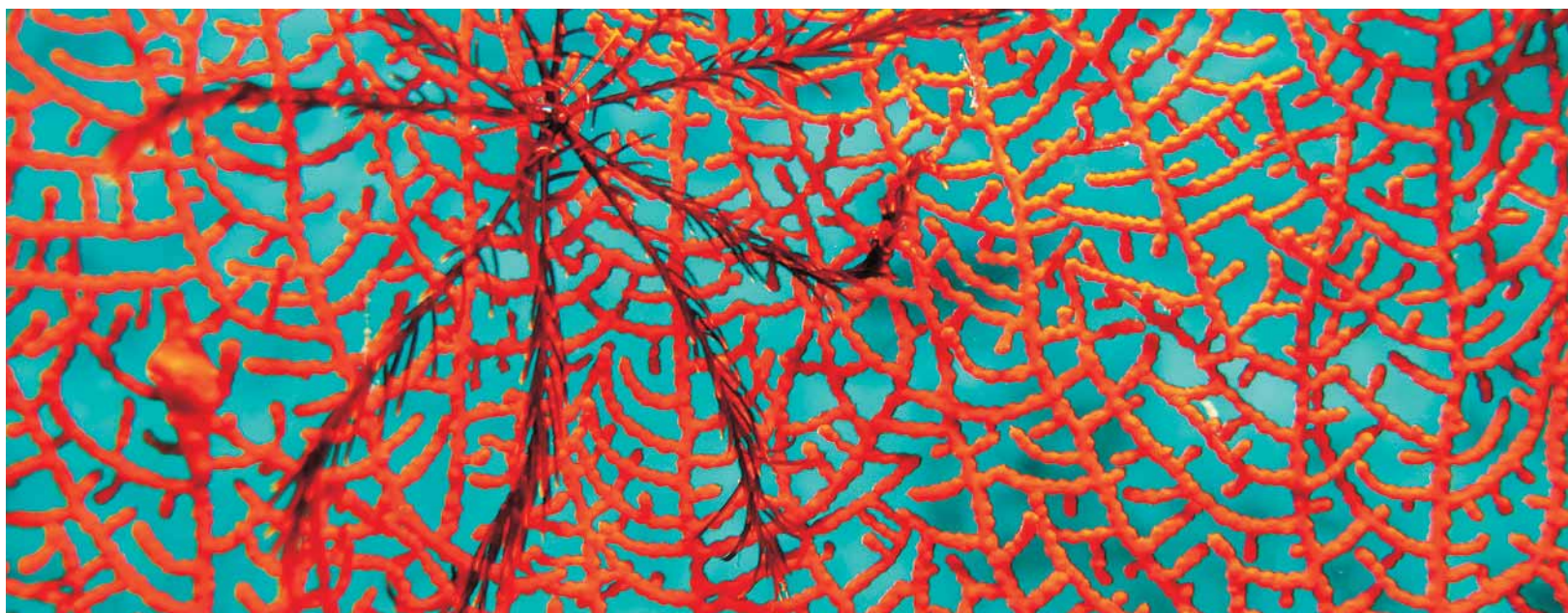


# Les défis d'une modélisation de l'écosystème corallien

Morgan Mangeas, Antoine Wickel, Jean-Brice Herrenschmidt, Catherine Sabinot, Pierre-Yves Le Meur, Laurent Vigliola et Gilbert David



Gorgone et comatule, côte Est, 2012. © IRD/J. L. Menou

L'écosystème corallien est complexe et sa santé dépend d'un équilibre entre les communautés biologiques qui y vivent et leur milieu. Lorsqu'ils sont en bonne santé, les récifs coralliens remplissent de nombreuses fonctions, traduites en termes de « services écosystémiques ». Ceux-ci contribuent au bien-être des communautés locales et participent au développement économique du littoral. Les récifs coralliens servent de support à des activités de loisirs et de tourisme, produisent de la biomasse qui participe au développement économique et à la sécurité alimentaire des populations via la pêche. Ils fournissent également d'autres services, comme la protection contre la houle et la séquestration du carbone. Les aspects culturels et patrimoniaux liés à cet écosystème à forte valeur symbolique et identitaire sont également essentiels aux niveaux

local, national et international. La modélisation (encadré 33) de cet écosystème et des pressions auxquelles il est soumis, des interactions avec les acteurs humains et des liens avec les services écosystémiques représente un véritable défi. Les enjeux sont importants : modéliser l'écosystème corallien permet de mieux comprendre les règles internes et externes qui régissent ce système complexe et d'analyser finement les relations entre les briques élémentaires qui le constituent. La modélisation permet aussi d'estimer les réactions de l'écosystème corallien face à différents scénarios d'évolution des pressions environnementales et humaines. Enfin, en intégrant à la modélisation des variables de régulation, il est possible de déterminer quelle combinaison d'actions peut être efficace pour stabiliser cet écosystème et éviter une dégradation majeure.

## Qu'est-ce que la modélisation ?

La modélisation consiste à définir un ensemble d'équations ou de règles destinées à décrire un phénomène et ses dépendances de façon reproductible et simulable. Le modèle ainsi généré sert à prédire le comportement d'un système en fonction de sollicitations connues. La modélisation nécessite généralement une phase de calibration qui consiste à estimer un jeu de paramètres afin que le comportement du modèle soit proche de celui attendu par des experts ou reproduise les observations passées.

Il existe plusieurs classes de modèle. On peut néanmoins faire la distinction entre une approche « mécaniste », qui met en équations les mécanismes biologiques, écologiques ou physiques induisant la dynamique du phénomène étudié, et une approche « statistique », qui se nourrit des données disponibles pour déterminer une fonction capable d'« approximer » les interactions entre la variable à expliquer (le phénomène) et les variables explicatives (les facteurs qui influencent la dynamique).

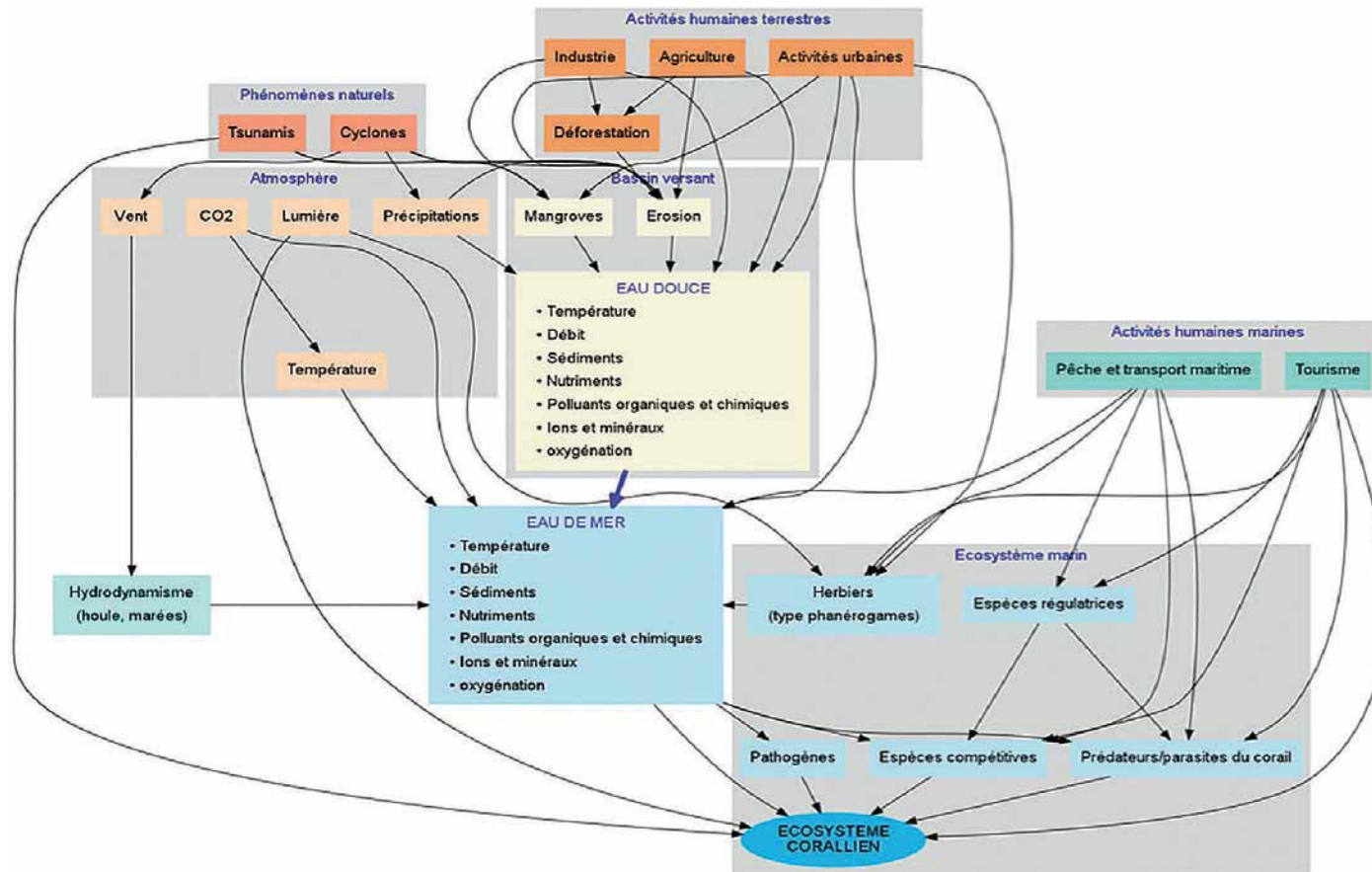


Figure 1 : Relations entre les principales causes génératrices de pressions sur l'écosystème corallien, les impacts potentiels et les différents indicateurs qui permettent d'évaluer l'état des milieux. Les flèches décrivent les relations connues entre ces différents éléments. Source : IRD/M. Mangeas

Comme souvent avec les écosystèmes complexes, le modélisateur est confronté à des problèmes d'échelles spatiale et temporelle. Certaines pressions peuvent être ponctuelles comme un accident industriel qui rejette des pollutions chimiques dans le lagon perturbant massivement l'écosystème corallien à très court terme. D'autres peuvent agir sur plusieurs dizaines d'années comme la lente progression des températures de la mer (+ 0,7 °C en moyenne depuis 1990), ce qui met à rude épreuve les capacités d'adaptation de la flore et la faune des récifs coralliens. De même, au niveau spatial cette fois-ci, la modélisation des processus agissant à l'échelle des colonies coralliennes nécessitera des informations détaillées et très localisées qui ne peuvent être disponibles à l'échelle d'un récif de plusieurs kilomètres carrés. La conception d'un modèle dépend donc de la nature du phénomène étudié et de la granularité spatiale et temporelle des données pertinentes disponibles. Enfin, un modèle adapté à une problématique représente toujours un compromis entre complexité, robustesse et capacité à simuler les observations.

## Pressions et impacts

Le modèle de représentation des connaissances des pressions (ICRI, 2016) impactant la santé d'un écosystème corallien (fig. 1) constitue la première étape du processus conduisant à la mise au point d'une modélisation. Malheureusement, il reste encore de nombreuses zones d'ombre concernant les facteurs abiotiques (conditions physico-chimiques) et biotiques (interactions entre espèces) qui permettent aux systèmes coralliens de rester en bonne santé. Cela rend difficile leur traduction en équations. Il existe aussi peu de séries de données caractérisant simultanément l'état des milieux et la santé de l'écosystème corallien, qui permettraient d'estimer statistiquement les relations entre les différents éléments.

Le schéma devient encore plus complexe lorsque la santé de l'écosystème corallien est connectée aux acteurs socio-économiques et aux services induits par les récifs coralliens (fig. 2). On remarque en particulier que, si la santé de l'écosystème corallien se dégrade, certains acteurs sont susceptibles de réagir en constatant que les services écosystémiques sont impactés (moins de touristes, moins de

poissons, activités de loisirs moins intéressantes...). Dans ce cas, ces acteurs feront pression sur les pouvoirs publics pour que des mesures de protection soient mises en place. D'où l'hypothèse d'un système dynamique, structuré par une boucle de rétroaction et d'autorégulation entre les acteurs et l'écosystème corallien.

Cette problématique complexe a été récemment abordée dans le cadre du projet de recherche Corail, financé par le programme européen Best et mené en Nouvelle-Calédonie et en Polynésie française entre 2013 et 2016. Les instituts de recherche, organismes et bureaux d'études impliqués dans ce projet ont travaillé en collaboration avec les décideurs et acteurs locaux pour appréhender et co-construire des développements méthodologiques et des outils de politiques publiques pour la gestion des écosystèmes coralliens. Les sites d'études étaient le Grand Sud et Hienghène pour la Nouvelle-Calédonie, et Opunohu et Moorea en Polynésie française.

## Réseaux bayésiens

Un réseau bayésien (KJAERULFF et MADSEN, 2007) est un modèle graphique probabiliste représentant des variables aléatoires sous la forme d'un graphe orienté acyclique. Son architecture en réseau permet de retranscrire quasi directement les modèles de représentation des connaissances tels que ceux décrits dans les fig. 1 et 2. Les relations de cause à effet entre les variables ne sont pas déterministes dans ce type de modélisation, mais probabilistes. Ainsi, l'observation d'une cause ou de plusieurs causes n'entraîne pas systématiquement l'effet ou les effets qui en dépendent, mais modifie seulement la probabilité de les observer. L'intérêt particulier des réseaux bayésiens est de tenir compte simultanément de connaissances a priori d'experts et de l'information contenue dans les données. Les réseaux bayésiens sont surtout utilisés pour l'analyse des risques et pour l'aide à la décision. Mathématiquement, les états des variables représentant les nœuds dans le réseau bayésien s'évaluent à partir de techniques de calcul de probabilités conditionnelles et du théorème de Bayes (encadré 34). Un réseau bayésien simplifié peut par exemple modéliser les interactions entre écosystème corallien, services écosystémiques induits, pressions

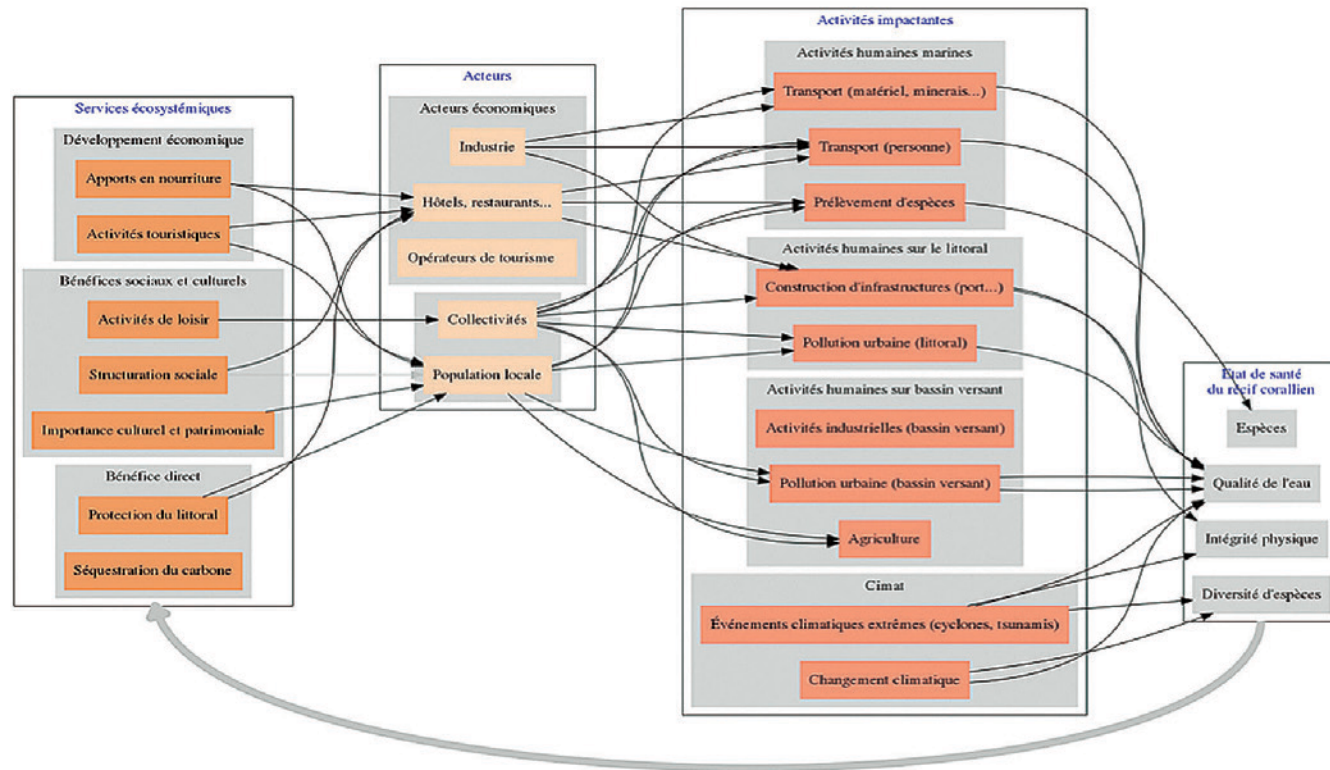


Figure 2 : Interactions entre acteurs, services écosystémiques, pressions sur l'écosystème corallien et impacts potentiels. Les flèches décrivent les relations connues entre ces différents éléments. Source : IRD/M. Mangeas

humaines et perturbations naturelles (fig. 3). Ce modèle a été testé avec succès dans d'autres régions du monde, mais le manque de données rend son application difficile en Nouvelle-Calédonie. L'un des avantages des réseaux bayésiens est toutefois de pouvoir construire un modèle sur la base de connaissances expertes. Un modèle a été ainsi calibré sur certaines zones de Nouvelle-Calédonie sur la base des connaissances des chercheurs, habitants et praticiens du lagon et acteurs de la gestion de l'environnement.

La modélisation des rétroactions nécessiterait l'utilisation d'un modèle plus complexe comme un modèle bayésien dynamique (DBN). Cette approche simplifiée nous a permis cependant de déterminer les grandes tendances et de proposer des scénarios susceptibles de servir de guide pour la gestion des écosystèmes coralliens dans la zone étudiée.

## Site étudié

Yaté est une commune de Nouvelle-Calédonie située au sud de la Grande Terre, à 80 km de Nouméa (fig. 4). Sa superficie est importante (15<sup>e</sup> commune la plus vaste de France) pour un faible nombre d'habitants (moins de 2 000). La population, résidant essentiellement sur une étroite bande littorale, pratique une activité de pêche traditionnelle sur les récifs faisant face à la commune. Or, depuis 2009, une des plus importantes usines de nickel au monde a été construite et est exploitée par l'opérateur minier brésilien Vale. Si le lagon et les récifs coralliens connexes à la commune sont toujours florissants, bien que soumis à plusieurs formes de pressions, la population a en grande partie délaissé la pêche pour des emplois dans l'activité minière. Le territoire offre un exemple type d'arènes de négociation multi-acteurs avec des enjeux très variés (risques

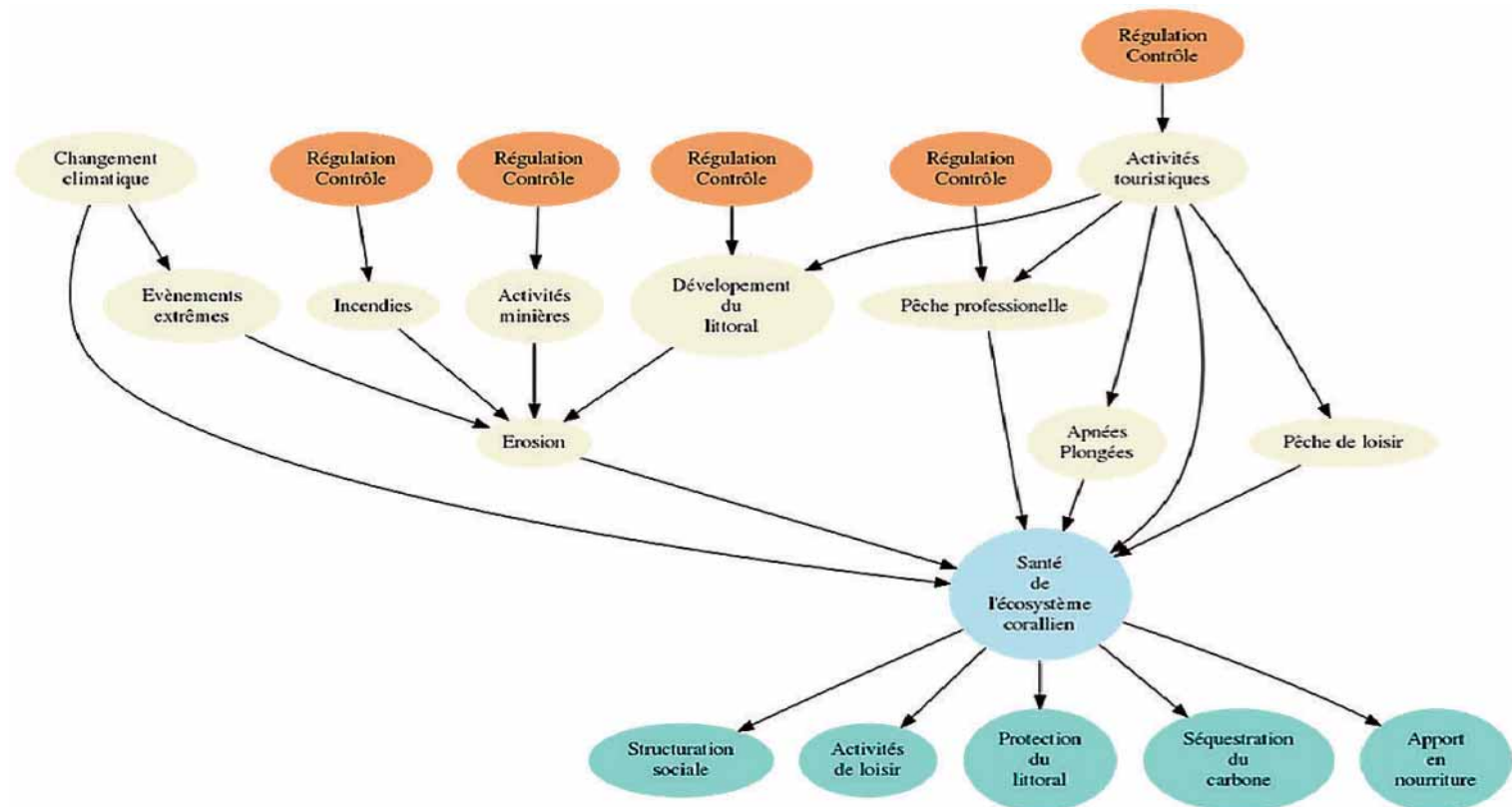
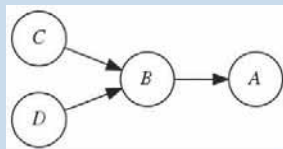


Figure 3 : Réseau bayésien simplifié. Source : IRD/ M. Mangeas.

### Encadré 34

## Le théorème de Bayes



Supposons que chacune des quatre variables A, B, C, D évolue dans un ensemble de trois états : « fort », « moyen », « faible ». Les probabilités conditionnelles s'écrivent :

$$P(A = \text{« fort »} | B = \text{« faible »})$$

Cela signifie littéralement : probabilité que A soit dans l'état « fort », sachant que B est dans un état « faible ». Dans un réseau bayésien, si l'ensemble des probabilités conditionnelles associées aux relations sont connues, soit par estimation statistique soit via

un avis d'expert, il est possible de calculer la probabilité que l'une des variables se trouve dans un certain état en fonction des états connus des autres variables. Par exemple, il est possible de calculer par effet domino  $P(A = \text{« fort »} | C = \text{« fort »} \text{ et } D = \text{« moyen »})$  même si l'état de B est inconnu.

À noter qu'il est possible d'estimer la probabilité qu'une variable se trouve dans un certain état, même si il s'agit d'une cause et que la conséquence est connue. Par exemple,  $P(B = \text{« faible »} | A = \text{« fort »})$  se calcule en utilisant le célèbre théorème de Bayes qui permet de calculer  $P(B|A)$  à partir de  $P(A|B)$ ,  $P(A)$  et  $P(B)$  :  $P(B|A) = P(A|B)P(B)/P(A)$ .

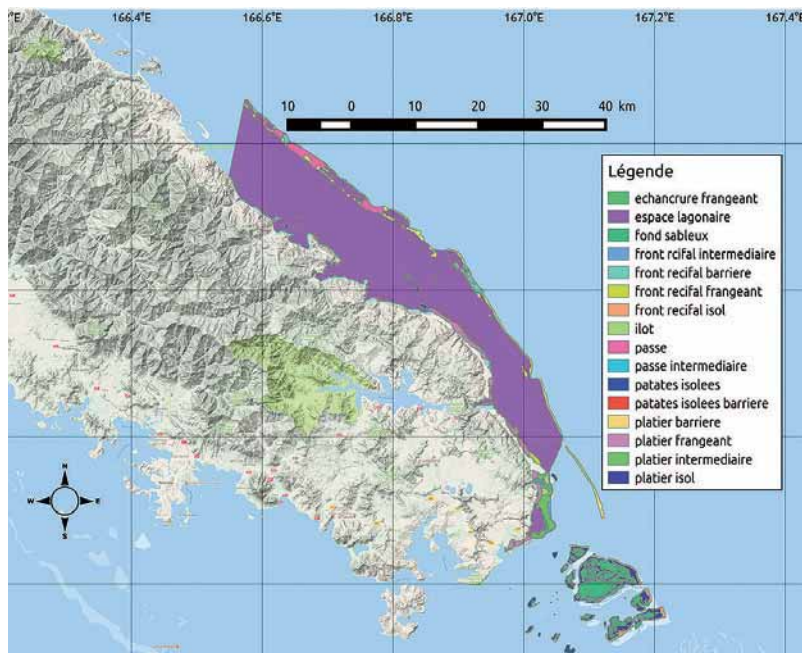


Figure 4 : Sites étudiés dans le sud de la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie.  
Source : IRD/M. Mangeas

environnementaux, industriels miniers, usages vivriers...). Les négociations autour de la gestion de l'environnement et de la compensation des impacts miniers y sont d'ailleurs très actives, parfois conflictuelles et souvent médiatisées. Les données disponibles proviennent de l'ISEE (Institut de la statistique et des études économiques Nouvelle-Calédonie) pour les données socio-économiques, du portail géographique de la Nouvelle-Calédonie pour ce qui concerne les données spatialisées et des données de l'OEIL (Observatoire de l'environnement en Nouvelle-Calédonie), pour ce qui concerne les données biologiques.

## Scénarios étudiés via la modélisation

Le réseau bayésien simplifié a été calibré pour fournir des réponses satisfaisantes concernant les besoins et l'état de santé actuel des récifs coralliens de la commune de Yaté. Les différentes pressions ont aussi été évaluées et les impacts estimés par connaissances expertes. Il s'agit à présent d'exploiter la modélisation élaborée afin de fournir les tendances sur quatre

configurations particulières. Les quatre scénarios, qui correspondent à des situations contrastées, mais possibles dans cette région, sont :

- 1 : Situation actuelle : état du récif et des services écosystémiques soumis aux pressions humaines et naturelles de ces dernières années ;
- 2 : Mise en place d'une réserve naturelle intégrale sur la zone intertidale et subtidale du lagon de la commune de Yaté correspondant au niveau de protection Ia.a de l'UICN ;
- 3 : Fermeture de l'usine de Vale : l'activité minière est interrompue entraînant le licenciement des employés qui doivent se reconverter ;
- 4 : Accroissement de la population des villages alentour (forte urbanisation) : afflux massif d'une population dans la zone.

Les récifs coralliens de la commune de Yaté sont actuellement considérés en bonne santé (scénario 1), particulièrement dans les zones peu fréquentées, éloignées des lieux d'habitation. Cet état observé indique que les activités humaines et industrielles régulières impactent peu l'écosystème jusqu'à présent. Cet état observé ne tient pas compte des pollutions ponctuelles éventuelles engendrées par un accident industriel comme un dysfonctionnement de l'émissaire marin à proximité, qui évacue l'eau du complexe métallurgique du port de Prony jusque dans le chenal de la Havannah, et qui concentre une majeure partie des craintes en matière d'impacts sur les écosystèmes du lagon de Yaté.

Les résultats de projection du modèle concernant la santé de l'écosystème corallien et les activités de loisirs sont fournis sur la fig.5. Dans le cas du scénario 2, la protection Ia.a de l'UICN impose que tout prélèvement soit interdit dans la zone et le modèle prévoit que la santé de l'écosystème s'améliorera. En cas de fermeture de l'usine (scénario 3) le modèle prévoit une dégradation de l'écosystème en raison d'un retour des habitants à un mode de vie plus orienté sur l'exploitation des ressources marines. Enfin, dans une perspective d'urbanisation accélérée de la zone (scénario 4), la forte fréquentation plaisancière du lagon, l'aménagement du littoral et les rejets polluants liés à une forte concentration d'habitants pourraient engendrer des impacts importants sur les récifs de la zone. Sur la base des données disponibles le modèle semble donc indiquer qu'un accroissement important de la fréquentation aurait un impact plus important que

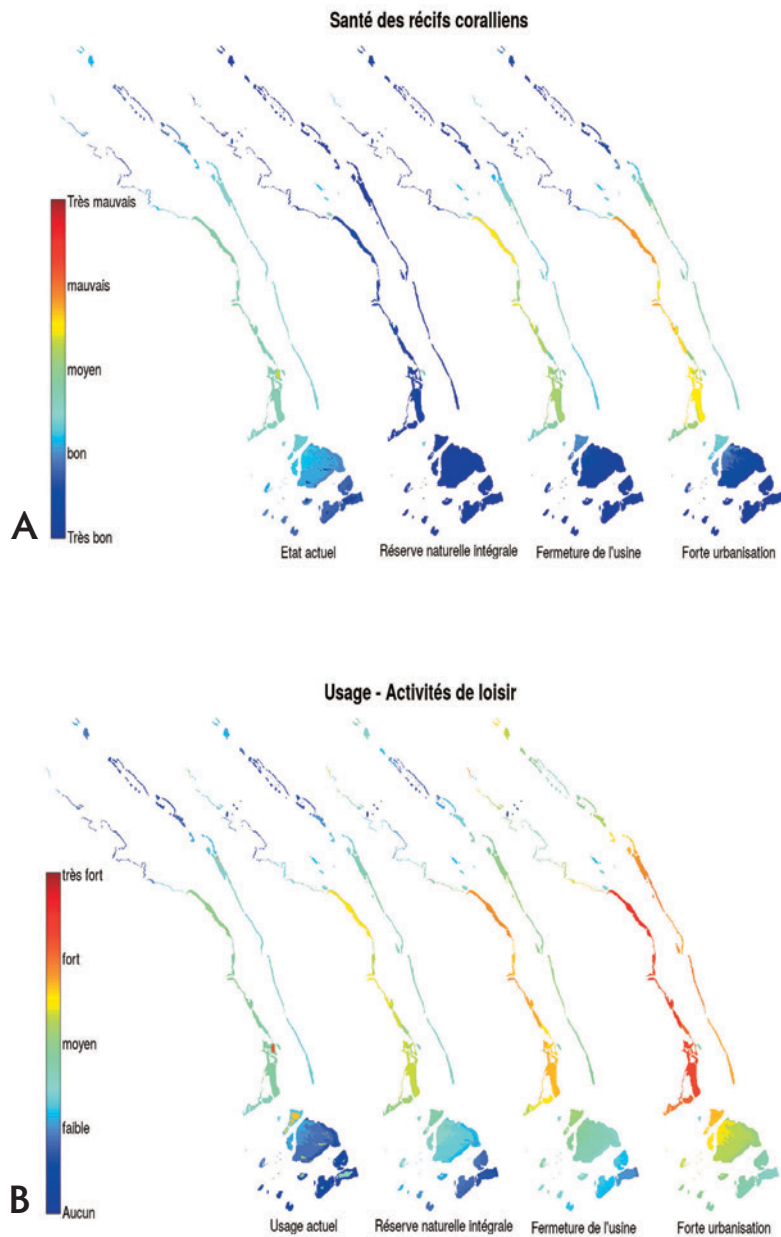


Figure 5 : Commune de Yaté, estimation spatialisée et évolution dans le cadre des trois scénarios étudiés.

A : Estimation spatialisée de la santé de l'écosystème corallien. B : Estimation spatialisée des activités de loisirs dans le lagon. Source : IRD/M. Mangeas



Usine Vale, Prony. © P.-A. Pantz

celui des activités minières « courantes » (hors pollutions engendrées par un accident industriel). Néanmoins, ce modèle a été ajusté sur des données très parcellaires, notamment concernant les impacts environnementaux indirects et à long terme de la mine et de l'usine sur l'ensemble des composantes de l'écosystème corallien.

L'un des grands avantages de la modélisation réside dans la possibilité d'analyser toutes les situations qui résultent d'influences prises en compte dans le modèle. Ainsi, il est tout à fait possible de tester des scénarios combinant « mise en réserve » et « fermeture de l'usine » ou « fermeture de l'usine » et « forte urbanisation ». L'approche par réseau bayésien permet aussi d'identifier la cause la plus probable si une amélioration ou une dégradation de l'écosystème corallien est constatée en fonction de la zone concernée et de l'intensité du phénomène.

La modélisation de l'écosystème corallien et des pressions auxquelles il est soumis reste d'une grande complexité. Les changements sociétaux notamment restent difficiles à appréhender, beaucoup plus que les impacts directs quantifiables, mais tout autant que les impacts indirects avec des multitudes d'interactions entre espèces et variables environnementales. En l'absence de séries

d'observations suffisamment longues et précises, la modélisation est fortement dépendante de connaissances expertes et nécessite une approche multidisciplinaire pour déterminer les intrications biologiques, sociétales et environnementales qui influencent l'état des récifs coralliens et déterminent leur capacité à produire des services écosystémiques. Dans le cas de la commune de Yaté, du fait des incertitudes autour des résultats, la modélisation représente plus un outil de concertation et d'analyse que de prédiction. La modélisation n'est d'ailleurs pas un but en soi ; pour qu'elle soit utile il faut en faire un outil convivial et performant de gestion afin que les acteurs et décideurs puissent l'exploiter dans des processus concertés de prise de décision.

## Références bibliographiques

- ICRI, 2016 *Case studies: from ridge to reef, Implemented coral reef conservation and management through a community-based approach emphasizing land-sea connectivity*, ICRI, Ministry of the environment, décembre 2015, 16 p.
- KJAERULFF U.B., MADSEN A.L., 2007 *Bayesian Networks and Influence Diagrams: A Guide to Construction and Analysis*, New York, Springer-Verlag, 303 p.



Mangeas Morgan, Wickel A., Herrenschmidt J.B., Sabinot Catherine, Le Meur Pierre-Yves, Vigliola Laurent, David Gilbert.

Les défis d'une modélisation de l'écosystème corallien.

In : Payri Claude (ed.), Moatti Jean-Paul (pref.). Nouvelle-Calédonie : archipel de corail. Marseille (FRA), Nouméa : IRD, Solaris, 2018, p. 259-266.

ISBN 978-2-7099-2632-4