

## Master 2 ó Biodiversité ó Écologie ó Evolution Gestion de l'Environnement

### Cartographie des connectivités des forêts sèches de Nouvelle-Calédonie



*Vue aérienne de la forêt sèche sur la Presqu'île de Pindai (source : CEN NC)*

**Stage effectué par Tristan ROTA**

**Au Conservatoire des espaces naturels de Nouvelle-Calédonie**

**BP 10 - 98860 Koné**

**Presqu'île de Foué**



Sous la responsabilité de Pierre PLOUZENNEC

Tuteur académique : J.M. BOISSIER

**Année Universitaire 2015-2016**

# *Résumé*

La fragmentation du paysage est le principal facteur d'érosion de la biodiversité dans le monde. Les forêts sèches de Nouvelle-Calédonie sont un exemple frappant d'habitat extrêmement fragmenté. Ces forêts sont présentes sur la côte Ouest de la Grande Terre et accueillent de nombreuses espèces endémiques dont plusieurs en voie d'extinction. Les nombreuses menaces qui pèsent sur cet habitat ont entraîné une réduction drastique de sa surface totale, et il ne reste aujourd'hui plus que 2% de sa surface initiale. La rupture des continuités entre les reliques de formations sclérophylles perturbe les déplacements des espèces et les flux de gènes, mettant en danger l'ensemble des écosystèmes qui leurs sont inféodés.

Cette étude à l'échelle de la Grande Terre fut réalisée dans le cadre du Programme de conservation des forêts sèches, sous la tutelle du Conservatoire d'espaces naturels de Nouvelle-Calédonie, et a permis de mettre évidence les connectivités structurelles entre les fragments de forêt sèche en développant trois aspects méthodologiques. Dans un premier temps, les fragments en eux-mêmes ont été analysés grâce à différents indices, afin de déterminer leur place au sein du paysage. Ensuite, les connectivités structurelles à courte distance ont été déterminées par la technique de dilatation-érosion. Enfin ces mêmes connectivités potentielles ont été déterminées à moyenne-distance, via une méthode basée sur l'analyse des distances-coût et la représentation des chemins de moindre coût.

Ensuite, des outils d'aide à la décision, notamment des cartes ont été développés afin de guider les gestionnaires pour la mise en place de futures actions de restauration ou de protection des forêts sèches. L'ensemble du système d'information géographique produit constitue un outil robuste pour étudier ces connectivités potentielles, tout en étant évolutif, remaniable et réutilisable.

# *Abstract*

Landscape fragmentation is the main cause of biodiversity loss worldwide. New-Caledonia dry forests are a striking example of an extremely fragmented habitat. Those forests are localized on the West coast of the Grande Terre, and contain several endangered endemic species. Various threats to this habitat led to a huge decrease of its total area, with just 2% of its initial area left. Break in continuities between the relics of sclerophyll formations disturbs species movements and genes flows, threatening all related ecosystems.

This study at the Grande Terre scale has been done for the Dry forests conservation program, under the lead of the Conservatoire d'espaces naturels of New-Caledonia. It permitted to show structural connectivity between dry forest fragments, developing three methodological aspects. First, fragments themselves have been analysed with several indexes, in order to determine their place among the landscape. Then, short distance structural connectivity has been established using dilatation-erosion. Finally, medium distance potential connectivity has been shown using a method based on distance-cost analyse, and representation of least cost path.

Then, tools for helping decisions, maps in particular, have been developed to guide managers and help them act for dry forests restauration or protection. The whole geographic information system which has been made is a robust tool to study potential connectivity. It can evolve, be redrafted and be used again in the future.

# Remerciements

---

Il me tient à cœur de remercier chaleureusement toutes les personnes ayant permis ma venue en Nouvelle-Calédonie pour effectuer ce stage de 6 mois, ainsi que toutes celles ayant veillé à son bon déroulement. Sans leur soutien, leurs conseils et leur expertise, ce mémoire n'aurait pu voir le jour.

Je souhaite remercier particulièrement :

- Pierre PLOUZENNEC, Coordinateur du Pôle Forêt sèche au sein du Conservatoire d'espaces naturels de Nouvelle-Calédonie, et maître de stage, pour son encadrement sans faille, sa grande disponibilité malgré la distance, ses encouragements et son soutien, ainsi que pour ses réponses rapides, précises et concises à toutes mes questions.
- Jean-Christophe LEFEUVRE, Directeur de programme pour Conservation International en Nouvelle-Calédonie, pour m'avoir accueilli dans les bureaux de CI pendant ces 6 mois, pour ses conseils avisés, sa disponibilité, et ses avis extrêmement enrichissants tout au long de l'étude.
- Damien BUISSON, chef du service géomatique de la DTSI, pour sa disponibilité, pour l'organisation de la visio-conférence pour la soutenance de stage, et pour la mise à disposition sur demande du meilleur matériel informatique disponible.
- Ralph SHROERS, Consultant pour CI, pour son expertise technique en SIG et son partage de compétences, m'ayant permis d'approfondir mes connaissances dans ce domaine.
- Shade PHAM et Selma HAOUET (Conservation International), pour leur sympathie, leur bonne humeur quotidienne et leurs coups de main, une recette parfaite pour rendre le travail au bureau des plus agréables.
- Julia NOUARD Assistante de coordination au Pôle Forêt sèche, pour son soutien et sa disponibilité.

Je remercie aussi toutes les personnes présentes lors des différentes restitutions de mon travail au sein du Groupe de travail connectivités des forêts sèches, ainsi que toutes les personnes m'ayant

accordé une part de leur temps, notamment Brice VAN HAAREN (WWF), François TRON (CI), Thomas IBANEZ (IRD), Maël IMIRIZALDU (CI).

Je tenais à garder mes remerciements les plus chaleureux pour Joël RIOS, hydrobiologiste et consultant pour CI, qui m'a encadré tout au long de mon stage, et sans qui rien de ceci n'aurait été possible. Je le remercie pour son soutien, ses idées, ses compétences, sa bonne humeur, son ouverture d'esprit, et j'en passe.

Pour terminer avec le plus important, je remercie ma famille qui m'a toujours soutenue dans tous mes projets et à qui je dois tout, ainsi que toutes les personnes avec qui j'ai pu lier une amitié sincère, et qui ont vécu avec moi de belles aventures sur le caillou.

# TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>3</b>
<b>GLOSSAIRE .....</b>	<b>8</b>
<b>LISTE DES ACRONYMES.....</b>	<b>11</b>
<b>LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>12</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>13</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>15</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>16</b>
<b>PARTIE I : CONTEXTE GENERAL.....</b>	<b>18</b>
<b>I. Une problématique écologique complexe impliquant plusieurs acteurs.....</b>	<b>18</b>
1. Présentation des structures d'accueil .....	18
a) Le Conservatoire d'espaces naturels de Nouvelle-Calédonie.....	18
b) Conservation International.....	19
c) Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie : Direction des Technologies et des Services de l'Information (DTSI).....	20
d) World Wildlife Fund.....	21
2. Un « caillou » unique au monde.....	21
a) L'immense richesse naturelle calédonienne .....	22
b) Un effort important et coordonné pour la protection de l'environnement.....	23
<b>II. La forêt sèche, une écorégion extrêmement menacée .....</b>	<b>25</b>
1. Description et généralités sur l'écosystème forêt sèche .....	25
a) La forêt sèche en Nouvelle-Calédonie .....	25
b) De nombreuses menaces identifiées en Nouvelle-Calédonie .....	26
2. Le Programme de Conservation des Forêts Sèches.....	29
a) Une initiative du WWF.....	29
b) Cartographie des connectivités des forêts sèches .....	29
<b>III. Généralités sur la connectivité écologique .....</b>	<b>30</b>
1. Fragmentation du paysage :.....	30
2. Pourquoi étudier les connectivités écologiques ?.....	30
a) Différents types de connectivités .....	31
b) Le réseau écologique .....	32

<b>PARTIE II : METHODOLOGIE ET RESULTATS .....</b>	<b>36</b>
<b>I. Périmètre d'étude .....</b>	<b>36</b>
1. Couche de travail.....	36
2. Délimitation des unités paysagères (UPF).....	37
a) Actualisation de la carte d'expansion potentielle de forêt sèche .....	37
b) Nouvelle délimitation des UPF .....	39
c) Caractéristiques des UPF .....	40
<b>II. Etude de la vulnérabilité des patchs .....</b>	<b>41</b>
1. Analyse des distances.....	41
a) Distance au plus proche voisin (Euclidian Nearest Neighbor :ENN) .....	41
b) Délimitation de grands ensembles via les polygones de Voronoï .....	43
2. Analyse de proximité via l'indice PROX .....	45
3. Analyse de la forme des fragments par calcul de l'indice de compaction K .....	48
<b>III. Etude de la connectivité forestière .....</b>	<b>50</b>
1. Identification de la connectivité structurelle à courte distance.....	50
a) Méthode par dilatation-érosion .....	50
b) Découpe du MOS.....	51
2. Identification des connectivités moyenne distance .....	52
a) Théorie des graphes et méthode des chemins de moindre coût .....	52
b) Création de la matrice et des chemins de moindre coût.....	52
3. Importance relative des patchs dans la connectivité à l'échelle du paysage.....	59
<b>IV. Aide à la recherche de zones d'action prioritaires .....</b>	<b>61</b>
1. Occupation du sol au sein du corridor.....	61
2. Dispersion des diaspores.....	64
3. Emprise foncière.....	68
4. Pente et accès .....	69
5. Biodiversité au sein du patch .....	71
6. Incendies .....	72
<b>PARTIE III : DISCUSSION, PERSPECTIVES .....</b>	<b>75</b>
<b>I. Discussion sur la priorisation des zones de gestion.....</b>	<b>75</b>
1. Exemple de démarche sur le site Montagnes-Blanches / Pindaï .....	75
2. Importance des fragments « nœuds » entre les grands massifs forestiers .....	78
3. Classement des fragments par importance relative dans la connectivité globale.....	79
<b>4. Discussion sur les méthodes d'identification des connectivités .....</b>	<b>82</b>
1. Discussion sur la caractérisation des patchs .....	82

a)	Distances ENN.....	82
b)	Indice PROX .....	83
c)	Occupation des sols au sein des UPF .....	83
d)	Occupation sur les corridors.....	83
e)	Forme des patchs.....	84
f)	Importance relative des fragments .....	84
2.	Méthode de dilatation-érosion .....	86
3.	Méthode des chemins de moindre-coût .....	87
a)	Matrice des coûts .....	87
b)	Chemins de moindre-coût et dispersion de la faune.....	87
<b>V.</b>	<b>Limites générales de l'étude .....</b>	<b>88</b>
1.	Simplification de la réalité et précision des données.....	88
2.	Choix effectués pour la représentation des connectivités .....	89
a)	Lacunes de connaissances sur la dispersion des diaspores .....	89
b)	Focalisation sur les connectivités structurelles .....	90
c)	Construction de la matrice de moindre-coût .....	90
d)	Critère financier non abordé .....	90
<b>VI.</b>	<b>Conclusion, Perspectives .....</b>	<b>91</b>
1.	Conclusions sur la méthodologie de cartographie des connectivités .....	91
2.	Conclusion générale .....	93
	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>95</b>

# Glossaire

---

- **Alizé** : L'alizé est un vent régulier des régions intertropicales (entre 23°27 nord et 23°27 sud), soufflant d'est en ouest de façon régulière
- **Anémochorie** : Désigne le mode de dispersion des graines des végétaux ou des diaspores se faisant grâce au vent.
- **Anthropique** : *Relatif* à l'activité humaine. Qualifie tout élément provoqué directement ou indirectement par l'action de l'homme: érosion des sols, pollution par les pesticides des sols, relief des digues, ... . Du grec anthropos (homme).
- **Biome**. Vaste région biogéographique s'étendant sous un même climat, comme la toundra, la forêt tropicale humide, la savane ou encore le récif corallien.
- **Buffer/tampon** : Une zone tampon est une zone située entre deux entités géographiques ou biogéographiques, qui lie et/ou sépare les deux entités. En SIG, une zone tampon est une délimitation de l'espace construite autour et à partir de la géométrie de l'objet source, quel que soit son type (point, polyligne ou polygone).
- **Climax, climacique** : Stade final d'évolution d'un milieu en équilibre avec les composantes climatiques, édaphiques et biologiques d'une zone géographique.
- **Corridors écologiques** : Ensemble linéaire de formations (forêts humides, pour la zone étudiée) qui relie entre eux deux ou plusieurs îlots (forestiers pour cette étude). Ils permettent la circulation d'animaux à travers la matrice du paysage qui est, pour le Plateau de Goro, le maquis minier et les zones anthropisées.
- **Diaspore** : Une diaspore est un terme qui désigne tout élément permettant d'accomplir la dissémination d'une espèce végétale par reproduction sexuée, dispersion des graines ou multiplication asexuée.
- **Ecorégion (selon le WWF)** : Une écorégion est définie comme « une unité étendue de terre ou d'eau qui contient un assemblage d'espèces, de communautés naturelles et de conditions environnementales qui se distingue au plan géographique ». Le WWF en définit 238.
- **Ecotone** : Zone de transition entre deux milieux distincts contigus.
- **Edaphique** : En écologie, on qualifie d'édaphique ce qui a trait à un facteur écologique lié au sol (pH, humidité, etc.).
- **Effet de lisière**. Les lisières sont souvent (mais pas toujours) plus riches en espèces et en individus que les milieux qui les séparent et renferment des espèces qui lui sont particulières : les espèces de lisière (Dajoz, 1996). L'effet de lisière est également induit par l'ouverture d'un milieu forestier et se manifeste sur une zone qui peut aller jusqu'à 100 m à l'intérieur de la forêt et qui se traduit par une augmentation de la température, de l'éclairement et de la vitesse du vent tandis que l'humidité relative diminue. Ceci provoque une augmentation de la mortalité des arbres forestiers, une accélération de la chute des feuilles ainsi qu'une invasion des plantes non forestières adaptées à un plus grand éclairement (Dajoz, 1996).

- **Endémisme** : C'est le terme employé en écologie pour décrire la tendance des plantes et des animaux à être naturellement confinés dans une région particulière.
- **Forêt sempervirente** : Forêt dense humide dont les arbres sont à feuilles persistantes. Forêt tropicale humide.
- **Héliophile** : Une plante héliophile est une plante qui apprécie l'exposition au soleil et à ses rayonnements (lumière, ultra-violet, chaleur). Ces espèces, parfois des communautés végétales entières, se développent dans les milieux ouverts.
- **Modèle Numérique de Terrain (MNT)** : Représentation de la surface d'un terrain réalisé à partir des données d'altitude et permettant de modéliser le relief du terrain.
- **MOS** : Mode d'occupation du sol
- **Pas japonais/stepping stone** : un corridor en « pas japonais » est établi par un corridor discontinu.
- **Patches** : correspond ici à une zone de forêt sèche délimitée par un contour la séparant d'autres classes de végétation. La notion de patch n'intègre aucune dimension de surface. Dans le rapport, le terme patch est parfois remplacé par les termes synonymes « îlot », « fragment » ou « lambeaux ».
- **Peuplement, communauté** : Ensemble des individus de toutes les espèces vivant sur un territoire.
- **Population** : Ensemble d'individus d'une même espèce vivant sur le même territoire.
- **Raster** : Données images où l'espace est divisé de manière régulière (en petits rectangles); à chaque petit rectangle (pixel) sont associées une ou plusieurs valeurs décrivant les caractéristiques de l'espace.
- **Shapefile/couche shape** : Le *shapefile*, ou « fichier de formes » est un format de fichier issu du monde des systèmes d'informations géographiques (SIG). Initialement développé par ESRI, il est également utilisé sous le logiciel Quantum GIS entre autres.
- **Sciaphile** : On désigne sous l'adjectif sciaphile tout organisme vivant, animal ou végétal, qui apprécie particulièrement les écosystèmes plongés dans l'obscurité, comme les bois ou les profondeurs marines, pour vivre et se développer. Son contraire est « héliophile », désignant les êtres vivants appréciant un ensoleillement important et se développant donc en milieu ouvert.
- **Tanne** : Un tanne, tann, ou encore tan, désigne la partie interne d'un marais maritime tropical, la moins fréquemment submergée et aux sols généralement sursalés ou acidifiés, se développant aux dépens d'une mangrove
- **Résilience** : Capacité d'un écosystème, d'un habitat, d'une population ou d'une espèce à retrouver un fonctionnement et un développement normal après avoir subi une perturbation importante.
- **Restauration** : Processus consistant à assister la régénération des écosystèmes qui ont été dégradés, endommagés ou détruits.

- **Services écosystémiques** : ensemble des biens et services fournis aux Hommes par les écosystèmes.
- **Ubiquiste** : se dit d'une espèce animale ou végétale que l'on rencontre dans des milieux très différents.
- **Zone nodale** : entité spatiale offrant la plus grande disponibilité de ressources et de niches écologiques pour qu'une espèce ou un groupe d'espèces puisse maintenir des populations viables.
- **Zone tampon** : ces zones placées autour des zones nodales assurent le maintien de leur intégrité, par exemple pour contrer ou enrayer le bruit, la poussière, la lumière ou d'autres aspects nuisibles à l'intégrité des zones
- **Ultramafique/ultrabasique** : Se dit d'une roche magmatique ou méta-magmatique, ou d'un sol résultant de la dégradation de telles roches, très pauvre en silice et composé à plus de 90% de minéraux « colorés » dit mafiques (riches en fer et magnésium). En Nouvelle-Calédonie, ces sols ou roches présentent une couleur rougeâtre caractéristique et sont particulièrement riches en nickel et cobalt, attirant les exploitations minières.
- **Plantes sclérophylles** : Végétaux présentant des feuilles coriaces, à la cuticule épaisse et généralement brillante. Ce sont des plantes adaptées à la sécheresse
- **Abrouissement** : Consommation des jeunes plantules par les grands herbivores (cerf, chevreuil, etc.) effectuée en sectionnant l'apex de la plantes, ce qui freine, voire arrête sa croissance.
- **Frottis** : Blessures causées aux jeunes arbres par les cervidés lorsqu'ils frottent leurs bois pour se débarrasser du velours qui les recouvre.
- **Ecorçage** : Consommation de l'écorce des arbres par les cervidés
- **Disperseur/disséminateur** : Animal contribuant à la dispersion des diaspores (graines ou pollen) par zoochorie.
- **Zoochorie** : Mode de dispersion des diaspores ou des graines des végétaux par l'intermédiaire d'un animal. Celles-ci peuvent voyager en étant accrochées au poils ou au plumes, ou suite à la consommation du fruit ou de la graine elle-même par l'animal, qui l'évacuera ensuite. Par extension on parle d'ornitochorie lorsque cette dispersion est effectuée par des oiseaux, d'anémochorie elle est effectuée par le vent, et de barochorie si cette dispersion n'est dépendante que de la gravité.

# Liste des acronymes

---

- **CEN** = Conservatoire d’Espaces Naturels
- **CI** = Conservation International
- **CNRS** = Centre National de la Recherche Scientifique
- **DITTT** = Direction des Infrastructures, de la Topographie et des Transports
- **DPM** = Domaine Public Maritime
- **DTSI** = Direction des Technologies et des Services de l’Information
- **ENN** = Euclidian Nearest Neighbor distance
- **FS** = Forêt Sèche
- **GDPL** = Groupement de Droit Particulier Local
- **GIP** = Groupement d’Intérêt Public
- **IAC** = Institut Agronomique néo-Calédonien
- **IBA** = Important Bird Areas
- **INC** = Incendies et biodiversité des écosystèmes en Nouvelle-Calédonie
- **INRA** = Institut National de la Recherche Agronomique
- **IRD** = Institut de Recherche pour le Développement
- **IRSTEA** = Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l’Environnement et l’Agriculture
- **IUCN** = Union internationale pour la conservation de la Nature
- **NC** = Nouvelle-Calédonie
- **Œil** = Observatoire de l’Environnement de Nouvelle-Calédonie
- **ONG** = Organisation Non-Gouvernementale
- **ORSTOM** = Office de la Recherche Scientifique et Technique d’Outre-Mer (aujourd’hui IRD)
- **PCFS** = Programme de Conservation des Forêts Sèches
- **PN** = Province Nord
- **PS** = Province Sud
- **SIG** = Systèmes d’Information Géographique
- **UNESCO** = Organisation des Nations unies pour l’éducation, la science et la culture
- **UPF** = Unité Paysagère Fonctionnelle
- **WWF** = World Wildlife Fund

# Liste des annexes

---

- **Annexe 1** : Table attributaire de la couche gestionnaire forêt sèche
  - **Annexe 2** : Processus SIG
    - Création de la couche d'expansion potentielle
    - Calcul des indices ENN
    - Calcul des indices PROX
    - Intégration de la couche gestionnaire dans le MOS
    - Création de la couche de dilatation-érosion
    - Création des corridors de moindre-coût
    - Calcul de l'indice BC\_IIC
  - **Annexe 3** : Occupation des sols des UPF
  - **Annexe 4** : Occupation des sols des continuums
  - **Annexe 5** : Tableau des indices de caractérisation des patchs
  - **Annexe 6** : Description des classes du MOS
  - **Annexe 7** : Exemple de tableau de classement des patchs selon les différents indices pour l'UPF 5
  - **Annexe 8** : Note technique de typologie des Forêts sèches (2004)
  - **Annexe 9** : Carte de la zone mise en défens sur le site de Pindaï
  - **Annexe 10** : Atlas Cartographique
- 
- **Carte 1** : Carte générale de Nouvelle-Calédonie
  - **Carte 2** : Carte de l'occupation des sols sur les UPF
  - **Carte 3** : Carte d'expansion potentielle de la forêt sèche
  - **Carte 4** : Carte de délimitation des UPF
  - **Carte 5** : Carte générale de l'UPF 5
  - **Carte 6** : Carte des indices ENN sur la zone de Pindaï-Nékoro
  - **Carte 7** : Carte des indices PROX sur la zone de Pindaï-Nékoro
  - **Carte 8** : Carte des indices de compaction sur la zone de Pindaï-Nékoro
  - **Carte 9** : Carte des indices BC\_IIC sur la zone de Pindaï-Nékoro
  - **Carte 10** : Carte des espèces végétales classées sur la zone de Pindaï-Nékoro
  - **Carte 11** : Carte de la connectivité structurelle par dilatation-érosion sur la zone de Pindaï-Nékoro
  - **Carte 12** : Carte des corridors potentiels sur la zone de Pindaï-Nékoro
  - **Carte 13** : Carte du continuum de gestion sur la zone de Pindaï-Nékoro
  - **Carte 14** : Carte de priorisation selon l'intérêt de restauration
  - **Carte 15** : Carte d'aide à la priorisation des zones d'action sur la zone de Pindaï-Nékoro
  - **Carte 16** : Carte des connectivités structurelles globales sur l'UPF 1
  - **Carte 17** : Carte des connectivités potentielle sur l'UPF 1

# Liste des figures

---

Figure 1 : Le Cagou huppé ( <i>Rhynochetos jubatus</i> ), espèce emblématique de Nouvelle-Calédonie (bmw323i.eklablog.com) .....	23
Figure 2 : Fleurs de <i>Mezoneuron montrouzieri</i> , plante endémique de calédonie typique des forêts sèches © Jean-Jacques Villegente <a href="http://www.endemia.nc/">http://www.endemia.nc/</a> .....	25
Figure 3 : Forêt sèche sur le site de Guaro-Deva (Source : CEN NC) .....	26
Figure 4: Photo de drone d'une forêt sèche suite au passage d'un incendie (Rios J., 2015) .....	27
Figure 5 : Schéma simplifié des éléments d'un réseau écologique (Birard C. - FPNRF) .....	33
Figure 6 : Diagramme des différentes échelles de corridors (Rios J. & Lefevre J.-C., 2011) .....	34
Figure 7 : Fusion des entités comportant une frontière commune .....	37
Figure 8 : Carte d'expansion potentielle de la forêt sèche en Nouvelle-Calédonie.....	38
Figure 9 : Carte des contours des UPF utilisés pour l'étude .....	39
Figure 10 : Forêt sèche au sein de l'UPF 5.....	40
Figure 11 : Histogramme de distribution des distances ENN par classe toutes UPF réunies.....	42
Figure 12 : Schéma des étapes d'intégration de la couche gestionnaire dans le MOS.....	43
Figure 13 : Diagramme de Voronoï appliqué à la couche forêt sèche sur la zone Pindaï-Nékoro : chaque cellule (surface colorée) représente la « zone d'influence » d'un germe (point noir).....	44
Figure 14 : Caractéristiques complètes de l'indice PROX .....	45
Figure 15 : Carte d'isolation des patches de forêt sèche par indice PROX sur l'UPF 5.....	46
Figure 16 : Exemple de grands ensembles forestiers mis en évidence par l'analyse via l'indice PROX.....	46
Figure 17 : Problème de création de polygones abérrants suite à la rasterisation de la couche gestionnaire. La couche violette est la couche gestionnaire, la couche verte est le raster obtenu suite à la rasterisation de la couche gestionnaire .....	47
Figure 18 : Schémas explicatifs de l'effet lisière selon la taille et la forme du patch forestier.....	49
Figure 19 : Schéma de comparaison des indices K pour deux patches de forêt sèche .....	49
Figure 20 : Schéma des différentes échelles d'analyse des connectivités .....	50
Figure 21 : Schéma descriptif de la technique de dilatation-érosion .....	51
Figure 22 : A = Continuum obtenu suite à la dilatation-érosion. B = Occupation du sol sur le continuum de dilatation-érosion.....	52
Figure 23 : Pistes intégrées à la légende du MOS.....	55
Figure 24 : Intégration des pistes dans le MOS .....	55
Figure 25 : Représentation des chemins de moindre-coût en termes de restauration sur la zone Pindaï-Nékoro (échelle : 1:80000).....	56

Figure 26 : Exemple de chemin de moindre coût aberrant .....	56
Figure 27 : Schéma récapitulant les étapes de création du continuum des connectivités .....	57
Figure 28 : Carte de connectivité potentielle globale des FS sur Pindaï-Nékoro .....	58
Figure 29 : Illustration de l'importance d'un patch dans la connectivité en fonction de sa situation dans le paysage (Forman R.T.T., 1995).....	59
Figure 30: Carte représentant l'importance des fragments dans la connectivité.....	61
Figure 31 : Regroupement du MOS en niveau d'intérêt pour la restauration des FS.....	62
Figure 32 : Carte de la connectivité potentielle globale des FS sur Pindaï-Nékoro .....	63
Figure 33 : Typologie des forêts sèches selon leur stade de dégradation .....	64
Figure 34 : Moyennes des distances de dispersion pour plusieurs espèces d'arbres de forêts tempérés (Ashley, 2010).....	66
Figure 35 : Représentation des diagrammes de direction du vent sur 4 zones de la Grande Terre ...	67
Figure 36 : Mode de dispersion des fruits en forêt sèche (Boquet A., 2005) .....	67
Figure 37 : Priorisation selon l'emprise foncière .....	69
Figure 38 : Priorisation selon la pente .....	70
Figure 39 : Représentation 3D du continuum de gestion.....	71
Figure 40 : Exemple de représentation des plantes classées dans les patches de forêt sèche.....	72
Figure 41 : Priorisation selon la vulnérabilité aux feux .....	72
Figure 42 : Carte d'aide à la priorisation pour la restauration des connectivités des forêts sèches....	74
Figure 43 : Site de Pindaï-Nékoro.....	75
Figure 44 : Zoom sur le site Montagnes-Blanches, potentiellement intéressant en termes de gestion .....	75
Figure 45 : Présence d'espèces classées EN (triangle orange) et VU (rond jaune) sur la liste rouge IUCN.....	76
Figure 46 : Focus sur l'intérêt de restauration sur le site Montagnes Blanches .....	76
Figure 47 : Site d'importance majeure dans la connectivité (Pindaï Est 5, Baie de Népoui .....	76
Figure 48 : Place centrale de certains petits fragments dans la connectivité .....	78
Figure 49 : Continuum des connectivités sur les sites Alamu et Mavovoui Ouest 4.....	79
Figure 50 : Patch présentant un indice K faible malgré une forme apparemment compacte .....	84
Figure 51 : BC_IIC anormalement élevé sur un patch situé sur une île .....	84
Figure 52 : Exemple de surface de restauration active nécessaire pour rétablir une continuité .....	86
Figure 53 : Schéma de comparaison de déplacement entre un reptile et un oiseau dans la matrice paysagère.....	87
Figure 54 : Schéma globale de la méthodologie de cartographie des connectivités (Rios J., 2016 modifié).....	91

# Liste des tableaux

---

Tableau 1 : Prérequis pour l'étude des connectivités structurelle et fonctionnelle .....	32
Tableau 2 : Tableau des caractéristiques générales des UPF.....	40
Tableau 3 : Tableau des distances ENN moyennes et des écarts-types associés pour chaque UPF. Le "Total" pour les colonnes distance ENN et écart-type correspond aux moyennes générales pour toute les UPF.....	42
Tableau 4 : tableau récapitulatif des tailles de pixel optimales pour la rasterisation de la couche gestionnaire pour chaque UPF en vue du calcul de l'indice PROX.....	47
Tableau 5 : Classes à conserver ou non dans l'analyse par chemins de moindre coût.....	53
Tableau 6 : Matrice des coûts de restauration pour chaque classe d'occupation du sol intégrée dans le MOS .....	54
Tableau 7 : Exemple de classement de patchs selon leur indice BC_IIC.....	60
Tableau 8 : Deux niveaux d'emprise foncière retenus .....	68
Tableau 9 : Classement des patchs Pindai-Est 5 et Baie de Népoui au sein de l'UPF 5 d'après leur BC_IIC.....	77
Tableau 10 : Exemple de tableau de classement des patchs selon les valeurs d'indices sur l'UPF 5.	81

# INTRODUCTION

---

La fragmentation du paysage et la perte d'habitat constituent les causes majeures d'extinction des espèces à l'échelle mondiale (Opdam P. et al., 1993 ; Fahrig L., 1997 ; Farhig L., 2003). Elles entraînent une isolation des espèces en sous-populations, amenant une diminution importante des échanges de gènes entre celles-ci et donc une diminution de la diversité génétique et une augmentation de la consanguinité, pouvant entraîner à long terme l'extinction des populations à faibles effectifs (Lowe AJ. Et al., 2007). La fragmentation provoque l'isolation des patchs d'habitat et réduit les possibilités de migration, de reproduction et de dispersion des espèces animales et végétales d'autant plus que cette isolation est importante. Il est donc primordial de rétablir les connectivités écologiques entre les lambeaux d'habitats, ou de maintenir celles déjà établies afin d'enrayer l'importante perte de biodiversité provoquée par leur rupture (Crooks K.R, Sanijayan M., 2006).

En conséquence d'un contexte climatique et géologique hors du commun, d'une industrie relativement peu développée, et d'une faible exposition aux risques naturels, l'archipel de Nouvelle-Calédonie est doté d'une biodiversité exceptionnelle tant en milieu terrestre que marin. Cette richesse, et la fragilité de ces écosystèmes lui ont valu d'être classé parmi les 10 premiers points chauds de biodiversité mondiale identifiés par Myers, 1988, aujourd'hui au nombre de 34 (Lowry et al., 2004). Depuis les années 2000, les acteurs de l'environnement au sein du gouvernement calédonien, de l'Etat français, des organismes associatifs internationaux et des scientifiques œuvrent sans relâche pour limiter l'érosion de la biodiversité et la disparition des écosystèmes terrestres et lagunaires, en majorité liés à l'impact humain.

Les forêts sèches calédoniennes sont des formations à végétaux sclérophylles se développant en zones tempérées et sub-tropicales sur des zones peu arrosées et de faible altitude. Déjà classées parmi les 238 écorégions prioritaires en termes de conservation par le WWF, elles constituent l'un des écosystèmes les plus menacé de la planète. Sur l'immense étendue de forêt sèche qui recouvrait la côte Ouest de la Grande Terre il y a environ 4000 ans, il n'en reste plus que 2%, soit environ 175 km<sup>2</sup>. Au fil des siècles, cet habitat fut détruit, morcelé, dégradé, entre autres par les défrichements et les incendies à répétition, et se présente aujourd'hui comme une mosaïque de fragments ou lambeaux (le terme « reliques » est aussi approprié) présentant différents stades de dégradation, et plus ou moins isolés les uns des autres. Suite à ce constat, une direction fut rapidement donnée par les acteurs de l'environnement pour empêcher la disparition de cet écosystème. Maintenir et reconstruire les connectivités écologiques entre les lambeaux de forêt sèche permettra le rétablissement des flux de gènes, la dispersion des graines et facilitera la résilience de ces

formations. Cela ne sera possible qu'en intégrant les fragments de forêt sèche dans leur contexte paysager et en rassemblant des connaissances poussées sur leur fonctionnement. Le facteur humain doit aussi être pris en compte, afin d'intégrer la préservation de cette écorégion dans les schémas de développement territoriaux et dans l'accroissement urbain.

Le présent rapport est une restitution de l'étude menée au cours des 6 mois de stage qui avait pour but de caractériser et de modéliser les connectivités écologiques entre les forêts sèches calédoniennes en passant par la production d'un Système d'Information Géographique (SIG) le plus complet possible. Comment modéliser ces connectivités par SIG au sein d'une matrice paysagère calédonienne très particulière, et comment déterminer des zones prioritaires pour la restauration ou la protection sur le long terme des forêts sèches dans un contexte d'aide à la décision ?

Trois grands axes sont développés pour répondre à cette problématique. Le premier est une présentation du contexte environnemental très particulier de la Nouvelle-Calédonie et des acteurs de l'environnement officiant sur le territoire. Les notions de continuités et de réseau écologique sont aussi expliquées. Une seconde partie développe en détail la méthodologie mise en place au cours de l'étude pour déterminer et caractériser ces continuités écologiques. Enfin, le troisième axe visera à discuter les résultats obtenus, exposera les limites qui ont été soulevées au cours de l'analyse, et informera sur les perspectives et les suites qui pourront être données à cette étude, tout en recommandant quelques stratégies de gestion.

# Partie I : Contexte général

---

## I. Une problématique écologique complexe impliquant plusieurs acteurs

### 1. Présentation des structures d'accueil

Trois organismes ont coencadré cette mission de 6 mois. Les personnes assignées à l'encadrement du stage assurèrent un soutien important, tant au niveau logistique que humain. La dimension collaborative entre le Conservatoire d'Espaces Naturels (CEN), Conservation International (CI), et la Direction des Technologies et des Services de l'Information (DTSI) était très présente tout au long de la mission, et a permis de la mener à son terme dans les meilleures conditions.

#### a) Le Conservatoire d'espaces naturels de Nouvelle-Calédonie

Les Conservatoires d'espaces naturels sont généralement des structures associatives dont la première a été créée en 1976 en Alsace. A l'heure actuelle, 29 CEN sont regroupés au sein de la Fédération des CEN mise en place en 1988. La protection de la biodiversité, la préservation des sites naturels et la restauration des milieux dégradés constituent leurs raisons d'être. Les CEN sont ainsi impliqués dans la gestion de 2921 sites naturels dans toute la France et outre-mer. Grâce à leur maîtrise foncière, leurs connaissances scientifiques et techniques et leur capacité à concerter les différents acteurs de l'environnement, ils constituent les principaux partenaires de l'Etat français pour le développement du réseau Natura 2000 et pour l'exécution de la Trame Verte et Bleue. Les CEN œuvrent sans relâche pour la prise en compte de la biodiversité et pour l'application des politiques publiques en matière de développement durable et de gestion écologique des territoires<sup>12</sup>.

En Nouvelle-Calédonie, la création officielle du CEN en tant que Groupement d'Intérêt Public (GIP) a été approuvée en février 2011. Sa constitution fait suite au succès du Programme de Conservation des Forêts Sèches (PCFS), lancé sous l'initiative du World Wildlife Fund (WWF), des provinces Nord et Sud, du gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, de l'Etat et visant à établir des stratégies pour préserver cet habitat extrêmement menacé. Bien que la compétence environnementale soit dévolue aux provinces et à la Nouvelle-Calédonie, plusieurs démarches

---

<sup>1</sup> [https://fr.wikipedia.org/wiki/Conservatoire\\_d%27espaces\\_naturels](https://fr.wikipedia.org/wiki/Conservatoire_d%27espaces_naturels)

<sup>2</sup> [www.reseau-cen.org](http://www.reseau-cen.org)

partenariales entreprises sur le territoire, dont le PCFS, ont montré tout l'intérêt d'un regroupement des compétences, des volontés et des moyens engendrant la mise en place d'une structure de coopération entre partenaires publics et privés dédiée aux milieux naturels néo-calédoniens : le GIP CEN.

Le CEN-NC intervient comme outil de coopération, de concertation et d'animation au service des stratégies environnementales définies par les collectivités de Nouvelle-Calédonie et par l'Etat.

Il a pour mission d'étudier, de comprendre, de conserver, de protéger, de restaurer, de valoriser et de faire connaître les espaces naturels terrestres et marins de la Nouvelle-Calédonie, afin d'en assurer une gestion intégrée et durable.

Actuellement, il intervient sur le thème de la conservation de la forêt sèche, sur celui de la coordination de la gestion du bien inscrit au patrimoine mondial, et sur la coordination de la lutte contre les espèces envahissantes

De ce fait, les actions du CEN sur le « caillou » sont nombreuses et variées, et peuvent aller du simple recueil de données scientifiques à la mise en place d'infrastructures de protection, en passant par l'animation et la valorisation des sites naturels.

Le CEN est organisé en trois pôles thématiques distincts :

- Le Pôle Patrimoine Mondial (PPM), assure la coordination et la mise en œuvre d'un programme d'actions dédié au maintien du bon état de santé des lagons calédoniens inscrits sur la liste du patrimoine mondial.
- Le Pôle Espèces Envahissantes (PEE), assure la coordination et la mise en œuvre d'un programme de lutte contre les espèces exotiques envahissantes, animales et végétales
- Le Pôle Forêt Sèche (PFS), auquel la mission de ce stage est rattachée, assure la coordination et la mise en œuvre d'un programme d'actions dédié à la préservation des forêts sèches.

Suite à l'évaluation du Programme de Conservation de la Forêt Sèche réalisée en 2012 ce dernier pôle a pour triple objectif de protéger, de restaurer et de valoriser les de forêts sèches de Nouvelle-Calédonie<sup>3</sup>.

#### **b) Conservation International**

CI est une organisation à but non lucratif américaine fortement engagée dans la protection de la Nature, la préservation de la biodiversité et le développement d'une société humaine évoluant dans

---

<sup>3</sup> [www.cen.nc](http://www.cen.nc)

le respect de l'environnement. Créée en 1987, l'association emploie aujourd'hui plus de 1000 personnes et œuvre dans une trentaine de pays. Toujours en suivant une ligne de conduite axée sur le développement durable et la préservation des ressources engendrées par la Nature, CI joue un rôle de médiateur et d'appui logistique. L'association accompagne les gouvernements, les sociétés privées, mais aussi les populations autochtones dans leurs démarches de développement respectueux de l'héritage naturel. Par ses actions de sensibilisation, ses études de terrain et ses collaborations avec les entités précédemment citées, CI a participé à la création de plus de 1200 aires protégées dans le monde, et à la préservation de plus de 740 millions d'hectares de sites terrestres, côtiers et maritimes<sup>4 5</sup>.

L'organisation est implantée depuis 1996 sur le territoire calédonien, et est impliquée dans de nombreux projets environnementaux sur les trois provinces (Sud, Nord et Iles Loyauté) à travers le programme GREEN (Gestion Raisonnée de l'Environnement et des Espaces Naturels de Nouvelle-Calédonie). CI est régulièrement sollicité par le gouvernement, les gestionnaires des provinces ou les sociétés privées pour effectuer des études environnementales, appuyer les études d'impacts ou apporter un angle de réflexion supplémentaire lors de la création d'espaces protégés. La réalisation de ce stage, par le biais d'un important apport de connaissances, de compétences et de données environnementales, est un exemple de l'implication et de l'appui de l'ONG, en tant que membre du CEN, pour la mise en œuvre des stratégies environnementales en Nouvelle-Calédonie

**c) Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie : Direction des Technologies et des Services de l'Information (DTSI)**

La DTSI est une direction du Gouvernement de Nouvelle-Calédonie chargée d'apporter un appui technique et de mettre à disposition les technologies informatiques nécessaires à la réalisation des projets gouvernementaux. Cette structure assure donc une veille technologique, une centralisation des données informatiques du gouvernement, et permet une interopérabilité des systèmes d'informations développés par les administrations, les institutions et les partenaires de la Nouvelle-Calédonie. Le service de la géomatique et de la télédétection de la DTSI élabore et met en œuvre le système d'information géographique du gouvernement, qui regroupe certaines des données scientifiques disponibles et qui permet au grand public de consulter librement des données géographiques via une interface Web-SIG (Georep).

---

<sup>4</sup> [https://fr.wikipedia.org/wiki/Conservation\\_International](https://fr.wikipedia.org/wiki/Conservation_International)

<sup>5</sup> [www.conservation.org](http://www.conservation.org)

#### **d) World Wildlife Fund**

Le WWF est une association internationale de protection de l'environnement fondée en 1961 à Morges en Suisse, sous l'impulsion de plusieurs ONG et d'écologistes réputés. A cette époque, préserver l'environnement et les ressources naturelles commence à être perçu comme une nécessité afin que la société humaine puisse survivre et continuer à se développer dans les siècles à venir. La volonté est là, mais le manque de financement ne permet pas aux structures déjà en place de lancer des actions à grande échelle. Ainsi à l'origine, la création du WWF par les principaux conservateurs de la Nature est une réponse à ce problème. Cet organisme sera dédié à la collecte de fonds dans le but exclusif de protéger la faune, ses habitats et la Nature en général, et collaborera avec les ONG sur leurs projets.

Depuis 50 ans, le WWF ne cesse de gagner de l'influence et est aujourd'hui l'une des plus importantes associations environnementaliste du monde, comptant environ 6200 employés et plus de 5 millions de sympathisants<sup>6 7</sup>.

Déjà engagée dans la conservation des forêts sèches en Nouvelle-Calédonie depuis 1997, la structure ouvre un bureau sur le territoire en 2001, afin d'être au plus proche du terrain. L'antenne calédonienne soutient le gouvernement et les Provinces sur les projets environnementaux, participe aux analyses en vue de la création de sites protégées et agit auprès de la population, notamment les habitants des tribus, pour les aider dans la gestion du patrimoine naturel de l'archipel. Ses actions passent donc régulièrement par le volontariat et se concrétisent souvent par l'organisation d'évènements éco-citoyens, tels que le reboisement, l'élimination d'espèces envahissantes ou encore la création d'évènements sportifs (Pandathlon) permettant de collecter des fonds dédiés aux actions futures.

## **2. Un « caillou » unique au monde**

La Nouvelle-Calédonie est répertoriée comme Territoire d'Outre-Mer, mais échappe depuis 1999 à la définition de ce statut. Elle est donc reconnue aujourd'hui comme une collectivité « sui generis », c'est-à-dire une « collectivité d'Outre-Mer à statut particulier » composé d'un gouvernement autonome, et subdivisée en trois Provinces semi-autonomes depuis 1988<sup>8</sup>. L'archipel calédonien, situé à environ 1500 km à l'Est de l'Australie et 1700 km au Nord de la Nouvelle-Zélande, est constitué de cinq îles principales et d'une multitude d'îles secondaires, d'îlots et de récifs, couvrant une superficie totale d'environ 18 600 km<sup>2</sup>. L'île principale appelée Grande Terre,

---

<sup>6</sup> <http://wwf.panda.org>

<sup>7</sup> [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonds\\_mondial\\_pour\\_la\\_nature](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonds_mondial_pour_la_nature)

<sup>8</sup> [http://www.collectivites-locales.gouv.fr/statuts-nouvelle-caledonie-et-polynesie#Statut\\_nv-cal](http://www.collectivites-locales.gouv.fr/statuts-nouvelle-caledonie-et-polynesie#Statut_nv-cal)

forme une fine bande de 400 km de long pour 70 km de large et est divisée en deux provinces, la province Sud – comprenant la capitale Nouméa et l'île des Pins – et la province Nord. Les îles Ouvéa, Lifou et Maré, situées au Nord-Est de la Grande Terre constituent la province des Iles Loyauté (carte générale en annexe 1). Les natifs calédoniens seront très prochainement appelés aux urnes lors de la tenue d'un référendum visant à arrêter le statut de la Nouvelle-Calédonie (Bonvallet J. et al. 2012).

#### a) **L'immense richesse naturelle calédonienne**

La formation du « Caillou » a débuté il y a environ 100 Ma, lors de l'ouverture de la mer de Tasman qui a amené une masse continentale à se détacher de l'Australie. Une série de plissement de la plaque océanique a ensuite eu lieu il y a 50 Ma jusqu'à environ 23 Ma avant notre ère, dont le dernier a entraîné la formation de l'archipel actuel. La Grande Terre est constituée en majeure partie de formations sédimentaires et volcaniques dont les âges vont du Permien (225-280 millions d'années) au Cénozoïque ou Tertiaire (1,5 - 65 MA). Les Loyautés quant à elles, font partie d'un arc volcanique constituant un chaînon de la Ceinture de Feu du Pacifique. Le Sud de la Grande Terre est entièrement recouvert de roches ultrabasiques résultant de l'obduction du manteau lors du dernier plissement, très riches en nickel, cobalt et chrome (Maurizot P. & Vendé-Leclerc M., 2012). L'exploitation de ces gisements de métaux constitue la principale activité économique de l'île, notamment l'extraction et la vente du nickel qui fait l'objet d'environ 90% des exportations du territoire (Lowry P.L. II et al. 2004). Le sol ultramafique résultant de ces roches au ton rougeâtre est notamment hostile à l'implantation des forêts sèches.

La Grande Terre est traversée sur toute sa longueur par un chaîne montagneuse appelée Chaîne Centrale et dont le point culminant est le Mont Panié à 1629 mètres. Cette véritable « moelle épinière » de l'île entraîne une différenciation climatique importante de part et d'autre de la chaîne, en bloquant les alizés venants du Sud-Est. La partie Est est ainsi nettement plus arrosée que la moitié Ouest. Par exemple, la moyenne annuelle des précipitations à Ouaco situées sur la côte Ouest est de 799 mm alors qu'elle est de 3746 mm à Galarino, distante de seulement 41 km mais situés sur la côte Est (Maitrepierre L., 2012). En outre, le phénomène ENSO (El Niño Southern Oscillation) joue un rôle prépondérant dans la variabilité climatique interannuelle, avec l'alternance des périodes El Niño plus sèches et plus fraîches, et des périodes La Niña plus humides et chaudes. Deux saisons se distinguent, avec des phénomènes d'intersaisons parfois difficiles à identifier. La saison chaude, entre décembre et avril, est caractérisée par des températures moyennes élevées et une pluviosité importante, tandis que la saison fraîche, s'étendant entre mai et septembre, se distingue par une température plus fraîche et des épisodes pluvieux nettement moins récurrents.



**Figure 1 : Le Cagou huppé (*Rhynochetos jubatus*), espèce emblématique de Nouvelle-Calédonie (bmw323i.eklablog.com)**

Ces contextes géologiques, climatiques et géographiques très particuliers ont permis le développement d'une biodiversité exceptionnelle en Nouvelle-Calédonie, notamment du point de vue floristique avec un total de 3371 espèces de plantes vasculaires pour un taux d'endémisme de 74,3% (Jaffré et. al., 1993). Sept grandes unités de végétation ont été définies (Jaffré et. al., 2012), qui regroupent les différents types de forêts, mangroves, marécages ou maquis. Les formations végétales les plus riches sont sans conteste les forêts denses humides sempervirentes, avec 2012 espèces de plantes vasculaires pour un endémisme de 82,2%, tandis que la formation la plus originale reste le maquis avec 88,8% d'endémisme (Jaffré et. al., 1993). En ce qui concerne la faune, seulement neuf

mammifères, dont six chauve-souris, sont répertoriés comme natifs ; 185 espèces d'oiseaux natives sont décrites, dont 23 endémiques, ainsi que 70 espèces de reptiles dont 62 endémiques (fig. 1), et environ 4000 espèces d'insectes, nombre qui augmente chaque année avec de nouvelles découvertes (Lowry P.L. II et al., 2004).

En second lieu, le lagon de Nouvelle-Calédonie fait partie des trois systèmes coralliens les plus vastes et époustouflant du monde. L'immense diversité d'espèces de poissons, la variété extraordinaire de systèmes récifaux, et les écosystèmes intacts encore observables dans le lagon sont les critères qui ont amené pas moins de six sites du lagon calédonien à être classés au patrimoine mondial de l'UNESCO<sup>9</sup>

### **b) Un effort important et coordonné pour la protection de l'environnement**

Ce contexte environnemental hors du commun a valu à la Nouvelle-Calédonie d'être classée comme l'un des 34 hotspots de biodiversité décrits par CI (Lowry P.L. II et al., 2004). malgré une réglementation naissante mais en plein développement. L'impact environnemental résultant de l'installation des mines de nickel a été très fort, et de nombreux sites naturels ont été dégradés ou détruits. La réglementation environnementale est encore en plein développement, mais depuis quelques années, un important effort est fait, notamment avec la réalisation d'études préalables visant à réduire au maximum ces impacts (Rios J., com. pers., 2016).

Depuis 2008, les provinces Nord et Sud se sont chacune dotées de leur propre Code de l'Environnement. Cet effort de coordination interprovincial a eu le mérite de structurer le droit de l'environnement, très éclaté à cause du partage complexe des compétences environnementales entre

<sup>9</sup> <http://whc.unesco.org/fr/list/1115>

les entités provinciales et gouvernementales. Ces codes décrivent en détail les méthodes de prévention des pollutions, de protection et de gestion du patrimoine naturel, malgré des différences importantes entre les deux provinces liées aux spécificités de chacune.

En province Nord, six types de sites protégés sont décrits : les réserves naturelles intégrales, les réserves naturelles, les aires de gestion durable des ressources, les parcs naturels provinciaux, les réserves de nature sauvage et les aires de protection et de valorisation du patrimoine naturel et culturel. Les forêts sèches, en tant qu'habitat dans son ensemble, ne sont pas protégées en province Nord, mais la majorité des espèces des formations sclérophylles figurent dans la « liste des espèces protégées en province Nord ».

En province Sud, les mêmes aires protégées sont décrites, à l'exception des deux dernières qui ne figurent pas dans le Code de l'Environnement PS. A ces sites d'intérêts environnementaux majeurs viennent s'ajouter les IBA (Important Bird Areas) délimitées par la Société Calédonienne d'Ornithologie affiliée au consortium Birdlife International et les sites inscrits au Patrimoine Mondial. Cinq d'écosystèmes d'intérêt patrimonial sont également identifiés et protégés quelle que soit leur localisation (au sein d'une aire protégée ou non) :

- Les forêts denses humides sempervirentes
- Les forêts sèches
- Les mangroves
- Les herbiers de phanérogames
- Les récifs coralliens

La préservation de ce patrimoine naturel hors du commun fait donc partie des enjeux majeurs sur le territoire calédonien. La reconnaissance par l'Etat Français de l'immense intérêt environnemental de l'archipel, et la bonne coordination des actions menées par les différentes collectivités (Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, provinces), instituts de recherche (IAC, IRD), et les associations, permettent d'importantes avancées en termes de connaissances des écosystèmes indigènes et de leur préservation. Pourtant beaucoup reste encore à faire, particulièrement au niveau des suivis de terrains et de la récolte de données environnementales concrètes (suivi des déplacements de la faune, étude de dispersion des diaspores, etc.).

## II. La forêt sèche, une écorégion extrêmement menacée

### 1. Description et généralités sur l'écosystème forêt sèche

La forêt sèche, ou forêt sclérophylle, est définie comme une forêt se développant en région tropicale qui se caractérise par une saisonnalité marquée dans la distribution des précipitations, avec plusieurs mois de sécheresse et quelques mois plus arrosés. La canopée y est moins fermée qu'en forêt humide, mais la strate arbustive reste très dense. Les plantes sclérophylles présentant une cuticule épaisse et brillante (du grec skleros = dur et phylle = feuille) sont caractéristiques de ces formations. La forêt de feuillus sèche tropicale et subtropicale constitue un des 14 biomes terrestres décrit par le WWF et celui-ci recouvre une surface d'environ 1 million de km<sup>2</sup> répartis sur une quarantaine de pays. La quasi-totalité est menacée par divers facteurs, majoritairement anthropiques, auxquels s'ajoutent des menaces affectant spécifiquement certains sites en fonction du contexte (Miles L. et al., 2006).

#### a) La forêt sèche en Nouvelle-Calédonie

L'écosystème forêt sèche en Nouvelle-Calédonie est présent uniquement le long de la côte Ouest de la Grande Terre (fig. 3) ainsi qu'à l'extrême Nord, où les faibles moyennes annuelles de précipitations permettent son développement. L'importante mobilisation autour de la préservation de cet habitat est relativement récente mais néanmoins tout à fait légitime, car les forêts sèches calédoniennes sont plus menacées que tous les autres écosystèmes similaires du globe en termes d'espèces en danger, et de surface

restante (Gillespie T.W. & Jaffré T., 2003). Aujourd'hui, ce milieu ne recouvre plus que 175 km<sup>2</sup>, soit environ 2% de sa couverture initiale. .

La flore des forêts sèches compte néanmoins 348 espèces réparties en 212 genres et 78 familles, un taux d'endémisme de 59 % et 71 espèces

qui lui sont propres (fig. 2) (Morat P. et al., 2012). La destruction de cet habitat, causée par une combinaison de nombreux facteurs, et accentuée par un manque d'intérêt flagrant pour cet écosystème pauvre en ressources exploitables, a entraîné une fragmentation extrêmement importante. Ainsi, les forêts sèches au sens stricte restantes sont dispersées en plus de 740 patchs plus ou moins isolés les uns des autres, certains ayant une surface inférieure à 0,5 ha, selon les dernières données cartographiques du CEN régulièrement mises à jour.



Figure 2 : Fleurs de *Mezoneuron montrouzieri*, plante endémique de calédonie typique des forêts sèches © Jean-Jacques Villegente <http://www.endemia.nc/>

La forêt sèche est par ailleurs décrite comme un écosystème d'intérêt patrimonial à protéger dans le Code de l'Environnement de la Province Sud, Livre II : Protection du patrimoine naturel, Titre III : Protection des écosystèmes d'intérêt patrimonial. Celui-ci est décrit comme une formation forestière située sur un site dont la pluviométrie annuelle est inférieure à 1500mm par an et dont l'altitude ne dépasse pas 500m. Une description de sa structure est aussi faite, et 71 espèces végétales caractéristiques de l'habitat sont listées. Le Code de l'Environnement de la Province Nord, plutôt axé sur la protection des espèces (dont plusieurs de forêt sèche) et sur la pérennisation de la sylviculture, ne contient aucun volet spécifique à cet écosystème.



Figure 3 : Forêt sèche sur le site de Guaro-Deva (Source : CEN NC)

#### **b) De nombreuses menaces identifiées en Nouvelle-Calédonie**

Les facteurs qui menacent aujourd'hui les vestiges de cet écosystème sont nombreux. Ceux-là même qui ont entraîné la dégradation de cet habitat dans le passé, constituent aujourd'hui encore un grand danger pour la pérennité des patches restant. A ces facteurs s'ajoutent des menaces plus contemporaines, liées principalement au développement des activités humaines et à l'augmentation de la population.

- *Les feux*

Les incendies répétés, ou « feux de brousses » ont façonné le paysage calédonien au fil du temps. En forêt sclérophylle, le passage des feux engendre un milieu dégradé de type savane, et induit un effondrement de la biodiversité, tant au niveau de la flore que de la faune. Suite à un incendie, qui détruit en général la



Figure 4: Photo de drone d'une forêt sèche suite au passage d'un incendie (Rios J., 2015)

totalité de la biomasse ligneuse (fig. 4), les plantes allochtones envahissantes profitent de la faible capacité de régénération des forêts sèches pour recoloniser entièrement le milieu et empêcher la repousse de ces dernières. Ces formations végétales sont donc reconnues comme étant les plus sensibles de toutes à cette menace sur l'archipel (Jaffré T. et al., 1997). Il est à noter que la plupart des incendies sont directement d'origine anthropique, leur fréquence a donc fortement augmentée au fil des siècles avec la croissance de la population sur la Grande Terre.

- *Menaces liées à l'élevage*

Le pâturage est un facteur important de destruction des formations sclérophylles. L'élevage extensif des bovins et ovins est pratiqué en Nouvelle-Calédonie, et les surfaces de terrain liées à cette pratique sont parfois gigantesques (de l'ordre de plusieurs milliers d'hectares). Les bêtes divaguent librement et peuvent ravager des sites de forêt sèche, ou pouvant potentiellement évoluer en forêt sèche, en se nourrissant des jeunes plantules. Le défrichage mis en œuvre pour ce type d'élevage a aussi un impact négatif important.

- *Menaces liées à l'urbanisation et ce qu'il en découle*

L'expansion urbaine qui s'intensifie sans cesse (notamment au Nord de Nouméa) participe aussi grandement à la destruction de cet écosystème. Les constructions et le défrichage peuvent effacer des connectivités potentielles existantes entre les patchs de forêt sèche, d'où l'intérêt de les identifier et de les caractériser. Le développement de la ville induit des passages d'engins de plus en plus fréquents, une augmentation des squats à proximité de la forêt, le développement de cultures vivrières en lisières de forêt sèche, et l'augmentation de la fréquentation au sein des ensembles forestiers induisant des dégradations des sous-bois (coupe, érosion, introduction d'espèces exotiques envahissantes).

- *Les espèces exotiques envahissantes*

L'un des principaux problèmes, récurrent dans tous les pays présentant un fort taux d'endémisme, est lié à l'import d'espèces exotiques végétales et animales. Ces espèces très compétitives et plastiques en termes d'adaptation, peuvent s'avérer envahissantes et néfastes pour la biodiversité. L'IUCN considère l'invasion des habitats par des espèces exotiques envahissantes comme la deuxième cause d'érosion de la biodiversité dans le monde, après la destruction et la fragmentation des milieux. En Nouvelle-Calédonie, plus de 2000 espèces végétales introduites ont été dénombrées, dont 200 sont considérés comme envahissantes ou potentiellement envahissantes, et 67 d'entre elles présentent un risque important et sont à suivre attentivement (Hequet V. et al., 2009). Le syndrome d'insularité entraîne une fragilité accrue des plantes endémiques de l'archipel qui ont évolué sans forte concurrence, avant que des espèces allochtones ne soient introduites. En forêt sèche, certaines s'avèrent bien plus compétitive que les espèces autochtones, et profitent des bouleversements du milieu liés aux feux ou au défrichage pour le recoloniser. Le taux de recouvrement monospécifique atteint parfois 100% dans certaines zones ouvertes (Hequet V. & Rigault F., 2007). *Arundo donax*, *Lantana camara* et *Pinus caribaea* sont les trois pires envahissantes présentes sur l'archipel, selon le classement établi sur la base du I-Rank développé par Morse, L et al. (2004). On peut aussi citer *Leucaena leucocephala* (le faux mimosa) comme espèce problématique.

En ce qui concerne les animaux, le cerf rusa (*Cervus timorensis rusa*) est l'un des principaux ravageurs en forêt sèche. Responsable d'abrutissement, d'écorçage, de frottis et de piétinement, le cerf a un impact sur la dynamique forestière lorsque qui peut être très négatif, et a été largement démontré dans un contexte de développement sylvicole (Reimoser F. & Gossow H., 1996 ; de Garine-Wichatitsky et al., 2004). Depuis son introduction vers 1870, un effort de chasse insuffisant et l'absence totale de prédateurs naturels permettent aux effectifs de cerfs de croître sans cesse. Un laps de temps très court suffit à une population de cerfs pour ravager plusieurs hectares de forêt et perturber la régénération du milieu. Afin de protéger les patches de forêt sèche les plus vulnérables, la mise en défens complète de certaines zones est pour le moment la seule mesure de protection efficace mise en place par le CEN (Hequet V., Rigault F., 2010).

Dans une moindre mesure, les cochons sauvages constituent aussi une menace pour la régénération des forêts sèches en piétinant les jeunes plants.

## **2. Le Programme de Conservation des Forêts Sèches**

### **a) Une initiative du WWF**

Sur la base des travaux de l'ORSTOM qui ont permis de démontrer l'imminence de la disparition de cet écosystème unique au monde, une réelle prise de conscience a eu lieu au sein des acteurs de l'environnement. Compte tenu de l'urgence de la situation, les premières opérations de conservation (classement législatif) sont mises en œuvre dans les années 90 afin d'inverser la tendance. Si la forêt sclérophylle calédonienne venait à disparaître, ce sont plusieurs centaines d'espèces végétales inféodées à ce milieu qui disparaîtraient avec elle. De plus, cette forêt présente des intérêts écosystémiques multiples en retenant les sols, en abritant de nombreux insectes pollinisateurs et en fournissant du bois (santal). Elle possède aussi une valeur économique potentielle via l'écotourisme, et est fortement ancrée dans la culture kanake (alimentation, médecine traditionnelle, artisanat, etc.) (Noulet M., 2007).

En 2001, à l'initiative du WWF, des provinces Nord et Sud, du gouvernement de la Nouvelle-Calédonie et de l'Etat, le Programme de Conservation des Forêts Sèches (PCFS) est lancé. Il a pour ambition de mobiliser les compétences de tous les acteurs de l'environnement afin d'endiguer le recul de la forêt sèche néo-calédonienne. Une stratégie est mise en place visant à accroître les connaissances scientifiques sur le sujet, à mettre en place des mesures de protection et de restauration et de sensibiliser le public à l'importance de ces forêts. En 2012, après 10 années de gestion du PCFS par l'IAC, le Conservatoire d'espaces naturels de Nouvelle-Calédonie prend en charge la coordination du plan d'actions en faveur de la sauvegarde des forêts sclérophylles, par la création du PFS. Des actions de protection, par le biais de mises en défens, ou de restauration sont menées, et le suivi des principaux sites de forêt sèches est réalisé (Hequet V., Isnard S., 2014). Des milliers d'arbres sont replantés chaque année au sein des sites prioritaires en Nouvelle-Calédonie et grâce au réseau associatif, la population participe à cet effort collectif en particulier dans le grand Nouméa (Ouen Toro, Lycée Jules Garnier).

### **b) Cartographie des connectivités des forêts sèches**

Suite à une étude sur les connectivités des forêts sèches dans le secteur du grand Nouméa, réalisée en 2012 par le WWF (Grange B., 2012), certains membres du CEN (CI, DTSI, WWF) ont souhaité se réunir pour proposer un stage sur cette thématique à l'échelle du territoire. C'est donc avec le concours de tous ces acteurs de l'environnement en Nouvelle-Calédonie qu'une offre de stage au sein du CEN a été émise. Le but du stage sera de déterminer les connectivités

fonctionnelles et structurelles entre les patches de forêt sèche dans la limite des connaissances disponibles, de proposer une cartographie viable de ces dernières, et d'identifier des sites à placer en priorité pour la gestion selon plusieurs critères. CI fournira un appui méthodologique direct avec la participation d'un consultant spécialiste. La DTSI apportera un support technique en mettant à disposition des machines et des logiciels performants, et fournira des données géographiques indispensables pour l'étude effectuée. Enfin, le WWF participera au financement du stage. Le stagiaire sera hébergé dans les bureaux de CI à Nouméa, et le CEN s'assurera du bon déroulement du stage par le biais de visites régulières et de point-étape.

### III. Généralités sur la connectivité écologique

#### 1. Fragmentation du paysage :

La rupture des continuités au sein d'un paysage, aussi appelée fragmentation du paysage, est reconnue comme le premier facteur d'érosion de la biodiversité à l'échelle du globe (Farhig L., 2003). Souvent assimilée à une perte d'habitat, elle résulte la plupart du temps des activités anthropiques, et fait suite à la construction d'une route, au défrichement pour créer un terrain agricole, ou à l'urbanisation.

Cette problématique est particulièrement applicable à la Nouvelle-Calédonie, qui est un archipel présentant un taux d'endémisme exceptionnel et où certaines espèces ne sont représentées que par une poignée d'individus. En forêt, la fragmentation amène aussi une augmentation de la surface de lisière, qui est une zone de forte compétition entre les plantes héliophiles et sciaphiles, et présentant un cortège d'espèces différent de ce que l'on trouve en cœur de forêt. Dans le cas des forêts sèches, dont la régénération est lente et dont les espèces typiques sont généralement moins compétitives que les espèces exotiques envahissantes, l'augmentation de la surface des lisières pourrait être néfaste à la reprise de la forêt. En Nouvelle-Calédonie, la forêt sclérophylle est déjà extrêmement fragmentée, à tel point que l'on ne parle plus vraiment de forêt, mais plutôt de fragments, ou reliques plus ou moins isolés les unes des autres. Pour les raisons citées précédemment, la protection de ces patches ne peut être envisagée sans définir et protéger, voir restaurer les éventuelles continuités écologiques présentes entre eux

#### 2. Pourquoi étudier les connectivités écologiques ?

La prise en compte des connexions écologiques entre les différents milieux pour la préservation de l'environnement et le développement durable est un fait relativement récent. Il est admis que la préservation des connexions entre les habitats fait partie intégrante de la protection de

l'environnement, et s'inscrit dans une idée de développement durable en prenant en compte la croissance de la société comme paramètre inéluctable (Opdam P. et al., 2006). L'exemple de la mise en place de la Trame Verte et Bleue en France démontre cette idée en considérant les continuités écologiques dans les documents d'urbanismes (Brouard-Masson J. et al., 2014). Le concept de réseau écologique est aujourd'hui largement répandu. Un réseau écologique est flexible et adaptable, il a la capacité de changer de structure spatiale tout en gardant sa cohésion et son potentiel de conservation (Opdam P. et al., 2006). C'est pour cela que ce concept est le plus répandu chez les décideurs lorsqu'il s'agit de concilier développement humain et protection des écosystèmes lors de la création de projets de construction.

Au sens large, la continuité écologique correspond au degré de mouvement d'un organisme ou d'un processus biologique au sein d'un ou plusieurs milieux (Rios J., Lefeuvre J-C., 2011). De ce concept de continuité découle donc celui de connectivités, se traduisant par la qualité des connexions biologiques entre les milieux d'un point de vue structurel ou fonctionnel. Lorsque la fragmentation du paysage augmente, la connectivité diminue.

#### a) Différents types de connectivités

- *Connectivité structurelle :*

Directement liée à la structure spatiale du paysage, elle peut être assimilée dans un contexte forestier à la capacité d'un milieu séparant deux formations similaires à évoluer (à son stade climax) vers une formation identique. Pour donner un exemple, les forêts sèches ne se développent pas sur sol à substrat ultramafique, cette catégorie d'occupation du sol est donc soustraite à l'analyse des connectivités structurelles. Ce type de connectivité est donc mis en évidence principalement par l'occupation du sol et seules quelques informations basiques sur les espèces sont prises en considération.

- *Connectivité fonctionnelle :*

Nettement plus complexe que la connectivité structurelle, l'étude des connectivités fonctionnelles cherche à tenir compte des facteurs écologiques connectant les milieux visés par l'action de conservation, facteurs qui sont aussi indissociables de la structure du paysage. Elle dépend entièrement des caractéristiques de l'espèce ou du groupe d'espèces étudié et nécessite donc une connaissance approfondie du mode de fonctionnement de cette espèce ou groupe d'espèces. Dans le cas de la forêt sèche, afin de déterminer précisément le degré de connectivité fonctionnel des patches, il est nécessaire d'identifier et de connaître les flux écologiques effectifs entre les

fragments de forêt, tels que les modes et distances de dispersion des diaspores, ou les mouvements précis des animaux disséminateurs (captures-marquage-recapture, suivi GPS). Dans l'idéal, prendre en compte tous les facteurs écologiques de chacune des espèces présentes dans le milieu analysé permettrait de caractériser très précisément la connectivité fonctionnelle. Malheureusement, les lacunes de connaissances ou les limites dans les capacités techniques actuelles ne permettent pas de réaliser une étude exhaustive, c'est pour cela qu'il est indispensable de faire des choix justifiés et d'estimer certains paramètres qui permettront de caractériser au mieux cette connectivité. Son étude nécessiterait au préalable de déterminer les espèces et les facteurs les plus importants participant à celle-ci. Le tableau 1 récapitule les prérequis pour l'étude des connectivités.

<b>Type de connectivité</b>	<b>Structurelle</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mode d'occupation du sol</li> <li>- Continuité paysagère</li> <li>- Forme des habitats</li> <li>- Distances entre habitats</li> </ul>
	<b>Fonctionnelle</b>	<b>Potentielle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Informations basique et indirectes sur les espèces</li> </ul>
		<b>Réelle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Connaissances approfondies d'une espèce et de ses interactions avec son milieu</li> <li>- Connaissance du mouvement réel des individus (GPS, marquage...)</li> </ul>

Tableau 1 : Prérequis pour l'étude des connectivités structurelle et fonctionnelle

### b) Le réseau écologique

En écologie du paysage, la notion de réseau écologique est centrale et permet de structurer le paysage en différentes zones interconnectées et présentant des caractéristiques propres (fig. 5). Ces zones sont communément désignées de la manière suivante :

➤ Les zones réservoirs, ou zones nodales, ou zones sources : Il s'agit de zones riches en biodiversité où les organismes peuvent effectuer généralement leur cycle de développement complet. Elles sont caractérisées par un milieu homogène et comportent pour une espèce donnée un effectif de population suffisant pour atteindre la population minimale viable, qui permet d'assurer un brassage génétique et un taux de reproduction suffisant pour la survie de l'espèce sur le long terme (Beissinger S.R. & McCullough D.R., 2002).

➤ Les zones d'extension, ou zones de développement, ou zones puits : Ce sont des zones moins riches en biodiversité que les zones nodales, mais présentant des caractéristiques écologiques similaires et constituant donc des milieux colonisables par les individus issus des zones nodales. Si la pérennité de ces zones est assurée, elles peuvent éventuellement devenir elles-mêmes des zones nodales. Les lisières peuvent constituer des zones d'extension dans le cas d'une forêt dont le coeur serait un réservoir.

➤ Les corridors : ils assurent les connexions structurelles et fonctionnelles entre les différentes zones du paysage

➤ La matrice paysagère : C'est le milieu interstitiel prédominant au sein duquel sont comprises les « taches » constituées par les zones puits et les zones sources. Elle contient tous les éléments du paysage qui sont peu ou qui ne sont pas propices au développement du ou des organismes étudiés.

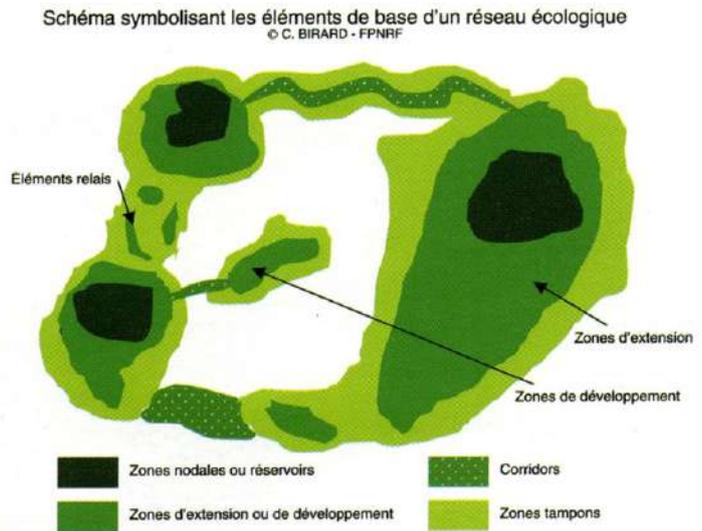


Figure 5 : Schéma simplifié des éléments d'un réseau écologique (Birard C. - FPNRF)

## Les corridors :

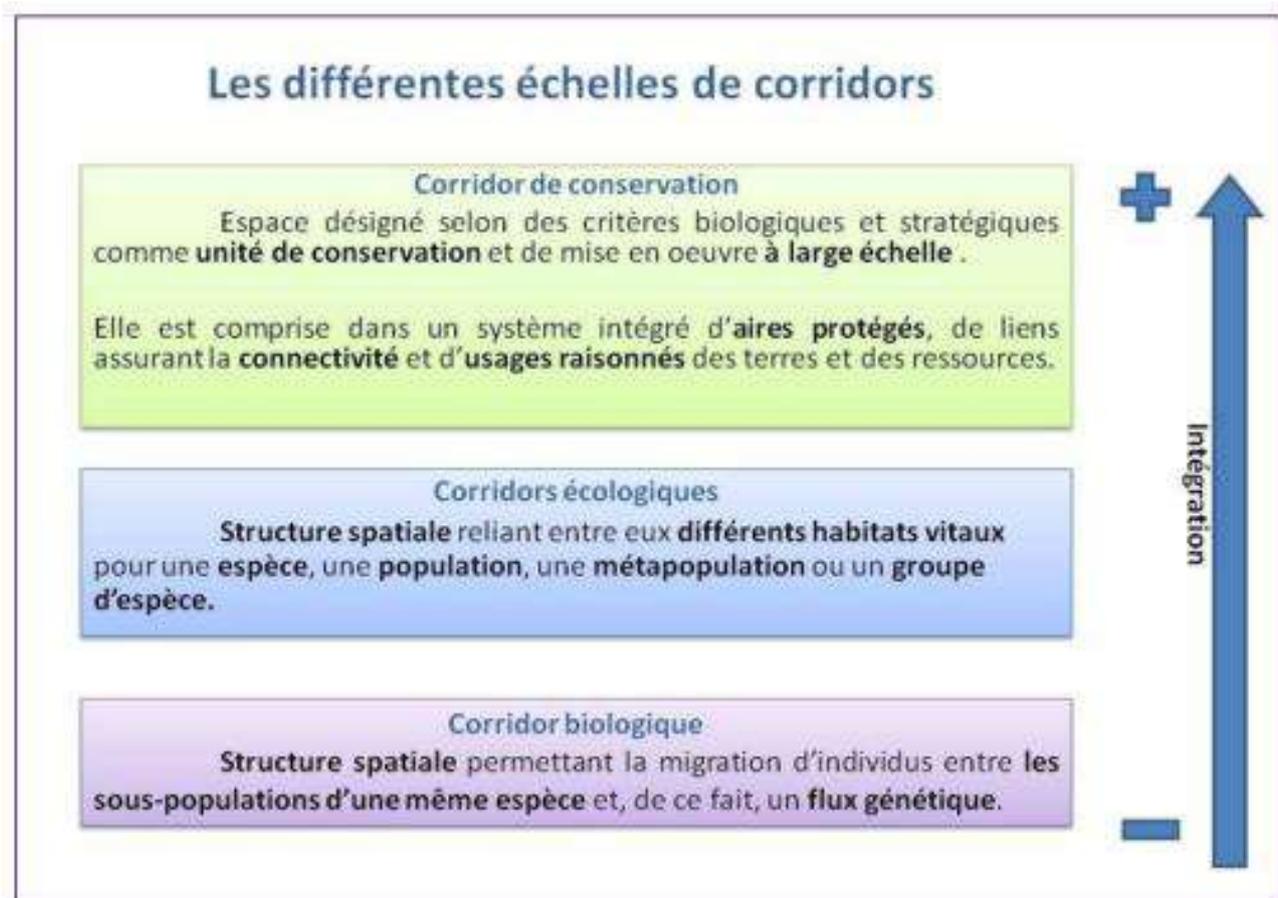


Figure 6 : Diagramme des différentes échelles de corridors (Rios J. & Lefeuvre J.-C., 2011)

Les concepts de connectivités et de continuités au sein d'un paysage sont à relier à celui de corridor. Le corridor constitue un milieu existant physiquement, connectant fonctionnellement et structurellement deux habitats naturels. Un corridor est propice au déplacement, à la reproduction ou à l'installation des espèces étudiées. Trois échelles de corridors peuvent être identifiées, comme illustré dans la figure 6. Chaque échelle présente des différences de méthode d'approche, de type et de précision des données. Pour cette étude, nous nous plaçons à l'échelle du corridor écologique qui est la plus adaptée pour analyser les continuités entre des patches d'un même habitat fragmenté.

Il est possible d'identifier généralement trois types de corridors permettant d'assurer la continuité écologique entre les milieux (Allag-Dhuisme F. et al., 2010) :

- Les corridors linéaires, constitués en général d'un seul type d'habitat continu, tel qu'une haie, une ripisylve, etc.
- Les corridors en « pas japonais » ou « stepping stones », caractérisé par des fragments d'habitats discontinus servant de relais ou de refuges aux organismes entre deux réservoirs, par exemple un bosquet ou une mare.

- Les corridors de type paysager, formés par différents milieux intégrés dans la matrice paysagère mais assurant une connectivité pour certaines espèces.

Le réseau écologique au sein d'un paysage possède donc un niveau de cohésion, plus ou moins élevé en fonction du niveau de fragmentation et des barrières physiques entre les habitats, qui empêchent la migration des espèces et la dispersion des diaspores. Il est indispensable de prendre en compte le réseau dans son ensemble si l'on souhaite agir dans l'optique d'enrayer la chute d'effectifs d'une espèce, de restaurer un habitat, ou dans le cas de la forêt sèche calédonienne, d'empêcher sa disparition.

# Partie II : Méthodologie et résultats

---

## I. Périmètre d'étude

### 1. Couche de travail

La cartographie des forêts sèches calédoniennes sous SIG a été réalisée entre 2002 et 2004 au lancement du PCFS. La première version de la couche shape comportait 519 polygones pour une surface de forêt sèche de 7 488 ha. Aujourd'hui, suite à la dernière révision en 2016, elle compte 753 polygones (dont 3 non validés) pour 17 491 ha. A cause des difficultés d'accès, ou du manque de prospection sur le terrain, la cartographie actuelle des forêts sèches n'est pour l'heure pas exhaustive. Le nombre de polygones et la surface sont encore susceptibles d'évoluer au fil du temps, au gré des découvertes et des études de terrain. Une réactualisation régulière sur un pas de temps défini est donc nécessaire pour une protection efficace. De plus, la validité de 445 polygones reste encore à vérifier sur le terrain.

Deux couches au format shape ont été diffusées par le CEN en 2016 :

- La couche « gestionnaire », destinée exclusivement aux acteurs de l'environnement travaillant sur la préservation de cet habitat, et comportant en attributs l'ensemble des informations disponibles. C'est cette couche qui est utilisée pour toutes les manipulations sous SIG de la présente étude.
- La couche « publique », version épurée de la couche « gestionnaire », avec les informations essentielles en attributs, et destinée à être diffusée au public par le biais de la plate-forme cartographique Georep de la DTSL.

Le contenu de la table attributaire de la couche gestionnaire est disponible en annexe 1.

Une zone tampon de 50m et une autre de 200m ont été créées autour de chacun des patches et intégrées sous forme d'attributs. Elles sont nommées « Zones de vigilance » et permettent d'améliorer la protection des patches en attirant l'attention sur l'importance de l'effet lisière en zone forestière. Il est important de préciser que l'ambition du PCFS n'est pas seulement de stopper la réduction continue de la surface de forêt sclérophylle, mais aussi d'inverser la tendance en offrant la possibilité aux plantes typiques de cette formation de se régénérer et de recoloniser des milieux dégradés présentant une potentialité d'évolution vers de la forêt sèche.

**Encadré 1 :**Correction de la couche :

Certains patches de forêt sèche ont une limite commune, soit par erreur (un tel travail de digitalisation étant extrêmement fastidieux) ou volontairement afin de différencier deux forêts nommées différemment. Afin de faciliter les analyses et éviter les erreurs dans les calculs d'indices, les polygones concernés ont été fusionnés (fig. 7). La couche corrigée ne comprend donc plus que 725 polygones.

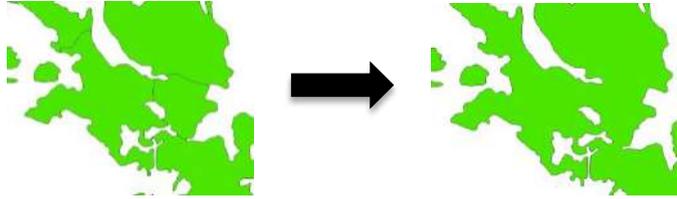


Figure 7 : Fusion des entités comportant une frontière commune

## 2. Délimitation des unités paysagères (UPF)

Le premier travail de délimitation des unités paysagères a été réalisé en 2005 par Matthews K. Cette analyse a permis de distinguer trois grands agrégats de forêts sèches et 15 unités paysagères regroupant l'ensemble des patches. Les contours de ces UPF ont été tracés en tenant compte de critères paysagers naturels et urbains expliqués en détail dans (Matthews K., 2005). En 2012, une nouvelle délimitation des UPF a été réalisée après révision des critères, et 10 UPF ont été retenues (Grange B., 2012). Les trois critères principaux utilisés pour délimiter les UPF sont l'altitude, la pluviométrie moyenne annuelle et la surface géologique. Ces trois critères rassemblés permettent de représenter l'état initial théorique de la forêt sèche avant l'arrivée de l'homme sur l'archipel. Cet état initial peut être assimilé à l'expansion potentielle de la forêt sèche. Les contours des UPF ont ensuite été affinés en tenant compte de l'éloignement des patches, des cours d'eau pouvant constituer un obstacle, de l'occupation du sol et des limites communales.

Pour cette étude, les contours des UPF tracés par (Grange B., 2012) seront redessinés et réutilisés dans un souci de cohérence et d'échelle pour les représentations cartographiques. Deux opérations ont été menées pour mettre à jour cette délimitation :

### a) Actualisation de la carte d'expansion potentielle de forêt sèche

Les critères utilisés en 2012 ont aujourd'hui évolué : l'altitude prise en compte par Grange était de 350m (basé sur la littérature). Une nouvelle carte est donc réalisée et permettra d'actualiser les contours des UPF avec les nouvelles valeurs pour ces critères.

- L'altitude : la valeur limite d'altitude figurant actuellement dans le Code de l'Environnement de la Province Sud est de 500 mètres.

- La pluviométrie annuelle moyenne : selon le Code de l'Environnement de la Province Sud, la valeur maximale permettant la formation d'une forêt sèche est de 1500 mm par an.
- La géologie : la Grande Terre, notamment sa région Sud, comporte de nombreux gisements de nickel qui ont commencé à être exploités il y a peu. L'importante quantité de ce métal dans le sol, ainsi que d'autres métaux souvent convoités (cobalt, or, manganèse, etc.) est due à la dégradation de roches magmatiques (péridotites, serpentinite, basalte), entraînant la formation de sols riches dit ultramafiques. Ces sols sont hostiles au développement de la forêt sèche. Ils sont donc soustraits à l'analyse.

L'utilisation de la calculatrice raster permet d'obtenir la carte suivante. Les manipulations informatiques réalisées sous SIG sont détaillées en annexe 2.

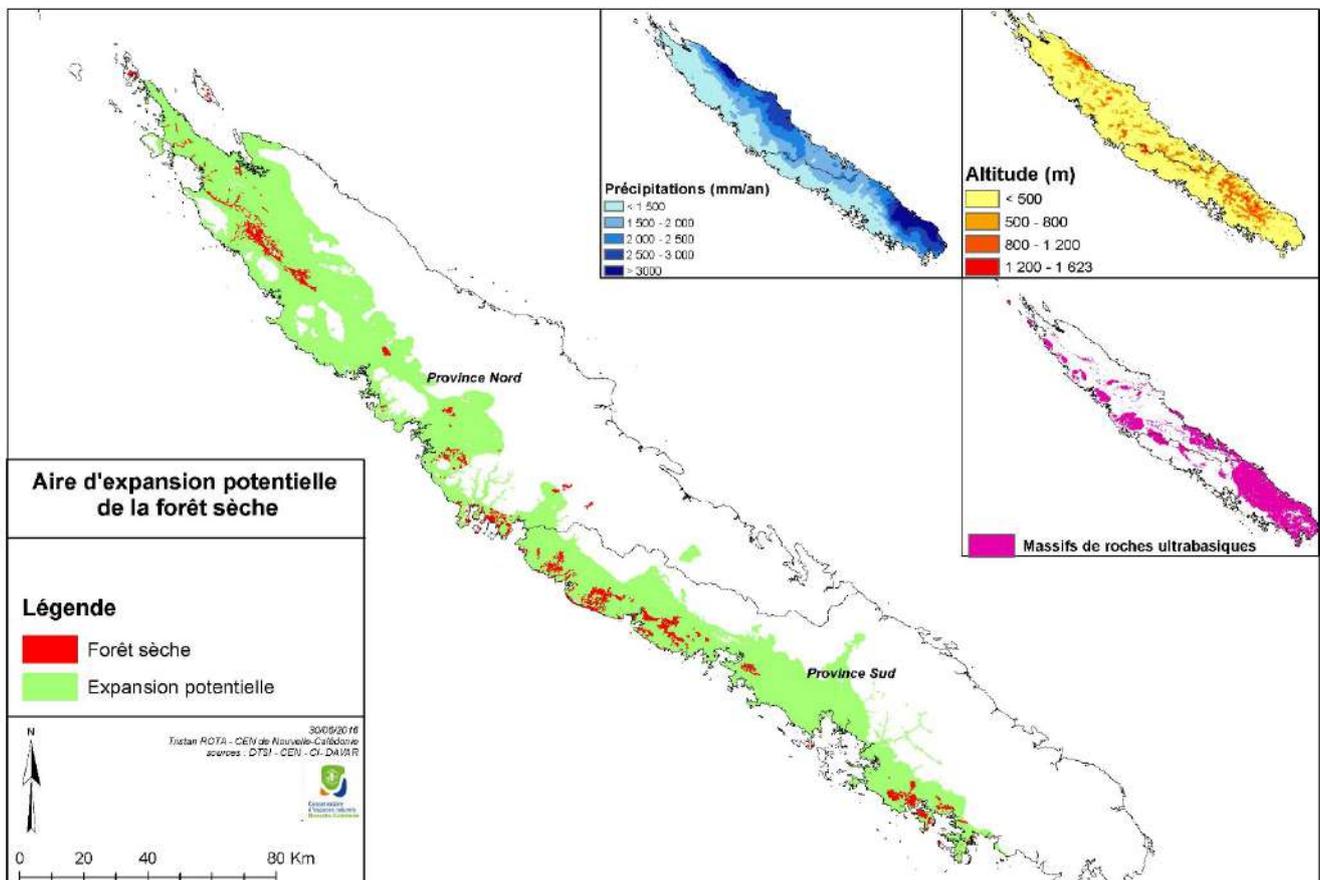


Figure 8 : Carte d'expansion potentielle de la forêt sèche en Nouvelle-Calédonie

Cette représentation cartographique (fig. 8) fait état de la répartition initiale probable de la forêt sèche en Nouvelle-Calédonie, c'est-à-dire avant l'arrivée de l'homme il y a environ 4000 ans, en supposant les conditions climatiques identiques à celles d'aujourd'hui. La côte Ouest était alors quasiment entièrement recouverte par cette formation à son stade climacique, excepté dans le Grand-Sud où les sols ultramafiques prédominent. Les fortes précipitations amenées par les alizés

du Sud-Est et arrosant la côte Est tout au long de l'année, ne permettent pas le développement de forêt sèche. La transition paysagère est très marquée en ce qui concerne la végétation d'une côte à l'autre, avec une large prédominance de la forêt humides sempervirente à l'Est, plus dense et luxuriante. Les fragments actuels de forêt sèche sont pour la quasi-totalité situés au sein de la zone d'expansion potentielle.

L'ensemble des cartes réalisées pour cette étude se trouve en annexe 10 pour une meilleure visibilité.

### b) Nouvelle délimitation des UPF

L'analyse de Grange B. a permis de délimiter 10 UPF. Or, il s'est avéré que depuis la révision de la couche SIG en 2016, certains patchs nouvellement digitalisés se trouvèrent en dehors de ces zones. Les UPF ont donc été redessinées afin d'intégrer ces fragments dans l'analyse. Les anciennes UPF 8, 9 et 10 ont été fusionnées en une seule, de même pour les UPF 3,4,5 et 6. Les UPF 1 et 2 ont aussi subit le même traitement. Ensuite, 3 nouvelles UPF ont été dessinées (UPF 2, 4 et 6 sur la fig. 9) afin d'intégrer des patchs qui n'étaient pas encore répertoriés en 2012. Les contours de toutes les nouvelles UPF (7 en tout) ont enfin été redécoupés avec la couche d'expansion potentielle de la forêt sèche afin de conserver une cohérence avec les précédentes, excepté pour l'UPF 4 qui rassemble des patchs situés en dehors de la zone d'expansion.

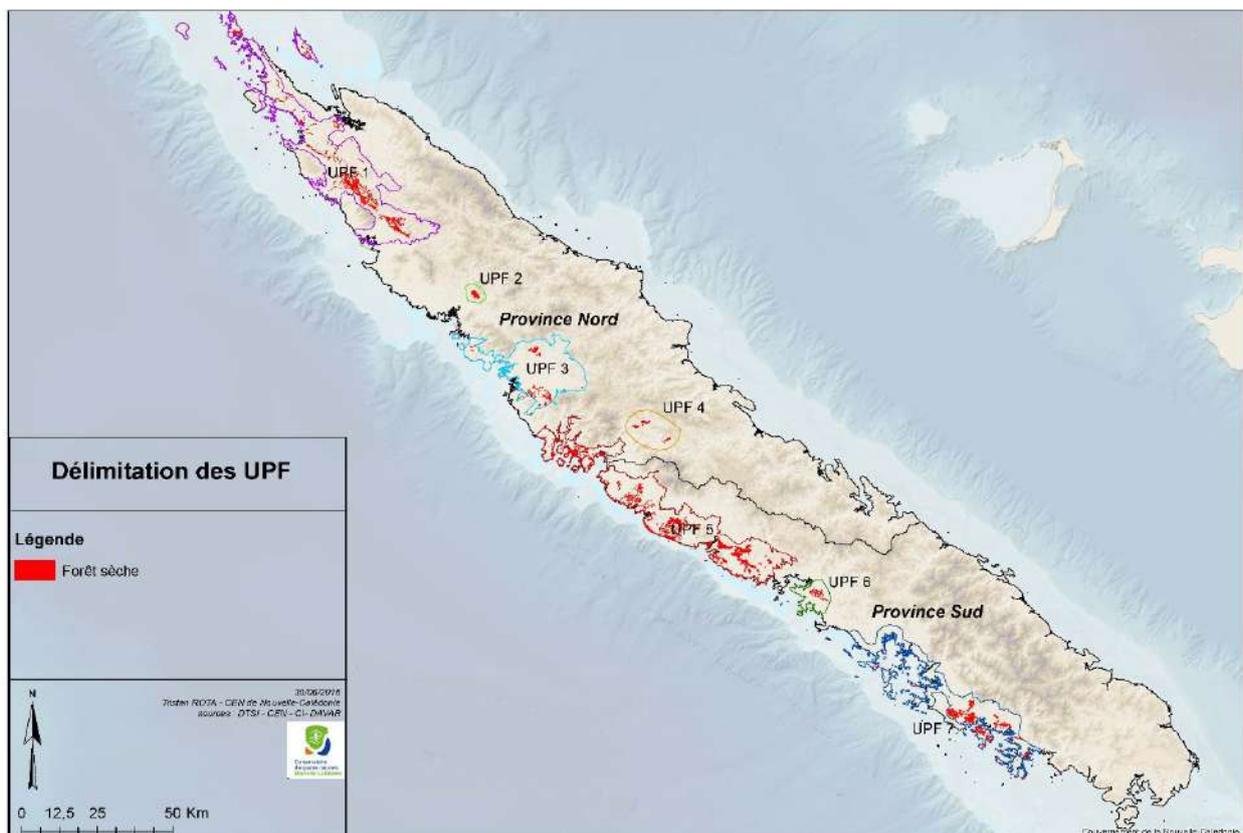


Figure 9 : Carte des contours des UPF utilisés pour l'étude

Il n'a pas été jugé nécessaire d'affiner les limites en reprenant les critères secondaires utilisés par Grange. Dans le cadre de cette étude, le découpage en UPF permet avant tout de réduire l'échelle des représentations cartographiques, et d'empêcher la délimitation de corridors potentiels aberrants car situés entre des patches trop éloignés.

### c) Caractéristiques des UPF

UPF	Surface (ha)	Nombre de patches de FS	Surface de FS (ha)
UPF 1	92 914	226	4 564
UPF 2	3 161	1	364
UPF 3	48 641	62	987
UPF 4	17 034	6	392
UPF 5	84 787	288	7 885
UPF 6	8 608	20	327
UPF 7	51 660	123	2 972
<b>TOTAL</b>	<b>306 805</b>	<b>726</b>	<b>17 491</b>

Tableau 2 : Tableau des caractéristiques générales des UPF

Les UPF sont numérotées du Nord au Sud, l'UPF 1 étant la plus au Nord, et l'UPF 7 la plus au Sud. L'UPF 1 est la plus étendue et couvre toute la pointe Nord de la Grande Terre. L'UPF 2 ne contient qu'un seul fragment de forêt sèche. Il a été convenu de créer une UPF à part entière pour ce patch car celui-ci est particulièrement isolé (14 km de son plus proche voisin) mais c'est aussi le septième patch en termes de surface avec 364 ha. L'UPF 5 (fig. 10) est celle qui contient le plus grand nombre de fragments (288) et qui comprend la plus grande surface de forêt sèche. Cette UPF servira d'exemple pour la majorité des analyses de la présente étude. Ce choix a été fait car elle comprend les zones de Pindaï-Nekoro et Gouaro-Deva, qui contiennent toute deux des sites prioritaires de conservation de la forêt sèche préalablement définis par le CEN, et où des actions de mise en défens et de replantation ont déjà été effectuées (Bilan général du PCFS Oréade-Brèche 2012). Toutes les manipulations sous SIG ont été réalisées pour l'ensemble des UPF. Le tableau 2 récapitule les principales

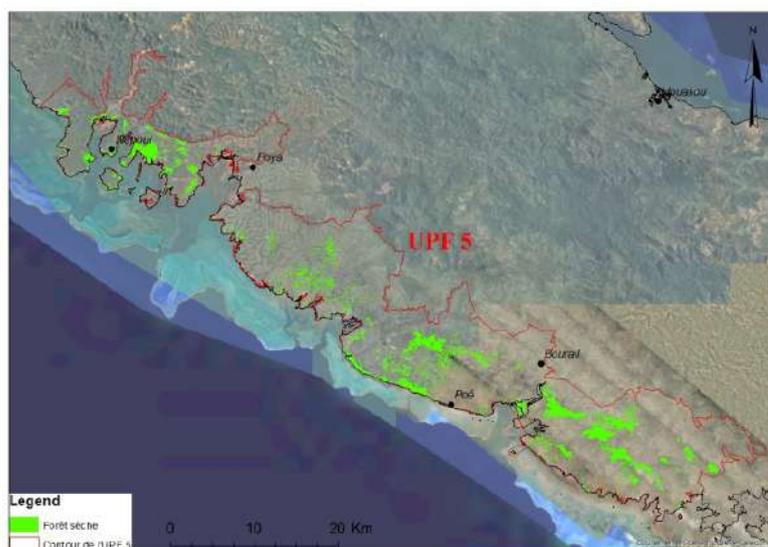


Figure 10 : Forêt sèche au sein de l'UPF 5

caractéristiques des UPF.

L'occupation des sols pour chaque UPF ainsi que la part de chaque type de couverture dans cette occupation sont disponibles en annexe 3. La Savane est le type de couvert dominant sur toute les UPF (à l'exception de l'UPF 2) et peut recouvrir jusqu'à 67% des sols sur l'UPF 1.

## II. Etude de la vulnérabilité des patches

La vulnérabilité d'une forêt peut-être évaluée de plusieurs manières, et de nombreux facteurs ont une influence sur celle-ci. Cette vulnérabilité peut-être intrinsèque, dans le cas d'une forêt exposée aux ravageurs ou au risque incendie par exemple. Elle peut aussi être liée à la fragmentation du paysage qui entraîne l'isolement des fragments forestiers. Le manque d'échange entre les populations des patches isolés réduit les possibilités de régénération et expose les forêts de petite taille à un important effet lisière et au fléau des espèces envahissantes. Déterminer la qualité écologique d'une forêt selon différents critères pourrait permettre de déduire sa vulnérabilité. Des outils pour mesurer cette qualité forestière sont développés depuis les années 2000 et se sont révélés efficaces, notamment l'Indice de Biodiversité Potentielle qui permet de rendre compte rapidement de l'état d'une forêt directement sur le terrain (Larrieu L. & Gonin P., 2008). Pourtant, ce type d'analyse appliqué au contexte des forêts sèches, nécessiterait de prospecter chaque fragment pour être exhaustif, ce qui n'est pas encore possible à l'heure actuelle. La première partie de l'étude proposée ici vise donc à déterminer la vulnérabilité des patches en se basant sur la répartition des fragments dans le paysage, leur isolement, leur forme et leur surface.

### 1. Analyse des distances

#### a) **Distance au plus proche voisin (Euclidian Nearest Neighbor :ENN)**

L'analyse des distances au plus proche voisin permet de rendre compte efficacement de l'isolation physique des patches. En effet, une faible distance entre les fragments de forêt similaires facilite les flux génétiques entre eux, et implique une plus grande probabilité de dispersion des diaspores par les animaux disperseurs, ou par le vent dans le cas des espèces anémochores.

Pour chaque UPF, la distance ENN entre les patches est mesurée directement via le logiciel ArcMap 10.3. Le modèle SIG décrivant les étapes de calcul et aboutissant à une représentation cartographique est détaillé en annexe 2.

*Les résultats présentés concernent les distances bord à bord des fragments, et non pas les distances d'un centroïde à l'autre.*

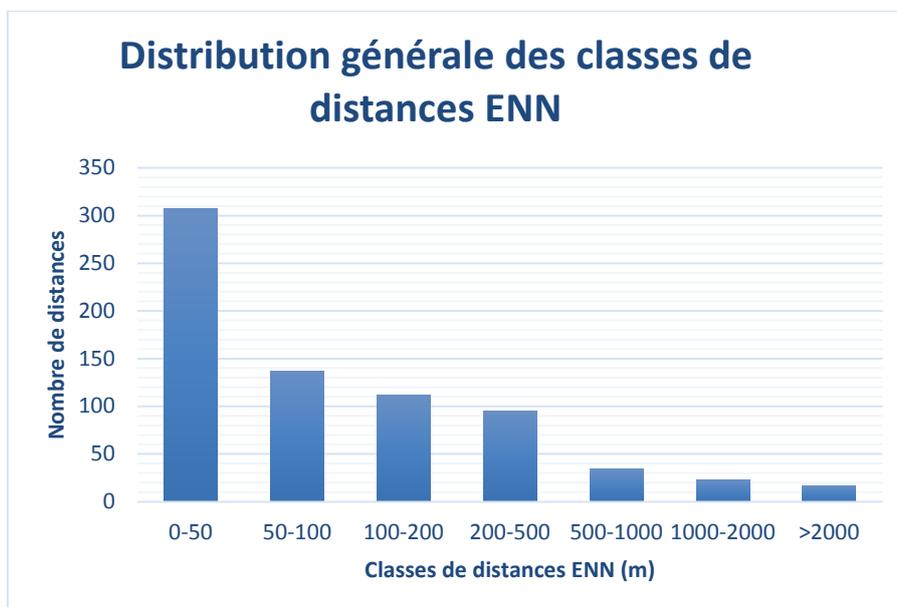


Figure 11 : Histogramme de distribution des distances ENN par classe toutes UPF réunies

La distribution des distances ENN par classe donne une première information sur le degré d'isolement général des fragments dans le paysage.

	Nombre de patchs	Distance ENN moyenne (m)	Ecart-type des distances
<b>UPF 1</b>	226	153	294
<b>UPF 3</b>	62	350	1168
<b>UPF 4</b>	6	1534	2688
<b>UPF 5</b>	288	169	328
<b>UPF 6</b>	20	90	48
<b>UPF 7</b>	123	193	402
<b>Total</b>	<b>725</b>	<b>265</b>	<b>874</b>

Tableau 3 : Tableau des distances ENN moyennes et des écarts-types associés pour chaque UPF. Le "Total" pour les colonnes distance ENN et écart-type correspond aux moyennes générales pour toute les UPF

Les distances ENN moyennes par UPF figurent dans le tableau 3. Sur l'ensemble des fragments de forêt sèche, 57,7% sont à plus de 50m de leur plus proche voisin, et 5,5% sont à une distance de plus de 1000m. Le nombre de fragment en fonction de la distance est strictement décroissant (fig. 11). En moyenne, les fragments de forêt sont situés à 265m de leur plus proche voisin. L'UPF 4 contient une forêt sèche très « éclatée », avec une distance ENN moyenne de 1534m, à noter que l'écart-type d'une valeur de 2688 laisse penser que certains patchs sont proches tandis que d'autres sont complètement isolés. On remarquera sur cette unité la présence d'un fragment important en termes de surface (82ha), situé à plus de 8 kilomètres du fragment le plus proche. Un tel éloignement rend difficile et coûteuse une reconnexion de ce fragment par le biais de corridors écologiques. Afin d'en assurer la pérennité, il n'y a d'autre choix qu'une protection totale et un « renforcement » des patchs très isolés par enrichissement.

## b) Délimitation de grands ensembles via les polygones de Voronoï

Nous avons utilisé le logiciel Graphab 2.0.1 (Foltête J.C., Clauzel C., Vuidel G., 2012) pour représenter la zone d'influence des fragments par la décomposition de Voronoï pour un seuil de distance préalablement défini.

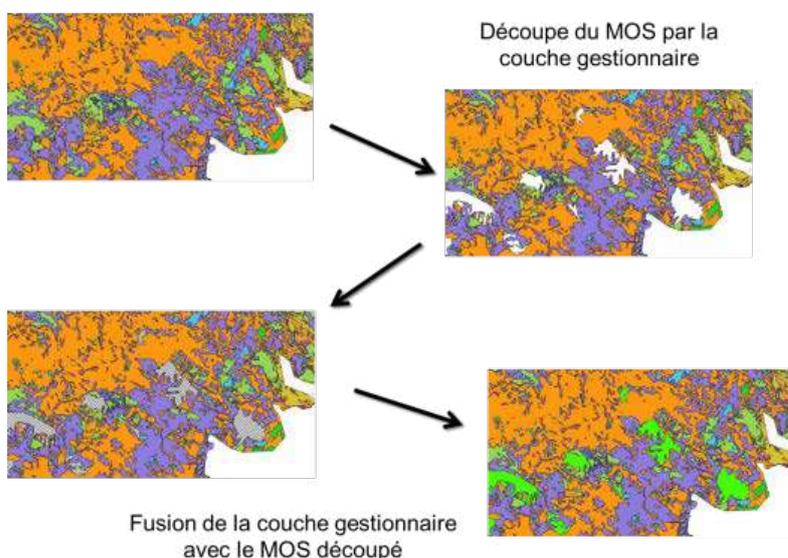
Le seuil de distance choisi est égal à la moyenne des distances ENN calculée pour tous les fragments de forêt, soit 265m.

Encadré 2 :

### Préparation de la couche de travail pour implémentation dans Graphab 2.0.1 :

Toutes les analyses sur Graphab ont été réalisées à partir du même type de fichier raster (format Geotiff). Un fichier raster a été créé de manière similaire pour chaque UPF. Celui-ci contient le Mode d'Occupation des Sols (MOS) auquel a été intégrée la couche gestionnaire. Une valeur unique a été ensuite attribuée par reclassement aux pixels représentant la même classe de MOS (dont les forêts sèches).

- Intégration des forêts sèches dans le MOS (fig. 12) :



**Figure 12 : Schéma des étapes d'intégration de la couche gestionnaire dans le MOS**

Le Mode d'Occupation des Sols au format shape utilisé pour toutes les manipulations de la présente étude est celui réalisé par la DTSI en 2008 (taille du pixel : 10mx10m) et disponible gratuitement sur le portail web-SIG du gouvernement de Nouvelle-Calédonie : <http://www.georep.nc/>. Les forêts-sèches n'étant pas représentées dans cette couche, il était nécessaire de les intégrer par découpage puis fusion des couches (annexe 2 - modèle SIG-)

Dans l'UPF 5, c'est sur la zone de Pindaï-Nékoro que le diagramme de Voronoï est le plus divisé (fig. 13), confirmant que la forêt sèche sur ce site est particulièrement fragmentée et dispersée. Au centre de l'UPF, le site de Gouaro-Deva est entièrement contenu dans un seul polygone, pouvant refléter une dispersion moins importante des fragments. L'analyse complémentaire de forme des fragments qui suit est pourtant nécessaire pour caractériser plus précisément le degré de fragmentation de ce site

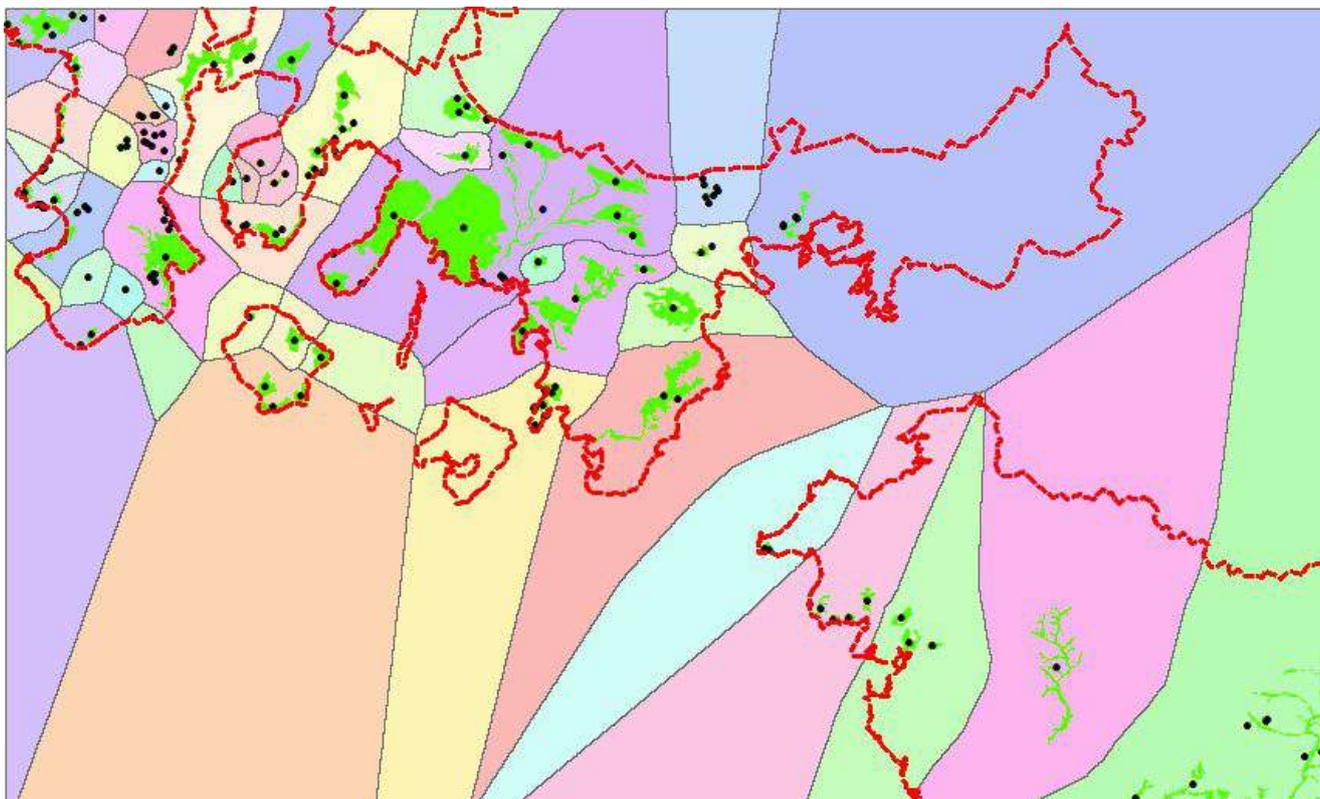


Figure 13 : Diagramme de Voronoï appliqué à la couche forêt sèche sur la zone Pindaï-Nékoro : chaque cellule (surface colorée) représente la « zone d'influence » d'un germe (point noir).

## 2. Analyse de proximité via l'indice PROX

<b>(P18) Proximity Index</b>	
$\text{PROX} = \sum_{s=1}^n \frac{a_{ijs}}{h_{ijs}^2}$	$a_{ijs}$ = area (m <sup>2</sup> ) of patch $ij$ s within specified neighborhood (m) of patch $ij$ . $h_{ijs}$ = distance (m) between patch $ij$ s and patch $ij$ s, based on patch edge-to-edge distance, computed from cell center to cell center.
<i>Description</i>	PROX equals the sum of patch area (m <sup>2</sup> ) divided by the nearest edge-to-edge distance squared (m <sup>2</sup> ) between the patch and the focal patch of all patches of the corresponding patch type whose edges are within a specified distance (m) of the focal patch. Note, when the search buffer extends beyond the landscape boundary, only patches contained within the landscape are considered in the computations. In addition, note that the edge-to-edge distances are from cell center to cell center.
<i>Units</i>	None
<i>Range</i>	PROX ≥ 0.  PROX = 0 if a patch has no neighbors of the same patch type within the specified search radius. PROX increases as the neighborhood (defined by the specified search radius) is increasingly occupied by patches of the same type and as those patches become closer and more contiguous (or less fragmented) in distribution. The upper limit of PROX is affected by the search radius and the minimum distance between patches.
<i>Comments</i>	<i>Proximity index</i> was developed by Gustafson and Parker (1992) and considers the size and proximity of all patches whose edges are within a specified search radius of the focal patch. Note that FRAGSTATS uses the distance between the focal patch and each of the other patches within the search radius, similar to the isolation index of Whitcomb et al. (1981), rather than the nearest-neighbor distance of each patch within the search radius (which could be to a patch other than the focal patch), as in Gustafson and Parker (1992). The index is dimensionless (i.e., has no units) and therefore the absolute value of the index has little interpretive value; instead it is used as a comparative index.

Figure 14 : Caractéristiques complètes de l'indice PROX

PROX (Gustafson J.E. & Parker R.G., 1994) est un indice permettant de caractériser la vulnérabilité d'un fragment en lien avec son isolation dans le paysage, en analysant la configuration spatiale dans laquelle il se trouve. Le calcul prend en compte la surface des fragments d'habitat de même type environnant un fragment donné, au sein d'un rayon défini par l'utilisateur, et la distance euclidienne de ce fragment par rapport aux mêmes fragments environnants (fig 14).

Ainsi, l'indice pour un patch donné sera d'autant plus élevé que le paysage autour de ce patch est occupé par une formation végétale similaire. L'indice d'un patch n'ayant aucun voisin dans le rayon défini au préalable sera nul. Pour cette analyse, nous avons utilisé le logiciel Fragstats 4.2.1 (McGarigal K. et al., 2012). Les captures d'écran résumant le paramétrage du logiciel pour cette analyse sont visibles en annexe 2..

La valeur seuil choisie est de 1000m. Nous considérons cette valeur comme la distance limite permettant une connexion même infime entre les patchs. Le choix d'une valeur assez élevée facilite aussi la visualisation en réduisant le nombre de valeurs égales à 0 et permet de déterminer aisément des classes de couleurs pour plusieurs intervalles de valeurs. Les calculs ont aussi été effectués pour une valeur seuil de 500m, mais les valeurs restent très similaires à celles obtenues pour un seuil de 1000 m.

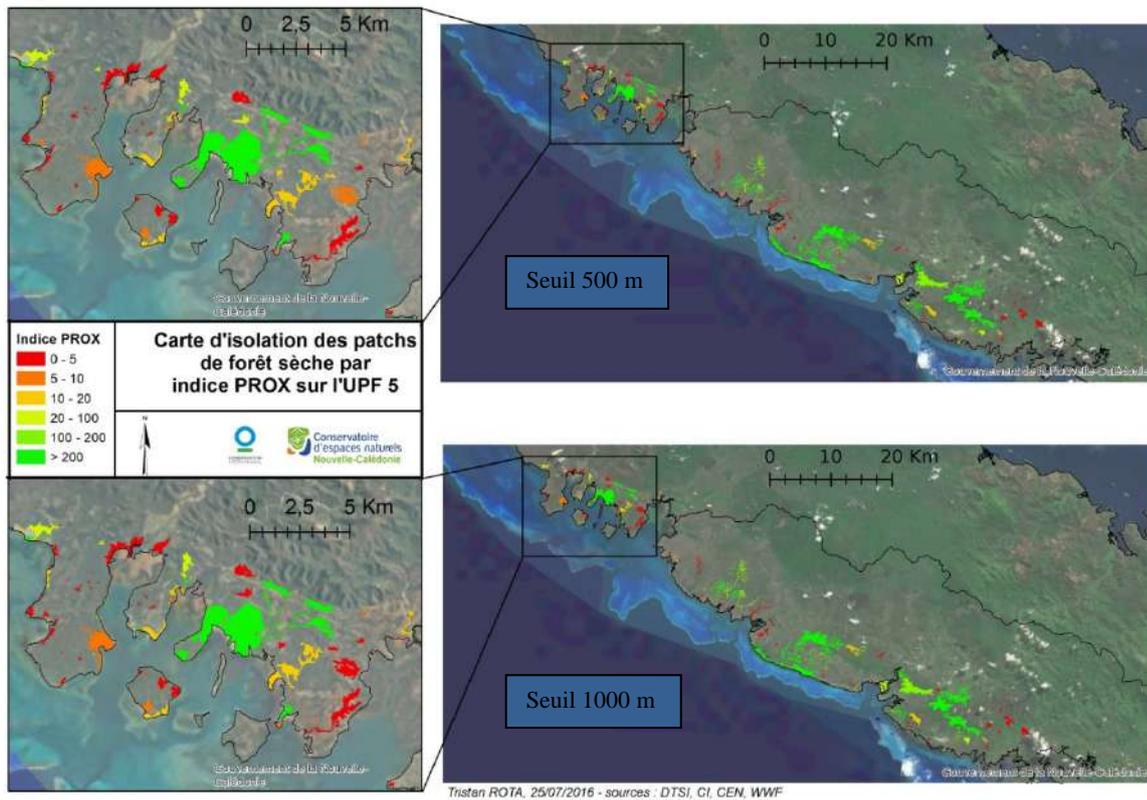


Figure 15 : Carte d'isolation des patchs de forêt sèche par indice PROX sur l'UPF 5

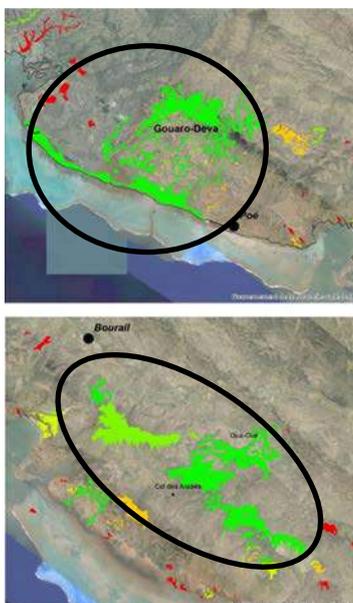


Figure 16 : Exemple de grands ensembles forestiers mis en évidence par l'analyse via l'indice PROX

Les cartes obtenues sont très similaires, la distance seuil n'a à priori que très peu d'influence sur l'indice PROX obtenu. Cet indice permet une première discrimination des grands ensembles dont la répartition spatiale des fragments présente une certaine cohésion (fig. 16). Il permet aussi, tout comme l'indice ENN, de mettre en lumière les patchs vulnérables du fait de l'importante distance qui les sépare de leur plus proche voisin, mais apporte une information supplémentaire en prenant en compte l'environnement direct du fragment considéré. Un fragment situé au sein d'une zone présentant un faible couvert de forêt sèche sera considéré comme vulnérable, même si son plus proche voisin est à une petite distance. De ce fait, un patch de faible surface apparaîtra en rouge sur les figures 15 et 16. Au

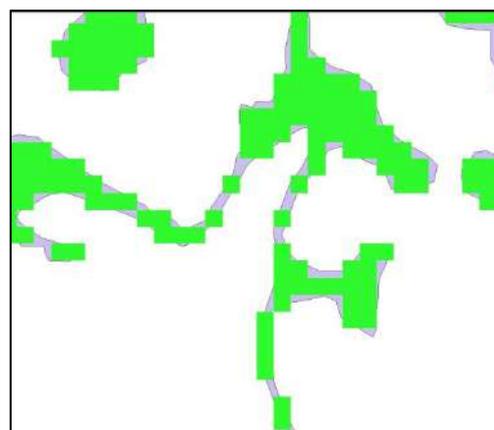
contraire, un patch de surface similaire mais entouré cette fois de larges fragments apparaîtra en vert. En outre l'indice PROX est difficilement interprétable de manière absolu, mais est efficace pour déterminer la vulnérabilité des fragments d'habitat relativement aux autres.

Cet indice présente la lacune de ne pas prendre en compte la forme des fragments, qui est un critère important pour caractériser un paysage. Il est donc important d'être attentif lors de son interprétation, et de croiser cette analyse avec une analyse de forme des fragments afin d'éviter tout mauvais jugement.

#### Encadré 2 :

Le calcul de l'indice PROX est effectué par le logiciel Fragstats pour chaque patch en tenant compte des patches environnant. Le fichier en entrée du logiciel doit être un raster. Nous utilisons le format Geotiff pour tous les rasters de cette étude. Celui-ci est le format standard pour une image géoréférencée et est lisible par tous les logiciels de SIG. Or la couche gestionnaire fournie par le CEN est au format vecteur shapefile. Il a donc été nécessaire de convertir cette couche au format geotiff via l'outil « rasterize » de ArcMap.

Néanmoins, la résolution du raster de sortie doit être assez grande pour éviter la création de polygones indésirables (fig. 17) faussant entièrement le calcul. Une nouvelle difficulté technique se déclare alors : le logiciel Fragstats possède une puissance de calcul limitée. Le calcul d'indices n'est pas possible si le pixel du raster « îlots » en entrée est trop fin. Il fut nécessaire de déterminer pour chaque UPF une résolution de raster située dans le juste milieu, c'est à dire suffisamment précise pour qu'aucun polygone parasite ne soit créé, mais aussi suffisamment grande pour que le poids du fichier ne dépasse pas les limites de performance du logiciel (un message d'erreur est retourné le cas échéant). Suite à plusieurs tests, la résolution optimale a été déterminée pour chaque UPF et est donnée dans le tableau 4



**Figure 17 : Problème de création de polygones aberrants suite à la rasterisation de la couche gestionnaire.** La couche violette est la couche gestionnaire, la couche verte est le raster obtenu suite à la rasterisation de la couche gestionnaire

UPF	1	3	4	5	6	7
Taille de pixel du raster (m)	15x15	10x10	10x10	7x7	5x5	7x7

**Tableau 4 : tableau récapitulatif des tailles de pixel optimales pour la rasterisation de la couche gestionnaire pour chaque UPF en vue du calcul de l'indice PROX**

### 3. Analyse de la forme des fragments par calcul de l'indice de compaction K

L'analyse de la forme des patchs, couplée à l'analyse de proximité, est capitale si l'on veut caractériser précisément la répartition spatiale des fragments, et informe sur leur vulnérabilité due à l'effet lisière.

- L'effet lisière

Ce phénomène est caractérisé en forêt par des conditions microclimatiques (notamment d'exposition au vent et au soleil) et édaphiques significativement différentes entre la bordure de la forêt et son cœur. Ces variations de caractéristiques écologiques ont été de nombreuses fois mises en évidence, et induisent des grandes différences dans les cortèges d'espèces végétales et animales, répondant à ces conditions particulières absentes en cœur de forêt (Harper K. A. et al., 2005). Par exemple, certaines espèces végétales héliophiles pourraient être présentes en lisière, mais absentes du cœur, où les conditions d'ensoleillement ne permettent pas leur développement.

Bien que difficile à mettre en évidence car c'est un phénomène diffus impossible à borner et dépendant d'innombrables facteurs intrinsèques et extrinsèques, il est nécessaire de le prendre en compte dans une étude visant un habitat forestier. Il peut en effet avoir une influence très forte sur la dynamique d'une forêt, et est d'autant plus important que le paysage est fragmenté en patchs de faibles surfaces (fig. 18)

L'effet lisière affecte de manière très importante les formations végétales forestières en Nouvelle-Calédonie, et induit une perte de biodiversité significative (Ibanez T. et al., 2016). En forêt sèche, les conséquences de l'effet lisière sont méconnues et ce dernier est particulièrement difficile à mettre en évidence, notamment parce que la totalité de la forêt sèche calédonienne est dégradé à un stade plus ou moins avancé. Cet effet est probablement moins marqué dans un milieu majoritairement semi-ouvert tel que la forêt sèche. Le gradient microclimatique est certainement moins marqué entre la lisière et le cœur qu'en forêt dense, entraînant de moindres différences dans les cortèges spécifiques.

Dans une note intitulée « Connaissances floristiques de la forêt sèche en Nouvelle-Calédonie », Tanguy Jaffré précise qu'« *il n'existe plus à ce jour, en Nouvelle-Calédonie de forêts sèches intactes, telles qu'elles pouvaient exister il y a environ 4000 ans, à l'arrivée de l'Homme sur la Grande Terre* ».

- **Forme du patch**

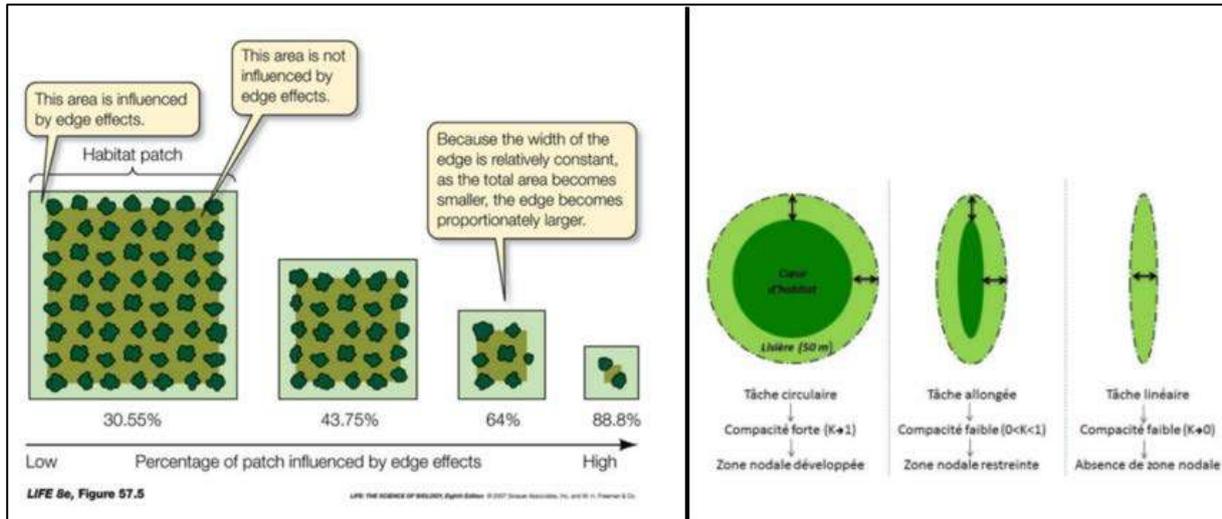


Figure 18 : Schémas explicatifs de l'effet lisière selon la taille et la forme du patch forestier

La figure 18 permet de comprendre l'influence de la taille et de la forme du patch sur la proportion de lisière dans un îlot de forêt. Plus la surface de ce dernier est faible, plus la surface de lisière sera importante en proportion. De même, un fragment allongé subira un effet lisière plus important qu'un fragment au contour circulaire, rendant la forme du patch déterminante dans cette proportion.

La caractérisation de la vulnérabilité des patches passe donc aussi par le calcul de l'indice de compaction K. La formule choisie est la même que celle utilisée lors des précédentes études, et définie par Forman G., 1995 :

$$K = (4 \cdot \pi \cdot S) / P^2$$

K tend vers 1 lorsque la forme du patch tend vers un disque. K = 1 pour un patch parfaitement circulaire (impossible en réalité) (fig. 19).

Un exemple de carte se trouve en annexe 10. Une attention particulière doit être portée aux fragments avec un faible indice de compaction, beaucoup plus vulnérables au risque d'agressions extérieures liées aux conditions climatiques et aux feux notamment. La représentation des patches selon leur indice K respectif permet de les hiérarchiser selon une vulnérabilité liée à leur forme.

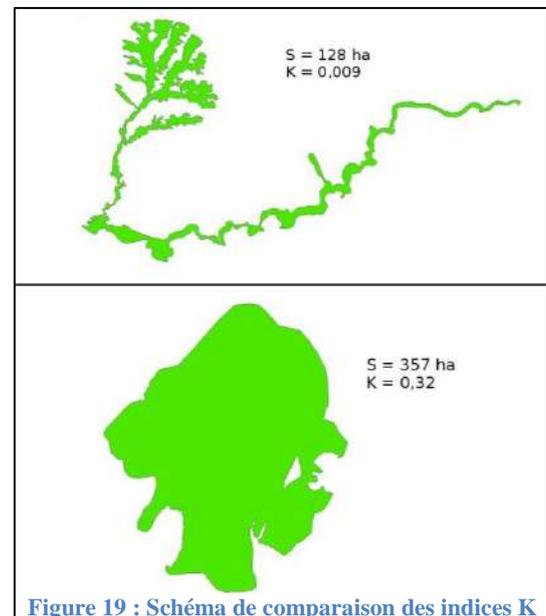


Figure 19 : Schéma de comparaison des indices K pour deux patches de forêt sèche

### III. Etude de la connectivité forestière

#### 1. Identification de la connectivité structurale à courte distance

La connectivité forestière peut être appréhendée à plusieurs échelles spatiales (fig 20) :

- à l'échelle du fragment, par sa cohésion (indice K), son état écologique ou son stade de dégradation (non analysés ici) ou de deux fragments reliés entre eux par un corridor ou intégrés dans une matrice favorable aux flux génétiques
- à l'échelle d'un ensemble de fragments potentiellement connectés par un réseau écologique
- à l'échelle d'un paysage entier (UPF)

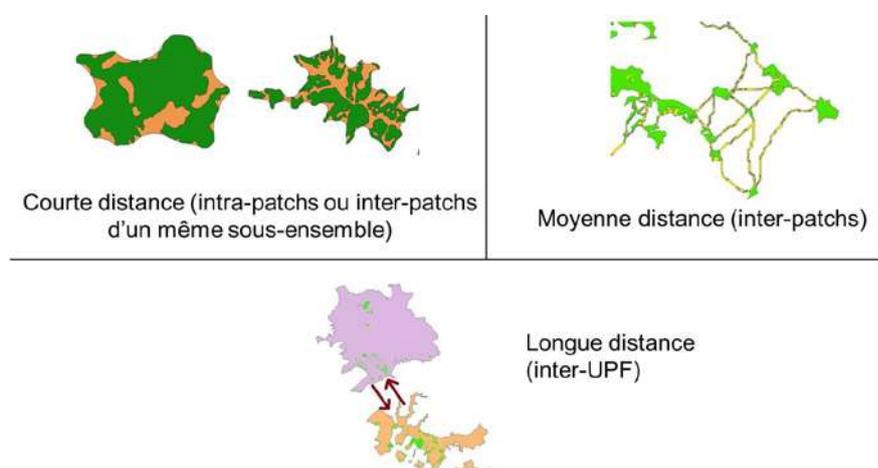


Figure 20 : Schéma des différentes échelles d'analyse des connectivités

Seules les connectivités courte et moyenne distance seront étudiés. La mise en évidence des connectivités entre les UPF demanderait une étude poussée en écologie du paysage, dépassant les bornes techniques imposées par le travail sous SIG.

Après avoir caractérisé la structure de chaque fragment, la seconde étape consiste à déterminer les connexions potentielles entre ceux-ci. Les premières connexions étudiées sont celles à courte distance par méthode de dilatation-érosion.

##### a) Méthode par dilatation-érosion

Décrite dans les guides du COMOP (Comité Opérationnel) de la trame Verte et Bleue en France métropolitaine (Allag-Dhuisme F. et al., 2010), la méthode de dilatation-érosion est une technique de SIG permettant d'identifier des agrégats de patchs et de visualiser les connexions potentielles les plus directes selon une distance définie au préalable. Nous avons déterminé deux seuils de distance pour réaliser cette analyse.

- Zones de connexions passives (100 mètres)

Il n'existe pas de norme pour la distance seuil applicable à cette méthode. Rappelons que les critères influents sur la connectivité des habitats sont extrêmement complexes, d'autant plus lorsqu'il est question d'une écorégion entière telles que la forêt sèche. Nous avons opté pour un seuil de 100m comme la limite permettant d'affirmer qu'une connexion est déjà fermement établie entre les fragments, et qu'aucune intervention de restauration n'est nécessaire.

- Zones de renforcement (200 mètres)

Le seuil de 200m met en évidence des zones de renforcement nécessitant une restauration active de l'habitat. Ce dernier seuil correspond à la moyenne des distances effectives de dispersion du pollen par les insectes pour 17 espèces d'arbres de forêts tempérées et tropicales (Ashley M.V., 2010).

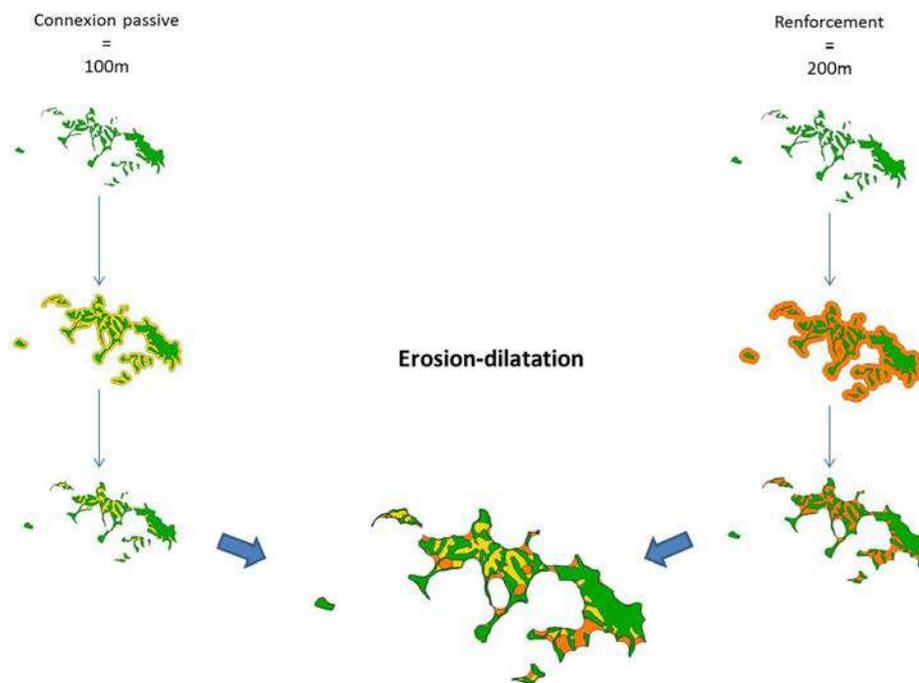


Figure 21 : Schéma descriptif de la technique de dilatation-érosion

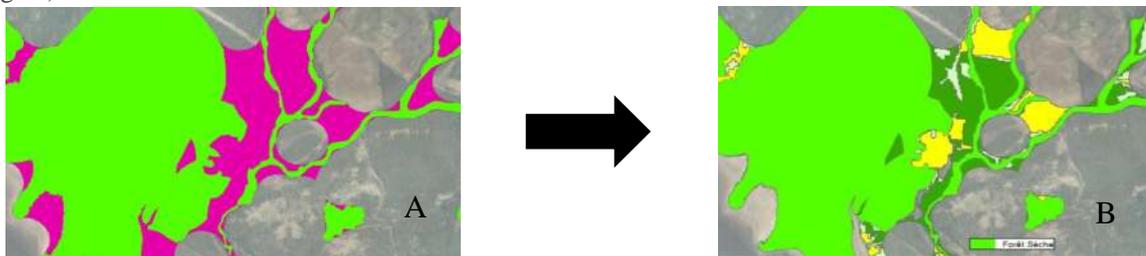
Le schéma de la figure 21 illustre la délimitation d'un continuum par dilatation-érosion. Les manipulations SIG permettant d'obtenir la couche shape de dilatation-érosion, qui ont été réalisées avec le logiciel Open Source QGIS 2.6, sont détaillées en annexe 2.

## b) Découpe du MOS

Pour mettre en évidence les connectivités structurelles à courte distance, une analyse du mode d'occupation des sols a été couplée à la dilatation-érosion, dans le but de déceler les zones propices à la restauration car susceptibles d'évoluer en forêt sèche (encadré 3).

### Encadré 3 :

Pour obtenir sous ArcGIS la couche shapefile du MOS correspondant à l'érosion-dilatation 200m, l'outil « clip » de la barre d'outils « éditeur » est utilisée. La couche en entrée est le shape du MOS et la couche de découpage est le shape « érosion 200 ». Il est donc possible de visualiser le MOS correspondant au continuum obtenu par érosion dilatation (fig 22).



2 Figure 22 : A = Continuum obtenu suite à la dilatation-érosion. B = Occupation du sol sur le continuum de dilatation-érosion

#### a) Théorie des graphes et méthode des chemins de moindre coût

L'étape suivante consiste à analyser les connectivités potentielles entre les patches éloignés de plus de 200 mètres. La méthodologie utilisée est basée sur la théorie des graphes, et notamment sur l'algorithme de Dijkstra, publié en 1959 et permettant entre autres de calculer les chemins de moindre-coût entre un point de départ et un point d'arrivée.

En écologie, l'application de cette théorie passe par l'hypothèse intuitive qu'un organisme aura plus de chance de se déplacer et de se disperser au sein d'un biotope qui lui est favorable. Cette capacité de déplacement est traduite par l'affectation d'un coût (valeur numérique) plus ou moins élevé à un habitat, selon l'affinité qu'à l'organisme (ou le groupe d'organisme) avec cet habitat, au sein duquel il pourrait évoluer. Il est donc possible de dessiner un chemin de moindre coût, qui correspondra au trajet le plus favorable entre un point A et un point B, qu'un organisme ou groupe d'organisme peut emprunter.

Cette théorie, déjà largement utilisée dans le domaine des transports ou de l'informatique, a plusieurs fois été appliquée dans l'étude des réseaux écologiques et a démontré maintes fois son efficacité et sa robustesse pour la mise en évidence des réseaux écologiques potentiels (Urban D.L. et al., 2009).

#### b) Création de la matrice et des chemins de moindre coût

La principale difficulté dans l'opération de calcul des chemins de moindre-coût réside dans les choix effectués pour l'affectation des coûts aux différentes classes d'occupation des sols. En effet Chaque espèce ayant une capacité de déplacement différente au sein d'un même habitat, cette méthode est particulièrement adaptée lorsqu'il s'agit de la protection et de la prédiction des déplacements potentiels d'une espèce particulière, mais diffère dans son application pour un habitat

entier tel que la forêt sèche, qui comprend un large cortège d'espèces animales et végétales. L'affectation des coûts ne peut donc être effectuée qu'après avoir réalisé un état des lieux des connaissances scientifiques sur le fonctionnement de la forêt sèche, suivi d'un consensus avec les différents experts.

- Sélection des zones du MOS propices à la restauration.

Les zones de MOS à conserver dans l'analyse ont été déterminées après concertation (tableau 5).

Mode d'occupation du sol	Conservé dans l'analyse
Forêt Sèche	Oui
Forêt sur substrat volcano-sédimentaire	Oui
Nuages	Oui
Savane	Oui
Sol nu sur substrat volcano-sédimentaire	Oui
Végétation arbustive sur substrat volcano-sédimentaire	Oui
Végétation éparse sur substrat volcano-sédimentaire	Oui
Zones cultivées	Oui
Zones non interprétables	Oui
Forêt sur substrat ultramafique	Oui
Eau douce	Non
Eau marine	Non
Mangrove clairsemée	Non
Mangrove dense	Non
Maquis dense paraforestier	Non
Maquis ligno-herbace	Non
Sol nu sur substrat ultramafique	Non
Tanne	Non
Végétation éparse sur substrat ultramafique	Non
Habitations	Non

Tableau 5 : Classes à conserver ou non dans l'analyse par chemins de moindre coût

Notons que les zones exclues de l'analyse le sont car une opération de restauration ne permettra pas de voir une forêt sèche se développer directement sur celles-ci. Pourtant, il est indispensable de considérer que certaines de ces zones ont une importance dans la connectivité des forêts sèches dans le sens où elles ne constituent pas d'obstacles imperméables aux flux génétiques et à la dispersion des diaspores. A titre d'exemple, aucune des 44 espèces d'oiseaux présentes en forêt sèche n'y est strictement inféodée (Barré N. et al., 2008). On en retrouve certaines dans le maquis, les forêts sur substrat ultramafique, les mangroves, etc. (*Geopelia striata*, *Trichoglossus haematodus*, *Corvus moneduloides*). De même, des espèces typiques des formations humides pourraient recoloniser par la suite des zones sclérophylles (Desmoulins F. & Barré N., 2004). Ce type de formation est donc conservé dans l'analyse. Tout comme la forêt sur substrat ultramafique qui peut constituer un « pas japonais » entre deux fragments de forêt sèche jouant donc un rôle important dans la connectivité. Ces classes peuvent être retirées à posteriori de la création des

chemins de moindre-coût pour ne pas apparaître sur les cartes représentant les corridors écologiques de moindre coût, par simple suppression dans la table attributaire. Il est néanmoins nécessaire de les conserver pour le calcul des chemins via Graphab pour éviter d’avoir des valeurs NoData dans la couche en entrée et ainsi fausser le calcul des coûts.

- Construction de la matrice de moindre coût

Au vue des lacunes de données écologiques en rapport aux fonctions des écosystèmes de forêt sèche, le choix d’affecter les coûts en termes de restauration s’est avéré être le plus aisé à mettre en œuvre. Les différents types d’occupation du sol sont donc classés selon leur capacité à être restaurés ou préservés (tableau 6), puis les chemins de moindre-coût sont dessinés entre les patches à l’aide du logiciel Graphab 2.0.1 selon le rapport distance/coût le plus faible. Notons que ce classement n’a pas de valeur scientifique, mais est pertinent pour le gestionnaire lorsque la décision de restaurer un site en particulier devra être prise.

CLASSE	Coûts de restauration
1 - Forêt sèche	1
10 - nuage	10
15 - végétation arbustive sur substrat volcano-sédimentaire	10
17 - végétation éparse sur substrat volcano-sédimentaire	10
5 - forêt sur substrat volcano-sédimentaire	10
20 - zone non interprétable	10
4 - forêt sur substrat ultramafique	15
11 - savane	20
13 - sol nu sur substrat volcano-sédimentaire	30
18 - zone cultivée	30
12 - sol nu sur substrat ultramafique	500
14 - tanne	500
16 - végétation éparse sur substrat ultramafique	500
19 - habitations	500
2 - Eau douce	500
6 - mangrove clairsemée	500
7 - mangrove dense	500
8 - maquis dense paraforestier	500
9 - maquis ligno-herbacé	500
3 - eau marine	800

Tableau 6 : Matrice des coûts de restauration pour chaque classe d’occupation du sol intégrée dans le MOS

Encadré 4 :

Les numéros affectés aux classes dans le tableau 6 sont des valeurs uniques servant à créer le raster du MOS qui sera intégré dans Graphab pour le calcul des chemins de moindre coût. Cette valeur unique est assignée par reclassification à chaque pixel du raster correspondant à une classe du MOS donnée.

Les pistes et les routes ne sont pas représentées dans le MOS utilisé pour l'étude, celle-ci sont assimilées souvent à de la savane voire à d'autres classes incohérentes. Ce défaut s'est avéré être un réel problème lors du calcul des chemins de moindre coût, qui pouvait parfois suivre un piste sur une longue distance. Ainsi, il a été nécessaire d'intégrer les pistes au MOS (fig.23 et 24) en créant un buffer de 15 mètres de part et d'autre de celles-ci, puis en les intégrant dans le MOS de la même manière que les patches de forêt sèche (voir encadré 1)

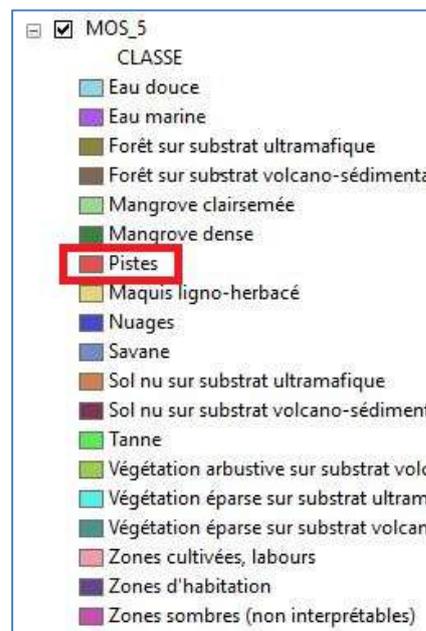


Figure 23 : Pistes intégrées à la légende du MOS



Figure 24 : Intégration des pistes dans le MOS

- Cas de la forêt sur substrat ultramafique :

La décision d'affecter une valeur de coût à 15 pour cette classe nécessita une réflexion plus poussée que pour les autres. Rappelons que la forêt sèche ne se développe sur sol à substrat ultramafique. Néanmoins ces forêts peuvent avoir une grande importance pour la connectivité des forêts sèches grâce au rôle de stepping stone qu'elles peuvent jouer pour la majorité des animaux disséminateurs. De ce fait si une forêt sur substrat ultramafique se situe entre deux fragments de forêt sèche proches, la continuité est assurée entre eux grâce à la dispersion des diaspores par la faune. Nous avons donc décidé d'affecter un coût suffisamment bas à cette classe, afin que les chemins calculés ne la contournent pas, tout en laissant ce coup légèrement plus haut que les 5 classes les plus intéressantes en termes de restauration.

- Cas des nuages et zones d'ombre :

Suite à une étude au cas par cas sur l'ensemble de ces zones (27 polygones au total dans les 10 UPF), il s'est avéré que chacune d'entre elle était incluse soit dans la classe « forêt sèche », soit

dans la classe « forêt sur substrat volcano-sédimentaire », soit dans la classe « végétation arbustive sur substrat volcano-sédimentaire ». Il conviendra donc d'assimiler les zones sombres et nuages à ces dernières classes, et leur affecter un coup similaire afin qu'elles ne soient pas contournées.

Le logiciel Graphab permet ensuite de tracer les chemins de moindre coût entre chaque patch (fig 25).

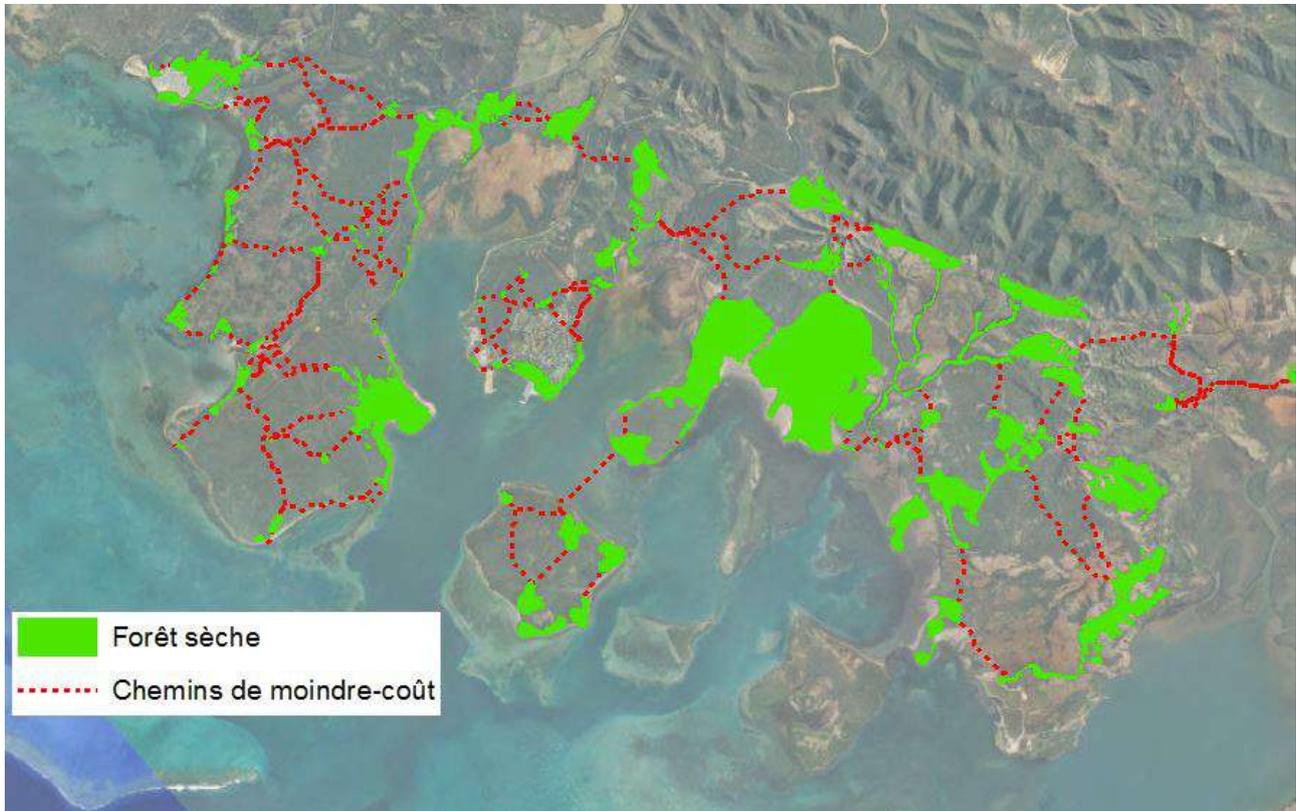


Figure 25 : Représentation des chemins de moindre-coût en termes de restauration sur la zone Pindai-Nékoro (échelle : 1:80000)

#### Encadré 5 :

- Lorsqu'aucune classe n'est disponible pour aller d'un patch à un autre (patch situé sur une île – fig. 26), le chemin sera tracé tout de même, de manière aberrante. Il n'a pas été jugé utile de supprimer un par un à la main chemins incohérents. Ceux-ci sont instantanément visibles lorsqu'une orthophotographie est appliquée en fond de carte, et n'apparaîtront pas dans le continuum de gestion final.

- Les chemins de moindre coût sont tracés sous Graphab, qui crée un fichier au format .shp de ces chemins. Ces derniers peuvent donc être exportés pour être éditables avec n'importe quel logiciel de SIG.



Figure 26 : Exemple de chemin de moindre coût aberrant

- Détermination de la largeur des corridors

Les auteurs s'accordent à dire que la probabilité de dispersion des espèces est corrélée positivement avec la largeur du corridor (Baur A. & Baur B., 1992 ; Tischendorf L. et al., 1997). Un corridor écologique doit être suffisamment large pour que les espèces animales puissent y évoluer éventuellement par étape et pour qu'il ne soit pas entièrement soumis à l'effet lisière. Pour ce modèle, nous avons décidé d'une largeur de 100 mètres pour les corridors écologiques entre les îlots.

Le corridor est modélisé en appliquant un buffer de 50 mètres de part et d'autre des chemins de moindre coût.

- Fusion des buffers et de la couche dilatation-érosion

Les buffers sont ensuite fusionnés à la couche érosion-dilatation afin d'obtenir un continuum des connectivités

- Intégration du MOS

Pour terminer, l'obtention des corridors surfaciques de moindre coût se fait après avoir créé une couche shape incluant le MOS. Cette étape permettra d'aider le gestionnaire à localiser les zones la plus propices à une intervention au sein de chacun des corridors potentiels avant une vérification terrain.

Chaque étape est illustrée en fig. 27

Cette opération est effectuée pour chacune des UPF.

La carte présentée en figure 28, permet de visualiser les connectivités potentielles globales sur le site de Pindai-Nékoro, d'après la méthode décrite précédemment. L'occupation du sol sur les continums pour chaque UPF est détaillée en annexe 4.

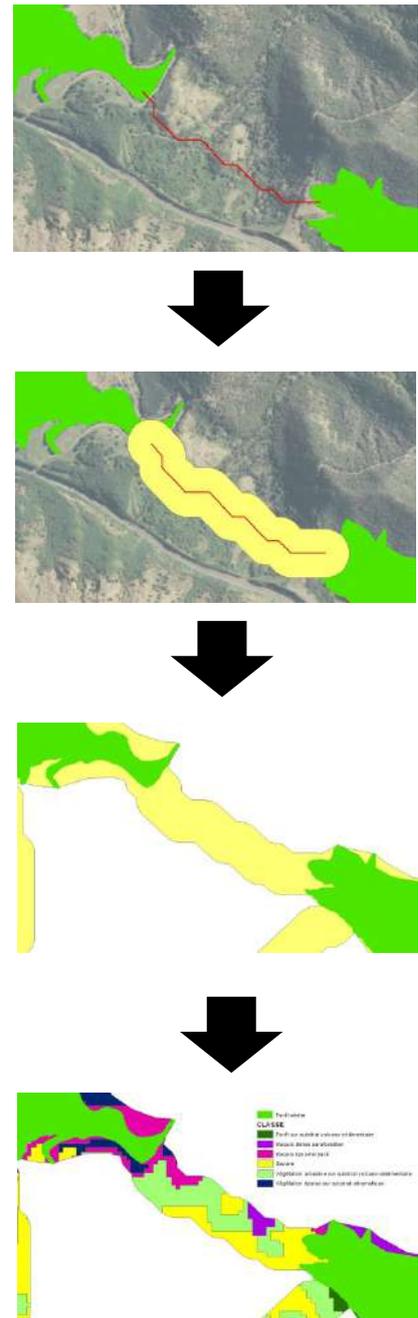
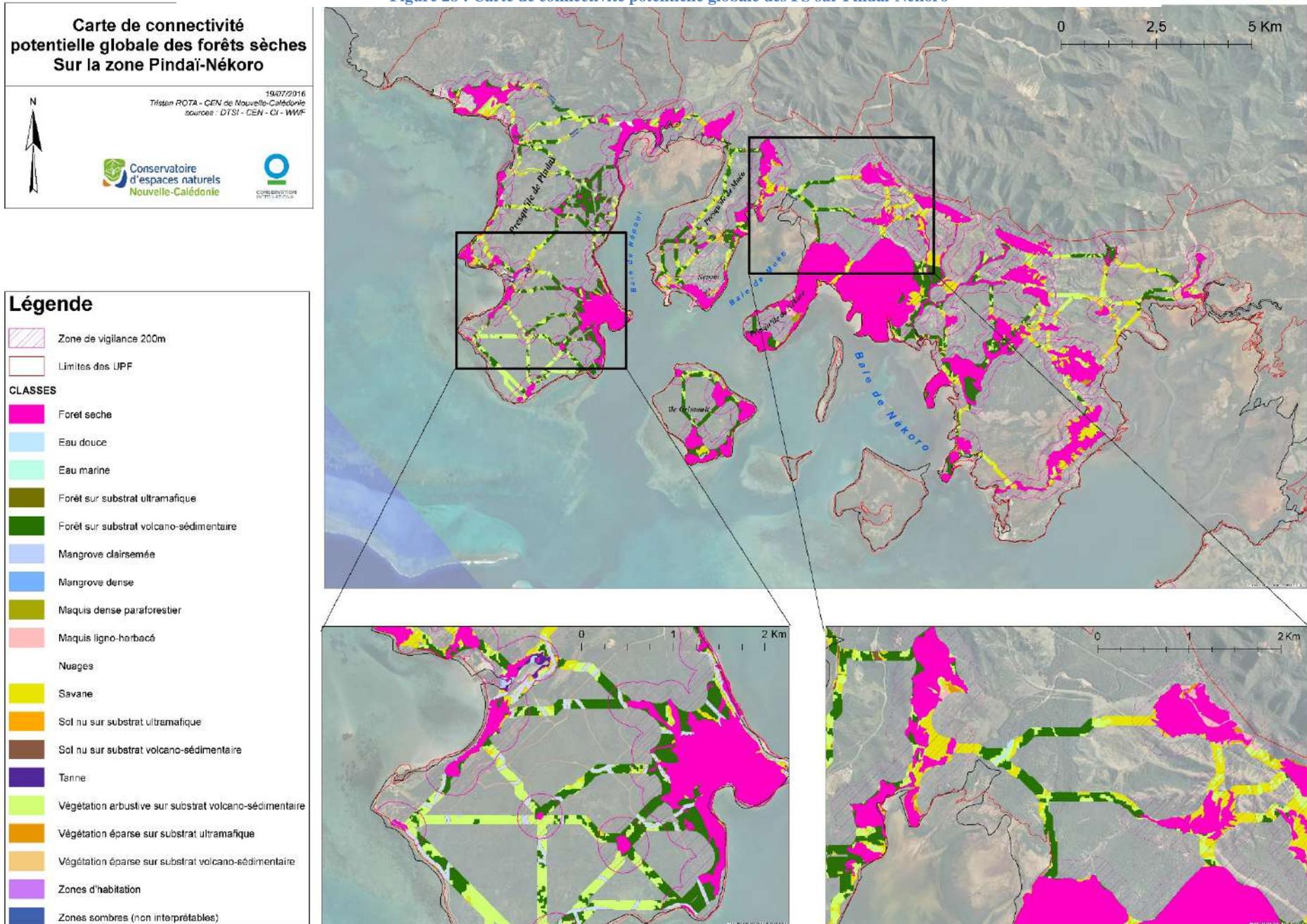


Figure 27 : Schéma récapitulant les étapes de création du continuum des connectivités

Figure 28 : Carte de connectivité potentielle globale des FS sur Pindai-Nékoro



### 3. Importance relative des patches dans la connectivité à l'échelle du paysage.

Plusieurs indices de connectivités permettent de caractériser l'importance relative d'un fragment au sein d'un paysage fragmenté. Le logiciel libre Conefor Sensinode 2.6 (Saura, S. & Torné, J. 2009) permet de calculer plusieurs de ces métriques, chacune affectant une valeur d'importance aux fragments (ou nœuds) du paysage. Les différents indices, ainsi que les articles rattachés sont listés dans Saura, S. & Torné, J., 2012. Nous avons opté pour l'indice IIC dans sa version généralisée BC\_IIC (Betweenness Centrality IIC) (Bodin, Ö. & Saura, S., 2010), présenté comme étant le plus abouti actuellement.

Selon le modèle proposé par Bodin et Saura, 2010, l'indice BC\_IIC est calculé pour chaque fragment d'habitat du paysage. Plus cet indice est élevé pour un patch, plus ce dernier tient une place importante dans la connectivité de l'habitat qu'il représente. Deux paramètres sont requis pour son calcul :

- Le centroïde des patches (localisation). Des patches similaires auront une importance très différente dans la connectivité selon leur situation dans le paysage (fig. 29)
- La distance euclidienne bord à bord au plus proche voisin entre chacun des patches.
- Une valeur de capacité pour chaque patch, qui peut être l'aire du patch ou toute autre caractéristique jugé pertinente pour le calcul du BC\_IIC (tel qu'un indice de qualité biologique par exemple).

La superficie du fragment est le paramètre d'entrée par défaut, nous avons choisi de le conserver pour le calcul du BC\_IIC. Le seuil de recherche de patch pour le calcul des distances au plus proche voisin a été défini à 1000m pour rester en cohérence avec l'indice PROX. Cette analyse a été réalisée pour chaque UPF.

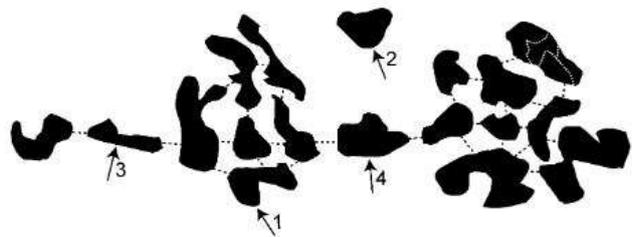


Fig. 1. A simple landscape to illustrate different types of habitat patches (as indicated by the numbered arrows) in terms of their relevance for evaluating the behavior and desirable properties of connectivity indices. Habitat patches are represented in black, and dashed black lines indicate those patches that are interconnected to some degree ( $p_{ij} > 0$ ), while the rest are not directly connected ( $p_{ij} = 0$ ). The different types of habitat patches shown here are: connected but not key stepping stone (patch 1, corresponding to property 7), isolated (patch 2, corresponding to property 8), key stepping stone (patches 3 and 4, corresponding to property 11), and a key stepping stone patch that when lost leaves most of the remaining habitat area still connected (patch 3) in comparison with a key stepping-stone patch that when lost separates the habitat in two disconnected halves (patch 4) (corresponding to property 12). One of the connected habitat areas (upper left) is divided into four different adjacent patches (as indicated by the white dotted lines), as they differ in their habitat quality or belong to different ownerships or administrative units (property 13).

**Figure 29 : Illustration de l'importance d'un patch dans la connectivité en fonction de sa situation dans le paysage (Forman R.T.T., 1995)**

Patch	BC_IIC_1000	dIICconnector	Rang BC_IIC_1000
64	9,766766	9,766766	1
62	6,148309	6,127989	2
47	3,893729	3,890986	3
143	3,241773	2,652845	4
142	2,653104	2,398263	5
134	2,398262	1,931277	6
248	2,066067	1,669472	7
128	1,931747	1,579267	8
223	1,674147	1,430485	9
235	1,579268	1,300495	10
207	1,495042	1,203952	11
138	1,447312	0,9118728	12
274	1,300496	0,858783	13
37	1,300188	0,8351889	14
279	1,203954	0,7999379	15
237	0,9633932	0,7618688	16
253	0,9420916	0,5370913	17
80	0,9118725	0,3850637	18
196	0,8867256	0,3836808	19
281	0,8351902	0,3584152	20

**Tableau 7 : Exemple de classement de patches selon leur indice BC\_IIC**

Le tableau 7 est un exemple de classement des patches de forêt sèche en fonction de l'indice BC\_IIC. Le numéro d'identification pour chaque patch est identique à celui de la couche gestionnaire. Le patch 64 est donc considéré comme le plus important pour la connectivité selon ce modèle. Le dIICconnector, directement lié au BC\_IIC, apporte une information supplémentaire. Il mesure l'impact qu'aurait le retrait du patch sur la connectivité globale. Dans certains cas de figure, un patch peut jouer un rôle très important dans la connectivité (BC\_IIC élevé), mais ce rôle peut être très bien compensé par les patches environnant si le patch en question venait à être disparaître (dIICconnector faible). Un dIICconnector égal au BC\_IIC indique que le patch en question est indispensable pour conserver le niveau de connectivité globale.

#### Encadré 6 :

Le BC\_IIC est un indice calculé via Conefor Sensinode 2.6. Le Plugin Conefor de QGIS permet de créer les deux fichiers requis en entrée : le fichier « node » contenant les aires des patches, et le fichier « distances » contenant les distances euclidiennes au plus proche voisin. Ce plugin est très simple d'utilisation, les fichiers sont créés directement à partir de la couche shape gestionnaire sans qu'aucune modification de celle-ci ne soit nécessaire. Après avoir procédé à l'analyse, un fichier texte est obtenu contenant les indices calculés pour chacun des patches, précédés de leur identifiant. Ce fichier est lié par jointure attributaire à la couche gestionnaire dans le but de représenter les fragments selon l'indice BC\_IIC. Le choix des intervalles de valeurs pour le classement par couleur n'a pas de valeur scientifique, et a été effectué pour obtenir la meilleure visualisation possible (fig. 30).

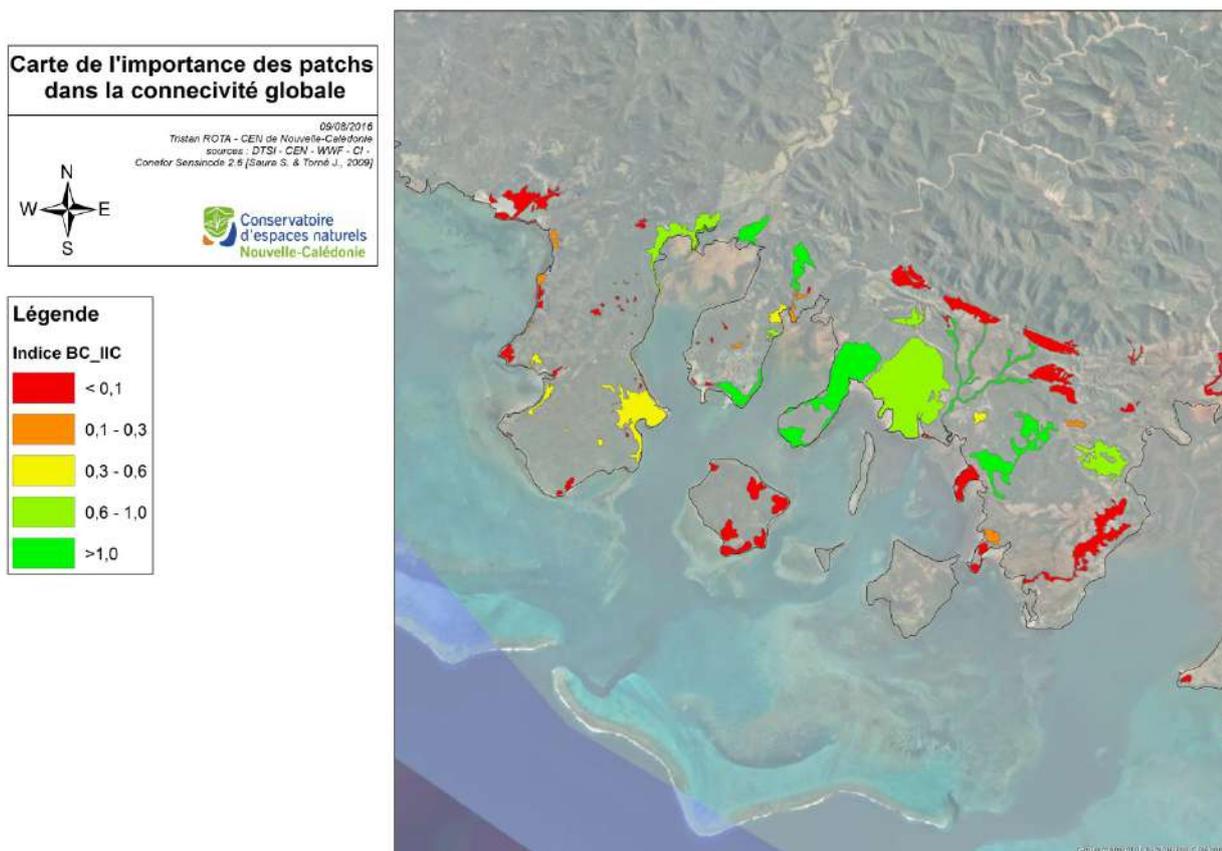


Figure 30: Carte représentant l'importance des fragments dans la connectivité

## IV. Aide à la recherche de zones d'action prioritaires

### 1. Occupation du sol au sein du corridor

L'intérêt donné à la restauration d'une zone située au sein d'un corridor de moindre-coût, diffère d'une classe d'occupation du sol à une autre. En se basant une nouvelle fois sur la matrice de moindre-coût, nous avons regroupé en trois classes les types de couverture du sol selon leur niveau d'intérêt pour la restauration (fig. 31).

Cette représentation ne nécessite pas de manipulation complexe sous SIG, mais simplement un travail sur la symbologie en affectant une nouvelle couleur à chaque type d'occupation du sol au sein des corridors.

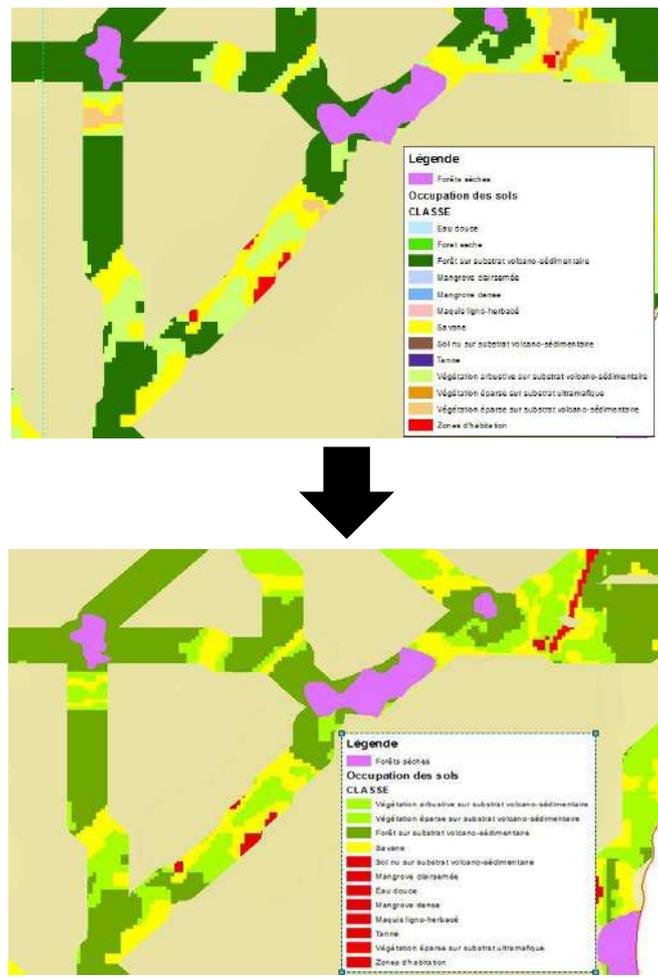


Figure 31 : Regroupement du MOS en niveau d'intérêt pour la restauration des FS

La carte suivante (fig. 32) représente les patches de forêts sèches avec les corridors écologiques de moindre coût regroupés selon le niveau d'intérêt de l'occupation du sol pour la restauration.

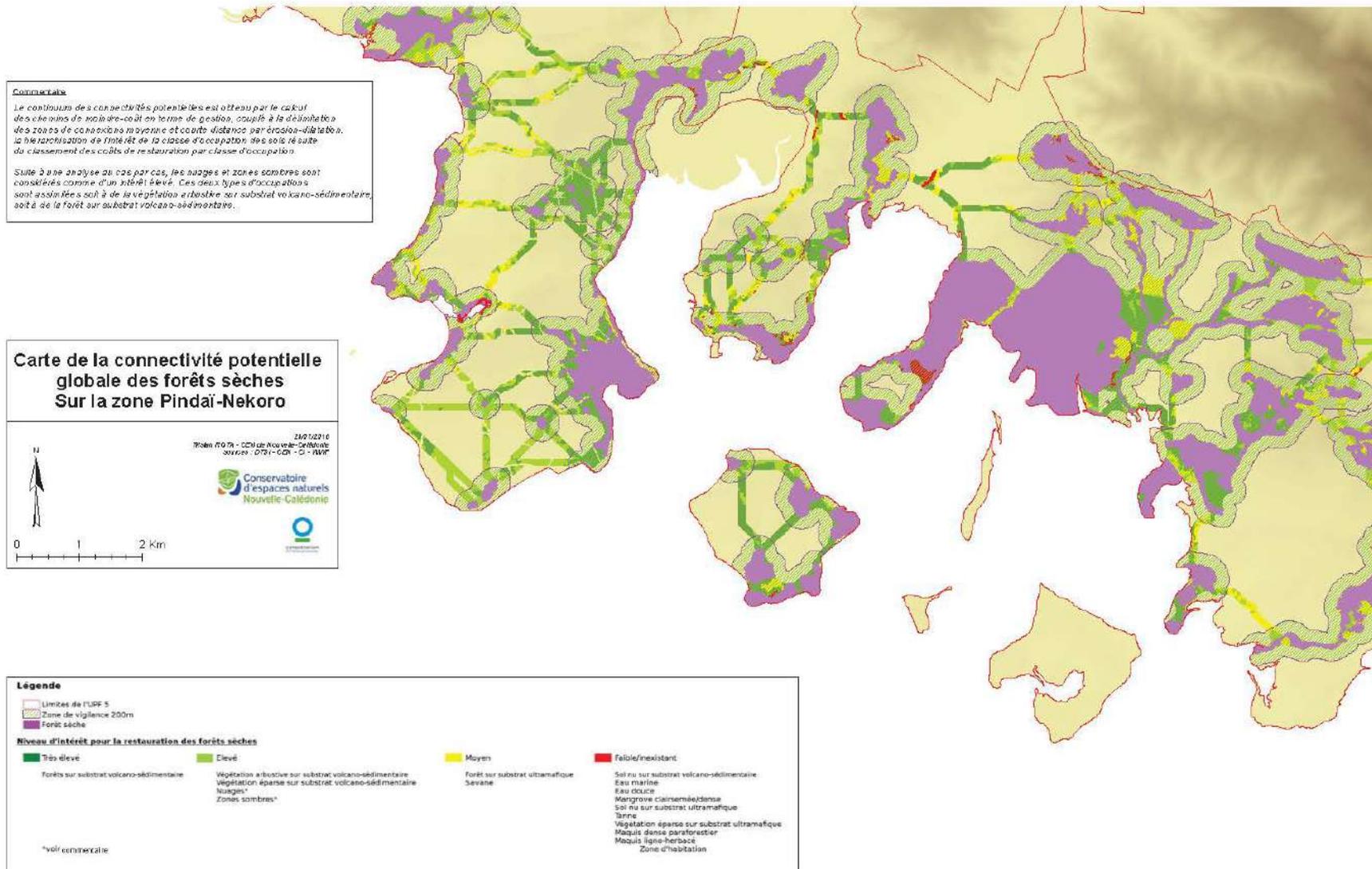


Figure 32 : Carte de la connectivité potentielle globale des FS sur Pindai-Nékoro

(d'après Jaffré *et al.*, 1993, et Tanguy Jaffré, communication personnelle, 2004). Les modèles dynamiques restent à affiner mais seront indispensables. Les trajectoires de restauration doivent chercher à comprendre les dynamiques régressives et s'inspirer le plus finement possible des dynamiques progressives des écosystèmes naturels.

Formation "climacique"	Faciès dégradé
Forêt tropicale sèche stricte, faciès fermé	Fourrés à Gaïac
Forêt tropicale sèche rivulaire	
Forêt tropicale sèche sur basaltes	Savane herbeuse à herbe à mouton ( <i>Heteropogon contortus</i> )
Forêt tropicale sèche sur argiles noires	Savane arbustive à cassis ( <i>Acacia farnesiana</i> )
Forêt tropicale sèche sur calcaire	Fourrés à faux mimosa ( <i>Leucaena leucocephala</i> )
Formations affines de transition avec la forêt humide	Savane à Niaouli
Formations affines sur serpentines	
Faciès dominants à <i>Gardenia</i> sp., <i>Cloezia</i> sp. ou <i>Croton</i> sp	

Figure 33 : Typologie des forêts sèches selon leur stade de dégradation

Plusieurs formations végétales actuelles correspondent à des stades plus ou moins dégradés de forêt sèche. Si des actions de restauration ou de protection sont menées, ces formations sont donc susceptibles de redevenir des forêts sèches. Le MOS ne détaille pas cette typologie fine (ex. fourrés à Gaïac), et c'est la classe « végétation arbustive sur substrat volcano-sédimentaire » du MOS qui contient les faciès « fourrés », « savanes arbustives », ainsi que les « savanes à niaouli dense » (fig. 33, annexe 6 pour la description complète des classes), justifiant d'un fort intérêt de restauration pour cette classe. Les forêts sur substrat volcano-sédimentaire sont placées en intérêt très fort du fait de leur similarité avec les forêts sèches en termes d'espèces, et du rôle de corridor ou de stepping stone qu'elles peuvent jouer. En annexe 10 se trouve une représentation cartographique des connectivités représentées selon leur niveau d'intérêt de restauration sur la zone Pindaï-Nekoro.

## 2. Dispersion des diaspores

Dans le choix de zones d'implantation de nouveaux îlots forestiers, nous avons considéré intéressant de prendre en compte la dispersion des diaspores. En effet, la progression de la forêt est dépendante de la dispersion du pollen et des graines. Ces derniers vont être dispersés soit par le vent (anémophilie et anémochorie), soit par les animaux (zoogamie et zoochorie). Notons que la plante peut également s'autoféconder (autogamie), et que la dispersion peut s'effectuer par une simple libération de la graine qui tombe au sol au niveau de la plante mère (barochorie).

Les modes de dispersion les plus intéressants en termes de connectivité entre îlots sont bien sûr la dispersion par le vent et les animaux.

## **Dispersion du pollen**

- **Notion de dispersion effective et dispersion basique**

La dispersion effective du pollen correspond à la dispersion des propagules qui ont conservé leur viabilité à leur arrivée. Ce type est à opposer avec la dispersion basique, qui ne considère que la dispersion de la particule sans information sur sa capacité à produire un nouvel individu ou à transmettre ses gènes. En effet, le pollen, lors de son transport dans l'atmosphère, se dessèche et perd peu à peu ses capacités de fertilisation. C'est donc la dispersion effective qui entre en jeu dans les mécanismes de flux génétiques et dans les connectivités entre îlots.

- **Notion de sédimentation et dispersion longue distance**

Le flux de grains de pollen décroît très rapidement en s'éloignant du plant émetteur, par le phénomène de sédimentation (effet de la gravité). Pour le maïs par exemple, 95% des grains se déposent sur les 50 premiers mètres avec une sédimentation de 20cm/s (Brunet Y., 2008). En général, on peut considérer que les distances de dispersion du pollen sont de l'ordre de centaines de mètres.

Cependant, une faible proportion de grains de pollen atteint une couche plus élevée dans l'atmosphère et parcourt de longues distances (de l'ordre de plusieurs kilomètres).

La bibliographie concernant la dispersion du pollen des espèces de forêts sèche locales est très lacunaire. Les informations disponibles ont été tirées du travail d'Ashley, 2010. Ce rapport traite de la dispersion du pollen de nombreuses espèces, en se basant sur l'étude de l'ADN (microsatellites).

Nous avons traité les différents résultats de dispersion issus du travail d'Ashley, les graphiques suivants en résultent (fig. 34). Le but de cette étape est d'avoir un ordre d'idée des distances de dispersion du pollen, par les différents modes de dispersion.

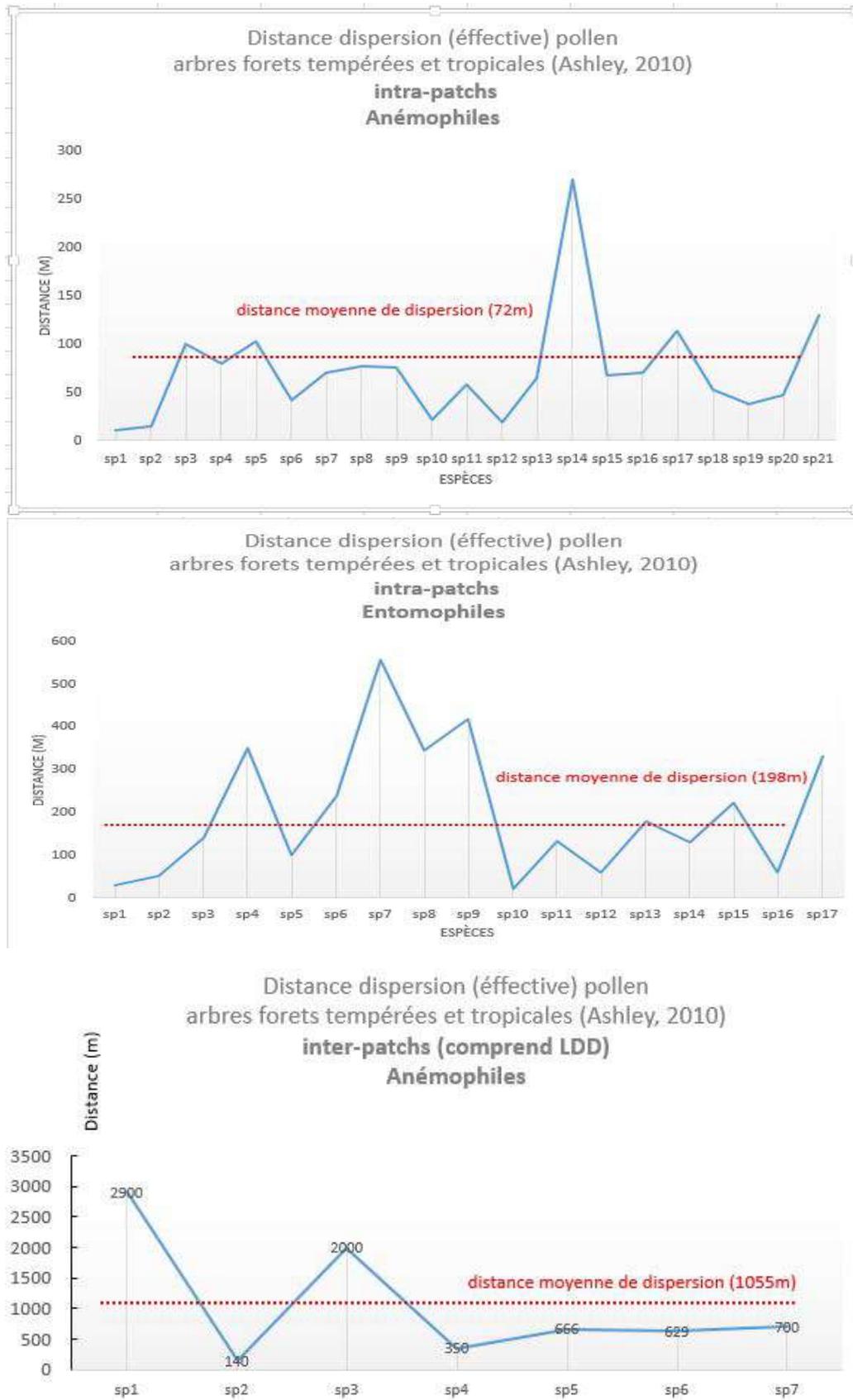


Figure 34 : Moyennes des distances de dispersion pour plusieurs espèces d'arbres de forêts tempérés (Ashley, 2010)

La figure 35 ci-dessous représente les diagrammes de direction (et non pas la provenance) du vent le long de la côte Ouest. Pour la majorité des localisations, on peut voir que l’ilot implanté devra être situé à l’ouest d’un ilot « disperseur » pour bénéficier des diaspores issues de ce dernier lors d’une dispersion par anémochorie.

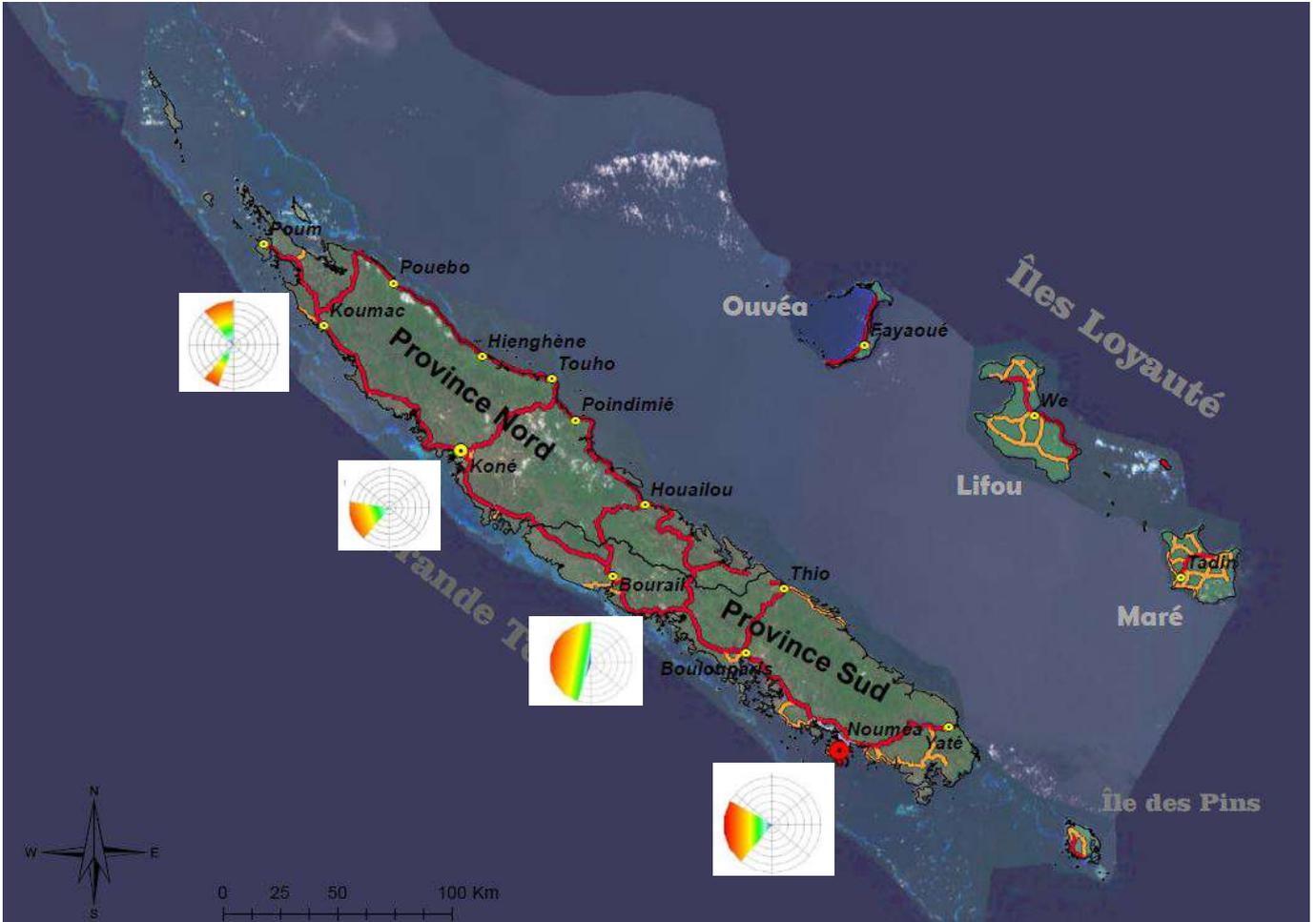


Figure 35 : Représentation des diagrammes de direction du vent sur 4 zones de la Grande Terre

**Dispersion des graines**

C’est l’ornithochorie qui prédomine en forêt sèche (Boquet A., 2005), pour représenter jusqu’à 45% des espèces (fig. 36). La dispersion des graines est donc intimement liée aux déplacements des oiseaux. L’ornitofaune présente en forêt sèche n’est pas inféodée à ce type de milieu, ce qui présente l’avantage de disperser sur d’autres milieux, en particulier pour des espèces pionnières.

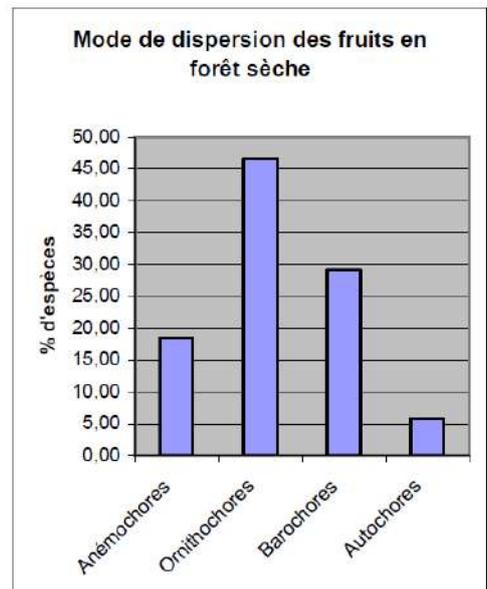


Figure 36 : Mode de dispersion des fruits en forêt sèche (Boquet A., 2005)

### 3. Emprise foncière

La maîtrise foncière est primordiale afin de mettre en place d'enclencher la gestion environnementale des forêts sèches sur le long terme. Le CEN a la capacité d'acquérir des territoires, ou de mettre en place des conventions avec les propriétaires privés pour mener des actions de protection. Le territoire est partagé entre différentes entités n'octroyant pas le même niveau d'aisance dans la mise en place d'actions environnementales. Par consensus, ces emprises foncières ont été classées selon deux niveaux de facilité d'action (Tableau 8).

- Niveau 1 = Actions de gestion possibles, facilitées par le caractère public de l'emprise foncière
- Niveau 2 = Actions de gestion envisageables au cas par cas, mais majoritairement contraignantes pour le gestionnaire.

<b>Niveau 1 : domaine public</b>	<b>Niveau 2 : domaine non public</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Terres appartenant au Gouvernement de Nouvelle-Calédonie</li> <li>- Terres appartenant aux Provinces (Nord et Sud)</li> <li>- Terres communales</li> <li>- Terres appartenant à l'Etat français</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Terres privés</li> <li>- Terres coutumières</li> </ul>

**Tableau 8 : Deux niveaux d'emprise foncière retenus**

- Les terres coutumières

Ces terres définies par la loi organique du 19 mars 1999 comprennent les réserves et agrandissement de réserves, les terres de clans et les terres de Groupement de Droit Particulier Local (GDPL). Elles sont par essence inaliénables, inaccessibles, incommutables et insaisissables. (cf. Lafargue R., 2012 pour une description complète du Droit Coutumier en Nouvelle-Calédonie).

- Les terres privées

La mise en place d'une gestion appropriée avec l'accord du propriétaire du domaine est possible sur ces terres. Des conventions peuvent être passées entre le propriétaire et le CEN afin que ce dernier puisse réduire les menaces pesant sur des habitats incluent dans un domaine privé. Pour le moment, en l'absence de dispositifs formalisés d'incitation à la conservation des forêts sèches sur les terres privés, ces accords sont encore rares, il a donc été convenu de placer les terres privées en niveau 2.

**Encadré 7 :**

Sous ArcGIS, le cadastre est découpé selon le continuum des connectivités obtenu suite à la délimitation des corridors de moindre-coût. Un champ « priorité » est ajouté à la couche ainsi obtenue et la symbologie est déterminée pour représenter les deux niveaux de priorisation sur le continuum (fig. 37).

Continuum priorisé		
FID	PROPRIO	PRIORITE
0	NON RENSEIGNEE	2
1	PRIVE	2
2	PRIVE	2
3	PRIVE	2
4	PRIVE	2
5	PRIVE	2
6	PRIVE	2
7	PRIVE	2
8	PROVINCE SUD	1
9	PRIVE	2
10	PRIVE	2
11	PRIVE	2
12	PRIVE	2
13	PRIVE	2
14	PROVINCE SUD	1
15	PRIVE	2

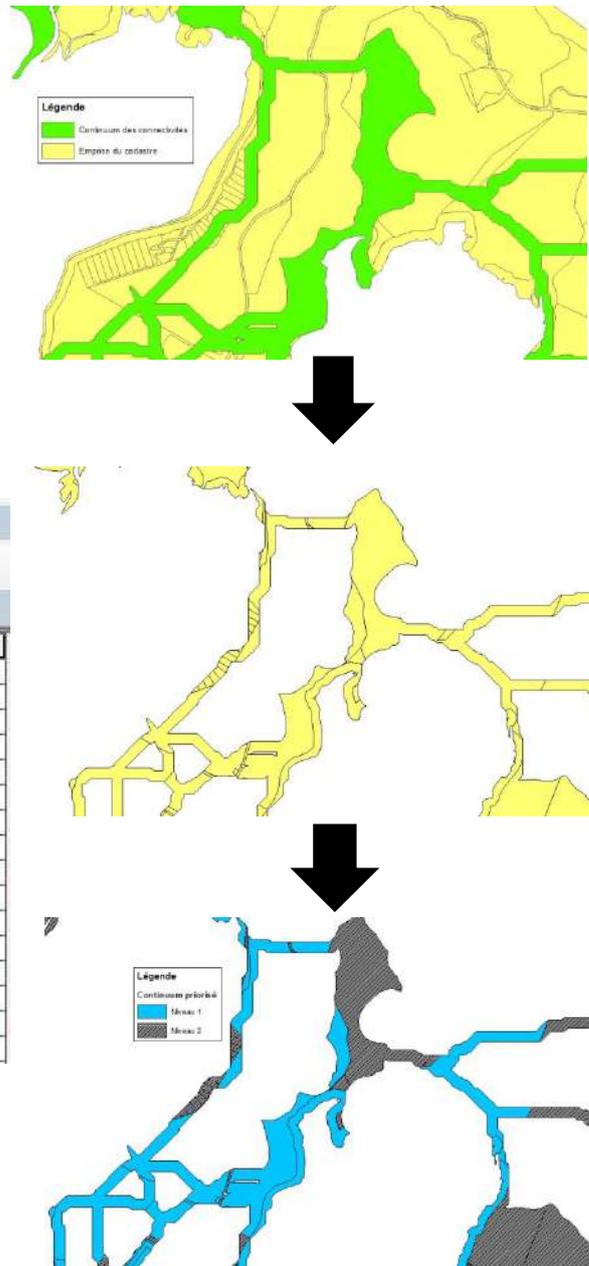


Figure 37 : Priorisation selon l'emprise foncière

**4. Pente et accès**

La pente est un facteur important pour la faisabilité des actions de restauration de mise en défens ou de replantation. Les engins et le personnel seront dans l'impossibilité d'évoluer s'ils sont confrontés à de fortes pentes où les coûts de mise en œuvre de telles actions seraient plus importants.

Les zones à forte pente sont par ailleurs plus sujettes à l'érosion et au charriage des éléments minéraux et organiques par les précipitations. Lors d'épisodes de pluies, les éléments sont entraînés, appauvrissant les sols en pente et enrichissant ceux situés en contre-bas de la pente. De plus, la

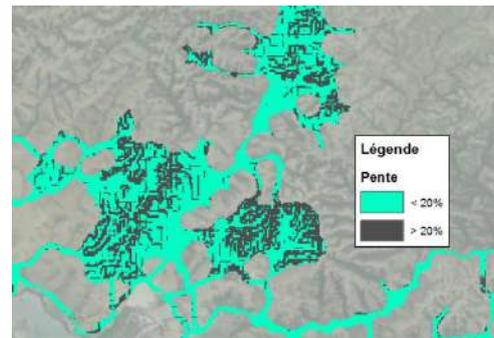
stabilité des arbres et arbustes est réduite. Pour ces raisons les zones à faibles pentes seront privilégiées pour la restauration. Nous avons déterminé la valeur de 20% comme la limite de pente acceptable pour agir sur une zone. Les pentes sur tout le continuum des connectivités ont donc été déterminées et reclassées pour discriminer les zones inférieures à 20% des zones supérieures à 20%.

#### Encadré 8 :

- *Correction du MNT sous ArcGis*

*Le raster pente est créé à partir du MNT de précision 25 m x 25 m de 2012 fourni par la DTSI. Une correction s'est avérée nécessaire car les zones maritimes portaient des valeurs d'altitude négatives, ce qui faussait le raster pente en entraînant la création d'une bande de pente extrêmement élevée tout au long du littoral.*

- *Reprojection du MNT en système de coordonnées Lambert\_New\_Caledonia, obtention du raster MNT\_proj*
- *Création d'un masque ne contenant que les valeurs d'altitude positives à partir du MNT\_proj via la calculatrice raster. Expression :  $MNT\_proj > 0$*
- *Reclassement du masque avec l'outil « reclassify » : valeurs 0 = NoData et valeurs 1 = 1*
- *Application du masque sur le raster MNT\_proj via l'outil « extract by mask ». Seules les valeurs d'altitude  $> 0$  seront conservées dans le raster de sortie*



**Figure 38 : Priorisation selon la pente**

- *Création du raster pente (fig. 38)*
- *Création du raster pente à partir du dernier raster obtenu après extraction avec le masque via l'outil « slope »*
- *Reclassement du raster pente en deux classes : valeurs  $< 20\%$  = 1, valeurs  $> 20\%$  = 2*
- *Découpe du raster pente reclassé par le continuum de gestion*

La figure 39 est une représentation en 3D du continuum des connectivités sur une portion de la Grande Terre. Cette représentation est intéressante dans le sens où elle permet d'appréhender de manière très visuelle le relief sur une zone donnée.

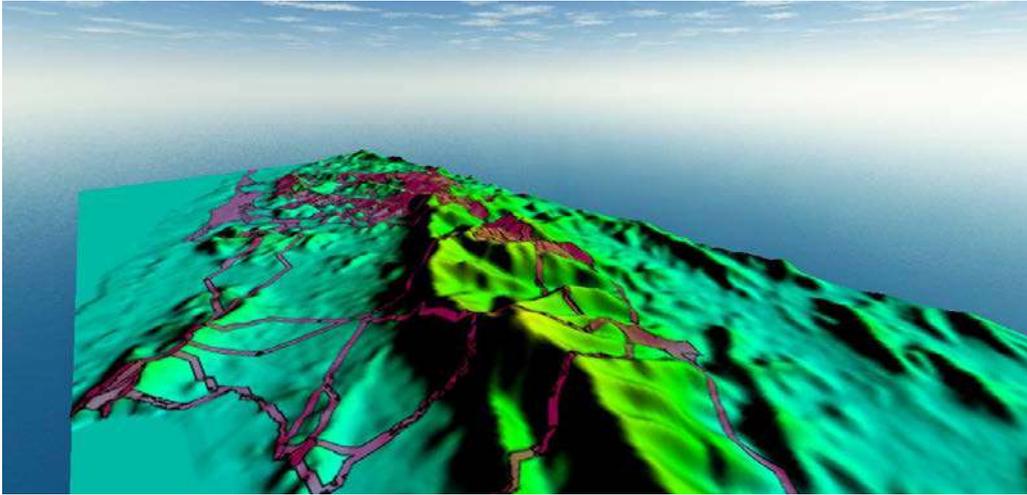


Figure 39 : Représentation 3D du continuum de gestion

## 5. Biodiversité au sein du patch

Une première priorité peut être accordée aux patches comportant des espèces menacées ou d'intérêt patrimonial en leur sein. Ces patches peuvent être mis en lumière sous SIG, dans la limite des données d'inventaire disponibles, en précisant en attribut le classement déterminé par l'IUCN pour ces espèces.

Quelques données d'inventaires de plantes sont disponibles actuellement sur quelques fragments. A l'échelle de la Grande Terre, et sachant qu'une grande majorité de fragments n'ont pas été inventoriés, nous n'avons pas jugé pertinent d'approfondir cette analyse. De nombreux patches auraient été mis à part car non prospectés, même si ces derniers pourraient comporter de nombreuses espèces menacées. Un effort de prospection beaucoup plus important est requis pour intégrer pleinement cette méthode de priorisation dans notre analyse. En revanche, il est possible de représenter l'information disponible afin de signaler les patches contenant de telles espèces (fig. 40). Mais rappelons que dans le contexte de la Nouvelle-Calédonie, où le taux d'endémisme est extrêmement élevé sur un territoire très restreint, on peut supposer que la grande majorité des îlots (si ce n'est tous) contient au moins une espèce classé dans la liste rouge de l'IUCN.

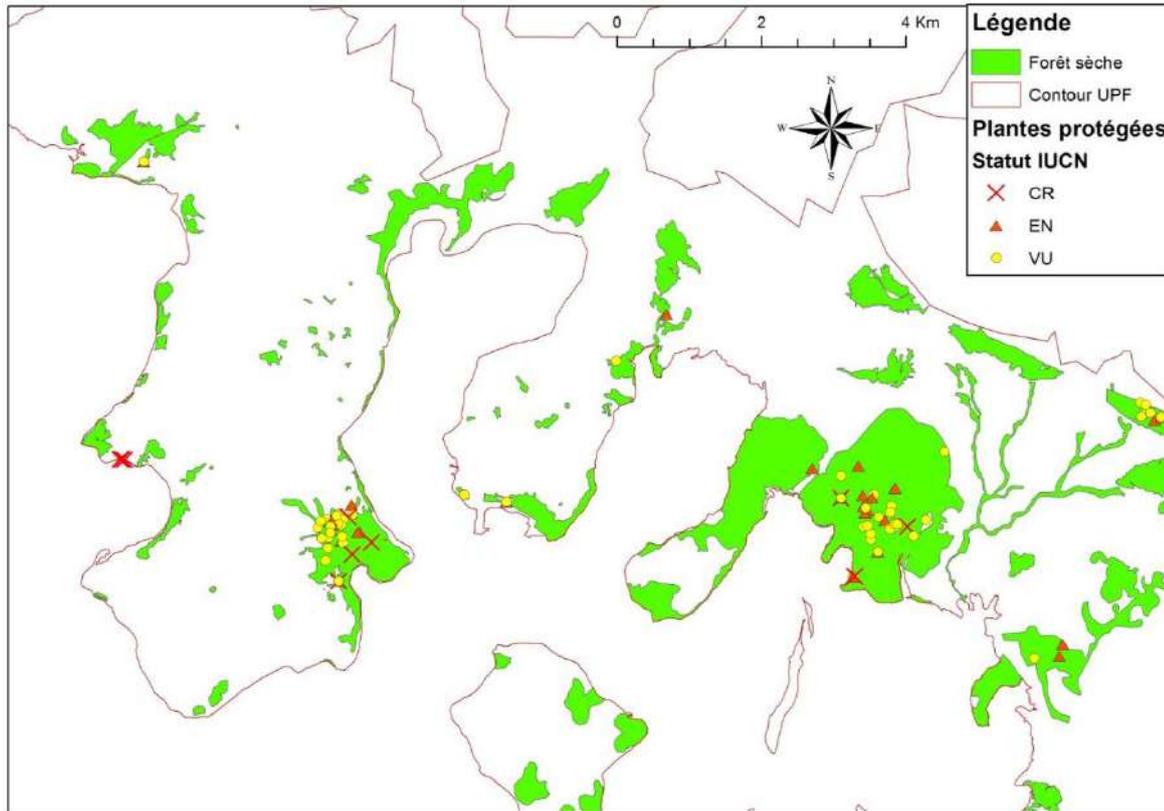


Figure 40 : Exemple de représentation des plantes classées dans les patches de forêt sèche

## 6. Incendies

Les feux de forêt constituent l’une des menaces les plus importantes pesant sur la forêt sèche, mais aussi sur la plupart des écosystèmes forestiers de Nouvelle-Calédonie. Ainsi, l’IRD lança en 2008 le projet INC (Incendies et biodiversité des écosystèmes en Nouvelle-Calédonie) en partenariat avec le CNRS, l’INRA, l’IRSTEA (anciennement CEMAGREF), Météo-France et le WWF-Calédonie, et financé par l’Agence Nationale de Recherche. Cette étude à grande échelle avait pour but de créer un outil permettant d’évaluer le risque de perte de biodiversité imputé aux incendies à l’échelle de la Nouvelle-Calédonie, en regroupant les composantes écosystèmes, pratiques humaines, climat et incendies passés. (Hély-Alleaume C., 2012).

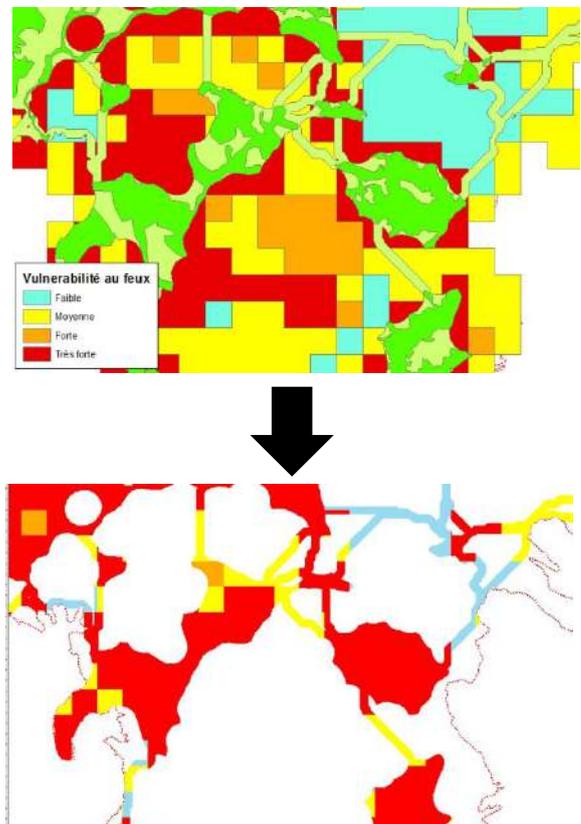


Figure 41 : Priorisation selon la vulnérabilité aux feux

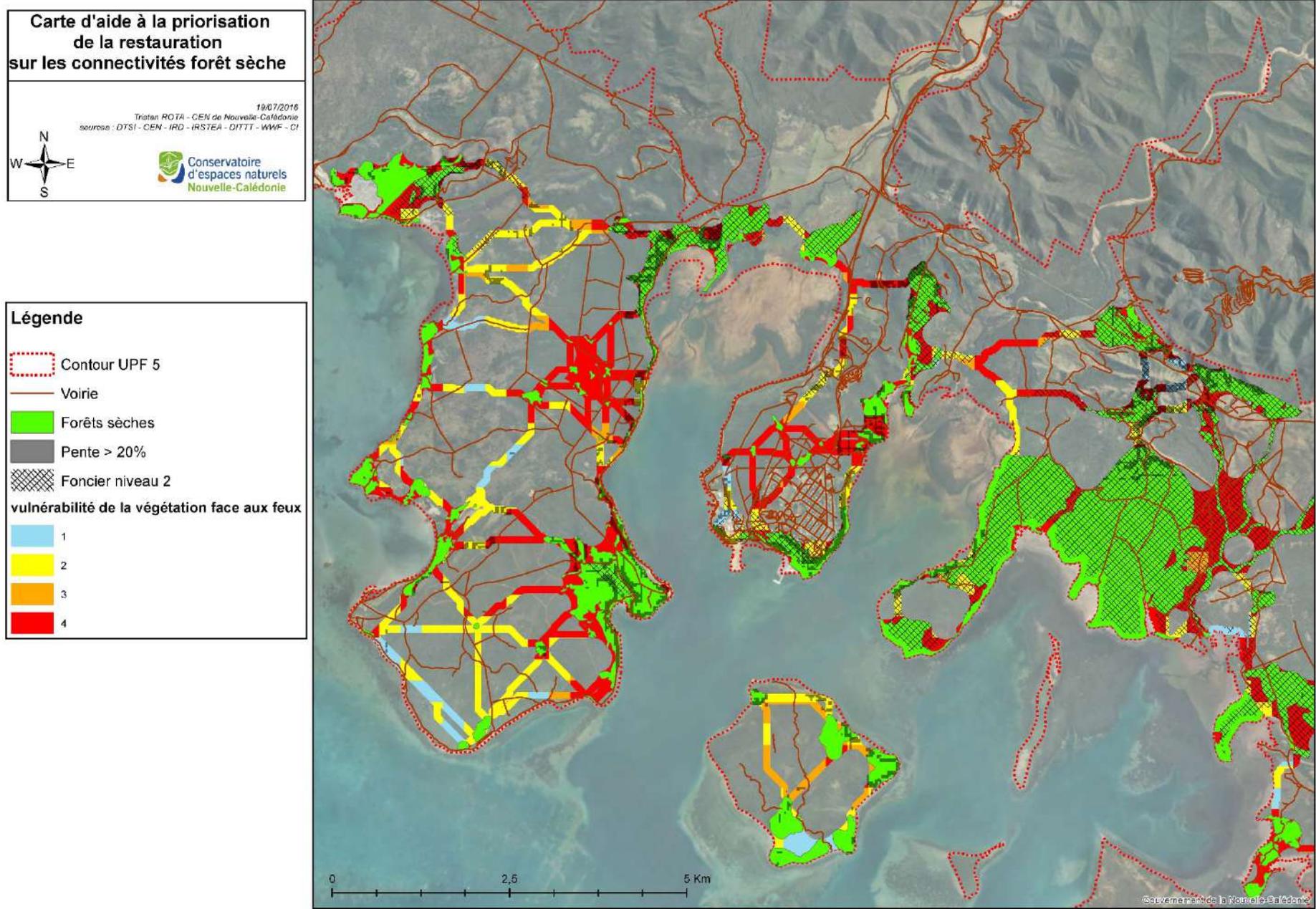
Ce projet a abouti à la création d'une carte de vulnérabilité de la végétation face aux feux, disponible sur le portail cartographique de l'ŒIL, que nous avons utilisé pour informer sur le risque d'incendies présent sur le continuum des connectivités (fig. 41).

La précision de la carte issue du projet INC est très approximative (pixel de 300 m x 300 m), Cette information doit donc être interprétée de manière générale. Il semble judicieux de prendre en compte le facteur risque d'incendie lors de la sélection d'une zone à restaurer, mais une analyse plus fine sera nécessaire afin de déterminer plus précisément le niveau de ce risque.

La figure 42 est une carte d'aide à la décision reprenant tous les critères de priorisation cités précédemment. Trois critères de priorisation sont représentés sur cette carte :

- La pente : les pentes supérieures à 20% sont les zones grisées visibles sur certaines parties du continuum. Dans l'ensemble, les pentes sont plutôt faibles sur la zone Pindaï-Nékoro et peu de corridors potentiels sont localisés sur une pente supérieure à 20%.
- L'emprise foncière : Les zones quadrillées correspondent au foncier de niveau 2. Le foncier niveau 1 n'est pas représenté mais correspond à toutes les zones non quadrillées. La majorité de la presqu'île de Pindaï est en zone foncière publique, tandis que la zone Nékoro est principalement en foncier niveau 2. L'accord des propriétaires des terres est donc nécessaire avant toutes actions de gestion sur ces zones. Des démarches au cas par cas doivent donc être effectuées pour avoir la possibilité d'agir sur ces sites.
- La vulnérabilité face au feu : Selon une échelle à quatre couleurs, le rouge correspond à une vulnérabilité très importante, et le faible à une faible vulnérabilité. Cette vulnérabilité est représentée uniquement sur le continuum de gestion.

Figure 42 : Carte d'aide à la priorisation pour la restauration des connectivités des forêts sèches



# Partie III : Discussion, perspectives

## I. Discussion sur la priorisation des zones de gestion

### 1. Exemple de démarche sur le site Montagnes-Blanches / Pindaiï

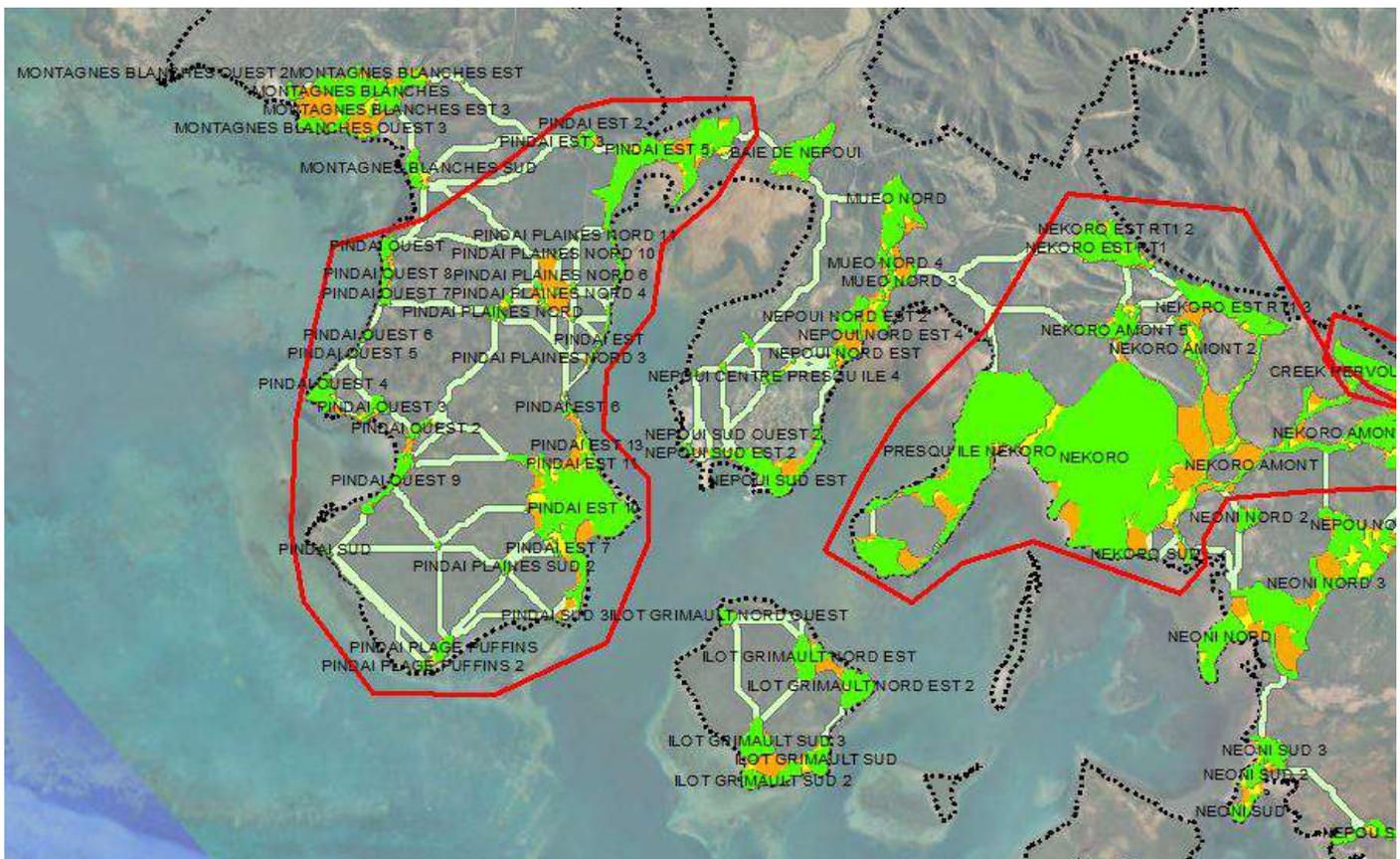


Figure 43 : Site de Pindaiï-Nékoro

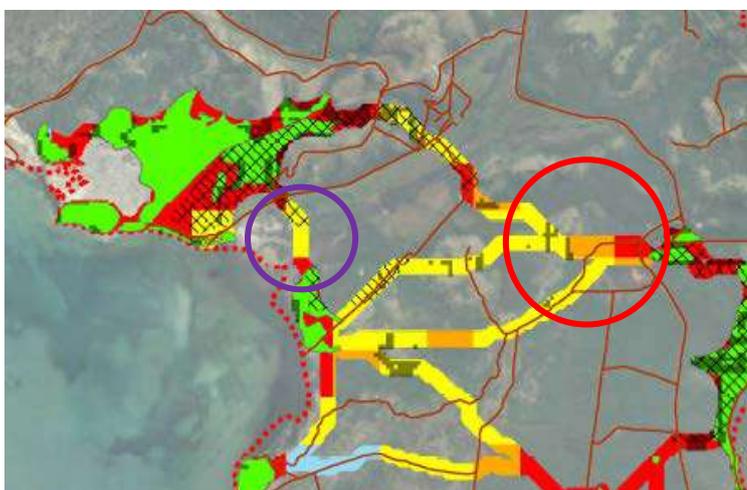


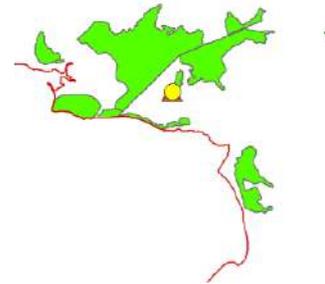
Figure 44 : Zoom sur le site Montagnes-Blanches, potentiellement intéressant en termes de gestion

La grande majorité des terres de la presqu'île de Pindaiï appartient au gouvernement, ce qui en fait un site prioritaire très important. La forêt sèche est extrêmement fragmentée sur cette zone, comme en témoigne le découpage des polygones de Voronoï notamment, mais les connexions potentielles sont nombreuses (fig. 43).

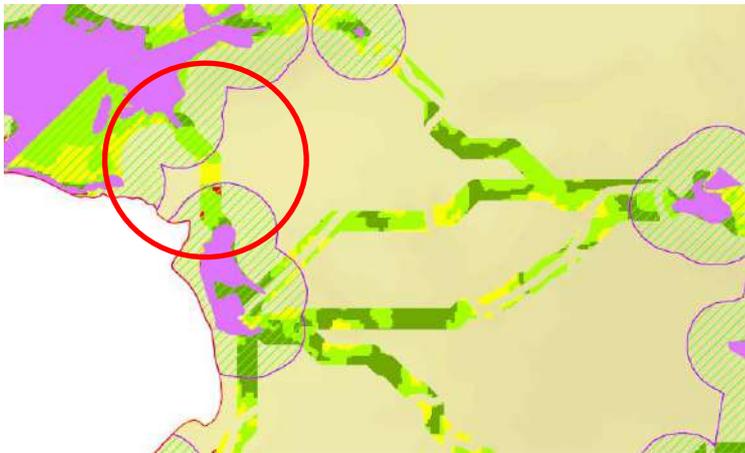
Le site Montagnes Blanches au Nord-Ouest comprend deux ensembles dont l'un est plutôt important en termes de superficie, mais reste relativement éloignés du site de Pindaï.

Certaines parties de ce site sont situés en foncier niveau 1, notamment à la jonction entre les corridors potentiels (entourée en rouge sur la fig. 44) et au Sud du site Montagnes Blanches (en violet). La vulnérabilité aux incendies sur cette portion est faible à moyenne, et une prospection très localisée sur l'un des patches a permis de déceler au moins une espèce classée EN, et une espèce VU (fig. 45). Des relevés plus aboutis pourraient permettre de recenser d'autres individus de ces espèces autour de cette zone, voire d'observer d'autres espèces en danger. De plus, la pente est inférieure à 20% sur la majorité du site

L'intérêt de restauration est élevé à très élevé au niveau de la jonction des corridors, et moyen à fort au niveau de la zone Sud de Montagnes Blanches (fig. 46)



**Figure 45 : Présence d'espèces classée EN (triangle orange) et VU (rond jaune) sur la liste rouge IUCN**

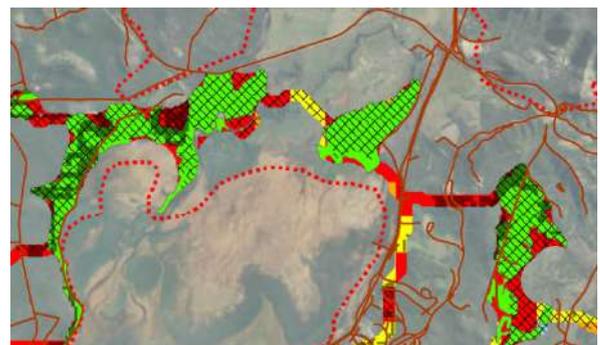


**Figure 46 : Focus sur l'intérêt de restauration sur le site Montagnes Blanches**

les relie. Les zones de végétation arbustives et de forêt sur substrat volcano-sédimentaire situées à ce niveau constituent de bons sites pour une restauration ou un enrichissement.

Les sites Pindaï Est 5 et Baie de Népoui (fig. 47) sont des fragments clés connectant les Presqu'île de Pindaï et de Népoui. Leur position et leur taille

La mise en relation des critères permet de déterminer ce site comme propice à une action de restauration de forêt sèche, notamment par la création d'un stepping-stone au niveau de la zone entourée en rouge sur la fig. 46. De plus, il peut être intéressant d'envisager une reconnexion de la zone de Montagnes Blanches avec le patch situé au Sud, proche du littoral en reboisant sur le corridor potentiel qui



**Figure 47 : Site d'importance majeure dans la connectivité (Pindaï Est 5, Baie de Népoui**

les rend indispensables dans ce rôle, Ils sont placés en 15<sup>ème</sup> et 20<sup>ème</sup> sur 288 selon leur indice BC\_IIC (tableau 9).

Ces patchs sont situés en domaine privé, il est donc nécessaire de sensibiliser le propriétaire des terres à la protection de ces forêts, et éventuellement passer un accord avec lui afin que le CEN puisse envisager une protection sur le long terme sur ces sites.

Patch	BC_IIC_1000	Rang BC_IIC_1000
64	9,77E+00	1
62	6,15E+00	2
47	3,89E+00	3
143	3,24E+00	4
142	2,65E+00	5
134	2,40E+00	6
248	2,07E+00	7
128	1,93E+00	8
223	1,67E+00	9
235	1,58E+00	10
207	1,50E+00	11
138	1,45E+00	12
274	1,30E+00	13
37	1,30E+00	14
279	1,20E+00	15
237	9,63E-01	16
253	9,42E-01	17
80	9,12E-01	18
196	8,87E-01	19
281	8,35E-01	20

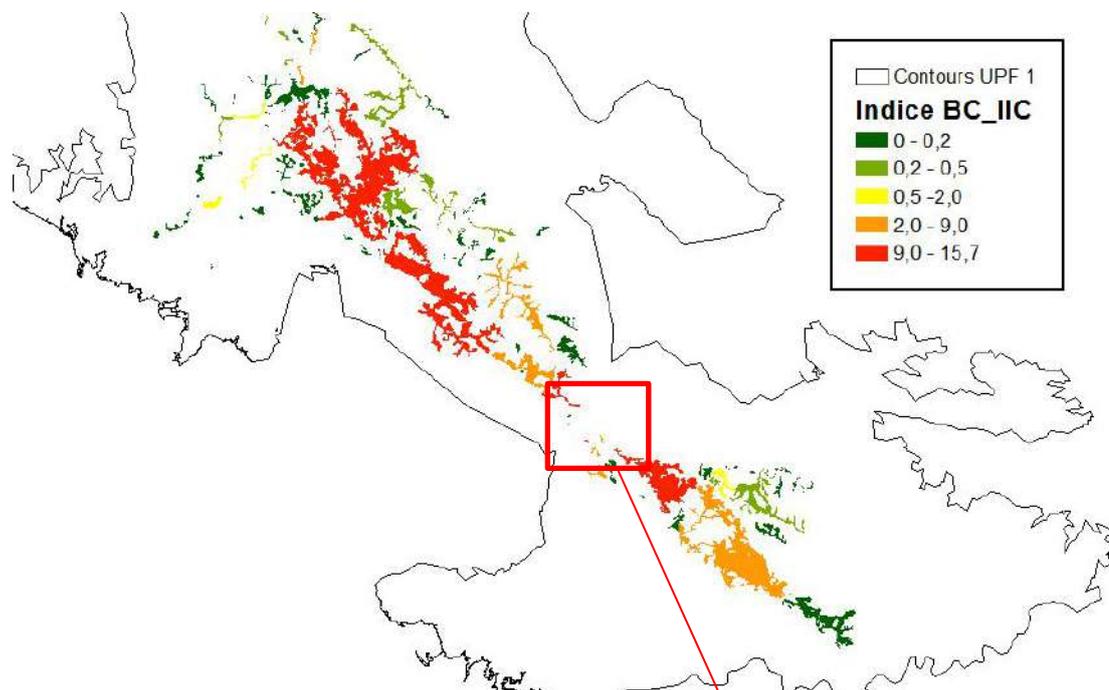
Tableau 9 : Classement des patchs Pindaï-Est 5 et Baie de Népoui au sein de l'UPF 5 d'après leur BC\_IIC

### Remarque sur les sites prioritaires

Sur les 20 plus grands massifs de forêt sèche, seuls 7 sont contenus dans les zones prioritaires déterminées auparavant par Grange B., 2012.

La question qui se pose dans une problématique de conservation d'un habitat très fragmenté est la suivante : Agit-on en priorité sur ces grands massifs pour maintenir de grands ensembles viables ou au contraire, les actions doivent-elles être concentrées sur les massifs plus petits et donc plus vulnérables dans leur état actuel ? Cette question rejoint les conclusions de Birnbaum P. et al., 2016 pour les forêts sur substrats ultramafiques. Dans la première hypothèse il serait préférable de modifier la liste de ces sites prioritaires.

## 2. Importance des fragments « nœuds » entre les grands massifs forestiers



Certains fragments constituent, vu leur position dans le paysage, des nœuds très importants dans la connectivité. L'analyse par l'indice d'importance BC\_IIC permet de déceler certains d'entre eux, dont la disparition entraînerait une rupture importante de la continuité. C'est le cas sur l'UPF 1 au niveau des sites Alamu et Mavovoui Ouest 4 (fig. 48), qui jouent constituent des nœuds de connexion et relient deux grands ensembles de forêt sèche. Ces îlots sont d'autant plus vulnérables que leur surface est extrêmement faible.



Figure 48 : Place centrale de certains petits fragments dans la connectivité

Cette configuration est à surveiller plus attentivement à l'avenir. Les sites définis comme prioritaires actuellement par le CEN ne considèrent pas ces sites « nœuds » d'une importance pourtant non négligeable, et dirigent généralement les actions sur les grands ensembles forestiers.

Dans l'idéal, les grands massifs forestiers encore existant doivent être renforcés par restauration passive et active afin de recréer une continuité intrinsèque et éviter l'accentuation de la fragmentation de l'habitat (Birnbaum P. et al., 2016). Néanmoins, certains îlots pouvant sembler isolés sont parfois les seuls liens structurels et fonctionnels entre deux grands massifs. Les deux sites évoqués plus tôt et visibles sur les figures 48 et 49 sont des patchs de forêt sèche entourés de savane et de végétation arbustive, signifiant qu'ils représentent quasiment les seuls points de transition pour les organismes strictement forestiers. Vu la distance raisonnable entre les deux grands ensembles en question (environ 2 km), un rétablissement complet de la connexion entre eux peut être envisagée en consolidant ces îlots.

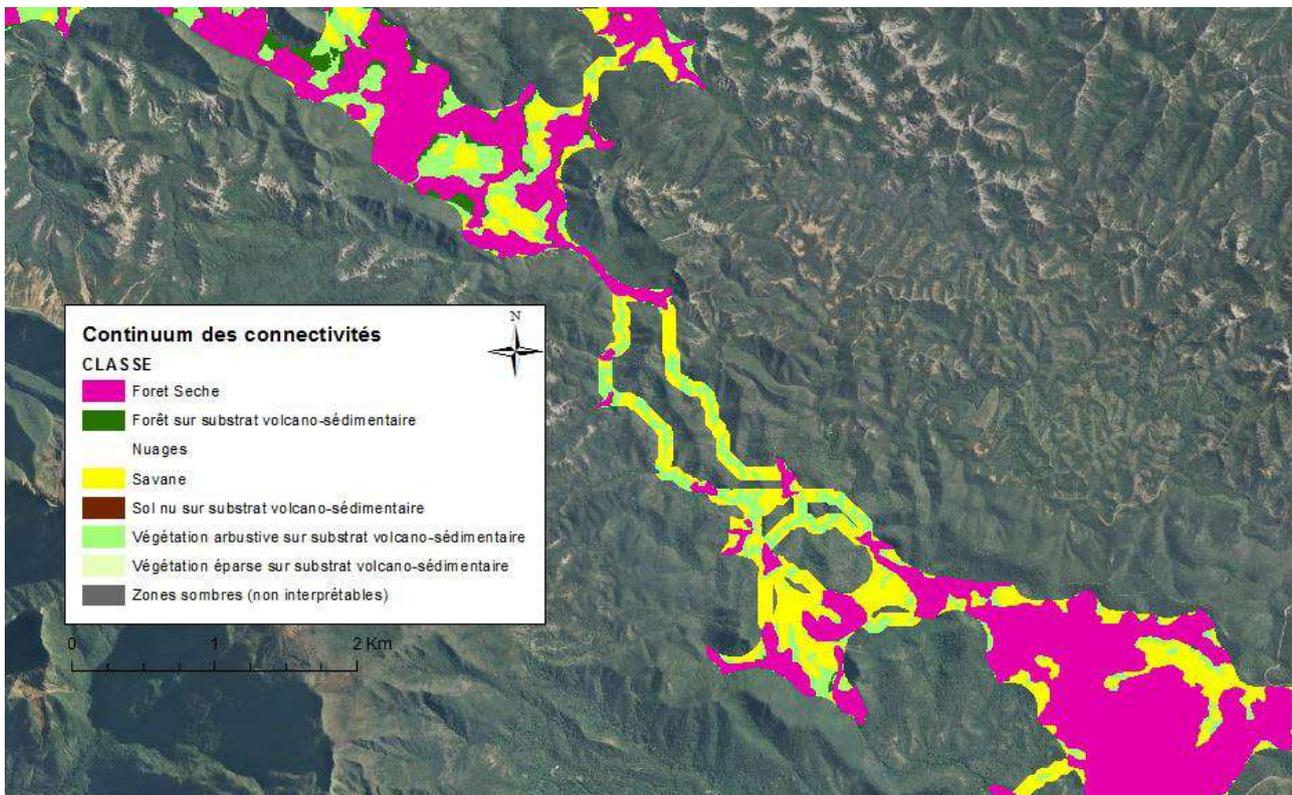


Figure 49 : Continuum des connectivités sur les sites Alamu et Mavovoui Ouest 4

### 3. Classement des fragments par importance relative dans la connectivité globale

Les indices PROX, ENN, BC\_IIC, ainsi que l'aire des fragments permettent de mettre en évidence leur importance relativement aux autres. Des tableaux ont été dressés sous excel par UPF (annexe 7), permettant de classer directement les patchs en fonction de la valeur de chacun des indices (tableau 10). On peut considérer qu'un fragment de forêt sèche sera d'autant plus important

dans la connectivité que son rang pour chacun des indices est élevé. L'aire du patch peut-être prise en compte ou non dans l'analyse de ce classement.

Il serait inexact de considérer que les patches les plus haut classés doivent concentrer tous les efforts de protection. Ce type de classement permet de diriger le regard vers certains fragments en particuliers, vu leur rôle prépondérant dans la connectivité globale, vu leur isolation, vu leur taille imposante, et vu leur forme étriquée ou compacte (ces deux derniers critères étant dans une certaine mesure intégrés dans le premier). Ce classement doit être complété avec une visualisation cartographique permettant de localiser le patch et de le replacer dans son contexte paysager, pour finalement sélectionner une zone d'action inhérente à celui-ci en tenant compte des différents critères de priorisation définis précédemment.

Tableau 10 : Exemple de tableau de classement des patchs selon les valeurs d'indices sur l'UPF 5

Patch	ENN	Rang_ENN	AIRE	Rang_AIRE	PROX 500	Rang PROX 500	PROX 1000	Rang PROX 1000	BC_IIC_1000	Rang BC_IIC_1000	dIICconnector_1000	dBC_IIC_500	Rang dBC_IIC_500	dIICconnector_500	Indice K	Rang K
1	2290,09	288	15,78	73	0,00	264	0,00	278	0,00E+00	206	0,00E+00	0,00E+00	145	0,00E+00	0,590	43
2	102,44	186	1,50	210	4,42	209	4,59	213	4,96E-03	125	4,96E-03	0,00E+00	145	0,00E+00	0,429	92
3	41,58	116	2,63	182	41,65	137	41,65	140	0,00E+00	206	0,00E+00	2,36E-05	140	5,00E-07	0,532	59
4	13,34	53	7,34	109	97,70	102	97,70	103	0,00E+00	206	0,00E+00	2,36E-05	140	5,00E-07	0,309	139
5	13,34	53	3,72	154	172,83	87	172,83	87	0,00E+00	206	0,00E+00	2,36E-05	140	5,00E-07	0,473	74
6	154,22	218	3,63	156	3,53	218	3,55	226	0,00E+00	206	0,00E+00	0,00E+00	145	0,00E+00	0,332	128
7	174,88	226	8,89	96	4,69	208	4,71	212	3,56E-03	136	3,56E-03	0,00E+00	145	0,00E+00	0,463	75
8	373,84	260	17,42	68	1,50	239	1,50	256	0,00E+00	206	0,00E+00	0,00E+00	145	0,00E+00	0,085	255
9	174,88	226	15,55	74	3,02	226	3,02	231	1,74E-03	149	1,74E-03	8,64E-04	113	8,64E-04	0,292	148
10	26,52	87	2,35	192	13,58	175	13,95	180	0,00E+00	206	0,00E+00	0,00E+00	145	0,00E+00	0,176	200
11	9,76	43	0,66	242	57,38	126	57,67	127	6,85E-05	189	4,00E-07	7,06E-04	115	5,00E-07	0,218	178
12	51,06	127	21,41	59	18,27	161	19,72	161	2,52E-01	46	2,52E-01	1,53E-03	106	1,53E-03	0,199	189
13	6,62	22	0,64	243	218,34	79	218,63	79	0,00E+00	206	0,00E+00	7,06E-04	115	5,00E-07	0,365	113
14	464,47	264	7,46	105	0,71	252	0,71	265	0,00E+00	206	0,00E+00	0,00E+00	145	0,00E+00	0,239	167
15	6,62	22	0,20	272	218,34	79	218,63	79	6,85E-05	189	4,00E-07	7,06E-04	115	5,00E-07	0,325	132
16	29,63	91	54,75	30	90,88	110	92,44	110	3,68E-04	175	4,00E-07	0,00E+00	145	0,00E+00	0,475	73
17	9,76	43	1,06	225	180,25	84	181,85	85	3,53E-03	137	4,00E-07	8,99E-04	112	5,00E-07	0,119	228

## 4. Discussion sur les méthodes d'identification des connectivités

Depuis la loi Grenelle I du 12 juillet 2010, la protection et la reconstruction des connectivités au sein d'un paysage fragmenté, afin que les organismes végétaux et animaux puissent circuler, s'alimenter, se reproduire et se reposer, sont ancrées dans les stratégies de développement territorial françaises. Par le biais de l'élaboration de la trame verte et bleue intégrée au Schémas Régionaux de Cohérence Ecologique (SRCE), les régions sont tenues de développer des méthodes afin d'identifier et de représenter les continuités écologiques. Les méthodes que nous développons dans cette étude (dilatation-érosion, chemins de moindre-coût) s'appuient sur celles déjà décrites en métropole, et nous nous sommes efforcés de les adapter au contexte des forêts sèches de Nouvelle-Calédonie. Néanmoins, le contexte particulier de la Nouvelle-Calédonie amène des limites dans l'analyse, particulièrement au niveau des seuils de distance utilisés pour certains indices (BC\_IIC et PROX).

Les pages suivantes contiennent quelques éléments de discussion sur chaque méthode utilisées pour cette étude, ainsi que les limites identifiées

### 1. Discussion sur la caractérisation des patchs

La caractérisation de l'habitat par plusieurs indices est une première approche de l'analyse des continuités écologique et permet de décrire le niveau de fragmentation de paysage.

#### a) Distances ENN

L'analyse des distance ENN entre les patchs permet de faire état d'une importante isolation générale des patchs au sein de la matrice, avec une moyenne de distance ENN de 265 mètres au sein des UPF.

L'indice ENN est la distance au plus proche voisin pour chaque patch. Il est important de noter que cette distance peut être très petite lorsque deux patchs sont très proches l'un de l'autre, mais cela n'empêche pas que ces deux patchs en question peuvent être à une très grande distance du 3<sup>ème</sup> patch le plus proche. La représentation des distances ENN peut donc parfois être trompeuse lorsqu'un ensemble de petits patchs très proches les uns des autres est très isolé des grands ensembles. Il pourrait être pertinent de ne tenir compte que des distances plus grandes qu'un certain seuil pour mieux caractériser l'isolation des patchs. Cette distance seuil pourrait être par exemple la

distance maximale entre deux fragments pour laquelle la connexion est considérée comme naturellement établie.

### **b) Indice PROX**

Les rayons de recherches (search radius) utilisés pour le calcul de l'indice PROX sont de 500 m et de 1000 m. Notons que ces seuils sont modulables et s'appuient sur des données bibliographiques lacunaires et non spécifiques aux forêts sèches calédoniennes. Avec l'évolution des méthodes et l'acquisition de connaissances sur l'écologie fonctionnelle de l'habitat forêt sèche, il sera nécessaire de repreciser ces seuils de distances pour affiner l'analyse.

L'analyse du PROX permet en tout cas de déceler les grands ensembles potentiellement connectés, pouvant être renforcés par enrichissement.

### **c) Occupation des sols au sein des UPF**

Le pourcentage de recouvrement de la forêt sèche est extrêmement faible, avec en moyenne une occupation de 5,6% toutes UPF considérées. La savane est largement dominante sur la plupart des UPF, notamment les 1, 3, 5 et 6 (39,6% en moyenne dans les UPF), suivi par la végétation arbustive sur substrat volcano-sédimentaire (30,6% en moyenne). Ces deux classes englobent la plupart des faciès dégradés de forêt sèche, témoignant des défrichements et des incendies incessants qui ont ravagés la forêt d'origine. Les opérations de restauration, voire de mise en défens complète sont possibles sur ces faciès. Il est donc complètement envisageable sur le long terme d'augmenter considérablement la surface de formations sclérophylles.

### **d) Occupation sur les corridors**

Les classes à faible coût de gestion sont logiquement beaucoup plus représentées que celles à fort coût au sein des corridors potentiels. La savane et la végétation arbustive sur substrat volcano-sédimentaire sont les classes majoritaires au sein des corridors. Ces deux classes comportent la plupart des stades dégradés de forêt sèche tels que les fourrés à gaïac ou les savanes à niaouli. Les actions de restauration seront donc effectuées en grande majorité sur ces deux classes.

La savane présente un intérêt moindre pour la restauration et demande un effort plus important et un pas de temps plus long pour que l'on puisse observer une évolution vers une forêt sèche. Il conviendra donc de privilégier les zones de végétation arbustives, même si éventuellement certaines zones de savanes peuvent être plus propices après analyse au cas par cas. Les zones de forêt sur substrat volcano-sédimentaire, troisième classe la plus représentée au sein des corridors, doivent

être préservé de par l'importance capitale qu'elles ont dans la connectivité fonctionnelle du paysage.

### e) Forme des patches

Les fragments ont une forme généralement étriquées, avec 80% d'entre eux ayant un indice K inférieur à 0,5. Certains d'entre eux, notamment en zone à reliefs, présentent des ramifications très marquées. Cette disposition est corrélée en général avec la forte érosion au niveau des lignes de crêtes, donnant l'impression que celles-ci sont « pelées ». Sur ces zones, la restauration est quasiment inutile. Il convient de privilégier le renforcement des massifs avec un indice de forme très faible et qui ne sont pas soumis à une forte érosion, afin de rétablir la continuité intra-patch.

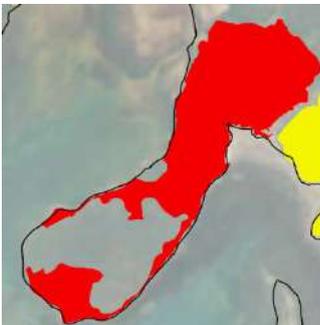


Figure 50 : Patch présentant un indice K faible malgré une forme apparemment compacte

La carte des patches selon leur indice K est disponible en annexe 10 sont totalement objectives et peuvent être modifiées. Comparer la forme d'un patch de très grande surface avec celle d'un patch de très petite surface n'est pas forcément pertinent dans le cas où le grand patch présenterait une grande zone compacte, et une autre zone très étriquée. Le patch en fig. 50 est un exemple de cas où l'indice K est très faible alors que le fragment présente à priori une forme compacte sur la majorité de sa surface.

### f) Importance relative des fragments

L'indice BC\_IIC, utilisé pour déterminer l'importance relative des fragments pour la connectivité, est un outil très intéressant pour diriger les actions sur certains patches, mais aussi pour déterminer des zones de plantations dans le but de « décharger » certains fragments de leur importance en créant de nouveaux « nœuds » de connexion. En l'intégrant au SIG, il permet d'obtenir une visualisation directe et mettre en lumière les fragments très importants dans la connectivité.

- Limites liées aux critères d'importance

Le BC\_IIC est calculé avec les seuls paramètres de l'aire et de distance ENN des patches, signifiant que l'importance des patches dans la connectivité selon ce modèle ne dépend que de ces deux critères. Ce n'est bien évidemment pas le cas lorsque l'on se place à l'échelle du



Figure 51 : BC\_IIC anormalement élevé sur un patch situé sur une île

paysage. Le mode d'occupation des sols n'est notamment pas considéré ici, l'hypothèse d'un coût identique de déplacement pour à travers l'ensemble de la matrice est donc faite. Un patch peu alors sembler occuper une place centrale relativement aux autres dans la connectivité alors qu'il est en réalité probablement moins indispensable qu'il n'y paraît, et vice versa. La fig. 51 représente un fragment situé sur une île, et donc isolé par la mer, qui constitue un obstacle infranchissable pour la plupart des organismes terrestres disperseurs. Il est donc important de prendre des précautions lors de l'interprétation de cet indice, ce qui justifie la nécessité d'une représentation visuelle afin de déceler les anomalies potentielles.

- Limites liées au seuil d'analyse

Le seuil de distance à partir duquel les patches ne sont plus considérés comme connectés, précisé en amont de l'analyse, à une influence importante sur les valeurs de BC\_IIC par patch. Au-delà d'une certaine valeur seuil, tous les fragments sont considérés comme connectés à un niveau plus ou moins élevé. Tester différentes valeurs seuil, détecter les fragments redondants présentant une importance élevée, ou justifier d'une valeur seuil au-delà de laquelle plus aucune connexion n'est établie entre les fragments pourraient permettre de réduire le risque de mauvaise interprétation.

Il n'y a pas de lien réel entre la taille et la forme du fragment, et son importance dans la connectivité selon ce modèle (Birnbaum P. et al., 2016). Cette analyse peut donc permettre de déceler l'importance capitale de petits patches, difficilement détectable par le biais d'autres types d'analyses telles que le calcul de l'indice PROX.

Par manque de temps, nous n'avons pas été en mesure d'aborder d'autres indices proposés par Conefor, tout aussi intéressants et pouvant apporter des informations supplémentaires. L'indice PC notamment (Saura S. & Pascual-Hortal L., 2007) est basé sur un modèle de probabilité offrant la possibilité d'indiquer les chances qu'un organisme se disperse d'un patch à un autre selon la distance entre les deux. Le calcul est ensuite fait en tenant compte de cette probabilité de dispersion. Ce dernier permet aussi de visualiser la modification de l'importance des fragments lorsqu'un fragment hypothétique est ajouté, ce qui n'est pas possible avec l'indice BC\_IIC. Par ailleurs, pour le calcul de l'importance du fragment, la plupart de ces indices utilisent par défaut leur aire, et leur distance ENN. Il est en revanche tout à fait possible d'utiliser d'autres critères, par exemple en substituant l'aire à un indice de qualité écologique calculé auparavant pour chaque fragment, ou encore de substituer les coûts des chemins de moindre-coût aux distances ENN.

En annexe 5 se trouve un tableau récapitulatif de tous les indices, ainsi que les seuils d'analyses utilisés.

## 2. Méthode de dilatation-érosion

Cette technique permet d'identifier rapidement les connectivités potentielles à courte distance les plus directes entre les fragments, et de définir les zones de renforcement intra-patches. Il est impératif de superposer plusieurs sous-trame d'occupation des sols à cette analyse afin d'écarter les classes non pertinentes selon les critères d'analyse définis auparavant. Les conditions topographiques (pente, exposition) peuvent aussi être prises en compte. Il n'existe pas de normes pour déterminer la longueur maximale des corridors identifiés par dilatation-érosion. Cette longueur est déterminée en tenant compte des sous-trames analysées, des guildes d'espèces pris en considération et des facteurs de dispersion des diaspores et des organismes établis. Nous avons choisi une distance maximale de 200m en s'appuyant sur des études de dispersion du pollen par les insectes et le vent, ce qui est discutable car les paramètres de dispersion des graines sont omis. En effet cette distance peut aussi être déterminée en tenant compte entre autres des déplacements de l'avifaune et des animaux disperseurs spécifiques aux forêts sèches. Les rares données précises existantes en Nouvelle-Calédonie ne permettent pas d'être plus précis sur cette distance.

### Recréer des massifs forestiers

L'analyse par dilatation érosion permet d'estimer les surfaces de restauration nécessaires pour recréer certains massifs forestiers. En estimant que la connectivité est déjà établie à 100m, la surface de restauration active nécessaire est évaluée à partir de la superficie de la couche « érosion 200m ». Il est remarquable qu'une restauration efficace et ciblée sur des zones peu étendues puisse être très bénéfique pour former, à partir de plusieurs fragments groupés, un massif forestier cohérent. La fig. 52 permet de donner une idée de l'effet théorique d'une restauration active de moins de 20 ha sur le site prioritaire Népouiri.

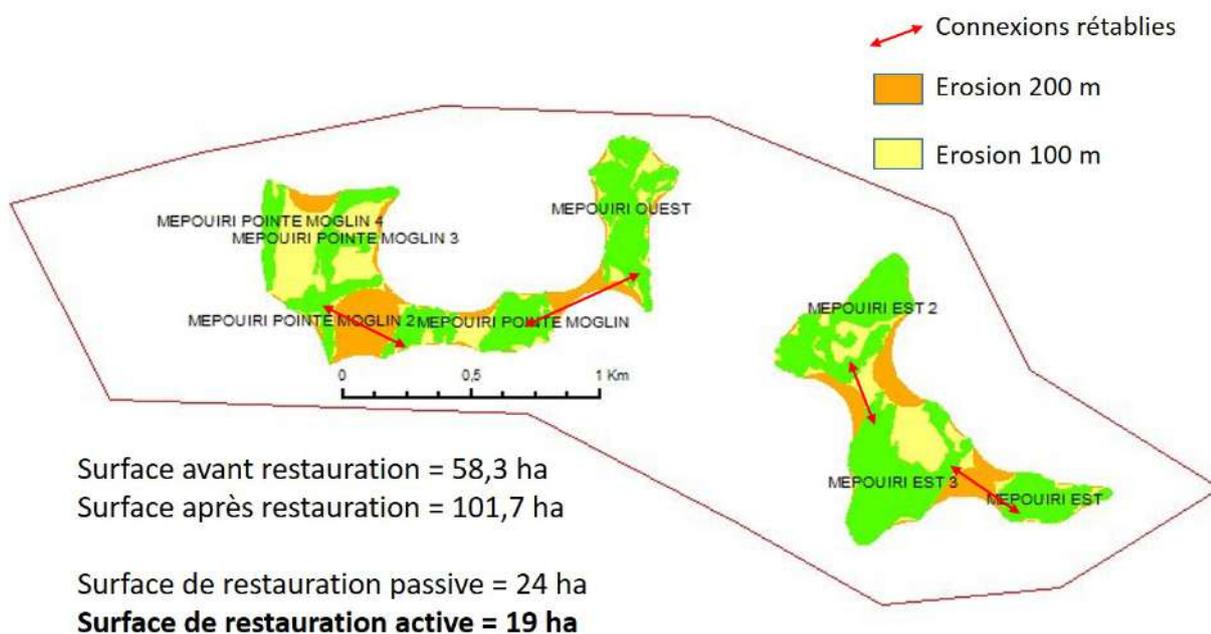


Figure 52 : Exemple de surface de restauration active nécessaire pour rétablir une continuité

### 3. Méthode des chemins de moindre-coût

#### a) Matrice des coûts

La méthode du calcul des chemins de moindre coût a plusieurs fois fait ses preuves lorsqu'il s'agit de caractériser les connectivités d'un paysage. Le coût de chaque classe d'occupation des sols représente généralement la résistance de la matrice à l'évolution des organismes en son sein. Ces coûts sont donc intégralement dépendants des organismes considérés et de leur fonctionnement. La volonté de caractériser les connexions de manière globale (à l'échelle de la Grande Terre), les lacunes importantes de connaissances sur la dispersion des animaux de forêt sèches, le peu d'inventaires ainsi que le contexte particulier des forêts sèches qui constituent un milieu très dégradé et difficilement délimitable, nous a poussé à construire une matrice des coûts de restauration par milieu. Cette matrice, plutôt subjective est basée sur un cortège de connaissances scientifiques locales et internationales. Le choix a été fait d'éliminer les milieux qui n'ont aucune chance d'évoluer vers un climax forêt sèche, afin de localiser aisément des zones où des opérations de restauration sont possibles

#### b) Chemins de moindre-coût et dispersion de la faune

Certaines classes d'occupation du sol que nous avons éliminées dans cette matrice sont tout de même importantes dans la connectivité des forêts de par le rôle qu'elles tiennent dans la dispersion des graines par ornithochorie. C'est en effet le principal facteur de dissémination des graines de plantes de forêts sèches. Pourtant, les coûts de résistance de la matrice paysagère sont très différents entre l'avifaune, et la faune terrestre (insectes, reptiles, etc.), et les chemins de moindre-coût qui s'appliquent pour l'un ou pour l'autre ne sont fondamentalement pas les mêmes (fig. 53). Les oiseaux tendront à procéder par étapes, en survolant les zones qui leur sont hostiles sur une distance maximale caractéristique de leur espèce. Ils seront sujet à moins de contraintes que les animaux rampant forestiers notamment. Ces derniers quant à eux, pourraient voir leur progression complètement entravée par la présence de sol nu, voire même d'une route de quelques mètres

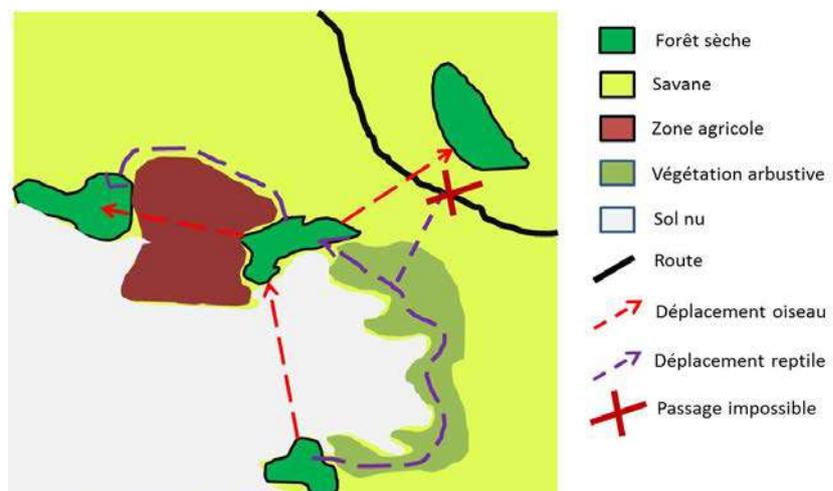


Figure 53 : Schéma de comparaison de déplacement entre un reptile et un oiseau dans la matrice paysagère

de large seulement. De ce fait, il est quasiment impossible de construire une matrice de moindre-coût robuste qui pourrait s'appliquer à tous les organismes de l'habitat, d'où le choix de coût de restauration.

Barré N. et al., 2008 ont notamment mis en évidence que 42,8% des espèces d'avifaune trouvées en forêt sèche se retrouve dans tous les types de végétation (ubiquistes), et 17,1% se retrouvent plus généralement en milieux ouverts. Boissenin M. et al., 2006 préconisent de privilégier les espèces appétantes (fruits colorés) à replanter lorsque les zones de restauration sont sélectionnées. Ce critère entre aujourd'hui en compte lors de la sélection des espèces est faites. On précise que le principal critère de sélection des espèces pour la plantation est leur capacité à résister à des conditions naturelles difficiles (sécheresse, rusticité, etc.). D'autres critères sont additionnés en fonction du site choisi, du sol disponible du comportement et de la patrimonialité de l'espèce. En annexe 11 se trouve une liste d'espèces non-exhaustive utilisées pour les opérations de reforestation.

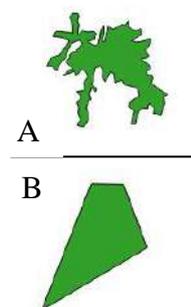
## V. Limites générales de l'étude

### 1. Simplification de la réalité et précision des données

En représentant de manière cartographique un phénomène ou un objet, une abstraction et une simplification de la réalité sont faites pour atteindre un objectif. De ce fait, les données spatiales sont nécessairement incomplètes et inexactes. Il est impossible de représenter parfaitement la réalité. Ainsi, des incertitudes demeurent lors du traitement de l'information géographique, et il est nécessaire de les réduire autant que possible pour obtenir une représentation au plus proche du monde réel (Couclelis H., 2003).

Les données externes utilisées pour cette étude comportent toutes d'importantes imprécisions, qui sont notamment liées au travail à une si petite échelle.

- Le MOS utilisé est d'une précision de 25m x 25m. De plus, cette classification a été validée avec une précision de 75,5%, signifiant que le risque de mauvaise classification est de 24,5%, ce qui est loin d'être négligeable. Cette imprécision se répercute dans une certaine mesure lors du calcul des distances de moindre-coût



**Figure 54 :**  
Exemple de patch  
imprécis dans la  
couche  
gestionnaire

- La couche gestionnaire émise par le CEN n'est pas exhaustive. Il est important de rappeler que 432 polygones de cette couche restent à valider sur le terrain. Certains contours de polygones dessinés « à la main » sont clairement imprécis (fig. 54). En outre, les contours correspondent à la forêt sèche dite « sensus stricto », selon la classification reprise dans une note technique de 2004 (annexe 8) et proposée par Jaffré T. Or dans la nature, une forêt n'a pas de bornes précises et se compose de successions paysagères comprenant son cœur, sa lisière et ses états dégradés. Birnbaum P. et al. 2016, conseillent de mettre fin à la vision binaire forêt/non-forêt et de s'ouvrir à une vision paysagère plus large à l'avenir.

Par ailleurs, la scission entre les deux provinces de la Grande Terre entraîne souvent une hétérogénéité entre les données produites et diffusées, ce qui peut parfois être handicapant lors des études généralisées à tout le territoire.

## 2. Choix effectués pour la représentation des connectivités

### a) Lacunes de connaissances sur la dispersion des diaspores

Au cours de cette étude, nous nous sommes heurtés à d'importantes lacunes de connaissances concernant l'écologie fonctionnelle des formations sclérophylles. La modélisation des connectivités, pour être exacte, nécessite une vision large du fonctionnement de l'habitat, c'est-à-dire un bagage de connaissances exhaustif sur la biologie des espèces vivant dans ce milieu, ainsi que sur leur répartition. Les prospections et relevés de terrain au sein des îlots de forêt sèche étant rares, d'importantes lacunes de connaissances sont identifiées, notamment en ce qui concerne les modes et distances de dispersion du pollen des plantes de forêt sèche. En ce qui concerne la dispersion des graines, plusieurs études ont mis en évidence une prédominance de l'ornithochorie, et soulignent une différence d'appétence entre les fruits produits, conduisant à une dispersion plus importante des plantes produisant les fruits les plus appétents telles que *Dysoxylum bijugum* ou *Arytera arcuata* (Boissenin M., 2006). Ont été aussi mis en exergue les temps de rétention des graines dans l'organisme de plusieurs oiseaux, et leur temps de résidence dans les arbres (Boissenin M., 2006), pourtant aucune étude n'a été menée sur le rayon de déplacement des principaux oiseaux disperseurs (*Zosterops xanthochroa*, *Zosterops lateralis*, *Lalage leucopyga*, etc.).

Des études ayant pour sujet la dispersion du pollen et la dispersion des graines des plantes de forêt sèche seront donc nécessaires par la suite pour caractériser avec une précision accrue les connectivités entre les patches. Des études par capture-marquage-recapture ont d'ores et déjà fait leur preuve pour obtenir ce type d'information.

## **b) Focalisation sur les connectivités structurelles**

L'étude réalisée ici a permis de dégager les connectivités structurelles selon les classes d'occupation des sols sur l'ensemble de la Grande Terre. Elle prend en compte la plupart des formations végétales impliquées dans les connexions entre les patchs de forêt sèche. En revanche les connectivités fonctionnelles ont été peu prises en considération. Cette omission partielle est une conséquence directe du manque de connaissances précédemment exposé. Quelques critères fonctionnels ont été tout de même pris en considération sur dire d'expert ou via la bibliographie internationale. Ces critères entrent notamment dans les décisions prises pour les seuils de distances de certaines des analyses. Ces derniers sont donc discutables et modifiables.

## **c) Construction de la matrice de moindre-coût**

Comme évoqué précédemment, la matrice de moindre-coût sur lequel se base le calcul des distances de moindre-coût reste entièrement discutable et peut être soumise à modification suite à un nouvel apport de connaissances ou à une modification des classes du MOS.

## **d) Critère financier non abordé**

Les connectivités cartographiées et les préconisations données ne tiennent pas compte du budget alloué au CEN pour la restauration et la mise en défens. A l'heure actuelle, le budget alloué à la plantation d'essences de forêt sèche permet un rythme de restauration d'environ 10 ha de forêt sèche par an. En ce qui concerne la mise en défens, les surfaces protégées sont plus étendues, et en 2015, un site de 75 ha sur le site de Pindaï (annexe 9) a pu être entièrement clôturé pour stopper les ravages des cerfs.

Le coût financier est un critère déterminant lors du choix de zones à restaurer, et il est important de définir une surface maximale sur laquelle agir. Dans l'idéal, l'étude pourrait être affinée par la suite en déterminant des sites prioritaires selon la surface de restauration envisageable. De plus Il pourrait être intéressant de classer les sites en fonction de la durée de l'action envisagée (court terme, moyen terme, long terme). Pour illustrer, à raison de 10ha restauré par an, la création d'un stepping-stone de 100 ha serait envisagée sur environ 10 ans, tandis que le renforcement d'un fragment en replantant au niveau des bordures sur 20 ha pourrait être fait en 2 ans.

## VI. Conclusion, Perspectives

### 1. Conclusions sur la méthodologie de cartographie des connectivités

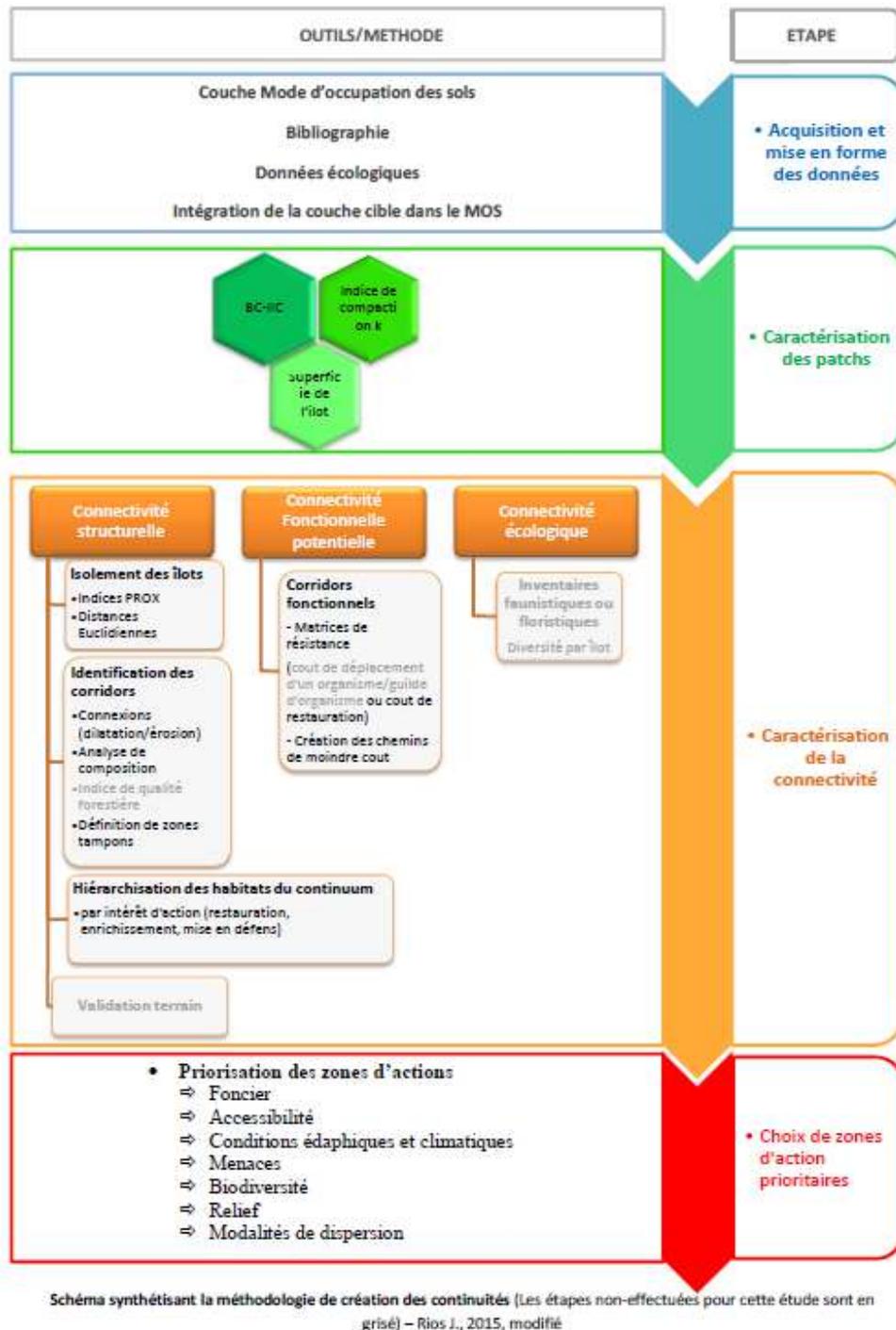


Figure 54 : Schéma globale de la méthodologie de cartographie des connectivités (Rios J., 2016 modifié)

La présente étude a permis dans un premier temps de réactualiser la carte d'expansion potentielle de la forêt sèche en reprenant les critères mis à jour dans le Code de l'Environnement de la Province Sud.

Le développement d'une méthodologie via un SIG a ensuite permis de caractériser les patches de forêt sèche et leur place dans le paysage fragmenté, puis de mettre en évidence les connectivités structurelles potentielles à courte et moyenne distances.

Une méthode d'aide à la décision visant à sélectionner des zones prioritaires est aussi développée, en s'appuyant sur une zone prioritaire en particulier (Pindaï-Nékoro), mais les couches SIG ont été produites pour l'ensemble des UPF permettant la visualisation des connectivités et des critères de priorisation sur la totalité de la Grande Terre.

Les limites qui ont été soulevées concernent la précision des données informatiques (MOS, MNT, relevés d'espèces, couche gestionnaire), certains choix discutables qui ont été fait par consensus, et les lacunes de connaissances vis-à-vis de la dispersion des diaspores en forêt sèche. De plus les rares données portant sur les relevées de faune, et sur les mouvements des animaux disperseurs au sein de la matrice et entre les formations sclérophylles ne permettent pas à l'heure actuelle de déterminer de manière précise et robuste les connectivités fonctionnelles en forêt sèche.

Les techniques développées tout au long de ce stage constituent une base méthodologique solide, mais pouvant être améliorée par la suite, au gré de l'acquisition de nouvelles connaissances sur l'écologie des espèces en forêt sèche. Les seuils de distances utilisés pour le calcul des indices PROX et BC\_IIC sont modulables, de même que les distances utilisées pour la technique de dilatation-érosion, et pour la délimitation des corridors écologique de moindre coût. Néanmoins, ces seuils s'appuient sur une bibliographie internationale variée, et sont donc pertinents dans un contexte d'aide à la décision pour la gestion territoriale à court, moyen et long termes.

Les corridors de moindre coût ont été dessinés afin d'offrir une représentation théorique des connectivités la plus fine possible, sans pour autant être parfaite. D'une part, la précision des données disponibles (MOS, couche gestionnaire forêt sèche) est un important facteur d'erreur. D'autre part, d'un point de vue fonctionnel, les interactions écologiques au sein d'un habitat dans son ensemble sont d'une infinie complexité, imposant une analyse réductrice, quoique robuste et évolutive. Il conviendrait d'envisager une mise à jour de la démarche selon un pas de temps formalisé, pour intégrer les connaissances nouvelles qui seront réunies via de nouvelles études. Par ailleurs, Une démarche du même acabit que celle développée ici, mais appliquée à une zone en particulier et renforcée par des inventaires et des études spécifiques à cette zone en question, renforcerait sans aucun doute la pertinence des conclusions.

L'ensemble du Système d'Information Géographique produit au cours de cette étude pourra être utilisé dans les processus d'aide à la décision lorsqu'il s'agira de déterminer de nouveaux sites de mise en défens ou de plantation. Par ailleurs, La notion de connectivités potentielles et leur représentation affirme la nécessité d'une gestion globale d'un paysage interconnecté, en tenant compte de l'apport de chaque cellules de la matrice paysagère dans cette connectivité, et du rôle que joue chaque organisme dans le fonctionnement de l'habitat considéré. En outre, la méthodologie appliquée ici aux forêts sèches calédoniennes et leur spécificité, pourrait éventuellement être repensée afin d'être adaptée à d'autres milieux fragmentés. En rééditant la matrice de moindre coût, et en redéfinissant de nouveaux seuils de distances adaptés, il est envisageable d'appliquer cette démarche à d'autres habitats par la suite. La figure 54 présente un schéma résumant la méthodologie développée dans sa généralité.

## **2. Conclusion générale**

Son degré de fragmentation très important et le niveau de menace extrêmement élevé qui pèse sur les forêts sèches en Nouvelle-Calédonie font de cet habitat un sujet modèle pour l'étude des connectivités structurelle et fonctionnelle. Depuis quelques années, les écologues ont tiré la sonnette d'alarme vis-à-vis de l'état de dégradation des formations sclérophylles, et ont instamment demandé aux autorités environnementales de mettre en place en urgence des mesures de gestion visant à enrayer leur disparition. Cette écorégion présente un degré de fragmentation tel qu'il est inutile d'entreprendre une gestion écologique « patch par patch », et la nécessité d'une gestion intégrée de l'ensemble du paysage s'est rapidement imposée. Les mesures de protection administratives (notamment par rapport aux grands projets de constructions immobilières ou routières) doivent maintenant prendre en compte le potentiel rétablissement d'une forêt sèche *sensus-stricto*, ce qui commence à être fait avec la création de « zones de vigilance » autour des lambeaux de forêt sèche. Quant aux mesures de restauration ou de mise en défens, celles-ci doivent être envisagées sur des sites sélectionnés à l'avance, là où la création d'une formation sclérophylle permettrait une amélioration majeure de la connexion entre les fragments encore existants. Une telle gestion passe aussi par le dialogue et la coopération entre les différentes instances territoriales, notamment lorsque la protection ou la restauration d'un site étalé sur plusieurs communes s'impose, car il est bon de le rappeler, contrairement à l'être humain, la Nature ne connaît pas de frontières.

# Bibliographie

---

- Allag-Dhuisme F., Amsallem J., Barthod C., Deshayes M., Graffin V., Lefeuvre C., Salles E. (coord), Barnetche C., Brouard-Masson J, Delaunay A., Garnier CC, Trouvilliez J., 2010. *Guide méthodologique identifiant les enjeux nationaux et transfrontaliers relatifs à la préservation et à la remise en bon état des continuités écologiques et comportant un volet relatif à l'élaboration des schémas régionaux de cohérence écologique – deuxième document en appui à la mise en oeuvre de la Trame verte et bleue en France*. Proposition issue du comité opérationnel Trame verte et bleue. MEEDDM ed.
- Ashley M.V., 2010. *Plant Parentage, Pollination, and Dispersal: How DNA Microsatellites Have Altered the Landscape*, Critical Reviews in Plant Sciences, 29: pp. 148–161.
- Barré N., Gay D., Desmoulins F., Selmaoui N., 2008. *Fragmentation of New-Caledonian dry forests reduces bird diversity*, rapport PCFS n°6/2008, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, Institut Agronomique néo-Calédonien.
- Baur A. & Baur B., 1992. *Effect of Corridor Width on Animal Dispersal: A Simulation Study*, Global Ecology and Biogeography Letters 2.2: pp. 52-56. Web.
- Beissinger S.R. & McCullough D.R., 2002. *Population Viability Analysis*, Chicago, The University of Chicago Press (2002), 577 p.
- Birnbaum P., Mangeas M., Maggia L., Ibanez T., Despinoy M., Marmey P., Hequet V., Gomez C., Bideau G., Chambrey C., Vandrot H., Blanchard E., 2016. *Caractérisation des connectivités structurelle et fonctionnelle des paysages fragmentés sur sols ultramafiques*, Projet Corifor, CNRT « Nickel & son environnement, 84 pp.
- Bodin, Ö. & Saura, S. 2010. *Ranking individual habitat patches as connectivity providers: integrating network analysis and patch removal experiments*. Ecological Modelling 221: 2393-2405.
- Boissenin M., Gomez S., Barré N., Chambrey C., Tassin J., 2006. *Interactions entre l'avifaune frugivore et la flore ligneuse en forêt sèche de Nouvelle-Calédonie*. Rapport PCFS n°3/2006, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, Institut Agronomique néo-Calédonien.
- Bonvallet J., Gay J.-Ch., Habert E. (coord.), 2012. *Atlas de la Nouvelle-Calédonie*, Marseille-Nouméa, IRD-congrès de la Nouvelle-Calédonie, 272 p.
- Boquet A., 2005. *Diagnostic écologique de l'interface entre savane à Niaouli, produit de l'activité humaine et forêt naturelle en Nouvelle-Calédonie*, Rapport de stage, DESS « Gestion des Systèmes Agro-Sylvo-Pastoraux en Zones Tropicales », Université Paris XII Val de Marne.

- Boquet A., Chambrey C., Derroire G., Tassin J., 2007. *Modes de colonisation de la savane arborée par des plantes de forêt tropicale sèche en Nouvelle-Calédonie*. Note brève, Rev. Ecol. (Terre Vie) (2007) vol. 62 : pp. 87-91.
- Brouard-Masson J., Cheret M., Letessier L., 2014, *Trame verte et bleue et documents d'urbanisme – Guide méthodologique*, Rapport août 2014, Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, Direction de l'Eau et de la Biodiversité, Sous direction des Espaces Naturels.
- Brunet Y., 2008. *La dispersion du pollen : mécanismes, modélisation et questions actuelles de recherche* [powerpoint slides], retrieved from [https://www.eccorev.fr/IMG/pdf/ECCOREV\\_2008\\_05\\_Brunet.pdf](https://www.eccorev.fr/IMG/pdf/ECCOREV_2008_05_Brunet.pdf)
- Chazeau J., Bonnet de Larbogne L., Potiaroa T., Jourdan H., 1997. *Altération de la diversité faunistique dans un milieu dégradé par le feu : le cas de la forêt sclérophylle* in Jaffré T., Veillon J.-M., Rigault F., Dagostini G., Chazeau J., Bonnet de Larbogne L., Potiaroa T., Jourdan H., 1997. *Impact des feux de brousse sur le milieu naturel en Nouvelle-Calédonie*, Centre de Nouméa, Nouvelle-Calédonie, CORDET, ORSTOM.
- Couclelis H, 2003. *The Certainty of Uncertainty: GIS and the Limits of Geographic Knowledge*. Transactions in GIS, 2003, 7(2): pp. 165-175.
- Crooks K.R., Sanjayan M., 2006. *Connectivity conservation: maintaining connections for nature*. Connectivity Conservation, pp. 1–19.
- De Garine-Wichatitsky M., Spaggiari J., Ménard C., 2004. *Ecologie et impacts des ongulés introduits sur la forêt sèche de Nouvelle-Calédonie*, Païta : Institut Agronomique néo-calédonien, 129 p.
- Desmoulins F. & Barré N., 2004. *Bilan du programme d'inventaire de l'avifaune des forêts sclérophylles*. Port Laguerre (NC) : Institut Agronomique néo-Calédonien, 57 p.
- Fahrig L., 1997. *Relative Effects of Habitat Loss and Fragmentation on Population Extinction*. The Journal of Wildlife Management 61.3 (1997): pp. 603-610. Web.
- Fahrig L., 2003. *Effects of habitat fragmentation on biodiversity*. Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics, 34, pp.487-515.
- Foltête J.C., Clauzel C., Vuidel G., 2012. *A software tool dedicated to the modelling of landscape networks*, Environmental Modelling & Software, 38: pp. 316-327.
- Forman R.T.T., 1995. *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*. Cambridge University Press, 656 p.

- Gillespie T.W. & Jaffré T., 2003. *Tropical dry forests in New Caledonia*, Biodiversity and Conservation 12: pp. 1687–1697, 2003.
- Grange B., 2012. *L'approche paysagère pour des stratégies d'actions en vue d'optimiser la conservation et la restauration d'un écosystème menacé : Exemple de la forêt sèche de Nouvelle-Calédonie*, mémoire de fin d'études, Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage, Angers : Agrocampus Ouest - Centre d'Angers Institut National d'Horticulture et du Paysage, 50 p.
- Gustafson E. J. & Parker G.R., 1994. *Using an index of habitat patch proximity for landscape design*. Landscape and Urban planning no. 29 (1994) pp. 117-130.
- Harper K. A., Macdonald S. E. Burton P. J., Chen J., Brosnoff K. D., Saunders S. C., Euskirchen E. S., Roberts D., Jaiteh M. S. and Esseen P.-A., 2005. *Edge Influence on Forest Structure and Composition in Fragmented Landscapes*. Conservation Biology, 19: pp. 768–782.
- Hély-Alleaume C., 2012. *INC : Incendies et biodiversité des écosystèmes en Nouvelle-Calédonie*, Agence National de Recherche, compte-rendu de fin de projet, programme BDIV 2007, 96 pp.
- Hequet V. & Rigault F., 2007, *Caractérisation floristique de trois sites de forêt sèche mis en défens en Nouvelle-Calédonie – T0 en vue d'un suivi écologique*, Rapport PCFS n°05/2007, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, Institut de Recherche pour le Développement.
- Hequet V., Le Corre M., Rigault F., Blanfort V., 2009. *Les espèces exotiques envahissantes de Nouvelle-Calédonie*, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, Institut de Recherche pour le Développement.
- Hequet V., Rigault F., 2010. *Caractérisation floristique des trois sites de forêt sèche sur le site de Gouaro-Deva en Nouvelle-Calédonie – T0 en vue d'un suivi écologique*, Rapport PCFS n°03/2010, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, Institut de Recherche pour le Développement.
- Ibanez T., Hequet V., Chambrey C., Jaffré T., Birnbaum P., 2016. *How forest fragmentation affects tree species richness ? A critical case study in the biodiversity hotspot of New Caledonia*, Manuscript draft, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, Institut Agronomique néo-calédonien.
- Jaffré T., Morat P., Veillon J., Rigault F., Dagostoni, G., 2001. *Composition and characterisation of the native flora of New Caledonia*. Centre IRD, Documents Scientifiques et Techniques, II4, pp. 1-121.

- Jaffré T., Morat Ph., Veillon J.-M., 1993. *Etude floristique et phytogéographique de la forêt sclérophylle de Nouvelle-Calédonie*, Bull. Mus. natl. Hist. nat., Paris, 4<sup>ème</sup> sér., 15, 1993, section B, Adansonia, n° 1-4 : pp. 107-146.
- Jaffré T., Rigault F., Munzinger J., 2012. « La végétation », pp. 76-80 in Bonvallet J., Gay J.-Ch., Habert E. (coord.), 2012, *Atlas de la Nouvelle-Calédonie*, Marseille-Nouméa, IRD-congrès de la Nouvelle-Calédonie, 272 p.
- Lafargue R., 2012. *Le Droit Coutumier en Nouvelle-Calédonie*, Maison de la Nouvelle-Calédonie, Paris, 21 pp.
- Larrieu L. & Gonin P., 2008. *L'indice de biodiversité potentielle (ibp) : une méthode simple et rapide pour évaluer la biodiversité potentielle des peuplements forestiers*, Rev. For. Fr. LX - 6-2008, pp. 727-748.
- Lowe A.J., Boshier D., Ward M., Bacles C.F., Navarro C., 2005. *Genetic resource impacts of habitat loss and degradation; reconciling empirical evidence and predicted theory for neotropical trees*, Heredity (2005) n°95, pp. 255-273.
- Lowry P.L. II, Munzinger J., Bouchet P., Géraux H., Bauer A., Langrand O., Mittermeier R.A., 2004. « New Caledonia », pp. 193-194 in Mittermeier, R. A., Robles-Gil, P., Hoffmann, M., Pilgrim, J. D., Brooks, T. B., Mittermeier, C. G., Lamoreux, J. L. & Fonseca, G. A. B. 2004. *Hotspots Revisited: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Ecoregions*. CEMEX, Mexico City, Mexico 390 p.
- Lowry P.P., Munzinger J., Bouchet P., Geraux H., Bauer A., Langrand O., Mittermeier R.A., 2004. *New Caledonia. Hotspots Revisited: Earth's Biologically Richest and Most Threatened Terrestrial Ecoregions*. CEMEX, Mexico. pp. 193-197.
- Maitrepierre L., 2012. « Les types de temps et les cyclones, les éléments du climat », pp. 53-60 in Bonvallet J., Gay J.-Ch., Habert E. (coord.), 2012, *Atlas de la Nouvelle-Calédonie*, Marseille-Nouméa, IRD-congrès de la Nouvelle-Calédonie, 272 p.
- Matthews K., 2005. *Identification, cartographie des unités paysagères de Forêt sèche de la Nouvelle-Calédonie et méthodologie d'analyse et d'action*, rapport de stage, WWF Nouvelle-Calédonie, 45 p.
- Maurizot P., Vendé-Leclerc M., « La géologie », pp. 65-68, in Bonvallet J., Gay J.-Ch., Habert E. (coord.), 2012. *Atlas de la Nouvelle-Calédonie*, Marseille-Nouméa, IRD-congrès de la Nouvelle-Calédonie, 272 p.
- McGarigal K., Cushman S.A., Ene E., 2012. *FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps*. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Available at the following web site: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>

- Mile L., Newton A.C., DeFries R.S., Ravilious C., May I., Blyth S., Kapos V. and Gordon J.E., 2006. *A global overview of the conservation status of tropical dry forests*, Journal of Biogeography (J. Biogeogr.) (2006) 33, pp. 491–505.
- Morat, P., T. Jaffré, F. Tronchet, J. Munzinger, Y. Pillon, J.-M. Veillon and M. Chalopin, 2012. *Le référentiel taxonomique Florical et les caractéristiques de la flore vasculaire indigène de la Nouvelle-Calédonie*, Adansonia sér. 3 34(2): pp. 177-219.
- Morse L.E., Randall J.M., Benton N., Hiebert R., Lu S., 2004. *An Invasive Species Assessment Protocol : Evaluating Non-Native Plants for Their Impact on Biodiversity. Version 1*, NatureServe, Arlington, Virginia.
- Myers, N., 1988. *Threatened biotas : 'hot spots' in tropical forests*. The Environmentalist (3): pp. 187-208.
- Noullet M., 2007. *Valorisation de la FS de Nouvelle-Calédonie : Etude des plantes utiles de la zone des aires coutumières Paicî-Camuki et Ajië-Aro*, Master Ecologie de la Biodiversité, Université de Montpellier, 21 p.
- Opdam P., Steingröver E., van Rooij S., 2006. *Ecological networks: A spatial concept for multi-actor planning of sustainable landscapes*, Landscape and Urban Planning 75 (2006), pp. 322–332.
- Opdam p., Van apeldoorn R., Schotman A., Kalkhoven J., 1993. *Population responses to landscape fragmentation*. Landscape Ecology of a Stressed Environment, pp. 147–171.
- Pascual-Hortal, L. and Saura, S. 2006. *Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation*. Landscape Ecology 21 (7): 959-967.
- Reimoser F., Gossow H., 1996. *Impact of ungulates on forest vegetation and its dependence on the silvicultural system*, Forest Ecology and management n°88, pp. 107-119.
- Rios J., Lefeuvre J.C., 2011. *Continuités écologiques dans le grand sud de la Nouvelle-Calédonie - Phase II: application d'une méthodologie et réalisation d'une cartographie préparatoire*, Conservation International.
- Rios J., Lefeuvre J.-C., Haouet S., 2015. Conservation International, 92 p., CONFIDENTIEL.
- Saura, S. and Pascual-Hortal, L. 2007. *A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study*. Landscape and Urban Planning 83 (2-3): 91-103.

- Saura, S. and Torné, J. 2009. *Conefor Sensinode 2.2: a software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity*. Environmental Modelling and Software 24 (1): 135-139.
- Tischendorf L. & Wissel C., 1997. *Corridors as Conduits for Small Animals: Attainable Distances Depending on Movement Pattern, Boundary Reaction and Corridor Width*, Oikos 79.3: pp. 603-611. Web.
- Urban D.L., Minor E.S., Treml E.A., Schick R.S., 2009. *Graph models of habitat mosaics*, Ecology Letters, (2009) 12: pp. 260–273.

## Sitographie

---

- <http://www.cen.nc/>, consulté le 11 avril 2016.
- [http://www.collectivites-locales.gouv.fr/statuts-nouvelle-caledonie-et-polynesie#Statut\\_nv-cal](http://www.collectivites-locales.gouv.fr/statuts-nouvelle-caledonie-et-polynesie#Statut_nv-cal), consulté le 12 avril 2016.
- <http://www.reseau-cen.org/>, consulté le 11 avril 2016.
- International Union for Conservation of Nature, <http://www.iucnredlist.org>, 2016, consulté le 4 juillet 2016.
- Liste du Patrimoine Mondial de l'UNESCO, « Lagons de Nouvelle-Calédonie : diversité récifale et écosystèmes associés », <http://whc.unesco.org/fr/list/1115/>, consulté le 25 juin 2016.
- Wikipédia, « Conservation International », [https://fr.wikipedia.org/wiki/Conservation\\_International](https://fr.wikipedia.org/wiki/Conservation_International), 9 octobre 2015, consulté le 12 avril 2016.
- Wikipédia, « Conservatoires d'Espaces Naturels », [https://fr.wikipedia.org/wiki/Conservatoire\\_d%27espaces\\_naturels](https://fr.wikipedia.org/wiki/Conservatoire_d%27espaces_naturels), 19 mars 2016, consulté le 11 avril 2016.
- Wikipédia, « Fonds mondial pour la Nature », [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonds\\_mondial\\_pour\\_la\\_nature](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonds_mondial_pour_la_nature), 23 juin 2016, consulté le 24 juin 2016.
- [www.conservation.org/](http://www.conservation.org/), consulté le 12 avril 2016.
- [www.panda.org/](http://www.panda.org/), consulté le 24 juin 2016.
- [www.worldwildlife.org/](http://www.worldwildlife.org/), consulté le 24 juin 2016.