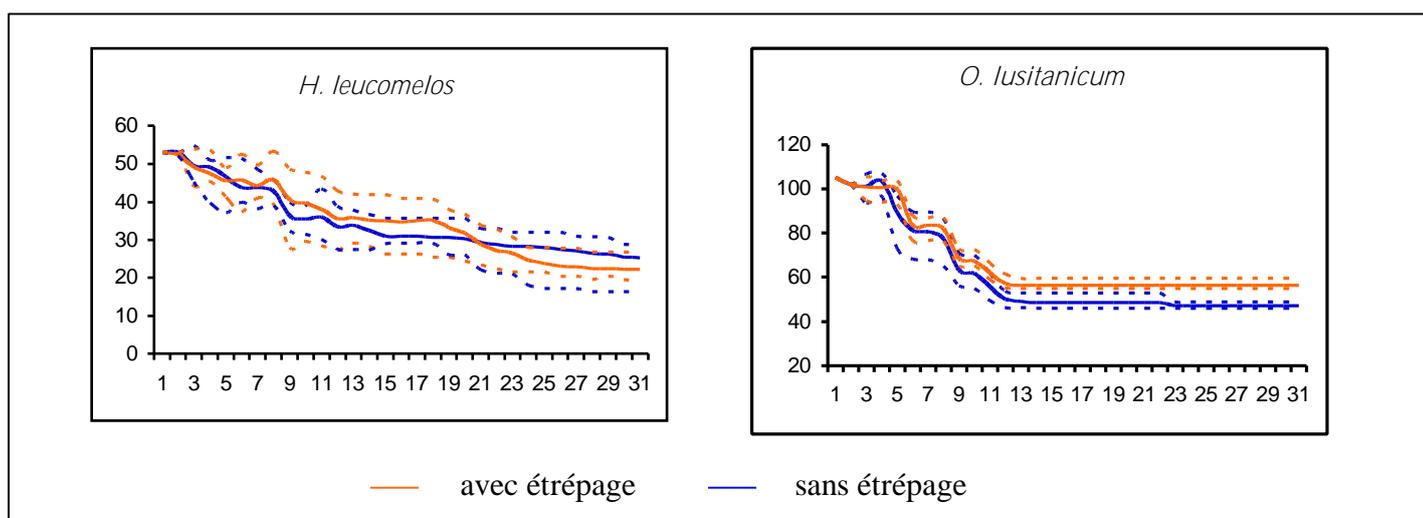


Figure 10 : Evolution du nombre de stations au cours du temps, avec ou sans étrépage, (exemple de catégories vacanciers.) (n = 5) en pointillé : valeur correspondant à 95% des valeurs extrêmes obtenues.

3.3 Sur le crave à bec rouge.

Une différence apparaît (figure 11, exemple avec les vacanciers) à partir du 21^{ème} pas de temps ; lorsqu'il y a « étrépage » la population reste stable jusqu'au 29^{ème} pas de temps alors qu'elle diminue progressivement dans le cas contraire. A l'issue des 10 ans, la population compte 49 individus en moyenne avec l'étrépage pour 20 individus sans étrépage.

Les mêmes résultats sont trouvés pour les simulations avec les séjours courts et l'allure de l'indicateur « nombre de nids occupés par un couple reproducteur » montre les mêmes types de trajectoire (annexe 11).

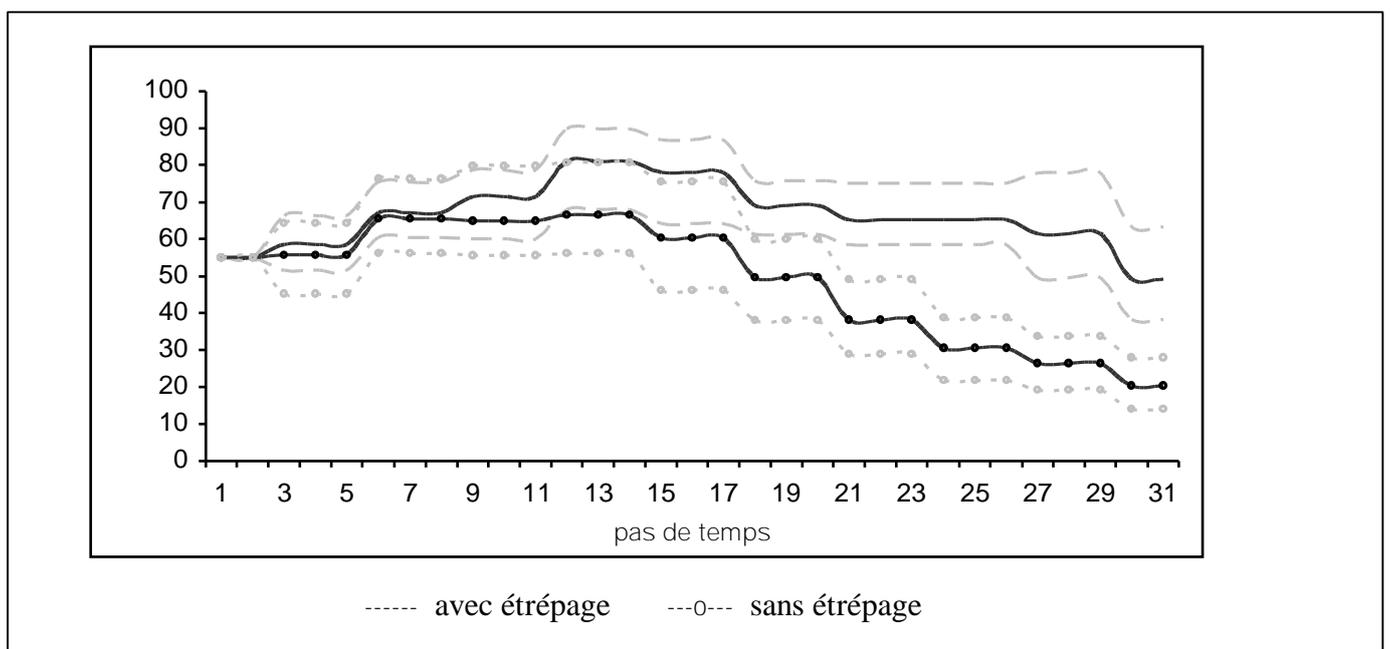
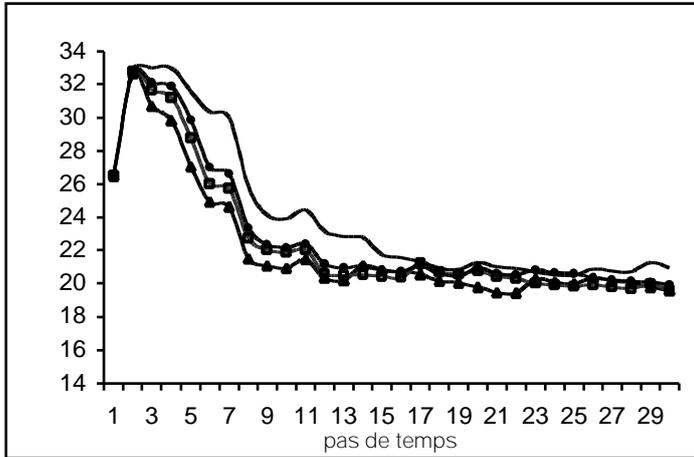


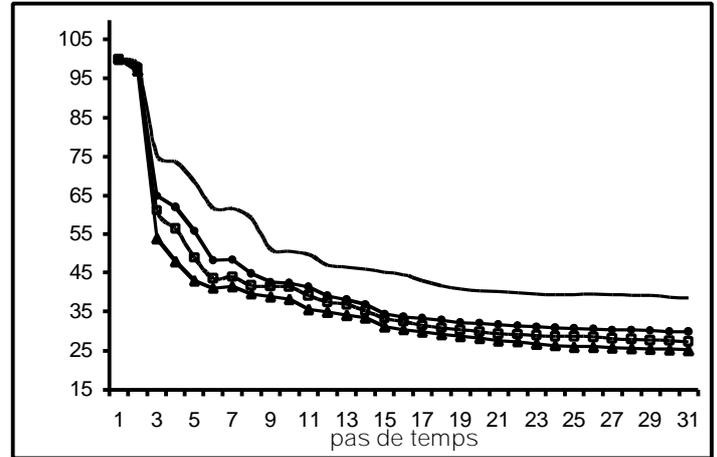
Figure 11 : Evolution de la population de craves au cours du temps, avec ou sans étrépage, (exemple de catégories vacanciers.) (n = 5)

4. Scénarios avec différentes proportions de catégories de touristes.

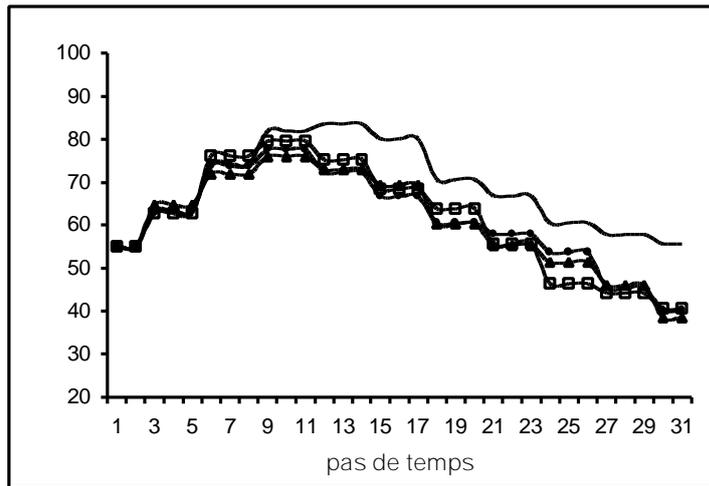
Il n'y a pas de différence significative observable entre les impacts des différents scénarios pour l'ensemble des indicateurs étudiés. Cependant, la courbe moyenne (figure 12) correspondant aux proportions 80% de 'journaliers', 15% de 'séjour court' et 5% de 'vacanciers' se démarque des autres qui sont quasi-similaires.



Richesse spécifique



« indice plantes patrimoniales »



nombre de craves

▲ A □ B ● C — D

Figure 12 : Variation des indicateurs au cours du temps selon les scénarios. (n = 11). (pour plus de clarté seules les moyennes sont représentées)

Le nombre de population par espèce de plante à été ramené à 100 pour fournir un indice global et représenter les effets de chaque scénario sur les peuplements d'espèce rare de manière générale.

V DISCUSSION

1. Dynamique de la végétation

La dynamique de la pelouse écorchée (Figure 5) révèle un artefact dû à la conception de la dynamique de la végétation dans le modèle. En effet, celle-ci a été conceptualisée par rapport à des impacts anthropiques. D'autre part, les cellules correspondant à un type végétal particulier ont toutes le même âge lors de l'initialisation du modèle. Ainsi, les cellules 'sol nu' passent à l'état 'pelouse écorchée' au début de la simulation et après deux ans toutes les cellules 'pelouse écorchée' avec l'attribut 'pelouse rase =2' passent en 'pelouse rase =1' et celles en 'pelouse rase =3' deviennent de la 'pelouse'. Autrement dit, les cellules qui auraient dû être piétinées retournent aux formations végétales non piétinées. La surface correspondant à ces états est ainsi stabilisée au cours de la 2^{ème} année. Cette phase peut être considérée comme un « temps de réajustement » du système qui passe d'un état initial conceptuel à un état dû à l'action des agents sociaux.

2. Les indicateurs

En écologie, La richesse spécifique est l'indicateur de biodiversité le plus souvent utilisé (Simberloff, 1999), bien qu'il soit peu informatif sur les dynamiques écosystémiques (Levrel, 2006). La manière de l'implémenter au sein du modèle, avec d'une part un grand nombre de cellules impliquées (4430), sachant d'autre part qu'une seule valeur est attribuée à toutes les cellules de type « pelouse » ou « lande », serait à l'origine de la faible variabilité observée. Par ailleurs, il serait intéressant de se placer à une autre échelle que celle de l'île et de tester cet indicateur sur des zones locales, une pointe particulière de l'île par exemple. Cela soulève la question de l'échelle spatiale considérée pour l'évaluation. Dans notre cas, sur la surface d'une cellule (225 m²), plusieurs milieux peuvent co-exister. Mais par le biais de la constitution de la grille de cellules, seul l'habitat le plus représenté sera identifié.

Le nombre de populations de plantes rares est plus réactif au niveau de la modélisation parce qu'elles ont été modélisées avec plus de précision. La rapidité avec laquelle les populations chutent indique probablement un problème de paramétrage au niveau de l'intensité du piétinement. Ceci n'empêche pas les comparaisons qualitatives. Les dynamiques de la population du crabe à bec rouge sont très variables du fait de la modélisation individu-centré, qui génère de la stochasticité liée aux traits d'histoire de vie. Il est alors moins évident de discerner des effets des contraintes environnementales lorsque les scénarios testés sont

proches. Emettre des hypothèses prédictives à ce sujet demanderait un nombre très important de simulations. Les différences de variabilité observées reflètent bien le degré de précision avec lequel les indicateurs ont été modélisés.

Alors que le suivi de terrain est très lourd pour la richesse spécifique, le nombre de populations de plantes et la taille de population de craves sont plus facilement mesurables.

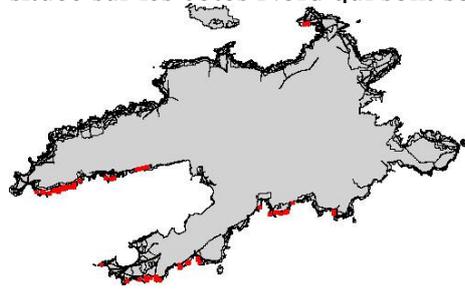
Les questions de conservation que soulève l'évolution de ces indicateurs peuvent être institutionnellement situées. En effet, le site étudié bénéficie du double statut de Parc naturel régional (PNR) et de Réserve de Biosphère. La conservation des espèces communes, mesurée par la richesse spécifique, n'est pas forcément le premier objectif des gestionnaires de PNR ; Tandis qu'une Réserve de Biosphère a vocation à s'intéresser à la biodiversité « utilisée », « valorisée socialement », et qui est « proche » des habitants de la réserve. Les PNR s'intéresseront davantage à la protection de la biodiversité patrimoniale. Or, « *La patrimonialisation ne permet pas de tout conserver : un choix social et culturel est clairement effectué* » (Chauvin-Louafi et Roussel *In* Barbault, 2005). Ce choix est souvent guidé par la conservation d'espèces emblématiques comme le crave à bec rouge ou des espèces « liste rouge » qui sont bien représentées par nos populations de plantes rares. La richesse spécifique est un indicateur qui prend évidemment beaucoup plus en compte la nature commune ou ordinaire. Ces indicateurs renvoient donc à des visions relativement différentes de la conservation sur l'île d'Ouessant et peuvent offrir à cet égard un outil de discussion précieux pour les gestionnaires et les acteurs locaux.

3. Exemple d'un effet de répartition spatiale

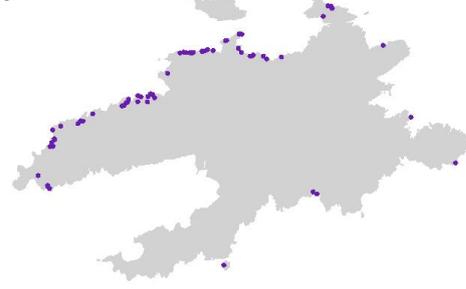
Les résultats des simulations présentés dans les figures 7 montrent que les populations de plantes réagissent différemment selon les catégories de touristes et plus précisément selon qu'il s'agit des 'journaliers' ou des autres. L'étrépage ne semble pas jouer de rôle important sur les populations (figure 10) . Ainsi, les différences observées pour une même espèce proviennent de la combinaison de la répartition des populations et de la fréquentation touristique.

Les réactions spécifiques ont aussi été différentes. Les populations de Centaurées et d'Isoetes ont les probabilités d'apparition les plus élevées et sont celles dont le nombre final de stations a parfois été supérieur à leur nombre initial. Pourtant, les probabilités attribuées aux populations n'expliquent pas tout : celles d'*Heterodermia* et de la Centaurée sont très proches mais leurs dynamiques sont différentes. Au contraire des populations de Centaurée, le nombre de

populations d'*Heterodermia* n'a jamais augmenté. Leur répartition serait alors l'autre facteur explicatif : La Centaurée se trouve sur les côtes orientées Sud alors qu' *Heterodermia* est située sur les côtes Nord qui sont soumises à une



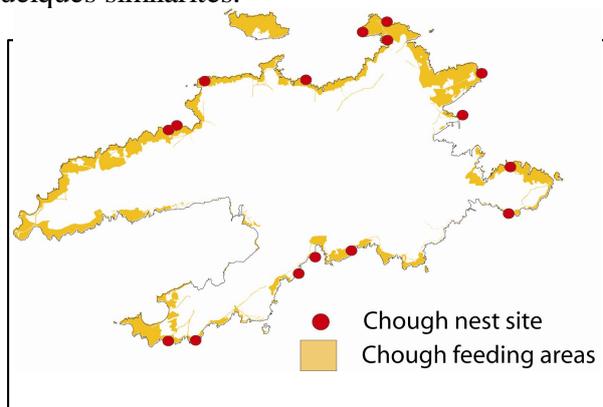
Répartition Centaurée



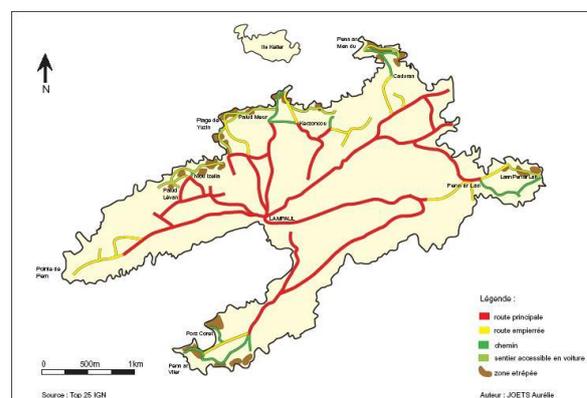
Répartition *Heterodermia*

4. Exemple d'un effet émergent

L'étrépage est une pratique qui existe depuis longtemps sur l'île. Les mottes y étaient le seul combustible disponible en l'absence d'arbres. Cette activité est perçue de manière très négative pour l'environnement. Pourtant les résultats montrent un effet neutre ou très faible sur la richesse spécifique et les populations de plantes. De plus, cette pratique s'avère moins déstabilisante pour la population de craves à bec rouge, sur l'échelle de temps considérée, si l'on compare les scénarios avec et sans étrépage. Cela peut être expliqué par la recolonisation des terrains étrépages sur lesquels la pelouse rase s'installe. L'installation de surfaces de pelouses rase dans un territoire occupé par un couple reproducteur a pour effet d'influencer positivement le succès reproducteur du crave. Il s'agit bien d'un effet émergent du système. D'ailleurs on observe que la répartition des nids et celle des zones étrépages montrent quelques similarités.



Répartition des nids de craves



Répartition des zones étrépages

5. Les scénarios

A la différence des autres simulations qui permettaient de dégager des effets au travers des différents comportements des catégories de touristes, les scénarios prennent en compte la durée de l'effort de piétinement et les apports financiers du tourisme (Annexe 12). Ils ont pour but de s'approcher de la réalité.

Les proportions 80% de 'journaliers', 15% de 'séjour court' et 5% de 'vacancier' semblent plus favorables pour l'ensemble des indicateurs bien que les différences ne soient pas significatives. Par rapport aux autres séries de simulations, l'impact est pondéré par un effort en termes de temps : le nombre de jours de piétinement. Il serait intéressant de déterminer l'importance de cet effort en le supprimant pour faire de nouvelles simulations avec les mêmes scénarios. De plus les trajectoires des courbes laissent penser qu'il pourrait y avoir un effet de seuil puisque celle qui correspond à 60% de journaliers est plus proche de celle correspondant à 30% que celle à 80%.

6. Limites et perspectives

6.1 *Plantes rares*

La dynamique du crabe a été modélisée de manière individu-centré, ce qui convient mieux pour les études de viabilité des petites populations. Cette remarque est valable pour les populations de plantes rares : introduire une notion d'abondance, au sein d'une population, permettrait d'enrichir cet indicateur qui a été modélisé seulement à l'aide de probabilités de présence. Par exemple, une population d'Ophioglosses ou d'Isoètes est favorisée par un piétinement d'intensité faible et moyenne (Kerbiriou, sous presse). Les sols piétinés sont alors moins perméables et l'eau de pluie qui stagne à la surface crée des conditions d'humidité favorables à leur développement. Cependant, le fait d'avoir modélisé les populations sans passer par un modèle individu-centré peut se justifier par la taille réelle des populations. En effet, sur un site, la densité est bien souvent comprise entre 10 et 100 individus au mètre carré, sur des surfaces qui peuvent dépasser 10 m². Il est possible de faire l'hypothèse qu'il n'y ait pas d'événements stochastiques en grand nombre et à court terme (10 ans) entraînant des dérives démographiques.

6.2 Touristes et piétinement

L'hypothèse de représentativité des touristes du mois d'avril, est une hypothèse très forte ; il est fortement probable que les proportions retenues selon les catégories ne soient pas équivalentes sur l'année. Le biais qui en résulte est une homogénéisation de l'effort de piétinement en terme de surface impactée et de répartition au cours de l'année. Cet aspect à été pensé lors de la construction du SMA mais n'a pu être mis en œuvre par manque de données. De nouvelles enquêtes seraient nécessaires pour avancer sur ce point.

Au delà de la question des proportions, se pose celle de la typologie des catégories. Par exemple, durant la saison estivale, une nouvelle catégorie pourrait apparaître, celle des vacanciers qui possèdent une maison secondaire. Ce type de touristes à été rencontré en avril mais en trop faible effectif ($n=3$) pour en dégager des informations.

Il faudrait également vérifier que la répartition ne diffère pas en été. Notons cependant qu'elle est liée à la superficie de l'île, le temps de séjour et les lieux attractifs (phares et points de vue) qui ne sont pas des éléments variables.

De plus, les comportements étudiés en avril n'ont pas montré de réactivité face aux autres touristes, à travers des réactions d'évitement ou encore à l'environnement, à travers le choix des itinéraires. Il serait envisageable que ce type de comportement apparaisse en été, du fait de la densité de touristes et de l'impact sur la végétation qui devient plus visible (zones de sol mis à nu par le piétinement ou l'étrépage).

Au sujet du piétinement, il serait plus judicieux de déterminer un nombre d'heures de promenade au lieu d'un nombre de jours afin de préciser les efforts par catégories de touristes. En effet il est probable que le touriste journalier passe la majeure partie de sa journée à marcher, tandis que le touriste qui reste une semaine va sans doute marcher moins longtemps chaque jour parce qu'il a plus de temps devant lui pour découvrir l'île. Il en résulte des pressions de piétinement qui devraient être évaluées en termes d'heures plutôt que de journées.

Enfin, l'approximation du coefficient de piétinement est liée à la difficulté d'établir un tel paramètre, sauf peut-être en procédant à une expérimentation.

VI CONCLUSION

Parmi les phénomènes affectant la biodiversité, ceux liés à la fréquentation touristique nécessitent une meilleure connaissance des différents comportements sociaux des touristes.

Les différents comportements sociaux peuvent en effet avoir des conséquences diverses.

Il est important de nuancer les impacts de l'activité anthropique. Rien ne peut être considéré comme complètement positif ou complètement négatif. Par exemple, bien qu'il y ait dégradation des habitats et dérangement de la faune, le piétinement et la pratique de l'étrépage pourraient maintenir des surfaces d'habitat favorables aux plantes rares étudiées et aux craves à bec rouge.

L'agencement spatial des éléments du système joue également un rôle important, ainsi que l'a montré l'étude en mettant en évidence un effet de répartition.

Ainsi, si l'on veut prendre les décisions de gestion appropriées, il y a une complexité à appréhender. Il est très important de décrire l'écosystème avec précision, discerner les facteurs d'impact et leur importance relative, les cibles d'impact et les conditions de réalisation du phénomène étudié.

Un système multi-agents permet d'intégrer ces éléments avec précision, de prendre en compte la spatialisation et par conséquent d'approcher la complexité du réel. Il peut servir aux études de viabilité des populations comme constituer un véritable laboratoire virtuel de recherche nature-société. Il est également un outil de gestion puissant autant parce qu'il permet de discerner l'importance relative des facteurs causant l'érosion de la biodiversité que par sa capacité d'intégration et de mise en évidence d'effets émergents.

La précision que requiert cette modélisation fait apparaître de nouvelles problématiques afin d'appréhender au mieux le système et lors de cette étape, la qualité de l'échange entre l'écologue, le sociologue et le modélisateur est déterminante. Elle peut alors conduire à l'établissement de nouveaux protocoles qui puissent servir recherche et gestion. D'autre part, l'intégration de données de différentes natures soulève de nombreuses questions et, malgré les difficultés qu'elle implique, est un défi passionnant à relever.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Barbault R. (2006). *Un éléphant dans un jeu de quilles, l'homme dans la biodiversité*. Edition du seuil.
- Barbault R. et Chevassus-au-Louis B., (eds.), (2004), *Biodiversity and Global Change*, Ministère des Affaires Etrangères, adpf, 237p.
- Bousquet F., Lepage C. (2004). Multi-agent simulations and ecosystem management : a review. *Ecological Modelling*. 176 (2004) 313-332
- Buckley, R.C. (2000). Tourism in the most fragile environments. *Tourism Recreation Resource* 25, 31-40.
- Buckley, R.C. (2003). Ecological indicators of tourist impacts in parks. *Journal of Ecotourism* 2:54-66.
- Brigand L. et Boulestreau G. (1995). *Guide d'Ouessant*, Les Editions Buissonnières, Collection Découvertes Buissonnières, 79p.
- Brigand L., Le Berre S. (2006) "Etude de la fréquentation de l'archipel des îles Chausey" Rapport, Geomer UMR 6554 LETG- Université de Bretagne occidentale.
- Ceballos-Lascurain, H. (1991). Tourism, Ecotourism, and protected area. in Kusler J.A (ed.) *Ecotourism and Resource Conservation* vol.1 Omnipress, Madison. USA
- Cibien C., Bioret F., Genot J.C. (2006) Biodiversité et acteurs : des itinéraires de concertation. *Réserves de Biosphère- notes techniques 1-2006*, Sciences écologiques et de la terre à l'UNESCO
- Epler Wood, M. (1996). The Evolution of Ecotourism as a Sustainable Development Tool. The Sixth International Symposium on Society and Natural Resource Management, Pennsylvania State University USA.
- Franc A., Sanders L. (1998) "Modèles et systèmes multi-agents en écologie et en géographie: état de l'art et comparaison avec les approches classiques". *Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires, actes de Colloque Clermont Ferrand 5-8 octobre*, Cemagref édition
- Gallet S., Rozé F. (2002). Long term effects of trampling on Atlantic Heathland in Brittany (France) : resilience and tolerance in relation to season and meteorological conditions. *Biological Conservation* 103 :267-275
- Gallet S., Lemauviel S., Rozé F. (2004). Responses of Three Heathland Shrubs to Single or Repeated Experimental Trampling. *Environmental Management* Vol. 33, No. 6, pp. 821-829 Springer-Verlag New York, LLC
- Guerrero, P., & Munoz, E. (2002). Ecotourism to the galapagos island, a world heritage site. Society for Conservation Biology 16th Annual Meeting. Durrell Institute Of Conservation and Ecology University of Kent at Canterbury & British Ecological Society.
- Gremmen N. J. M., Smith V. R., van Tongeren O. F. R. (2003). Impact of Trampling on the Vegetation of Subantarctic Marion Island *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, Vol. 35, No. 4 pp. 442-446

- Harriot, V. (2002). Marine tourism on the great Barrier Reef. [<http://www.greatbarrierreef.org>]
- IUCN, DFID & European Commission (2002). Tourism and Biodiversity. Biodiversity in Development Biodiversity Brief 9. [<http://wcpa.iucn.org>].
- Javier F.G.L., de Lucio J.V. (1995). Recreational activities and loss of diversity in grasslands in Alta Manzanares natural park, Spain. *Biological Conservation* 74 pp.99-105
- Jones C. G. Lawton J.H., Schacak M. (1994). Organism as ecosystem engineers. *Oikos*, 69 : 373-386
- Kerbiriou C. (2006). Impact des changements d'usage sur la viabilité d'une population menacée dans un espace multi-protégé: le Crave à bec rouge (*Pyrrhocorax pyrrhocorax*) sur l'île d'Ouessant. ? Thèse de doctorat présentée au Muséum National d'Histoire Naturelle. 164p.
- Kerbiriou C., Leviol I., Jiguet F., Julliard R., (en revision). The impact of human frequentation on coastal vegetation in a Biosphere Reserve.
- Levrel H. (2006) *Biodiversité et développement durable: quels indicateurs ?* Thèse de doctorat de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, sous la direction de Jacques Weber, 406p.
- Levrel H., Etienne M., Kerbiriou C., Le Page C., Rouan M., (en revision). "Co-modeling process, negotiations and power relationships: some outputs from a MAB project in the island of Ouessant", *Society and Natural Resources*.
- Mitsch, W.J. (1996). Ecological engineering : a new paradigm for engineers and ecologists. In : Schulze, P.C. (Ed.), *Engineering Within Ecological Constraints*. National Academy Press, Washington, DC, pp. 111-128
- Ramat E., Preux P., Seuront L., Lagadeuc Y. (1998) « Modélisation multi-agent de systèmes naturels Réflexions générales et applications en biologie marine ». *Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires, actes de Colloque Clermont Ferrand 5-8 octobre 1998* Cemagref édition
- Rodwell, J.S. (1991). *British Plant Communities*, Joint Nature Conservation Committee, Cambridge University Press, Vol. 2 Mires and Heaths, 628 p.
- Rodwell, J.S. (2000). *British Plant Communities*, Joint Nature Conservation Committee, Cambridge University Press, Vol 5 Maritime communities and vegetation of open habitats, 512 p.
- Roovers P., Verheyen K., Hermy M., Gulinck H. (2004). Experimental trampling and vegetation recovery in some forest and heathland communities
Applied Vegetation Science 7: 111-118,
- Rouan M. (2003). Compte-rendu de la réunion des 10 et 11 décembre 2003, Plouzané Projet IFB/SMA, Groupe Ouessant 8p.
- Simberloff D. (1999). The role of science in the preservation of forest biodiversity, *Forest Ecology and Management* 115 pp.101-111
- Steiner A. (2005). la protection de la nature dans un état critique : de nouvelles stratégies pour sensibiliser la société. Actes de la Conférence internationale Biodiversité science et gouvernance. Paris, 24-28 janvier 2005
- UK CEED (2000). A review of the effects of recreational interaction within the UK European marine site. Countryside Council for Wales. UK Marine SACS project.Perth.

U.S. Congress, Office of Technology Assessment (1992). *Science and Technology Issue in Coastal Ecotourism-Background* paper, OTA-BP-F-86. U.S. Government Printing Office Washington, DC.

Weber, J. "Biodiversité, l'écologique et le social, un regard d'anthropologue économiste". Conférence du 17 avril 2007, Montpellier.

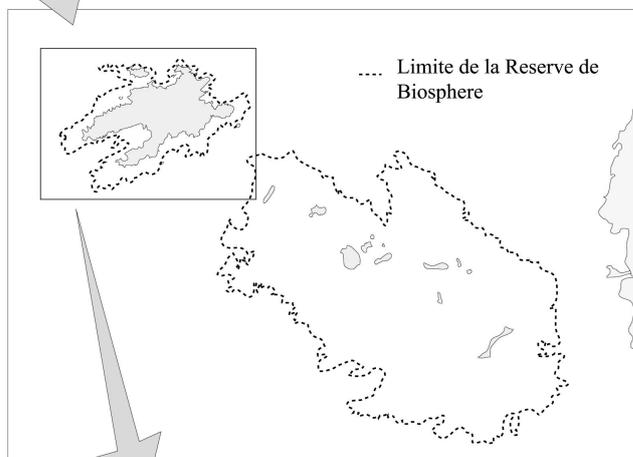
ANNEXES

Annexe1. Les statuts de protection sur l'île d'Ouessant :

Parc Naturel
Regional
d'Armorique

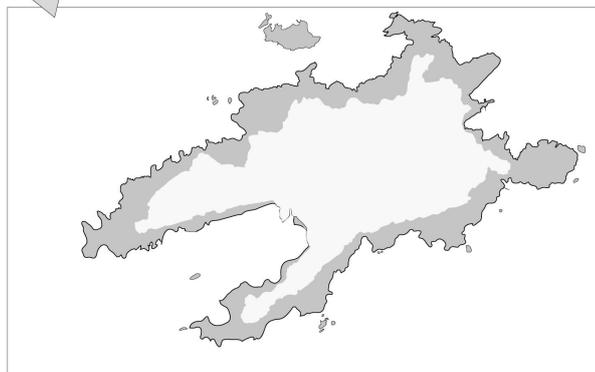


Reserve de
Biosphere
de la Mer
d'Iroise



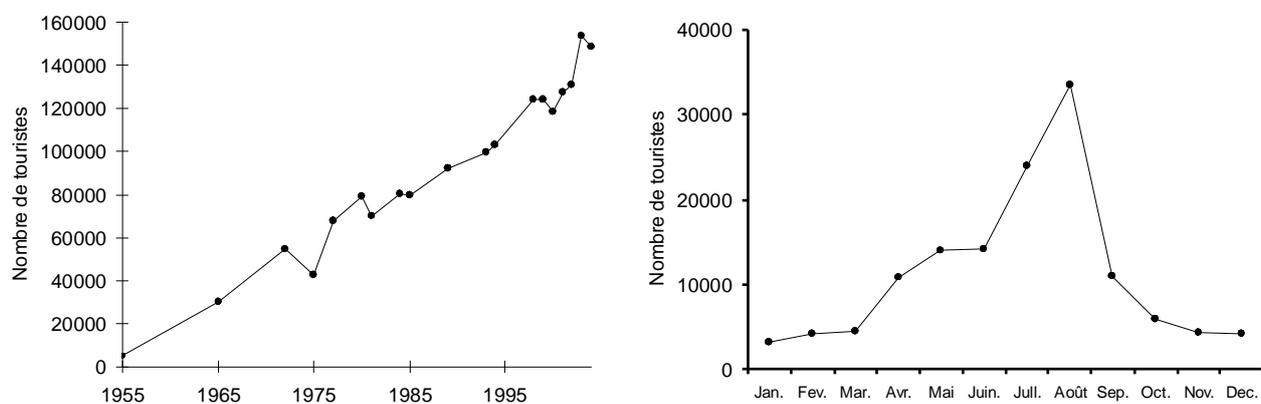
Ouessant

■ Site Classé et zone
tampon de la Réserve
de Biosphere de la Mer
d'Iroise



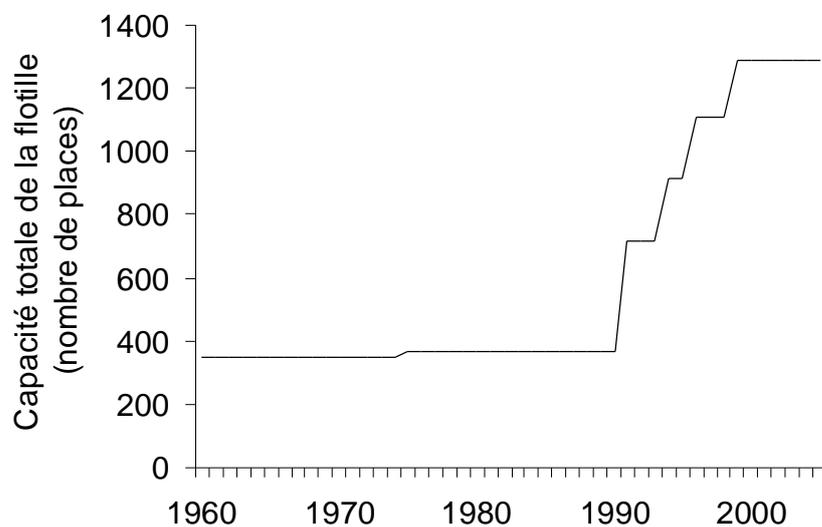
Annexe 2.

Evolution de la fréquentation touristique de 1955 à 2000 et fréquentation touristique au cours d'une année.

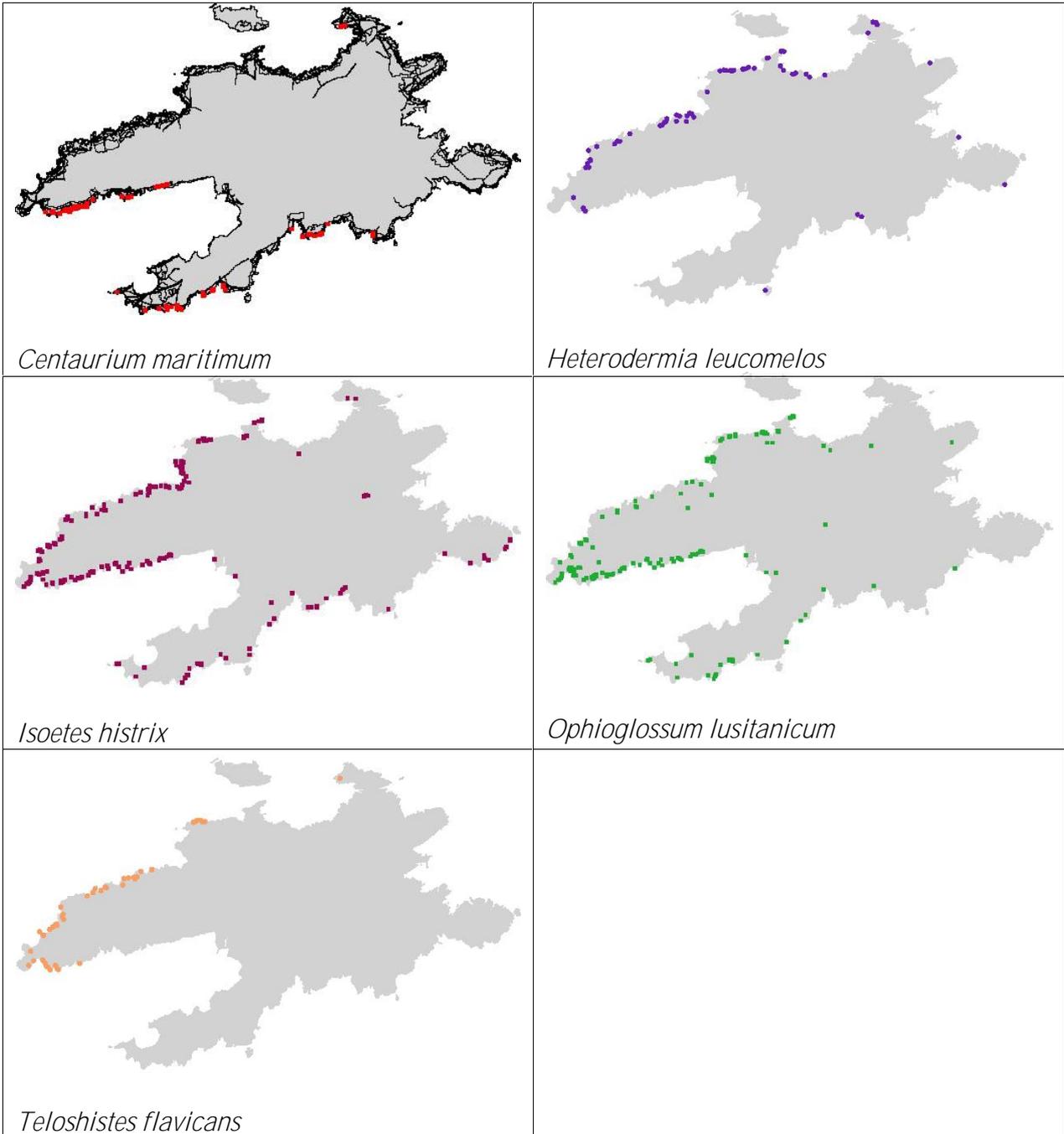


Annexe 3.

Augmentation des capacités de transport des compagnies maritimes de 1960 à 2000.



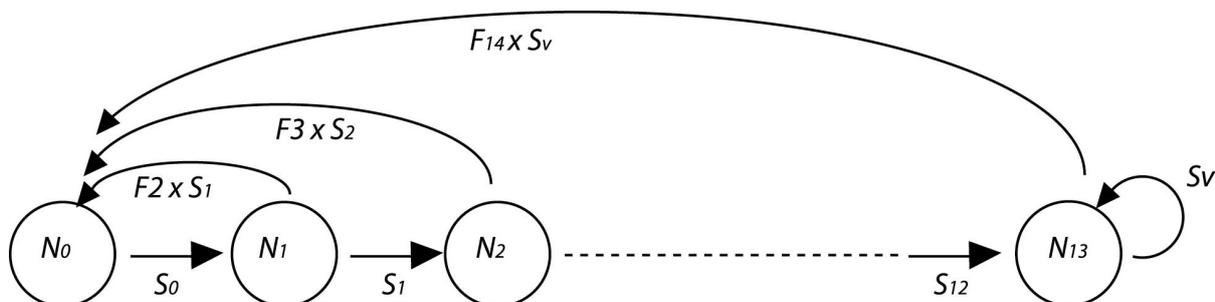
Annexe 4.
Cartes de répartition des espèces de plantes patrimoniales.



Annexe 5.

Cycle de vie et paramètres de modélisation du crabe à bec rouge

(source : thèse Christian Kerbiriou)



Paramètre	Estimation	Référence
Survie des oiseaux de 1 ^{ère} année S_0	$S_0 = 0,32$ ou $S_0 = 0,4$	Cette étude Reids et al. 2003a
Survie des oiseaux de 2 ans (S_1)	$S_1 = 0,82$	Cette étude
Survie des oiseaux de 3 à 13 ans (S_2 à S_{12})	S_2 à $S_{12} = 0,82$	Reids et al. 2003b
Survie des oiseaux de plus de 13 ans (S_v)	$S_v = 0,27$	Reids et al. 2003b
Nombre moyen de jeunes à l'envol/couple	<i>Variable selon les scénarios</i>	Cette étude, Reids et al. 2003a
Taille de la population initiale (après reproduction)	55	Cette étude
Nombre maximum de sites de reproduction	13	Cette étude
Structure initiale de la population	Obtenue à l'aide du modèle matriciel : classe d'âge à l'équilibre, en utilisant le même cycle de vie et mêmes paramètres	Cette étude

Annexe 6.

Enquête sociologique, questionnaire :

N° questionnR

Seul couple amis famille groupe

Combien de jours sur Ouessant

1 2 ou 3 4 ou plus :

nb jour de balade :

déplacement : vélo pied navette

itinéraire prévu : oui non

infos : OT PAB autre (IGN, feeling)

sites visités => carte

cherché à éviter les routes : oui non

focalisation sur littoral, à pied
du plus souvent au moins souvent

- Resté sur zones de pelouse
- Longé côtes
- Traverser lande
- Observé oiseaux => crave : oui non
- Approché moutons, chevres

Sentiers suivis

privilegié petits sentiers moins empruntés ou les gros ?

sortis des sentiers ? oui non

à quelle occasion :

« paysage d'Ouessant »

vous voyez quoi ?

photos :

côtes lande oiseaux plantes gros animaux

préférence pour les endroits

avec une végétation diversifiée

observer des petits végétaux

avec végétation plus régulière

étendues de lande

étendues pelouse

sentiment de « paysage abimé »

déchets (mer touriste)

remarqué des endroits ou végétation dégradée

par de nombreux passages, sol mis a nu oui non

en été il y en a beaucoup,

- Ça n'enleverait pas le charme

- Ce serait dommage
- Ça défigurerait le paysage

Vous avez vu d'autres visiteurs

Beaucoup pas beaucoup non

S'il y en avait plus

- il y a de la marge
- il en faudrait pas plus
- ça gacherait vraiment
- j'viendrais pas en été

en général, vous savez qu'un coin est joli mais très fréquenté

- vous y allez quand même
- vous y allez à un moment où il y a moins de monde
- vous n'y allez pas

s'il y a des touristes en face de vous et vous avez le choix entre plusieurs chemins :

- vous passez par la, cela ne vous dérange pas, bonjour
- vous n'aimez pas trop mais vous voulez passer par la et vous y allez
- vous n'avez pas de but précis et vous préférez partir de l'autre côté
- vous partez de l'autre côté sans hésiter

ça dépend si ce sont des touristes isolés, des familles, groupes

vous êtes venus à cette période de l'année plutôt

- c'est les vacances, week end
- éviter la foule de l'été
- paysage plus joli au Printemps
- autre

estimer les dépenses sur l'île

- logement
- déplacement
- visites
- resto
- picnic
- achat souvenir carte autre..
- activité
- autre

avez vous goûté le ragout à la motte

oui combien

non on a voulu mais pas pu

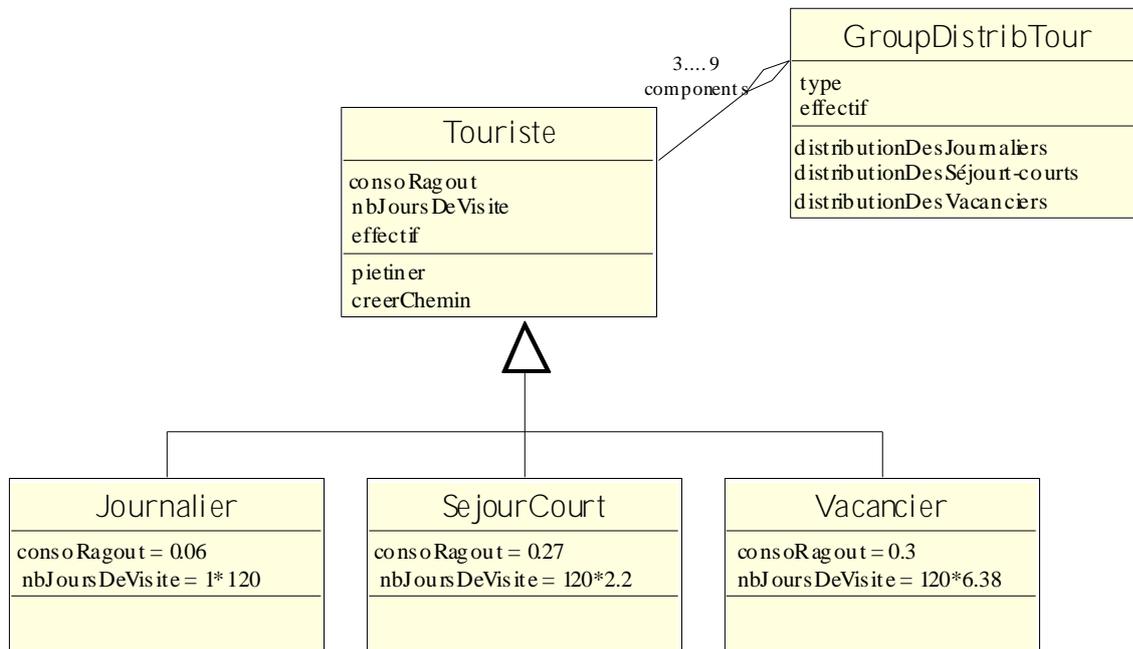
non on n'a pas vu sur les carte

non pas envie

pris un autre plat « typique » (saucisse..)

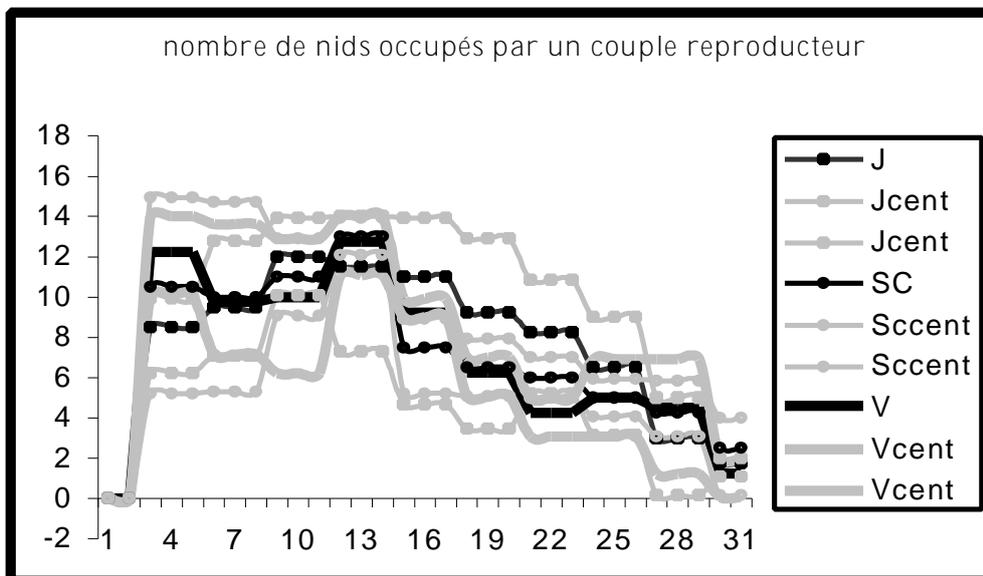
Annexe 7.

L'entité touriste, diagramme de classe :



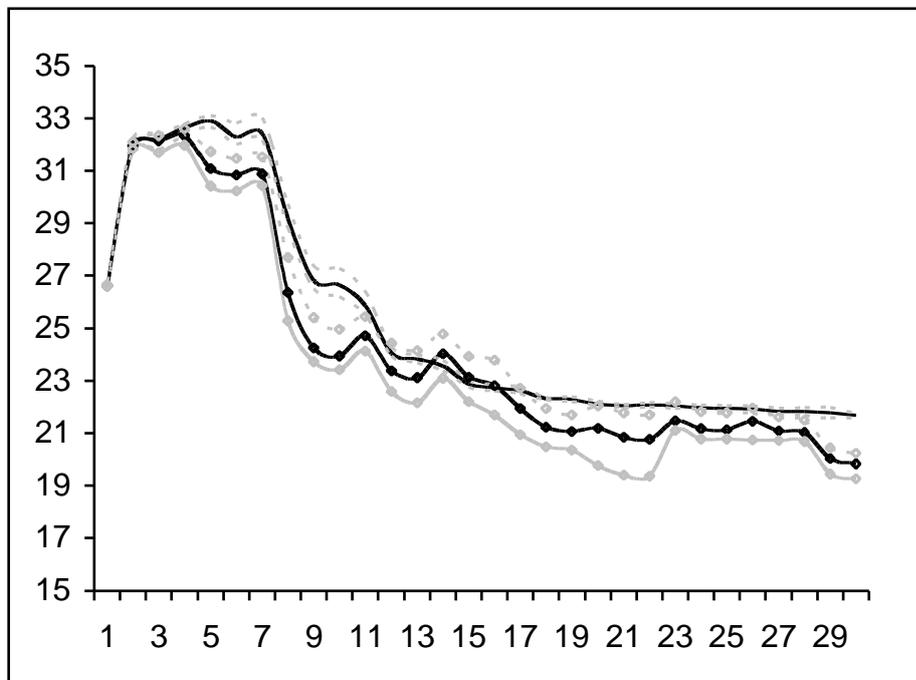
Annexe 8 .

Nombre de nids occupés par les couples reproducteurs au cours du temps selon le type de tourisme.



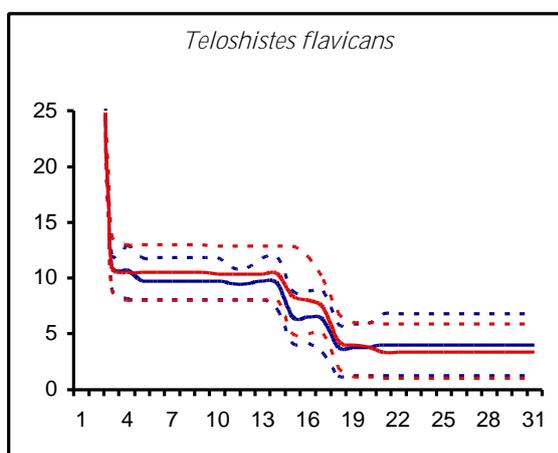
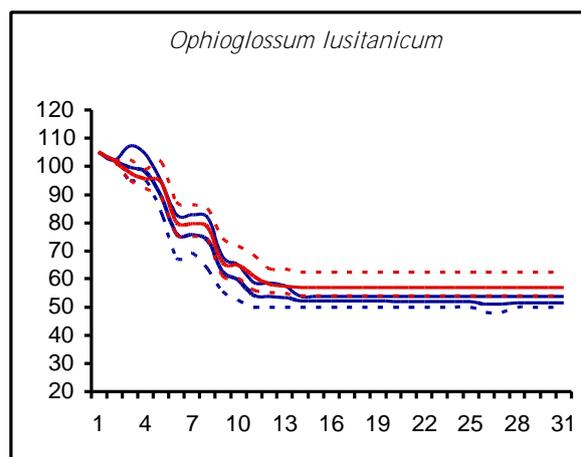
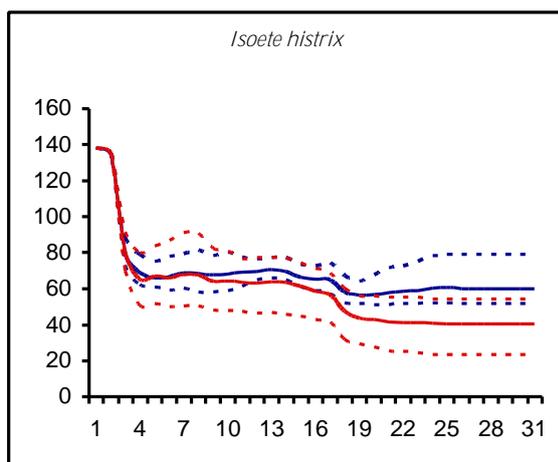
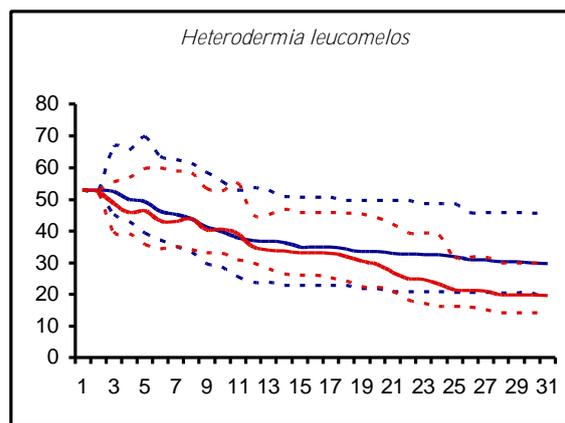
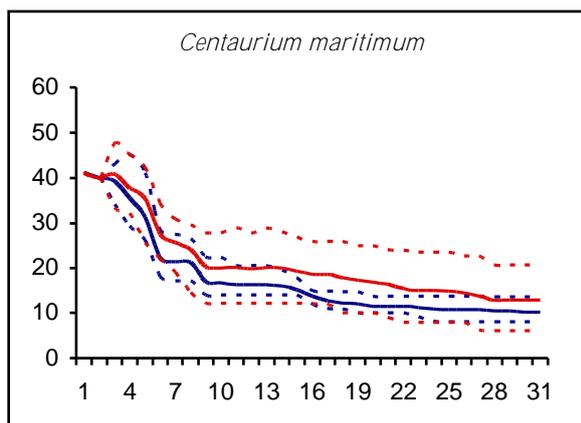
Annexe 9.

Richesse spécifique par pas de temps, exemple du tourisme exclusivement vacancier,
----- avec étrépage ----o---- sans étrépage

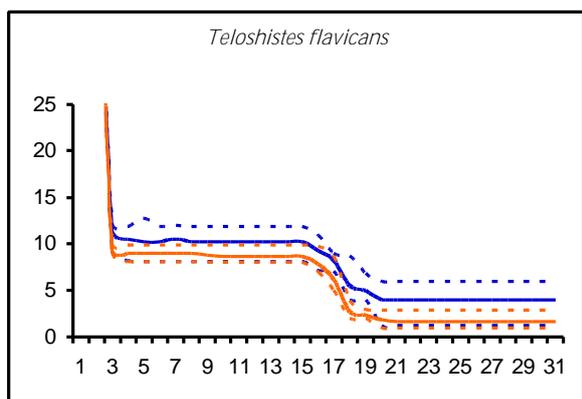
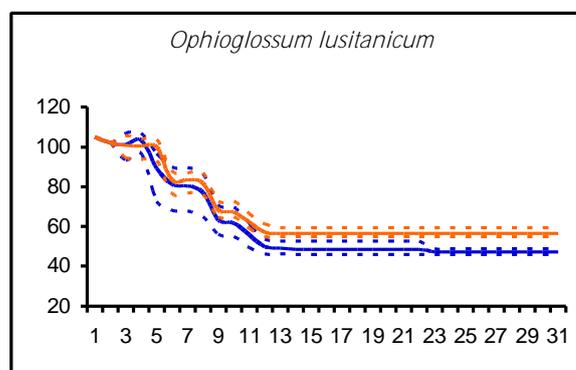
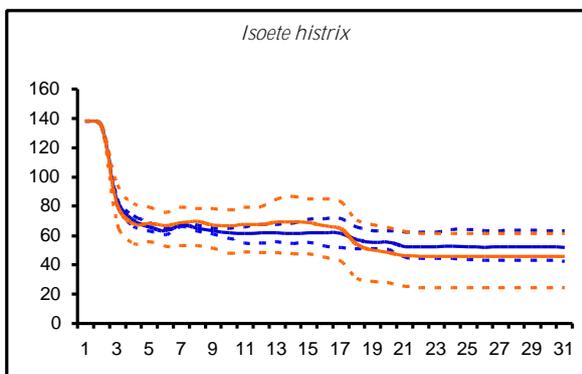
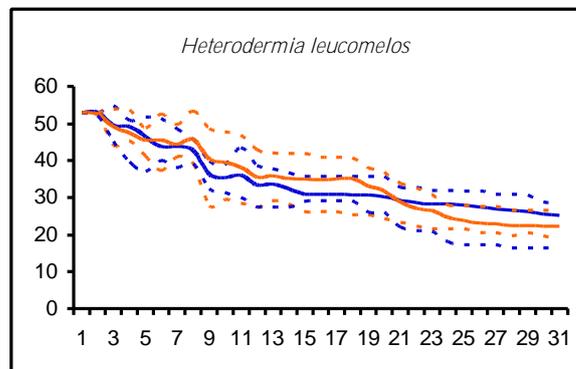
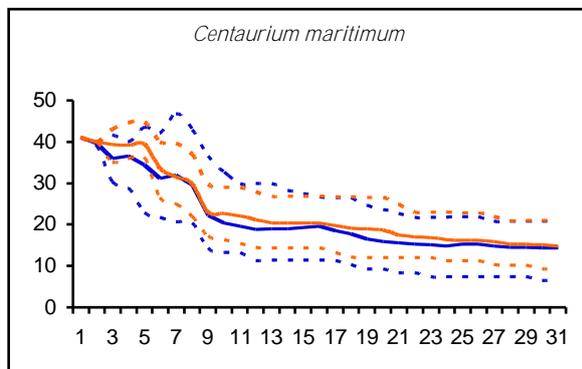


Annexe 10.

Plantes rares, nombre de populations au cours du temps, type de tourisme 'séjours courts' exclusivement. Rouge : sans étrépage, bleu : avec étrépage.

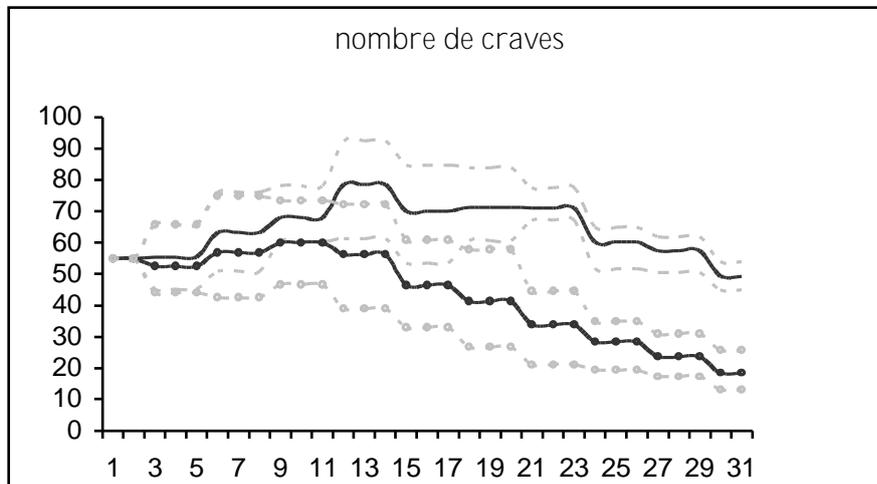


Plantes rares, nombre de populations au cours du temps, type de tourisme
 'vacanciers' exclusivement. Orange : sans étrépage, bleu : avec étrépage.

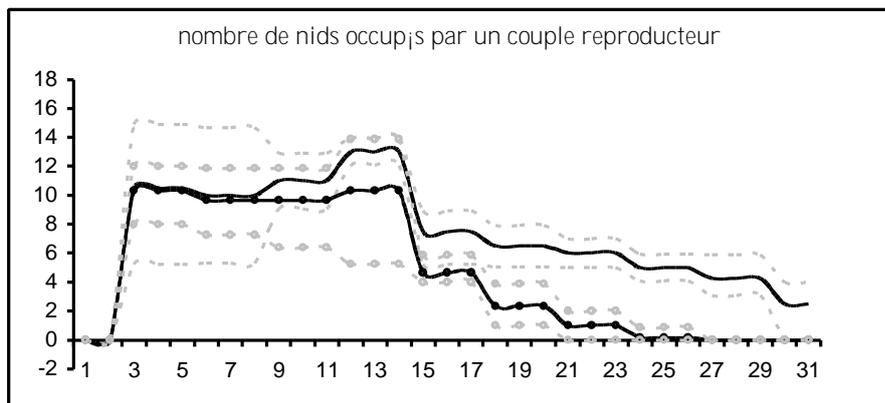


Annexe 11.

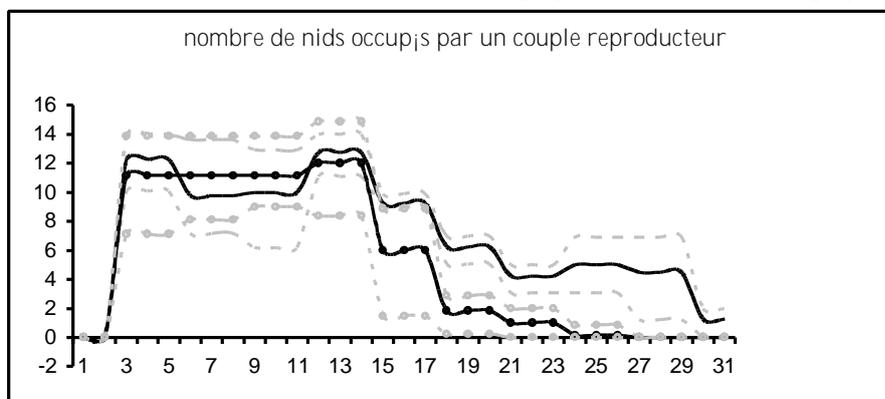
Evolution de la population de craves par pas de temps, tourisme de type 'séjours courts' exclusivement. ----- avec étrépage ----o— sans étrépage



Nombre de nids occupés par les couples reproducteurs par pas de temps, tourisme de type 'séjours courts' exclusivement. ----- avec étrépage ----o— sans étrépage



Nombre de nids occupés par les couples reproducteurs par pas de temps, tourisme de type 'vacancier' exclusivement. ----- avec étrépage ----o— sans étrépage



Annexe 12.
Aspects financiers.

Selon la répartition des catégories de touristes (journalier, séjour court, vacancier) qui diffère dans les 4 scénarios décrits au paragraphe « III. 4 Protocole de simulation », le revenu dégagé se répartit différemment entre l'île et les compagnies de transport, comme indiqué dans le tableau ci-après :

Scénario	île	transport
A	292	145
B	261	175
C	237	207
D	208	256

Valeurs issues de l'indicateur économique du modèle
En millions d'euros

Plus le poids des journaliers est important dans la proportion, plus le revenu se dégage dans les compagnies de transport, accessoirement dans la « taxe Barnier » (loi Barnier du 2 février 1995, 0,9 euro par passage) au profit du PNR. Inversement, plus le poids des vacanciers est important, plus le revenu se dégage dans l'île et accessoirement au niveau de la commune par le biais de la taxe de séjour.

Le financement de la politique de conservation dépend donc de la commune et du PNR et de la part qu'ils sont disposés à affecter à ce type d'opérations.

Un indicateur plus précis et une investigation plus détaillée sur les actions menées par ces organismes permettrait de compléter les impacts écologiques du tourisme au sens strict avec son impact sur le financement de la conservation et l'économie de l'île.

Résumé

La conception ou la gestion d'écosystèmes passe par l'intégration de la société humaine dans son environnement. L'objectif de cette étude est de décrire un système d'interactions société-nature, en prenant l'exemple du tourisme sur l'île d'Ouessant, au moyen d'une modélisation multi-agents.

La biodiversité y est représentée à trois niveaux : à l'échelle individu-centré pour une espèce d'oiseau menacée, le crabe à bec rouge, à l'échelle des populations pour des espèces végétales menacées et à l'échelle des communautés par un indicateur de richesse spécifique.

Le tourisme est intégré en distinguant trois catégories –'journalier', 'séjour-court' et 'vacancier' dont les comportements ont un impact différent sur la biodiversité soit directement soit au travers d'une pratique liée au tourisme, l'étrépage.

Les premiers résultats montrent que le tourisme journalier a, de manière générale, moins d'impact sur les trois indicateurs de biodiversité que le tourisme de séjour (séjour court ou vacances). Des effets liés à la répartition spatiale ont été observés sur les plantes. Un effet émergent a été mis en évidence, laissant penser que l'arrêt de la pratique de l'étrépage serait déstabilisant pour la population de crabes à bec rouge.

Cette recherche a montré que l'utilisation d'un modèle multi-agents permet de préciser les phénomènes affectant la biodiversité afin d'orienter les politiques de gestion.

Abstract

The conception or management of ecosystems can be done only by integrating human society into its own environment. The aim of this study is to describe a system of interactions between Society and Nature, system taking as an example tourism on the French island of Ouessant, by means of multi-agent modelling.

Biodiversity is integrated at three levels : at the level of individual-based model for a specimen of endangered species, the red-billed chough, at the level of the whole population for some endangered species of plants, and at the level of communities through a specific richness indicator.

Tourism is integrated into the model with three distinctive categories : day-trips, short holidays, standard holidays, all of them having a different impact on biodiversity, either directly or through a practice connected with tourism called "étrépage" in French (meaning the removing of top soil and grass).

The first results show that day-trips have, as a rule, less impact on the three biodiversity indicators than short or standard holidays. Effects connected with space occupation have been observed on plants. An emerging effect has been pointed out which may lead to think that stopping the "étrépage" would have a detrimental effect on the population of red-billed chough.

This study has shown that using a multi-agent system makes it possible to identify the phenomenons affecting biodiversity, so as to better target policies of eco-management.