

Projet ANR-07-BDIV-008 INC : Incendies et biodiversité des écosystèmes en Nouvelle-Calédonie Programme BDIV 2007
--

A	IDENTIFICATION	3
B	RESUME CONSOLIDE PUBLIC	3
B.1	Résumé consolidé public en français	3
B.2	Résumé consolidé public en anglais.....	4
C	MEMOIRE SCIENTIFIQUE	6
C.1	Résumé du mémoire.....	6
C.2	Enjeux et problématique, état de l'art	6
C.3	Approche scientifique et technique.....	8
	Ecosystèmes et Biodiversité (WP1)	8
	Pratiques humaines (WP2)	9
	Météorologie et Climatologie (WP3)	9
	Feux : Régime et comportement (WP4)	9
	Modélisation de l'aléa (WPA)	9
	Modélisation - Système d'Information – Système d'Alerte (WPB-D)	10
C.4	Résultats obtenus.....	10
	Ecosystèmes et Biodiversité (WP1)	10
	Pratiques humaines (WP2)	10
	Météorologie et Climatologie (WP3)	11
	Feux : Régime et comportement (WP4)	11
	Modélisation de l'aléa (WPA)	11
	Modélisation - Système d'Information – Système d'Alerte (WPB-D)	11
C.5	Exploitation des résultats	12
C.6	Discussion	12
C.7	Conclusions	13
C.8	Références	13
D	LISTE DES LIVRABLES	14
E	IMPACT DU PROJET	16
E.1	Indicateurs d'impact	17
E.2	Liste des publications et communications.....	18
	Articles de rang A	18
	Conférences	19

Articles de vulgarisation	19
Thèses et Post-doc	19
Masters	19
Rapports techniques	20
E.3 Liste des éléments de valorisation	20
E.4 Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires)...	22
F ANNEXES	24
F.1 Etude du risque incendie sur les principales formations végétales en Nouvelle-Calédonie en terme de diversité végétale.....	25
F.2 Analyse du risque incendie en Nouvelle-Calédonie : une anthropisation complexe des paysages entre héritage et adaptations contemporaines	40
F.3 Programme de recherche INC 2008-2012 - Contribution du WWF-France	56
F.4 Eléments pour le rapport final, de la participation de Météo- France au projet INC (Incendie en Nouvelle-Calédonie).....	62
F.5 Modélisation de la probabilité de démarrage incendie sur la Grande-Terre : approche intégrée pluridisciplinaire	63

A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	INC
Titre du projet	Incendies et biodiversité des écosystèmes en Nouvelle-Calédonie
Coordinateur du projet (société/organisme)	Christelle Hély-Alleaume, EPHE
Période du projet (date de début – date de fin)	Janvier 2008 – juin 2012
Site web du projet, le cas échéant	

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Madame Christelle Hély-Alleaume
Téléphone	04 99 23 21 80 poste 1122
Adresse électronique	Christelle.hely-alleaume@univ-montp2.fr
Date de rédaction	2 août 2012

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	Part. 1, UMR CEREGE, CNRS, Christelle Hély-Alleaume Part. 2, UMR ESPACE-DEV, IRD, Marc Despinoy Part. 3, UMR AMAP (BIODIVAL), IRD, Jérôme Munzinger Part. 4, METEO-France, Luc Maîtreperrière Part. 6, EMAX, IRSTEA (EX CEMAGREF), Thomas Curt Part. 7, IFP (AMAP), INRA, Cédric Gaucherel Part. 8, WWF, Hubert Géraux
---	--

B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

B.1 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

Biodiversité et incendies en Nouvelle-Calédonie : risque et vulnérabilité des écosystèmes

Créer un outil d'aide à l'évaluation du risque de perte de biodiversité terrestre en Nouvelle-Calédonie en réponse aux incendies

La Nouvelle-Calédonie (NC), hotspot mondial de biodiversité, est menacée par les feux. Le projet INC visait à analyser les interactions entre écosystèmes, pratiques humaines, climat et incendies, et à développer un outil pour suivre simultanément ces composantes dans l'espace et le temps afin d'évaluer le risque de perte de biodiversité. Forêts, maquis, et savanes furent analysés en termes de diversité spécifique (végétale et fourmis), et de combustibilité. Les pratiques humaines induisant des feux furent étudiées notamment via des enquêtes, et le climat et la météorologie par des mesures et des simulations afin notamment de produire un indice d'aléa de feu amélioré. L'historique des feux (2000-2011) fut reconstruit par télédétection, et le comportement du feu modélisé afin d'estimer la susceptibilité à brûler des écosystèmes à l'échelle de la NC. Le modèle de risque, déclinable à terme en un système d'alerte opérationnel pour gérer les moyens de lutte et aménager le

territoire, intègre déjà ces composantes dans un système d'information spatialisé et les combine dans un modèle stochastique afin de modéliser le risque généré par les feux sur la biodiversité en tout point de la NC.

Du terrain aux modèles mécanistes et stochastiques: une approche pluridisciplinaire et multi échelle au service de la biodiversité calédonienne

Le projet INC repose sur un échantillonnage permettant le changement d'échelle depuis le paysage avec quelques sites témoins analysés en détail (Aoupinié et Montagne des sources) vers l'île de Grande Terre entière avec beaucoup de sites dont l'échantillonnage a été allégé. Ont ainsi été traitées les composantes de ce système complexe : biodiversité, combustibles, et pratiques humaines. Différentes archives ont été utilisées : les photographies aériennes depuis 1950 pour quantifier la régression des forêts et les images satellites (MODIS/Landsat) pour construire le premier historique des feux (date, point d'ignition, étendue, écosystèmes touchés). Au-delà des analyses disciplinaires, qui ont permis d'accéder à des informations capitales pour la NC (voir résultats ci-dessous), le projet INC a développé un outil générique, reposant sur des modèles stochastique (réseau bayésien) et déterministe (FlamMap), permettant de coupler les informations pertinentes des composantes précédentes, afin d'évaluer le risque de perte de biodiversité et son origine (aléa d'ignition, vulnérabilité des écosystèmes susceptibles de brûler, ou enjeux en terme de diversité, de richesse ou d'endémicité).

A l'échelle de l'île, INC a produit 1) des cartes de biodiversité (archives et données multisources) sur la richesse spécifique des types de végétation et l'endémisme; 2) un nouvel Indice Forêt Météo (IFM) de départ de feu opérationnel dès 2010; 3) l'historique des feux par télédétection (2000-2011); 4) un modèle bayésien expliquant et localisant les départs de feux intégrant, entre autres, la topographie, l'IFM et les distances aux routes et tribus; 5) un modèle de risque de perte de biodiversité intégrant tous ces produits. INC a aussi produit des résultats sur la dynamique et la recolonisation locale post incendie dans plusieurs types d'écosystèmes (végétation et fourmis).

Le projet INC a financé le fonctionnement de 4 thèses, et obtenu les bourses correspondantes auprès du CNRS (Ibanez), du Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur (Barbero), de la Province Sud de Nouvelle-Calédonie (Berman) et d'un cofinancement entre Province Nord de Nouvelle-Calédonie et MRES (Toussaint). A ce jour, INC compte 8 publications de rang A, 8 soumises et en prépare plusieurs autres. Le nouvel Indice de risque de départ de feu (IFM) est un produit appliqué et opérationnel né de INC.

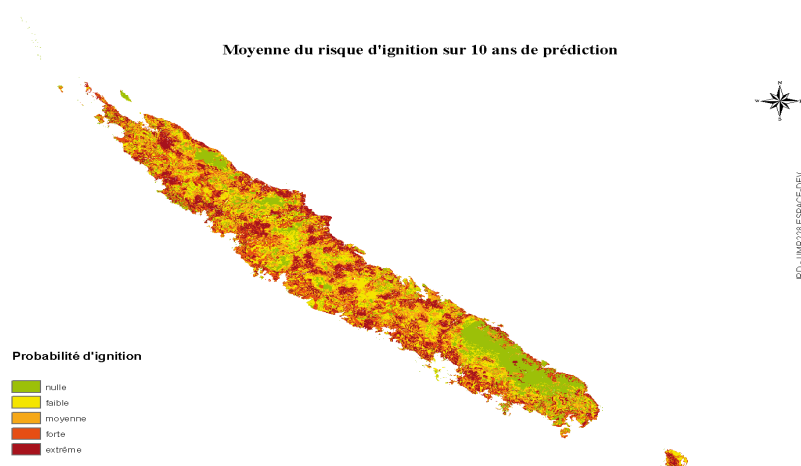


Figure 1. Probabilités d'ignitions calculées sur la période 2000-2010 à partir du modèle bayésien incluant la topographie, des indices intermédiaires de l'Indice Forêt Météo, et les distances aux routes et aux tribus.

Le projet INC est un projet de recherche fondamentale à but appliqué coordonné par le CNRS. Il associe aussi des laboratoires IRD, IRSTEA, et INRA, ainsi que METEO-France, le WWF France et le CSIRO Australien (Centre de Darwin). Le projet a commencé en janvier 2008 et a duré 54 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 995 k€ pour un coût global de l'ordre de 3500 k€.

B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

Biodiversity and fires in New Caledonia: Fire risk and ecosystem vulnerability

Providing a decision tool to assess the erosion of biodiversity in New Caledonia due to fires

New Caledonia (NC) is a biodiversity hotspot whose conservation is threatened by fires. The INC Project aimed at analyzing interactions between ecosystems, human activities, climate and fires in order to provide a modeling tool capable to analyze spatially and temporally these components and assess the risk of biodiversity erosion. Forests, shrublands and savannas have been studied in terms of plant and ant diversity, and as fuels. Human activities inducing fires have been studied through enquiries, and both weather and climate have been analyzed using field measurements and simulations to produce and improve a fire hazard index. Fire history (2000-2011) has been reconstructed from fire scars using remote sensing, and fire behavior has been modeled in the different ecosystems in order to assess their fire susceptibility over the whole NC. This modeling tool has come in an operational alert system designed for land management. It integrates the different components into a spatially-explicit information system, and combines them into a dynamic and non-linear model in order to model the integrated fire risk endured by biodiversity in the whole NC.

From the field to the mechanistic and stochastic models: a multidisciplinary and multi-scale approach designed for New-Caledonian biodiversity

The INC project rests on a multi-scale sampling from the landscape-scale with some small study sites which have been studied extensively (Aoupinié and Montagne des Sources) to the whole NC. At each scale we studied different components of this complex system: biodiversity, fuels, fires, and human activities. Archives documents have been studied including aerial photographs since 1950 to quantify the forest regression, and remote sensing data (MODIS/Landsat) to reconstruct the first fire history available for NC (data of fires, ignition points, burned area, and ecosystems burned). Beyond studies specific to each WP, which have provided important information for NC (see below) the INC Project has provided a generic tool based on a statistic model (partly Bayesian) allowing to couple the above-mentioned information and to assess the potential threat to biodiversity and its origin (fire ignition hazard, ecosystem's vulnerability, or ecosystem's richness, diversity and endemism).

At the scale of the whole NC, the INC project has provided: 1) a biodiversity map based on multiple databases and indicating the richness, diversity and endemism specific to each ecosystem; 2) a new Fire Weather Index (FWI) for fire ignition and operational since 2011 ; 3) a fire history by remote sensing (2000-2011); 4) a Bayesian model explaining and localizing fire ignitions from topography, FWI and the distance to the nearest road and tribe; 5) a risk model indicating the probability of biodiversity loss from the previous information. The INC Project has also provided local results on the post-fire regeneration and dynamics for several ecosystems (plants and ants).

The INC Project has financially supported four PhD students, and gained PhD grants from CNRS (T. Ibanez), the French Ministry for Research and Education (MRES) (R. Barbero), the southern Province of New-Caledonia (M. Berman) and a co-funding from the Northern Province of New-Caledonia and MRES (M. Toussaint). To that date, the INC Project has published 8 A-ranked papers, 8 are submitted, and others are prepared or scheduled. The new FWI (IFM) is an operational product of the INC Project.

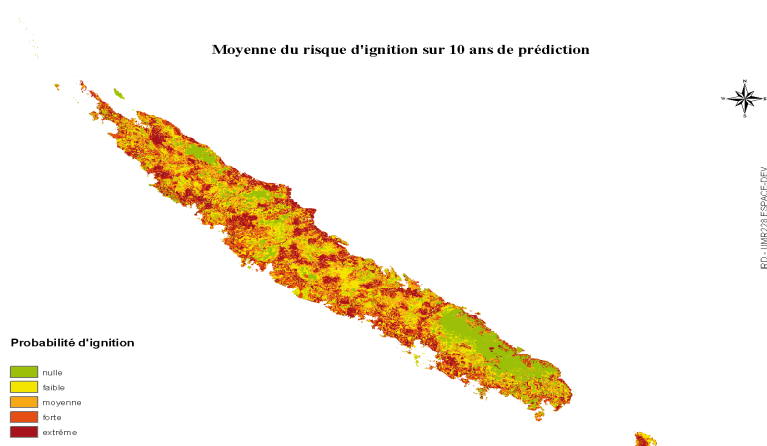


Figure 2. Mean ignition probabilities computed over the 2000-2010 period from the bayesian model that takes into account topography, the Fire Weather Index indices as well as the distance to roads and tribes.

The INC project is a fundamental research program with practical relevance coordinated by CNRS. It associates several research laboratories: IRD, IRSTEA, INRA, METEO-France, WWF France, and the Australian CSIRO (Darwin centre). The project started in January 2008 and has lasted for 54 months. It has been funded by ANR for 995 k€, for a global cost of ca. 3500 k€.

	Compte-rendu de fin de projet	

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

Mémoire scientifique confidentiel : oui. Le consortium n’existait pas avant le démarrage du projet, les efforts se sont concentrés à atteindre les objectifs proposés pour chaque livrable et workpackage, depuis l’acquisition des données fondamentales disciplinaires jusqu’aux modèles et prototype d’outils. En conséquence, les données ne sont que partiellement publiées au jour de la rédaction du présent rapport et 2 thèses sur les 4 effectuées dans INC sont en cours, dont une qui s’achèvera en 2014. Nous demandons donc au minimum un an de délai avant sa publication.

C.1 RESUME DU MEMOIRE

La Nouvelle-Calédonie (NC) est un haut-lieu de biodiversité mondiale dont la conservation semble être menacée par les incendies. Le projet INC visait à analyser les interactions entre 4 composantes (écosystèmes, pratiques humaines, climat et incendies), et à développer un outil pour suivre simultanément ces composantes dans l’espace et le temps afin d’évaluer le risque de perte de biodiversité. Le projet INC a utilisé sur un double échantillonnage permettant de changer d’échelle depuis le paysage avec des sites témoins analysés en détail (Aoupinié et Montagne des sources) vers l’île de Grande Terre entière grâce à de nombreux sites pour lesquels l’échantillonnage a été allégé. Les principaux écosystèmes (forêts, maquis, et savanes) ont été analysés en termes de diversité spécifique végétale et myrmécologique (fourmis), ainsi que de combustibilité. Les pratiques humaines induisant des feux ont été étudiées notamment via des enquêtes, et le climat et la météorologie ont été analysés à partir des données de stations et de simulations afin notamment de produire un indice d’aléa de feu amélioré. L’historique des feux (2000-2011) a été reconstruit par télédétection (MODIS et Landsat) et le comportement du feu a été modélisé dans les écosystèmes afin d’estimer leur susceptibilité à brûler à l’échelle de la NC. Le modèle de risque final, déclinable à terme en un système d’alerte opérationnel pour la gestion des moyens de lutte et l’aménagement du territoire, repose sur des modèles stochastique (réseau bayésien) et déterministe (FlamMap), permettant de coupler les informations pertinentes des 4 composantes, et évalue le risque de perte de biodiversité et son origine (aléa d’ignition, vulnérabilité des écosystèmes susceptibles de brûler, ou enjeux en terme de diversité, de richesse ou d’endémicité). Le projet INC a permis d’acquérir des informations de première importance pour la NC et les produits intermédiaires comme les résultats issus des analyses locales seront utilisés par les acteurs de la politique publique de conservation de la biodiversité via l’aménagement du territoire, la sensibilisation, la prévention et la lutte contre les incendies.

C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L’ART

Problématique et Enjeux: Les feux en Nouvelle-Calédonie sont perçus comme récurrents et menaçant un point chaud de biodiversité mondiale (hotspot)

La Nouvelle-Calédonie (NC) a de loin, le plus fort taux d’endémisme végétal rapporté à la surface, et ce au niveau mondial [1], mais le territoire a perdu une grande partie de sa végétation d’origine, si bien qu’il fait partie des “hotspots” de biodiversité [2] et demande aujourd’hui une attention particulière en terme de conservation pour les générations futures [3, 4]. En effet, bien qu’ils aient existé en NC au début de l’Holocène, les feux avaient un régime naturel jusqu’à il y a environ 4000 ans BP [5]. Ce n’est que suite à l’arrivée des premiers Mélanésien, et aux colonisations successives, que les feux sont devenus de plus en plus anthropiques au point qu’aujourd’hui les incendies sont exclusivement allumés par l’homme (ex : agriculture, pratiques culturelles, chasse ...) [ex. 6]. Malgré des moyens de lutte contre les incendies de plus en plus lourds, les feux en NC menacent de plus en plus les populations, les habitations, et au-delà les écosystèmes (fragmentation des habitats et détérioration de leur qualité) car ils augmentent en nombre et en superficie (amplification durant les années El Niño, qui devraient être plus fréquentes du fait des changements climatiques globaux). Or, l’IUCN indique qu’il en va de la responsabilité collective de développer des systèmes efficaces de suivi des écosystèmes dans ces régions à forte diversité et endémisme qui sont menacés par des perturbations tels que les incendies, et ce pour le devenir de la planète entière [7].

Etat de l’art sur les écosystèmes, le climat, les incendies et les activités humaines en NC avant le démarrage du projet INC

Les principaux écosystèmes de NC sont les savanes (6000 km²), les maquis miniers, les fourrés et les forêts denses humides (1800 km²). Les études antérieures ont montré que la biodiversité et les taux d'endémismes sont maximum dans les forêts sempervirentes mais que ces forêts sont également les plus sensibles aux incendies [8, 9]. Bien que certaines forêts, comme la forêt sèche, comptent parmi les plus menacées de disparition au monde [10], leur capacité à brûler n'avait jamais jusqu'à maintenant été évaluée, que ce soit en terme de composition et quantité de combustibles, ou bien de leur structure interne pouvant favoriser la propagation de la flamme horizontalement et verticalement vers la couronne des arbres. Bien que la biodiversité totale diminue quand les savanes remplacent les forêts brûlées, l'exclusion prolongée du feu ou le passage de feux peu intenses peut inverser la tendance [11]. Or, malgré les nombreux travaux des chercheurs en NC, les connaissances sur la biodiversité, qu'elle soit végétale ou animale, étaient encore loin d'être exhaustives quand le feu de la Montagne Des Sources, très destructeur (4300 ha et 3 aires protégées touchées), a réveillé la conscience collective et initié le projet INC en réponse à l'appel du WWF.

Le climat subtropical en NC présente une saison sèche qui varie de 3 à 6 mois de la côte Est à la côte Ouest [12]. Aucune étude n'avait jusqu'à là analysé le lien entre les feux et la variabilité climatique, alors que les statistiques de NC montrent que les surfaces brûlées sont beaucoup plus importantes durant les années associées à l'ENSO (El Niño/Southern Oscillation), certainement parce que les conditions plus fraîches, mais surtout plus sèches [13] induisent un stress hydrique végétal et donc une meilleure propension à brûler, augmentant ainsi l'aléa de départ de feu et le risque de propagation [12]. Il nous semblait donc important, comme proposé par Mechoso et al. [14] en zone tropicale pacifique, que l'outil à développer pour suivre l'évolution du risque de feu intègre la variabilité climatique intra- et inter-annuelle.

Les études antérieures menées sur les comportements humains avaient montré que les populations calédoniennes allument intentionnellement des feux pour 4 raisons principales : la protection des champs contre les espèces invasives et leur nettoyage avant mise en culture, la recherche de nourriture (chasse), la communication (plus souvent lors de conflits), ou bien par plaisir [ex. 15, 16, 17]. Malgré le grand nombre de feux allumés, les auteurs avaient conclu que tous ne se transforment pas en incendies destructeurs, et que ces derniers surviennent plutôt en cas de contexte social difficile, défavorisé, ou bien par manque d'expérience de l'usage agricole du feu. La tradition orale et l'éducation font que les personnes âgées et les enfants semblent être les deux groupes les plus sensibilisés au risque d'incendies, alors qu'à l'opposé les adultes actifs considèrent le feu comme un outil masculin, traditionnel et courant à la chasse. Cependant, le feu de la MDS a participé au réveil de la prise de conscience collective car les Calédoniens; ruraux et citadins ont reconnu que les forêts et maquis brûlés altéraient le bien-être des populations rurales, le climat social citadin, l'environnement et la biodiversité.

Le feu est une perturbation naturelle mondiale qui participe à la dynamique de nombreux écosystèmes. Alors que les feux ont été abondamment étudiés dans les zones boréales, tempérées, et intertropicales africaines, notamment par les membres du projet [18-22], peu d'études ont analysé le régime actuel des feux dans les écosystèmes tropicaux humides [9] et aucune en NC. Pourtant, des analyses de charbons ont démontré que les écosystèmes en NC qui avaient enregistré des feux naturels jusqu'à il y a 4000 ans ont été profondément modifiés suite aux différentes colonisations de l'Archipel [5]. Depuis ce temps des premiers Mélanésiens, les feux sont devenus de moins en moins naturels pour n'être plus aujourd'hui que des feux anthropiques qui sont allumés très tôt dans la saison sèche et se manifestent très longtemps, prolongeant d'autant la saison dite de feu, et dont le nombre et les superficies brûlées semblent en constante augmentation. Le comportement du feu, une fois l'incendie démarré, dépend de la quantité et de la qualité sèche du combustible, de la météorologie et de la topographie. Lorsque ces caractéristiques sont connues, les vitesses de propagation et l'énergie dégagée au cours de l'incendie peuvent être modélisées [23-25]. Par contre, concernant le démarrage du feu, jusqu'à maintenant les outils développés tenaient uniquement compte de l'aléa météorologique, sans considérer les activités humaines potentiellement responsables des départ de feu [26-28], ce qui dans le contexte de NC représentait un point faible et un challenge. C'est d'ailleurs pour cette raison que Météo-France à Nouméa utilisait avant le projet INC l'indice PREVIFEU, basé sur une estimation de la quantité d'eau dans le sol, du vent moyen, du nombre de jours sans pluie et des dernières quantités d'eau tombées.

C'est dans ce contexte international et régional que les partenaires du projet INC ont créé un consortium dominé par la recherche et dont l'objectif était d'analyser les relations entre écosystèmes, pratiques humaines, climats et incendies, afin d'en améliorer la gestion et de limiter l'impact des feux à venir. Le projet INC voulait créer un outil appliqué permettant d'évaluer les risques de pertes de biodiversité liés aux incendies à l'échelle de l'île de la Grande Terre. Cet outil prédictif doit permettre d'estimer le risque de perte

de biodiversité généré par les feux en considérant la richesse, l'endémisme et la vulnérabilité des écosystèmes, les aléas météorologiques et humains de départ de feu et les enjeux en cas de propagation.

C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Le projet INC repose sur 4 workpackages disciplinaires (Figure 3) dont les analyses ont permis d'acquérir des connaissances fondamentales préalables à l'analyse de risque et à la construction du modèle et de son outil appliqué sous forme de système d'alerte. Les membres INC ont souhaité travailler le plus possible selon deux échelles spatiales afin de faciliter le passage du local, défini d'après des sites pilotes, à l'île entière. Ainsi, toutes les composantes du projet ont été étudiées en détail sur les deux sites pilotes (massif de l'Aoupinié sur substrat volcano-sédimentaire et massif de la Montagne des Sources (MDS) sur substrat ultramafique). Les résultats les plus pertinents ont été soit extrapolés à la NC entière via un échantillonnage rapide mais allégé, soit mis en relation avec des variables dont les valeurs avaient un sens à l'échelle de l'île et variaient significativement (analyses socio-économiques). Au final, concrètement, le projet INC s'est articulé autour de 5 WP (WP1 à WP4 et WPA), les trois derniers (WPB-D) ayant été regroupés en un 6^{ème} WP. C'est sur cette base qu'est présenté le projet.

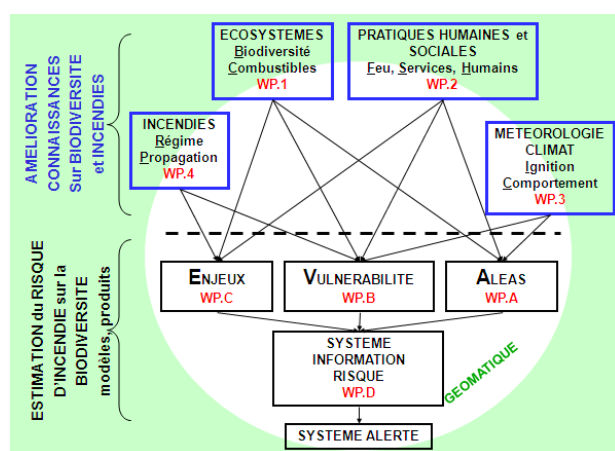


Figure 3. Structure du projet INC présentant des Workpackages (WP) d'acquisition de connaissances fondamentales disciplinaires (WP1 à WP4), préliminaires à l'analyse du risque de perte de biodiversité face aux incendies (WPA à WPD). Le projet INC considère la Géomatique comme une discipline transversale.

ECOSYSTEMES ET BIODIVERSITE (WP1)

A partir de données multi-sources des cartes d'indices de biodiversité végétale ont été réalisées à l'échelle de l'île (300m résolution) et validées à partir des données récoltées dans 174 parcelles forestières (20mx20m) et des données d'herbier (partenaires 2 et 3, *Annexe F1*). En parallèle, 123 parcelles réparties sur la NC ont été échantillonnées pour caractériser les combustibles et la structure verticale des écosystèmes (partenaire 1) afin de créer une typologie pour les simulations du comportement du feu [WP4, 29]. Toutes ces données entrent dans le modèle final de risque (WPB-D). L'important travail de terrain a mis en évidence des espèces nouvelles pour la science à l'Aoupinié, dont certaines sont en cours de description [30].

Sur l'Aoupinié (Thèse Ibanez), l'analyse de photos aériennes (1950-2000) a permis d'abord de caractériser l'évolution du couvert forestier [31] puis de sélectionner des zones de recolonisation forestière active afin d'analyser les successions secondaires [32] et les traits de résistance au feu des principales espèces [33]. La structure et la composition des zones de transitions savane/forêt ont été analysées afin de mieux connaître leurs dynamiques [34]. Les effets de bords microclimatiques, pouvant favoriser la propagation du feu de la savane vers la forêt et la contraction forestière, ont aussi été mesurés à l'aide de sondes microclimatiques [35]. Les fourmis ont été analysées aux deux échelles spatiales (Thèse Berman) et l'étude de l'impact des feux sur les communautés a requis un protocole d'échantillonnage adapté aux particularités de la myrmecofaune NC [36]. Les specimens furent identifiés à Darwin (CSIRO-partenaire 7), idéalement jusqu'à l'espèce, et les espèces non encore décrites furent classées en morpho-espèces. Les identifications morphologiques des *Pheidole* ont été confirmées par des outils moléculaires (collaboration américaine). La collection photographique digitale de la collection de référence sera prête fin 2012. La génétique a été réintroduite dans INC par M. Berman (bourse Univ. Charles Darwin de 3KAU\$) pour étudier la fragmentation de la forêt primaire sur les populations de *Leptomyrmex pallens* via 13 marqueurs microsatellites et un marqueur mitochondrial.

PRATIQUES HUMAINES (WP2)

- Le premier objectif était de contribuer à la modélisation du risque incendie à l'échelle de la NC en identifiant les critères sociaux spatialisables influant l'aléa incendies. Des corrélations ont donc été recherchées entre les différents critères de géographie humaine, de démographie et de structure sociale renseignés à l'échelle de la NC et la localisation des démarrages d'incendies détectés par le satellite MODIS (1000 feux en 10 ans) (tâche 2.1, Annexe F2).
- Le second objectif était de décrire sur sites d'étude les pratiques du feu à risque responsables des départs de feux afin d'orienter les politiques publiques de sensibilisation et de prévention. Des enquêtes ont donc été menées pour analyser les représentations et les pratiques du feu des populations locales (tâche 2.2) et une analyse participative et prospective sur les méthodes de prévention et des politiques publiques des incendies a été initiée (tâche 2.3, Annexe F3) en s'appuyant sur les résultats aux deux échelles spatiales.

METEOROLOGIE ET CLIMATOLOGIE (WP3)

- En s'appuyant sur l'historique des feux MODIS obtenu (WP4), la comparaison des indices disponibles pour évaluer l'aléa météorologique de départ du feu dans le monde (partenaire 4) a retenu l'Indice Forêt Météo (IFM) qui remplace en mode opérationnel depuis septembre 2010 l'indice PREVIFEU (Annexe F4).
- À l'IFM quotidien, INC ajoute l'indice saisonnier EDI (Effective Drought Index, partenaire 1, Thèse Barbero) estimant la superficie concernée par les feux à l'échelle de la NC mais aussi autour d'environ 80 stations pluviométriques entre septembre et décembre [37, 38]. L'EDI repose sur le forçage intense imposé par les événements *El Niño* sur le déficit des précipitations [39] qui déclenchent des sécheresses intenses dès l'automne austral, et permettent une prédiction robuste dès la fin de l'hiver austral.
- La modélisation météorologique sur la NC a également été améliorée (partenaire 4, Annexe F4) en développant la chaîne de modèles CEP-ALADIN-AROME afin de spatialiser l'ensemble des paramètres utiles à une échelle de 2.5 x 2.5 km. A terme, une classification de la météorologie en 6 types de temps sera disponible.

FEUX : REGIME ET COMPORTEMENT (WP4)

Le régime des feux (historique d'occurrences, fréquences, saisonnalité, point d'ignition et surfaces brûlées) a été analysé par télédétection sur la période 2000-2011 via les produits MODIS (partenaire 2, voir Annexe F5) ou Landsat et MODIS (partenaire 6, [40]). Dans les deux cas, les détections MODIS provenant du produit « feux actifs » ont été filtrées grâce à un algorithme développé dans INC (partenaire 2) pour éliminer les redondances spatiales et temporelles et localiser les départs d'incendies. La complémentarité des données Landsat repose sur leur meilleure précision spatiale (30-60m versus 250m-1km pour MODIS) au dépend de leur résolution temporelle (16 jours versus 6-8 heures pour MODIS). Au final, chaque feu (MODIS ou Landsat) présente une métadonnée intégrant la superficie, la date de début et de fin du feu et sa localisation géographique. La base MODIS est réactualisée automatiquement quotidiennement (partenaire 2) alors que la base Landsat est statique (arrêtée en 2010, partenaire 6). Des données de la sécurité civile avaient été récoltées mais n'ont pas été intégrées à la base du fait d'un échantillonnage fortement biaisé.

Au-delà des quelques mesures de comportement du feu prélevées au cours des rares accompagnements des pompiers (partenaires 1 et 7), le comportement du feu dans les différents types d'écosystèmes a été analysé par modélisation à partir i) des données de combustibles récoltées dans le WP1, ii) du modèle BehavePlus pour la calibration, et iii) du modèle FlamMap, spatialement explicite (partenaires 1 et 6). La cartographie méthodique sur le terrain de l'Aoupinié (partenaire 8) des feux < 1ha en 2008 (Annexe F3) a révélé leur invisibilité par télédétection, mais a permis l'analyse (partenaire 1) des périmètres brûlés et des lisières forestières touchées avec FlamMap [41]. Ce modèle a aussi été utilisé à l'échelle de la NC pour calculer les probabilités de propagation du feu en tous points et comparer la propension des différents écosystèmes à brûler à partir d'ignitions aléatoires (partenaires 1 et 6, [29]), ou d'ignitions incluant les activités humaines (partenaires 2 et 6).

MODELISATION DE L'ALEA (WPA)

A partir des données multi-sources présentées ci-dessus et intégrées dans un système d'information géographique (partenaire 2), un modèle statistique bayésien a été construit pour prédire les ignitions de feux (partenaire 2, [42]). Il a été calibré puis validé sur deux sous-échantillons indépendants des feux MODIS. Les variables retenues sont le climat, la météo, la topographie et les distances aux routes et tribus. La validation sur les ignitions Landsat reste à effectuer pour tester l'amélioration des estimations de distances.

MODELISATION - SYSTEME D'INFORMATION – SYSTEME D'ALERTE (WPB-D)

L'objectif principal consistait à utiliser les indicateurs généralisables de biodiversité végétale calculés pour la NC dans le WP1 pour évaluer spatialement l'impact des incendies sur cette biodiversité à la résolution de 300m (Annexe F1). La vulnérabilité des écosystèmes a été estimée à partir du taux de changement entre la superficie originelle couverte par les formations végétales primaires et leur superficie actuelle [e.g. 43], et leur résilience en fonction de la littérature tropicale. L'aléa induit (surface brûlée et comportement du feu) par le départ d'un feu dans chaque pixel NC a été systématiquement simulé avec FlamMap pour des conditions et une durée type de 8 heures. Le modèle final repose sur le croisement des différentes couches mises au point (Annexe F1).

C.4 RESULTATS OBTENUS

ECOSYSTEMES ET BIODIVERSITE (WP1)

La cartographie des formations végétales a été validée à ~99% lorsqu'un écart de 300m (1 pixel) est toléré. Les cartes de richesse, de diversité et endémisme, distinctes et combinées, ainsi que celle des combustibles ont été réalisées pour être incluses dans le modèle de risque final qui intègre la propagation du feu (Annexe F1 et WPB-D).

Tous les écosystèmes étudiés présentent des combustibles dont les charges en débris fins (ligneux ou herbacés) sont suffisamment importantes pour entretenir la propagation de la flamme, les savanes enregistrant les plus fortes vitesses en NC [29]. Aux combustibles s'ajoute le relief et surtout les crêtes peu abruptes qui n'arrêtent pas les flammes et laissent ainsi les feux passer d'un versant à l'autre, notamment d'est en ouest selon la direction des vents dominants jusqu'à s'arrêter dans les lisières forestières [41].

Sur l'Aoupinié, les forêts, rongées par les feux (- 24% en 50 ans) au profit des savanes, se réfugient dans les fonds de vallées plus humides [31] et moins exposés aux vents dominants favorables au feu. Un modèle de paysage à long terme [44] devrait bientôt aider à déterminer si le recul se poursuivra et selon quelles modalités. De plus ce modèle vectoriel de paysage, utilisé avec succès sur des paysages bocagers, permettra de tester la validité de l'approche par patches concernant les dynamiques paysagères naturelles et de développer un nouvel indice de congruence spatiale [45]. Les espèces qui régénèrent post-incendie s'organisent en deux types de succession [32], et certaines comme *Geissois racemosa* seraient intéressantes pour l'aménagement forestier (restauration et conservation) car des traits les rendent plus tolérantes au passage du feu que d'autres espèces [33]. En périodes humides, la transition microclimatique savane/forêt est localisée en savane, devant la lisière forestière [35], ce qui peut empêcher la propagation des feux en lisière, et faciliter à moyen terme la succession forestière par l'avancée dynamique de la forêt en cas d'absence de feu prolongée [34].

Les analyses des communautés de fourmis ont révélé les impacts directs des feux : la disparition de la litière végétale des zones récemment brûlées entraîne une perte de diversité des espèces cryptiques et la perte de connectivité de l'habitat. Toutefois, c'est son rôle de facilitateur d'invasion par les fourmis exotiques qui est le facteur crucial de perte de biodiversité [43, 44]. En effet, les espèces invasives (ex. fourmi électrique (*Wasmannia auropunctata*)) pénètrent dans les forêts intactes par les zones perturbées et empêchent toute recolonisation des natives, dont les pionnières potentielles ont été identifiées. La restauration effective du milieu passe donc par une lutte synchrone contre les deux menaces. En réponse à la fragmentation forestière sur l'Aoupinié, la capacité de dispersion par les mâles (ailes) de *L. pallens* semble avoir contrebalancé celle, réduite, des reines aptères, et avoir assuré le brassage génétique des populations de *L. pallens* sur la région.

PRATIQUES HUMAINES (WP2)

L'analyse des corrélations spatiales entre occurrence des incendies (MODIS) et les différents facteurs sociologiques et géographiques a alimenté les WP4 et WPA (Annexes F2 et F5) et permis de casser des préjugés : malgré de fortes disparités entre communes, il n'y a pas plus d'incendies en milieu tribal kanak qu'ailleurs en NC. Aucune corrélation n'a été trouvée avec la structure sociale ou démographique. Les causes d'incendies sont donc à chercher ailleurs. La distance aux routes et aux lieux d'habitations est le premier critère aggravant l'occurrence des feux. Le second est de nature foncière : 87% des feux démarrent sur terre privée ou coutumière (dont 27% aux limites des deux) alors qu'elles ne représentent que 34% de l'espace.

Les enquêtes sur les pratiques du feu ont donc été menées sur les espaces «appropriés» auprès des populations. La perception de plusieurs usages du feu susceptibles de créer des incendies a été confirmée, par ordre de priorité: 1) les pratiques de chasse nouvelles et la lutte contre les espèces invasives (animales et végétales), 2) le climat social local et le niveau de conflictualité, et 3) les pratiques agricoles et d'entretien du

paysage en mutation (individualisation des pratiques, changements des calendriers, érosion des savoirs locaux).

METEOROLOGIE ET CLIMATOLOGIE (WP3)

Le résultat INC le plus important est la modification du calcul de l'aléa de départ du feu par l'IFM et son utilisation effective par la Sécurité Civile dans la prévention et la lutte contre les feux de forêt. Cette réussite est d'autant plus importante que l'IFM a été mis en place dans de nombreux pays, la NC pouvant ainsi profiter de ces expériences internationales.

La modélisation météorologique spatialisée en tous points de grille via la chaîne de modèles CEP-ALADIN-AROME est également une grande avancée scientifique car son développement initial en métropole sous climat tempéré est très éloigné des caractéristiques à considérer pour la zone du Pacifique. Son utilisation n'est pas encore opérationnelle (Annexe F4) mais les perspectives sont prometteuses car la classification en types de temps facilitera la caractérisation de l'aléa météorologique et de la lutte en cas d'incendie déclaré. A terme, des simulations de propagation des feux existeront pour chaque type de temps et non pas seulement pour les conditions les plus favorables à la propagation comme actuellement.

Les analyses climatologiques ont montré que les feux identifiés par les bases de données satellitaires étaient majoritairement contraints par les anomalies pluviométriques à court (quelques jours), moyen et long-terme (jusqu'à 1 an). En croisant cette caractéristique avec la saisonnalité des feux, les anomalies pluviométriques entre la fin de l'hiver austral et surtout lors du printemps austral sont les principaux pilotes climatologiques des feux en NC [38]. Cependant, des facteurs humains sont susceptibles de biaiser et/ou atténuer le signal climatique [37]. Par ailleurs, les anomalies pluviométriques lors du printemps austral sont fortement contraintes par les événements ENSO, notamment ceux dont les anomalies thermiques de surface sont maximales vers la ligne de changement de date (épisodes « centraux » ou « Modoki ») avec une modulation à basse fréquence qui augmente encore récemment le lien entre les températures de surface océaniques sur le centre du Pacifique [39]. Cela permet une prévision saisonnière de la fréquence des feux et/ou de la surface brûlée à l'échelle de la NC (corrélation de 0.87 entre les surfaces brûlées en septembre-décembre et l'indice thermique Nino 4 (160°-210°E et 5°S-5°N) en juillet. La prévision est encore très correcte ($r > 0.5$) sur le centre de l'île, là où le signal climatique n'est peut être pas trop brouillé par les pratiques humaines.

FEUX : REGIME ET COMPORTEMENT (WP4)

Le projet INC a permis de créer le premier historique des feux en NC en combinant les avantages des différentes sources de données (terrain, MODIS, Landsat). La période analysée est très courte (2000-2010) mais les premières caractéristiques du régime des feux par écosystème sont correctes, et la méthodologie développée robuste pour poursuivre l'acquisition dans les prochaines années afin d'approfondir l'analyse des régimes. La confrontation des bases de données avec les différentes ont permis d'expliquer la localisation des départ de feux (partenaires 2 et 6) et construire le modèle bayésien d'ignition des incendies (partenaire 2, WPA). L'analyse spatiale des incendies (localisation, patrons spatiaux, analyse des lisières) a été effectuée pour mieux comprendre l'ignition et la propagation, et implémenter les simulations spatialisées (partenaire 6).

La carte de probabilité de passage des feux et de leur comportement associé met en évidence les zones et donc les écosystèmes les plus sensibles à protéger [29].

MODELISATION DE L'ALEA (WPA)

L'analyse statistique multivariée préliminaire (Annexe F5) a mis en relief trois dimensions principales favorables au départ du feu : l'utilisation des terres, l'environnement physique, et le climat. Les tests de sélection de variables à priori, en amont de la construction du modèle bayésien, n'ayant pas permis d'écarter une composante, la structure de celui-ci a été construite avec l'ensemble des variables et leur forte complémentarité. En effet, pris séparément les trois sous-modèles ont une capacité de prédiction moyenne de 57%, alors que leur combinaison totale atteint 88% en procédure de validation pour départs d'incendies et points témoins échantillonnés. Les 6 variables les plus importantes du modèle final appartiennent aux domaines climatique et social et expriment 49% de la précision du modèle. Les résultats de ce WP sont détaillés en Annexe F5.

MODELISATION - SYSTEME D'INFORMATION – SYSTEME D'ALERTE (WPB-D)

Les équations pour l'aléa induit et les risques d'impact ont été appliquées et les cartographies associées produites. Toutes les zones près des derniers lambeaux de forêts sèches ont un aléa induit maximal, celles près

des forêts denses humides ultramafiques un aléa induit élevé et les maquis un aléa induit moyen. Un incendie peut démarrer d'une zone à faible potentiel de biodiversité végétale mais peut pourtant engendrer un incendie très impactant, à fort aléa induit. Le risque directement associé à l'aléa induit est calculé en intégrant la probabilité d'ignition issue du WPA. Les zones à fort aléa induit les plus probables sont ainsi visualisées. Les résultats préliminaires de ce WP sont détaillés en Annexe F1.

C.5 EXPLOITATION DES RESULTATS

L'impact du projet INC sur la communauté scientifique, autant que sur la communauté des acteurs calédoniens concernée par la question de feux et de la biodiversité, est très important au vu du succès qu'a connu la journée de restitution des conclusions scientifiques du projet INC en novembre 2011. De nombreuses données scientifiques utilisables ont été recueillies ce jour là et ont servi de terreau lors d'ateliers de réflexion pour la définition d'un système d'alerte adapté au territoire, dans le but de prévenir efficacement les feux de végétation. Ce travail collégial offre à la Nouvelle-Calédonie une somme d'informations complémentaires inédite à ce jour. Les résultats du projet peuvent venir en appui à un système de gestion des incendies en Nouvelle-Calédonie pour délimiter les zones les plus à risques et y allouer les moyens nécessaires à la lutte contre les incendies dévastateurs. La principale application possible actuellement est la détermination de ces zones à risque dans lesquels les enjeux de biodiversité sont particulièrement importants et où la probabilité et l'intensité des incendies sont les plus forts. Les différentes cartographies du projet INC telles que les cartes d'aléa induit ou des probabilités de passage du feu permettront des utilisations différentes par les acteurs intéressés (lutte, aménagement du territoire, stratégies de reboisement, sensibilisation de la population. Les résultats qualitatifs des enquêtes auprès des populations ont permis de dégager des pistes originales et pertinentes formalisées sous forme de recommandations aux collectivités territoriales en matière de gestion participative du feu et des incendies. La base des feux réactualisée a déjà été transmise aux collectivités depuis novembre 2011 et a vocation à être exploitée par l'ensemble des acteurs liés aux incendies en Nouvelle-Calédonie. De plus, la structure du modèle de risque, relativement générique dans sa conception, pourrait être déclinée dans d'autres thématiques comme par exemple en un modèle de risque d'érosion pour la NC comme s'apprête à le proposer le partenaire 2.

C.6 DISCUSSION

L'objectif final du projet INC était ambitieux puisqu'il visait à étudier plusieurs aspects liés aux incendies en NC qui avaient été peu étudiés. Les avancées dans chaque WP ont été présentées plus haut. Au-delà de ces avancées disciplinaires, le projet a permis de faire travailler ensemble plusieurs disciplines des sciences environnementales (météorologie, climatologie, écologie du feu, écologie forestière) et des sciences humaines et sociales (sociologie, géographie, histoire). L'interaction entre ces chercheurs a permis de fournir un premier modèle opérationnel qui doit permettre aux gestionnaires d'estimer le risque lié aux incendies sur toute la NC. Au-delà de l'interaction formulée en amont du projet par les partenaires sur la collaboration obligatoire pour mener le projet, des collaborations intra-disciplinaires ont pu voir le jour au regard des problèmes rencontrés comme par exemple le compromis nécessaire entre l'utilisation de MODIS et Landsat (partenaires 2 et 6) pour aboutir à un historique des feux sur la période 2000-2010 assez proche de la réalité des feux assez grands. Le travail de terrain sur les feux de l'Aoupinié par le partenaire 8 a également été important car il a confirmé la limite des données satellitaires concernant les petits feux, mais a permis au partenaire 1 de poursuivre les simulations de la propagation de ces petits feux caractéristiques du paysage de l'Aoupinié. La base de données historique sur les feux (2000-2011) constituée par le projet INC sera complétée au cours des prochaines années pour obtenir une base sur une durée suffisante pour une prédiction encore plus fiable des départs de feux et de leur trajectoires probables, mais aussi une meilleure caractérisation du régime des feux qui devrait inclure des variables telles que le cycle par exemple.

Les objectifs initiaux affichés pour la modélisation du risque de feu sur la biodiversité calédonienne sont apparus un peu trop ambitieux au regard du temps imparti, malgré la prolongation de 6 mois. En effet, le temps a manqué pour produire les différentes cartes des composantes du projet qui auraient dû être assemblées dynamiquement. Seule la cartographie des probabilités d'ignition l'est et est calculable quotidiennement, alors que la plupart des autres cartes actuellement utilisées (occupation du sol, biodiversité végétale, combustibles, et peut-être dans un futur proche la biodiversité des communautés myrmécologiques) sont statiques et doivent faire l'objet d'une validation approfondie pour leur utilisation en toute confiance dans le modèle de risque final. Le fait que Météo-France ne disposait pas encore du modèle Arome validé sur la NC au début du INC n'a pas permis de disposer de cartes quotidiennes réactualisées en tous points ; de ce fait,

seules des cartes de champs moyens sont aujourd'hui utilisées en attendant d'être remplacées par celles des champs quotidiens.

C.7 CONCLUSIONS

Le projet INC a été une véritable aventure scientifique, multi-partenariale, multidisciplinaire, impliquant pas moins de 50 chercheurs, ingénieurs, doctorants et stagiaires. Les réunions plénières, semestrielles, ont rassemblé à chaque fois une vingtaine de participants de disciplines très éloignées et une dizaine d'acteurs extérieurs incontournables sur le territoire, ce qui représente un réel succès. La gestion du projet a sans doute été partiellement victime de son ambivalence entre recherche fondamentale et recherche appliquée, avec une production scientifique partiellement limitée par ses efforts vers la société civile bénéficiant de l'étude. Le projet a non seulement permis de fédérer les équipes internationales impliquées, mais aussi les équipes de recherche locales et les acteurs du feu en Nouvelle Calédonie. A ce titre, l'objectif initial, qui était un objectif de stratégie scientifique nationale en écologie spatiale dans les écosystèmes, a été pleinement atteint.

C.8 REFERENCES

- 1.Kier, G., et al., A global assessment of endemism and species richness across island and mainland regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009. 106(23): p. 9322-9327. 2.Myers, N., et al., Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000. 403: p. 853-858. 3. WWF, Program "Global 200". 2006. 4.Bouchet, P., T. Jaffré, and J.M. Veillon, Plant Extinction in New-Caledonia - Protection of Sclerophyll Forests Urgently Needed. *Biodiversity and Conservation*, 1995. 4(4): p. 415-428. 5.Hope, G. and J. Pask, Tropical vegetational change in the late Pleistocene of New Caledonia. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1998. 142(1-2): p. 1-21. 6.Perry, G.L.W. and N.J. Enright, Humans, fire and landscape pattern: understanding a maquis-forest complex, Mont Do, New Caledonia, using a spatial 'state-and-transition' model. *Journal of Biogeography*, 2002. 29(9): p. 1143-1158. 7.UICN, Stratégie mondiale de la conservation: la conservation des ressources vivantes au service du développement durable, ed. Gland. 1980, Suisse. 8. Jaffré, T., et al., Impact des feux de brousse sur le milieu naturel en Nouvelle-Calédonie, ORSTOM, Editor. 1997: Nouméa. p. 45. 9.Cochrane, M.A., et al., Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests. *Science*, 1999. 284(5421): p. 1832-1835. 10.Gillespie, T.W. and T. Jaffré, Tropical dry forests in New Caledonia. *Biodiversity and Conservation*, 2003. 12(8): p. 1687-1697. 11.McCoy, S., et al., Fire and succession in the ultramafic maquis of New Caledonia. *Journal of Biogeography*, 1999. 26(3): p. 579-594. 12.Caudmont, S. and L. Maitrepierre, Atlas climatique de la Nouvelle-Calédonie, ed. M. France. 2006: Direction interrégionale de Nouvelle-Calédonie. 128. 13.Nicot, J.B. and T. Delcroix, ENSO-related precipitation changes in New Caledonia, southwestern tropical Pacific: 1969-98. *Monthly Weather Review*, 2000. 128(8): p. 3001-3006. 14.Mechoso, C.R., et al., The Seasonal Cycle over the Tropical Pacific in Coupled Ocean-Atmosphere General-Circulation Models. *Monthly Weather Review*, 1995. 123(9): p. 2825-2838. 15. Barrau, J., Culture itinérante, culture sur brulis, culture nomade, écobuage ou essartage: un problème de terminologie agricole. *Etudes Rurales*, 1972. 45: p. 99-103. 16.De Garine, I. and M. Lepoutre-Goffinet, Les feux de brousse et de forêts en Province Sud: Aspects socioculturels. 2004, Direction de ressources naturelles Province Sud. p. 72. 17.Jost, C., Dégénération des îles hautes et gestion de l'environnement dans le Pacifique : Nouvelle-Calédonie et Ile de Hoorn (Futuna). in *Pratiques de gestion de l'environnement dans les pays tropicaux. Espaces tropicaux, Singaravelou, Editor. 1997: Talence. p. 453-470.* 18.Hély, C., et al., SAFARI-2000 characterization of fuels, fire behavior, combustion completeness, and emissions from experimental burns in infertile grass savannas in western Zambia. *Journal of Arid Environments*, 2003. 54: p. 381-394. 19.Hély, C., et al., Role of vegetation and weather on fire behavior in the Canadian mixedwood boreal forest using two fire behavior prediction systems. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001. 31: p. 430-441. 20.Curt, T., et al., Litter flammability in oak woodlands and shrublands of southeastern France. *Forest Ecology and Management*, 2011. 261: p. 2214-2222. 21.Curt, T. and P. Delcros, Managing road corridors to limit fire hazard. A simulation approach in southern France. *Ecological Engineering*, 2010. 36: p. 457-465. 22.Hély, C. and S. Alleaume, Fire regimes in dryland landscapes, in *Dryland Ecohydrology*, P. D'Odorico and A. Porporato, Editors. 2006, Kluwer Academic Publishers: The Netherlands. p. 283-301. 23.Burgan, R.E. and R.C. Rothermel, BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system—FUEL subsystem. 1984, U. S. Department of agriculture, Forest service: Ogden, UT. Intermountain forest and range experiment station. 24.Hirsch, K.G., Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System: user's guide, N.R. Canada, Editor. 1996, Canadian forestry service: Edmonton, Alberta. p. 121. 25.Dupuy, J.L. and M. Larini, Fire spread through a porous forest fuel bed: a radiative and convective model including fire-induced flow effects. *International Journal of Wildland Fire*, 2000. 9(3): p. 155-172. 26.van Wagner, C.E., Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. 1987, Canadian Forestry Service: Ottawa, ON. 27.Viegas, D.X., et al., Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe. *International Journal of Wildland Fire*, 1999. 9(4): p. 235-246. 28.Schoenberg, F.P., et al., Detection of non-linearities in the dependence of burn area

on fuel age and climatic variables. *International Journal of Wildland Fire*, 2003. 12(1): p. 1-6. **29.**Hély, C., et al., Main New Caledonian ecosystem fuel types involved in tropical fires and their susceptibility to burn in a changing environment. *International Journal of Wildland Fire*, in preparation. **30.**Munzinger, J., et al., A Taxonomic Revision of the Endemic New Caledonian Genus *Podonephelium* Baillon (Sapindaceae). *Systematic Botany*, in preparation. **31.**Ibanez, T., et al., Rainforest and savanna landscape dynamics in New Caledonia: Towards a mosaic of stable rainforest and savanna states? . *Austral Ecology*, 2012: p. doi:10.1111/j.1442-9993.2012.02369.x. **32.**Ibanez, T., et al., Mono-dominated and co-dominated early secondary successional patterns in New Caledonia. *Plant Ecology and Diversity*, Submitted. **33.**Ibanez, T., T. Curt, and C. Hély, Low tolerance of New Caledonian secondary forest species to savanna fires. *Journal of Vegetation Science*, 2012. **34.**Ibanez, T., et al., Stable and unstable phases in the dynamics of savanna/forest boundaries in New Caledonia. *Journal of Tropical Ecology*, Submitted. **35.**Ibanez, T. and C. Hély, Sharp transition of microclimatic conditions between rainforest and savanna in New Caledonia: insights for rainforest edge vulnerability to fire. *Basic and Applied Ecology*, en préparation. **36.**Berman, M. and A. Andersen, New Caledonia has a depauperate subterranean ant fauna, despite spectacular radiations above ground. *Biodiversity and Conservation*, accepted. **37.**Moron, V., et al., Prediction of September-December fire in New Caledonia (SW Pacific) using July Niño 4 sea surface temperature index. *Journal of Applied Meteorology and Climate*, Submitted. **38.**Barbero, R., et al., Relationships between MODIS and ATSR fires and atmospheric variability in New Caledonia (SW Pacific). *Journal of Geophysical Research*, 2011. 116(D21110): p. 16p. **39.**Barbero, R. and V. Moron, Seasonal to decadal modulation of the impact of El Niño–Southern Oscillation on New Caledonia (SW Pacific) rainfall (1950–2010). *Journal of Geophysical Research*, 2011. 116(D23111). **40.**Curt, T., et al., Caractérisation des incendies en Nouvelle-Calédonie par télédétection sur la période 2000-2010. *Journal of Biogeography*, Submitted. **41.**Hély, C., et al., Are the New-Caledonian forest burning?: a modeling approach. *International Journal of Wildland Fire*, in preparation. **42.**Mangeas, M., J. André, and XXX, A spatially explicit integrative model for predicting fire ignitions in New-Caledonia. *Environmental Modelling & Software*, in preparation. **43.**Jaffré, T., P. Bouchet, and J.M. Veillon, Threatened plants of New Caledonia: Is the system of protected areas adequate? *Biodiversity and Conservation*, 1998. 7(1): p. 109-135. **44.**Bonhomme, V., et al., Patchy-based modeling of New Caledonian landscape dynamics: towards the quick loss of endemic forest in a biodiversity hotspot. in preparation. **45.**Bonhomme, V., et al., A vectorial kappa index for assessing spatial congruence for patchy landscapes. In preparation.

D LISTE DES LIVRABLES

N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (<u>souligner le responsable</u>)	Commentaires
1	Méthode pour estimer la biodiversité fonctionnelle (végétale et fourmis) des écosystèmes en NC	Données, cartographies, articles rapport (Annexe F1)	Tous et plus particulièrement : Ibanez et Hély (part.1), Gomez et Mangeas (part. 2), Munzinger (part. 3), Curt (part.6), Andersen et Berman (part.7), Géraux (part. 8)	Travaux de thèses, réflexions collectives, et synthèse préliminaire (post-doc de Gomez) n'incluant à ce jour que la flore et pour laquelle les combinaisons d'indices sont en discussion t ne font pas l'unanimité
2	Classification des écosystèmes et de leurs stades de succession en fonction des combustibles et de la biodiversité.	Données, cartographies, articles	Hély et Ibanez (part. 1) Gomez et Despinoy (part. 2) Munzinger (part. 3) Curt (part. 6) Andersen Berman et Gaucherel (part. 7)	L'âge des parcelles, mêmes forestières, n'étant pas identifiable car pas mesurable, nous n'avons caractérisé les écosystèmes que selon leurs types

N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (<u>souligner le responsable</u>)	Commentaires
3	Synthèses interdisciplinaires des facteurs humains et des usages et perception du feu en NC	Données, cartographie, articles, rapport (Annexes F2 et F3)	Herrenschmidt, Dumas et Toussaint (part. 2), Géraux (part. 8)	
4	Analyse sociologique et spatialisation des acteurs de la problématique incendie et de leurs activités	Rapport	Herrenschmidt, Dumas et Toussaint (part. 2), Géraux (part.8)	Les collègues australiens sur cette thématique ont surtout interagi avec le partenaire 8.
5	Cartes d'occurrence et de localisation des incendies, caractérisation du régime des feux	Données, cartographies, Articles, rapport (Annexe F2)	Broucke et Despinoy (part.2), Borgniet et Curt (part. 6), Géraux et Petit (part.8)	Les 10 ans d'archives représentent une période trop courte pour caractériser toutes les composantes du régime des feux. L'automatisation de la base de données MODIS permettra de compléter cet objectif d'ici quelques années alors que le croisement avec les données Landsat permettra d'améliorer la localisation des départs de feux et l'estimation des superficies brûlées.
6	Amélioration du calcul de risque de départ de feu adapté à la NC et tenant compte des aléas météorologique et humains	Logiciel, données , modèle bayésien, articles, Rapports (Annexes F4 et F5)	André, Despinoy, Dumas, Herrenschmidt Mangeas (part. 2), Maitrepierre et Paul (part. 4), Borgniet et Curt (part. 6)	Ce livrable regroupe deux types de produits très différents : l'IFM devenu opérationnel chez Météo-France pour l'aléa météorologique, et des modèles statistiques plus fondamentaux couplant les différents aléas
7	Modèle non linéaire (SI) quantifiant le risque de perte de biodiversité par les incendies et prenant en compte les incertitudes	Modèle, articles, rapport (Annexe F1)	Comme pour le livrable 1	réflexions collectives sur la durée du projet, synthèse préliminaire (Annexe F1) qui demande un approfondissement avant que la publication soit envisagée car pas d'accord collectif obtenu. Le produit actuel ne

N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (<u>souligner le responsable</u>)	Commentaires
				correspond pas au modèle bayésien global proposé initialement
8	System d'Information Géographique intégrant toutes les composantes spatialisées du projet INC, ainsi les entrées et sorties des modèles utilisés ou créés dans le projet INC	Données	Despinoy (part. 2)	A ce jour, ce produit n'est pas encore accessible aux partenaires autres que le partenaire 2.
9	Système d'alerte opérationnel créé à partir du modèle SI	prototype	André, Despinoy, Dumas, et Mangeas (part.2)	Le prototype scientifique disponible à ce jour n'inclut que les probabilités d'ignitions du modèle bayésien et demanderait plus de feux pour être testé en mode opérationnel quotidien. L'annexe fournie ne reflète pas la participation des différents partenaires qui se sont impliqués

E IMPACT DU PROJET

Ce rapport rassemble des éléments nécessaires au bilan du projet et plus globalement permettant d'apprécier l'impact du programme à différents niveaux.

L'impact du projet INC sur la communauté scientifique, autant que sur la communauté des acteurs calédoniens concernée par la question de feux et de la biodiversité, est très important. Le projet composait un volet fondamental, mais aussi un volet appliqué qui a pu être valorisé notamment grâce à une journée de restitution de ses conclusions scientifiques. Cette journée qui s'est tenue le mardi 15 novembre à l'université de Nouvelle Calédonie (Nouméa) a réuni la majorité des autorités et acteurs locaux de cette thématique (Etat, Gouvernement, provinces, Université, pompiers, communes, ONGs ...). De nombreuses données scientifiques utilisables ont été recueillies ce jour là et ont servi de terreau lors d'ateliers de réflexion pour la définition d'un système d'alerte adapté au territoire, dans le but de prévenir efficacement les feux de végétation. Ce travail collégial offre à la Nouvelle-Calédonie une somme d'informations complémentaires inédite à ce jour. Les résultats du projet peuvent venir en appui à un système de gestion des incendies en Nouvelle-Calédonie pour délimiter les zones les plus à risques et y allouer les moyens nécessaires à la lutte contre les incendies dévastateurs. La principale application possible actuellement est la détermination de ces zones à risque dans lesquels les enjeux de biodiversité sont particulièrement importants et où la probabilité et l'intensité des incendies sont les plus forts. Les différentes cartographies du projet INC telles que les cartes d'aléa induit ou des probabilités de passage du feu permettront des utilisations différentes par les acteurs intéressés (lutte,

aménagement du territoire, stratégies de reboisement, sensibilisation de la population). La base des feux réactualisée a déjà été transmise aux collectivités depuis novembre 2011 et a vocation à être exploitée par l'ensemble des acteurs liés aux incendies en Nouvelle-Calédonie. De plus, la structure du modèle de risque, relativement générique dans sa conception, pourrait être déclinée dans d'autres thématiques comme par exemple en un modèle de risque d'érosion pour NC comme s'apprête à le proposer le partenaire 2.

E.1 INDICATEURS D'IMPACT

Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

		Publications multipartenaires	Publications monopartenaires
International	Revue à comité de lecture	12	8
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	3	3
France	Revue à comité de lecture		1
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)		
Actions de diffusion	Articles vulgarisation		1
	Conférences vulgarisation		
	Autres :	Brochure, 2 interviews télévisées en NC, articles de presse, 1 site Web en cours de construction	

Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Brevets internationaux obtenus	
Brevet internationaux en cours d'obtention	
Brevets nationaux obtenus	
Brevet nationaux en cours d'obtention	
Licences d'exploitation (obtention / cession)	
Créations d'entreprises ou essaimage	
Nouveaux projets collaboratifs	
Colloques scientifiques	
Autres (préciser)	

E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

ARTICLES DE RANG A

- Arnan, X., Gaucherel, C., Andersen, A., **2011**. Dominance and species co-occurrence in highly diverse ant communities: a test of the interstitial hypothesis and discovery of a three-tiered competition cascade. *Oecologia*, 166:783-794.
- Barbero, R., Moron, V., **2011**. Seasonal to decadal modulation of the impact of El Niño–Southern Oscillation on New Caledonia (SW Pacific) rainfall (1950–2010). *Journal of Geophysical Research* 116, D23111, doi:10.1029/2011JD016577.
- Barbero, R., Moron, V., Mangeas, M., Despinoy, M., Hély, C., **2011**. Relationships between MODIS and ATSR fires and atmospheric variability in New Caledonia (SW Pacific). *Journal of Geophysical Research* 116, D21110, doi:10.1029/2011JD015915.
- Berman, M., Andersen, A., **accepted**. New Caledonia has a depauperate subterranean ant fauna, despite spectacular radiations above ground. *Biodiversity and Conservation*.
- Berman, M., Andersen, A., Hély, C., Gaucherel, C., **Submitted**. An overview of New Caledonian ant communities in relation to habitat and invasion by exotic species. *Biological Invasions*.
- Berman, M., Andersen, A., Ibanez, T., **Submitted**. Invasive ants as back-seat drivers of native ant diversity decline in New Caledonia. *Ecology*.
- Bonhomme V, Ibanez T, Castets M, Hély C, Gaucherel C. **In preparation**. Patchy-based modeling of New Caledonian landscape dynamics: towards the quick loss of endemic forest in a biodiversity hotspot.
- Bonhomme, V., Castets, M., Morel, J., Gaucherel, C., **In preparation**. A vectorial kappa index for assessing spatial congruence for patchy landscapes.
- Curt, T., Borgniet, L., Ibanez, T., Hély, C., Mangeas, M., Despinoy, M., Moron, V., **Submitted**. Bushfires threat forests in New Caledonia: Evidence from spatial patterns of fires. *Journal of Biogeography*.
- Dumas P., Tousaint M., Herrenscheidt J.B., Conte A., Mangeas M., **Submitted**. Analyse du risque incendie en Nouvelle-Calédonie : une anthropisation complexe des paysages entre héritage et adaptations contemporaines, *Revue de Géographie de l'Est*
- Dumas P. et al, **In preparation**. The Analysis of Fire Risk in New Caledonia: A Complex Anthropization of Landscapes Poised between Heritage and Contemporary Adaptations. *The International Journal of Mass Emergencies and Disasters*
- Gaucherel, C. **2011**. Self-Organization of Patchy Landscapes: Hidden Optimization of Ecological Processes. *Journal of Ecosystem and Ecography*, 1:105 (doi:10.4172/2157-7625.1000105).
- Gaucherel, C. **2011**. Wavelet analysis to detect regime shifts in animal movement. *Computational Ecology and Software*, 1 (2):69-85.
- Gaucherel, C., Boudon, F., Houet, T., Castets, M., Godin, C. **Submitted**. Towards a Landscape Language: Grassland Management Modelling For Species Conservation. *Plos One*.
- Ibanez, T., Borgniet, L., Mangeas, M., Gaucherel, C., Hély, C., **2012**. Rainforest and savanna landscape dynamics in New Caledonia: Towards a mosaic of stable rainforest and savanna states? *Austral Ecology*, doi:10.1111/j.1442-9993.2012.02369.x.
- Ibanez, T., Curt, T., Hély, C., **2012**. Low tolerance of New Caledonian secondary forest species to savanna fires. *Journal of Vegetation Science*. 10.1111/j.1654-1103.2012.01448.x
- Ibanez, T., Munzinger, J., Géaux, H., Hély, C., Gaucherel, C., **Submitted**. Mono-dominated and co-dominated early secondary successional patterns in New Caledonia. *Plant Ecology and Diversity*.
- Ibanez, T., Hély, C., Gaucherel, C., **Submitted**. Sharp transitions in microclimatic conditions between savannah and rainforest in New Caledonia: Insights into the vulnerability of rainforest edges to fire. *Agricultural and Forest Meteorology*.
- Ibanez, T., Munzinger, J., Gaucherel, C., Curt, T., Hély, C. **Submitted**. Stable and unstable phases in the dynamics of savanna/forest boundaries in New Caledonia. *Journal of Tropical Ecology*.
- Mangeas et al. **In preparation**. A spatially explicit integrative model for predicting fire ignitions in New-Caledonia, *Environmental Modelling & Software*.
- Moron, V., Barbero, R., Mangeas, M., Borgniet, L., Curt, T., Berti-Equille, L., **Submitted**. Prediction of September-December fire in New Caledonia (SW Pacific) using July Niño 4 sea surface temperature index. *Journal of Applied Meteorology and Climate*.
- Munzinger, J., P. P. Lowry II, M. Callmander, and S. Buerki. **In preparation**. A Taxonomic Revision of the Endemic New Caledonian Genus *Podonephelium* Baillon (Sapindaceae). *Systematic Botany*

CONFERENCES

- Barbero, R., V. Moron, M. Mangeas, M. Despinoy, **2010**. Climate variability and hotspots fires in New Caledonia : diagnostic approach and potential predictability, European Geosciences Union, Session : Wildfires, Weather and Climate, Wien, May, 2010
- Barbero, R., Moron, V., **2011**. Modoki vs classical ENSO impacts in New Caledonia (166_E, 22_S) and SouthWest Pacific. European Geosciences Union General Assembly 2011, Wien, Austria, pp. EGU2011-2408.
- Barbero, R. and V. Moron **2012**, Seasonality and decadal variability of Central Pacific vs Eastern Pacific teleconnections in SW Pacific, 10th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Changing Southern Climates, Session : Interannual climate variability and Southern Hemisphere teleconnections, Nouméa, April, 2012
- Berman, M., Andersen, A. N. **2011**. Invasive ants drive the biodiversity declines in relation to fire in New Caledonia. International Conference of Conservation Biology 2011, Auckland, New Zealand.
- Hély C, Ibanez T., Tinquaut F., and Curt, T. **2010**. Fire, savannas, and forest/savanna dynamics in New Caledonia. The 2010 International meeting of the Association for Tropical Biology and Conservation, Bali, Indonesia, July 19-23.
- Ibanez, T., Munzinger, J., Géaux, H., Gaucherel, C., Hély. C., **2011**. Rainforest-savanna dynamics and fire in New Caledonia : Implications for rainforest restoration and conservation. International conferences forests. Leuven, Belgium.

ARTICLES DE VULGARISATION

- Bertaud, A. 2012. Une richesse qui part en cendres ! L'œil magazine, L'information environnementale accessible à tous. Observatoire de L'environnement, Province Sud, Nouvelle-Calédonie, n°3, page 4.
- Géaux, H., Bucco H., 2011. Dix ans d'engagement du WWF-France en Nouvelle-Calédonie. Brochure information WWF, citation INC p.30
- Mangeas, M., 2012. Les scientifiques luttent contre le feu. Pompier Mag – magazine officiel de l'USPNC n°9, 54-55
- Peltier, A. et Aubail, X., **2011**. Le "caillou vert" menacé par les feux. Météo - Le magazine 13, 38-39.

THESES ET POST-DOC

- Barbero, R., **2012**. Variabilité pluviométrique en Nouvelle-Calédonie et températures de surface océanique dans le Pacifique tropical (1950-2010): impacts sur les incendies (2000-2010). Ph.D. Géographie physique. Aix-Marseille Université, Marseille, p. 232.
- Berman, M., **prévue sept. 2012**. Effet du feu sur la biodiversité de fourmis de Nouvelle-Calédonie. Ph.D. Université Montpellier 2 / Darwin University, Montpellier / Darwin.
- Bonhomme, V., **2011**. Application de la plateforme DYPAL à un paysage tropical (Nouvelle-Calédonie). Post-doc Contrat ingénieur 12 mois, Pondichéry, Inde (dir. C. Gaucherel).
- Gomez, C., **2012**. Etude du risque incendie sur les principales formations végétales en Nouvelle-Calédonie en terme de diversité végétale, postdoctorant Contrat Ingénieur 9 mois, Nouméa (dir. M. Mangeas).
- Ibanez, T., **2012**. Dynamiques des forêts denses humides et des savanes en réponse aux incendies en Nouvelle-Calédonie. Ph.D. Faculté des Sciences et Techniques. Aix-Marseille Université, Marseille, p. 321.
- Ibanez, T., **2012**. Dynamiques des forêts denses humides et des savanes en réponse aux incendies en Nouvelle-Calédonie. Post-doc Contrat ingénieur 2 mois, Montpellier, France (dir. J. Munzinger).
- Toussaint, M., **Prévue 2014**. Etudes des rapports entre mutations des sociétés locales, pratiques du feu et gouvernance locale des ressources naturelles en Nouvelle-Calédonie, Ph.D. EHESS, (dir. P. Y., Le Meur)

MASTERS

- Bouchet, D., **2011**. Endemism in the evergreen and semi-evergreen forests of the Western Ghats (India): understand its distribution pattern as a first step towards the reassessment of conservation priorities. UFR des Sciences. Université Paris-Sud 11, Master 2, Paris, p. 41.
- Conte, A., **2010**. Compréhension des risques d'incendies relatifs à la biodiversité en Nouvelle-Calédonie et modélisation: Développement méthodologique pour l'intégration d'indicateurs d'aléas anthropiques. UFR de Géographie. Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Master 2, Paris, p. 66.
- Dufour, C., **2009**. Dynamique de population, étude théorique de l'impact des feux sur une population végétale. Master 2 MIGS (Mathématiques pour l'Informatique Graphique et les Statistiques), Dijon, p. 59.

- Gailhbaud, P., **2008**. Aoupinié : Un massif forestier à inventorier, à protéger et à restaurer. UFR des Sciences biologiques. Université Bordeaux I, Master 1, p. 34
- Gailhbaud, P. **2009**. Modes de dispersion des diaspores sur le massif de l'Aoupinié, une forêt dense humide de Nouvelle-Calédonie. Université de Bordeaux 1 - ENITA de Bordeaux / Institut de Recherche pour le Développement, Master 2, Nouméa / Bordeaux
- Aoupinié : Un massif forestier à inventorier, à protéger et à restaurer. UFR des Sciences biologiques. Université Bordeaux I, Master 1, p. 34
- Gontrand, F., **2012**. Recommandations de conservation sur la base d'une comparaison de l'Endémisme et de la Biodiversité dans les Ghats occidentaux (Inde) et en Nouvelle-Calédonie. UFR des Sciences. Université Paris-Sud 11, Master 2, Paris, p. 41.
- Grimaldi, V., **2012**. Acoustic Engineer to test the prototype of a meteorological instrument. Université de Compiègne, Master 2, Compiègne, p. 60.
- Lustig, A. **2012**. Analyse de la cyclostationnarité du climat Calédonien. Stage M2 Ecole Normale Supérieure de Lyon et INSA, Pondichéry, Inde.
- Miss, F., **2009**. Cartographie du flanc Ouest du massif forestier de l'Aoupinié et premières recommandations pour gérer le risque de feu sur cette zone. ENGREF 1ère année. AgroParisTech, Paris, p. 19.
- Perronnet L., **2009**. Méthode de détection des feux par télédétection, 6 octobre 2009. Rapport de master II, ENSEIHT. 15 p.
- Puiseux, A., **2012**. Modélisation intégrée d'un écosystème théorique. Ecole Normale Supérieure, Master 1, Paris, p. 24.
- Tiavouane, J., **2009**. Dynamique forestière et incendie en Nouvelle Calédonie. Étude de la dynamique de la mosaïque savane – forêt dense humide sur le massif de l'Aoupinié (Poya) en Nouvelle Calédonie. Université de Perpignan, Master 1, p. 24.
- Tinquaut, F., **2010**. Analyse des combustibles et modélisation du comportement du feu dans les principaux écosystèmes en Nouvelle-Calédonie. UFR Sciences et Technologie. Université Blaise Pascal, Master 2, Clermont-Ferrand, p. 41.
- Udo, N., **2011**. Feu, ressources naturel les et territoires : Perceptions, usages et mode gestion. Etude de cas autour du massif de l'Aoupinié, Tribus de Gohapin, Goa et Pöo (Province Nord). Faculté des Sciences, Master 2. Université Montpellier II, Montpellier, p. 113.

RAPPORTS TECHNIQUES

- Aubail, X. **2010**. Guide technique du logiciel PREVIFEU, document interne Météo-France, septembre 2010.
- Broucke, S., **2009**. État de l'art sur la détermination du régime du feu par des moyens de télédétection. Rapport d'étude, Juin 2009. 14 p.
- Broucke, S., **2009**. Évaluation du régime du feu en Nouvelle-Calédonie à partir de moyen de télédétection. Rapport d'étude, Novembre 2009. 28 p.
- Gomez, C., **2012**. Etude du risque incendie sur les principales formations végétales en Nouvelle-Calédonie en termes de potentiel de biodiversité végétale. Rapport d'étude GIE Océandie, Juillet 2012. 20 p.
- Menu, S., et Chenet, A., **2012**. Valorisation des produits du programme de recherche INC et orientation de ses résultats vers un dispositif opérationnel. Rapport final d'étude GIE Océanide, Juin 2012. 27 p.
- Météo-France, **2011**. Bilan de l'utilisation du logiciel PREVIFEU sur la période septembre 2010-aout 2011, document interne Météo-France, septembre 2011.
- Paul, J. **2009**. Développement d'un système d'estimation du risque Incendie en Nouvelle-Calédonie, document interne Météo-France, mars 2009.
- Petit, N., **2009**. Problématique du feu dans les tribus entourant le massif forestier de l'Aoupinié - Collecte d'informations pour le WP2 de l'ANR INC. Rapport WWF. 14 p.
- Safrana, J. 2011. Cartographie d'un échantillonnage diffus et stratifié des écosystèmes calédoniens, Spatialisation des connaissances sur les feux la biodiversité en Nouvelle-Calédonie. Université de Montpellier II, Stage L3, p. 20.
- Winckel, A., **2011**. Étude de sciences humaines et sociales sur la caractérisation et l'évolution des pratiques et des risques environnementaux liés au feu en zone périurbaine de Nouméa (Montagne des sources - Monts Koghi). Rapport d'étude final sur la Province Sud, Avril 2011. 72 p.

E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

- *logiciels et tout autre prototype* : Prototype du système d'alerte de INC : Risques incendies sur la biodiversité végétale et l'érosion)

- la création d'une plate-forme à la disposition d'une communauté
- création d'entreprise, essaimage, levées de fonds
- autres (ouverture internationale,...)

Elle en précise les partenariats éventuels. Dans le cas où des livrables ont été spécifiés dans l'annexe technique, on présentera ici un bilan de leur fourniture.

E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Barriol Christina	F	christina.barriol@gmail.com	Mai 2012	Master 2	France	0	1	IE	6	Mars 2009	Sans nouvelle autre que via son avocat	NA	NA	NA	NA
Fabien Tinquaut	H	ftinquaut@gmail.com	Dec. 2011	Master 2	France	0	1	IE	9	Aout 2011	CDI	INSERM	IE	Non	oui
Céline GOMEZ	F	Celine.c.gomez@gmail.com		Doctorat	France	1	2	IE	4 + 5 par le PPF IRD	30 juin 2012	Post-doct	IRD	IE	Oui	Oui
Jérémy ANDRE	H	Jeremy-andre@hotmail.fr		Master 2	France		2	IE	12,5	30 juin 2012	En recherche de financement de doctorat				
Delphine BUI DUYET	F		Dec 2011	Master 2	France	0	2	IE	3,5	31 dec 2011	CDI	Collectivité	IE	Non	Oui
Morgan MANGEAS	H	Morgan.mangeas@ird.fr	Juillet 2012	Doctorat	France	14	2	IR	5,5	31 août 2009	Renouvellement de l'Accueil IRD	IRD	CR1	oui	oui
Johanna TEIN	F						2		6	Oct. 2009					
Sébastien XX							2		4	Aout 2009					
Apiazari Vannessa	F	NA	Juin 2012	Bac+2	Nouvelle-Calédonie	0	3	CDD Tech	6	Juin 2009	A repris ses études, passé une licence, et postule pour un master			Non	Oui
Céline Chambrey	F	celine.chambrey@ird.fr	Juillet 2012	Bac+2	Nouvelle-Calédonie	7	3	CDD Tech	3	Juin 2012	Tech.	IRD	Technicienne	Non	Oui
Mickaël Le Corre	H	NA	2011	Bac+2	Nouvelle-Calédonie		3	CDD Tech	6	Dec. 2009	A été recruté (CDI) à la DDR en NC	Collectivité	Coordonnateur	Non	Oui
Hervé Vandrot		herve.vandrot@ird.fr	Juillet 2012	Bac + 5	Nouvelle-Calédonie	5	3	CDD Tech	2	Juin 2012	Tech	IAC	Tech	Non	Oui

Julien Paul	H			DESS (2005)	France	5	4	CDD IE	5 +3.5 par Météo-France	Juin 2009					
							6								
Marianne Guibert	F						7								
Vincent Bonhomme	H						7								
Quentin AURIAC	H			ENS césure			7		6	Dec. 2010					
							8								

F ANNEXES

F1.	Etude du risque incendie sur les principales formations végétales en Nouvelle-Calédonie en terme de diversité végétale	25
F2.	Analyse du risque incendie en Nouvelle-Calédonie : une anthropisation complexe des paysages entre héritage et adaptations contemporaines	40
F3.	Programme de recherche INC 2008-2012 - Contribution du WWF-France	56
F4.	Eléments pour le rapport final, de la participation de Météo-France au projet INC	62
F5.	Modélisation de la probabilité de démarrage incendie sur la Grande-Terre : approche intégrée pluridisciplinaire	63

F.1 ETUDE DU RISQUE INCENDIE SUR LES PRINCIPALES FORMATIONS VÉGÉTALES EN NOUVELLE-CALÉDONIE EN TERME DE DIVERSITÉ VÉGÉTALE

Rapport rédigé par Céline Gomez, UMR ESPACE-DEV 228, IRD, Juin 2012

INTRODUCTION

CONTEXTE GENERAL

La Nouvelle-Calédonie est une île originale en termes d'endémisme et de biodiversité, bien connue comme hot spot de biodiversité (Mittermeier et al., 2004). Elle présente notamment des situations originales permettant d'accéder à des zones riches en biodiversité végétale, climatiquement et pédologiquement très contrastées. Elle offre une variété de substrats (ultramafiques, volcano-sédimentaires...), d'habitats (forêts humides, forêts sèches, maquis miniers, savanes...) et de microclimats (notamment au sein de la chaîne montagneuse centrale) qui sont autant de facteurs contribuant à diversifier le panel de niches écologiques disponibles.

Les principales formations végétales existantes en Nouvelle-Calédonie ont été définies et globalement caractérisées en termes de nombre total d'espèces et de niveau d'endémisme (Jaffré et al., 1998; Jaffré et al., 2009; Jaffré, Veillon, 1994; Jaffré et al., 1997). Cependant, il n'existe pas d'indicateurs généralisés sur la Nouvelle-Calédonie nous permettant de comparer les différentes formations végétales en termes de potentiel de biodiversité et de vulnérabilité notamment face à une menace naturelle ou anthropique.

Cette biodiversité est menacée par différents paramètres tels que les incendies ou la présence de plus en plus généralisée d'espèces envahissantes. Les incendies restent les principaux facteurs de dégradation et de fragmentation des milieux terrestres (Jaffré et al., 1995). En effet, les feux anthropiques croissent en nombre, fréquence et étendue, devenant un danger pour les populations et menaçant grandement certains écosystèmes en Nouvelle-Calédonie.

En Nouvelle-Calédonie, comme dans l'ensemble du monde tropical et méditerranéen, les feux de brousses sont l'un des facteurs principaux de transformation et de dégradation du milieu naturel (Groeneveld et al., 2008; Hochberg et al., 1994; Jaffré et al., 1995; Whelan, 1995). Les feux ont un rôle déterminant dans la structure du paysage et la composition en espèces des écosystèmes impactés (Díaz-Delgado et al., 2004; Trabaud, 1994). Pourtant, tous les écosystèmes néo-calédoniens ne sont pas exposés au même risque d'incendie de par leur composition, leur structure et le climat dont ils bénéficient.

Les régimes de feux (fréquence et structure spatiale des feux) sont spatialement et temporellement dynamiques, et largement influencés par les changements encourus au sein des milieux naturels (Massada et al., 2009). L'impact anthropique est notamment l'un des principaux facteurs modifiant les milieux naturels et par conséquent les régimes de feu (Syphard et al., 2008). La quantification de la structure spatiale et temporelle des incendies est primordiale afin de mettre en évidence les écosystèmes les plus vulnérables selon le contexte naturel et/ou anthropique (e.g Massada et al., 2009).

Prédire et quantifier les régimes de feux implique d'analyser non seulement les conditions d'ignition mais aussi de propagation. Un modèle d'ignition a été mis en place dans le cadre du projet et nous fournit notamment des prédictions moyennes de probabilité de départ de feu sur les dix dernières années en fonction de trois modèles combinés : social, climatique et environnemental. Ensuite, une fois qu'un feu a démarré dans le milieu naturel, il se propage selon trois paramètres principaux : la combustibilité de la végétation, la topographie et les conditions climatiques (vent, température, humidité) (Finney, 2006; Syphard et al., 2008).

L'estimation du risque incendie consiste à caractériser et combiner les probabilités de comportement des feux et leurs effets sur les milieux naturels en termes de perte ou de gain (Finney, 2005). Deux risques peuvent être estimés selon si l'on considère chaque incendie comme des événements indépendants (on parle alors d'aléa induit) ou si l'on prend en compte la probabilité de passage d'un feu cumulant ainsi l'effet de plusieurs incendies (initiés à des endroits différents). Le premier type de risque est un risque dit « événementiel » permettant de cibler l'impact d'un feu, initié à un endroit donné et à un moment donné. En revanche, le deuxième type de risque inclut une notion de temporalité mettant en exergue les régions où le feu a plus de chances de passer.

OBJECTIFS

Notre objectif principal a été d'estimer le risque incendie sur le potentiel de biodiversité végétale sur l'ensemble de la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie selon le schéma suivant. Les couches dites de départ doivent être calculées et estimées.

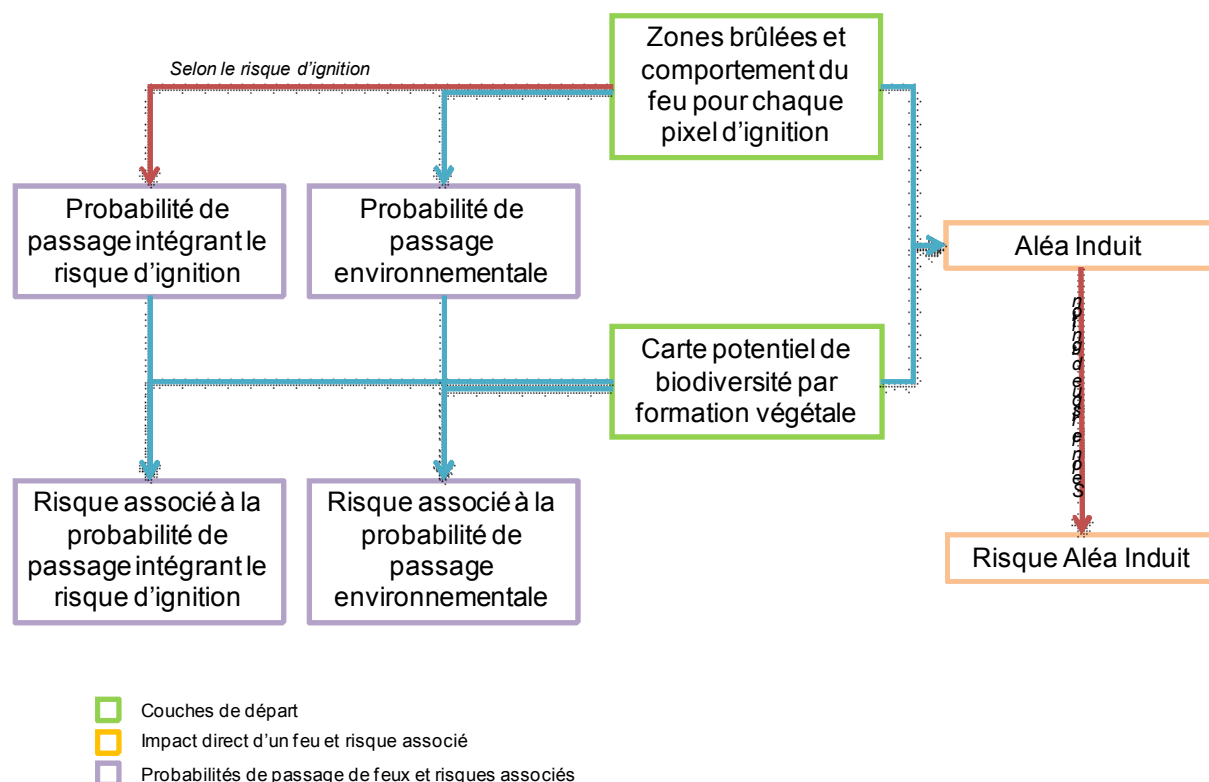


Figure 4 Principales données d'entrées et combinaison pour le calcul des différents risques incendie

Pour cela, il a s'agit de développer des indicateurs précis et généralisables de biodiversité végétale en Nouvelle-Calédonie afin d'évaluer spatialement l'impact des incendies sur cette biodiversité. Un travail de cartographie à large échelle des principales formations végétales a été effectué au préalable, sur la base des connaissances expertes et des données relatives aux formations publiées dans la littérature. Les indicateurs développés font alors état du potentiel de biodiversité de chacune des formations végétales et plus précisément dans un contexte de vulnérabilité face aux feux.

Dans un deuxième temps, la propagation des incendies a été modélisée afin d'estimer les surfaces brûlées et le comportement des incendies associées pour chaque pixel d'ignition potentielle de la Nouvelle-Calédonie.

Enfin les risques d'incendie sur le potentiel de biodiversité végétale caractérisé ont été estimés selon plusieurs approches nous permettant de distinguer l'impact direct d'un incendie indépendant localisé et l'impact répété de passage de feux. Ces deux estimations permettront alors des utilisations différentes par les acteurs intéressés.

MATERIEL ET METHODES

CARACTERISATION DES PRINCIPALES FORMATIONS VEGETALES EN NOUVELLE-CALÉDONIE

En Nouvelle-Calédonie, les formations végétales sont définies en fonction de la nature de la végétation, du type de sol et de l'altitude. Leurs compositions et leurs structures ont été décrites par les experts botanistes locaux ((Jaffré et al., 1998; Jaffré et al., 2009; Jaffré, Veillon, 1994; Jaffré et al., 1997)), mais exclusivement pour les plantes vasculaires, dites phanérogames. Les données de composition publiées font référence principalement au nombre total d'espèces, au nombre d'espèces endémiques et au nombre d'espèces endémiques et spécifiques d'une formation. Ces valeurs généralisées par formation, sont celles que nous avons utilisées pour les discriminer en termes de potentiel (voir ci-dessous).

La cartographie de ces principales formations végétales actuelles a été effectuée sur la base des données d'occupation du sol, issues de SPOT (DTSI, Boyaud, 2008) validée à hauteur de 0,755 de coefficient Kappa, des données d'altitude, issues du Modèle Numérique de Terrain (MNT, DITTT) et des données de pédologie différenciant les principaux types de sols (ValPedo, IRD). La résolution de la carte est de 300 m x 300 m afin de correspondre à la résolution du modèle d'ignition réalisé préalablement. Cependant, lors de la construction de cette carte, la résolution spatiale a été optimisée en calculant des fichiers raster brick, pour les couches d'occupation du sol et de pédologie. Ces fichiers raster brick contiennent autant de couches d'information que de classes d'entités existantes. Chaque couche présente des valeurs allant de 0 à 1 (valeur p), représentant le pourcentage de couverture de la classe correspondante, dont l'information est contenue dans les fichiers vecteurs correspondants à plus fine résolution (utilisation de la fonction rasterize sous R). Ces fichiers raster brick sont alors combinés avec la couche altitude afin de construire la carte des formations végétales. Ainsi, nous pouvons calculer les indices de biodiversité proportionnellement à la surface réelle de chaque formation végétale sur chaque pixel.

Huit principales formations végétales sont ainsi cartographiées et distinguées : la forêt dense humide (FDH) sur sols ultramafiques, la FDH sur sols volcano-sédimentaires, la FDH sur sols calcaires, le maquis minier sur sols ultramafiques de moyenne et basse altitude et celui de haute altitude, la forêt sèche, la savane et autres formations secondaires et la mangrove.

Parallèlement, une carte de la distribution potentielle (sans impact anthropique) des formations végétales a été réalisée en combinant les couches de pédologie, d'altitude et de pluviométrie annuelle selon les seuils présentés dans le Tableau 1. La distribution potentielle des formations végétales ne présentent alors que les formations dites primaires, c'est-à-dire existant naturellement sans impact anthropique. Il est intéressant de noter que le maquis minier est une formation primaire mais qui s'étend sous l'influence de l'homme et notamment des feux (elle est donc dite mixte). Cette carte nous permet de calculer la surface potentielle de chacune des formations exclusivement ou partiellement primaire afin de les comparer aux surfaces actuelles. On considère alors que les incendies sont le principal facteur de régression des formations végétales exclusivement primaires.

Tableau 1 Règles d'expert pour localiser les formations climaciques potentielles en Nouvelle-Calédonie

Formation végétale	Pluvio annuelle (mm)	Altitude (m)	Substrat
Forêt dense humide			
Haute altitude, sols ultramafique	>1100	1000-1350	Ultramafique
Moyenne / basse altitude, sols ultramafique	>1100	<1000	Ultramafique
Haute altitude, sols volcano-sédimentaire	>1100	1000-1350	Volcano-sédimentaire
Moyenne / basse altitude, sols volcano-sédimentaire	>1100	<1000	Volcano-sédimentaire
Toute altitude, sols calcaires	>1100	-	Calcaire
Maquis de haute altitude	-	>1350	Ultramafique
Maquis de moyenne et basse altitude	<1100	<1000	Ultramafique
Forêt sèche	<1100	-	Volcano-sédimentaire
Mangrove	-	-	Humide

Deux étapes de validation ont été menées pour 1) valider la cartographie elle-même et 2) valider l'utilisation de valeurs généralisées pour caractériser les grandes formations végétales.

La première étape de validation s'est appuyée sur les relevés botaniques d'espèces spécifiques de chaque formation ayant un géoréférencement précis. La cartographie et ces points géoréférencés sont alors croisés afin de calculer une matrice de confusion. Une erreur de 50 à 300 mètres est admise pour évaluer le gain dans la prédiction.

La deuxième étape de validation a été menée uniquement pour les forêts denses humides (tous substrats et altitude confondus) pour des raisons de disponibilité des données. La distribution des espèces endémiques et endémiques spécifiques inventoriées au sein du réseau de parcelles (174 parcelles) mis en place en Nouvelle-Calédonie, est comparée à la valeur générale utilisée pour caractériser cette formation particulière.

ELABORATION D'UN INDICATEUR DE POTENTIEL DE BIODIVERSITE PAR FORMATION

Chaque formation végétale a ensuite été caractérisée selon deux indicateurs : un indice de diversité et un indice de vulnérabilité (utilisables indépendamment ou de manière couplée).

Le premier indice de diversité (D) combine trois taux basés sur le nombre total d'espèces (TS), le nombre d'espèces endémiques (ES) et le nombre d'espèces endémiques et spécifiques (SES) recensées au sein d'une formation végétale (u) et sur tout le territoire de Nouvelle-Calédonie (L). Ces trois taux sont combinés linéairement et pondérés par la surface actuelle de la formation végétale correspondante (AS_u):

$$D_u = \left(a \frac{TS_u}{TS_L} + b \frac{ES_u}{ES_L} + c \frac{SES_u}{SES_L} \right) \times \frac{1}{AS_u} \quad (1)$$

Les distributions des valeurs des trois taux sont analysées afin d'équilibrer leur contribution et de déterminer des coefficients de pondération (annotés a , b et c).

A partir de cet indice calculé pour chacune des formations végétales identifiées en Nouvelle-Calédonie, la quantité de diversité présente au sein d'un pixel est estimée. Pour cela, l'indice D_u associé à la surface d'un pixel (S_i) et à sa composition en formations végétales ($p_{i,u}$) est sommé sur l'ensemble des formations végétales pour un pixel donné $i \in L$, L étant l'ensemble des pixels de Nouvelle-Calédonie.

$$D_i = \sum_{u \in U} S_i \times p_{i,u} \times D_u \quad (2)$$

Où U est l'ensemble des formations végétales u .

Enfin, un indice normalisé DNC_i est calculé afin que $\sum_i^{NC} DNC_i = 1$:

$$DNC_i = \frac{D_i}{\sum_i^{NC} D_i} \quad (3)$$

Le deuxième indice, l'indice de vulnérabilité face au feu (Vul), est calculé par formation végétale. Il rend compte non seulement de l'évolution d'une formation sous l'effet global des incendies (formation en régression ou en expansion – formation primaire ou secondaire) mais aussi du temps de résilience (notée Res) de chaque formation après le passage d'un incendie. Le rapport de surface potentielle (PS) et surface actuelle (AS) nous permet d'estimer si la formation est en régression ou en expansion. De nouveau, la vulnérabilité est attribuée à chaque pixel en fonction de sa composition en formation végétale ($p_{i,u}$) :

$$Vul_i = \sum_{u \in U} p_{i,u} \times Res_u \times \frac{PS_u}{AS_u} \quad (4)$$

MODELISATION DU COMPORTEMENT DU FEU LORS DE SA PROPAGATION

Des départs de feu sont simulés pour chaque pixel de la Nouvelle-Calédonie selon l'algorithme MTT (Minimum Travel Time) implémenté dans le logiciel FlamMap [46]. La propagation et le régime de chaque feu ont été simulés en tenant compte des variations spatiales de la combustibilité, de la topographie et des conditions climatiques [46]. Les îles Loyautés ne sont pas incluses dans cette analyse car elles sont essentiellement composées de sols calcaires sur lesquels poussent de la forêt dense humide qui sont des sols très peu propices à la propagation des feux. Les îles Loyautés n'étant pas menacées par les incendies, ne constituent pas une priorité dans cette étude et ne sont pas intégrées

L'algorithme de propagation utilisé peut simuler des feux à travers des paysages complexes tout en supposant des conditions climatiques constantes [47]. En pratique, il est impossible d'obtenir ou de simuler des données de propagation pour un nombre infini de combinaisons de conditions climatiques et d'ignitions. En général, les études sur les risques incendies concentrent les simulations sur les conditions climatiques extrêmes, dans la mesure où elles favorisent la propagation de graves incendies qui sont plus difficile à contrôler et qui expose les milieux naturels à un risque plus fort [48].

Ici, la propagation des feux a été simulée selon le pire scénario envisageable, à savoir selon les pires conditions climatiques et sur une durée maximale de 8 heures (calculée selon les surfaces de feu moyennes détectées par MODIS et une vitesse de propagation de 3m/min) correspondant à une après-midi entière de combustion. En effet, le modèle de combustibilité de la végétation et les conditions de vent ont été calculés selon les pires conditions climatiques moyennes (définies selon Météo France). L'algorithme est calibré pour 300 mètres de résolution.

Pour chaque incendie simulé et initié sur un pixel donné j , l'intensité du feu $I_{i,j}$ (kW/m) et la vitesse de propagation $RoS_{i,j}$ (m/min) sont calculés pour chaque pixel i appartenant à la surface brûlée (notée B_j). Pour caractériser l'ampleur des effets négatifs du feu, un indice de sévérité est calculé pour chacun des pixels i de la surface brûlée :

$$\begin{cases} Sev_{i,j} = I_{i,j} \times \frac{1}{RoS_{i,j}} & \text{if } i \in B_j \\ Sev_{i,j} = 0 & \text{if } i \notin B_j \end{cases} \quad (5)$$

CALCUL DE L'IMPACT DIRECT, ALÉA INDUIT, ET RISQUE ASSOCIÉ

On appelle aléa induit (annoté EO), l'impact direct du passage d'un feu sur le milieu naturel. Cet impact dépend non seulement de la sévérité du feu, de la vulnérabilité du milieu naturel mais aussi de sa diversité. Chaque pixel d'ignition j a induit une surface brûlée au sein de laquelle le comportement du feu a varié (intensité et temps de résidence ou vitesse de propagation). L'aléa induit est calculé pour chacun des pixels de la surface brûlée dans un premier temps. Puis la somme des aléas induits de la surface brûlée est effectuée et rapportée au pixel d'ignition.

$$EO_j = \sum_{i \in B_j} Sev_{i,j} \times DNC_i \times Vul_i \quad (6)$$

Le risque associé à l'aléa induit (annoté EOR) est ensuite calculé en intégrant la probabilité d'ignition au calcul. Plusieurs calculs sont alors possibles selon si l'on considère la probabilité d'ignition moyenne sur 10ans (risque statique) ou la probabilité d'ignition mise à jour quotidiennement (risque dynamique).

$$EOR_j = EO_j \times FIP_j \quad (7)$$

CALCUL DES PROBABILITES DE PASSAGE DU FEU ET DES RISQUES SUR LA DIVERSITE VEGETALE ASSOCIEE

Les probabilités de passage sont une estimation de la composante probabiliste dans l'étude d'un risque, mais elles ne permettent pas de distinguer les différents comportements de feu, qui sont nécessaires pour déterminer l'impact d'un feu [48], comme c'est par ailleurs le cas de l'aléa induit. En revanche, elles permettent d'ajouter une notion de temporalité au calcul du risque. Cette approche est donc complémentaire du calcul du risque de l'aléa induit.

Une zone brûlée est associée à chaque pixel d'ignition et compilée à une grille cumulative de zones brûlées à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie. On appelle BAM, une matrice au sein de laquelle $BAM_{i,j}$ correspond au résultat de la propagation d'un feu initié au pixel j et ayant impacté les pixels i , avec :

$$\begin{cases} BAM_{i,j} = 1 \text{ if cell } i \text{ burned} \\ BAM_{i,j} = 0 \text{ if cell } i \text{ did not burn} \end{cases} \quad (8)$$

Une probabilité de passage par défaut est calculée sur l'ensemble des incendies simulés en Nouvelle-Calédonie, incluant l'ensemble des pixels, en sommant, pour chaque pixel i , les zones brûlées de chaque incendie individuel et en divisant par le nombre total d'incendies initiés (ici égal au nombre total de pixels). Il s'agit d'une distribution uniforme sur l'ensemble des pixels de la Nouvelle-Calédonie.

$$\begin{cases} NB_Occ_i = \sum_j BAM_{i,j} \\ BP_i = \frac{NB_Occ_i}{N} \end{cases} \quad (9)$$

Où NB_Occ_i correspond au nombre de fois que le pixel j brûle et N est le nombre total de feux simulés.

Une deuxième probabilité de passage est calculée en tenant compte de la probabilité d'ignition (moyenne sur 10 ans) calculée au préalable. Pour cela, le nombre de feux passant par pixel est calculé en multipliant le nombre d'ignitions (ici fixé à 100000) par la probabilité d'ignition relative à chaque pixel (la distribution de cette probabilité n'est donc plus uniforme). Ensuite, la même formule que précédemment est appliquée.

$$\begin{cases} NB_Occ_i = \sum_j BAM_{i,j} \times FIP_j \\ BP_i = \frac{NB_Occ_i}{N} \end{cases} \quad (10)$$

Ces deux probabilités de passage sont intéressantes à analyser dans la mesure où la première ne dépend que du contexte environnemental alors que la deuxième intègre également les paramètres anthropogéniques tels qu'ils sont intégrés au modèle d'ignition développé par ailleurs.

Enfin, les risques pour la diversité végétale, associés à chacune des probabilités de passage sont calculés en les combinant avec les indices de diversité et de vulnérabilité.

$$BPR_j = BP_j \times DNC_j \times Vul_j \quad (11)$$

$$BPIR_j = BPI_j \times DNC_j \times Vul_j \quad (12)$$

RESULTATS ET DISCUSSION

CARACTERISATION ET CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS VEGETALES

Les principales formations végétales (au nombre de huit) sont caractérisées selon leur vulnérabilité face aux incendies (rapport de surfaces potentielle et actuelle) et résilience, ainsi que selon leur diversité végétale en termes de nombre d'espèces (totales, endémiques et spécifiques). Les valeurs de surface ont été calculées respectivement sur la base de la carte des formations végétales actuelles (Figure 2) et potentielles (Figure 3) réalisées.

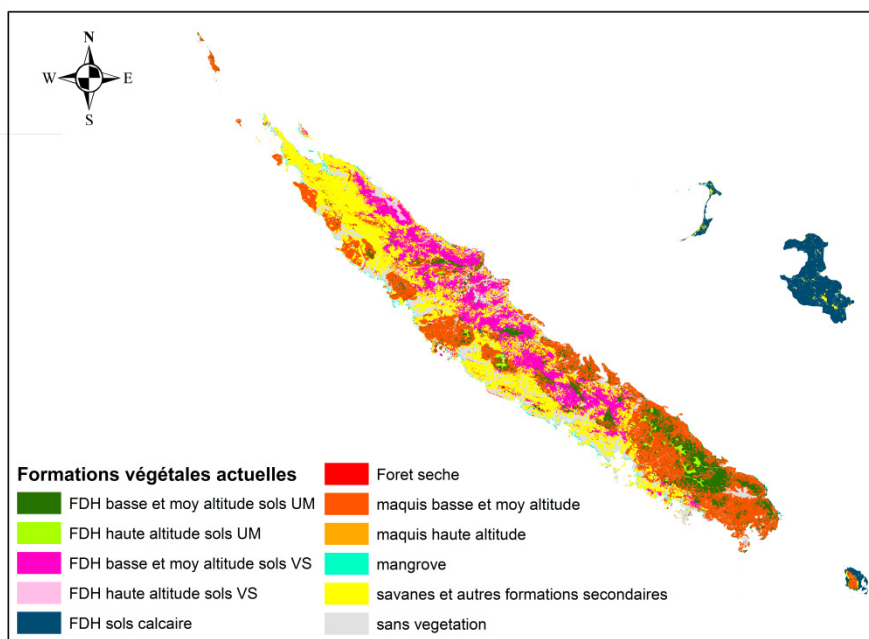


Figure 5 Distribution actuelle des principales formations végétales en Nouvelle-Calédonie

Comme précisé, la surface potentielle de la savane est fixée à 0 car il s'agit d'une formation strictement secondaire. Selon les experts, la mangrove n'aurait ni régressé ni se serait étendue sous l'influence anthropique en Nouvelle-Calédonie. Cette formation n'est par ailleurs pas soumise à l'impact des incendies. Sa surface potentielle est donc équivalente à sa surface actuelle.

Les valeurs de résilience ont été estimées par expertise croisée entre les botanistes et écologistes du feu.

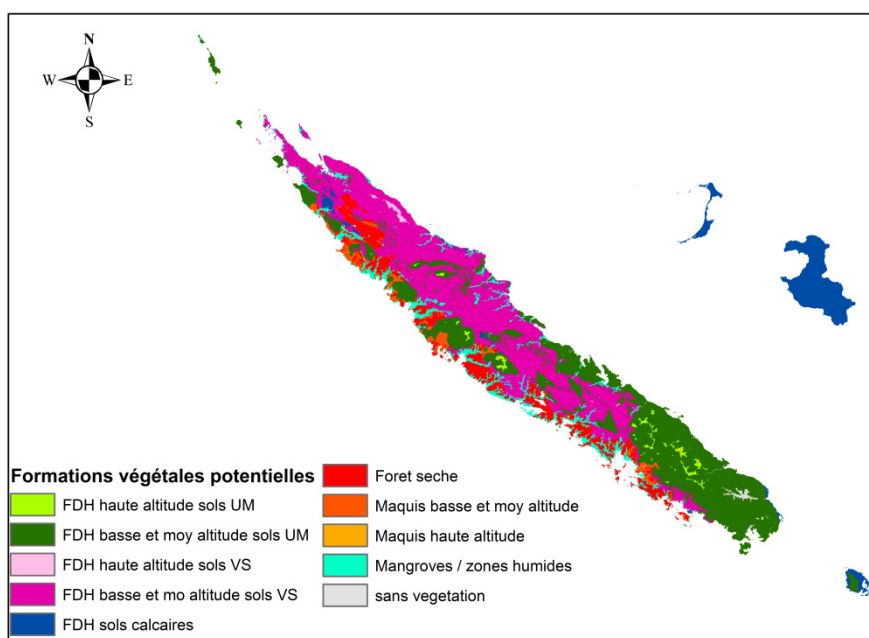


Figure 6 Carte de la distribution potentielle, sans impact anthropique, des formations végétales primaires en Nouvelle-Calédonie

Quant aux estimations en termes de nombre d'espèces, les valeurs sont issues de la littérature (Jaffré *et al.*, 1998; Jaffré *et al.*, 2009; Jaffré, Veillon, 1994; Jaffré *et al.*, 1997) hormis le nombre d'espèces endémiques et spécifiques des maquis de moyenne/basse altitude et de haute altitude (Tableau 3). Ces dernières (*) sont estimées selon les connaissances expertes à savoir que l'on observe généralement 22% d'endémisme spécifique en maquis (Munzinger, données personnelles).

Tableau 2 Attributs de chaque formation végétale considérée

1 Jaffré, et al (2009) PSI Tahiti ; 2 Jaffré, Veillon, Pintaud (1997) ; 3 Jaffré, et al (1998) Threatened plant of NC

Formation végétale	Surface potentielle	Surface actuelle	Résilience	Espèces Totales (TS)	Espèces endémiques (ES)	Espèces endémiques spécifiques (SES)
Forêt Dense Humide	14744	6570	1	2013 ¹	1171 ¹	1160 ¹
Sols calcaires	2145	1720	0.5	225 ²	108 ²	23 ²
Sols ultramafiques	5891	1770	1	1360 ²	1121 ²	574 ²
Sols volcano-sédimentaires	6709	3080	1	1367 ²	1048 ²	481 ²
Maquis	480	4267	0.5	1144 ¹	1016 ¹	534 ¹
Moyenne et basse altitude	473	4223	0.5	1100 ³	979 ³	21*
Haute altitude	7	44	0.5	200 ³	182 ³	242*
Forêt sèche	1648	52	0.5	424 ¹	233 ¹	67 ¹
Savane / formations secondaires	0	5311	0.01	410 ¹	45 ¹	4 ¹
Mangrove	148	148	0.001	345 ¹	108 ¹	25 ¹
TOTAL	--	--	--	3260	2412	1437

La cartographie des formations végétales a été validée à hauteur de 60,8% de précision et un coefficient de kappa de 26.4%. Or il se trouve que une grande majorité des points se trouvent en bordure de formations végétales. De ce fait, en introduisant une marge d'erreur la prédiction est améliorée de 78% à 50m jusqu'à 98.95% à 300m et le coefficient de kappa atteint 55% à 50m et 85.3% à 300m. Une erreur de 300m dans notre étude est tout à fait acceptable dans la mesure où le modèle complet est calculé à 300m de résolution. Cette résolution permet d'intégrer les erreurs spatiales inhérentes aux images satellites (MODIS) à la base du modèle lui-même.

Enfin l'utilisation de valeurs généralisées pour caractériser les formations végétales a été validée pour la forêt dense humide. Pour les espèces endémiques, la distribution d'espèces recensées est en moyenne (93% ± 5.6%) supérieure à la valeur généralisée utilisée (82.1%). Ceci est dû au fait que toutes les espèces végétales ont été recensées sur le terrain incluant des familles aux taux d'endémisme très faible (*i.e.* Orchidacées). Concernant les espèces endémiques spécifiques, les valeurs correspondent bien avec 57.62% *versus* 61% ± 19% (Figure 4).

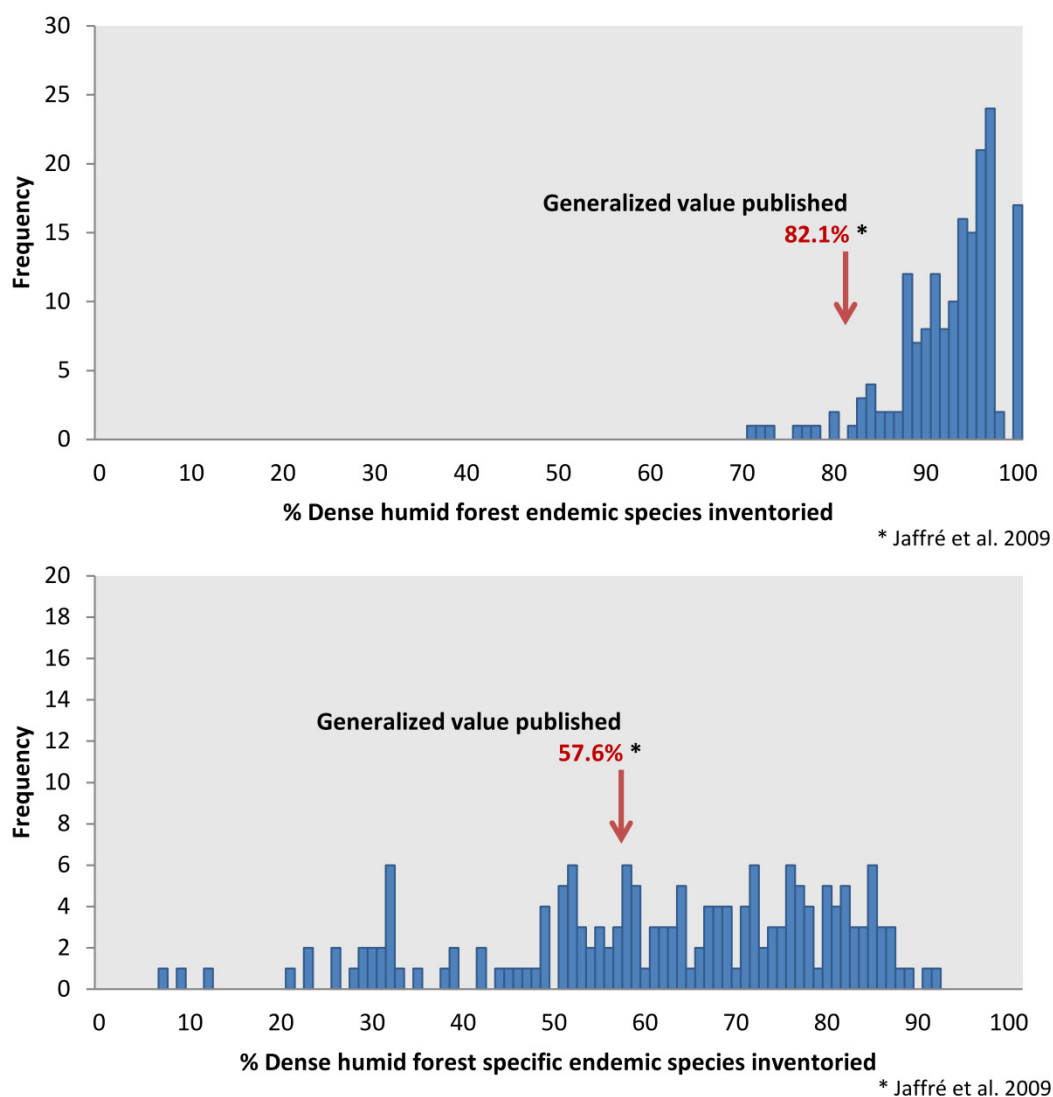


Figure 7 Histogrammes permettant de comparer les valeurs généralisées issues de la littérature utilisées pour la caractérisation des formations à la distribution de valeurs issues du recensement d'espèces au sein du réseau de parcelles botaniques mis en place.

UN INDICATEUR GENERALISE REPRESENTANT LE POTENTIEL DE BIODIVERSITE DES FORMATIONS VEGETALES FACE AU FEU

Cet indicateur a été normalisé et varie alors entre 0 et 1 (Figure 5), représentant la part du potentiel de biodiversité total par pixel. Il est important de rappeler que cet indicateur a été calculé par pixel en fonction de la composition de ce pixel en formations végétales. La cartographie de cet indicateur apparaît donc mieux résolue que la carte des formations végétales brutes. La distinction, en termes de potentiel total, est toutefois claire avec la forêt sèche ayant un potentiel très élevé jusqu'aux formations secondaires (incluant la savane) qui ont un potentiel nul.

Quatre formations végétales ont un potentiel de diversité et de vulnérabilité face au feu que l'on considère élevé. La forêt sèche est la formation au plus fort potentiel de diversité et de vulnérabilité face au feu ($> 0,5$). En effet, elle présente non seulement des taux d'endémisme et d'endémisme spécifique élevés, mais aussi une très forte vulnérabilité face aux incendies surtout mise en évidence par sa forte régression par rapport à sa distribution potentielle au profit de la savane et autres formations secondaires. La forêt dense humide sur sols ultramafiques est la deuxième formation au plus fort potentiel ($> 0,1$) de par son taux d'endémicité très élevé mais aussi sa forte régression au profit du maquis minier.

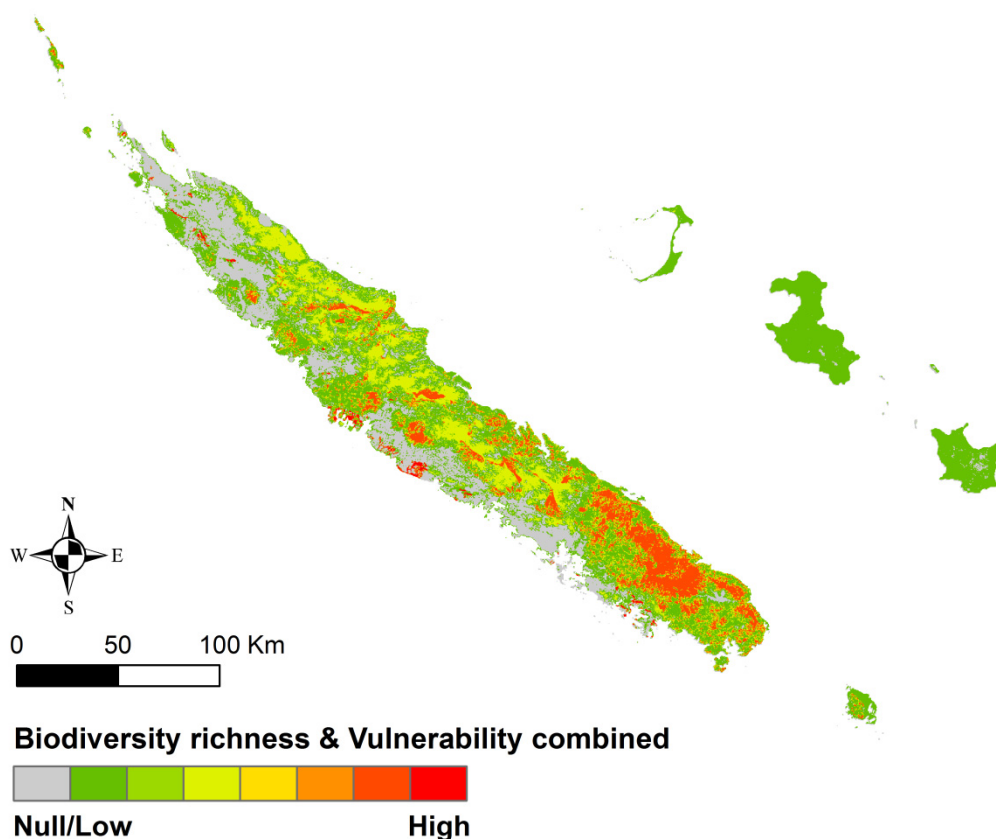


Figure 8 Indice de diversité et de vulnérabilité combiné

Par ailleurs, le temps de résilience de cette formation est plus long que celui d'une forêt dense humide sur sols volcano-sédimentaires dû aux difficultés de germination notamment. Le maquis de haute altitude se distingue ensuite notamment par sa faible superficie et son taux d'endémisme spécifique élevé. Enfin, la forêt dense humide sur sols volcano-sédimentaires a un potentiel de diversité élevé, bien que son potentiel de vulnérabilité soit moindre par rapport aux trois formations décrites précédemment. Cette forêt dense humide est naturellement moins vulnérable face aux incendies que la forêt dense humide sur sols ultramafiques mais demeure un réservoir de biodiversité très riche.

Les autres formations végétales ont un potentiel inférieur qui traduit un niveau d'endémisme faible (savane), un temps de résilience faible (savane, mangrove), une évolution vers l'expansion (formations mixtes ou secondaires) ou une faible exposition naturelle aux incendies (mangrove). En effet, il s'agit notamment des formations végétales mixtes (maquis de basse et moyenne altitude), ou exclusivement secondaires (savane) et de la mangrove pour lesquelles les feux ne constituent pas une menace.

MODELISATION DE LA PROPAGATION DES INCENDIES ET OBTENTION DES SURFACES BRULEES POTENTIELLES

Pour chaque point d'ignition de la Nouvelle-Calédonie (chaque pixel de 300 * 300 mètres), la propagation d'un incendie est simulée selon les pires conditions climatiques et sur une durée maximale de huit heures. Les surfaces brûlées et le comportement associé des incendies que nous obtenons représentent donc une estimation du pire scénario envisageable. Chaque pixel d'ignition potentiel de la Nouvelle-Calédonie (hormis les trois îles Loyautés) se voit donc attribué une surface brûlée composée au maximum de 441 pixels pour lesquels l'intensité et le temps de résidence (ou à l'inverse vitesse de propagation) du feu sont renseignés. La sévérité associée à chaque surface brûlée et donc est calculée selon l'équation 5.

APPROCHE EVENEMENTIELLE : QUEL EST L'IMPACT ET LE RISQUE ASSOCIE SI UN INCENDIE DEMARRE ?

L'aléa induit (Figure 6) est obtenu pour chaque potentiel pixel d'ignition en fonction de l'impact qu'un incendie issu de ce pixel aura sur l'environnement de la surface brûlée engendrée. Concrètement, si un pixel a un fort aléa induit, cela signifie que si le feu y démarre, les pertes en termes de diversité sur la surface brûlée engendrée seront très importantes.

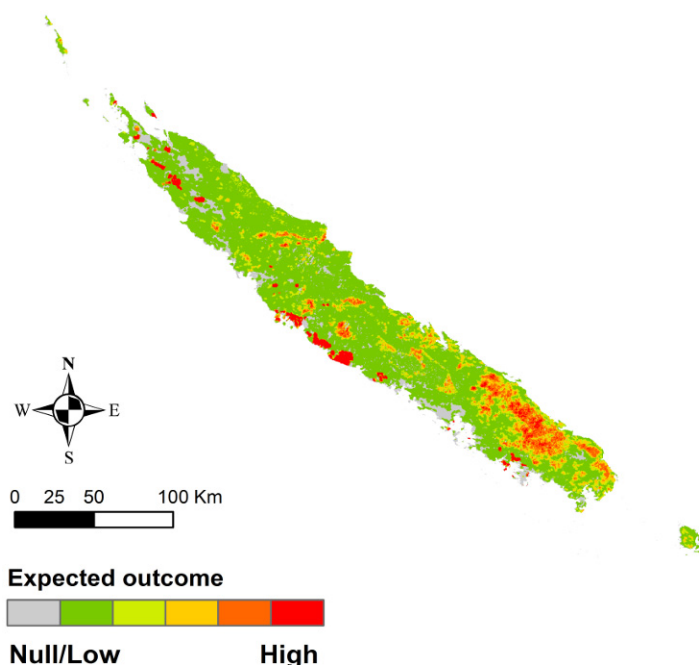


Figure 9 Aléa induit ou impact direct d'un incendie sur la biodiversité végétale

Nous remarquons que toutes les zones à proximité des derniers lambeaux de forêts sèches ont un aléa induit très élevé ($>0,19$), les zones à proximité de formations de forêts dense humide sur sols ultramafiques ont un aléa induit élevé ($0,026 - 0,19$) et enfin les zones de maquis ou avoisinantes ont un aléa induit moyen ($0,02 - 0,026$).

Il est intéressant de remarquer qu'un incendie peut démarrer d'une zone à faible potentiel en termes de biodiversité végétale mais peut pourtant engendrer un incendie très impactant, à fort aléa induit. C'est le cas des bordures entre deux formations, comme par exemple entre la savane et la forêt sèche. C'est pour cette raison qu'il est impératif de calculer l'aléa induit sur la totalité de la surface brûlée avant de le rapporter au pixel d'ignition.

Le risque directement associé à l'aléa induit (Figure 7) est ensuite calculé en intégrant la probabilité d'ignition (préalablement calculée). Les zones à fort aléa induit les plus probables sont ainsi visualisées. Elles correspondent aux zones à fort aléa induit et à forte probabilité d'ignition.

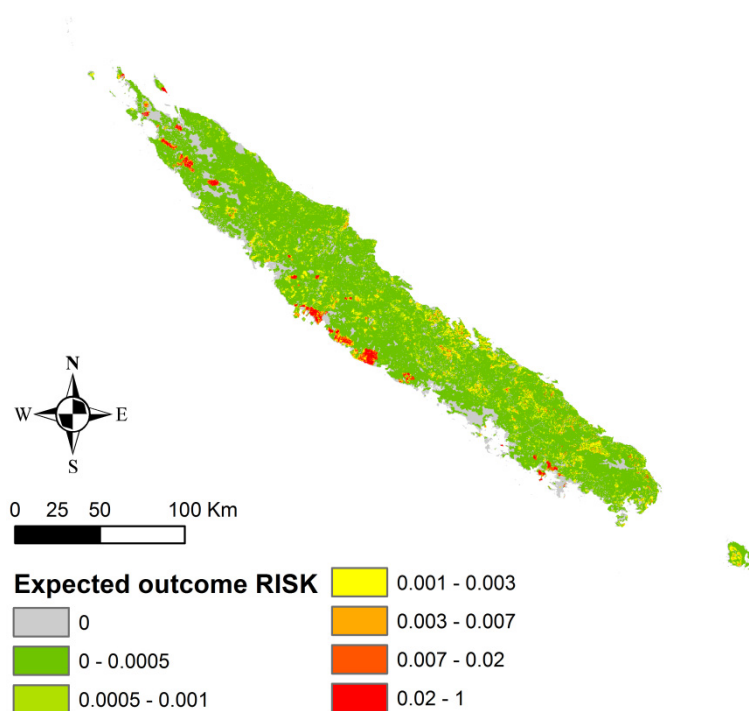


Figure 10 Risque associé à l'aléa induit

Ici, il s'agit de fournir un outil aux gestionnaires, leur permettant de mettre en place des mesures d'urgence si un incendie venait à démarrer au sein d'un pixel ayant un fort aléa induit. Les gestionnaires seront en mesure de distinguer les incendies à fort aléa induit de ceux n'ayant qu'un faible impact sur le potentiel de biodiversité végétale. Il s'agit réellement d'un outil à utilisation directe et d'urgence, ne permettant pas d'anticiper par la mise en place de structures pérennes visant la limitation des incendies.

Ce risque peut être calculé sur une moyenne de probabilité d'ignition sur les dix dernières années, fournissant donc un risque moyen. Cependant, il peut aussi être actualisé de manière journalière dans la mesure où la probabilité d'ignition est disponible quotidiennement, mise à jour selon les modèles climatiques.

APPROCHE TEMPORELLE PROBABILISTE : REPERER LES REGIONS LES PLUS « A RISQUE »

L'approche temporelle quant à elle apporte une information complémentaire, sur le long terme, aux gestionnaires. Les risques calculés qui en sont issus permettent de repérer rapidement les zones qui brûlent le plus souvent. La notion de temporalité est particulièrement importante s'il s'agit de mettre en place des mesures de sécurité permanentes afin de limiter le passage du feu dans des zones d'intérêt particulier en termes de diversité et de vulnérabilité.

Il est important de noter que notre approche ne prend pas en compte les changements induits par le passage d'un premier feu pour calculer la propagation du feu suivant.

Ces probabilités de passage et leurs risques associés ont été calculés selon deux cas de figure, en tenant uniquement compte uniquement des conditions environnementales d'une part (Figure 8) et en intégrant l'impact anthropique d'autre part (au travers de la probabilité d'ignition calculée notamment selon un modèle anthropique) (Figure 10). Seuls les résultats concernant cette dernière sont présentés ici dans la mesure où la probabilité de passage par défaut ne fait état que d'une situation hypothétique où l'homme n'aurait aucun impact.

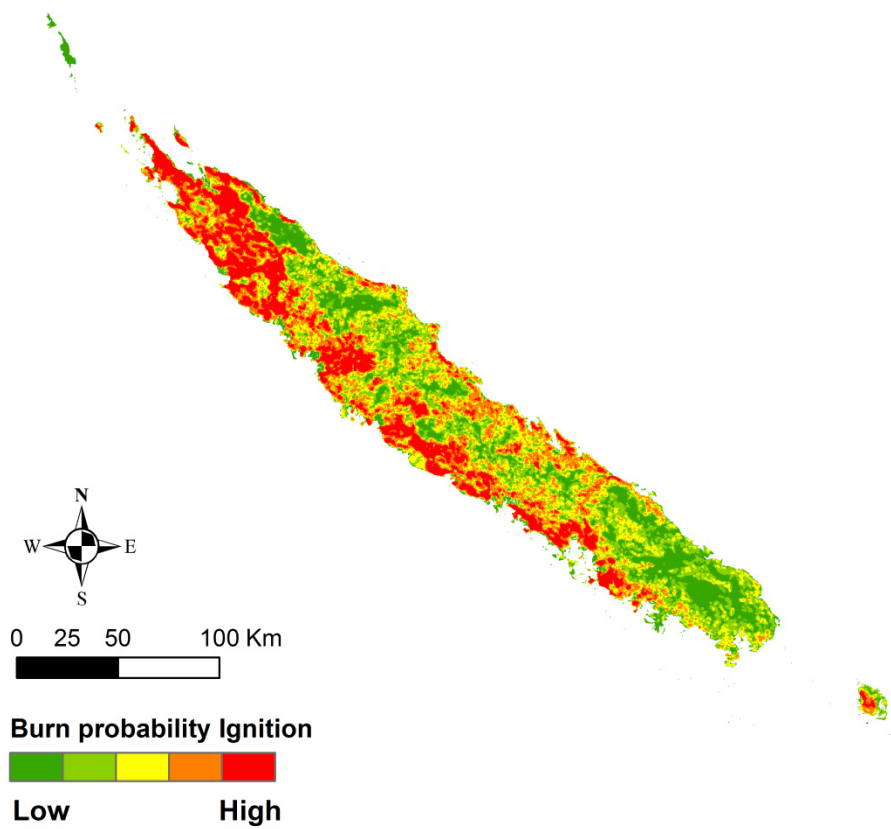


Figure 11 Probabilité de passage réelle calculée selon la probabilité d'ignition

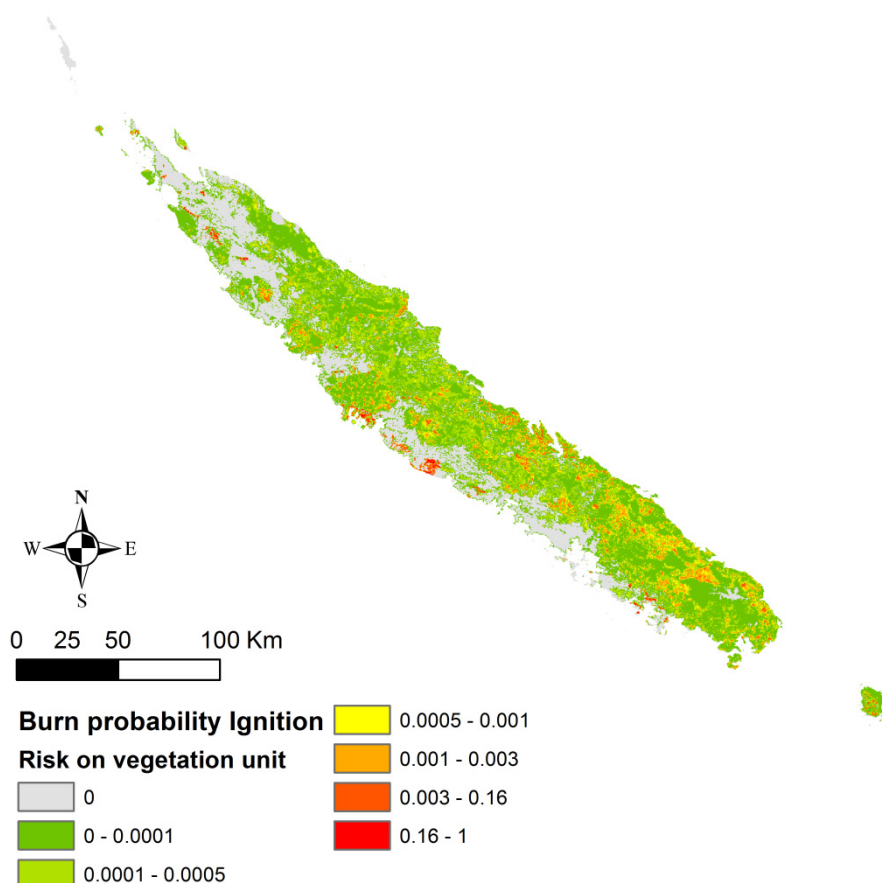


Figure 12 Risque associé à la probabilité de passage selon le risque d'ignition sur la biodiversité végétale

Alors que la probabilité de passage intégrant la probabilité d'ignition rend mieux compte de la réalité et permet donc de calculer un risque sur la diversité des formations végétales plus réel et par conséquent plus utile, la probabilité de passage dite environnementale résume les composantes physiques et environnementales des incendies en Nouvelle-Calédonie. Les différences entre ces produits sont riches d'enseignements dans un contexte local où les enjeux de conservation de la biodiversité végétale face aux incendies est grandissante.

CONCLUSION

Le risque incendie sur la biodiversité végétale en Nouvelle-Calédonie est réel. Il a été quantifié au niveau des grandes formations végétales en mettant en avant les fortes menaces qui pèsent sur des formations comme la forêt sèche qui est à la fois très riche, très vulnérable et très impactée. Les livrables de cette étude permettent non seulement d'avoir une vision globale de la situation sur le territoire mais également de mener des actions à différents niveaux. Le risque d'impact direct pourrait permettre des interventions d'urgence afin de maîtriser des incendies dévastateurs en allouant des moyens sur les zones les plus à risque. En parallèle, le risque issu de la probabilité de passage du feu pourrait permettre de mettre en place des aménagements adéquats pour limiter les démarrages de feu autour des zones ciblées comme étant les plus à risques.

Des études à des échelles plus fines permettraient d'augmenter la résolution de nos résultats. Pour cela, il faudrait mener des études très lourdes quant à la caractérisation des habitats en Nouvelle-Calédonie afin d'évaluer la biodiversité présente à une échelle plus fine.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Díaz-Delgado R, Lloret F, Pons X (2004) Spatial patterns of fire occurrence in Catalonia, NE, Spain. *Landscape Ecology* 19, 731 - 745.
- DTSI, Boyaud YE (2008) Classification de l'occupation du sol de la Nouvelle-Calédonie par approche objet réalisée par le Service de Géomatique et de la Télédétection du Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie.

- Finney MA (2002) Fire growth using minimum travel time methods. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* 32, 1420 - 1424.
- Finney MA (2005) The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire. *Forest Ecology and Management* 211, 97 - 108.
- Finney MA (2006) An overview of FlamMap fire modelling capabilities. *USDA Forest Service Proceedings RMRS*, 41.
- Groeneveld J, Enright NJ, Lamont BB (2008) Simulating the effects of different spatio-temporal fire regimes on plant metapopulation persistence in a Mediterranean-type region. *Journal of Applied Ecology* 45, 1477 - 1485.
- Hochberg ME, Menaut J-C, Gignoux J (1994) The Influences of Tree Biology and Fire in the Spatial Structure of the West African Savannah. *Journal of Ecology* 82, 217 - 226.
- Jaffré T, Bouchet P, Veillon J-M (1998) Threatened plants of New Caledonia : is the system of protected areas adequate ? *Biodiversity and Conservation* 7, 109 - 135.
- Jaffré T, Rigault F, Dagostini G, et al. (2009) Input of the different vegetation units to the richness and endemism of New-Caledonia. In: *Proceedings Pacific International Science Congress, Tahiti*.
- Jaffré T, Veillon J-M (1994) Les principales formations végétales autochtones en Nouvelle-Calédonie: caractéristiques, vulnérabilité, mesures de sauvegarde. In: *Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ed. ORSTOM), Centre de Nouméa*.
- Jaffré T, Veillon J-M, Pintaud J-C (1997) Comparaison de la diversité floristique des forêts denses humides sur roches ultramafiques et sur substrats différents en Nouvelle-Calédonie. In: *Conférence Internationale sur l'Ecologie des Milieux Serpentiniques = International Conference on Serpentine Ecology Nouméa*.
- Jaffré T, Veillon J-M, Rigault F, Dagostini G (1995) Impact des feux de brousse sur le milieu naturel en Nouvelle-Calédonie. In: *Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ed. ORSTOM), Centre de Nouméa*.
- Massada AB, Radeloff VC, Stewart SI, Hawbaker TJ (2009) Wildfire risk in the wildland-urban interface: a simulation study in northwestern Wisconsin. *Forest Ecology and Management* 258, 1990 - 1999.
- Mittermeier RA, Robles GP, Hoffman M, et al. (2004) Hotspots revisited: Earth's biologically richest and most threatened terrestrial ecoregions. *Mexico city, Mexico*.
- Syphard AD, Radeloff VC, Keuler NS, et al. (2008) Predicting spatial patterns of fire on a southern California landscape. *International Journal of Wildland Fire* 17, 602 - 613.
- Trabaud L (1994) Post-fire plant community dynamics in the Mediterranean Basin. In: *The role of fire in Mediterranean-type ecosystems*, pp. 1 - 15. *Ecological studies*, Springer.
- Whelan RJ (1995) *The ecology of fire*, Cambridge University Press.

F.2 ANALYSE DU RISQUE INCENDIE EN NOUVELLE-CALÉDONIE : UNE ANTHROPISATION COMPLEXE DES PAYSAGES ENTRE HÉRITAGE ET ADAPTATIONS CONTEMPORAINES

Le risque incendie en Nouvelle-Calédonie : L'Homme responsable, mais pas coupable

Rapport rédigé par Pascal Dumas, Equipe GRED, Université de la Nouvelle-Calédonie et UMR ESPACE-DEV 228, IRD, Juin 2012

MOTS CLES : INCENDIES, RISQUE, FEUX DE BROUSSE, PERCEPTION, TELEDETECTION, SIG, NOUVELLE-CALÉDONIE

RESUME

La Nouvelle-Calédonie est un haut-lieu de la biodiversité mondiale, se classant au troisième rang mondial pour l'endémisme floristique (près de 80%). Or, depuis des années les feux anthropiques croissent en nombre, fréquence et étendue, menaçant la conservation des écosystèmes et devenant un danger pour les populations. Les estimations montrent que les feux de forêt et de brousse dévastent en moyenne chaque année de 20 000 à 50 000 ha soit près de 3 % de la superficie totale de l'archipel. Au delà de la perte de biodiversité, il en résulte le cortège des risques d'impacts indirects des incendies : assèchement des cours d'eau en saison sèche, appauvrissement des sols, accélération du processus de désertification, aggravation du ruissèlement, augmentation de l'érosion des sols, phénomènes d'hypersédimentation, étouffement des récifs coralliens, etc, autant de maux qui affectent directement les populations locales et leur milieu de vie dont une grande partie se nourrit des produits d'une agriculture vivrière traditionnelle et ou d'une pêche artisanale. Cependant malgré les enjeux liés à la gestion de ce risque majeur, l'une des constatations que nous pouvons faire, au-delà du manque de moyens humains et techniques de lutte, est une connaissance fragmentaire sur la répartition et les causes des incendies en Nouvelle-Calédonie. Cette communication, présentant quelques résultats du programme ANR INC (Incendies et biodiversité des écosystèmes en Nouvelle-Calédonie), aura comme objectifs d'analyser la distribution spatiale de l'occurrence des feux détectés par les satellites MODIS. Ces informations seront croisées au travers d'un SIG à des indicateurs spatialisés de type statuts fonciers (terres coutumières/privé) socio-économiques (taux de chômage, niveau scolaire, origine ethnique..) afin d'identifier des facteurs corrélés aux départs d'incendies. Dans un deuxième temps, l'étude de la perception de ce risque chez les populations Kanak nous permettra de mettre en évidence les causes principales des feux de brousse non maîtrisés.

KEYWORDS : FIRE, HAZARD, BUSHFIRES, HUMAN PRACTICES, PERCEPTION, REMOTE SENSING, GIS, NEW-CALÉDONIA

ABSTRACT

New Caledonia is one of the world's biodiversity hot spots, ranking third in the world for the floristic endemism (nearly 80%). However, anthropogenic fires are becoming more threatening to ecosystems and human populations as they increase in number, frequency, and area. Estimates show that bushfires devastate an average each year of 20 000 to 50 000 ha, representing about 3% of the total area of the archipelago. Beyond biodiversity loss, the risks of indirect impacts of fires (dry rivers in the dry season, soil depletion, acceleration of desertification process, increased runoff and soil erosion, smothering of coral reefs...) are very important and directly affect local populations and their environment. But despite the issues associated at the management of this major risk, it's the fragmentary knowledge about the distribution and causes of fires in New-Caledonia. This paper describes some results of the INC project (Fire and biodiversity in New-Caledonia ecosystems) and has as objective to analyze the spatial distribution of the occurrence of fires detected by MODIS satellite. This information will be crossed in a GIS with spatial indicators of land type association (customary land / private) socio-economic (unemployment, educational level, ethnicity, etc.) to identify factors correlated with the fire departures. In a second step, the study of perception of risk among Kanak populations will allow us to highlight the main causes of uncontrolled bushfires.

INTRODUCTION

La Nouvelle-Calédonie recèle un patrimoine naturel exceptionnel marqué par une biodiversité et un taux d'endémisme élevé à la fois sur le plan floristique et faunistique terrestre comme marin. Dans l'état actuel des

connaissances, la flore indigène terrestre compte environ 3 260 espèces dont 76 % sont strictement endémiques presque autant que pour l'ensemble de l'Europe continentale qui comptabilise 3 500 plantes (Jaffre et Veillon, 1994 ; Bouchet et al., 1995; Bradford et Jaffre, 2004; Jaffre et al., 1998). La Nouvelle-Calédonie se classe ainsi au troisième rang mondial pour l'endémisme floristique, après la Nouvelle-Zélande (82%) et Hawaï (89%). Cette situation s'explique par l'histoire géologique tourmentée et l'ancienneté de l'isolement insulaire, combinés à la situation en zone intertropicale de la Nouvelle-Calédonie. L'ensemble de ces facteurs a alors généré une palette de climats et de substrats adaptés à la spéciation. (Jaffre, 1980 ; Jaffre et al., 1987). De l'avis de nombreux scientifiques, ce territoire insulaire est l'un des lieux les plus emblématiques des grands enjeux mondiaux que sont la conservation et la gestion durable de la biodiversité. Ces écosystèmes, exceptionnellement riches et originaux, souffrent en particulier du syndrome de l'insularité qui les rend particulièrement fragiles et sensibles aux impacts d'origine anthropique. L'un des plus destructeurs est aujourd'hui incarné par les incendies de forêt que les habitants de l'île qualifient communément de « feux de brousse ». Ces incendies, considérés désormais par les collectivités publiques comme un problème écologique majeur, pourraient constituer la première cause de perte de biodiversité du pays. Les recensements officiels montrent que les feux de forêt et de brousse brûlent en moyenne chaque année près de 20.000 hectares. Toutefois, ces chiffres sont largement sous-estimés car ils n'incluent essentiellement que les feux faisant l'objet d'une intervention. Une estimation de l'ordre de 50.000 ha/an de formations végétales brûlées serait plus proche de la réalité, en gardant à l'esprit que certains de ces espaces brûlent périodiquement de manière récurrente.

Outre la question de la biodiversité, les populations les plus exposées aux risques d'impacts indirects des incendies sont les populations rurales, en particulier les populations kanak vivant en tribu. En effet, les tribus sont le plus souvent situées à proximité des milieux les mieux préservés et offrant beaucoup de combustible, et les modes de vie restent en grande partie vivriers (agriculture, chasse, pêche) rendant la viabilité de vie des populations assez dépendantes d'une bonne qualité environnementale. Les premiers signes de dégradation se font désormais sentir en matière de ressources en eau : plusieurs tribus font le constat que la dégradation de la végétation par les incendies sur les bassins versants environnants a changé les régimes hydriques et assèche les rivières une partie de l'année, en particulier lors des épisodes particulièrement secs sous l'influence d'ENSO. A long terme, si rien n'est fait, les incendies pourraient provoquer les mêmes conséquences que les activités minières ou d'élevage développées depuis un siècle en Nouvelle-Calédonie, à savoir l'appauvrissement des sols, l'aggravation du ruissellement, voire la désertification et l'érosion importante des sols comme cela est observable sur certains sites (Belep, Ile Ouen, etc.). Ces risques déjà bien identifiés entraînent aussi des phénomènes d'hypersédimentation dans le milieu lagunaire et l'étouffement des récifs coralliens côtiers.

Cependant malgré les enjeux liés à la préservation de cette biodiversité et l'ensemble des services écosystémiques rendus à la population, le manque de moyens humains et techniques de lutte est aggravé par une compréhension fragmentaire des incendies en Nouvelle-Calédonie. Une meilleure connaissance de la géographie et de la variabilité du risque d'incendies et des processus expliquant leurs causes devraient fournir à la Sécurité civile et aux divers acteurs parties prenantes de la prévention des incendies des éléments d'analyse améliorant leur capacité de gestion de ce risque. En outre, les causes de ces incendies sont encore mal connues et suscitent de nombreuses interrogations et les représentations du phénomène par les différents acteurs locaux sont souvent contradictoires. Les autorités et les acteurs environnementaux perçoivent le feu comme un risque pour les personnes et les biens, mais aussi comme une source importante de dégradation de l'environnement et de perte de biodiversité, ils invoquent souvent le manque de maîtrise de la part de la population locale, principalement kanak, comme étant à l'origine de ces feux de brousse. En Nouvelle-Calédonie, comme ailleurs dans le Pacifique, le feu est pourtant utilisé comme outil depuis plus de 3000 ans. Lorsque les premiers peuplements d'hommes arrivèrent sur l'archipel, ils firent usage du feu pour leurs activités quotidiennes : de l'installation du foyer jusqu'à la préparation de nourriture, en passant par la construction de l'habitat, la préparation des champs, la gestion des espaces environnants. Ainsi les ancêtres des Kanak, comme ce peuple autochtone contemporain de la Nouvelle-Calédonie, ont façonné les paysages de la Grande-Terre depuis le premier temps de peuplement de l'île jusqu'à nos jours. L'habitat et les structures horticoles évoluaient selon une relative itinérance, délaissant certains espaces, alors mis en jachère, pour des périodes allant d'une dizaine d'années à plusieurs dizaines d'années (Dotte, 2007). L'usage du feu, avant les premiers contacts avec l'occident, semblait ainsi se caractériser par une pratique de défriche-brûlis comme partie intégrante d'une agriculture et d'une horticulture dynamiques, caractéristique des modes de culture de la région Sud-Pacifique (Dotte, 2007 ; Sand, 1997). A partir des premiers contacts au 18^e siècle, puis dans une mesure plus large depuis son annexion par la France en 1853 et la colonisation qui en suivit, le peuple Kanak comme la Nouvelle-Calédonie ont connu de forts bouleversements. Les savoirs locaux, comme la configuration de l'espace ont été particulièrement bouleversés par les spoliations foncières : la création de réserves intégrales autochtones, où les « indigènes » furent assignés à résidence au bénéfice de

l'installation des colons français et le développement des cultures intensives et des pâturages pour l'élevage bovin ont modifié considérablement les paysages et leurs modes de gestion. Le développement économique, principalement basé sur l'exploitation du nickel, a également eu un fort impact sur cet environnement. Avec la colonisation sont également apparues de nouvelles pratiques agricoles en milieu kanak et de nouvelles pratiques de chasse (cerf, cochon) en même temps que les populations se sont progressivement tournées vers les emplois salariés. Ces évolutions contemporaines ont également modifié de manière significative les modes de régulations de ces pratiques. Le feu a donc longtemps constitué un outil pour les populations locales, mais il est encore difficile aujourd'hui d'appréhender ses usages, sa maîtrise, et la part de cette pratique dans ce que l'on nomme les « feux de brousse ». Une approche compréhensive, basée sur les méthodes des sciences sociales (géographie, sociologie, anthropologie, histoire) peut permettre de mieux comprendre cette problématique en partant des discours et des pratiques des acteurs eux-mêmes et d'appréhender également la perception du risque que constituent les feux de brousse.

Un programme de recherche intitulé « Incendies et biodiversité des écosystèmes en Nouvelle-Calédonie » (INC) financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) a démarré en 2008 pour tenter de combler les manques de connaissance du phénomène et les incompréhensions que l'augmentation des incendies suscitent. Ce projet interdisciplinaire vise à recueillir toutes les données scientifiques utiles pour prévenir les risques d'incendie à court ou moyen terme, et leurs impacts sur les écosystèmes et la biodiversité. L'objectif à terme est la mise en œuvre d'un système d'alerte adapté au territoire néo-calédonien et l'amélioration des politiques publiques de gestion du risque, dans le but de prévenir efficacement les feux de végétation. Plusieurs domaines d'expertise ont structuré ce programme de recherche en différents volets permettant d'intégrer un ensemble de paramètres afin de modéliser le risque d'incendies (facteurs météorologiques et climatologiques, régimes et comportements des feux, facteurs géographiques et anthropiques, etc.).

L'objet de cet article est de présenter les principaux résultats issus des études visant la caractérisation des facteurs anthropiques dans la compréhension du risque d'incendies en Nouvelle-Calédonie. Il insiste particulièrement sur la spatialisation des occurrences d'incendies et sur les difficultés liées aux perceptions différentes de ce risque entre les populations kanak et les différents acteurs institutionnels. Cette double approche montre la complexité du phénomène et des réponses que l'on peut y apporter.

SITUATION ET CONTEXTE DU TERRAIN D'ETUDE

La Nouvelle-Calédonie, intégrée à l'aire mélanésienne en Océanie, est située dans le sud-ouest de l'Océan Pacifique, au nord du tropique du Capricorne entre 20° et 22° 30' de latitude Sud et 164° et 167° 30' de longitude Est (figure 1). D'une superficie totale de 18 750 km², l'archipel est constitué de l'île principale: « la Grande-Terre », des quatre îles Loyauté (Lifou, Maré, Ouvéa, Tige), de l'archipel des Belep, de l'île des Pins et de quelques îlots lointains. La Grande-Terre est une bande d'environ 400 kilomètres de long sur 40 à 70 km de large, traversée du nord au sud par une chaîne montagneuse qualifiée de « Chaîne Centrale », relativement accidentée, aux vallées encaissées. Le relief est cependant modéré et semble faciliter la propagation des feux et les crêtes peu abruptes ne peuvent pas arrêter les flammes. Ainsi, les feux peuvent passer d'un versant à l'autre, notamment d'est en ouest selon la direction des vents dominants. Seuls de rares sommets atteignent 1500 mètres d'altitude (point culminant : Mont Panié 1628m). La Chaîne Centrale coupe l'île dans le sens de la longueur en deux régions distinctes :

- la côte Ouest plus découpée avec de larges plaines propres à la culture et à l'élevage, surplombées par des massifs riches en minerais de nickel ;
- la côte Est, exposée aux alizés, est la région la plus humide et la plus chaude. Une végétation plus dense y couvre les pentes abruptes ainsi que l'étroite plaine côtière.

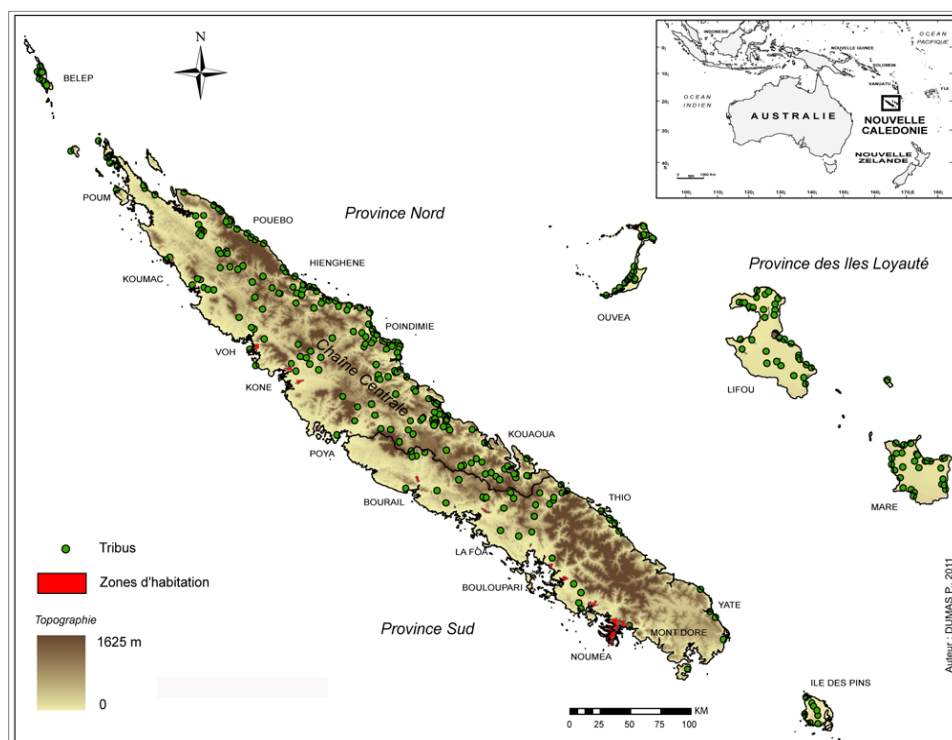


Figure 1 : Carte de situation de la Nouvelle-Calédonie

Avec moins de 250 000 habitants au dernier recensement de 2009 et une densité moyenne d'environ 14 hab. au km², la Nouvelle-Calédonie reste très peu peuplée. Par ailleurs, la population est très inégalement répartie dans l'espace. Elle se concentre principalement dans le sud et l'ouest de la Grande-Terre, deux tiers de la population étant domiciliée sur Nouméa, capitale monopolistique du pays, et le « Grand Nouméa », ensemble formé par ses communes périphériques : Paita, Mont-Dore, Dumbéa. Sur ces quatre communes, la densité moyenne est de 100 habitants/km² avec un maximum de 2 135 habitants/km² à Nouméa. L'ensemble de cette population forme une société pluri-ethnique et multiculturelle, résultat de plusieurs vagues d'immigrations d'origines différentes ces 150 dernières années (déportation pénitentiaire, grands travaux industriels). En 1996, la population autochtone mélanésienne (dite Kanak), représentant plus de 44% de la population calédonienne, est la plus importante du pays devant la population d'origine européenne (34%). Les polynésiens (Wallisiens-Futuniens et Tahitiens) constituent 12% de la population calédonienne, tandis que les 10% restant regroupent des personnes d'origines diverses (Indonésie, Vietnam, Vanuatu, Réunion, Antilles...). On note aussi l'existence d'un déséquilibre prononcé au plan de la répartition des différentes ethnies sur l'ensemble du pays. En 1996, les Kanak sont majoritaires en Province des Îles (98% de la population provinciale) et en Province Nord (80%). Par contre ils ne représentent que 25 % de la population de la Province Sud qui est en majorité d'origine européenne et comprend aussi la totalité des autres composantes culturelles. En règle générale, la population se regroupe dans les vallées et sur les franges côtières, le reste du territoire apparaissant vide. Avec l'obstacle physique de la Chaîne Centrale, moins de 3% de la population vit au dessus de 100 m d'altitude (Dumas, 2004). Bien que durant le XX^e siècle, le pouvoir d'attraction de Nouméa et sa banlieue, avec l'essor de l'industrie métallurgique, des travaux publics et des services a été très fort, 65% de la population Kanak vit encore en tribu (soit plus de 56 000 personnes en 1996). Sur l'ensemble de l'archipel, on dénombre 341 tribus où se regroupent généralement 200 à 300 habitants.

D'un point de vue climatique, la Nouvelle-Calédonie est soumise à l'influence des phénomènes El Nino South Pacific Oscillation (ENSO) accentuant fortement la sécheresse de la saison sèche. Les années qualifiées d'années El Niño (phases ENSO chaudes) sont marquées par de très faibles précipitations, de nombreux feux de brousse ainsi que des pénuries d'eau. La saison des feux de brousse s'étend de début du mois d'août à la fin du mois de février, au retour des grandes pluies de la saison chaude (Barbero et al, 2011).

Au niveau de la lutte contre les incendies, la situation est marquée par un manque sévère de moyens humains et matériels, très inégalement répartis (figure 2). En 2011, la Nouvelle-Calédonie comptabilise 131 pompiers

BELEP

WALA

SIVM Nord Poum
0 permanent et 8 volontaires
1 véhicule

POUR

OUVEA

CIS d'Ouvéa
0 permanent et 2 volontaires
4 véhicules

LIFOU

CIS de Lifou
1 permanent et 18 volontaires
4 véhicules

TIGA

MARE

PROVINCE DES ILES LOYAUTE

PROVINCE NORD

SIVM Nord Koumac
1 permanent et 12 volontaires
2 véhicules

CIS de Hienghène
0 permanent et 11 volontaires
3 véhicules

CIS de Touho
0 permanent et 9 volontaires
2 véhicules

CIS de Poindimié
2 permanents et 13 volontaires
3 véhicules

CIS de Houailou
1 permanent et 20 volontaires
2 véhicules

CIS de Thio
2 permanents et 20 volontaires
3 véhicules

CIS de Yaté
2 permanents et 18 volontaires
3 véhicules

PROVINCE SUD

SIVM Nord Kaala-Gomen
2 permanents et 7 volontaires
2 véhicules

CIS de Voh
1 permanent et 4 volontaires
2 véhicules

CIS de Koné
2 permanents et 12 volontaires
2 véhicules

CIS de Bourail
3 permanents et 25 volontaires
4 véhicules

SIVM Sud La Foa
1 permanent et 24 volontaires
8 véhicules

SIVM Sud Boulouparis
2 permanents et 5 volontaires
1 véhicules

CIS du Grand Nouméa

A Nouméa
71 permanents et 30 volontaires
8 véhicules

Au Mont-Dore
17 permanents et 36 volontaires
5 véhicules

A Païta
8 permanents et 70 volontaires
4 véhicules

A Dumbéa
17 permanents et 35 volontaires
4 véhicules

Legend:

- 12 tours de surveillance
- 4 hélicoptères
- 1 en province Nord
- 1 en province Sud
- 2 mis à disposition par le pays pour l'ensemble de la Grande Terre
- 131 pompiers permanents (*) et 371 volontaires
- 64 véhicules (*)

Footnote:
(*) Hors aéroports, marins-pompiers, secteurs miniers et gardes-nature

d'incendies mieux renseignée (type de végétation impactée, date, heure, et fin du feu, origine du feu, superficie, et moyens engagés pour la lutte, etc.) avec une information géographique relativement détaillée basée sur un carroyage de coordonnées. Ce quadrillage, à l'exemple de celui de la Défense de la Forêt Contre l'Incendie (DFCI), utilisé par les sapeurs pompiers et forestiers du Sud de la France, permet de découper le territoire en carrés de 2km par 2 km afin de disposer d'une base commune de localisation des zones d'interventions. Cependant, ces données collectées sur un pas de temps relativement court et ne concernant que la période critique des feux, d'octobre à février ne peuvent suffire à l'établissement d'un diagnostic spatial du risque incendie.

Pour palier à ce manque d'information, notre choix s'est alors porté sur l'utilisation des données satellitaires. Ces dernières années, la télédétection par satellite a ouvert beaucoup de portes à la cartographie et la surveillance du feu à des échelles globales. En effet, quatre formes de signaux produits par les feux peuvent être observées depuis l'espace : les radiations directes du feu actif (la chaleur et la lumière), la fumée, les zones carbonisées apparues après un feu, et l'altération de la structure de la végétation (Robinson, 1991). Dans le cadre de cette étude, la méthode d'analyse de la menace incendie se base sur un échantillon des feux détectés par les satellites MODIS sur une période de 10 ans entre 2000 et 2009. Le Spectromètre imageur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) est un capteur embarqué à bord des satellites Terra et Aqua de la National Aeronautical and Space Administration (NASA), lancés respectivement en 1999 et 2002. Le MODIS acquiert des données dans 36 bandes spectrales dont certaines sont idéales pour la détection des incendies (Kaufman et al., 1998). Dans le cadre de cette étude trois types de données brutes MODIS ont été utilisés. Il s'agit des produits MOD14A1 (Terra) disponibles depuis février 2000 et MYD14A1 (Aqua) depuis juillet 2002, fournissant des renseignements de détection des feux actifs « Fire Hot Spot » par rayonnement, avec une précision de 1000 mètres. Le produit MCD45A1, disponible depuis avril 2000 et obtenu en combinant les données de réflectance de la surface du sol de MODIS Terra et Aqua, apporte quant à lui une détection des surfaces brûlées « Burned Area » à une fréquence mensuelle et avec une précision de 500 mètres.

La base de données topographique (BD-TOPO) du service territorial de la Direction des Infrastructures de la Topographie et des Transports Terrestres (DITTT) est aussi exploitée. Cette base de données numérique géoréférencée au 10.000ième comporte un certain nombre de couches d'information telles que les limites administratives des communes, la localisation des tribus, les réseaux routiers, le cadastre foncier, les sites d'exploitation minière, ou encore l'habitat qui sont prises en compte dans notre recherche. Enfin, une série d'informations démographiques et socio-économiques (tableau 1) issue des recensements de population de l'Institut de la Statistique et des Études Économiques (ISEE) est associée à la base d'information géographique des communes et des tribus. Ces données statistiques ont pour objectif de rechercher à l'échelle de ces entités administratives des relations éventuelles avec la distribution spatiale des incendies.

Tableau 1 : Variables démographiques et socio-économiques

Variables par communes	Dates	Variables par tribus en 1996
Densité de population	2004	Nb résidents
Part de population tribale	1996	Nb résidents moins de 20 ans
Nb-Population inférieure à 20 ans	2004	Nb résidents hommes moins de 20 ans
Nb-Population inférieure à 30 ans	2004	Ratio hommes/femmes
Nb-Population inférieure à 60 ans	2004	Nb-résidents sans diplômes
Age moyen	2004	Niveau d'étude ne dépassant pas le collège
Taux de chômage	2004	Taux de chômage des hommes
Taux de non diplômés	2004	Taux de chômage total
Part de la superficie coutumière	2007	
Nb- Population européenne	1996	
Nb-Population mélanésienne	1996	

APPROCHE METHODOLOGIQUE

Le diagnostic spatialisé

L'ensemble des produits MODIS, suite à des prétraitements (conversion des formats natifs MODIS au format « shapefile » lisible au travers du SIG ArcGIS, géoréférencement, suppression des doublons, etc) permet de recenser près de 5000 points de détection de feu entre mars 2000 et mai 2009, sur l'archipel néo-calédonien. Un algorithme

regroupant les détections de feux proches dans le temps et dans l'espace (jusqu'à 1 jour de différence, et jusqu'à 2 km de distance) identifie au travers de ces 5000 enregistrements, 940 départs de feu (chacun étant décrit par des attributs tels que sa localisation géographique, sa superficie, ou encore le début et la fin du feu). Il est essentiel de rappeler que ce chiffre est largement sous-évalué du fait de la basse résolution spatiale des données MODIS n'identifiant que les grands feux. Toutefois, même si ce bilan ne peut-être exhaustif et ne reflète que très partiellement la réalité du terrain (à ce titre par exemple, le bilan de saison 2009/2010 fait état de près de 700 feux de brousse traités par les moyens d'intervention de la Sécurité civile sur l'ensemble du pays), il permet néanmoins de donner une représentation statistique à moyen terme des incendies en Nouvelle-Calédonie. Une sélection de 85 autres feux correctement géo-renseignés par la Sécurité civile, durant la période réduite de octobre 2008 à février 2009 a été prise en compte. La base de données spatialisée ainsi mise en œuvre répond à notre démarche d'analyse géographique des départs de feux. Cette dernière s'appuie sur les fonctionnalités offertes par l'outil SIG (Système d'Information Géographique), véritable plate forme d'information numérique représentant des données spatialisées enrichies d'attributs quantitatifs ou qualitatifs. Par le croisement de données multicouches ou l'enrichissement de ces dernières, il est alors possible de créer une information nouvelle. Le SIG permet une véritable approche spatiale et globale du territoire étudié et d'établir un diagnostic spatial du risque incendie en Nouvelle-Calédonie, au travers d'une analyse multi-scalaire (échelle territoriale, provinciale, communale et tribale). Dans un second temps, les départs de feux sont croisés avec une série de facteurs tels que la proximité des routes, des habitats, le type de propriété foncière (domaniale, privée et coutumière), les zones d'exploitation et de prospection minière ou encore les aires culturelles et les langues. La finalité de ces croisements est de révéler des indicateurs pertinents expliquant la répartition des feux.

Pour compléter cette approche géographique, deux séries de tests statistiques, l'une basée sur une régression linéaire et l'autre sur une relation logistique, ont été mises en œuvre pour analyser les corrélations entre les départs de feux et les variables démographiques et socio-économiques de l'ISEE, associées à l'échelle communale et tribale. L'établissement de degrés de corrélations permettrait de mieux identifier des causes anthropiques du risque incendie.

Les méthodes de l'ethnographie et de l'anthropologie

Parallèlement au diagnostic spatialisé, une série d'études en sciences sociales ont été réalisées afin de mieux comprendre les pratiques du feu, notamment en milieu tribal, qui sont actuellement très peu connues. En effet, malgré une littérature ethnographique abondante sur les formes d'organisation sociale kanak pré-coloniale (Leenhardt 1930, 1937 ; Bensa, 1995 ; Bensa & Leblic, 2000 ; Guiart, 1998) et sur les rapports de la société kanak à son environnement (Barrau, 1965 ; Bensa & Antheaume, 1982, Leblic, 2005), le feu et ses usages n'ont encore jamais constitué un objet d'étude à part entière. On trouve dans la littérature grise quelques éléments sur les pratiques du feu, et quelques rapports de mission et une étude sociologique ont été réalisés sur les discours et les perceptions du feu et de ses usages (De Garine & Lepoutre-Goffinet, 2004). Plus récemment, des travaux en sciences sociales ont été initiés dans le cadre de l'ANR INC et ont apporté des informations intéressantes (Conte, 2010 ; Moueaou, 2010 ; Wickel, 2011 ; Udo, 2011). On s'appuiera donc sur ces travaux récents pour comprendre comment le risque incendie est perçu localement, à la fois au sein de la population locale, et au sein des acteurs institutionnels et des scientifiques participant à la lutte contre les incendies.

L'approche compréhensive basée sur les méthodes de l'ethnographie et de l'anthropologie a été privilégiée. Il s'agissait avant tout d'aller chercher dans les discours et les pratiques des acteurs les éléments nous permettant de comprendre les représentations contemporaines du feu en Nouvelle-Calédonie, ses usages et les perceptions du risque qui leur sont liées. Pour se faire, la collecte de données s'est traduite par plusieurs enquêtes et la réalisation d'entretiens approfondis auprès des usagers du feu. Ces entretiens sont complétés par des observations sur le terrain, et président à l'étude plus approfondie des techniques du feu in situ. Une série d'entretiens avec les acteurs institutionnels a été initiée courant 2011 pour compléter les différentes études réalisées auprès des usagers. Parallèlement, une étude bibliographique importante doit permettre de situer ces pratiques dans leur contexte historique, géographique, culturel et institutionnel.

RESULTATS

ANALYSE GEOGRAPHIQUE DES DEPARTS DE FEUX

La base de données spatialisée constituée à partir des produits MODIS et des données de la Sécurité civile permet de recenser 1025 départs de grands feux sur une période de près de 10 ans (figure 3). La distribution spatiale de ces feux

permet de constater à l'échelle de la Grande-Terre quelques grandes tendances. Ainsi plus de 2/3 des occurrences de feux se concentrent en Province Nord (avec 718 feux) alors que la Province Sud n'en rassemble qu'environ 300. Leur distribution au niveau des versants est plus équilibrée, avec 535 départs de feux recensés sur la côte Est et 490 sur la côte Ouest. Au niveau de la côte Est, les incendies se localisent davantage sur l'étroite bande littorale (régions de Pouébo, Touho, Poindimié...) et dans les étroites vallées, pénétrant à l'intérieur des terres (vallée de la Thio, de la Houailou). Sur la côte Ouest, la répartition des feux est plus diffuse s'étalant de la bordure littorale aux parties hautes des larges plaines, jouxtant les contreforts des massifs montagneux. On constate d'ailleurs que plus de 40 % des incendies échantillonnés sont situés au niveau de la Chaîne Centrale. Ce modèle montagnard, aux pentes fortes et aux vallées encaissées, difficile à aménager, couvre près de 80% de la superficie de la Grande-Terre. Il est marqué par une densité ne dépassant pas 1 hab./km² et ne regroupe que 3 % de la population du pays, dispersée au sein de tribus très isolées (telles que Gohapin Bopope, Ouayaguette, Koindé, etc). Pourtant vide d'hommes, les occurrences de départs de feux y sont élevées. Cependant, proportionnellement aux superficies qu'elles couvrent, les plaines côtières (situées en dessous de la courbe hypsométrique des 100 mètres) représentent les espaces les plus touchés par le risque d'incendie (environ 600 feux détectés). L'extrême Sud de la Grande-Terre, ainsi que sa partie côtière orientale, région très faiblement peuplée, semble relativement épargnée. Cette région, communément dénommée le Grand Sud, s'étendant sur plus de 30 000 hectares, n'a connu ces dix dernières années qu'une quinzaine d'incendies majeurs. A l'inverse, la région s'étendant de Poum à Pouébo en passant par Ouégoa, au Nord de la Grande-Terre, est la plus dévastée concentrant plus d'1/5 des départs de feux.

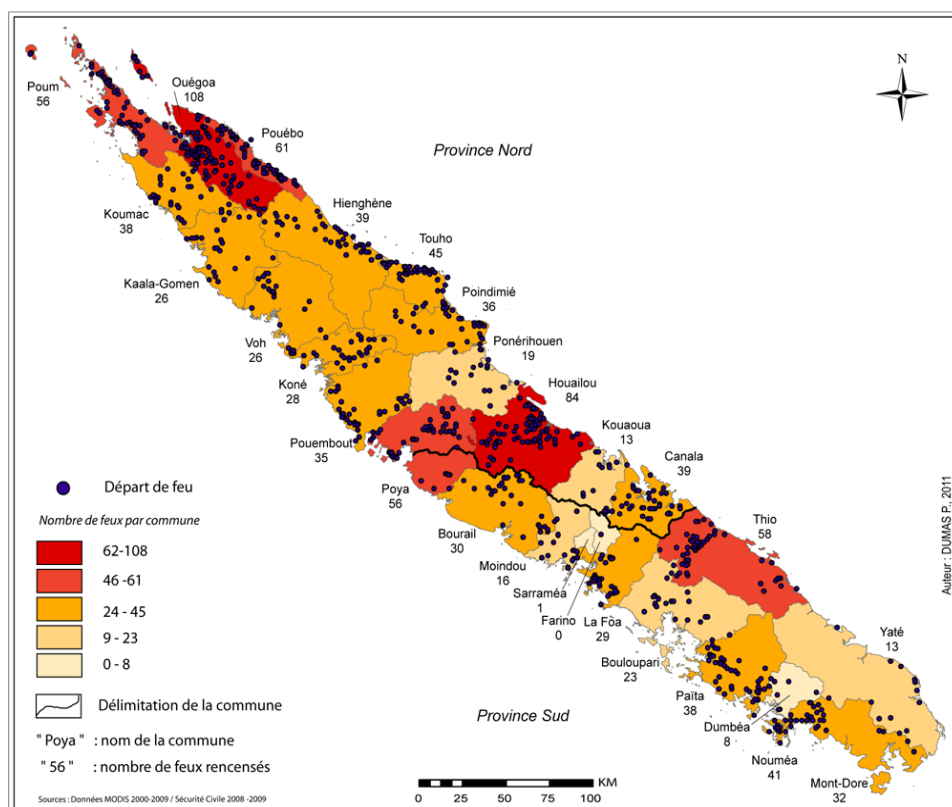


Figure 3 : Distribution des départs de feux par communes (2000-2009)

A une échelle d'observation plus fine, celle du niveau communal, la répartition des départs de feux apporte des résultats bien plus contrastés (figure 2). Ouégoa, avec 108 feux recensés ces dix dernières années (soit près de 10% de l'échantillon), représente la commune la plus impactée alors que Farino n'enregistre aucun départ de feu durant la même période. A Houailou, Pouébo, Thio, situées sur la côte Est, à Poya et Poum à l'ouest, les occurrences de feux sont relativement élevées (plus de 55 départs de feux enregistrés par commune). Avec Ouégoa, ces 5 communes regroupent à elles seules 40% de l'échantillon détecté par les satellites MODIS. Le Mont-Dore, La Foa, Bourail, Voh, Kaala-Gomen, Bouloupari ou encore Koné, comptabilisent chacune une trentaine de départs de feux. Enfin, avec une dizaine d'incendies, Kouaoua, Yaté, Sarraméa et Dumbéa sont les communes les mieux préservées de ce risque.

Au-delà d'une répartition des occurrences de départs de feux relativement hétérogène à l'échelle de la Grande-Terre (même si certaines régions et communes se détachent), les croisements d'indicateurs anthropiques susceptibles d'expliquer la distribution spatiale du risque apporte de nouveaux éléments d'interprétation. Ainsi, l'accessibilité de certains espaces apparaît fortement corrélée à la distribution spatiale des départs de feux. La moitié de ces derniers sont situés à moins de 500 mètres d'une voie carrossable. Cette relation de proximité entre les départs de feux et la distance de moins d'un kilomètre d'une route atteint près de 80% (figure 4). L'influence de la proximité des foyers de population, caractérisés par les zones d'habitation (groupées ou dispersées au sein d'un village communal ou d'une tribu) est aussi importante. Un tiers des feux sont situés à 1 kilomètre d'une habitation et près de 80% à moins de 4 kilomètres.

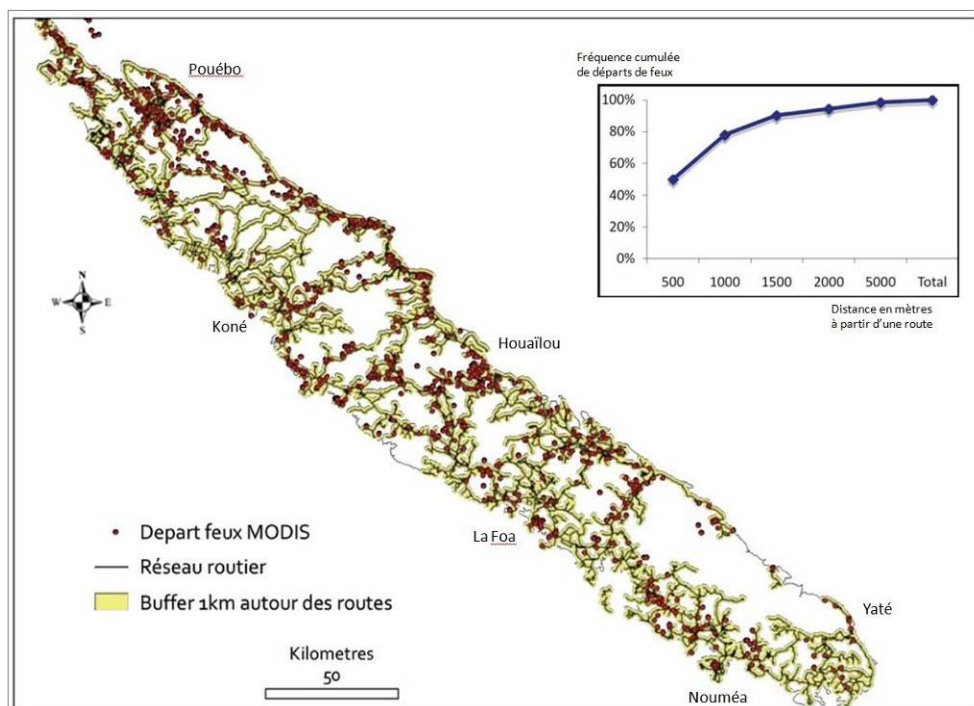


Figure 4: Relations des départs de feux avec les voies carrossables

Une deuxième corrélation peut être mise en évidence avec le type de propriété foncière (figure 5, tableau 2). Les terres domaniales qu'elles appartiennent à l'État Français, à la Nouvelle-Calédonie, aux provinces ou encore à la commune, regroupent 40% des feux recensés par les satellites MODIS. Les 60% restants se produisent à l'intérieur de terres privées (à hauteur de 26%) et coutumières (31 %). Cependant, en prenant en compte une zone tampon d'un kilomètre autour de ces zones exprimant l'erreur de localisation liée à la détection MODIS (1 pixel), cette relation peut être portée à 87%. Quoiqu'il en soit, 27% (87-60) des feux appartiennent aux marges. Elles correspondraient soit à des erreurs MODIS soit à des feux qui seraient des avancées volontaires sur les limites domaniales. Dans ce sens, le recul des forêts domaniales pourrait être interprété comme la progression de fronts pionniers, en réponse à des conflits fonciers marqués par une velléité d'appropriation d'espace sur les terres des collectivités. D'autre part, bien que les gisements de nickel expliquent la distribution résiduelle des feux non comptabilisés par la relation avec le cadastre privé et coutumier, la dépendance de la répartition des feux avec l'activité minière est plus nuancée et difficilement exploitable. L'utilisation du feu comme procédé de défrichage pour faciliter la prospection minière n'est plus pratiquée depuis plusieurs décennies. L'utilisation des pistes minières utilisées pour la randonnée ou toute autre activité extérieure à l'activité minière pourrait expliquer la présence d'incendies sur le domaine minier. Enfin, les croisements géographiques avec des aspects culturels, comme les langues ou les aires culturelles, n'ont apporté aucune corrélation significative.

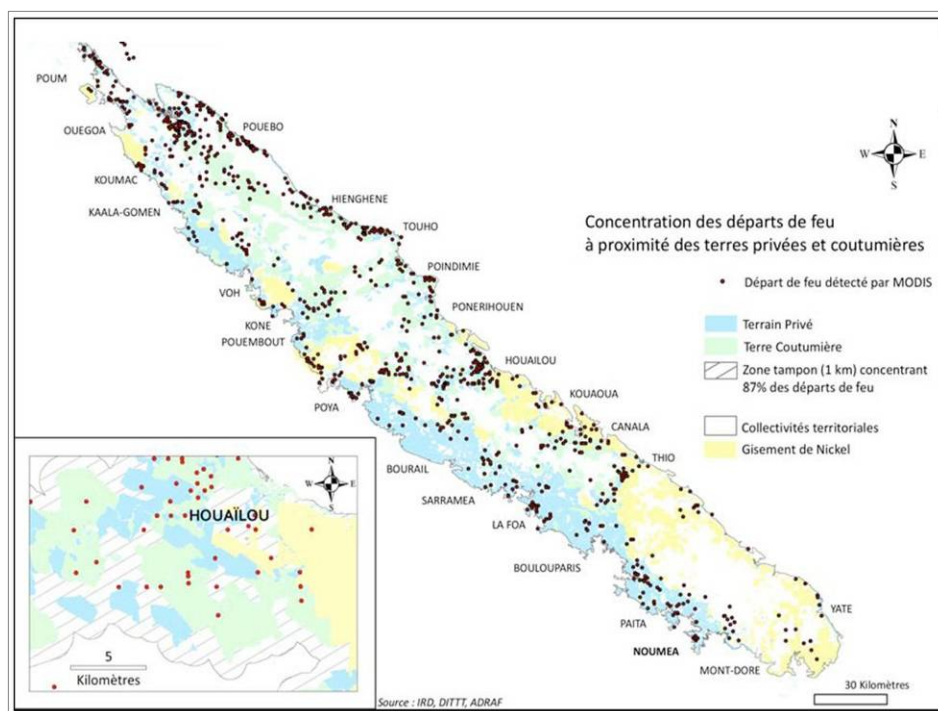


Figure 5: Relation des départs de feux selon la propriété foncière

Tableau 2 : Répartition des feux selon les catégories cadastrales

Cadastre	% de la superficie	% des occurrences de feux	Somme des %	Feux avec zone tampon de 1 km
<i>Domaines des collectivités</i>				
Etat	0%	1%		
Nouvelle-Calédonie	53%	33%		
Province Nord	3%	2%	40%	13%
Province Sud	4%	1%		
Commune	1%	1%		
<i>Privé et coutumier</i>				
Terres privées	20%	26%		
Terres coutumières	18%	31%	60%	87%
Total Grande-Terre	100%	100%	100%	100%

La recherche de variables démographiques et socio-économiques issues de l'ISEE, corrélées statistiquement aux données MODIS apparaît beaucoup plus contrastée. La première série de tests reposant sur la méthode de Bravais-Pearson, sous l'hypothèse d'une relation linéaire et sous l'hypothèse d'une distribution gaussienne s'est avérée non concluante. Les taux de corrélation entre la densité de départ de feux par commune et les données de l'ISEE sont très faibles (tableau 3). Ces résultats s'expliquent notamment par l'utilisation d'une relation linéaire mal adaptée à l'analyse d'une série statistique « densité de départ de feux » qui est dissymétrique. Si la majorité des communes ont une densité d'incendies relativement faible, quelques communes ont exceptionnellement de fortes valeurs, faussant la loi normale d'une répartition statistique permettant de prédire un caractère en fonction d'un autre. Selon la loi normale, 68% des effectifs sont à plus ou moins un écart type de la moyenne, et 95% à plus ou moins deux écarts types. Cette dissymétrie structurelle de la répartition peut s'expliquer par le fait que des facteurs externes ont une influence bien plus importante que les variables analysées.

Tableau 3 : Taux de corrélation entre la densité de départ de feux par commune et quelques variables démographiques et socio-économiques

Variable par commune	Taux de corrélation avec la densité de départ de feux	Pourcentage de chance que cette corrélation est due au hasard
Densité de population 2004	14,6 %	10 %
Population tribale en 1996	14,6 %	10 %
Population inférieure à 20 ans en 2004	17,8 %	5 %
Population inférieure à 30 ans en 2004	11,2 %	10%
Population inférieure à 60 ans en 2004	6,6 %	20 %
Taux de chômage en 2004	14,8 %	5 %
Taux de non diplômés en 2004	11,7 %	10 %

Les tests statistiques, mis en œuvre par le modèle de régression logistique et permettant de déceler des corrélations pour des variables dont la répartition des valeurs dans la série est dissymétrique (Huet & al., 1992), mettent aussi en évidence l'absence de corrélations statistiques probantes entre les nombres de départs de feux et la série de données socio-économiques. L'ensemble des tests de significativité, Chi2 Pearson pour les tribus et Fisher Exact pour les communes ne sont pas concluants. Les indicateurs démographiques (densité de population, classe d'âge, etc.), de précarité (taux de chômage, niveau d'étude, etc.), ou de groupes ethniques (part de la population européenne ou mélanésienne dans la population communale) sont des variables qui ne sont pas corrélées avec les départs de feux observés par MODIS et les données de la Sécurité civile. Si les corrélations statistiques ne peuvent être établies, il convient de s'interroger sur les méthodes et les données d'analyse, particulièrement au niveau des limites d'échelle induites par la détection MODIS incompatible avec des pratiques locales, mais aussi sur la pertinence des classes de l'ISEE où certaines variables n'ont pas de réalité concrète en milieu kanak (à l'exemple du taux de chômage qui est un indicateur biaisé par la nature même de la structure socio-économique liée à l'importance de l'agriculture de subsistance en milieu tribal). L'absence de corrélations statistiques justifie ainsi pleinement une approche qualitative à une échelle locale des usages, des pratiques du feu et des perceptions qui y sont associées.

PERCEPTION DU RISQUE INCENDIES CHEZ LES POPULATIONS KANAK : MISE EN EVIDENCE DES CAUSES PRINCIPALES DES FEUX DE BROUSSE NON MAÎTRISÉS

L'usage du feu en milieu kanak est une pratique ancienne. A l'époque coloniale et pré-coloniale, le feu était encore largement utilisé comme en témoignent les nombreux récits de voyages, et les premiers travaux ethnographiques. Ce que l'on qualifie de « feu de brousse » recouvre en réalité plusieurs usages et plusieurs causes. En zone rurale, derrière les incendies de forêts se trouvent des pratiques diverses qui ne sauraient se réduire à de simples incendies. La première de ces pratiques est celle de défriche-brûlis, préalable à la préparation des champs, et de l'écobuage utilisé pour « nettoyer » les bordures de chemins et/ou de parcelles, et les jardins situés autour de la maison. Ces pratiques sont encore largement comprises dans des techniques d'agriculture et d'horticulture, mais ont tendance à être de moins en moins maîtrisées, et ne font plus tout à fait l'objet d'un usage « traditionnel ». En complément de ces pratiques de défriche-brûlis, on peut également citer les feux à vocation cynégétique (pour signaler sa présence, pour circuler, pour débusquer le gibier et/ou accéder à sa dépouille), et les incendies volontaires dus à des conflits (fonciers en général). Les incendies provoqués pour le simple « plaisir » ou attribués à des comportements pyromanes sont aussi régulièrement évoqués. En zone urbaine ou périurbaine (Nouméa – Grand-Nouméa), on retrouve globalement les mêmes types d'activités et d'usages du feu, à cette différence près que le risque incendie est accentué par la densité démographique, où les conflits fonciers ont une large part (Wickel, 2011). De nos jours on estime généralement que ces savoir-faire sont inégalement acquis, tout le monde ne possède pas ou plus, la technique du feu pour la préparation des champs, de même que tout le monde n'a plus forcément l'ensemble des connaissances agricoles et/ou horticoles nécessaires. La perte des savoirs des anciens est d'ailleurs souvent mise en avant dans les enquêtes, par les usagers eux-mêmes, pour expliquer la mauvaise maîtrise des feux (De Garine & Lepoutre-Goffinet, 2004). Si l'on peut imputer cette perte des savoirs locaux aux nombreuses transformations dont le monde kanak fait l'objet depuis la colonisation, force est de constater qu'aucune étude minutieuse des techniques du feu n'apporte à ce jour d'éléments suffisamment probants en faveur de la reconnaissance d'une maîtrise ou d'une non-maîtrise du feu. Par ailleurs, la diversité de ces pratiques et leur méconnaissance nécessitent en tout premier lieu un effort de clarification terminologique (Barrau, 1965). Une rapide revue de la littérature contemporaine internationale sur les pratiques du feu (notamment à Vanuatu et en Papouasie-Nouvelle-Guinée, mais également en

Australie) nous indique pourtant toute l'importance et l'enjeu de décrire ces techniques pour une meilleure compréhension des dynamiques écologiques locales.

Maîtrisé ou pas, l'emploi du feu est néanmoins indissociable d'un espace sur lequel un individu a le « droit » d'exercer son savoir-faire. Cette question du droit d'usage sur un espace et les relations d'appartenance à la terre sont un aspect primordial des dynamiques socio-spatiales en Nouvelle-Calédonie. Elles ont par ailleurs déjà été étudiées pour l'habitat, pour l'agriculture, pour la pêche (Bensa, 1992 ; Bensa & Antheaume, 1995, Teulières-Preston, 2000, Leblic, 2008), et plus récemment dans le cadre des réformes foncières et des conflits liés à la mine (Saussol, 1984, Naepels, 1998, Demmer, 2010, LeMeur, 2010). Ainsi les pratiques agricoles, horticoles et cynégétiques, sont toujours associées à des droits d'usages sur certains espaces. Avec les spoliations foncières, la création des réserves et les déplacements de populations que la situation coloniale a provoquées, de même que les réattributions contemporaines, l'évolution vers le salariat, les migrations vers la ville, etc. ont fortement bousculé les modes d'attribution, d'appropriation et d'usages traditionnels des espaces. A l'heure actuelle, les activités agricoles revêtent différentes fonctions et différents modes d'exploitation selon leur vocation (Saussol, 1984, Gaillard et Sourisseau, 2009). Ainsi on peut globalement distinguer les champs dédiés à la coutume, qui sont plus ou moins gérés de manière « traditionnelle », des autres champs vivriers ou non. Pour chaque type d'agriculture il existe des règles différentes et elles s'exercent sur des espaces différenciés, de fait là encore la part et la place du feu revêt une importance non négligeable. Les enquêtes et les observations sur le terrain soulèvent d'ailleurs la question de la distribution de ces droits d'usages sur les espaces qui concernent les pratiques agricoles, horticoles et cynégétiques, mais également sur les espaces domaniaux (comme les exploitations forestières domaniales) et les espaces privés et/ou coutumiers faisant l'objet de projet de conservation ou de reboisement à vocation environnementale ou économique. Car les espaces utilisés par les populations locales à divers titres, se superposent parfois à d'autres espaces et d'autres usages. Sur certains sites, une forte occurrence des feux de brousse semble d'ailleurs être révélatrice de ces mécanismes. La territorialisation du feu apparaît donc comme un paramètre incontournable, pour comprendre au mieux ces pratiques du feu.

En ce qui concerne la perception du risque que le feu implique, il ressort des enquêtes que le feu est évidemment perçu comme une menace possible sur certaines ressources, notamment sur la forêt humide, et sur la dégradation des ressources en eau. Cependant, au quotidien le feu n'est pas considéré comme une menace très importante sur l'environnement, au regard des dégâts causés par les espèces invasives. Ainsi certaines espèces animales (cochon, cerf, poule sultane, fourmi électrique), mais également certaines espèces végétales (sensitive, para, pinus) sont considérées comme fortement nuisibles et sont régulièrement repoussées à l'aide du feu. Le feu est aussi utilisé pour nettoyer les herbes invasives, dans les champs, comme aux alentours de la maison, le long des chemins, et sur certaines étendues de « brousse », comme il l'était autrefois pour nettoyer les herbes considérées comme inutiles ou « sales ». L'appréciation du degré de « propreté » d'un espace semble ici avoir une forte influence sur la mise à feu. Avec cette différence toutefois que le feu, paradoxalement, favorise fortement la propagation des espèces invasives. Si le feu est en partie responsable de l'aggravation de ce problème sur certains sites, il est plutôt considéré comme une solution (quoique à court terme) par les populations locales qui ont avant tout à cœur de lutter contre ces espèces invasives. Les nuisances occasionnées (difficultés de circuler pour la chasse ou dans les champs à cause de la sensitive (plante rampante de la famille des Fabaceae) et de la fourmi électrique, cochons et poules sultanes qui font des ravages dans les champs, etc.) sont donc beaucoup plus problématiques en elles-mêmes que les conséquences du feu, qui par ailleurs est toujours écarté des espaces que l'on veut préserver de son attaque.

Les observations sur le terrain ont également mis en évidence le fait que des végétations dites « dégradées » comme la brousse (dont la savane à Niaoulis) mais également les forêts de Pinus sont fréquemment brûlées, alors qu'il est rare d'observer un feu en forêt humide. Outre le fait que le feu n'y progresse pas naturellement (car trop dense et trop humide), certaines forêts sont taboues et de ce fait personne ne se risquerait à y mettre le feu. Globalement la distinction de ces différents espaces semble correspondre à une opposition entre espace cultivé, anthropisé, domaine des hommes et de leurs activités, et espace « inculte », « non-cultivé », domaine des esprits et des morts (Leblic, 2005, Dotte, 2007). Dans cette logique, les représentations du feu, de ses conséquences et des risques qu'il comporte sont indissociables d'une représentation des milieux « pouvant brûler » ou « à brûler », et des milieux à préserver du feu. Il existerait donc, dans les représentations, des systèmes de régulations des pratiques du feu, qui limitent ses usages à certaines portions de territoire, et l'excluent d'autres. C'est donc dans la perception des paysages et les dynamiques foncières qui y sont associées que l'on peut chercher des éléments de réponse et essayer de comprendre comment se définit le risque incendie au sein des populations kanak. Quelques éléments allant dans ce sens ont été recueillis lors des travaux initiés dans le cadre de l'ANR INC. Il ressort d'un relevé du vocabulaire désignant les espaces végétaux en langue vernaculaire (Païci – Aire coutumière Païci-Cemuhi, commune de Païta) que la catégorisation de

l'espace et des formations végétales en milieu kanak, comporte des noms spécifiques qui diffèrent des catégories définies par les sciences (botanique, écologie, etc) (Udo, 2011). On suppose que la définition des différentes formations végétales dépend à la fois des espèces végétales (et animales) qui les composent, mais également des ressources qu'elles fournissent, des esprits qu'elles abritent (ou non), de leur accessibilité, de leur statut foncier et surtout de leur caractère anthropisé (Leblic, 2005). La hiérarchisation de ces paysages renvoie plutôt à une territorialisation et à un certain mode de gouvernance renvoyant à des événements mythologiques et/ou historiques, qui organisent la cosmogonie et fournit un ordre du monde pour la mise en place d'un ordre social local. Chaque usage sur chaque espace étant, en principe, cadré par la coutume.

Du côté de la lutte contre les incendies, on trouve une grande variété d'acteurs : les pompiers et la sécurité civile, mais également les acteurs environnementaux (ONG, associations de protection de l'environnement et de la biodiversité), les techniciens et ingénieurs agricoles et forestiers, les élus et les scientifiques. Globalement, on peut observer dans les discours émis par ces différents acteurs (mais également dans les rapports, les campagnes de sensibilisation, etc.) une conception beaucoup plus négative des « feux de brousse » et du risque qu'ils font peser sur la biodiversité locale. Prise dans son ensemble, la question de la lutte contre les feux de brousse est plutôt ignorante des modes de régulation locaux et des techniques du feu. Au-delà d'interrogations sincères sur l'origine anthropique des feux de brousse, cette cause est souvent associée à une « manie » ou à des « négligence », voire à des pratiques « archaïques » associées à une méconnaissance des pratiques du feu et de l'impact du feu sur les écosystèmes locaux. On trouve en creux dans ces discours une représentation de la nature largement répandue en occident, où l'on retrouve une opposition assez simple entre nature « sauvage », « naturelle » (concept de « wilderness ») par essence intacte et menacée par les activités humaines ; et une nature « domestiquée », « utile », « dégradée » plus volontiers exploitées pour des motifs économiques. Dans cette acceptation, le feu, et en particulier le feu de forêt, est quasi systématiquement considéré comme « mauvais » et nécessairement destructeur (Lewis, 1989 pour l'Australie ; Ribet, 2007 et Dumez, 2010 pour la France). Ainsi le feu de brousse, en favorisant la présence de formations végétales « dégradées » et la propagation des espèces invasives, et en empêchant le processus « naturel » de reformation d'un couvert forestier plus important, nuit à la qualité écologique, mais aussi à la « valeur » environnementale de la Nouvelle-Calédonie.

Dans un autre domaine, celui des forestiers et des agronomes, le feu de brousse est considéré comme destructeur des activités économiques, forestières ou agricoles. Ainsi la technique de défriche-brulis est assez souvent qualifiée d'« archaïque », car nécessitant la destruction d'espaces boisés, par le feu, menaçant souvent les forêts reboisées (ou non). Là encore, il est question de représentations des espaces et de leur valeur, en particulier de représentation de la forêt. Ainsi on a pu constater sur le terrain que les forêts de pinus (pinus caribaea), issus d'un reboisement planifié, sont très régulièrement brûlées. Considérées au départ par les techniciens et l'institution provinciale comme un outil de développement économique, ces forêts tranchent nettement avec les espaces environnants et ne semblent pas considérées par les populations riveraines comme particulièrement vulnérables ou dignes d'être préservées, elles semblent même d'autant mieux brûlées si elles sont situées sur des terres de chasse, ou dans le prolongement de champs. Dans une « conception kanak » des lieux, elles font donc simplement l'objet d'une appropriation foncière, supports de divers droits d'usages, donc le feu n'est qu'une technique et un moyen d'exercice de ce droit. Par ailleurs, on peut supposer que si les personnes riveraines ne sont pas engagées dans l'activité économique du domaine forestier, elles considèrent avec d'autant plus d'indifférence le risque d'incendie sur ces espaces (Kohler, 1984). Dans un cas comme dans l'autre, c'est-à-dire que l'on accorde une valeur écologique et/ou environnementale importante ou une valeur économique certaine à ces espaces, le constat est un peu le même : on projette sur ces espaces des systèmes de référence spécifiques qui ne sont pas celui, tout aussi spécifique, des acteurs locaux. D'une certaine manière c'est nier, inconsciemment, à la fois le rapport qu'entretiennent réellement les populations locales avec leur environnement et les contraintes qui pèsent sur elles, en même temps que leur propre légitimité à exercer leurs activités de subsistance et/ou de loisir sur ce qu'elles définissent comme leur « propriété » (au sens large : qu'elle soit légale, coutumière ou privée, ou revendiquée).

En plus de ces différences cognitives et culturelles dans la perception des « feux de brousse », les directives socio-économiques et institutionnelles ajoutent à l'écart de perception du risque entre les populations et les acteurs institutionnels (Etat, Provinces, Sécurité Civile, ONG environnementales, scientifiques...). En effet, en Nouvelle-Calédonie, comme en France métropolitaine, le feu est généralement considéré comme un « objet » « non-maîtrisé », « non-maîtrisable » dont la gestion est exclusivement confiée à des corps qualifiés : les pompiers (professionnels et volontaires) et la Sécurité civile (Ribet, 2007 ; 2011). Dans ce contexte où l'on a à la fois, d'un côté, un outil, « ancestral » dont la connaissance est acquise dès l'enfance, perçu autant de manière bénéfique que maléfique, de

l'autre, un phénomène perçu quasi-systématiquement comme une menace représentant un « risque », dont la gestion se doit d'être extrêmement et rigoureusement cadrée, il n'est pas toujours facile de reconnaître mutuellement la pratique de l'« autre ». Il émerge de cet écart une difficulté accrue et surtout une incompréhension de la part des corps qualifiés lorsqu'il s'agit de mettre en place un plan de lutte actif contre les incendies qui se heurte à de nombreuses occurrences de feux.

Enfin, il ressort des différentes études que ces dynamiques socio-spatiales sont d'autant plus difficiles à saisir et à comprendre qu'elles revêtent une configuration différente en fonction de chaque localité. Ainsi il faut se placer à un niveau micro-local pour saisir les conditions de mise à feu dans un espace déterminé finalement relativement restreint au regard de l'ensemble du territoire Néo-Calédonien. L'extrapolation de ces dynamiques, une fois identifiées, reste malaisée. En effet, les différentes études menées montrent que ces réalités socio-spatiales sont extrêmement diversifiées et hétérogènes à l'échelle du territoire : il est difficile de trouver deux situations revêtant les mêmes caractéristiques principales tant les paysages sont variés. Il en est de même pour la configuration sociale de chaque localité, qui résulte à la fois d'héritages de l'organisation socio-spatiale pré-coloniale et de l'histoire des déplacements de population et du développement économique locaux (création de réserves et de villages coloniaux, déplacements de population, présence d'exploitations de santal, café, ou de mines etc.). Mais aussi de la présence, ou non, d'enjeux économiques, ou environnementaux importants.

DISCUSSION ET CONCLUSION

La géolocalisation des feux suffisamment importants en intensité ou dans le temps pour être détectés par satellite, c'est-à-dire que l'on interprète comme étant des incendies, apporte des informations inédites. D'une part, à l'encontre de tous les préjugés, on ne peut expliquer à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie leur occurrence par un profil socio-économique des communes : aucun critère lié à la composition socio-économique, ethnique et démographique ne permet d'expliquer que telle ou telle commune connaît une occurrence des feux plus importante. D'autre part, la structure foncière et la proximité par rapport aux lieux de vie et aux voies d'accès sont quant à elles fortement corrélées au risque d'occurrence des incendies. Les gens brûlent dans des espaces qui sont les leurs ou revendiqués comme tels (terres coutumières et terres privées) et dans des espaces de vie et d'activité assez facilement accessibles. Ces résultats démontrent que malgré les forts contrastes entre les communes, les raisons des disparités sont à chercher dans les particularismes locaux et dans les pratiques du quotidien.

De manière assez générale on suppose que le feu, et notamment la gestion des paysages par le feu, en milieu kanak, est quelque chose de répandu, de familier, c'est un outil couramment utilisé au quotidien. Sa non-maîtrise, ou plus exactement sa propagation au-delà de la parcelle initialement désignée pour être brûlée, son « débordement » en « feu de brousse », serait donc autant le résultat d'une mauvaise maîtrise qu'une perception différente du risque que cela comporte. Brûler des espaces entiers pour fonder un tertre, un foyer ou pour mettre en valeur un espace forestier ou horticole, fait partie intégrante de l'organisation de l'espace et de la société kanak. Le feu est en quelque sorte à la base du processus d'appropriation de l'espace, préalable nécessaire à la fondation de tout ordre social. Le feu revêt donc une importance toute particulière dans la culture kanak, quoiqu'il ne soit pas non plus un élément a priori aussi évidemment fondamental. Le feu et les savoirs qui le concerne sont d'ailleurs indissociables d'un ensemble d'autres savoirs, à la fois mythologiques, thérapeutiques, agricoles, cynégétiques, etc. Le feu en milieu kanak participerait plutôt d'une écologie, au sens propre, englobant l'ensemble des savoirs et savoir-faire qui permettent aux individus et à la collectivité kanak d'interagir avec leur milieu. Cependant, pour ne pas trop verser dans une forme d'idéalisation de ces savoirs locaux, il est nécessaire de bien prendre la mesure des transformations et évolutions contemporaines, c'est-à-dire de l'apport de nouvelles techniques agricoles et de l'hybridation des pratiques agricoles, mais aussi les effets de la circonscription des usages, traditionnels ou non, sur des espaces considérablement réduits (et dont la relative itinérance a perdu de sa mobilité), et la territorialisation plus large de ces pratiques, qui sont parfois superposées à d'autres usages de l'espace (parcs forestiers, exploitations forestières, pâturages, etc.). Il y a donc ici deux pistes qui doivent être approfondies : les techniques et savoir-faire du feu d'une part, qu'ils soient « traditionnels » ou contemporains, et la spatialisation de ces usages avec une visée comparative large.

Un autre élément en particulier ressort de ces premiers essais de clarification des usages du feu : il s'agit de la différence de perception des espaces et la valeur qui leur sont associés. Un effort de compréhension de la dynamique des usages et des statuts fonciers des espaces exploités doit être fait, afin qu'un dialogue entre usagers du feu et acteurs de lutte contre les incendies (y compris les scientifiques) soit ouvert. L'effort est à double sens : il ne s'agit plus

seulement de sensibiliser les usagers pour qu'ils cessent totalement leurs activités (ce qui paraît illusoire), il s'agit de comprendre les dynamiques d'interactions entre les différents usagers des espaces végétaux et de définir des priorités de gestion du risque incendie.

Ces éléments sont évidemment indispensables pour une prise en compte globale de la gestion des incendies et feux de brousse en Nouvelle-Calédonie. Car en l'absence des moyens nécessaires pour lutter efficacement contre les incendies, il est plus qu'indispensable de prendre en compte les savoirs locaux, et les réactions des habitants de la brousse, pour assurer une meilleure coordination locale entre les différents corps de lutte contre les incendies. La reconnaissance de savoirs et savoir-faire sur le feu, mais surtout la compréhension des enjeux complexes, fonciers, politiques, économiques, qui sous-tendent les feux de brousse sont à prendre en compte pour assurer un meilleur relais local dans la lutte contre les incendies et ne pas, d'une certaine manière, passer à côté de la question.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé en grande partie par l'Agence Nationale pour la Recherche dans le cadre du projet intitulé « Incendies et biodiversité des écosystèmes en Nouvelle-Calédonie ». Nous remercions les collectivités et institutions locales pour nous avoir permis de mener cette étude dans les meilleures conditions en nous donnant un accès complet aux données et aux informations relatives aux incendies en Nouvelle-Calédonie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Barbero, R., V. Moron, M. Mangeas, M. Despinoy, and C. Hély (2011), "Relationships between MODIS and ATSR fires and atmospheric variability in New Caledonia (SW Pacific)", *J. Geophys. Res.*, 116, D21110, doi:10.1029/2011JD015915.
- Barrau J., 1965, "L'Humide et le Sec: An essay on ethnobiological adaptation to contrastive environments in the Indo-Pacific Area" *Journal of the Polynesian Society* (Wellington), vol.74, n°3, pp. 329-346.
- Bensa A., 1992, "Terre kanak : enjeu politique d'hier et d'aujourd'hui. Esquisse d'un modèle comparatif", *Etudes rurales*, 127-128, pp. 107-131.
- Bensa A., 1995, *Chroniques kanak. L'ethnologie en marche*, Peuples Autochtones et Développement, Paris, 349 p.
- Bensa, A. et Antheaume B., 1982, "Le terroir et l'organisation sociale en zone Cêmuhi (région de Touho, Nouvelle-Calédonie) : quelques questions d'anthropologie économique", *Journal d'Agriculture Traditionnelle et de Botanique*, 29 (3-4), pp. 275-284.
- Bensa A. & Leblie I. (dir.), 2000, *En pays kanak : Ethnologie, archéologie, linguistique, histoire de la Nouvelle-Calédonie*, Paris, Ed. de la MSH, pp. 129-146.
- Bouchet, P., Jaffre, T. and Veillon, J.M., 1995, "Plant Extinction in New-Caledonia - Protection of Sclerophyll Forests Urgently Needed", *Biodiversity and Conservation*, 4(4), pp. 415-428.
- Bradford, J. and Jaffre, T., 2004, "Plant species microendemism and conservation of montane maquis in New Caledonia: two new species of *Pancheria* (Cunoniaceae) from the Roche Ouaieme", *Biodiversity and Conservation*, 13(12), pp. 2253-2273.
- Conte A., 2010, *Compréhension des risques d'incendies relatifs à la biodiversité en Nouvelle-Calédonie : Développement méthodologique pour l'intégration d'indicateurs d'aléas anthropiques*, Mémoire de Master 2, UFR de Géographie, Université Panthéon 1 Sorbonne, G.I.E. Océanide – IRD.
- Demmer, C., 2010, "Nouveaux enjeux fonciers et évolution du nationalisme kanak après l'accord de Nouméa, Nouvelle-Calédonie. Un éclairage sur des projets de société successifs", in Jacob J-P, Le Meur P-Y., *Politique de la terre et de l'appartenance. Droits fonciers et citoyenneté dans les sociétés du Sud*, Paris, Karthala, 432 p.
- Dotte, E., 2007, "Modes d'exploitation et d'intégration au sein des territoires kanak précoloniaux des ressources végétales forestières (Ile millénaire apr. J.-C.). Approche ethno-archéo-anthracologique en Nouvelle-Calédonie", *Territoires et Economie*, Actes de 2e Journée Doctorale d'Archéologie, Paris.
- Dumas P., 2004, *Caractérisation des littoraux insulaires : approche géographique par télédétection et Système d'Information Géographique pour une gestion intégrée. Application en Nouvelle-Calédonie*, thèse de doctorat, Université d'Orléans, 401 p.
- Dumez R., 2010, *Le feu, savoirs et pratiques en Cévennes*, Editions Quae, 248p.
- Gaillard C., et Sourisseau J.-M., 2009, "Systèmes de culture, système d'activité(s) et rural livelihood : enseignements issus d'une étude sur l'agriculture kanak (Nouvelle-Calédonie)", *Journal de la Société des Océanistes*, 129, pp. 279-294.

- Guiart J., 1998, Les Mélanésien devant l'économie de marché, Rocher-à-la-Voile, Nouméa, 191 p.
- Huet S., Jolivet E., Messean, 1992, La régression non linéaire : méthodes et applications en biologie, Eds. INRA, 256 p.
- Jaffre T., 1980, Végétation des roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie, Trav. & Doc., ORSTOM, Paris. n° 124.
- Jaffre T., Morat P., Veillon J.-M., & Mackee H.S., 1987, "Changement dans la végétation de Nouvelle-Calédonie au cours du Tertiaire : La végétation et la flore des roches ultrabasiques", Bull. Mus. nat. Hist. Nat., Paris, 4eme ser.9, Section B, Andersonia Vol. 4, pp. 365-391.
- Jaffre T., & Veillon J., 1994, "Les principales formations végétales autochtones en Nouvelle-Calédonie : caractéristiques, vulnérabilité, mesures de sauvegarde", Annexe IRD, Nouméa, pp. 1-7.
- Jaffre, T., Bouchet, P. and Veillon, J.M., 1998, "Threatened plants of New Caledonia: Is the system of protected areas adequate?", Biodiversity and Conservation, 7(1), pp.109-135.
- Kaufman Y.J., Justice C.O., Flynn L.P., Kendall J.D., Prins E.M., Giglio L., Ward D.E., Menzel W.P., Setzer A.W., 1998, "Potential global fire monitoring from EOS-Modis", Journal of Geophysical Research Atmospheres, Vol 103, pp. 32215-32238.
- Kohler J.-M., 1984, Pour ou contre le Pinus ? Les Mélanésien face aux projets de développement, ORSTOM, Nouméa, 171p.
- Leblic I., 2005, "Pays, "surnature" et sites "sacrés" paicî à Ponérihouen, (Nouvelle-Calédonie)", Journal de la Société des Océanistes, 120-121, pp.95-111.
- Leblic I., 2008, Vivre de la mer, vivre avec la terre... en pays kanak. Savoirs et techniques des pêcheurs kanak du sud de la Nouvelle-Calédonie, Paris, Société des Océanistes (Travaux et documents océanistes 1), 288 p.
- Leenhardt M., 1930, Notes d'ethnologie néo-calédonienne, Paris, IX-265 p.
- Leenhardt M., 1937, Gens de la Grande-Terre, Paris, Gallimard.
- Le Meur P.Y., 2010, "Réflexions sur un oxymore. Le débat du "cadastre coutumier" en Nouvelle-Calédonie", in : Faugere E. & Merle I. (dir.) La Nouvelle-Calédonie, vers un destin commun ? Nouveaux enjeux, nouveaux terrains, Paris, Karthala, pp. 101-126.
- Lewis, H. T., 1989, "Ecological and technical knowledge of Fire: Aborigines versus Park Rangers in Northern Australia", American Anthropologist, New Series, Vol. 91, No. 4, pp.940-971.
- Moueaou N., 2010, L'évolution des pratiques du feu des populations locales en Province nord (Nouvelle-Calédonie), Rapport d'étude, Task 2 – ANR INC, G.I.E. Océanide.
- Napaels M., 1998, Histoires de terres kanakes, coll. Socio-histoires, Belin, 379p.
- Ribet N., 2007, "La maîtrise du feu : un travail "en creux" pour façonner les paysages", in Woronoff Denis (dir.), Travail et paysages, Paris, Éditions du CTHS : 167-198, Actes du 127ème Congrès du CTHS « Le travail et les hommes », Nancy 15-20 avril 2002.
- Ribet N., 2011, "Enjeux de connaissance et de reconnaissance des compétences techniques du brûlage à feu courant", Forêts Méditerranéennes, Tome XXXII, n°3.
- Robinson, J.M. 1991, "Fire from space: global fire evaluation in infrared remote sensing", International Journal of Remote Sensing, (12), pp. 3-24.
- Sand, C., 1997, "Variétés de l'habitat ancien en Nouvelle-Calédonie : étude de cas sur les vestiges archéologiques du Centre Nord de la Grande-Terre », Journal de la Société des Océanistes, vol.104, pp. 39-66.
- Teulieres-preston M.-H., 2000, "Le droit maritime kanak et ses transformations", in : Bensa A. & Leblic I. (dir.), En pays kanak : Ethnologie, archéologie, linguistique, histoire de la Nouvelle-Calédonie, Paris, Ed. de la MSH, pp. 129-146.
- Udo N., 2011, Feu, ressources naturelles et territoires : Perceptions, usages et mode de gestion. Etude de cas autour du massif de l'Aoupinié, tribus de Gohapin, Goa et Pöö (Province nord, Nouvelle-Calédonie), Mémoire de Master 2 Ingénierie en Ecologie et Gestion de la Biodiversité, Université de Montpellier 2, Task 2 ANR INC – WWF.
- Wickel A., 2010, Etude de sciences humaines et sociales sur la caractérisation et l'évolution des pratiques et des risques environnementaux liés au feu en zone périurbaine de Nouméa (Montagne des sources –Monts Koghi), Rapport d'étape, Task 2 – ANR INC, G.I.E. Océanide.

F.3 PROGRAMME DE RECHERCHE INC 2008-2012 - CONTRIBUTION DU WWF-FRANCE



Copyright photos : A. Le Goff, S.Mounier, N.Petit

par Hubert Géraux, WWF-France, Responsable du Bureau Nouvelle-Calédonie
Nouméa, le 30 juillet 2012

Le feu de la Montagne des Sources fin 2005 a été pour le WWF-France l'opportunité de mobiliser les chercheurs sur la problématique des incendies en Nouvelle-Calédonie afin d'apporter des éclairages et des outils nécessaires à une meilleure gestion d'une des menaces les plus importantes pesant sur la biodiversité calédonienne.

Le WWF-France, par le biais de son Bureau Nouvelle-Calédonie, s'est donc engagé comme partenaire de ce programme de recherches, afin d'apporter, dans les limites de ses moyens et de ses compétences, un appui aux instituts de recherche et à leur effort d'investigation.

Au-delà de notre participation aux réunions de travail lors des missions semestrielles de coordination, notre appui, dont nous allons donner les éléments illustratifs dans la suite de ce document, s'est donc concrétisé par :

- la facilitation du travail des chercheurs sur le terrain (introduction coutumière, logistique, etc)
- la participation à la collecte de données sur les sites pilotes et ponctuellement sur ceux de « percillage »
- la mise à disposition de l'expertise de l'équipe calédonienne
- la contribution à l'étude de la sociologie du feu

Parallèlement, l'engagement du programme INC sur le site pilote de l'Aoupinié a permis au WWF, grâce d'une part à la mobilisation des guides de la tribu de Gohapin aux côtés des chercheurs pendant 4 ans et d'autre part à l'éclairage apporté sur l'évolution réelle de la couverture forestière, de poursuivre ses démarches de promotion d'une meilleure gestion des feux et de ses ressources naturelles sur son territoire. Double enjeu puisque Gohapin est la plus grande tribu de Province Nord avec plus de 700 habitants et l'Aoupinié est la plus grande forêt de basse à moyenne altitude sur sol volcano-sédimentaire de Nouvelle-Calédonie.

Enfin, le programme INC aura permis :

- d'élaborer un modèle de système d'alerte incendies pour les collectivités locales, en premier lieu le Gouvernement de Nouvelle-Calédonie qui se voit transférer la compétence sécurité civile au 1^{er} janvier 2014 par l'Etat français. Cet outil, après une étape de transfert pour le rendre opérationnel, devrait permettre d'organiser la lutte contre les feux en fonction des enjeux de conservation et du risque d'ignition.
- d'offrir des sous-produits de recherche très utiles pour les collectivités locales gestionnaires : amélioration de la carte de prévision du risque feu, identification des espèces pionnières d'intérêt pour la restauration forestière, inflammabilité des différents milieux, etc.
- d'ouvrir des voies d'investigation scientifique qui devraient se poursuivre voire s'amplifier dans les années à venir grâce aux premiers résultats obtenus et à l'intérêt croissant des chercheurs calédoniens pour ces thématiques (dynamique forestière, stockage carbone, ...)

Je tenais à remercier en premier lieu Christelle Hély-Alleaume pour avoir répondu à l'appel de notre ONG et avoir mobilisé les instituts de recherche autour de ce projet, le premier programme de recherche pluridisciplinaire sur la problématique du feu en Nouvelle-Calédonie.

Merci également à :

- *tous les chercheurs qui nous ont fait confiance et qui nous ont associés à leurs travaux.*
- *A la population de Gohapin pour l'ouverture dont elle a fait preuve pour accueillir, loger, nourrir, guider et partager son savoir avec un grand nombre de chercheurs, de stagiaires et de doctorants pendant ces quatre années*
- *Nos bénévoles qui ont apporté leur soutien aux chercheurs*
- *Nos stagiaires Pierric Gaihbaud, Fanny Miss, Adrien Naouna & Nathalie Udo*
- *Nicolas Petit et Denis Meandu-Poveu pour leur soutien indéfectible à l'organisation des missions et à l'encadrement de nos stagiaires.*

WP1

1. **Mise en place de 4 parcelles d'inventaire floristique pour l'IRD** sur le flanc ouest de l'Aoupinié, selon le protocole arrêté par J.Munzinger (1 sur serpentine, 3 sur volcano-sédimentaire à 300, 600 et 900 m) via la mobilisation du stagiaire M1 WWF Pierric Gailhbaud
2. **Appui au doctorant CNRS T.Ibanez** (Feux & dynamiques forestières) via :
 - aide à l'organisation des missions sur Gohapin et aménagement des disponibilités du guide D.Meandu-Poveu
 - prise en charge financière des prestations de relevés sur sa batterie de 80 pièges à graines (pour évaluation effet perchoir) et suivi du prestataire, ainsi que du soutien sur les relevés parcelles
 - recherche de photos aériennes des années 1942-43 sur sa zone d'étude de l'Aoupinié
 - contribution à l'article « *Rainforest and savanna landscape dynamics in New Caledonia :Towards a mosaic of stable rainforest and savanna states?* » publié en 2012 dans *Austral Ecology*
3. **Appui à la mission terrain « combustibles-fourmis » d'octobre 2010** via la mobilisation de moyens humains bénévoles pour soutenir la collecte de données par les chercheurs INC

WP2

1. **Collecte d'informations sur les usages et perceptions du feu, ses conséquences sur leur environnement & ressources :**
 - Missions de terrain pour recueil informations sur organisation clanique et spatiale des tribus du site pilote de l'Aoupinié (Gohapin, Goa, Pöö) ainsi que sur les usages du feu (par Nicolas Petit & Denis Meandu-Poveu)
 - Organisation de rencontres et d'échanges sur le projet Aoupinié avec un focus spécial sur la gestion des feux



- Financement et co-encadrement WWF-IRD d'un stage M2, Nathalie Udo, sur le thème « **Feu, ressources naturelles et territoires : perception, usages et modes de gestion- Etude de cas autour du massif de l'Aoupinié tribus de Gohapin, Goa et Pöö (Poya, Province Nord)** », permettant de valoriser les résultats précédents et de lever des pistes de travail originales sur l'amélioration de la gestion des feux dont les suivantes :
 - o Les espèces envahissantes, moteur puissant d'évolution des pratiques, des fréquences et du calendrier annuel d'usage du feu
 - o Perception du recul par le feu des savanes à niaoulis mais pas de celle des forêts
 - o Rétraction spatiale des pratiques agricoles

2. Appui aux collaborateurs de la composante WP2 pour le Task2

Site pilote AOUPINIE

- **Alexis Bayonnas**, stagiaire UNC/IRD encadré par Pascal Dumas : Organisation d'une mission sur Gohapin pour son travail de spatialisation des données sociologiques influençant les incendies
- **Johana Tein**, contractuelle GIE Océanide : Mise à disposition des documents de mission socio Feu WWF (rapport, tableau organisation clanique des 3 tribus & ensemble des cartes produites), briefing sur historique projets sur l'Aoupinié, mise à disposition de la revue de presse WWF sur les incendies en NC 2001-2008), invitation sur Gohapin lors de nos missions.
- **Marie Toussaint**, doctorante EHES / IRD / UNC en anthropologie : Introduction à Gohapin, collaboration avec stagiaire WWF sur premières missions.

Site pilote MONTAGNE DES SOURCES

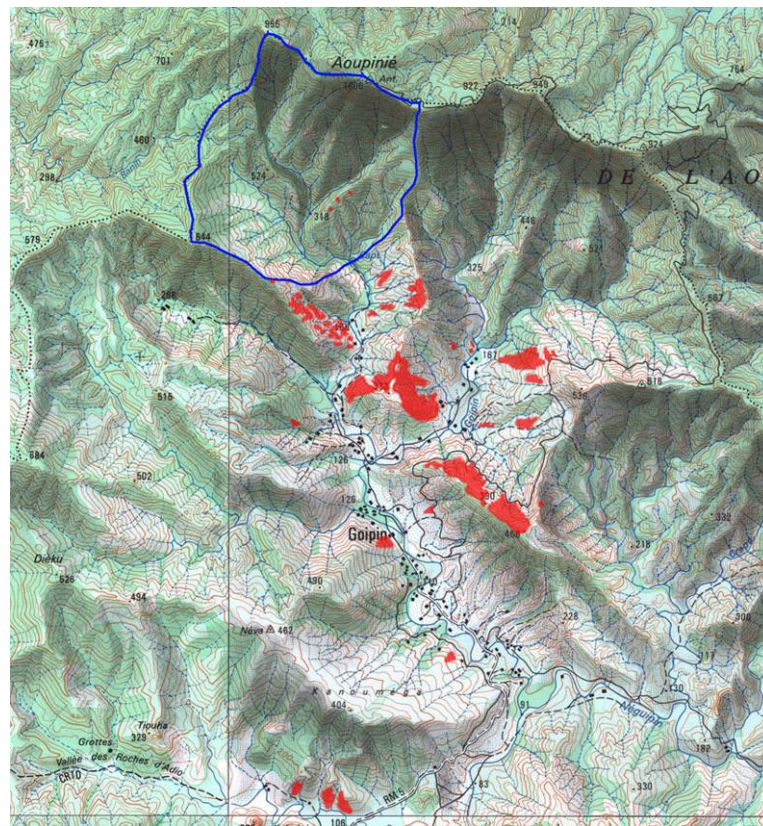
- **Antoine Wickel**, contractuelle GIE Océanide : mise à disposition de la revue de presse WWF sur les incendies en NC 2001-2008, mise à disposition d'un fonds documentaire sur l'incendie de la Montagne des Sources ainsi que le combat des ONG (WWF-Dumbéa-Rivière Vivante) sur la lutte contre les incendies et la préservation de cette zone de fort enjeu écologique, introduction auprès des référents de l'association locale Dumbéa Rivière Vivante pour faciliter la pénétration du réseau d'acteurs ainsi que la collecte de données

3. Développement des actions Task3 dans les limites de ce que l'agenda de travail retardé du Task2 et de l'éclairage scientifique concomitant ont permis :

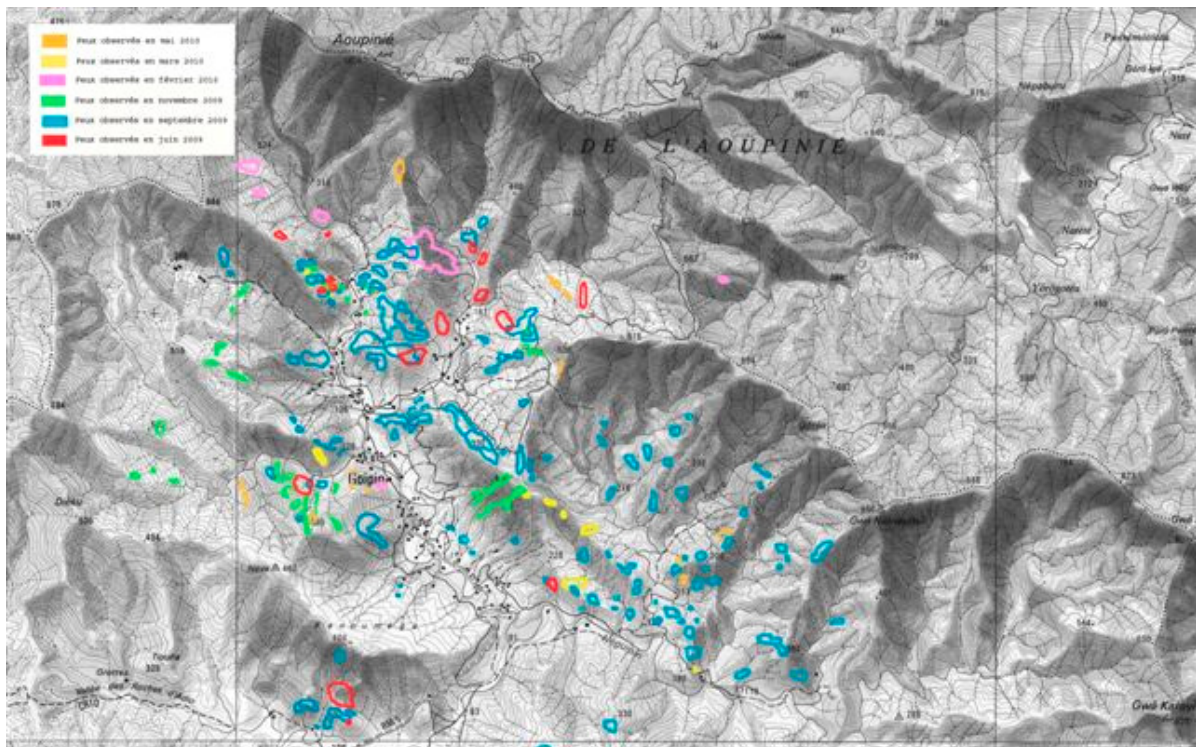
- Poursuite des démarches de sensibilisation des **clans de Gohapin** à la problématique des feux par engagement dans un projet de plantation / gestion des feux (ex : Clan Meandu-Gorodé dans la vallée de Newapwi avec le focus du captage d'eau, clans Borékaou, Meandu-Poveu et Moindeu sur le massif de Goaputu, etc)
- mobilisation de l'association des **femmes We Ereteu** dans cette problématique de restauration des zones brûlées via le développement de production de plants à but de restauration forestière et de plantation sylvicole
- Mobilisation de la **nouvelle génération** via le développement d'activités pédagogiques sur le thème du feu, des ressources naturelles de la tribu (eau & biodiversité) et de la restauration forestière (dont chantier scolaire sur ancienne zone brûlée)

WP2 + WP4

1. Réalisation de travaux de spatialisation des feux sur la tribu de Gohapin



Surfaces brûlées entre le 01/05/08 et le 08/08/08



Surfaces brûlées entre juin 2009 et mai 2010

Intérêt des relevés WWF pour les chercheurs :

- **Vérité terrain pour confronter les feux réels avec les relevés feu du satellite** MODIS (calage traitement images NOAA-AVHRR) et apprécier ainsi la fiabilité de MODIS (M.Despinoy - IRD Unité S140 ESPACE)
- **Calage des simulations de feux du logiciel flammapp** via les distributions des feux relevées par le WWF dans la mosaïque forêt/savane (C.Hely-Alleaume / V.Tinquaut - UMR CNRS 6635)
- Aide, via le relevé et la caractérisation des voies de circulation sur l'ensemble du massif forestier, à la **paramétrisation d'un modèle patchy de dynamique des paysages forêt humide / savane** sur le Massif de l'Aoupinié. (V.Bonhomme – UMIFRE 21 CNRS-MAEE)



Copyright : N.Petit



F.4 ÉLÉMENTS POUR LE RAPPORT FINAL, DE LA PARTICIPATION DE MÉTÉO-FRANCE AU PROJET INC (INCENDIE EN NOUVELLE-CALÉDONIE)

Rapport rédigé par Luc Maîtreperrière, Météo-France Nouméa, Juillet 2012

OBJECTIFS REALISES

A) Le premier objectif était d'identifier un nouvel indice d'alerte incendie pour la Nouvelle-Calédonie. En 2008, Julien Paul a été recruté en CDD pour rechercher le « meilleur » index d'alerte incendie pour la Nouvelle-Calédonie. Il a donc réalisé une étude comparative entre les différentes méthodes de calcul utilisées et a rédigé un rapport dans lequel il a préconisé l'utilisation de l'algorithme canadien IFM. Il a été aidé par la venue d'un spécialiste de Météo-France du centre d'Aix, Eric Bertrand, qui est venu une semaine au mois de décembre 2008 pour faire part de son expérience sur l'utilisation de l'indice d'alerte incendie dans la région sud-est de la France.

Notons qu'il a été recruté 5 mois sur le budget INC à partir d'octobre 2008 et prolongé 3,5 mois (jusqu'en juin 2009) sur le budget de Météo-France de façon à finaliser le travail jusqu'au codage de l'algorithme de calcul de l'indice et à l'évaluation des résultats. Ce travail a ensuite été poursuivi et validé par Xavier Aubail. En final, le logiciel PREVIFEU (avec le calcul de l'IFM) est opérationnel depuis septembre 2010.

B) Le deuxième objectif d'envergure, mené dans le cadre du projet INC par Météo-France, était de réaliser une climatologie en point de grille (2,5 km) à partir d'une modélisation à échelle fine avec une approche par type de temps. Les types de temps sont issus d'une classification objective réalisée par Anne Leroy à partir des champs de pression mer.

Le choix du modèle s'est porté sur AROME qui a été couplé au modèle ALADIN, lui-même initialisé au bord du domaine par le modèle global du CEP. Ce travail de préparation à la modélisation a été réalisé par Yves Bidet de la Direction Interrégionale Sud-Est.

Ce travail s'est déroulé en plusieurs phases :

1. Identification de la meilleure méthode pour le choix des tirages de 100 dates.
2. Choix du meilleur tirage (parmi les 90 réalisés) : c.a.d. celui qui donne la meilleure reconstitution de la climatologie moyenne (à partir des 100 dates du tirage) aux postes de référence.
3. Modélisation avec AROME de ces 100 dates.
4. Réalisation d'une climatologie moyenne en point de grille (grille de 2,5 km de côté).
5. Exploitation des résultats et réalisation du rapport final.

En final, la climatologie des vents (roses des vents, tableaux de fréquences, valeurs moyennes horaires) et des températures (valeurs moyennes horaires) est disponible en point de grille sur l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie.

RAPPORTS DISPONIBLES

A. INDICE FEUX DE FORETS

-Développement d'un système d'estimation du risque Incendie en Nouvelle-Calédonie, document interne Météo-France, Julien Paul, mars 2009.

-Guide technique du logiciel PREVIFEU, document interne Météo-France, Xavier Aubail, septembre 2010.

-Bilan de l'utilisation du logiciel PREVIFEU sur la période septembre 2010-aout 2011, document interne Météo-France, Xavier Aubail, septembre 2011.

B. CLIMATOLOGIE EN POINT DE GRILLE

-Choix des 100 tirages, document interne Météo-France, Luc Maîtreperrière, mars 2011.

-Evaluation de la reconstitution des vents à partir des 100 tirages AROME, document interne Météo-France, Luc Maîtreperrière, novembre 2011.

-Evaluation de la reconstitution de la température à partir des 100 tirages AROME, document interne Météo-France, Luc Maîtreperrière, mars 2012.

F.5 MODÉLISATION DE LA PROBABILITÉ DE DÉMARRAGE INCENDIE SUR LA GRANDE-TERRE : APPROCHE INTÉGRÉE PLURIDISCIPLINAIRE

Rapport rédigé par Jérémy André, UMR ESPACE-DEV 228, IRD, Juin 2012

Probabilité d'ignition au 5 octobre 2003

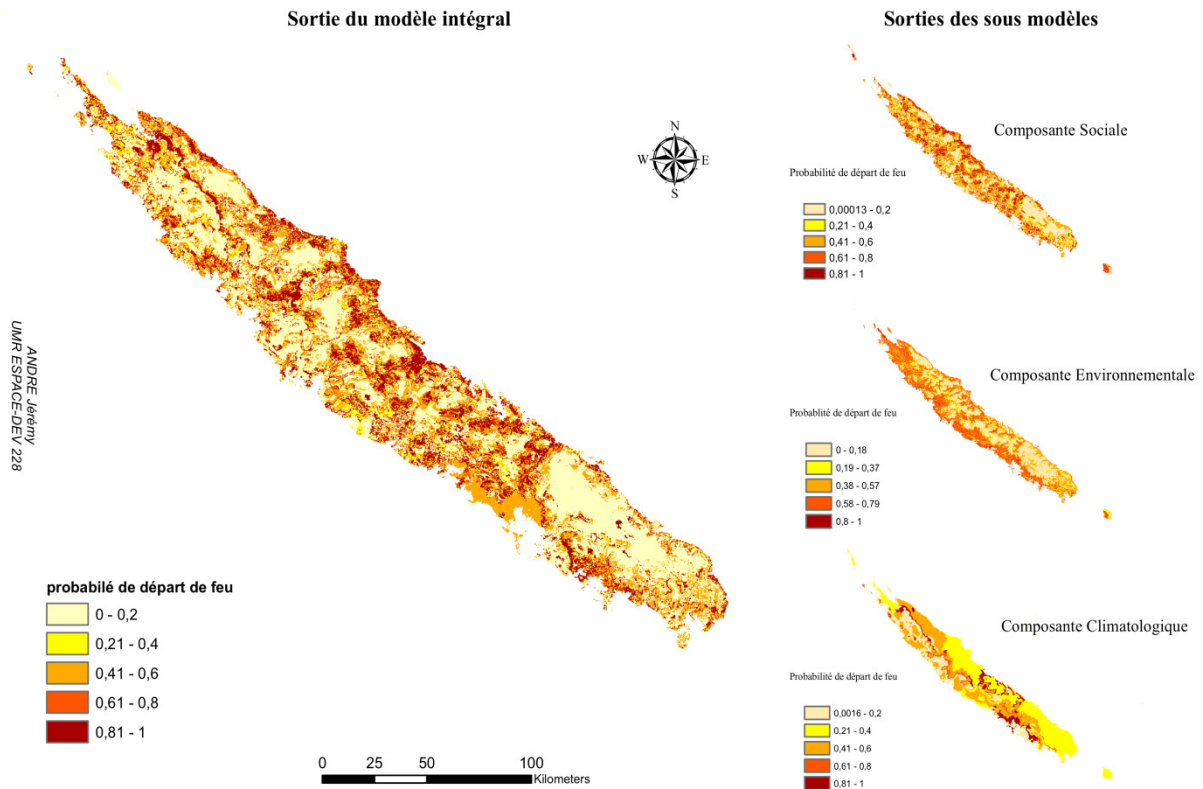


Table des matières

1	LES VARIABLES	66
1.1	La composante humaine et sociale	66
1.2	La composante environnementale	67
1.3	La composante climatologique	68
2	PLAN D'ECHANTILLONNAGE	69
3	DISCRETISATION	70
4	DISTRIBUTIONS DES DEMARRAGES INCENDIES POUR CERTAINES VARIABLES	71
5	GRAPHE CAUSAL DU RISQUE INCENDIE	78
6	STATISTIQUES PRELIMINAIRES	79
6.1	Analyse multivariées	79
6.1.1	Analyse en Composantes Principales	79
6.1.2	Analyse mixte :variables quantitatives et qualitatives	81
6.1.3	ACM globale sur variables discrétisées.....	82
6.2	Tests d'indépendance Khi 2 Monte-Carlo	85
7	SELECTION DE VARIABLES	87
8	RESEAU BAYESIEN, LE MODELE D'IGNITION	89
8.1	Structure.....	89
8.1.1	Par expertise	89
8.1.2	Apprentissage de la structure.....	90
	Recherche de structure sans connaissance à priori.....	90
	Avec contraintes de dépendance sur la structure de calcul des indices météo-france. 90	
	D'autres liens entre variables ont été trouvés par la procédure de "structure learning"91	
8.2	Paramétrage du modèle	91
8.3	Validation	92
8.3.1	Sous-modèle climatique	92
8.3.2	Sous-modèle environnemental	92
8.3.3	Sous-modèle social	92
8.3.4	Modèle intégré.....	92
8.4	Analyse de sensibilité	93
8.5	Analyse ROC AUC	93
9	DISCUSSION	94
10	BIBLIOGRAPHIE	95

Index des illustrations

Illustration A: Diagramme de construction de l'Indice Forêt Météo	68
Illustration B: Carte de répartition des points échantillonnés	69
Illustration C: distribution des démarrages incendies et agrandissements réserves.....	71
Illustration D: Distribution des démarrages et orientation des versants	72
Illustration E: Distribution des démarrages incendies et foncier coutumier	72
Illustration F: Distribution des démarrages incendies et zones GDPL.....	73
Illustration G: Distribution des démarrages incendies et zones de réserves	73
Illustration H: Distribution des démarrages incendies et distance aux routes et chemins.....	74
Illustration I: Distribution des démarrages incendies et distances aux tribus	74
Illustration J: Distribution des démarrages incendies et indice DMC	75

Illustration K: Distribution des démarrages incendies et indice FFMC	75
Illustration L: Distribution des démarrages incendies et altitude	76
Illustration M: Distribution des démarrages incendies et NDVI.....	76
Illustration N: Distribution des démarrages incendies et foncier privé	77
Illustration O: Distribution des démarrages incendies et foncier domanial	77
Illustration P: Graphe du modèle global de risque incendie	78
Illustration Q: Résultat de l'ACP sur les variables quantitatives.....	80
Illustration R: analyse multivariée mixée, variables quantitatives.....	81
Illustration S: Boxplot ACM, score des variables et catégories	82
Illustration T: scatter plot ACM Variables et catégories.....	83
Illustration U: Score ACM et ratios de corrélations pour les variables	83
Illustration V: ACM et variables météo	84
Illustration W: ACM et variables sociales	84
Illustration X: ACM et variables physiques	85
Illustration Y: Tests d'indépendance entre variables. Khi2 Monte Carlo	85
Illustration Z: Description de la catégorie feux par les catégories des autres variables	86
Illustration AA: Ordre d'importance des variables établi par la méthode RELIEF sur 200 itérations	87
Illustration BB: Graphe causal du modèle d'aléa du départ d'incendie (BNIM) et ses sous modèles	89
Illustration CC: Précision du modèle et bonnes prédictions de démarrage incendie	94
Illustration DD: True positive vs. false positive rates	94

Index des tables

Tableau 1: Classes foncières.....	66
Tableau 2: Typologie de l'occupation du sol reclassée pour le modèle.....	67
Tableau 3: Source et description des données des variables nœuds du modèle	70
Tableau 4: Coefficients de corrélation des variables sur les 3 axes de l'ACP	80
Tableau 5: Résultat du test d'indépendance (Khi-2) des variables avec le démarrage d'un incendie	85
Tableau 6: Résultats de différentes procédures de sélection de variables sur arbre de décision (T) et réseau bayésien naïf (NBN) avec procédure de validation k-fold.....	88
Tableau 7: Scores du sous modèle climatique, coefficient Kappa et erreurs associées. Scores de bonnes prédictions pour les non feux, et les feux.	92
Tableau 8: Scores du sous modèle environnemental, coefficient Kappa et erreurs associées. Scores de bonnes prédictions pour les non feux, et les feux.	92
Tableau 9: Scores du sous modèle social, coefficient Kappa et erreurs associées. Scores de bonnes prédictions pour les non feux, et les feux.	92
Tableau 10: Scores du modèle intégré global, coefficient Kappa et erreurs associées. Scores de bonnes prédictions pour les non feux, et les feux.	92
Tableau 11: Résultats de l'analyse de sensibilité: score de bonne prédiction des points témoins, des points de départ de feux, coefficient Kappa et réduction d'entropie calculée sur le coefficient Kappa	93

1 LES VARIABLES

Toutes les couches ont été normalisées sous forme de rasters à une résolution de 300 mètres, et calées ensemble dans le système de coordonnées RGNC 91-93. Cette résolution de 300 mètres est relative à l'incertitude des objets de télédétection : 250 mètres pour le NDVI, 1 km pour les points feux et surfaces brûlées, et à la résolution fine que présentent les autres couches vectorielles, le modèle numérique de terrain (mnt) à 50 mètres, les routes, les distributions de tribus sous forme de points etc. Le modèle doit intégrer les différentes dimensions ou variables pouvant conduire à l'ignition d'un incendie. Trois composantes principales concourant au départ d'un feu ont été identifiées dans la littérature et au sein des différents groupes d'experts qui ont travaillé sur le projet de recherche ANR INC (Dlamini W.M. 2011, Dlamini W.M. 2010, Archibald S. *et al.* 2008):

- La composante humaine. Elle est déterminante dans l'allumage d'un feu. Plus de 80% des incendies sur prairies tropicales et savanes sont d'origine humaine (FAO 2007).
- La composante environnementale. Le type et l'état écophysologique (stress hydriques) de la végétation déterminent la combustibilité du milieu considéré.
- La composante climatologique. Différents paramètres climatologiques sont intégrés par Météo-France Nouvelle-Calédonie dans le calcul d'indices de risque incendie.

1.1 LA COMPOSANTE HUMAINE ET SOCIALE

Les variables du domaine des sciences humaines et sociales, extrapolables à l'échelle de la Grande-Terre qui ont été identifiées et testées sont les suivantes : la distance aux zones de réserves et agrandissement de réserves (polygones), la distance aux routes (polylignes), la distance aux tribus (points), la distance aux zones dites de stock ADRAF (polygones), qui représentent les espaces dédiés à la rétribution potentielle de terres aux tribus, la distance aux zones GDPL (Groupement de Droit Particulier, polygones).

Le foncier a été traité en utilisant différentes méthodologies (distances aux limites, classification des pixels), et les variables créées à partir de la couche du cadastre ont été testées du point de vue de leur poids au sein du modèle. Les fichiers au format shapefile présentaient différents types de propriétés : domanial, État, terres communales, Province Nord, Province Sud, terres privées, et terre coutumières. A partir de cette couche brute et en fonction des conclusions du rapport de stage d'Alexis Conte, ont été créées les couches suivantes : (i) la distance aux terres « domaniales » ou collectivités, regroupant le domanial, les terres de l'État, celles des communes et des provinces Nord et Sud, (ii) la distance aux terres privées, (iii) la distance aux terres coutumières. On peut ainsi à travers l'apprentissage des paramètres du modèle bayésien (probabilités conditionnelles i.e croisement des états des différentes variables) mettre en relief les conclusions des différents intervenants en sciences sociales. En effet il a été montré que 87% des points de feux MODIS se trouvent au sein des terres privées et coutumières, dont 27% aux limites de ces classes cadastrales. Ainsi ces feux aux marges des terres privées et coutumières peuvent correspondre soit à des erreurs de MODIS, soit à des feux marquant des avancées volontaires sur les marges domaniales, e.g des revendications de terres. Durant les enquêtes il a aussi été relevé que les incendies sont marqueurs de conflits fonciers ou de problèmes entre « propriétaires », ou personnes.

NB : La résultante pour la donnée foncière

Il y a sur-apprentissage dans le cas où l'on divise le foncier en 3 couches différentes. Finalement le foncier est intégré au modèle sous forme de 5 classes en une seule couche géographique.

Tableau 1: Classes foncières

Code classe	Propriétaire foncier
1	Domanial (État, Provinces, Communes)
2	Privé
3	Coutumier
4	Nouvelle-Calédonie
5	Non available data (« NA »)

Toutes ces variables sont statiques dans le temps. Le calendrier agricole, pourrait ajouter de la précision à la dimension temporelle de la composante humaine et sociale. Cependant, établir un tel calendrier est une tâche difficile. En effet le travail du WWF, au travers du stage de Nathalie Udo montre que les pratiques culturelles tribales changent avec le contexte de développement du pays. Les travaux agricoles ne sont plus systématiquement effectués aux moments prévus. Les retards culturels s'étalent de plus en plus vers la période sèche notamment. Enfin, les dates de travaux au champ s'effectuent en fonction des pénologies naturelles d'arbres forestiers, ou plus symboliquement, sont liés à d'autres facteurs, comme par exemple le passage de la baleine dans la baie etc. (Voir Marie Toussain, GIE Océanide).

1.2 LA COMPOSANTE ENVIRONNEMENTALE

Les variables testées sont : l'orientation du versant, la pente, l'altitude, le type d'occupation du sol, le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) décrit l'activité chlorophyllienne d'une surface (ici résolution à 250 m), un NDVI négatif correspond à une étendue d'eau, proche de zéro à du sol nu, puis plus on tend vers la valeur 1 plus on est proche d'une végétation à feuilles à forte activité chlorophyllienne typique des forêts tropicales humides. Des valeurs plus basses entre 0.2, 0.4 correspondent à des végétations basses de type arbustif, des prairies, savanes. (http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php). Cette variable est incluse dans le modèle, sous la forme d'une médiane saisonnière. Trois saisons sont observées en Nouvelle-Calédonie : la saison humide (décembre-avril), la saison intermédiaire (avril-août), et la saison sèche (août-décembre). Ainsi 3 (saisons) x 10 (années de base de données) = 30 valeurs ont été calculées pour toute la Nouvelle-Calédonie à une résolution de 250 x 250.

Seul le NDVI est dynamique, toutes les autres variables de la composante environnementale sont statiques. Une étude liant plusieurs indices de végétation issus de télédétection, (ou par la voie de l'hyperspectral) et l'état saisonnier de différents types de végétation reste encore à mener pour aboutir à une couche d'occupation du sol simplifiée, mais dynamique. Cette étude inclue un plan d'échantillonnage terrain sur les différentes formations végétales (incluant la vérification de la couche occupation du sol par la même) à différentes saisons.

Comme il reflète la quantité relative de présence de végétation (ou capacité photosynthétique de la végétation en présence), le NDVI a aussi un rôle de complément à la couche occupation du sol, cette dernière n'étant pas totalement validée par les experts locaux. La nature des données est aussi très différente. Pour l'occupation du sol la donnée est de nature qualitative nominale (voir tableau 2), alors que pour le NDVI, elle est de nature quantitative continue. Dans l'objectif de modéliser la probabilité de démarrage d'un incendie, on peut déjà faire l'hypothèse qu'une variable continue dynamique dans le temps, reflétant la quantité relative de présence de végétation ainsi que son état hydrique, représente une mesure plus discriminante que la carte d'occupation du sol, qui est statique et consiste en une interprétation qualitative de l'état de la végétation, présentant des limites spatiales intégrant potentiellement une incertitude.

Tableau 2: Typologie de l'occupation du sol reclassée pour le modèle

Code	Classe d'occupation du sol
1	eau, sol nu, tanne, mangrove, habitation
2	maquis
3	forêt humide
4	savane et formations secondaires
5	nuages
6	forêt sèche
7	zones cultivées

Cette cartographie est issue du croisement des couches d'occupation du sol de 1996 et 2008, avec la pédologie, et la cartographie de la forêt sèche.

1.3 LA COMPOSANTE CLIMATOLOGIQUE

Le vent, l'humidité relative de l'air, les températures cumulées, et les précipitations cumulées sont intégrés par Météo-France Nouvelle-Calédonie dans le calcul d'indices de risque incendie. Ces indices reflètent l'état de sécheresse de la matière organique à différentes profondeurs de sol (horizons pédologiques). Le calcul des indices de risque ignition et propagation provient d'une adaptation de la méthode Canadienne de calcul de l'Indice Forêt (développement du modèle IFM et l'interface de saisie : Xavier Aubail, Julien Paul, encadrement: Luc Maitrepierre, Alexandre Peltier, conseil : Yves Bidet, Eric Bertrand, Peltier A. & Aubail X. 2011)

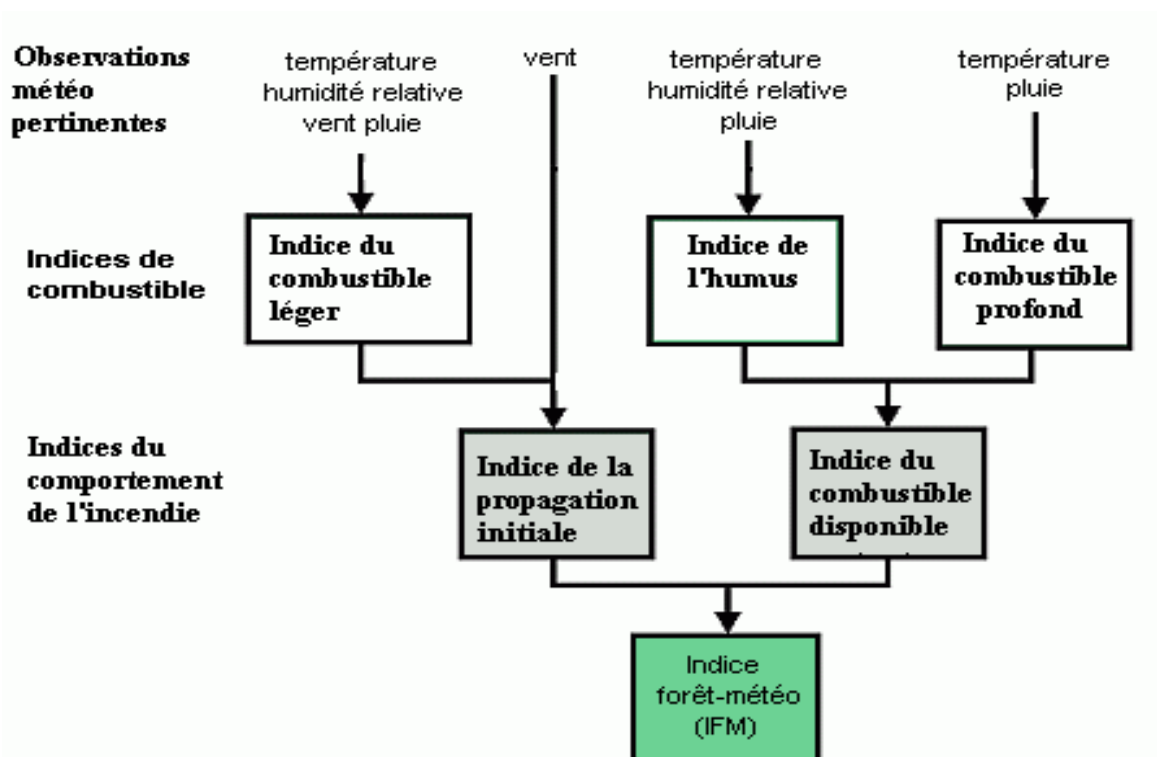


Illustration A: Diagramme de construction de l'Indice Forêt Météo

L'indice forêt-météo est calculé à partir de cinq composantes qui tiennent compte des effets de la teneur en eau des combustibles et du vent sur le comportement des incendies. Les trois premiers indices constituent des indicateurs d'humidité des combustibles. Les deux autres sont des indices de comportement du feu. Ces indices sont estimés la veille pour le lendemain, sur la base des prévisions des modèles climatiques. Ils sont calculés pour un jour j donné et sont réactualisés trois fois, le lendemain matin, le lendemain après-midi et le sur-lendemain, à partir des données actualisées. Ainsi le modèle crée (cf. prototype sur internet : deployeur.univ-nc.nc/r/INC/) est en capacité de prédire l'aléa de démarrage incendie en fin d'après-midi pour le lendemain, et ensuite de réactualiser les prévisions du jour et de la veille.

Il existe trois sortes de combustibles :

- 1) La litière (horizon OL) : Indice combustible léger (ICL ou FFMCI)

Les combustibles légers comprennent les feuilles et autres matières organiques qui forment la litière supérieure de la forêt. Il s'agit d'une évaluation numérique de la teneur moyenne en eau de la litière et d'autres combustibles légers. Cet indice est un indicateur de la facilité relative de l'allumage ainsi que de l'inflammabilité du combustible léger.

- 2) L'humus (horizon OF) : Indice de l'humus (IH ou DMC)

Il comprend les matières organiques en décomposition de moyenne profondeur dans les premiers 10-20 cms du sol. L'indice d'humidité de l'humus (IH) est une évaluation numérique de la teneur moyenne en eau des couches organiques peu tassées de moyenne épaisseur. Il donne une indication de la combustion du combustible dans les couches organiques de moyenne épaisseur et les matières ligneuses de taille moyenne.

3) Le combustible profond très compact (Horizon OH jusqu'à l'horizon A) : Indice du combustible profond, Indice sécheresse (IS ou DC)

Ces couches profondes reflètent de longues périodes de sécheresse. L'indice de sécheresse (IS) est une évaluation numérique de la teneur moyenne en eau des épaisses couches organiques compactes. C'est un indicateur utile des effets saisonniers des sécheresses sur les combustibles forestiers et du degré de latence du feu dans les épaisses couches organiques.

Les combustibles légers sont importants pour l'initiation du feu mais ce sont les deux autres qui permettent sa propagation et sa persistance. L'indice d'inflammabilité du combustible profond est particulièrement important car il varie lentement. Une fois le feu démarré, il peut persister très longtemps si cette couche est très sèche.

Les composantes sur le comportement du feu sont : la propagation initiale, qui combine les effets du vent et de l'indice du combustible léger sur le taux de propagation, et la combustible disponible qui combine les apports de l'humus et des combustibles profonds. Ces données doivent être prises en continu durant toute l'année car le degré de sécheresse des couches profondes se bâtit sur de longues périodes. Il sera intéressant de tester un réseau bayésien dynamique pour intégrer les données antérieures. Cependant dans le calcul de Météo-France Nouvelle-Calédonie, les pluies ne sont pas seulement sur les 24h passées (cf. IFM en règle générale) mais sur les 2 jours précédents.

2 PLAN D'ECHANTILLONNAGE.

L'échantillonnage des points d'allumage incendie et des points témoins a été réalisé à partir de la base de données MODIS de 1999 à 2010 (burned areas, hotspots, et pour le calcul du NDVI). Les points d'allumage d'un incendie sont issus de l'algorithme mis en place par l'équipe de l'UMR ESPACE-DEV de l'IRD.

Après avoir reconstruit à partir des images MODIS un polygone correspondant à un incendie - « burned areas » et « hotspots » proches dans le temps, moins de 1 jour, et l'espace, moins de 2km, l'algorithme définit le point d'ignition par la date d'enregistrement MODIS. C'est donc le point du polygone qui s'est allumé en premier.

Tous les points d'ignition (allumage d'incendie) sur la Grande-Terre sont échantillonnés. Les points témoins sont échantillonnés aléatoirement dans l'espace, mais à plus de 500 mètres du point d'ignition, et suivant la distribution temporelle du régime d'incendie issus de MODIS. Ainsi au pas de temps du mois il y a deux fois plus de points témoins que de points d'ignition échantillonnés.

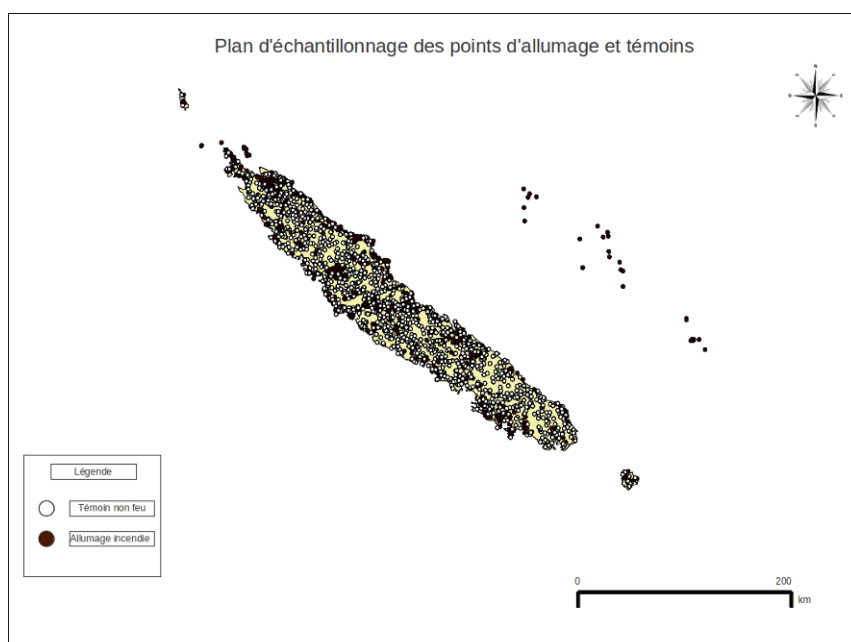


Illustration B: Carte de répartition des points échantillonnés

Nous ne prenons en compte que la Grande-Terre pour l'étude INC. Cependant notre travail peut être étendu à l'échelle de toute la Nouvelle-Calédonie i.e sur les Îles Loyautés.

3 DISCRETISATION

La discrétisation des données permet de construire un réseau bayésien discret et ainsi paramétrer le modèle avec des tables de probabilités conditionnelles. En sortie on obtient une probabilité de réaliser l'événement correspondant à la classe d'intérêt : départ ou non d'un incendie.

Pour créer des classes, nous avons appliqué un découpage des données. Cinq classes sont créées pour toutes les variables quantitatives, comme préconisé dans Marcot *et. al* (2006). Les variables qualitatives pures (nominales) qui présentent un nombre de classes supérieur ne sont pas changées. C'est seulement le cas pour l'occupation du sol. Les classes créées ou quintiles, contiennent chacune un nombre d'individus équivalent. Cependant après expertise pour certaines variables (e.g le NDVI) le découpage en classe ne se fait pas automatiquement en quintiles mais ont été fixées par expertise.

Tableau 3: Source et description des données des variables nœuds du modèle

Variable (Noeud)	Type	Source	Classes
Allumage incendie	Discret	MODIS et algorithme S.Broucke	Présence / absence
Distance stock ADRAF	Continu	ADRAF et algorithme de calcul de distance	0-2972; 2792-5562; 5562-8647; 8647-13089; >13089 (m)
Distance GDPL	Continu	ADRAF et algorithme de calcul de distance	0-1137; 1137-2827; 2827-4945; 4945-8412; >8412 (m)
Distance routes et chemins	Continu	DITT et algorithme de calcul de distance	0-255; 255-641; 641-1241; 1241-2417; >2417 (m)
Distance tribu	Continu	DITT et algorithme de calcul de distance	0-2773; 2773-4590; 4590-6796; 6796-10510; >10510 (m)
Distance réserve	Continu	ADRAF et algorithme de calcul de distance	0-65; 65-1532; 1532-3527; 3527-6894; >6894 (m)
Altitude	Continu	DITT MNT 50m	0-35; 35-97; 97-234; 234-438; >438 (m)
Orientation	Continu	Dérivé du MNT 50m	0-64; 64-148; 148-215; 215-284; 284-360 (degrés)
Pente	Continu	Dérivé du MNT 50m	0-1; 1-4; 4-8; 8-14; >14 (degrés)
NDVI	Continu	MODIS et calcul	0-0,575; 0,575-0,666; 0,666-0,734; 0,734-0,802; >0,802
Occupation du sol	Discret nominale	DTSI Croisement 2008 avec 1996 avec couches mangroves, forêt sèche, et formations secondaires; pédologie	1: eau, sol nu, végétation halophile, tannes, mangroves; 2: maquis; 3: Forêt; 4: Savane et formations secondaires; 5: Nuages; 6: Forêt sèche; 7: zones cultivées
Foncier	Discret nominale	DITT	1: Domanial; 2: Privé; 3: Coutumier; 4: Nouvelle-Calédonie; 5: Non-available
ICL (FFMC)	Continu	Météo-France Nouvelle-Calédonie	<86,6 ; 86,6-88,5 ; 88,5-89,7 ; 89,7-90,8 ; >90,8
IH (DMC)	Continu	Météo-France Nouvelle-Calédonie	<146 ; 146-255 ; 255-367 ; 367-508 ; >508

IS (DC)	Continu	Météo-France Calédonie	Nouvelle- <26,3 ; 26,3-43,4 ; 43,4-65,3 ; 65,3-104 ; >104
IPI (ISI)	Continu	Météo-France Calédonie	Nouvelle- <7,8 ; 7,8-11,2 ; 11,2-15,5 ; 15,5-21,6 ; >21,6
ICD (BUI)	Continu	Météo-France Calédonie	Nouvelle- <35,8 ; 35,8-58,5 ; 58,5-86,5 ; 86,5-131 ; >131
IFM (FWI)	Continu	Météo-France Calédonie	Nouvelle- <16,9 ; 16,9-26,7 ; 26,7-37,8 ; 37,8-52,6 ; >52,6
Pluviométrie	Continu	Lefèvre J. <i>et al</i> , 2010	500-991; 991-1323; 1323-1586; 1586-1756; >1756 (mm/an)

4 DISTRIBUTIONS DES DEMARRAGES INCENDIES POUR CERTAINES VARIABLES

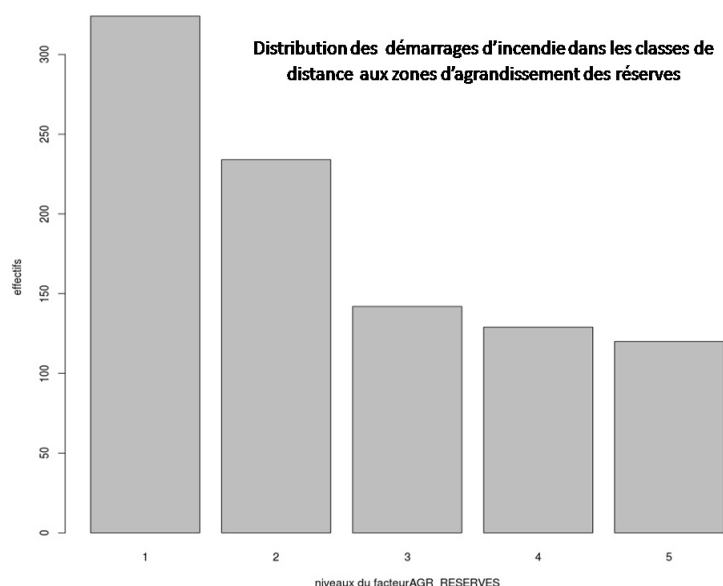


Illustration C: distribution des démarrages incendies et agrandissements réserves

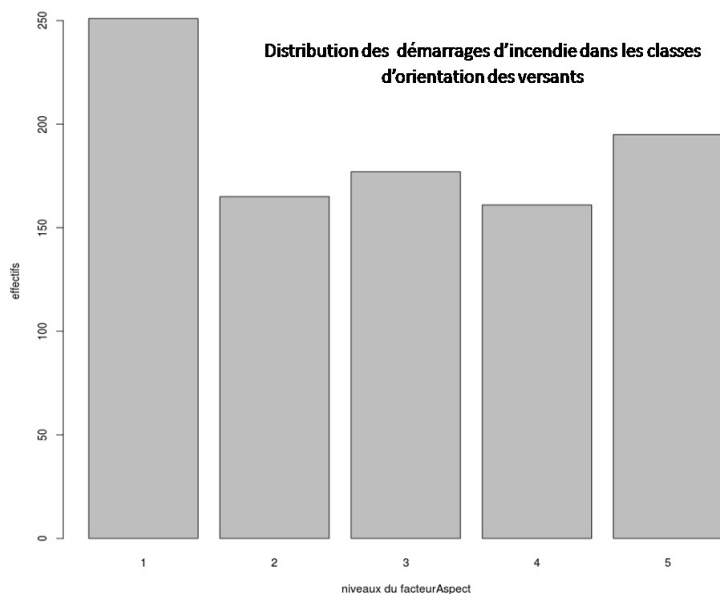


Illustration D: Distribution des démarrages et orientation des versants

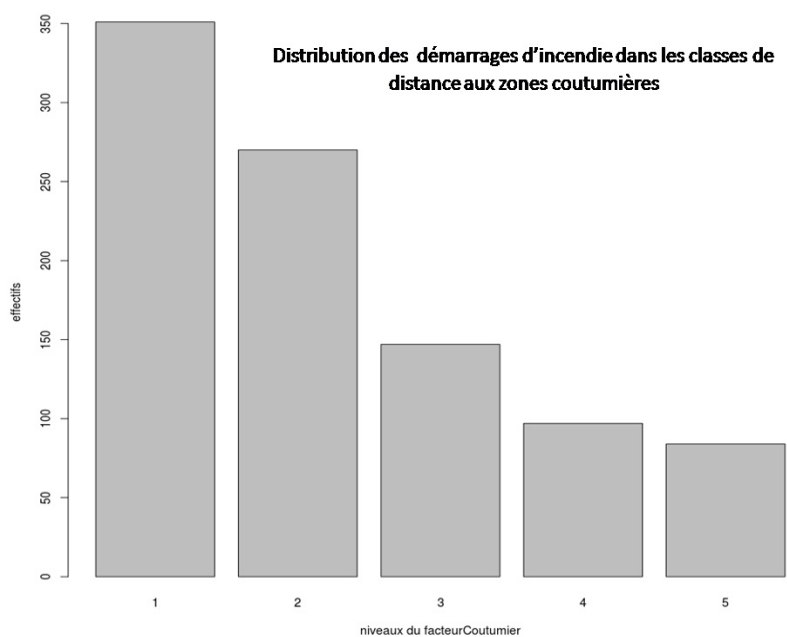


Illustration E: Distribution des démarrages incendies et foncier coutumier

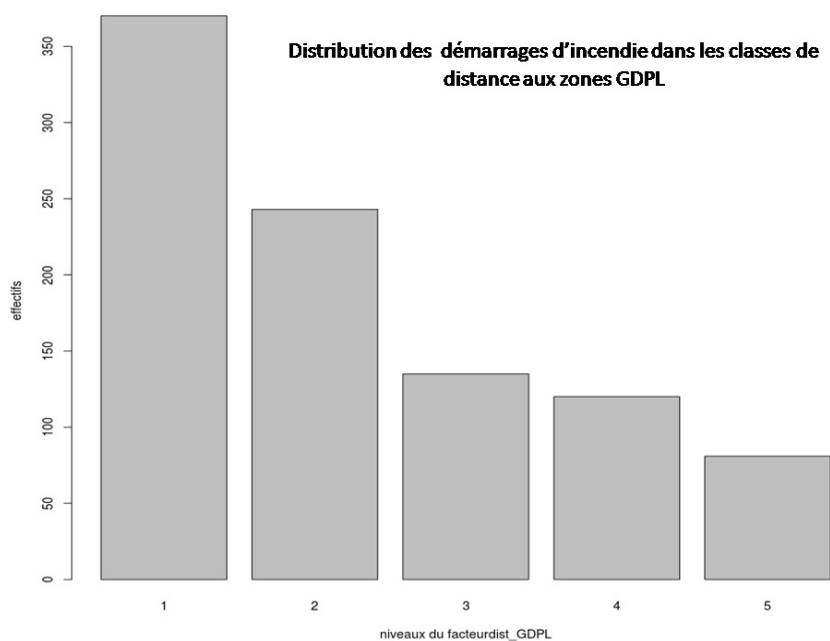


Illustration F: Distribution des démarrages incendies et zones GDPL

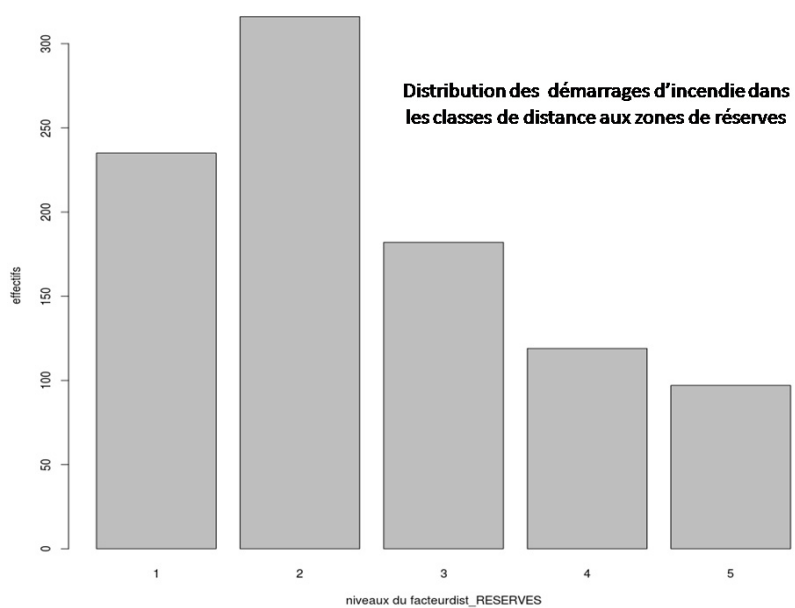


Illustration G: Distribution des démarrages incendies et zones de réserves

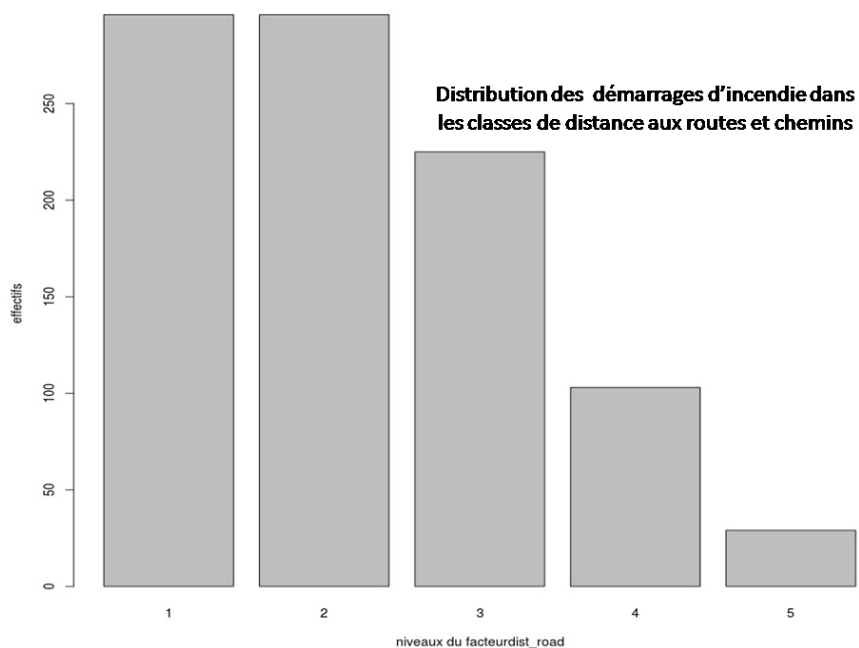


Illustration H: Distribution des démarrages incendies et distance aux routes et chemins

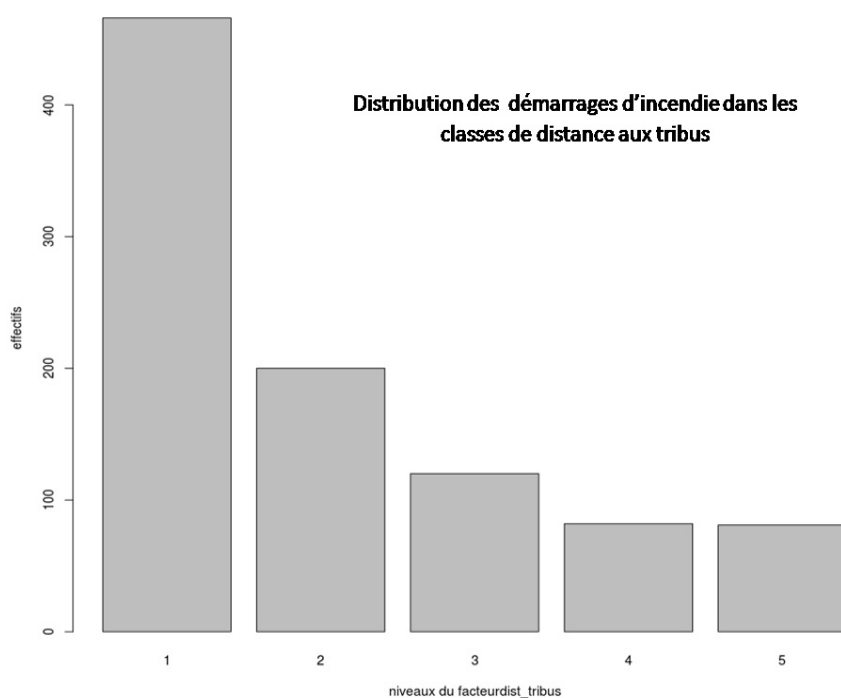


Illustration I: Distribution des démarrages incendies et distances aux tribus

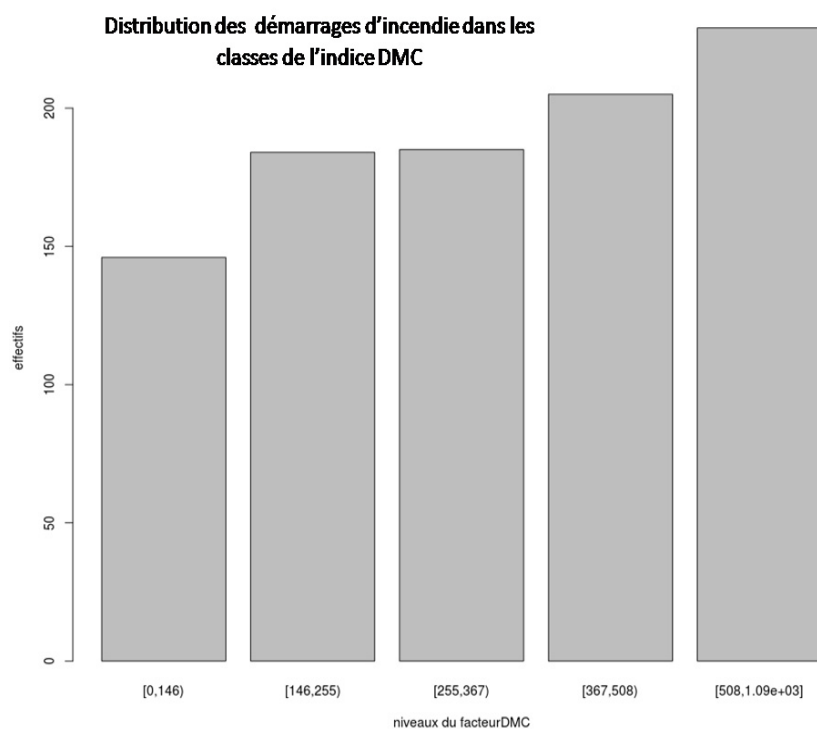


Illustration J: Distribution des démarrages incendies et indice DMC

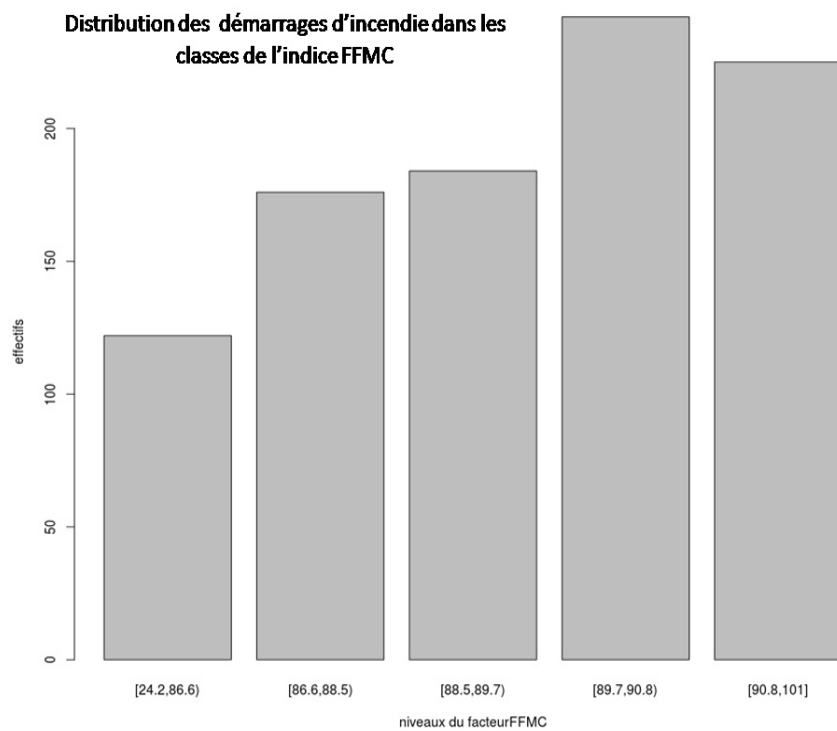


Illustration K: Distribution des démarrages incendies et indice FFMC

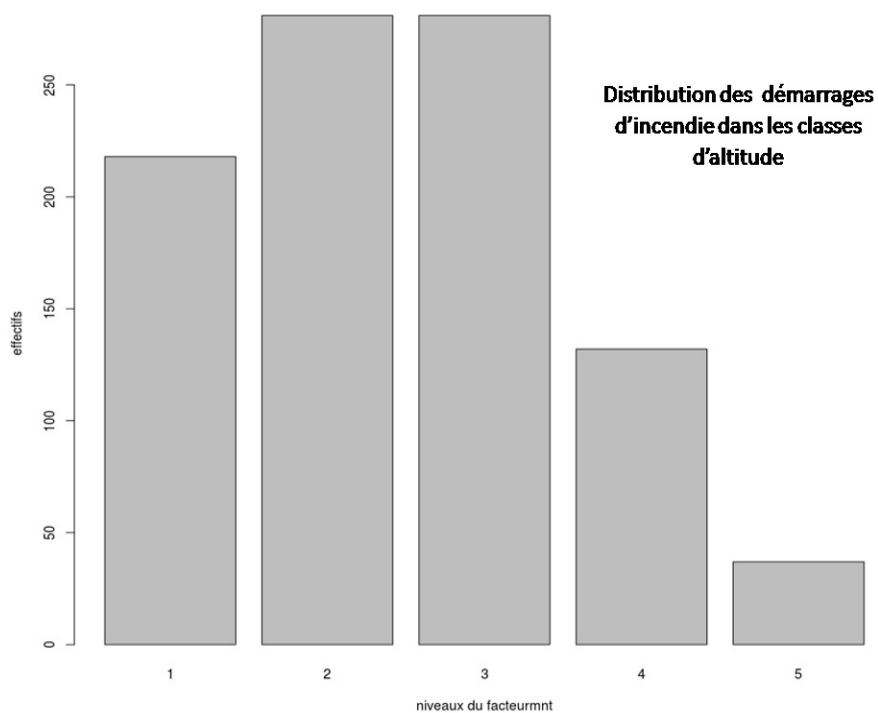


Illustration L: Distribution des démarrages incendies et altitude

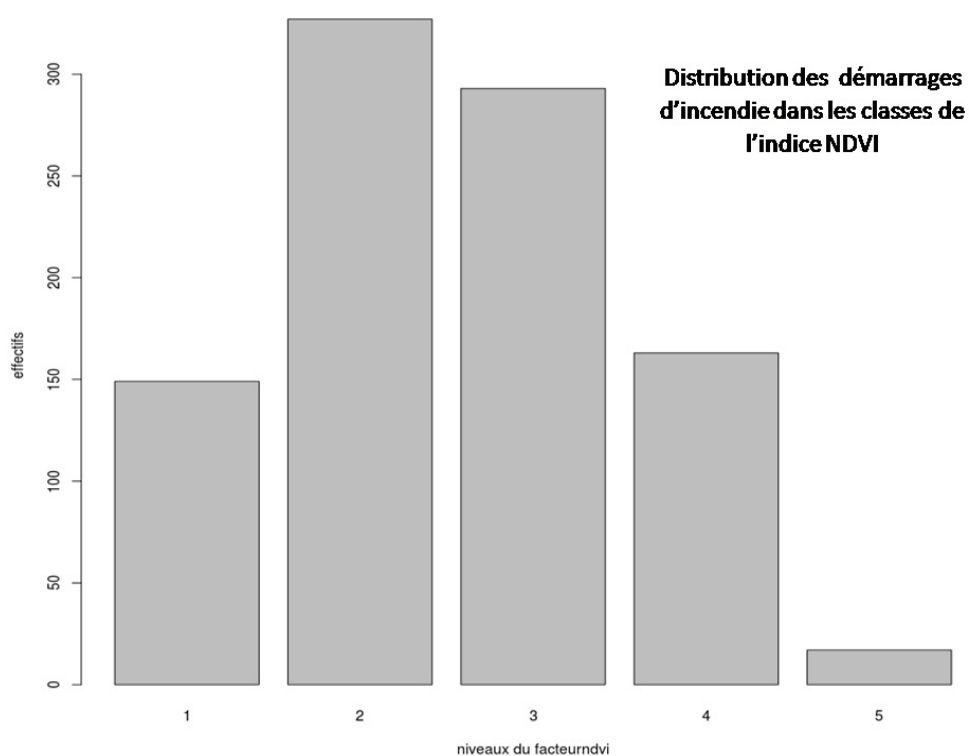


Illustration M: Distribution des démarrages incendies et NDVI

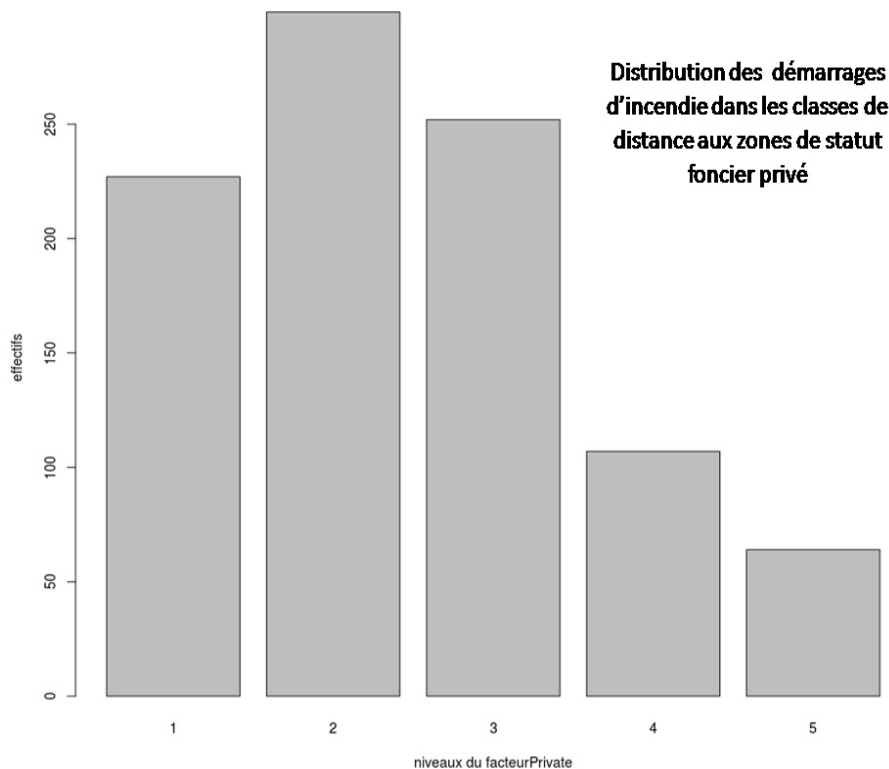


Illustration N: Distribution des démarrages incendies et foncier privé

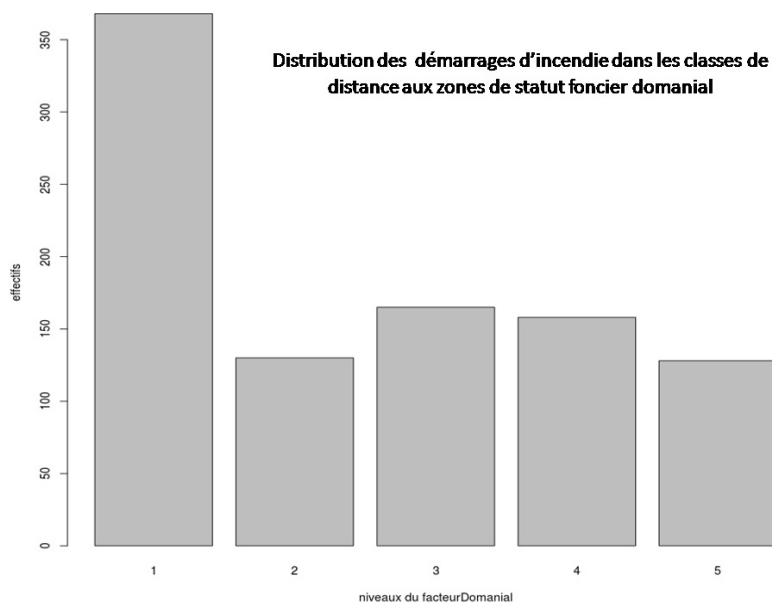


Illustration O: Distribution des démarrages incendies et foncier domanial

L'observation des diagrammes en bâtons, représentant les effectifs des démarrages de feux dans chaque classe (après discrétisation) des variables considérées, permet de mettre en relief différents patterns, ou règles de distribution des démarrages incendies.

En ce qui concerne les variables climatiques, que sont les indices de sécheresse de la litière (FFMC) et de la couche superficielle humifère (DMC), on observe, de façon logique, plus de démarrages pour de fortes valeurs de ces indices.

Si l'on croise les observations des occurrences de démarrages incendies en fonction de l'éloignement aux limites foncières domaniales, privées, coutumières ou aux tribus, aux zones GDPL, aux réserves et agrandissements de réserves, on s'aperçoit que la majorité des départ d'incendies se situe exclusivement aux bordures de ces variables. En ce qui concerne le foncier, ceci se traduit par une majorité de départ incendies dans les zones d'interfaces, de transition entre statuts fonciers différents.

De même que pour les routes et chemins, et l'altitude, on observe une distribution décroissante des départs d'incendies plus on s'éloigne des facilités d'accès. En ce qui concerne l'orientation des versants qui présentent le plus de départ d'incendies, si on regroupe les 4 premières classes, on se situe entre 0 et 280 degrés. Ceci correspond à l'orientation des vents prédominants (les Alizés). La dernière classe d'orientation présente néanmoins quelques départs d'incendies. On peut penser que ce sont des incendies qui se sont produit sur les rares périodes de l'année, durant lesquelles les vents ne viennent pas de l'Est.

Enfin pour l'indice NDVI, on observe que la grande majorité des pixels correspondant aux départs d'incendies possède des valeurs qui se situent entre 0 et 0,7. Ces valeurs correspondent à des formations herbacées à arbustives, voir arborées, des savanes en incluant les variations saisonnières et donc les stress hydriques (Newnham *et al.* 2011, Liu Y *et al.* 2010, Povead & Salazar L.F. 2004, Martinuzzi S. *et al.* 2008). Les valeurs supérieures à 0,8 sont caractéristiques de forêt sempervirentes et forêt humides.

5 GRAPHE CAUSAL DU RISQUE INCENDIE

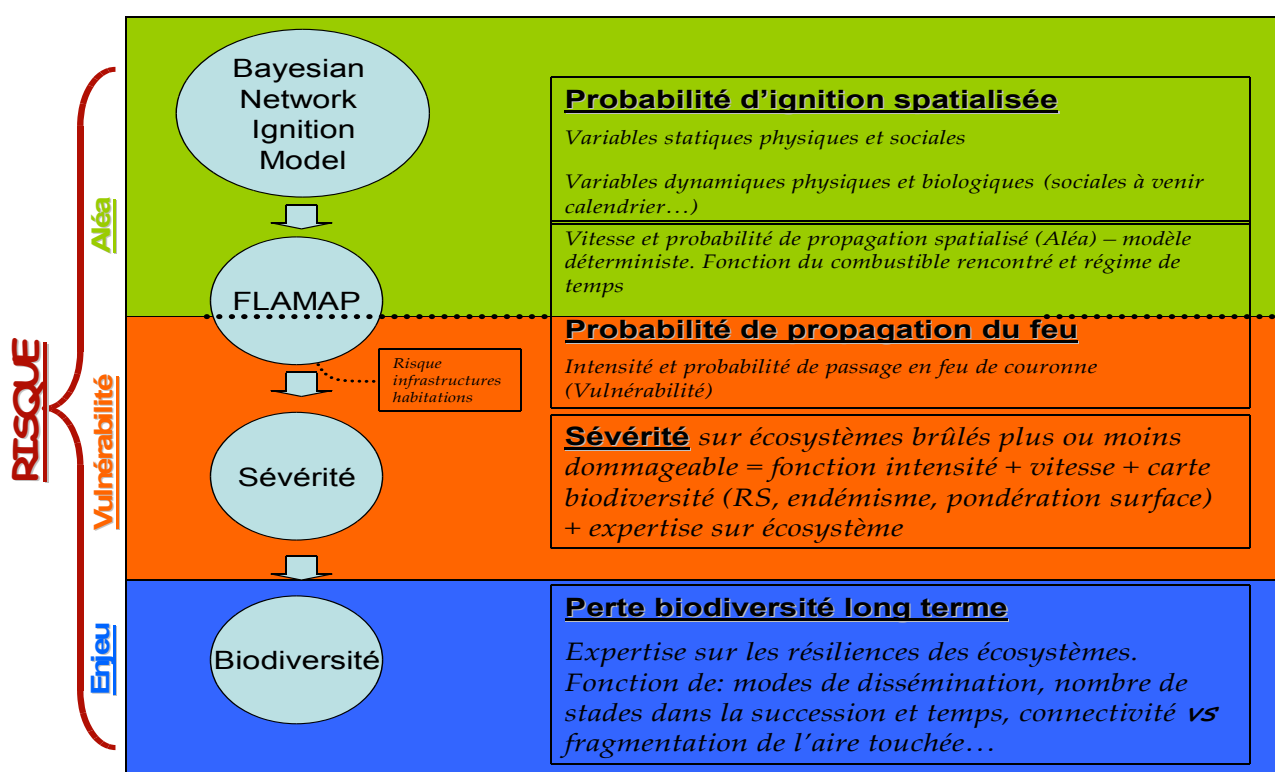


Illustration P: Graphe du modèle global de risque incendie

Le présent rapport est à mettre en relation avec le travail sur la partie vulnérabilité et enjeu pour la biodiversité. Le modèle de prédiction du départ d'un incendie permet d'évaluer l'aléa du risque global. Une fois cet aléa estimé, on estime la vulnérabilité des formations végétales, c'est à dire comment le feu se propage (FlamMap) en fonction de la topographie de la météo, et de la combustibilité de chacune des formations. Ensuite, sur cette surface impacté par l'incendie modélisé, un indice de sévérité et de biodiversité est calculé. Il représente l'enjeu dans le calcul du risque incendie. En combinant l'aléa, la vulnérabilité et les enjeux on obtient le risque. Nous nous concentrons ici sur l'aléa de démarrage d'un incendie.

Le modèle de « probabilité d'ignition incendie » ou BNIM (Bayesian Network Ignition Model) est créé à partir de l'apprentissage de données statiques et dynamiques issues de procédures de sélection de variables, présentées en partie 6.

Les deux étapes essentielles à la construction d'un réseau bayésien sont :

- i) Établir la structure du réseau reflétant les relations de causalité entre variables (ou nœuds)
- ii) L'apprentissage des paramètres. On estime ici les paramètres de la distribution globale (loi de probabilité jointe), i.e sont définies les lois de probabilité conditionnelles de toutes les variables (lois marginales). La méthode bayésienne est utilisée pour cette étape.

Ces deux étapes peuvent se réaliser par la combinaison d'algorithmes d'apprentissage (structure et paramètres) et d'expertise. L'expertise est intégrée au modèle pour l'établissement de la structure du graphe causal.

Plusieurs essais de structures de graphe ont cependant été testées. Ces structures dérivent essentiellement de l'apprentissage de structure et de relations de variables établies par analyse multivariée et tests d'indépendance conditionnelle (sur critère de « mutual information »). Une recherche de structure par algorithmes de « structure learning » a concerné tout le réseau pour la phase exploratoire, mais aussi pour les liens causaux non expertisés.

Trois approches existent pour l'apprentissage de la structure:

- i) les « constraint based algorithms », sont des tests statistiques pour apprendre les relations d'indépendance conditionnelle entre variables
- ii) les « score based algorithms », sont plus proches des techniques de sélection de modèle et de la théorie de l'information, à chaque structure de graphe (ou réseau) est associé un score qui est intégré à une fonction d'optimisation
- iii) les « hybrid algorithms » qui combinent les deux approches précédentes.

Cette démarche n'a pas abouti à une structure complète du graphe de dépendances satisfaisante. La structure finale a été simplifiée par expertise avec la volonté de segmenter la prédiction en 3 sous modèles (illustration O). Cependant la démarche et les résultats sur les dépendances conditionnelles entre variables sont présentés (partie 7.1.2).

Une carte de prédiction de la probabilité d'ignition incendie est produite par jour par le modèle, en fonction des données dynamiques actualisées (indices météo, et NDVI).

6 STATISTIQUES PRELIMINAIRES

Pour construire la structure de graphe du BNIM et avoir une vision d'ensemble sur les données, des analyses préliminaires multivariées, une étude sur la sélection des variables, des tests d'indépendance des variables discrètes, ainsi qu'une expertise ont été préalablement réalisés.

6.1 ANALYSE MULTIVARIEES

6.1.1 ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

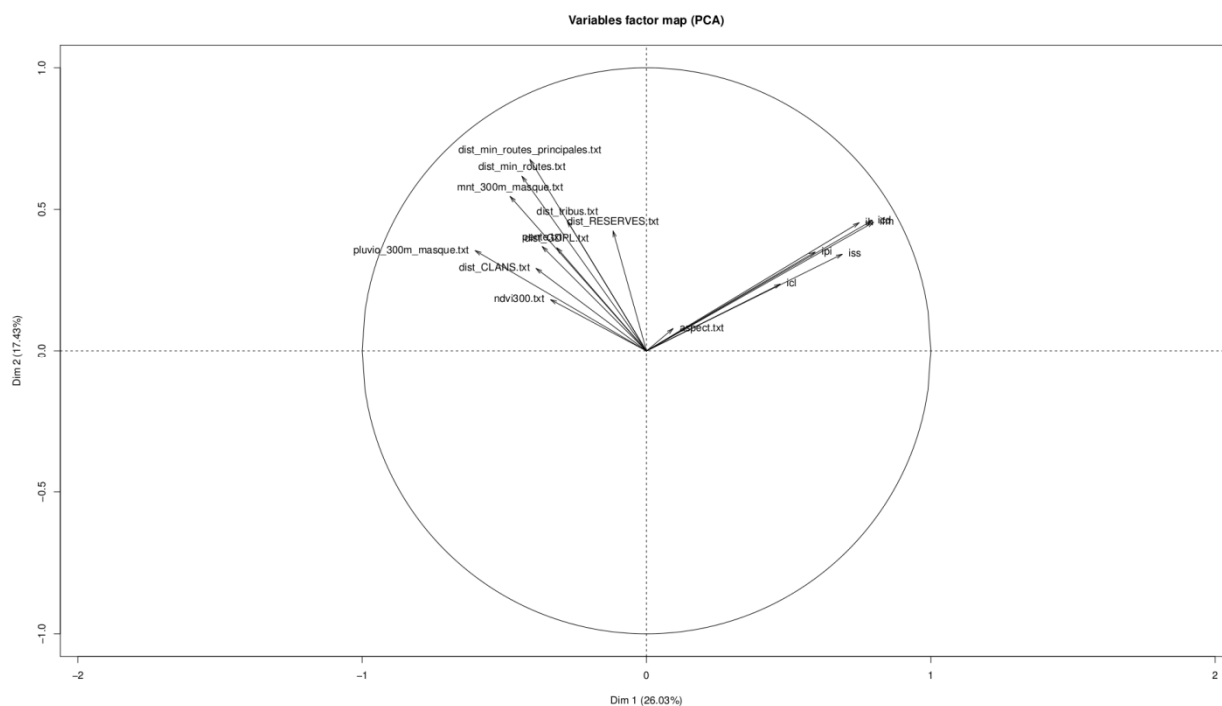


Illustration Q: Résultat de l'ACP sur les variables quantitatives

Les trois premières composantes expriment 58 % de la variance totale.

Tableau 4: Coefficients de corrélation des variables sur les 3 axes de l'ACP

Coefficient de corrélation	Axe 1	Axe 2	Axe 3
ifm	0,80	0,45	-0,06
icd	0,79	0,46	-0,05
ih	0,75	0,45	-0,08
iss	0,69	0,34	-0,04
ipi	0,59	0,35	-0,05
icl	0,47	0,24	-0,07
aspect	0,10	0,10	0,10
réserves	-0,12	0,42	0,42
tribus	-0,28	0,46	0,76
GDPL	-0,32	0,36	0,68
NDVI	-0,34	0,18	-0,48
pente	-0,37	0,37	-0,53
clans	-0,39	0,29	0,63
routes principales	-0,41	0,68	-0,09
routes	-0,44	0,62	-0,23
altitude	-0,48	0,55	-0,44
pluviométrie	-0,60	0,35	-0,35

Sur le premier axe les indices forêt-météo sont corrélés, et inversement aux variables environnementales qui décrivent un risque incendie faible pour des valeurs fortes : NDVI, altitude, pluviométrie. Cet axe décrit principalement un risque incendie du à l'environnement faible à gauche et fort à droite.

Les coefficients de l'axe 2 montrent une corrélation entre les indices forêt-météo et les variables du domaine social : distance aux zones de réserve, tribus, zones GDPL, et routes. Il est donc important de noter qu'à ce stade d'analyse nous pouvons d'ores et déjà affirmer que le risque incendie est lié à la présence proche de l'homme ou de ses activités.

Les valeurs fortes sur l'axe 3 montrent une corrélation entre les variables d'ordre social (réserves, tribus, zones GPDL, clans). Un autre groupe de variables est exprimé par cet axe : NDVI, pente, et altitude, et pluviométrie.

Cette première analyse multifactorielle met en relief trois groupements de variables selon trois dimensions principales : celles d'ordre météorologique (indices forêt-météo), celles qui ont trait à l'usage des terres par l'Homme, et les variables environnementales. Pour confirmer cette division en trois groupements principaux de variables nous tentons d'autres approches en incluant notamment les variables qualitatives pures i.e nominales : l'occupation du sol, et le foncier.

6.1.2 ANALYSE MIXTE :VARIABLES QUANTITATIVES ET QUALITATIVES

La fonction « `dudi.mix()` » de la librairie `ade4` du logiciel R, permet de réaliser une analyse multivariée en mélangeant des variables qualitatives et quantitatives (Kiers H.A.L., 1994). Cinquante pour cent de l'inertie totale du nuage de points est exprimée par les 6 premiers axes principaux de l'analyse. Cependant 10 dimensions sont conservées, et expriment 64 pour cent de l'inertie du nuage de points.

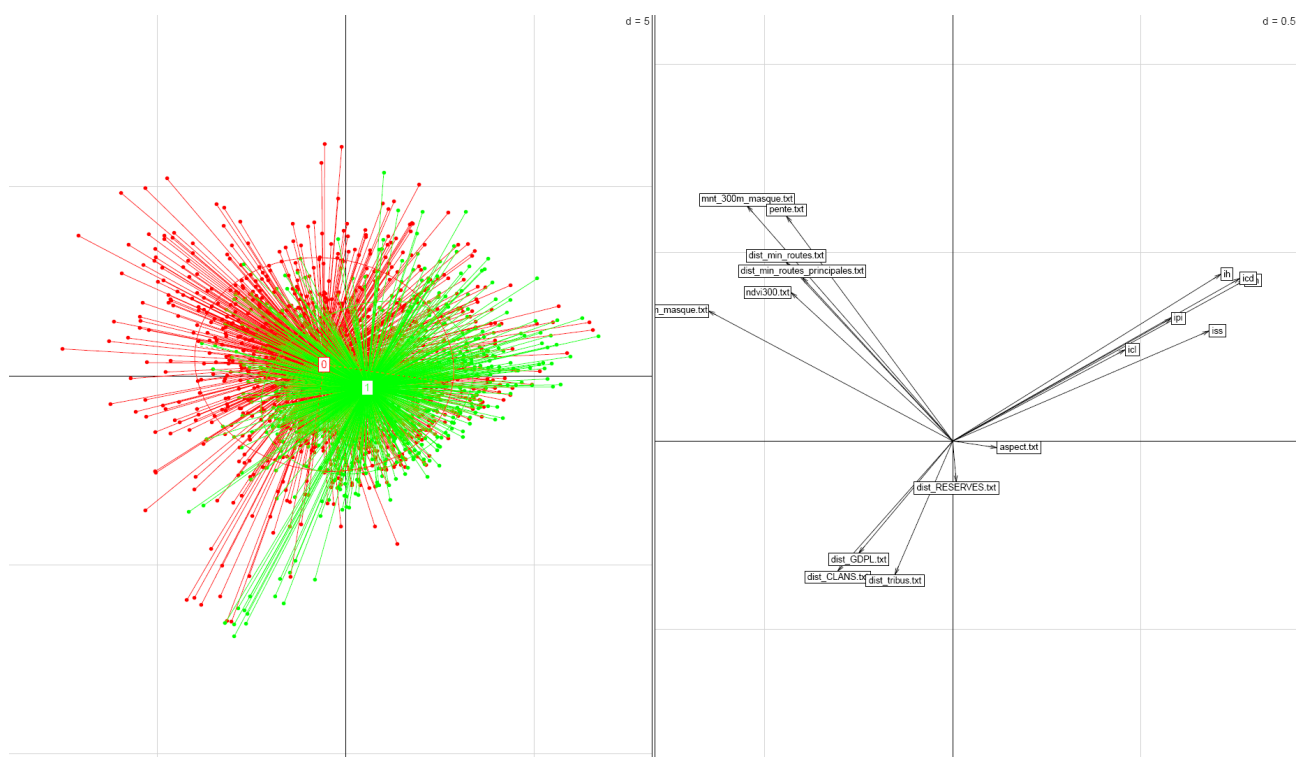


Illustration R: analyse multivariée mixée, variables quantitatives

A gauche le nuage de point total découpé en deux: 0 = les non feux en rouge; 1 = les feux en vert

Les variables les plus corrélées à l'axe 1 sont les indices météo d'un côté, et le MNT, NDVI et la pluviométrie de l'autre. Cet axe peut être interprété comme un indice de risque incendie fort à droite et faible à gauche. L'axe 2 est représenté majoritairement par le MNT la distance aux routes et chemins et la pente en haut, et les variables sociologiques en bas. Les variables du domaine des sciences humaines et sociales et l'« aspect » (orientation de la pente) ressortent mieux sur l'axe 3 que sur le 2 mis à part la distance au routes.

A l'instar de l'ACP, cette analyse mixte permet de différencier les 3 groupes de variables qui semblent être complémentaires : l'utilisation des terres par l'Homme, l'état de l'environnement et l'accessibilité (altitude, pente), et les variables météo ou indices de risque incendie intégrant diverses variables climatologiques.

6.1.3 ACM GLOBALE SUR VARIABLES DISCRETISEES

Une ACM a aussi été réalisée pour rendre compte des tendances entre les variables une fois catégorisées (discrétisées). C'est sous cette forme discrète, divisées en 5 classes que les variables interviennent dans le réseau bayésien (Bayesian Network Ignition Model: BNIM).

Cinquante pour cent de l'inertie totale du nuage de points est atteint pour 20 dimensions. 60% pour 27 dimensions. Les plus fortes tendances de liaison entre variables se décrivent aisément grâce au graphique ci dessous (illustration G) issu de l'ACM. Les variables météo (les 6 indices météo) évoluent dans le même sens. La variable pluviométrie évolue en sens contraire à ces 6 indices météo. Ces variables sont liées de façon opposée. La pente, le NDVI, et le MNT (altitude) évoluent dans le même sens que la pluviométrie. Ces variables sont liées, et évoluent dans le même sens. En effet les classes de 1 à 5 créées à partir des variables quantitatives sont classées par ordre croissant de valeurs. Ceci ne s'applique pas pour les variables qualitatives nominales: occupation du sol, cadastre. L'observation du scatter plot de l'ACM (illustration H), notamment des ellipses caractérisant les niveaux des variables permet de aussi de conclure quant à la bonne superposition de certaines variables sur les 2 premiers axes de l'ACM. En plus des observations précédentes, on peut souligner la bonne superposition des ellipses du nuage de points, entre la distance aux routes, le NDVI, et mnt. Une ellipse représente une classe de la variable. Ces variables initialement quantitatives, ont été discrétisées sous forme de variable qualitative ordinale.

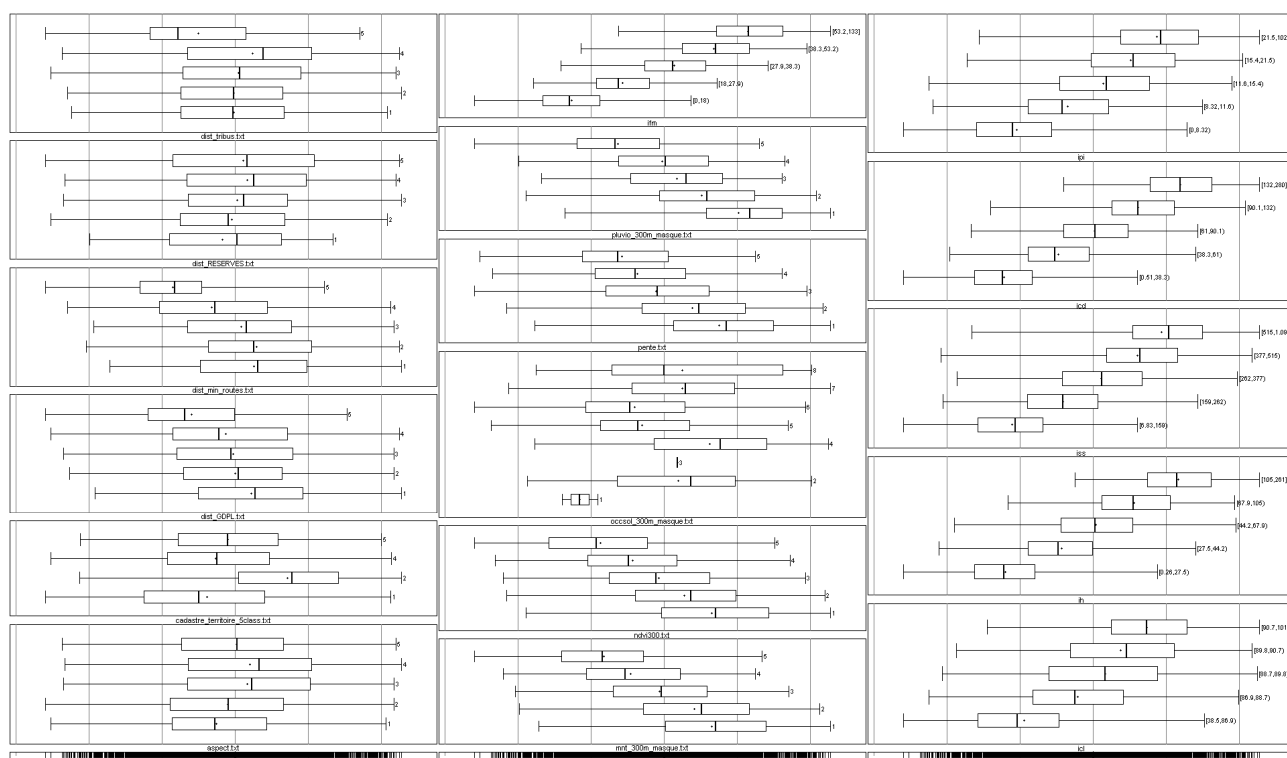


Illustration 5: Boxplot ACM, score des variables et catégories

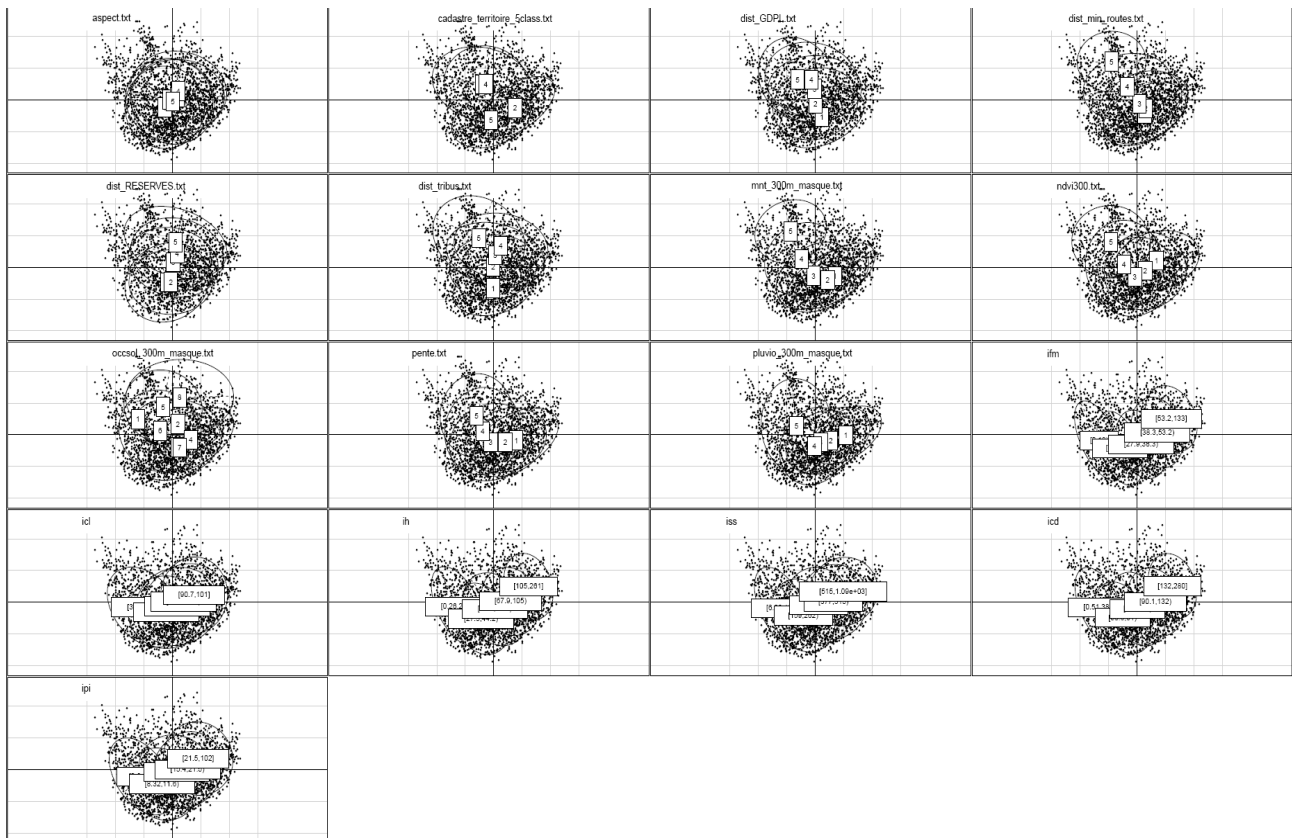


Illustration T: scatter plot ACM Variables et catégories

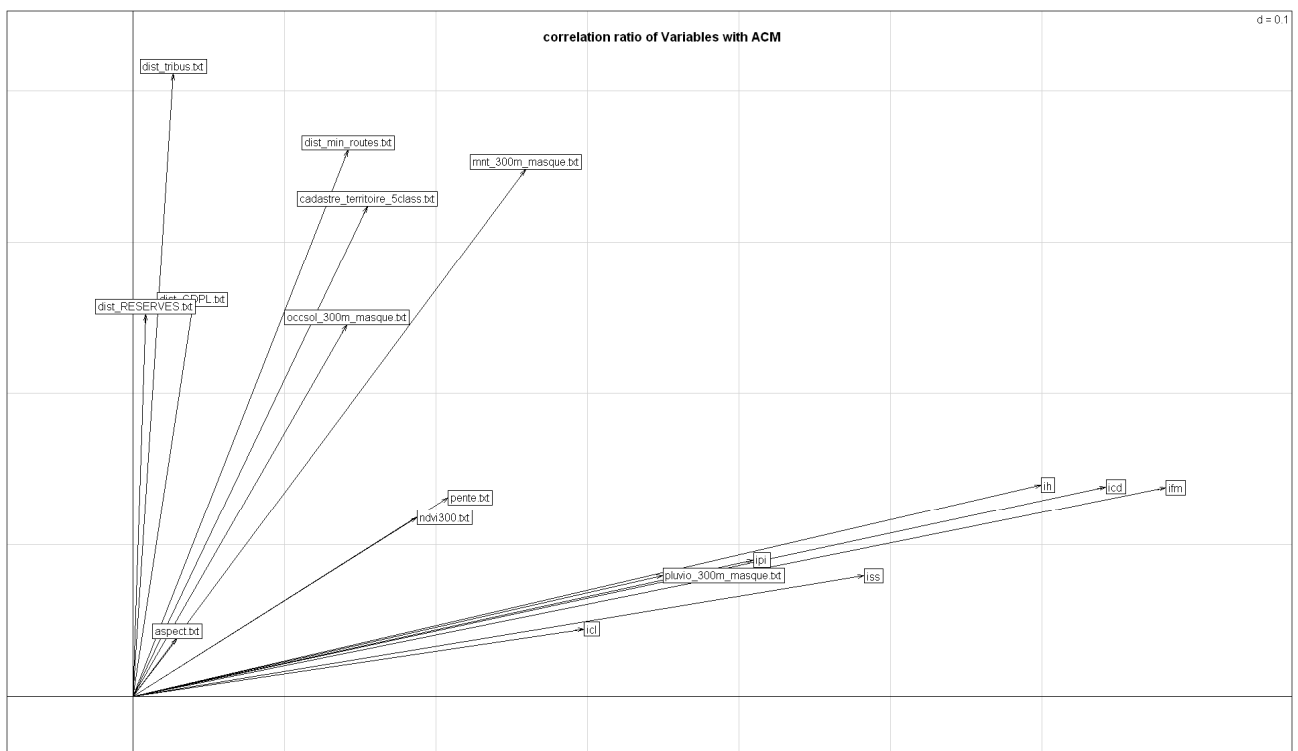
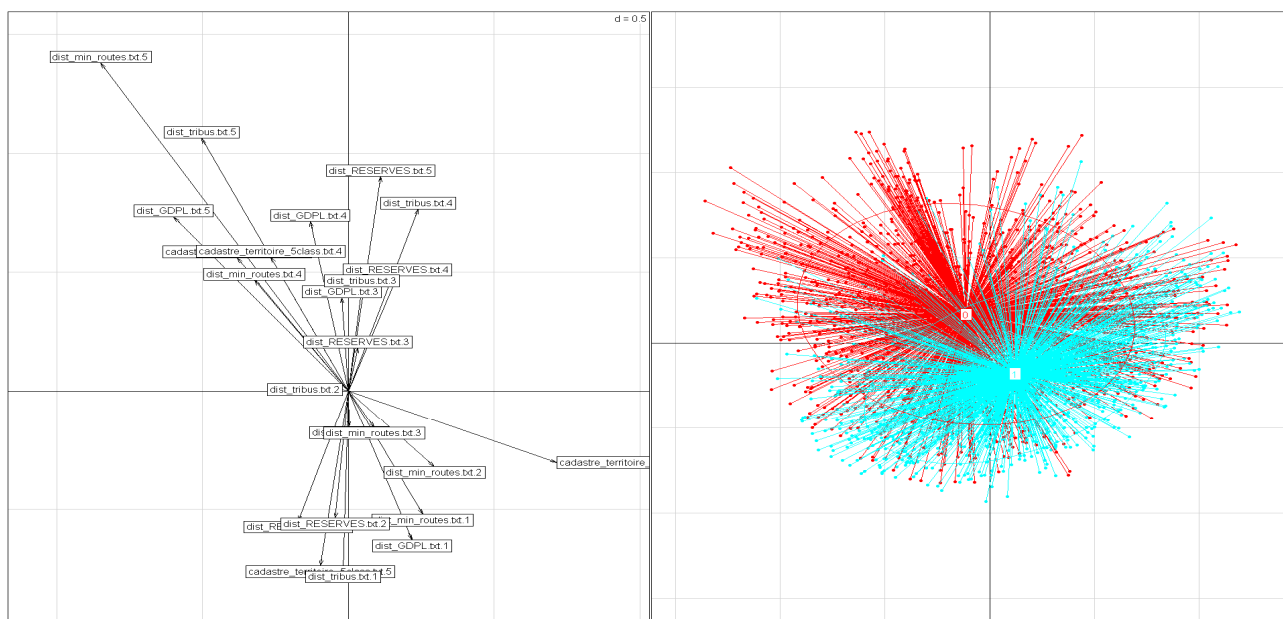
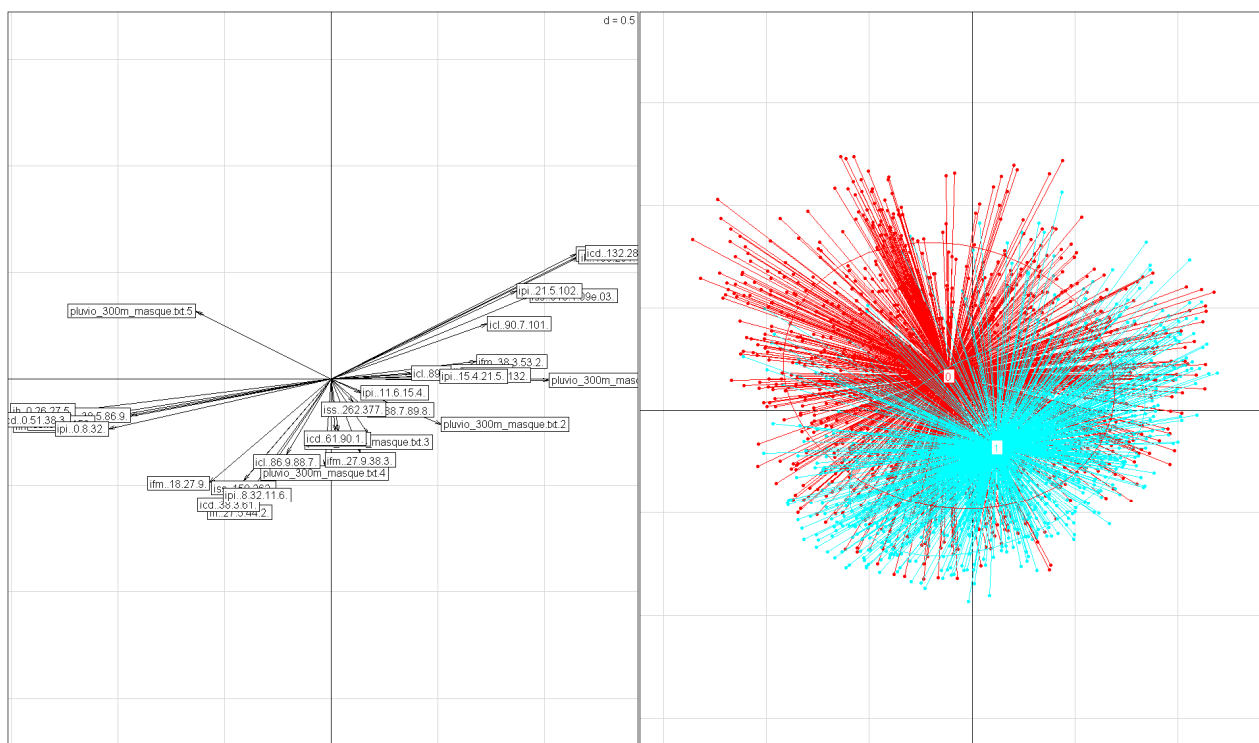


Illustration U: Score ACM et ratios de corrélations pour les variables

On observe encore 3 groupements de variables. Vers la droite la composante climatique. Puis verticalement les variables de la composante sociale, et entre les deux se concentrent de façon moins marquée les variables de la composante environnementale.



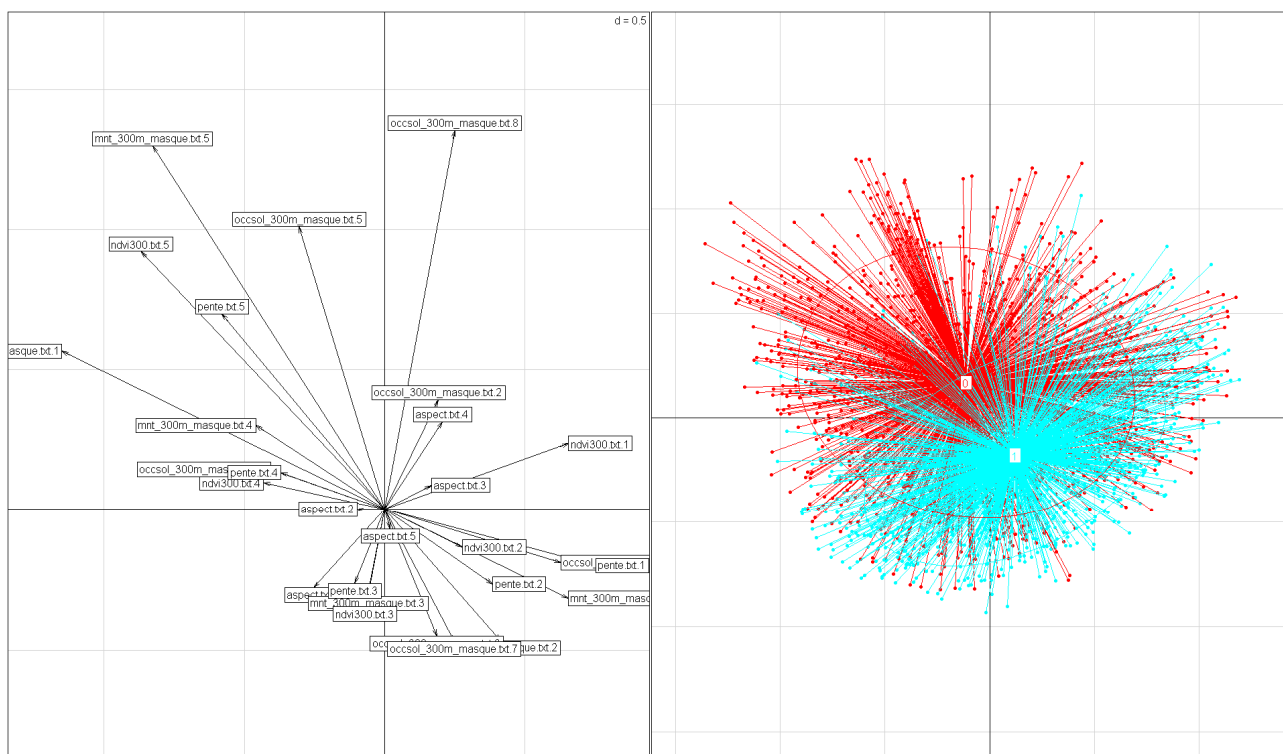


Illustration X: ACM et variables physiques

L'ensemble des statistiques multifactorielles nous permet d'isoler 3 composantes principales pour le modèle : la sociale, l'environnementale, et la climatologique. Au sein de ces composantes les variables sont relativement corrélées entre elles.

6.2 TESTS D'INDEPENDANCE KHI 2 MONTE-CARLO

Les résultats sont issus d'un test d'indépendance du Khi-deux.

Illustration Y: Tests d'indépendance entre variables. Khi2 Monte Carlo

Seule la variable de l'orientation du versant est indépendante vis à vis des feux. La majorité des variables sont dépendantes entre elles. Une tendance à l'indépendance s'observe entre certaines variables qui appartiennent à des composantes différentes. Par exemple la distance aux réserves (composante sociale) est indépendante de 4 des 6 variables climatiques. Cette tendance est tout de même relative.

Ci-dessous sont présentés les résultats du même test sans permutation Monte-Carlo pour chaque variable par rapport à l'occurrence de feux. Toutes les variables sont significativement liées à l'occurrence de feux.

Le classement par ordre décroissant selon la p-value souligne l'importance des variables de la composante sociale, puis de la composante environnementale, et enfin de l'indice de combustible légers (composante climatique).

C'est l'indice climatique fourni par Météo-France Nouvelle-Calédonie qui indique le risque de démarrage d'incendie à partir de la litière. Cela paraît logique que cet indice climatique soit plus important que les autres pour le démarrage d'un incendie. Cela nous conforte aussi quant à la qualité de l'algorithme de détection de feux qui retrouve le point d'ignition d'un incendie à partir des images MODIS.

Tableau 5: Résultat du test d'indépendance (Khi-2) des variables avec le démarrage d'un incendie

Variable	p-value
Distance tribus	4.685478e-61
Altitude	4.427747e-56
Distance routes et chemins	3.141225e-51
Distance réserves	2.919763e-37
Cadastre territoire	5.865372e-31

Distance zones GDPL	1.476916e-29
NDVI	1.052032e-27
Occupation du sol	6.466243e-24
ICL	9.702008e-17
Pluviométrie	7.713455e-16
IH	2.741025e-12
Pente	4.349306e-12
IPI	1.552412e-11
IFM	2.415519e-11
ICD	1.076943e-09
ISS	3.684398e-08
Orientation versant	3.602641e-03

En ce qui concerne la composante climatique un ordre logique d'importance apparaît. La sécheresse profonde est en dernière position. Cet indice semble plus déterminant dans le cadre de la propagation d'un incendie, que dans le cadre de son allumage. Les indices combinés sont aussi moins importants que l'indice de litière et celui de risque incendie lié aux couches superficielles des horizons pédologiques.

Illustration Z: Description de la catégorie feux par les catégories des autres variables

7 SELECTION DE VARIABLES

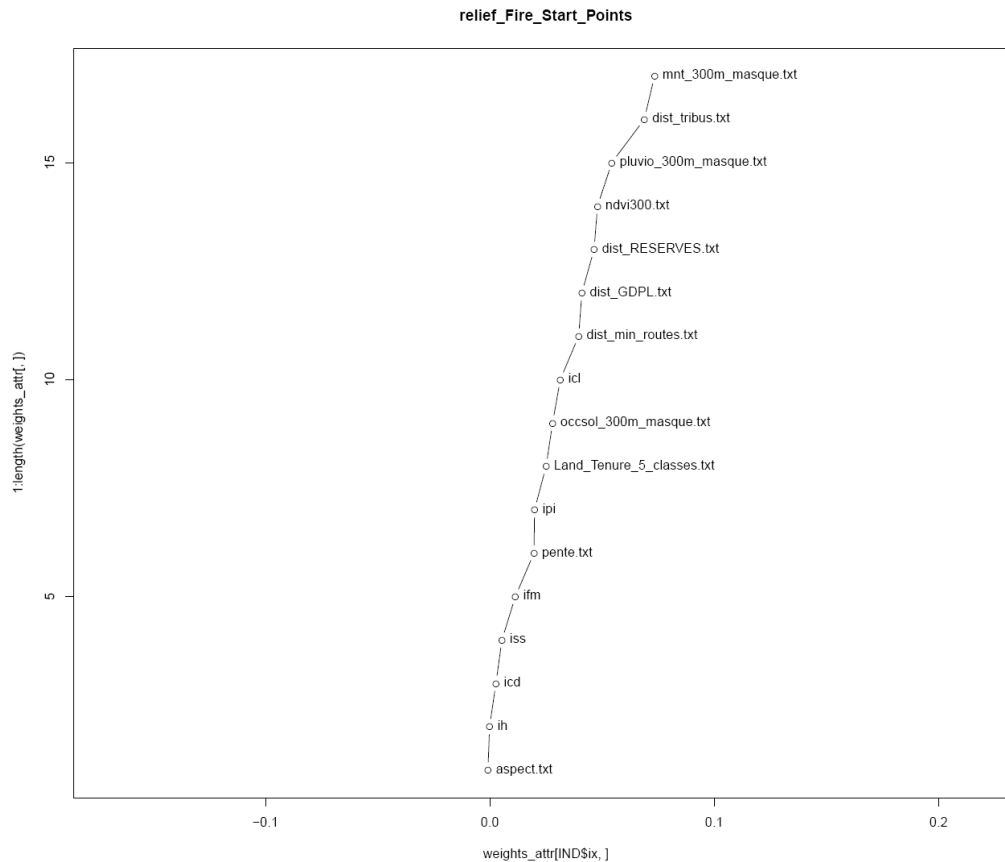


Illustration AA: Ordre d'importance des variables établi par la méthode RELIEF sur 200 itérations

Cette figure est issue de 200 itérations de la méthode RELIEF. RELIEF est une méthode dite de filtre heuristique applicable aux problèmes de classe binaire. Cette méthode sous échantillonne plusieurs jeux de données à partir de l'original, et attribue par calcul de distance euclidienne entre observations, un poids à chaque variable. Je l'ai répété 200 fois, et calculé une moyenne sur les poids de chaque variable après m'être assuré de la normalité de la distribution des poids pour chaque variable.

A l'instar des résultats du test du Khi-2 sans permutations, on observe la même logique quant à l'importance des variables.

D'autres algorithmes ont été utilisés pour explorer les groupes de variables à retenir pour construire le modèle.

Tableau 6: Résultats de différentes procédures de sélection de variables sur arbre de décision (T) et réseau bayésien naïf (NBN) avec procédure de validation k-fold

	Best First search		CFS		Greedy Search backward		Hill climbing		Step AIC backward
	T	NBN	T	NBN	T	NBN	T	NBN	Modèle glm
Distance tribus	x		x	x	x	x	x	x	x
Altitude	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Distance routes et chemins		x	x	x	x	x	x	x	x
Distance réserves	x	x			x	x	x	x	x
Cadastre territoire					x	x		x	x
Distance zones GDPL		x	x	x	x	x	x	x	
NDVI	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Occupation du sol					x	x	x	x	x
ICL	x				x	x		x	x
Pluviométrie	x	x			x	x		x	x
IH		x				x		x	
Pente		x			x	x	x	x	
IPI	x				x	x	x	x	
IFM					x	x		x	
ICD					x	x	x	x	
ISS		x			x	x	x	x	
Orientation versant	x				x				

Les algorithmes d'optimisation (Best First Search, Greedy Search, Hill-Climbing) ont été combinés à une procédure de validation k-fold en 5 sous groupes. La procédure CFS (Correlation Feature Selection) évalue des sous ensembles de variables selon le paradigme suivant : un bon sous ensemble de variables en contient des très corrélées avec la classification et non corrélées entre elles. C'est la plus restrictive, elle sélectionne 5 variables. Juste après vient la procédure step-wise backward appliquée à l'AIC du modèle glm, qui permet de sélectionner 9 variables. Avec cette méthode toutes les composantes sont représentées. Cependant la climatique est sous-représentée, avec seulement l'indice de combustibles légers.

Enfin chaque variable a été sélectionnée plus d'une fois au travers des différents algorithmes de « feature selection ». Ces statistiques ne permettent pas de déterminer les variables qui ne contiennent pas d'information. La démarche a donc consisté à inclure dans le réseau bayésien toutes les variables puis à appliquer une procédure step-wise backward sur l'analyse de sensibilité de ce modèle, sur critère kappa, et AIC.

8 RESEAU BAYESIEN, LE MODELE D'IGNITION

8.1 STRUCTURE

8.1.1 PAR EXPERTISE

Une vision simpliste du modèle est de le hiérarchiser en sous-modèles correspondant aux groupements de variables identifiés par les experts et les analyses multivariées. Les trois composantes : sociale, environnementale et climatique peuvent ainsi constituer trois sous-modèles. La figure présentée ci-dessous illustre cette vision de causalité.

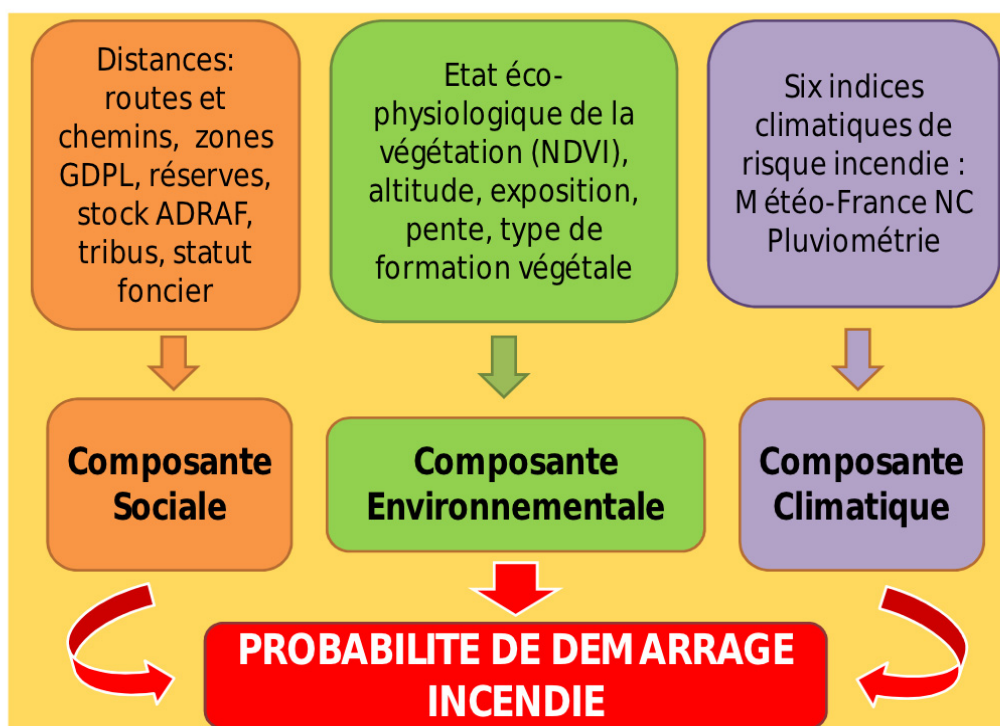


Illustration BB: Graphe causal du modèle d'aléa du départ d'incendie (BNIM) et ses sous modèles

8.1.2 APPRENTISSAGE DE LA STRUCTURE

Tout le travail de modélisation a été réalisé dans le langage de programmation R. Pour construire le réseau bayésien, le tester, et calculer les paramètres du modèle, nous avons utilisé la librairie « bnlearn » (Scutari M. 2010). Marco Scutari (2010). Learning Bayesian Networks with the bnlearn R Package. Journal of Statistical Software, 35(3), 1-22.

Pour évaluer les indépendances conditionnelles entre variables, le critère d'information mutuelle est choisi. Afin de choisir la structure de dépendance optimale nous utilisons 2 algorithmes hybrides différents: le "Max-Min-Hill-Climbing algorithm" et le "Restricted Maximization algorithm". Un algorithme d'optimisation dit hybride, combine les « constraint based algorithms » et les « score based algorithms ». Ils combinent l'utilisation des tests d'indépendance conditionnelle pour réduire l'espace de recherche, en détectant les structures de Markov, qui sont utilisées pour calculer la structure du réseau bayésien, et des scores de structures pour trouver le meilleur réseau dans l'espace, par optimisation heuristique qui ordonne les structures de réseaux suivant leur score. Pour en savoir plus sur la terminologie des réseaux bayésiens, on peut se référer à : Marcot B.G *et al.* 2006, Cooper G.F. & Herskovits E. 1992, Pollino C.A. *et al.* 2006, Aguilera P.A. *et al.* 2011, Liu W.Y *et al.* 2011, Scutari M & Strimmer K. 2011.

- "Max-Min Hill-Climbing algorithm" (mmhc)

Combine le « Max-Min Parents and Children algorithm » (pour restreindre l'espace de recherche) et le « Hill-Climbing algorithm » (pour trouver la structure de réseau optimale dans l'espace restreint). On choisi le score "bde", logarithme du "Bayesian Dirichlet equivalent score", et le test de "mutual information" qui mesure la diminution de l'entropie.

- "Restricted Maximization" (rsmax2)

C'est en fait une généralisation du "Max-Min Hill-Climbing algorithm", qui peut utiliser n'importe quelle combinaison des algorithmes "constraint-based" et "score-based". Nous utilisons l'algorithme "tabu search" qui est un algorithme "Hill-Climbing" capable de s'échapper d'optimums locaux en sélectionnant un réseau qui fait décroître à minima la fonction de score. On associe le score "bde" à cet algorithme.

Recherche de structure sans connaissance à priori

Nous présentons ici les liens qui ont pu être mis en évidence

De	Vers
Probabilité feu	Altitude
Altitude	Distance routes
Distance réserves	Distance tribus
Distance tribus	Distance GDPL
Altitude	Pente
Pente	Pluviométrie
NDVI	Occupation du sol
FWI	ISI
DC	DMC
DC	BUI
DMC	BUI

Avec contraintes de dépendance sur la structure de calcul des indices météo-france.

Contrainte

De	Vers
----	------

DC	DMC
DC	BUI
DMC	DC
FFMC	ISI
ISI	FWI
BUI	FWI

Liens établis

De	Vers
Probabilité feu	Altitude
Altitude	Distance routes
Distance tribus	Distance réserves
Distance tribus	Distance GDPL
Altitude	Pente
NDVI	Occupation du sol

D'autres liens entre variables ont été trouvés par la procédure de "structure learning"

De	Vers
ISI	Probabilité feu
FWI	Probabilité feu
Altitude	Pluviométrie
Altitude	NDVI

Ce type de procédure est utile pour établir des liens entre variables en respectant les conditions d'application des réseaux bayésiens i.e indépendances conditionnelles entre variables. Cependant, cela ne peut aboutir à une structure complète. Le mélange de l'expertise et des liens établis par « structure learning » ont conduit à une structure complexe. Mais cette structure présente des problèmes important de temps de calcul et de sur-apprentissage.

La structure retenue est construite par expertise et sur la base des analyses statistiques précédentes qui mettent en relief trois dimensions regroupant les variables des domaines environnemental, climatique, et social. Il est composé de 3 sous modèles qui correspondent aux composantes sociale, environnementale, et climatique. Chacun des sous modèles prédit une probabilité de démarrage d'un incendie. Ces 3 probabilités sont combinées dans un modèle final qui rend compte de la probabilité globale de démarrage d'un incendie (illustration O). Ces 3 paramètres que sont les probabilités des 3 sous modèles sont discrétisées sous forme de centiles avant l'apprentissage des paramètres du modèle global. Cette discrétisation fine permet d'optimiser la complémentarité des 3 composantes dans la combinaison des probabilités. Ainsi les résultats présentés en 7.3 montrent bien une complémentarité importante des 3 composantes ou sous-modèles.

8.2 PARAMETRAGE DU MODELE

L'apprentissage des paramètres, c'est à dire les lois marginales, est calculé selon la théorie bayésienne.

8.3 VALIDATION

La procédure de validation est une validation croisée à sous-échantillonnage aléatoire répété. 300 itérations d'apprentissage / validation du modèle sont calculés. 30% des données sont utilisés pour la validation. Dans chaque itération, le jeu de données est divisé. Chaque division choisit au hasard un nombre fixe d'exemples sans remplacement. Utilisation holdout validation croisée dans une boucle est similaire à une validation K-fold une fois sans boucle, sauf que des sous-ensembles non disjoints sont affectés à chaque évaluation. Ce type de processus de validation est considéré comme très robuste par la communauté des modélisateurs.

8.3.1 SOUS-MODELE CLIMATIQUE

Tableau 7: Scores du sous modèle climatique, coefficient Kappa et erreurs associées. Scores de bonnes prédictions pour les non feux, et les feux.

	Score points témoins	Score démarrages	Kappa
moyenne	0,88	0,17	0,08
écart-type	0,01	0,02	0,02

8.3.2 SOUS-MODELE ENVIRONNEMENTAL

Tableau 8: Scores du sous modèle environnemental, coefficient Kappa et erreurs associées. Scores de bonnes prédictions pour les non feux, et les feux.

	Score points témoins	Score démarrages	Kappa
moyenne	0,84	0,29	0,16
écart-type	0,01	0,03	0,03

8.3.3 SOUS-MODELE SOCIAL

Tableau 9: Scores du sous modèle social, coefficient Kappa et erreurs associées. Scores de bonnes prédictions pour les non feux, et les feux.

	Score points témoins	Score démarrages	Kappa
moyenne	0,87	0,33	0,21
écart-type	0,01	0,03	0,02

8.3.4 MODELE INTEGRE

Tableau 10: Scores du modèle intégré global, coefficient Kappa et erreurs associées. Scores de bonnes prédictions pour les non feux, et les feux.

	Score points témoins	Score démarrages	Kappa
moyenne	0,98	0,79	0,81
écart-type	0,00	0,02	0,02

On observe des scores de bon classement en validation très élevés pour les non feux pour l'ensemble des modèles, mais assez faible pour les points d'ignition en dehors du modèle intégré. Le sous modèle correspondant à la

composante sociale est le plus performant des trois (cf. coefficient Kappa). On observe une complémentarité très importante entre les sous modèle. En effet en les combinant dans un modèle intégré on obtient un Kappa de 0,8. La procédure de validation donne 87% de bonnes prédictions toutes classes confondues.

Ces résultats expriment l'intérêt et la légitimité d'une approche intégrée pluridisciplinaire en ce qui concerne l'étude du risque incendie.

8.4 ANALYSE DE SENSIBILITE

On mesure la baisse de précision relative en enlevant un paramètre au modèle. A chaque itération une procédure de validation est effectuée. On mesure la diminution de l'entropie relativement au coefficient Kappa.

Tableau 11: Résultats de l'analyse de sensibilité: score de bonne prédiction des points témoins, des points de départ de feux, coefficient Kappa et réduction d'entropie calculée sur le coefficient Kappa

	Score non feux	Score feux	Kappa	Sensibilité : réduction entropie (% Kappa)
Modèle Total	0,983	0,787	0,806	100
FFMC	0,963	0,729	0,728	9,7
Pluviométrie	0,970	0,720	0,731	9,3
DMC	0,969	0,723	0,732	9,1
Distance tribus	0,972	0,728	0,741	8,9
Distance GDPL	0,974	0,740	0,755	6,0
Distance routes	0,978	0,735	0,756	6,0
Orientation versant	0,971	0,753	0,760	5,7
NDVI	0,971	0,753	0,761	5,6
Altitude	0,975	0,747	0,761	5,0
Distance réserves	0,976	0,746	0,762	5,0
Occupation du sol	0,973	0,755	0,765	5,0
Stock ADRAF	0,973	0,757	0,766	4,9
Régime Foncier	0,977	0,750	0,767	4,9
Pente	0,975	0,755	0,768	4,0
DC	0,977	0,756	0,771	4,0
ISI	0,978	0,759	0,776	2,9
BUI	0,978	0,767	0,783	2,0
FWI	0,978	0,776	0,790	2,0

L'AIC du modèle retenu est de -21750,69. Si on supprime les dernières variables de l'analyse de sensibilité on ne fait qu'augmenter cet AIC. En enlevant la dernière on obtient un AIC de -21165,05. Le modèle comprenant toutes les variables est donc retenu.

8.5 ANALYSE ROC AUC

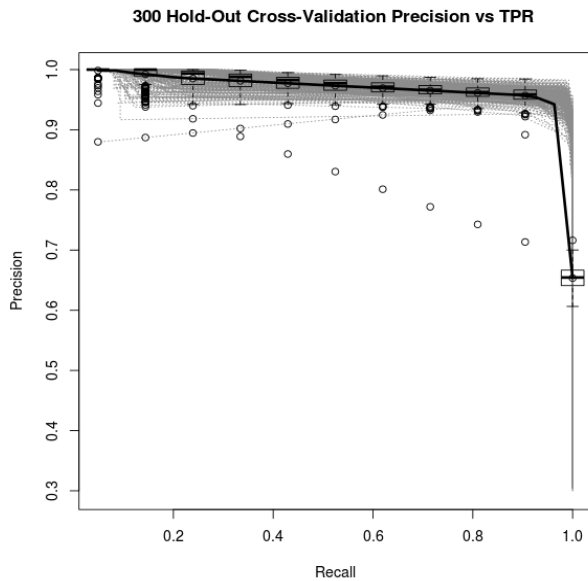
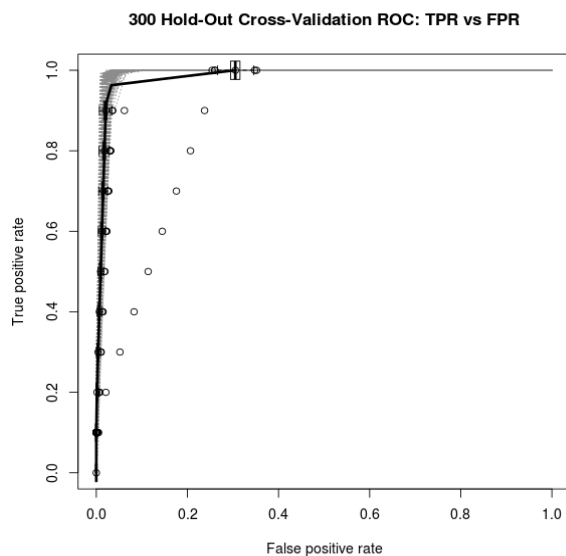


Illustration CC: Précision du modèle et bonnes prédictions de démarrage incendie



On observe une performance décroissante à partir du seuil de probabilité 0,5.

Illustration DD: True positive vs. false positive rates

9 DISCUSSION

A l'instar de la bibliographie (Dlamini W.M. 2011, Dlamini W.M. 2010, Archibald S. *et al.* 2008), la phase d'analyses statistiques multivariées a mis en relief trois dimensions principales concourant au démarrage d'un incendie : l'utilisation des terres par l'Homme, l'état de l'environnement et l'accessibilité (altitude, pente), et enfin les variables climatiques. Les tests de sélection de variables à priori, en amont de la construction finale du modèle, n'ont pas

permis d'écarter clairement une ou plusieurs variables. Ainsi le modèle a été construit initialement avec l'ensemble des variables. La structure du modèle a permis de mettre en relief une forte complémentarité entre les trois sous-modèles. En effet, pris séparément ces sous-modèles présentent une capacité de prédiction moyenne de 57 pourcent. Une fois combinés, ils prédisent, en procédure de validation, avec exactitude 88 pourcent des départs d'incendies et des points témoins échantillonnés. Cette complémentarité s'observe de manière très forte entre les sous-modèles social et climatique. D'autre part l'analyse de l'importance des variables dans le modèle intégré, montre que la précision (coefficient Kappa), dans la prédiction de l'aléa de démarrage incendie, est déterminée à 75 pourcent par les variables climatiques et sociales. Les 6 variables les plus importantes dans le modèle appartiennent aux domaines climatique et social et expriment 49 pourcent de la précision du modèle (coefficient Kappa). Les dix variables les plus pertinentes expriment 70,3% de la précision du modèle. Ce sont : l'indice FFMC, la pluviométrie moyenne, l'indice DMC, la distance aux tribus, la distance aux zones GDPL, la distance aux routes, l'orientation du versant, le NDVI, l'altitude et la distance aux réserves. Au regard des distributions des effectifs des points feux dans chaque classe de ces variables, on s'aperçoit que les démarrages d'incendies s'opèrent majoritairement :

- dans des conditions spatio-temporelles, marquées de sécheresse : la teneur en eau de la litière et des couches superficielles du sol (humus) est faible, ainsi que la pluviométrie
- à proximité des tribus, des zones GDPL, sur lesquelles des projets communs sont mis en place au sein de la tribu qui peuvent être sources de conflits, des routes et chemins principaux, et des zones de réserves et agrandissements, qui représentent les terres réattribuées et ré-attribuables à la population Kanak.
- à des altitudes basses à moyennes, donc accessibles (jusqu'à 300 mètres), et sur des versants orientés de 0 à 215 degrés, donc sous les vents des alizés, sur les versants les plus propices à des propagations importantes.

De plus nous avons vu que les départs d'incendies se situent majoritairement aux interfaces entre statuts foncier, privé, coutumier, et domanial. D'après les recherches en sciences sociales, et anthropologie (Marie Toussain, Antoine Wikel, Jean-Brice Herrenshmidt), nous savons que les incendies sont marqueurs de conflits fonciers, ou de personnes. Les résultats du modèle intégré le confirment. De plus, les départs d'incendies semblent répondre à une certaine logique. Ils surviennent dans les conditions les plus favorables à un démarrage et une propagation importante. Des situations similaires, impliquant une forte prédominance des variables climatiques et humaines, sur des statuts fonciers différents, peuvent être rencontrées en Australie (Turner D., Lewis M., Ostendorf B. 2011, et cf. Thèse Marie Toussain)

10 BIBLIOGRAPHIE

- Aguilera P.A., Fernandez A., Fernandez R., Rumi R., Salmeron A. 2011. Bayesian networks in environmental modelling. *Environmental Modelling & Software*. 26(12) : 1376-1388
- Archibald S., Roy D.P., van Wilgen B.W., Scholes R.J. 2008. What limits fire ? An examination of drivers of burnt area in Southern Africa. *Global Change Biology*. 15:3, 613-630
- Congalton, R. G., & Green, K. 2009. Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices (2nd ed.). Boca Raton: Lewis Publishers
- Conte A., 2010. Compréhension des risques d'incendies relatifs à la biodiversité en Nouvelle-Calédonie et modélisation: Développement méthodologique pour l'intégration d'indicateurs anthropiques
- Cooper G.F. & Herskovits E. 1992. A Bayesian method for the induction of probabilistic network from data. *Machine learning*. 9:309-347
- Daniel, B. K., Zapata-Rivera, J.-D., & McCalla, G. I. 2007. A Bayesian belief network approach for modeling complex domains. In A. A. Mittal, A. Kassim, & T. Tan (Eds.), *Bayesian network technologies: Applications and graphical models* (pp. 13–51). Hershey: IGI Publishing
- Dlamini W.M. 2011. Application of Bayesian networks for fire risk mapping using GIS and remote sensing data. *GeoJournal*. 76, 283-296
- Dlamini W.M. 2010. A Bayesian belief network analysis of factors influencing wildfire occurrence in Swaziland. *Environmental Modelling & Software*. 25, 199-208
- FAO, 2007. Fire management-global assessment 2006. FAO Forestry paper. 151
- GTOS 2009. Fire disturbance: Assessment report on available methodological standards and guides. ECV 13, GTOS 68
- Jensen, F. V. 2001. Bayesian networks and decision graphs. New York: Springer

- Kiers H.A.L., 1994. Simple structure in component analysis techniques for mixtures of qualitative and quantitative variables. *Psychometrika*. 56, 197-212
- Lefèvre J., Marchesiello P., Jourdain N.C., Menkes C., Leroy A., 2010. Weather regimes and orographic circulation around New Caledonia. *Marine Pollution Bulletin*. 61, 413-431
- Liu Wei-Yi, Yue K., Li Wei-Hua. 2011. Constructing the Bayesian network structure from dependencies implied in multiple relational schemas. *Expert Systems with Applications*. 38 : 7123-7134
- Liu Y., Stanturf J., Goodrick S. 2010. Wildfire potential evaluation during a drought event with a regional climate model and NDVI. *Ecological Informatics*. 5:418-428
- Manel, S., Williams, H. C., & Ormerod, S. J. 2001. Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence. *Journal of Applied Ecology*, 38(5), 921-931
- Marcot B.G., Steventon D.J., Sutherland G.D., McCann R.K. 2006. Guidelines for developing and updating Bayesian belief networks applied to ecological modeling and conservation. *Can. J. For. Res.* 36 : 3063-3074
- Martinuzzi S., Gould W.A., Gonzalez O.M.R., Martinez Robles A., Maldonado P.C., Perez-Buitrago N., Caban J.J.F. 2008. Mapping tropical dry forest habitats integrating Landsat NDVI, Ikonos imagery, and topographic information in the Caribbean Island of Mona. *Rev. Biol. Trop. Journal of Tropical Biology*. 56(2) : 625-639
- McCann, R. K., Marcot, B. G., & Ellis, R. (2006). Bayesian belief networks: applications in ecology and natural resource management. *Canadian Journal of Forestry Research*, 36(12), 3053-3062.
- Newnham G.J., Verbesselt J., Grant I.F., Anderson S.A.J. 2011. Relative Greenness Index for assessing curing of grassland fuel. *Remote Sensing of Environment*. 115 : 1456-1463
- Peltier A., Aubail X. 2011. Le Caillou vert menacé par les feux. *Météo, Le magazine*. 13, 39
- Pollino C.A., Woodberry O., Nicholson A., Korb K, Hart B.T. 2006. Parametrisation and evaluation of a Bayesian network for use in an ecological assessment. *Environmental Modelling & Software*. 22(8) : 1140-1152
- Povead G., Salazar L.F. 2004. Annual and interannual (ENSO) variability of spatial scaling properties of a vegetation index (NDVI) in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*. 93 : 391-401
- Scutari M. 2010. Learning Bayesian Networks with the bnlearn R Package. *Journal of Statistical Software*. 35(3), 1-22
- Scutari M & Strimmer K. 2011. Introduction to Graphical Modelling. [arXiv:1005.1036v3](https://arxiv.org/abs/1005.1036v3)
- Tsamardinos I., Brown L. E., Aliferis C. F. 2006. The Max-Min Hill climbing Bayesian Network structure Learning algorithm. *Machine Learning*, 65(1), 31-78.
- Turner D., Lewis M., Ostendorf B. 2011. Spatial indicators of fire risk in the arid and semi-arid zone of Australia. *Ecological Indicators*. 11 : 149-167
- Uusitalo, L. 2007. Advantages and challenges of Bayesian networks in environmental modeling. *Ecological Modelling*, 203(3-4), 312-318
- Van Wagner C.E. & Pickett T.L. 1985. Equations and FORTRAN Program for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Forestry Technical Report 33. Canadian Forestry Service, Government of Canada
- <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/printall.php>