

RÉSUMÉ DE THÈSE /  
ACADEMIC THESIS ABSTRACT / RESUMEN DE TESIS ACADÉMICA**Planification systématique de la conservation basée sur les contraintes, une approche générique et expressive : application à l'aide à la décision pour la conservation des forêts de Nouvelle-Calédonie**

Dimitri JUSTEAU-ALLAIRE

## RÉSUMÉ

Issue de la biologie de la conservation, la planification systématique de la conservation (PSC) est une approche pratique qui se propose de fournir une aide à la décision dans la planification des actions de conservation en intégrant les objectifs écologiques avec les contraintes des gestionnaires. Basée sur la modélisation, l'optimisation et l'informatique, la PSC offre un cadre rationnel pour aborder les problématiques environnementales et réduire le fossé entre recherche et gestion.

Dans cette thèse, nous avons introduit une approche formelle pour modéliser et résoudre des problèmes de PSC basée sur la programmation par contraintes, une méthode issue de l'intelligence artificielle et fondée sur le raisonnement automatique. Notre motivation principale était d'apporter plus d'expressivité à la PSC (i.e. d'accroître l'étendue et la variété des problèmes qui peuvent être représentés et résolus), notamment par l'intégration de contraintes spatiales avancées et d'indices du paysage. Cette approche permet également d'obtenir des garanties sur la qualité des solutions produites (satisfaisabilité, optimalité) qui peuvent améliorer considérablement la qualité de l'aide à la décision.

Nous avons appliqué cette approche sur des données réelles issues des forêts de Nouvelle-Calédonie, un point chaud de la biodiversité qui doit faire face à de nombreux défis pour la conservation de sa biodiversité. Le contexte développé, insulaire et peu peuplé de cet archipel permet une grande proximité entre les différents acteurs de la conservation, ce qui en fait un terrain d'étude approprié pour expérimenter de nouveaux outils pour la conservation. Nous avons illustré cette particularité à travers un cas d'étude mené en étroite collaboration avec les gestionnaires du parc provincial de la « Côte Oubliée – *Woen Vùù – Pwa Preeù* ». Dans cette étude, nous avons fourni une aide à la décision dans un projet de reforestation, en mettant l'accent sur la réduction de la fragmentation et l'amélioration de la connectivité structurelle. Dans l'ensemble, nous avons démontré le caractère générique, la flexibilité et l'expressivité de l'approche basée sur les contraintes appliquée à la PSC. Nos résultats ont également ouvert de nouvelles perspectives pour l'aide à la décision en Nouvelle-Calédonie, la PSC, et la programmation par contraintes.

**Mots-clés :** planification systématique de la conservation, aide à la décision, conservation des forêts, planification de la restauration écologique, intelligence artificielle, programmation par contraintes, Nouvelle-Calédonie.

**Constraint-based systematic conservation planning: a generic and expressive approach applied to decision support for the conservation of New Caledonian forests**

## ABSTRACT

Originating in conservation biology, systematic conservation biology (SCP) is a practical approach that aims to provide decision support for planning conservation actions by integrating ecological objectives with socio-economic management constraints. Based on modelling, optimization and computer technology, SCP provides an evidence-based framework to address environmental issues and narrow the gap between research and implementation.

In this PhD thesis, we introduced a formal approach to modelling and resolving SCP problems based on constraint programming, a method derived from artificial intelligence and based on automated reasoning. The main reason for adopting this approach was to increase the expressiveness of SCP (i.e. extend the breadth and variety of problems that users can represent and resolve), in particular by integrating advanced spatial constraints and landscape indices. This approach also provides guarantees as to the satisfiability and optimality of the solutions produced. Such guarantees can substantially improve the quality of decision support.

We assessed the methods developed during this thesis against real data from New Caledonian forests. As one of the world's biodiversity hotspots, New Caledonia has to struggle with many conservation challenges. Moreover, the New Caledonian island context, being at once developed and thinly populated, brings conservation stakeholders into close proximity, which makes it an appropriate field of study to experiment with novel approaches. We illustrated this particularity through a real case study, conducted in close collaboration with the managers of the « Côte Oubliée – *Woen Vùù – Pwa Preeù* » provincial park. In this study, we aimed to provide decision support for a reforestation project, with an emphasis on reducing fragmentation and improving structural connectivity. Overall, we demonstrated the generic, flexible and expressive nature of the constraint-based SCP approach. Our results also opened up new perspectives for decision support in New Caledonia, for systematic conservation planning and for constraint programming.

**Keywords:** systematic conservation planning, decision support, forest conservation, restoration planning, artificial intelligence, constraint programming, New Caledonia.

**Planificación sistemática de la conservación basada en restricciones, un enfoque genérico y expresivo: aplicación en la ayuda a la toma de decisiones para la conservación de los bosques en Nueva Caledonia**

## RESUMEN

La planificación sistemática de la conservación (PCS), que tiene su origen en la biología de la conservación, es un enfoque práctico cuyo objetivo es facilitar la toma de decisiones en la planificación de las acciones de conservación mediante la integración de los objetivos ecológicos con las limitaciones de gestión. Basada en la modelización, la optimización y la informática, la PSC ofrece un marco racional para abordar los problemas medioambientales y salvar la distancia entre la investigación y la gestión.

En esta tesis hemos introducido un enfoque formal para modelar y resolver problemas de PSC según la programación por restricciones, un método de inteligencia artificial basado en el razonamiento automático. Nuestra principal motivación era aportar más expresividad a la PSC (es decir, aumentar el alcance y la variedad de los problemas que pueden representarse y resolverse), especialmente mediante la integración de restricciones espaciales avanzadas e índices del paisaje. Este enfoque también permite obtener garantías sobre la calidad de las soluciones proporcionadas (índices de satisfacción y de optimización), lo que puede mejorar considerablemente la calidad del apoyo en la decisión.

Aplicamos este enfoque a datos reales de los bosques de Nueva Caledonia, un punto crítico de la biodiversidad que se enfrenta a muchos retos para conservar su biodiversidad. El contexto desarrollado, insular y poco poblado de este archipiélago, permite una estrecha proximidad entre los distintos actores de la conservación, lo que lo convierte en un terreno de estudio apropiado para experimentar nuevas herramientas de conservación. Hemos ilustrado esta particularidad a través de un estudio de caso realizado en estrecha colaboración con los gestores del parque provincial Côte Oubliée – *Woen Vùù – Pwa Preeù*. En este estudio proporcionamos ayuda en la toma de decisiones para un proyecto de reforestación, centrándonos en la reducción de la fragmentación y la mejora de la conectividad estructural. En general, hemos demostrado la generalidad, la flexibilidad y la expresividad del enfoque basado en restricciones aplicado a la PSC. Nuestros resultados también han abierto nuevas perspectivas para el apoyo en la toma de decisiones en Nueva Caledonia, la PSC y la programación por restricciones.

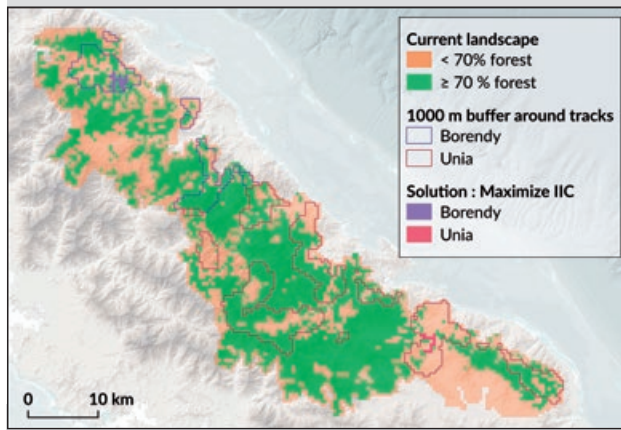
**Palabras clave:** planificación sistemática de la conservación, apoyo en la decisión, conservación forestal, planificación de la restauración ecológica, inteligencia artificial, programación por restricciones, Nueva Caledonia.



Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2021.a36793>  
Droit d'auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques © Cirad  
Date de publication : 1<sup>er</sup> septembre 2021



Licence Creative Commons :  
Attribution - Pas de Modification 4.0 International.  
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)



**Figure 1.**

Cartographie d'une solution optimale produite par notre approche dans le cadre du projet de reforestation du parc provincial de la Côte Oubliée – *Woen Vûû – Pwa Pereeû*. L'objectif était de délimiter des zones propices à la reforestation qui : (i) sont situées dans des zones dégradées, (ii) sont accessibles depuis le réseau de pistes actuel, (iii) sont connectées et compactes pour réduire les coûts de gestion, (iv) sont équitablement réparties entre les deux districts coutumiers du parc (Borendy et Unia) afin d'impliquer les deux communautés dans le projet et (v) respectent les contraintes budgétaires de la Province Sud (environ 200 ha à investir dans la reforestation). Ces zones ont été automatiquement délimitées de manière à satisfaire les contraintes précédentes tout en maximisant la connectivité structurelle du couvert forestier potentiel résultant de la reforestation. La connectivité structurelle a été mesurée avec l'indice intégral de connectivité (IIC, Pascaul-Hortal et Saura, 2006).

**Figure 1.**

Figure 1. Map of an optimal solution produced by our approach for the “Côte Oubliée – *Woen Vûû – Pwa Pereeû*” provincial park reforestation project. The aim was to delineate two areas suitable for reforestation that: (i) are located in degraded areas, (ii) are accessible from the current forest road network, (iii) are connected and compact to reduce management costs, (iv) are equitably allocated between the two customary districts of the park (Borendy and Unia) to involve both communities in the project, and (v) keep within the budgetary constraints of the South Province (investment budget earmarked for ~200 ha of reforestation). These areas were automatically delineated to satisfy the previous constraints while maximising the structural connectivity of the potential forest landscape resulting from reforestation. Structural connectivity was measured with the Integral Index of Connectivity (IIC, Pascual-Hortal and Saura, 2006).

**Figura 1.**

Cartografía de una solución óptima producida por nuestro enfoque en el marco del proyecto de reforestación del Parque Provincial Côte Oubliée – *Woen Vûû – Pwa Pereeû*. El objetivo era identificar las zonas aptas para la reforestación que: (i) están situadas en zonas degradadas, (ii) son accesibles desde la red de pistas existente, (iii) están conectadas y son compactas para reducir los costes de gestión, (iv) están distribuidas equitativamente entre los dos distritos tradicionales del parque (Borendy y Unia) para implicar a ambas comunidades en el proyecto, y (v) respetan las limitaciones presupuestarias de la Provincia Sur (unas 200 ha que se invertirán en reforestación). Estas zonas se delimitaron automáticamente para satisfacer las restricciones mencionadas y maximizar la conectividad estructural de la cubierta forestal potencial resultante de la reforestación. La conectividad estructural se midió con el índice de conectividad integral (IIC, Pascaul-Hortal y Saura, 2006).

**Photo 1.**

Le parc provincial de la Côte Oubliée – *Woen Vûû – Pwa Pereeû*. Créée en avril 2019 par la Province Sud de Nouvelle-Calédonie, cette aire protégée couvre 93 000 ha de zone terrestre et 27 000 ha de zone marine. La création du parc provincial a permis à la Province Sud de Nouvelle-Calédonie d'atteindre l'objectif d'Aichi 11 (au moins 17 % des zones terrestres protégées et 10 % des zones marines et côtières protégées). Les méthodes développées dans le cadre de cette thèse ont permis d'identifier des zones d'intérêt pour la reforestation, respectant les contraintes des gestionnaires tout en maximisant les bénéfices potentiels pour la connectivité et la réduction de la fragmentation forestière dans le parc provincial.

Photo N. Rinck.

**Photo 1.**

The “Côte Oubliée” (*Woen Vûû – Pwa Pereeû*) provincial park. Created in April 2019 by New Caledonia's South Province, this protected area covers a land area of 93,000 ha and a marine area of 27,000 ha. Thanks to the park's creation, New Caledonia's South Province has achieved the Aichi 11 objective (at least 17% of protected land area and 10% of protected marine and coastal areas). The methods developed during this thesis allowed the identification of areas of interest for reforestation that comply with management constraints while maximizing the potential benefits for connectivity and reducing forest fragmentation in the provincial park.

Photo N. Rinck.

**Foto 1.**

Parque Provincial Côte Oubliée – *Woen Vûû – Pwa Pereeû*. Creada en abril de 2019 por la Provincia Sur de Nueva Caledonia, esta zona protegida abarca 93 000 ha de zona terrestre y 27 000 ha de zona marina. La creación del Parque Provincial ha permitido a la Provincia Sur de Nueva Caledonia alcanzar el objetivo de Aichi 11 (al menos el 17 % de las zonas terrestres y el 10 % de las zonas marinas y costeras están protegidas). Los métodos desarrollados durante esta tesis permitieron identificar las áreas de interés para la reforestación, respetando las restricciones de los gestores y maximizando al mismo tiempo los beneficios potenciales para la conectividad y la reducción de la fragmentación forestal en el parque provincial.

Foto N. Rinck.

**Grade et diplôme :** Doctorat

**Université :** Université de Montpellier, France

**Date de soutenance :** 15 décembre 2020

**Composition du jury :**

**Direction :** Philippe BIRNBAUM (directeur, CIRAD, UMR AMAP)

Xavier LORCA (co-directeur, IMT Mines Albi)

**Membres :** Ana RODRIGUES (présidente, CNRS, CEFE)

François MUNOZ (rapporteur, Université Grenoble-Alpes)

Christine SOLNON (rapporteur, INSA Lyon)

Jean-Jérôme CASSAN (examinateur, Direction du Développement Économique et de l'Environnement, Province Nord de Nouvelle-Calédonie)

**Financements :** Cirad (50%) et Institut agronomique néo-calédonien (IAC) (50%).

En compléments, appuis ponctuels de l'école doctorale GAIA, de l'Institut Mines-Télécom IMT Mines Atlantique, et de l'UMR AMAP pour les missions et les conférences.

**Langue de rédaction :** Anglais (avec résumé en français)

Accès au manuscrit : <https://hal.archives-ouvertes.fr/>

Contact : [dimitri.justeau@gmail.com](mailto:dimitri.justeau@gmail.com)

<https://dimitri-justeau.github.io/>

**Liste des articles publiés**

Justeau-Allaire D., Birnbaum P., Lorca X., 2018. Unifying Reserve Design Strategies with Graph Theory and Constraint Programming. In: J. Hooker (Ed.), Principles and Practice of Constraint Programming. Springer International Publishing, 507-523. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-98334-9\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-319-98334-9_33)

Justeau-Allaire D., Vismara P., Birnbaum P., Lorca X., 2019. Systematic Conservation Planning for Sustainable Land-use Policies: A Constrained Partitioning Approach to Reserve Selection and Design. Proceedings of the Twenty-Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence, 5902-5908. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2019/818>

Justeau-Allaire D., Vieilledent G., Rinck N., Vismara P., Lorca X., Birnbaum P., 2021. Constrained optimization of landscape indices in conservation planning to support ecological restoration in New Caledonia. Journal of Applied Ecology, 58 (4): 744-754. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13803>