

GUIDE SUR LA RESTAURATION PAR LA NUCLÉATION APPLIQUÉE POUR LES FORÊTS TROPICALES

AUTEURS

Sarah Jane Wilson

École des études environnementales,
University of Victoria, Canada

Nikola S. Alexandre

Conservation International ; Responsable de
la restauration, Center for Natural Climate
Solutions

Karen D. Holl

Département des études environnementales,
University of California, Santa Cruz

J. Leighton Reid

École des sciences botaniques et
environnementales, Virginia Tech

Rakan Zahawi

Lyon Arboretum et École des Sciences de la
vie, University of Hawaii, Mānoa

Danielle Celentano

Conservation International, Brésil ; Alliance
pour la restauration de l'Amazonie, Brésil ;
Programme universitaire d'agroécologie, UEMA,
Brésil

Starry Sprenkle-Hyppolite

Conservation International ; Directeur, Sciences
de la restauration, Centre des solutions
naturelles pour le climat

Leland Werden

Lyon Arboretum, University of Hawaii à Mānoa

Les données présentées dans le présent rapport sont de la responsabilité de ses
auteurs et ne reflètent pas nécessairement les points de vue des entrepreneurs.

Développé par :

Sarah Jane Wilson
École des études environnementales,
University of Victoria, Canada ;
sjwil@umich.edu

Supporté par :

Conservation International, Agence des États-
Unis pour le développement international
Starry Sprenkle-Hyppolite, Directeur,
Sciences de la restauration ;
ssprenkle-hyppolite@conservation.org

Mars 2021

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ ANALYTIQUE	04
INTRODUCTION	07
Boîte de dialogue 1 : Directives pour la planification et la mise en place de la plantation d'arbres pour la restauration forestière	
SECTION 1 : NUCLÉATION APPLIQUÉE : DE QUOI S'AGIT-IL, ET POURQUOI L'UTILISER ?	13
SECTION 2 : ENJEUX ET OPPORTUNITÉS SOCIOCULTURELS POUR LA NUCLÉATION APPLIQUÉE.	18
Boîte de dialogue 2 : Utilisation de la nucléation appliquée à plus grande échelle	
SECTION 3 : OÙ ET QUAND DOIT ÊTRE UTILISÉE LA NUCLÉATION APPLIQUÉE (PAR RAPPORT AUX AUTRES TECHNIQUES) ?	23
SECTION 4 : TAILLE, FORME, ESPACEMENT ET CONFIGURATION DE L'ÎLOT FORESTIER	28
SECTION 5 : SÉLECTION DES ESPÈCES ET DES MATÉRIELS VÉGÉTAUX	33
SECTION 6 : MAINTENANCE POUR LA NUCLÉATION APPLIQUÉE.	37
SECTION 7 : SURVEILLANCE	40
SECTION 8 : APPRENDRE DE LA PRATIQUE - CRÉATION D'EXPÉRIMENTATIONS DE TERRAIN	43
SECTION 9 : RESSOURCES	47
SECTION 10 : EXEMPLES DE CAS	49
Exemple de cas n° 1 : Îlots forestiers dans une forêt tropicale des contreforts montagneux dans le Costa Rica méridional.	
Exemple de cas n° 2 : Nucléation pour évaluer l'effet de la densité de plantation et de la taille foliaire sur les performances de plantation et de régénération de l'ajonc (<i>Ulex europaeus</i>)	
Exemple de cas n° 3 : Nucléation appliquée pour la restauration des populations d'espèces d'arbres localement menacées	
Exemple de cas n° 4 : Nucléation appliquée pour restaurer la ripisylve à l'école agricole de la Maranhão University, Brésil	
Exemple de cas n° 5 : Adaptation de la nucléation appliquée à la menace d'incendie dans la zone orientale de Madagascar	
Exemple de cas n° 6 : Comparaison de trois designs de peuplements arboricoles pour la restauration de la forêt atlantique au Brésil	
RÉFÉRENCES	72

RÉSUMÉ ANALYTIQUE

Afin de répondre aux engagements globaux et au potentiel de la restauration, des solutions innovantes et peu coûteuses sont urgemment nécessaires. La nucléation appliquée (NA) est une technique qui intègre le peuplement d'arbres et la succession naturelle pour restaurer et faire croître à nouveau les forêts. Les arbres sont plantés en îlots, au lieu d'être plantés sur tout le site, réduisant ainsi le coût et le travail demandé. La nucléation appliquée favorise la restauration naturelle de la forêt et repose sur les espèces animales dispersées les arbres natifs, ce qui peut créer des forêts à la biodiversité native élevée. Cette technique possède un grand potentiel pour la restauration des forêts à large échelle dans les zones tropicales et subtropicales

Malgré ses promesses, la NA n'a pas été implémentée massivement. Les politiciens, les donateurs et les praticiens n'ont souvent pas connaissance de cette pratique ; peu d'exemples à large échelle ont été documentés, et jusqu'à présent, peu de consignes existent pour la mettre en œuvre. Il existe aussi des enjeux sociaux pour son adoption : les jeunes habitats en phase de restauration, en particulier ceux sous NA, sont souvent vus comme non utilisés ou comme des « terrains vagues ». L'éducation, autant des communautés locales que des niveaux gouvernementaux/politiques supérieurs

concernant le processus de NA, est essentielle pour aboutir au succès. Ce guide est destiné à la NA, et délivre des directives pratiques sur les lieux d'utilisation, la conception et la planification, la mise en œuvre ainsi que le maintien/la surveillance des sites restaurés.

Lorsqu'elle est utilisée dans les contextes appropriés, la nucléation appliquée :

- 1. est peu coûteuse.** Elle est moins onéreuse que la plantation d'arbres, et plus rapide que la régénération naturelle seule.



2. **Elle produit des résultats comparables à ceux d'un peuplement plus intensif.** Lorsque les conditions écologiques permettent le renouvellement forestier naturel, il a été démontré que la NA est aussi efficace que la plantation d'arbres sur plusieurs années.
3. **Peut être mise en œuvre à grande échelle.** Du fait qu'un effort moindre est requis, la NA peut permettre une extension plus grande à travers le paysage en ce qui concerne les efforts de plantation d'arbres.
4. **Combine les meilleurs éléments de la plantation d'arbres et de la régénération naturelle (RN).** La plantation d'arbres peut offrir des opportunités à l'engagement social et à l'intégration locale d'arbres utiles, tandis que la RN étend les efforts en matière de plantation d'arbres au sein du paysage.
5. **S'applique à une vaste palette de contextes tropicaux.** La nucléation appliquée a été utilisée dans les zones tempérées et tropicales, ainsi que dans une grande variété d'altitudes. Il existe de grandes zones tropicales dans lesquelles la succession naturelle peut être améliorée, et qui conviennent donc pour la NA.
3. **L'évaluation des besoins et des expériences locales pour la régénération des forêts.** La nucléation appliquée peut s'avérer moins appropriée que les plantations traditionnelles dans les zones où les personnes nécessitent des revenus directs de la terre.
4. **La décision de l'endroit et de la manière dont les arbres doivent être placés dans le paysage,** y compris la taille et l'espacement des îlots, dans un contexte donné. En outre, des îlots plus vastes sont synonymes de résultats plus rapides, mais à des coûts plus élevés.
5. **La sélection d'espèces** qui vont bien pousser, accroître le couvert de canopée rapidement et attirer les disséminateurs de graines sur le site.
6. **Planification pour la maintenance et la surveillance.** Cela inclut généralement le soin des petits plants, ainsi que la gestion de la végétation, des incendies, etc. dans les zones qui régénèrent naturellement entre les îlots forestiers.

La conception et la mise en œuvre de la NA requièrent une série d'étapes, y compris :

1. **la décision du moment et de l'endroit avec lesquels la NA peut être utilisée** (à la place de la RN ou des plantations). L'identification des zones qui conviennent à la NA, lorsque 1) la restauration est possible mais 2) elle peut être accélérée par une première étape clé.
2. **La compréhension du** contexte politique, et de la manière dont la NA peut être utilisée de manière peu coûteuse pour restaurer les forêts dans les lieux où il est juridiquement demandé aux propriétaires terriens/entreprises de restaurer les forêts.



INTRODUCTION

CADRE ET OBJECTIF

La nucléation appliquée (NA) est une stratégie de restauration dans laquelle les îlots arborés (aussi dénommés nucléi ou clusters) sont plantés pour accélérer la restauration de l'habitat forestier. La nucléation appliquée peut être une composante de la « régénération naturellement assistée » (RNA), dans laquelle les praticiens peuvent accélérer les processus naturels de restauration forestière à travers la protection, la gestion et/ou le maintien des forêts en régénération (1, 2). D'autres méthodes de création de nucléi existent, telles que les semis de semences directement dans les clusters, mais ce guide se focalise exclusivement sur l'utilisation d'arbres plantés en « îlots ». Ce guide couvre la raison, la manière, le moment et le lieu d'usage de la NA pour restaurer les forêts tropicales, y compris la planification et la conception des éléments, les considérations logistiques, et les directives spécifiques à la NA pour la maintenance et la surveillance du site. Il offre aussi des directives pour apprendre de la pratique et inclut des exemples de cas.

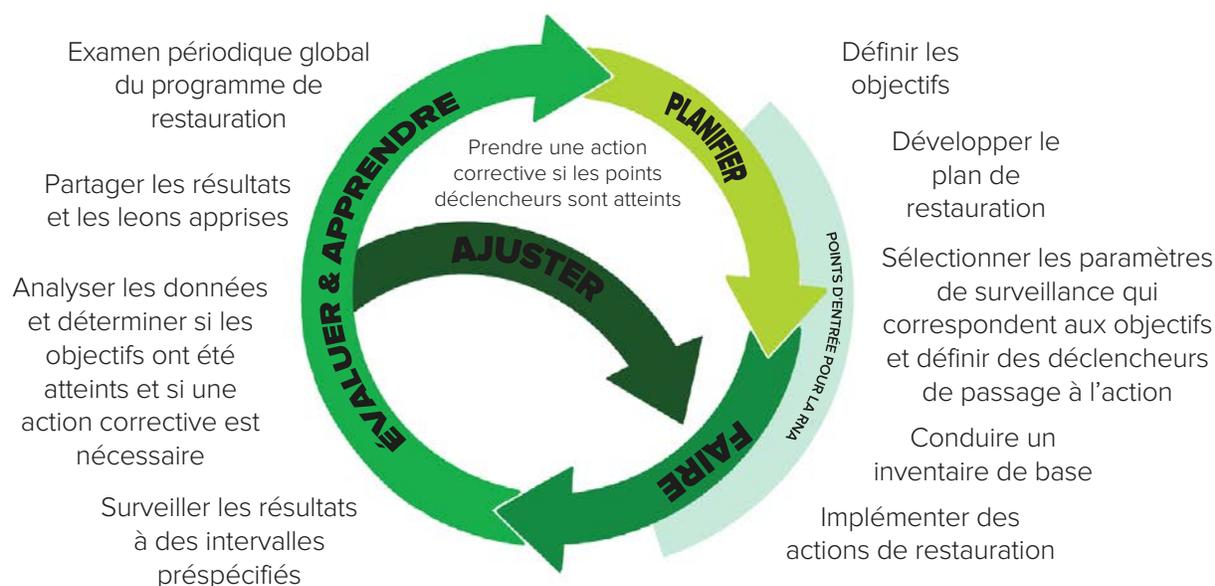


Figure 1. Processus de restauration basé sur un cycle de gestion adaptatif (modifié à partir de (4)). La nucléation appliquée peut être considérée comme une méthode possible dans les étapes de planification et de mise en œuvre, en fonction des objectifs du projet, des ressources financières et des conditions écologiques du site. Ce guide offre des informations détaillées pour l'intégration de la NA au sein d'un processus de restauration plus vaste.



© JESSICA SCRANTON

La nucléation appliquée est une technique qui doit se situer au sein d'un cadre de restauration plus large (figure 1) qui inclut les procédés pour la sélection du site, l'engagement des acteurs, la définition des objectifs, la mise en œuvre et la surveillance. Ces composants essentiels de restauration (3) sont bien couverts dans la section 9 : Ressources.

LA NÉCESSITÉ POUR CE GUIDE

L'Assemblée générale des Nations Unies a fait une déclaration concernant la Décennie 2021-2030 de l'ONU sur la restauration des écosystèmes, dans l'objectif de « développer massivement les efforts de restauration des écosystèmes dégradés et détruits comme mesure éprouvée pour combattre la crise du climat et favoriser la sécurité alimentaire, l'approvisionnement en eau et la biodiversité » (5).

La majorité des forêts originelles mondiales ont été détruites ou dégradées (6, 7). Étant donné le rôle essentiel joué par la conservation et la restauration des forêts dans l'adaptation et la médiation au changement climatique, la plupart des engagements en matière de plantation d'arbres et de restauration forestière ont été lancés au cours des dernières années - l'accord de Paris, au moins trois efforts « mille milliards d'arbres »¹ (8), et le Challenge de Bonn : tous proposent de reboiser et restaurer les paysages sur de vastes échelles. Parallèlement à cela, un support et un plébiscite pour les efforts de reboisement deviennent plus forts de la part des secteurs publics, privés et économiques.

Une attention et un support en matière de restauration et de plantation d'arbres génèrent

¹ [tt.org](https://trilliontrees.org/) effort mille milliards d'arbres ; Trillion Trees (<https://trilliontrees.org/>) (effort conjoint entre WWF, WCS, et Birdlife International) et Plant for the Planet (<https://www.trilliontreecampaign.org/>).

une demande équivalente en techniques efficaces de mise en œuvre. Actuellement, les ressources allouées pour la restauration sont insuffisantes pour répondre aux objectifs globaux, et autant des fonds supplémentaires que des techniques peu onéreuses de restauration forestière sont nécessaires (9). La nucléation appliquée permet aux ressources et aux efforts de plantation d'arbres d'aller plus loin : elle utilise la plantation d'arbres, mais avec une intensité et un coût bien plus faibles que les méthodes traditionnelles. Au lieu de planter des arbres sur la totalité des sites, les arbres sont plantés dans des îlots stratégiques qui aident les forêts à recouvrir le reste du site.

TIRER LE MEILLEUR PARTI DU MOUVEMENT GLOBAL DE REBOISEMENT

Malgré une attention et des ressources sans précédent concernant la plantation d'arbres, assez peu de réflexion a été donnée concernant le moment, l'endroit et la manière dont les arbres sont plantés, ainsi que la manière d'évaluer le « succès » (10, 11). La plupart des efforts de peuplements se focalisent uniquement sur le style plantation, souvent sans évaluer si les forêts

se régénèreraient naturellement sans le reboisement, ou la quantité de plantations requises pour aider la restauration forestière naturelle (12). La plantation forestière est essentielle dans certaines zones où le sol est fortement dégradé, ou dans certaines conditions sociales (fig. 2). Mais lorsque les forêts peuvent repousser, la plantation s'avère aussi onéreuse par rapport à la régénération naturelle des forêts, et peut résulter en des forêts plus homogènes, mais peut aussi résulter en des espèces diverses mais mal adaptées au site, en fonction de la diversité et des exigences de succession stade/site pour les espèces plantées (13). La plantation forestière comporte aussi une empreinte écologique plus importante que celle de la régénération naturelle. En plantant des arbres, les praticiens prédéterminent les espèces dominantes qu'il y a eues sur un site pendant des années ou des décennies, parfois avec des conséquences négatives sur l'habitat de la vie sauvage ou le cycle des nutriments (14, 15). Des efforts de plantation conçue de manière inefficace représentent un usage inefficace des ressources limitées (boîte de dialogue 1). Par exemple, une étude a démontré que dans les pâturages au centre du Brésil, les arbres qui se sont régénérés



naturellement ont été endommagés par la plantation d'arbres - la plantation d'arbres n'a pas augmenté le nombre d'arbres en croissance dans l'ensemble. Dans ce cas, la semence de graines d'espèces n'ayant fait aucun germe naturel (plutôt que les plantules) auraient pu constituer une option meilleure et moins demandeuse en travail (16).

La plantation d'arbres n'est qu'une seule option de restauration, et fonctionne mieux dans certains contextes par rapport à d'autres (10, 17, 18) (boîte de dialogue 1 ; fig. 2). Les praticiens, donateurs et autres supporters de la plantation d'arbres doivent évaluer et choisir les stratégies de restauration selon les conditions écologiques du site (sol, niveau de dégradation, type de forêt etc.), la quantité de forêt à disposition à proximité,

l'historique d'usage du terrain, les besoins de l'habitat ou les exigences des espèces clés, ainsi que les objectifs et les besoins socio-économiques (17). Lorsque les forêts peuvent se régénérer naturellement, la protection des zones en régénération peut suffire (19). Une plantation de style plantation peut s'avérer nécessaire lorsque les forêts sont incapables de se régénérer naturellement, lorsque les espèces invasives dominent la régénération naturelle, et/ou lorsque les propriétaires de terres exigent des revenus directs des terres (18, 20, 21). La NA est plus appropriée dans les zones où une certaine restauration naturelle est possible, mais peut être accélérée avec la plantation stratégique d'arbres (14, 22) (fig. 2).

Régénération naturelle



Dans de nombreux endroits, les forêts peuvent se régénérer naturellement, et **la restauration forestière peut s'accomplir en protégeant tout simplement la recroissance de ces forêts.**

Plantations



Plantation forestière de style plantation - **lorsqu'une diversité d'espèces d'arbres natives sont plantées en lignes régulièrement espacées sur toute la zone de restauration** - peut s'avérer particulièrement efficace dans les zones dégradées, et/ou les zones éloignées des vestiges de forêts natives, qui sont dans l'incapacité, ou peinent à se renouveler lorsqu'elles sont sans assistance.

Nucléation appliquée



La nucléation appliquée **implique la plantation d'îlots stratégiques d'arbres pour accélérer la restauration forestière naturelle.** Cette méthode est la plus appropriée dans les espaces où une certaine restauration est possible, et peut accroître les possibilités de la plantation d'arbres dans une palette de contextes tropicaux.

Figure 2 : Nucléation appliquée en comparaison aux autres techniques communes de restauration forestière, la régénération naturelle et le peuplement de style plantation.

BOÎTE DE DIALOGUE 1 : DIRECTIVES POUR LA PLANIFICATION ET LA MISE EN PLACE DE LA PLANTATION D'ARBRES POUR LA RESTAURATION FORESTIÈRE

La plantation d'arbres doit être soigneusement planifiée et exécutée, y compris l'implication des acteurs locaux dans les processus de définition d'objectif ; l'allocation de ressources à prendre en compte et la surveillance des sites restaurés ; et répondre aux vecteurs de perte forestière (23). Les directives suivantes peuvent contribuer à rendre la plantation d'arbres plus efficace à travers une grande variété de contextes. Se référer aussi à la section « Ressources » pour davantage d'outils et de directives.

- 1. Identifier et prendre les mesures nécessaires pour arrêter les vecteurs de la déforestation.** La plantation efficace d'arbres demande à ce que les praticiens évaluent si les forêts vont encore être éclairci dans la même région, et si c'est le cas, qu'ils travaillent à comprendre les vecteurs de la perte forestière afin de mettre un terme à ce processus. Les forêts natives et intactes sont plus riches en biodiversité, stockent davantage de carbone, et logent davantage d'espèces rares ou endémiques que les forêts en régénération, et il est presque impossible de recréer la forêt qui était là auparavant (24-26) (fig. 3). Les forêts intactes sont aussi importantes pour les efforts de régénération, et agissent comme sources de graines et de faune pour les forêts en régénération à proximité (20, 27, 28). Cela augmente la probabilité d'avoir une restauration plus rapide, et des forêts plus riches en espèces, tandis que les forêts restantes sont protégées. Un exemple pour parvenir à cela (suggéré par Business and Biodiversity Offsets Programme) est de s'engager à ce que, pour chaque zone restaurée, une zone équivalente de forêt intacte sera conservée (29).
- 2. Évaluer si la plantation d'arbres est nécessaire pour répondre aux objectifs du projet.** Les personnes responsables de la planification, de la mise en place ainsi que les donateurs doivent soigneusement considérer où, comment et si oui la plantation d'arbres est nécessaire pour parvenir aux objectifs du projet (10, 12, 30). Pour décider quelle stratégie de restauration est la plus appropriée, des objectifs de restauration doivent être clairement établis afin que la plantation ne devienne pas un objectif en elle-même (10). Trop souvent, des métriques telles que le « nombre d'arbres plantés » ou la « surface de plantation » sont utilisées pour rapporter la succès d'un projet de plantation d'arbres. Mais pour que les arbres puissent piéger le carbone, amener de la biodiversité, et d'autres avantages, il faut souvent de nombreuses décennies. Si l'objectif ultime est une forêt résiliente autonome, cet objectif devrait guider le processus de planification et les métriques utilisés pour faire état du succès. Les objectifs du projet doivent être développés en partenariat avec les acteurs concernés, y compris les personnes et les communautés locales (10, 31, 32). D'un point de vue écologique, le terrain pourrait être laissé en jachère pendant quelques années pour voir si les forêts régénèrent bien naturellement et pour déterminer s'il est même nécessaire de planter (33).
- 3. Comprendre l'usage du terrain et le contexte du paysage,** y compris l'usage actuel et passé du terrain, et des éléments actuellement présents sur le paysage (y compris les vestiges d'arbres et de faune pour la composante dispersion des graines). Cela aidera à déterminer si la plantation d'arbres est nécessaire, et si tel est le cas, à quelle intensité (34).
- 4. Rechercher des solutions au sein desquelles la plantation d'arbres favorisera les modes de vie et les systèmes locaux de production.** Il est essentiel de comprendre comment la plantation d'arbres peut s'adapter aux modes de vie et aux systèmes d'agriculture locaux. Sans le soutien des personnes locales, les efforts de plantation d'arbres sont souvent voués à l'échec à cause d'un manque de maintenance et/ou de protection (35). D'un autre côté, relier la plantation d'arbres aux pratiques d'agriculture durable et la mettre en place d'une manière qui réponde aux menaces perçues pour l'agriculture peut aider à développer un soutien et à accroître l'adoption de ces pratiques à large échelle (31, 36).
- 5. Établir un engagement et un financement à long terme pour s'assurer que les arbres plantés survivent et croissent.** Le financement durable est essentiel pour parvenir au succès de la restauration (10, 37). Cela commence avec la reconnaissance et la planification de tous les coûts d'établissement des arbres, comprenant 1) le coût d'évaluation des conditions sociales et écologiques avant le début de la plantation, 2) la maintenance du site après plantation des arbres (souvent entre deux et cinq années,

jusqu'à ce que les arbres soient établis) et 3) les stratégies de développement - telles que la protection contre le bétail et les incendies - afin d'assurer la santé et la persistance à long terme de la forêt. Souvent, ces coûts essentiels ne sont pas considérés - par exemple, de nombreux programmes de plantation d'arbres offrent un tarif fixé par arbres (tel que 1 \$) qui ne couvre clairement pas la totalité du coût pour l'établissement et le maintien des arbres. Ces initiatives découplent les coûts de planification et de maintenance des coûts de plantation, et laissent les praticiens avec la tâche ardue de sécuriser des fonds pour conserver les arbres après leur plantation. Cela comporte l'effet supplémentaire de diminuer le coût perçu relatif à la plantation d'arbres sur le marché, rendant ainsi plus difficile l'obtention de fonds pour une plantation d'arbres efficace

6. Répondre à la possibilité de « fuite », lorsque la restauration à un endroit conduit à la déforestation ailleurs. Comprendre comment la reforestation à un endroit peut affecter l'usage du terrain à un autre, par exemple si cela cause le déplacement de l'usage agricole ou autre du terrain ; il est important de s'assurer que les impacts de la restauration sont « additifs ».



Figure 3 : Résumé des coûts et des bénéfices de différentes techniques communément utilisées au cours des 15 à 20 dernières années (adapté à partir de 2). Notez que les coûts et les bénéfices sont dépendants du contexte - sur certains sites dégradés, la régénération naturelle est lente ou incapable de se produire, et peut faire preuve de bénéfices bien moindres. Dans cette figure, on assume que le site est adapté à l'une des trois techniques de restauration. La métrique de dégradation du terrain suggère quand appliquer la régénération naturelle plutôt que la nucléation appliquée plutôt que les interventions en plantation (selon un gradient de dégradation croissante).

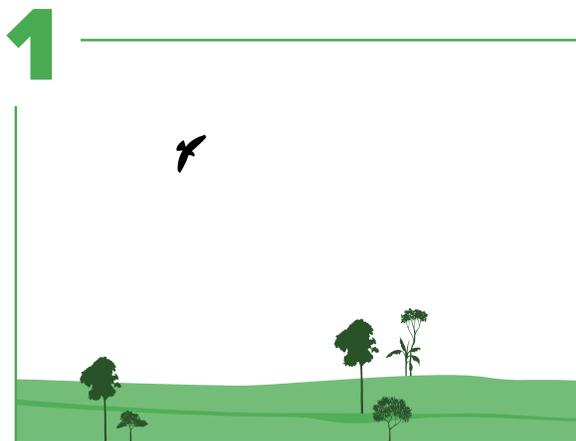


SECTION 1 :

NUCLÉATION APPLIQUÉE : DE QUOI S'AGIT-IL, ET POURQUOI L'UTILISER ?

QU'EST-CE QUE LA NUCLÉATION APPLIQUÉE, ET COMMENT FONCTIONNE-T-ELLE ?

La nucléation appliquée (NA) - aussi désignée par « îlots forestiers » ou « plantation en clusters » - implique la plantation de petits îlots d'arbres qui 1) créent un habitat pour les disséminateurs de graines, 2) fournissent de l'ombre pour supprimer la croissance des plantes héliophiles et autres conditions qui favorisent la croissance des arbres, et 3) exportent les graines des arbres plantés vers le paysage environnant (fig. 4). La nucléation appliquée imite le processus naturel de succession, et ces attributs aident la zone environnante à régénérer plus rapidement que lors de la régénération naturelle seule. Les arbres peuvent être plantés en petits îlots, en bandes ou autres configurations (voir l'étude de cas n° 6), selon l'écosystème, le paysage et les objectifs du projet (39). La nucléation appliquée ne fonctionne que si les forêts peuvent régénérer naturellement (par exemple si les conditions biotiques et abiotiques sont convenables), auquel cas le processus peut être facilité et accéléré.



Après une perturbation, les parcelles isolées de chaque espèce pionnière d'arbres commencent à reprendre. Sous leurs canopées éparées, le climat est plus frais et plus humide que dans la zone environnante, ce qui crée des conditions plus favorables pour les espèces présentes sur le long terme. Les canopées attirent les oiseaux ainsi que d'autres animaux essentiels pour la dispersion des graines, lorsqu'ils défèquent depuis les branches, venant ainsi contribuer à la réserve des semences d'arbres. Au cours du temps, ces canopées éparées agissent comme des pépinières, et d'autres arbres germineront et croîtront en dessous et autour des bordures, accroissant la taille de la parcelle arborée. Finalement, les parcelles finissent par se rejoindre, refermant la canopée et donnant lieu à une forêt continue.

Figure 4 : Le processus de succession forestière/régénération naturelle se produit en parcelle à travers l'établissement et la croissance de clusters arborés.

La nucléation appliquée se base sur le modèle de nucléation de remplacement, un schéma dans lequel la végétation recouvre sous forme de parcelle suite à une perturbation, telle qu'un incendie ou une tempête. Les premières plantes à revenir sur le site perturbé modifient l'environnement afin de le rendre plus favorable pour les derniers arrivants, ce qui fait qu'au cours du temps, la végétation en développement parcellaire s'étend et finit par se rejoindre (40) (fig. 4, fig. 5). La nucléation appliquée repose sur les forêts et les arbres autour du site comme sources de graines, et accélère ce processus en établissant ces premières parcelles arborées via la plantation d'arbres. Lorsque les parcelles forestières environnantes sont absentes, les arbres isolés dans les champs ou les clôtures dans les paysages agricoles peuvent être sources de graines (parfois même chez les espèces de remplacement tardif), il est donc important de protéger aussi ces arbres.

POURQUOI UTILISER LA NUCLÉATION APPLIQUÉE ?

Lorsque les conditions le permettent, la NA peut aider à restaurer les forêts aussi bien voire mieux que la plantation traditionnelle d'arbres, mais à un coût moins élevé par surface. L'effort requis par rapport à une plantation traditionnelle d'arbres est faible : Par exemple, dans une expérience de NA à long terme, les parcelles qui ont été plantées avec seulement 27 % des arbres utilisés dans les parcelles environnantes en style de plantation ont montré des degrés similaires de renouvellement après 10 à 15 ans (22). Le pourcentage approprié de surface de terre à planter dépend 1) des ressources disponibles et 2) de la rapidité à laquelle les forêts régénèrent naturellement.

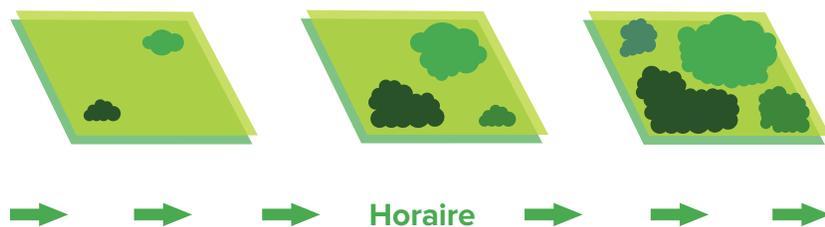


Figure 5 : Régénération naturelle via le **modèle de nucléation de remplacement** tel que vu précédemment (adapté à partir de (41)). La nucléation appliquée accélère ce processus en établissant ces premiers îlots arborés via la plantation d'arbres, en opposition au fait d'attendre qu'ils s'établissent naturellement (ce qui peut ne jamais se produire dans les sites particulièrement dégradés). Le temps réel requis pour la régénération du couvert arboré peut varier fortement selon les conditions du site, ainsi que l'espacement et la taille des îlots forestiers.

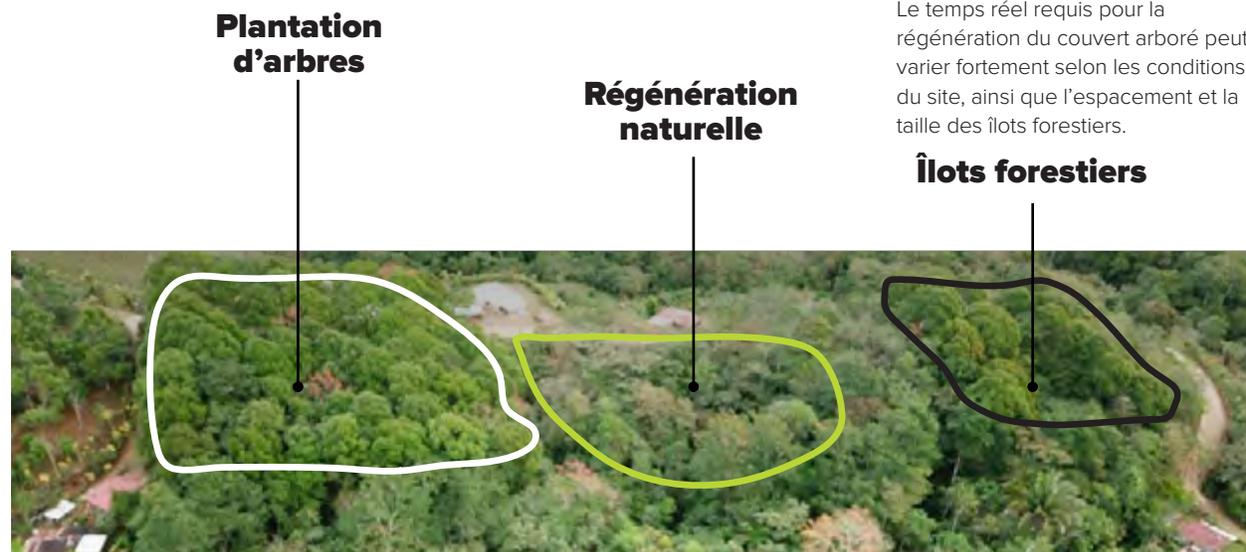


Figure 6 : Les sites d'étude de la nucléation appliquée au Costa Rica après 7 à 8 années (adapté à partir de (41)).

La nucléation appliquée a été étudiée dans plusieurs écosystèmes, y compris les forêts tempérées et tropicales, les forêts des plaines et de moyenne altitude/des contreforts montagneux, les fruticées arides et les prairies (par exemple (22, 42-44)). Cependant, seules quelques études ont comparé les résultats de la NA avec ceux de la plantation arborée de style plantation, de la régénération naturelle, et d'un site de référence de forêt primaire, ce qui limite la comparaison des résultats de la NA par rapport aux autres méthodes (22) (Fig. 3, Fig. 6). Mais ces études montrent que lorsqu'elle est utilisée dans les conditions appropriées,

la nucléation appliquée peut produire des résultats similaires en matière de fermeture de canopée, de recrutement arboré (les nouveaux arbres qui croissent sur le site), la richesse spécifique des arbres, et les processus de dispersion des graines par rapport à la plantation de style plantation (22, 45). Des expériences à petite échelle suggèrent que la NA peut s'avérer être une bonne option pour répondre aux engagements de restauration forestière à large échelle (22), mais des tests à plus grande échelle pour cette méthode sont nécessaires.



A

Anciens terrains envahis par *Megathyrus maximus* avant la plantation d'îlots forestiers



B

Futur îlot forestier débarrassé de *Megathyrus maximus* juste avant plantation



C

Maintien de l'élimination d'herbes invasives non natives environ 3 à 6 mois après plantation



D

25 mois après plantation. Rangées d'arbres *Heliocarpus americanus* visibles

Figure 7 : Les résultats de la NA sur le terrain après seulement deux années de recroissance dans une forêt de contrefort montagneux, en Colombie (exemple de cas n°3).

COÛT

La NA est moins onéreuse que les méthodes traditionnelles de plantation des arbres (46). Dans la NA, de nombreux coûts sont mis à l'échelle de la zone plantée, ce qui signifie qu'une zone NA plantée avec 20 % du nombre d'arbres coûte un cinquième du prix d'une plantation (47-49). Les coûts fixes, tels que la protection des forêts, la surveillance, la compensation des propriétaires de terrains, les

coûts liés aux terrains, la planification de projet etc., restent similaires pour la NA, la plantation d'arbres et la régénération naturelle, et doivent être estimés séparément pour calculer le coût global (Fig. 8). Tandis que les comparaisons varient, la NA est généralement peu onéreuse et peut étendre les investissements en plantation d'arbres, à condition qu'elle soit utilisée dans les conditions sociales et écologiques appropriées.

Catégorie du coût	RN	NA	Plan-tion	Remarques
Mobilisation communautaire, planification et éducation	\$	\$	\$	La NA et la RN peuvent nécessiter davantage d'explications car elles sont moins familières.
Terrain	\$	\$	\$	Il peut y avoir des coûts légèrement supérieurs pour la NA et la RN si elles ne semblent pas pouvoir offrir les avantages de la plantation d'arbres.
Surveillance	\$	\$	\$	
Matériels végétaux	–	\$	\$\$\$	Dépend de la densité des arbres plantés pour la NA.
Main-d'œuvre de plantation	–	\$	\$\$\$	Dépend de la densité des arbres plantés pour la NA.
Maintenance - désherbage autour des arbres plantés	–	\$	\$\$	Cela peut nécessiter plus de travail pour nettoyer autour des parcelles d'arbres qui ne sont pas plantés en rangées ; les plants non forestiers peuvent mettre plus de temps avant d'être protégés du soleil.
Exclusion des animaux brouteurs	\$\$	\$\$	\$	Peut être plus longue pour la RN et la NA car l'herbe de pâturage persiste plus longtemps.
Protection contre les incendies	\$\$	\$\$	\$	Peut être supérieure pour la RN et la NA car la végétation entre les îlots est plus inflammable.
Récolte/usage illégal de la terre	\$\$	\$\$	\$	Peut être supérieure pour la RN et la NA car les arbres confèrent une propriété/font preuve d'un usage ; les personnes peuvent faire paître les troupeaux sur l'herbe. Lorsque les arbres plantés sont plus gros, la situation peut s'inverser tandis que les personnes récoltent les arbres plantés.

Figure 8 : Les coûts relatifs de la nucléation appliquée (NA) par rapport à la plantation de style plantation (plantation) et à la régénération naturelle (RN). Notez que les coûts « fixes » par surface unitaire ne varient pas avec la zone restaurée, contrairement aux coûts « de mise à l'échelle ». (Adapté depuis (50)). Les coûts sont relatifs à chaque rangée, et non à chaque colonne.



SECTION 2 :

ENJEUX ET OPPORTUNITÉS SOCIOCULTURELS POUR LA NUCLÉATION APPLIQUÉE.

La nucléation appliquée n'est toujours pas utilisée à grande échelle ni reconnue comme technique de restauration, ainsi, sa mise en œuvre peut présenter des enjeux culturels, juridiques et politiques. Aligner les objectifs de la restauration sur les besoins des peuples locaux à travers l'engagement des acteurs et un concept de planification à la participation sont des éléments essentiels pour s'assurer que la restauration est acceptée, protégée, et persiste au cours du temps. Comprendre qui utilise la terre et comment ; impact des politiques nationales sur l'usage local de la terre ; définition des objectifs ; considération de la manière dont la NA peut s'adapter dans un paysage qui fonctionne : tous ces éléments sont essentiels. Une discussion complète sur la mobilisation des acteurs est au-delà du cadre de ce guide, mais il existe de nombreuses ressources disponibles (se référer à la fin de la section).

De nombreuses personnes s'attendent à ce que la restauration soit ordonnée et à voir des résultats rapides. La plantation d'arbres en lignes correspond à ces attentes si les arbres survivent et croissent correctement. D'un autre côté, les zones en régénération naturelle prennent souvent du temps pour croître en quelque chose qui ressemble à une « forêt » (51). Précocement, ces hommes sont parfois considérés non utilisés ou arides, et peuvent subir le risque d'être réclamées ou utilisées dans des buts non forestiers (22, 52). Dans la NA, les zones entre les îlots forestiers subissant une régénération naturelle sont souvent perçues comme « brouillon » - plus broussailleuses et moins ordonnées, ce qui peut ne pas s'aligner sur les préférences et normes culturelles (22, 51). Les jeunes forêts en régénération peuvent aussi ne pas être considérées comme des « forêts » par la politique ou les propriétaires de terrains locaux à moins qu'elles n'atteignent une certaine taille, ne couvrent une certaine surface, ou jusqu'à ce que les espèces clés ne reviennent (Wilson, données non publiées) (11, 53). Jusqu'à ce que ces critères ne soient satisfaits, la végétation en régénération est à risque plus élevé de se faire déboiser (54, 55). Permettre aux forêts de régénérer naturellement requiert aussi une action modérée de la part des propriétaires de terres en plus de protéger la terre, ce qui est très différent de l'investissement requis et de l'ordre trouvé dans l'agriculture ou la plantation de style plantation, et cela peut représenter un basculement majeur dans la réflexion concernant la gestion et l'usage de la terre (36, 56, 57). Par conséquent, il peut s'avérer nécessaire de fournir une portée supplémentaire aux propriétaires des terres au cours des stades précoces de la mise en œuvre, afin de les aider à visualiser le processus important qui se déroule au sein du « désordre ». Des sites de démonstration dans lesquels les personnes peuvent voir l'efficacité de la NA peuvent tout d'abord être utiles pour éduquer les propriétaires de terres locaux à propos de la technique (56) (étude de cas n° 4 de ce guide).

La nucléation appliquée peut faire usage de la composante active de la plantation d'arbres pour surpasser certains des enjeux rencontrés par la régénération naturelle. La plantation d'arbres rend la restauration plus attractive aux yeux des propriétaires de terrains parce que :

1. c'est une méthode pratique, active, qui requiert du travail de l'investissement, et qui donne aux propriétaires de terrains un certain contrôle sur les résultats obtenus.

2. Cela montre que la terre est utilisée, ce qui peut réduire les intrusions, et qui dans certains contextes, indique une propriété (de manière formelle ou informelle). Par exemple, aux Philippines, planter des arbres peut conférer des droits formels et informels sur une terre à travers le Certificat de propriété par plantation d'arbres lorsque des surfaces ont été plantées avec des arbres.
3. La méthode peut être utilisée pour établir des espèces bénéfiques.
4. La méthode est reconnue par de nombreux gouvernements et agences comme méthode principale pour restaurer les forêts.

Pour faire le meilleur usage de la plantation d'arbres dans la NA, les praticiens doivent mobiliser les propriétaires des terres locaux ainsi que d'autres acteurs pour concevoir la zone de NA, et travailler pour comprendre les politiques (passées et actuelles) sur les réclamations de terres via l'usage. Voici quelques exemples de solutions :



Figure 9 : Des membres de la communauté locale traitant des semences et sélectionnant des spécimens sains et de qualité supérieure pour la restauration d'une espèce menacée localement en Colombie (photos par Angélica Cogollo) (Exemple de cas n° 3).



Figure 10 : Les opportunités et les enjeux sociaux posés par la nucléation appliquée comme technique de restauration, et les manières possibles de les surpasser. (a) souvent la restauration est perçue comme désordonnée, ou le terrain est considéré inutilisé ou aride au cours des stades précoces de la régénération. Les solutions possibles et potentielles sont : b) de planter des arbres le long des bordures de la propriété ; c) de planter des espèces localement utiles en îlots pour la récolte ; d) d'utiliser la plantation d'arbres pour mobiliser les communautés et les acteurs.

2. Les praticiens peuvent considérer comment démontrer que ce terrain va être utilisé dans le design de plantations en altérant la configuration des plantations pour, par exemple, définir des lignes de propriété ou encore faire preuve d'intention.
3. Les espèces localement valorisées peuvent être plantées dans les îlots forestiers, et dans les espaces en régénération - la plantation d'espèces commercialisables a vu accroître le soutien communautaire et accroître le sentiment de propriété dans les espaces en régénération naturelle (57, 58).

4. La plantation d'arbres peut être utilisée pour mobiliser les communautés et fournir de l'emploi local afin d'accroître le soutien à la restauration.

Les études de cas présentées dans ce guide fournissent des exemples sur la manière dont la NA a mobilisé intentionnellement les communautés marginalisées pour effectuer le travail, y compris la formation et le développement capacitatif, et l'impact social positif que cela a eu (exemples de cas n° 2 et 4) (Fig. 9). La NA, comme les autres activités de restauration active, peut devenir

une opportunité de fournir de l'emploi qui a du sens et de développer la communauté, grâce à une planification réfléchie et inclusive (Fig. 10).

OUTILS ET RESSOURCES

Pour le processus général de compréhension de l'usage local et de la mobilisation des acteurs :

- [Un guide sur la Méthodologie d'évaluation des opportunités de restauration \(MEOR\) : Évaluation des opportunités de restauration de paysage forestier au niveau national ou sous-national](#). IUCN : International Union for Conservation of Nature & WRI : World Resources Institute, 2014. (se référer aux pages 58 à 63 pour l'outil sur la priorisation des acteurs des interventions de restauration, et autres informations pertinentes).
- [Guide sur le dialogue pour l'usage des terres : Le dialogue comme outil pour les approches paysagères aux enjeux environnementaux](#). TFD : The Forests Dialogue, 2020. (Pour plus d'informations, visitez <https://theforestdialogue.org/initiative/land-use-dialogues-luds>).
- [Manuel de formation sur l'analyse participatoire pour l'action communautaire \(PACA\) de Peace Corps](#). Peace Corp, 2007. (Orienté sur l'usage au niveau communautaire).
- [Bonnes pratiques dans la cartographie participatoire : Un compte-rendu préparé pour l'International Fund for Agricultural Development \(IFAD\)](#). IFAD, 2009.
- [Appréciation rurale rapide et appréciation rurale participatoire : Un manuel pour les partenaires et les travailleurs de terrain CRS](#). Freudemberger, K. S., CRS : Catholic Relief Services, 2008.

Pour le choix des espèces :

- [Agroforestry Tree Domestication: A primer](#). Dawson et al., ICRAF: The World Agroforestry Centre, 2012

- [In Equal Measure: A user guide to gender analysis in agroforestry](#). Catacutan et al. (Eds), ICRAF: The World Agroforestry Centre, 2014.

Pour comprendre comment rendre la RNA plus pertinente pour les utilisateurs de terre locaux :

- [Assisted Natural Regeneration: Methods, results and issues relevant to sustained participation by communities](#). Dugan, P. [In Forest Restoration for Wildlife Conservation](#). Elliott, et al. (Eds), ITTO : International Tropical Timber Organisation & FORRU: The Forest Restoration Research Unit, 2000.

BOÎTE DE DIALOGUE 2 : UTILISATION DE LA NUCLÉATION APPLIQUÉE À PLUS GRANDE ÉCHELLE

La nucléation appliquée comporte un bon potentiel pour restaurer les forêts à grande échelle, avec un coût et un effort moindres que la plantation d'arbres traditionnelle pour les mêmes laps de temps (22). Seuls quelques exemples existent jusqu'à présent pour lesquelles l'ANA a été mis en œuvre à des échelles plus grandes, y compris la Péninsule d'Osa au Costa Rica (Osa Conservation) et à Madagascar (Green Again Madagascar, étude de cas n° 5) (22), et les résultats n'ont pas encore été publiés. Des études de la NA à des échelles plus grandes (par exemple 1 000, 5 000 Ha) seraient très précieuses pour informer les efforts futurs.

En l'absence de données de terrain, le guide pratique pour adapter la NA à des échelles plus grandes inclut :

1. **déterminer quelle zone convient le mieux pour une NA au sein d'une zone plus grande (telle qu'un paysage), et à quel endroit les autres techniques peuvent être plus appropriées.** Voir la section 4 ci-dessous.
2. **La NA pourrait être stratégiquement localisée/combinée avec d'autres formes de restauration pour répondre à différents objectifs sociaux et exigences légales pour la restauration.** Utiliser cette technique dans certaines zones, et dans d'autres zones dont la restauration est plus intensive et/ou davantage orientée sur les moyens de subsistance, peut aider à développer un support pour la restauration en général. Par exemple, utiliser la NA pour restaurer des zones de ligne de partage des eaux, ainsi que les systèmes de parcelle boisée/de plantations/d'agroforesterie dans, et autour des terres agricoles travaillées.
3. **La configuration et/ou la taille des îlots forestiers peut être modifiée dans les surfaces les plus grandes,** en fonction des objectifs du projet, des échéanciers, des conditions du site, du choix des espèces, et du type de forêt. (Voir la section 6 ci-dessous).

Exemple d'un projet NA implémenté en 2019 par Laura Toro et Fundacion Natura. 42 hexagones ont été établis dans un pâturage de 7 Ha précédemment utilisé pour l'agriculture et le pâturage pendant plus de 50 ans. Les hexagones mesuraient 35 m de large avec un espacement de 15 m. Parmi les 271 arbres individuels, 11 espèces ont été plantées, espacés de 1 m. Les photos ont été prises pendant, puis rapidement après la plantation. *Credit photo : Fundacion Natura et Laura Toro.*



A



B



C



SECTION 3 :

OÙ ET QUAND DOIT ÊTRE UTILISÉE LA NUCLÉATION APPLIQUÉE (PAR RAPPORT AUX AUTRES TECHNIQUES) ?

La nucléation appliquée est plus efficace lorsque les forêts peuvent régénérer naturellement dans une certaine mesure, mais la régénération est lente (Fig. 2, Fig.11). L'usage historique du terrain, la proximité avec des forêts existantes ou des arbres seuls, ainsi que la taille des parcelles de forêt rémanente : tout cela affecte la régénération et par conséquent, le potentiel pour la NA (17, 21, 59, 60). La nucléation appliquée fonctionne en créant 1) des zones dans lesquelles les disséminateurs de graines peuvent trouver refuge et voyager d'un îlot à l'autre, et 2) des conditions favorables pour que les semences puissent s'établir (14) (Fig. 3). Les zones ne comportant pas ces nucléi (arbres rémanents ou parcelles) peuvent particulièrement bénéficier de la NA (22).

RÉGÉNÉRATION NATURELLE



NUCLÉATION APPLIQUÉE



PLANTATION



Figure 11 : Le processus et les résultats de la régénération naturelle, de la nucléation appliquée, et de la plantation de style plantation au cours du temps (adapté à partir de (14)). Dans un objectif de simplicité, un seul type d'arbre est illustré comme étant planté, et toutes les autres espèces font une colonisation naturelle. En réalité, les nucléi arborés ainsi que les plantations doivent idéalement inclure de multiples espèces.

Les sites éloignés des forêts au sein desquels la terre est plus dégradée/plus lente à régénérer naturellement peuvent nécessiter une plantation d'arbres plus intensive, tandis que dans les zones où les forêts peuvent régénérer correctement sans assistance, la régénération naturelle peut s'avérer suffisante pour la restauration forestière (Fig. 11). Cette section délivre des consignes afin d'évaluer si la nucléation appliquée peut être un bon candidat en fonction des conditions locales du site (Fig. 13).

1. La nucléation appliquée est compatible avec les besoins et les objectifs des propriétaires de terres locaux. La NA peut s'avérer une bonne option lorsque les objectifs de la restauration visent à restaurer le couvert forestier natif, ainsi que pour les lignes de partage des eaux ou la protection des sols. Lorsque les propriétaires de

terres demandent des bénéfiques/des récoltes alimentaires sur les zones reboisées, des plantations plus intenses d'arbres de valeur et/ou des installations de systèmes d'agroforesterie peuvent être de meilleures options. Ou bien, ces systèmes peuvent être combinés à la NA à l'échelle paysagère. La plantation d'enrichissement dans les zones NA ou RN peut aussi être utilisée pour intégrer des espèces de valeur.

2. Les forêts en régénération sont valorisées/culturellement acceptées. Les forêts en régénération sont souvent perçues comme non réclamées ou inutilisées, ce qui peut générer des problèmes avec les droits d'usage et les réclamations de propriété (52) (se référer à la section 2 ci-dessus). La nucléation appliquée peut s'avérer un meilleur choix dans les cas où

Conditions du site	Stratégies recommandées dans des situations données		
	RN	NA	Plantations
Renouvellement des espèces forestières lorsque le terrain est laissé en jachère pendant une à deux années	Renouvellement rapide	Un certain renouvellement mais lent/ralenti	Faible/aucun renouvellement
Présence des disséminateurs de graines	Présence confirmée/probable	Présence confirmée/probable	Non présent/très peu
Sources de semences (vestiges de forêts, arbres pastoraux) présentes dans le paysage	Arbres et/ou vestiges de forêt à proximité	Arbres et/ou vestiges de forêt à proximité	Peu à pas de vestige forestier ou arboré présent
Présence d'espèces suppressives d'arbres, par exemple des espèces compétitives héliophiles telles que l'herbe de pâturage	Peu/moins dense	Abondant à modéré	Abondant à modéré
Historique d'usage du terrain ; cycles de brûlage.	Sites modérément à légèrement utilisés, aucun cycle de brûlage/d'incendie	Sites utilisés modérément ; quelques brûlages	Sites fortement utilisés avec des brûlages répétés
Objectifs du projet et autres considérations			
Fournir des revenus aux propriétaires de terres	Génération de revenus non essentielle	Génération de revenus comme objectif secondaire/non essentielle	Génération de revenus : important
Compatibilité avec d'autres objectifs de propriétaires de terrains	Restaurer le couvert forestier natif	Restaurer le couvert forestier natif, la protection de la ligne de partage des eaux ou du sol. Potentiel des espèces de valeur à pouvoir être plantées en quantités plus faibles	Récoltes alimentaires ou de bois possibles à travers les plantations ou les systèmes agroforestiers
Zone devant être plantée, financement disponible	Fonds par surface unitaire minimum	Fonds par surface unitaire limite	Financement relativement élevé par surface à restaurer

Figure 12 : Quand utiliser la NA par rapport à d'autres techniques communes selon les conditions du site et les objectifs du projet.

elle est culturellement plus susceptible d'être acceptée, ou dans le cas contraire, lorsque les ressources et le potentiel existent pour les sites de formation ou de démonstration, l'éducation et/ou un changement de politique. Le dialogue avec les organisations locales est essentiel pour comprendre la façon dont les propriétaires de terrains perçoivent et utilisent la forêt en régénération. Les grandes zones protégées avec un financement limité et dans lesquelles les populations locales n'ont pas besoin de faire de l'argent avec le terrain peuvent être particulièrement de bons candidats (par exemple, un terrain dégradé ayant été récemment ajouté à une réserve ou un parc national ; et/ou lorsque le financement pour restaurer de vastes espaces s'avère limité (22)). Se référer à la section 2 ci-dessus pour les outils et les consignes concernant la compréhension des modes de subsistance et de l'usage des terres ainsi que les besoins, objectifs et perceptions des propriétaires de terrains.

3. La restauration forestière est en mesure de se produire, mais se voit généralement lente ou ralentie. Si le site comporte déjà de nombreux plants d'arbres natifs, cela est un bon indicateur qu'une régénération naturelle peut se produire. Mais dans le cas contraire, considérez lancer ce qui suit :

A. Tester le potentiel de régénération naturelle en permettant au terrain de régénérer entre 1,5 et 2 ans. Le degré de régénération après 1,5 ans est un bon élément prédictif de la régénération future (33). Si les espèces forestières commencent à revenir après 1 à 2 années de jachère, le site peut être un bon candidat à la RN et la NA.

i. Afin d'évaluer si un site se régénère bien, le % de couverture herbacée, le % de couvert de canopée, et la densité de plants d'arbres doivent être mesurés. Par exemple, un couvert de canopée >10 % et un couvert herbacé < 70 % après 1,5 ans a été associé avec une régénération plus importante huit ans après au Costa Rica. D'autres systèmes peuvent avoir différentes proportions, et le type d'herbe a

aussi un impact. Pour de plus amples consignes, se référer à (33) (ainsi que la section ci-dessous, sur le « traitement du site »)

B. Lorsqu'il n'est pas possible d'attendre d'eux une à deux années, considérez l'intensité de l'usage historique du terrain et du paysage environnant pour évaluer le potentiel de régénération.

i. Intensité de l'usage historique du terrain : Les espaces ayant été déboisés pendant de longues périodes ; qui ont été déboisés à répétition ; dans lesquels les sols sont dégradés/érodés ; et dans les espaces où le feu a été utilisé à répétition pour déboiser les forêts, ces derniers sont moins susceptibles de régénérer naturellement, moins susceptibles de posséder une banque de graines solide, et peuvent nécessiter des méthodes plus intenses.

- **Historique d'incendies à répétition :** *Le terrain a-t-il été incendié à répétition (c'est-à-dire sur plusieurs cycles de jachère ?) → si tel est le cas, la régénération de la forêt peut être ralentie à cause d'un manque de banques de graines et autres propagules (61-63). Des incendies fréquents peuvent aussi rendre un site plus difficile à restaurer avec la NA, parce que la mutation inclut les îlots peut être hautement inflammable (plus que les forêts) (64).*
- **Mauvaises conditions de sol :** *Les sols ont-ils été sévèrement érodés ou compactés ? → si c'est le cas, l'établissement naturel de plantules sera très limité à moins que les sols ne se renouvellent, et la plantation de styles plantations d'espèces tolérantes de tels sols, de fixateurs d'azote, et/ou d'un enrichissement du sol avec du compost avant l'implantation peut être nécessaire pour une restauration efficace.*
- **Temps long depuis le déboisement :** *Quand le site a-t-il été déboisé ? → des durées plus longues d'usage anthropique du terrain sont souvent associées à une régénération plus mauvaise (61) puisque les sols deviennent moins fertiles avec un usage continu et que la banque de graines diminue au cours du temps.*

- **Espèces invasives :** Les espèces tolérantes à l'ombre hautement invasives (en particulier les arbres invasifs) sur le site peuvent signifier que la nucléation appliquée ne fonctionnera pas, en particulier s'ils remplissent tout l'espace intersticiel entre les îlots (14). La dominance des espèces invasives (par exemple à Hawaï) peut empêcher l'expansion de la NA et limiter son efficacité.

ii. **Des vestiges d'arbres/de forêts sont présents dans le paysage agricole.** Un vestige forestier peut faire office d'une source importante de graines, ainsi que d'un habitat pour lesdits simulateurs de graines, ainsi que les vestiges d'arbres parsemés dans le paysage agricole.

iii. **Les disséminateurs de graines sont présents et sont capables d'utiliser les îlots.** Avoir d'abondants disséminateurs de graines sur un site est favorable pour la NA. Mais les disséminateurs de graines ne sont pas toujours faciles à observer, ainsi, cette étape ne doit pas être utilisée pour exclure une NA.

- *Outils et consignes pour évaluer la présence d'un disséminateur de graines. La présence de disséminateurs de graines peut être rapidement évaluée sur le terrain à travers l'observation directe des visites de la vie sauvage sur les sites, comprenant les décomptes (décomptes ponctuels ou chronométrés par zone) et les pièges photographiques. Les observations de la vie sauvage ne requièrent pas tellement d'assistance, mais requièrent des connaissances sur les espèces disséminatrices potentielles - mobiliser les naturalistes et les communautés locales peut s'avérer utile. Pour interpréter les résultats des observations de la vie sauvage :*
 - Si de plus petits oiseaux omnivores ou frugivores sont présents, il est probable que les espèces pionnières à petites graines soient dispersées. (Les endroits dans lesquels vous ne vous attendriez pas à voir cela incluent les grandes plantations de monoculture, ou les îles dans lesquelles ils sont

largement absents (comme l'île de Guam par exemple (65)).

- Si de gros oiseaux frugivores (par exemple toucans, calaos) ou mammifères (singes, lémuriens, roussettes) sont présents, ils peuvent œuvrer à disperser des espèces plus disséminées dans la zone (66, 67).
- Notez que certains animaux disséminateurs de graines peuvent passer inaperçus, tels que les rhinolophes (68).

4. **La végétation environnante est principalement composée d'espèces natives.** Parce que les forêts en régénération reposent sur les graines dispersées depuis les arbres à proximité, la qualité des arbres ou de la forêt environnants a aussi son importance. Bien que le couvert forestier puisse augmenter avec une gamme de différents niveaux de couvert arboré/forestier, la composition des espèces d'une forêt en régénération est fortement affectée par la forêt existante dans le paysage (Zahawi, données non publiées/en progression). La nucléation appliquée est une mauvaise stratégie dans les lieux où les semences devant être dispersées proviennent principalement des espèces invasives.

5. **D'autres facteurs de stress - herbivores, incendies, etc. - pouvant détruire la végétation en régénération peuvent être gérés.** La re-croissance secondaire est souvent réalisée en quelques années ou décennies après le début de régénération (55, 69). Afin que la nucléation appliquée ou une stratégie de restauration forestière puisse être efficace, les menaces sur la forêt en régénération (en particulier lorsqu'elle est jeune) doivent être gérées/supprimées (17).

OUTILS ET RESSOURCES

- [Rules of Thumb for Predicting Tropical Forest Recovery](#). Holl et al., *Applied Vegetation Science*, 21(4), 2018.
- Voir aussi les outils et ressources sur la mobilisation des acteurs dans la section 2.



SECTION 4 :

TAILLE, FORME, ESPACEMENT ET CONFIGURATION DE L'ÎLOT FORESTIER

TAILLE ET ESPACEMENT DE L'ÎLOT

Pour un effort de plantation donné, les praticiens doivent-ils planter des îlots moins nombreux, plus grands ou plus petits ? Il y a des contreparties entre la taille de l'îlot et la distance entre les îlots pour le même effort de plantation. Les îlots plus grands et plus rapprochés tendent à mieux performer et à avoir une vitesse de renouvellement plus rapide jusqu'à un certain point, mais la taille de l'îlot et l'espacement entre les îlots dépend aussi des objectifs du projet, des échéances et du budget. Les données du Costa Rica et du Honduras, où les îlots sont séparés de 8 à 20 m (CR) et de 12 m (Honduras), montrent de bons résultats, mais le renouvellement était plus lent lorsque les nucléi étaient espacés par des distances plus grandes. Étant donné que quelques études évaluent directement la distance optimale entre les îlots, un espacement par défaut pourrait être de 8 à 12 m d'après nos études antérieures, mais des expériences supplémentaires sont nécessaires.

QUELLE EST LA TAILLE OPTIMALE DE L'ÎLOT FORESTIER ?

Les îlots forestiers doivent être assez grands pour attirer les oiseaux et autres disséminateurs de graines (70) et faire de l'ombre aux herbes de pâturage. La taille optimale dépend du contexte local et du type de forêt. Au Costa Rica et au Honduras, les îlots plus réduits (28 et 50 m²) tendaient à avoir davantage d'herbe dans le sous-étage (45, 59), et se voyaient plus affectés par la mort même d'un seul arbre planté (en particulier l'arbre central, ce qui laisse ainsi un cœur central de l'îlot réduit). Les plus gros îlots (surface plantée de 64 et 144 m²) ont eu des visites d'oiseaux plus nombreuses, davantage de graines disséminées par les animaux, et ont facilité davantage de recrutement arboré que les îlots plus réduits (22, 59, 60, 70, 71), de façon à ce qu'une taille minimum de 64 m² était recommandée (22, 59). Cependant, les cas présentés à la fin de ce guide ont démontré que la NA accroissait quand même le renouvellement forestier par rapport à la régénération naturelle en utilisant des îlots circulaires de seulement 2 m de diamètre (3,14 m²) au Brésil (étude de cas n° 4) et de 6 m de diamètre (28,3 m²) dans une forêt de la zone des brouillards dans les contreforts montagneux supérieurs en Colombie (étude de cas n° 3) (dans les deux cas, les arbres étaient plantés de manière très dense sur l'îlot, respectivement à 0,5 et 1,1 m d'éloignement). Des recherches supplémentaires sont requises pour déterminer la taille minimum dans d'autres types forestiers, tels que les forêts tropicales sèches.

Au final, au-delà d'un seuil minimum, la taille maximale de l'îlot **dépend largement des ressources du projet, du type de forêt et de la surface totale à restaurer**. Les îlots plus grands couvrent plus de sol, et peuvent fournir un habitat légèrement meilleur - mais requièrent aussi davantage de ressources. L'équilibre entre la surface totale couverte, l'espacement entre les îlots, et la taille de chaque îlot est une considération essentielle.

QUELLE SURFACE DOIT ÊTRE PLANTÉE, ET QUEL ESPACEMENT DOIT ÊTRE UTILISÉ ENTRE LES ÎLOTS ? CONSIDÉRER LES FACTEURS SUIVANTS :

1. **Évaluer le degré de perturbation/dégradation sur le site.** Les sites plus perturbés et dégradés demanderont une plantation d'arbres plus intense, ce qui

pourrait signifier un rapprochement entre les îlots.

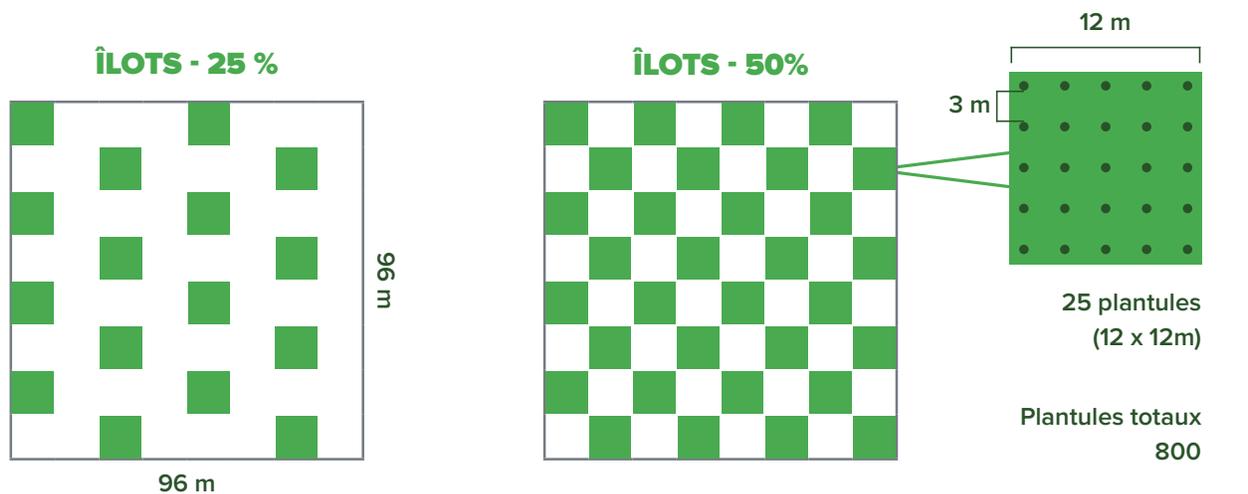
2. **Estimer le taux de croissance de la canopée.** Les îlots plantés avec des arbres qui développent de larges canopées rapidement peut signifier que les îlots peuvent être espacés davantage ; moins espacés pour une croissance plus lente.
3. **Considérer les ressources disponibles pour la plantation d'arbres.** Planter un plus gros pourcentage d'un site de restauration avec des îlots résultera très probablement en une restauration plus rapide, mais planter davantage d'arbres augmente le coût du projet. Sur un certain point, l'avantage relatif de la NA par rapport à la plantation d'arbres traditionnels sera perdu si la plantation d'arbres devient trop intensive.

QUELLE FORME D'ÎLOT CONVIENT LE PLUS DANS UN CONTEXTE DONNÉ ?

Les carrés ou les cercles sont les plus communément utilisés (Fig. 13). Les cercles produisent le meilleur ratio entre les bordures et la forêt intérieure, mais les bordures peuvent être plus difficiles à localiser et maintenir (c'est-à-dire que les plantules plantées peuvent être coupées par erreur). D'autres formes peuvent aussi être utilisées à partir du moment où elles créent un habitat ombragé au sein des îlots. Par exemple, les bandes sont plus simples à planter et à maintenir parce qu'il y a moins d'angles à localiser dans la végétation dense secondaire, et de nombreuses pratiques forestières traditionnelles utilisent cette configuration. Au Brésil, les arbres ont été plantés en bandes, et les observations après trois années suggèrent que le renouvellement forestier est similaire dans les zones plantées en îlots et en bandes, mais que les bandes sont bien plus simples à installer (exemple de cas n° 6).

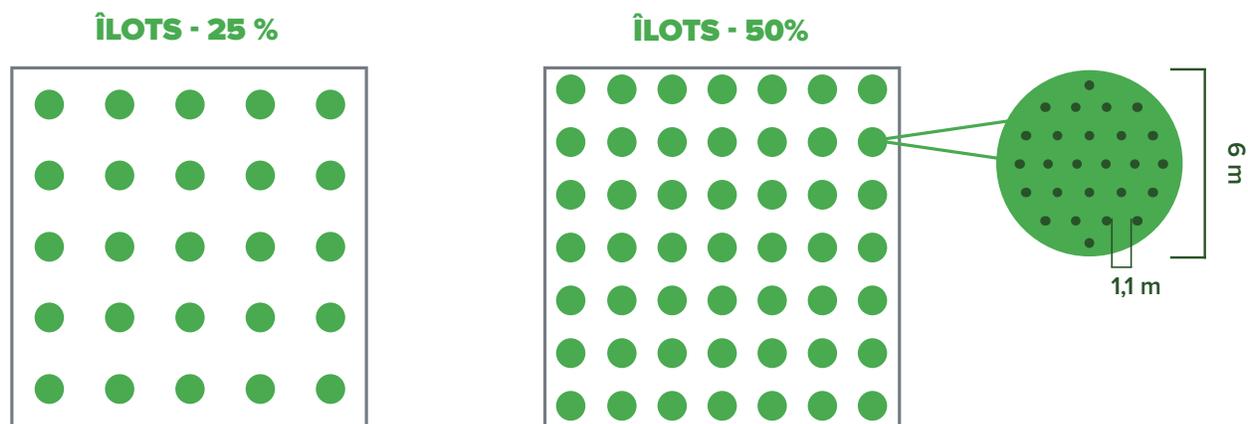
AVEC QUEL ESPACEMENT LES ARBRES DOIVENT-ILS ÊTRE PLANTÉS DANS LES ÎLOTS ?

La réponse dépend largement des objectifs du projet, des ressources disponibles, et des taux de croissance des espèces utilisées (72, 73). La plantation d'arbres de style traditionnel pour la restauration a montré de bons résultats en utilisant une grande palette d'espacements (souvent de 1 à 4 m). Une étude testant la régénération naturelle sous les arbres plantés a démontré que plus les arbres plantés sont rapprochés (2 x 2 m), plus grande est la



Plantation à faible densité

À 25 % 200 plantules ont été plantés, et à 50 % 400 plantules ont été plantés



Plantation à densité élevée

À 25 % 525 plantules ont été plantés, et à 50 % 1029 plantules ont été plantés

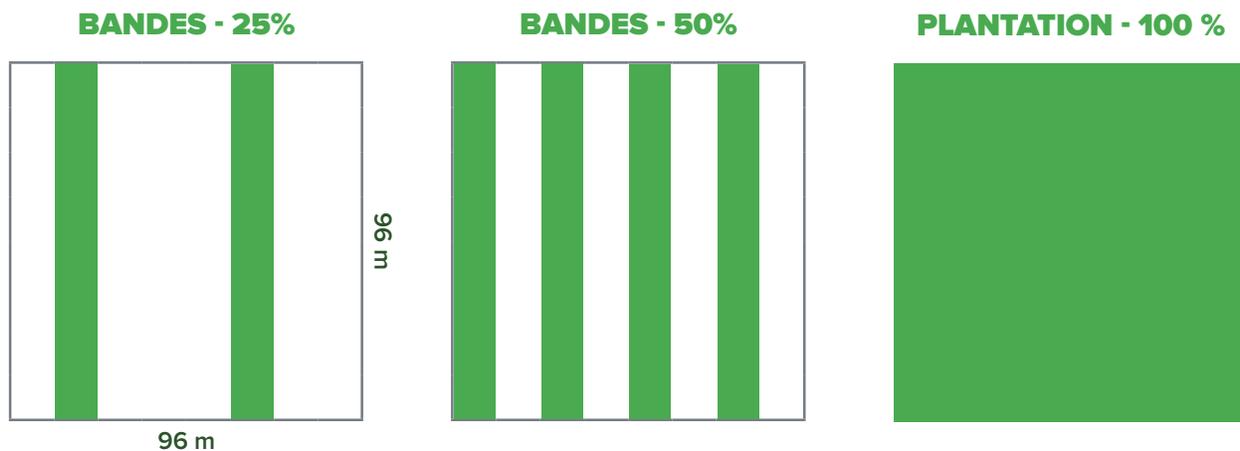


Figure 13 : Exemples de conceptions alternatives pour la nucléation appliquée. Notez que dans cette figure, les carrés fournissent un exemple de plantation à « faible densité » (arbres plus espacés au sein de chaque îlot) et les cercles un exemple de plantation de « haute densité ». Les carrés, les cercles et les bandes sont tous représentés dans les exemples de cas de ce guide (carrés, cas 1 et 5 ; cercles, cas 2, 3 et 4 ; carrés et bandes dans le cas 6).

diversité des plantules en régénération par rapport aux arbres plus espacés (3 x 3 m), mais l'abondance des individus était similaire (74). Les plantations mixtes avec un espacement de 3 x 3 m pour restaurer la végétation native dans la savane brésilienne étaient plus réussies en termes de croissance, en particulier en ce qui concerne l'accumulation de biomasse et le stock carbone.

Les avantages de l'espacement plus large (> 2 m, typiquement 3 m) sont 1) que cela utilise moins de ressources du projet puisque moins d'arbres sont plantés dans chaque îlot, 2) cela peut promouvoir une croissance plus élevée des arbres, un bon attribut si certains arbres devaient être destinés à la coupe ; et 3) cela produit des arbres avec un diamètre de tronc plus important (75-77). Des espacements plus proches (< 2 m) sont utilisés pour encourager la compétition et la diversité forestière (73). Cette pratique est aussi utilisée dans les micro-forêts urbaines afin de créer des strates denses multi couches (78). Les avantages de l'espacement plus rapproché incluent 1) la fermeture plus rapide de la canopée dans les îlots ; 2) la création potentielle de conditions forestières plus « naturelles » dès le départ ; 3) la production plus rapide de davantage de biomasse (1,5 - 2 m) (79, 80) ; et 4) la réduction de l'espace disponible pour les espèces invasives.

L'un des avantages principaux de la NA par rapport à la plantation d'arbres traditionnelle est qu'elle utilise moins de ressources. Parce que le nombre d'arbres dans les îlots correspond au carré de la distance entre les arbres, le nombre total d'arbres nécessaires augmente rapidement lorsque l'espace se réduit. À Madagascar et en Colombie de bons résultats ont été obtenus avec un espacement de 1 m, et à Madagascar, des essais sont en cours afin de tester des îlots « bon marché » (faible densité de plantation) par rapport à des îlots « denses » (plantation de plus haute densité) (étude de cas n° 5). Un cas en Colombie a explicitement testé la densité de plantation (0,9 contre 1,1 m) et a conclu une croissance d'arbres plus rapide pour l'espacement moins dense, ce qui a aussi réduit les dépenses du projet d'environ 30 % (étude de cas n° 2). Au Brésil, la plantation d'arbres avec un espacement de 0,5 m en petits îlots a aussi produit de bons résultats (étude de cas n° 4), et au Costa Rica de bons résultats ont aussi été obtenus en utilisant des arbres espacés de 3 m (étude de cas n° 1). Des

espèces à la croissance plus rapide avec des canopées plus importantes signifie que les forêts peuvent devenir plus denses plus rapidement, rendant ainsi approprié un espacement plus grand.



A

Vue aérienne des plantations.



B

Prise de vue par drone des rangées d'*Eucalyptus* plantés alternativement avec des rangées d'espèces natives



C

Espèces d'arbres natives plantées après que les *Eucalyptus* aient été coupés pour des bénéfices en matière de moyens de subsistance. L'anticipation est que les espèces natives vont régénérer naturellement dans la zone exploitée

Un exemple d'agrandissement de plantations en bandes d'un mélange d'espèces natives et d'*Eucalyptus* sur 77 Ha au Brésil, plantées en lignes pour faciliter la plantation, la maintenance et la récolte. Crédit photo Pedro Brancalion. Voir aussi l'exemple de cas n° 6.



© PETE OXFORD/ILCP

TRAVAILLER AVEC LES CARACTÉRISTIQUES DU PAYSAGE

Pour un effort de plantation donné (mettons 20 %), où les arbres doivent-ils être plantés sur le paysage ? Les arbres peuvent être stratégiquement plantés pour offrir de multiples avantages au sein du paysage. Certaines considérations générales incluent :

1. **des îlots végétaux dans les zones où il y a moins de régénération naturelle.** Allouer un effort de plantation plus important dans les zones les plus dégradées 1) cible les endroits où la régénération naturelle est moins susceptible de se produire et 2) établit les îlots forestiers qui peuvent accélérer la régénération naturelle sur le reste du site.
2. **Les îlots végétaux dans les zones qui mettent d'importantes ressources en tampon.** Par exemple, favoriser les îlots par rapport aux zones riveraines afin de minimiser l'érosion, ou le long d'une limite de propriété pour rendre l'usage du terrain plus intentionnel (voir section 2).
3. **Îlots végétaux pour créer une connectivité** (par exemple entre deux fragments forestiers) pour favoriser les processus paysagers.
4. **Choisir le placement des espèces d'après le contexte paysager.** Par exemple, s'il existe une partie plus venteuse sur la parcelle et que les espèces plantées sont

anémochores, les planter à cet endroit (81). Si une espèce est hydrochore, la placer au plus près de l'eau, ou si elle repose sur la zoochorie, la planter à proximité d'excréments ou d'autres signes de disséminateurs.

DE BONNES PRATIQUES DE PLANTATION D'ARBRES SONT ESSENTIELLES POUR DE BONS RÉSULTATS (10, 23)

Les parcelles de nucléation appliquée requièrent d'efficaces techniques de plantation d'arbres pour accroître la survie et la croissance, y compris le fait de baser la plantation sur les cycles de pluie locaux afin d'éviter une irrigation coûteuse. Les meilleures pratiques en matière de plantation des arbres sont au-delà du cadre de ces directives, mais de nombreuses ressources sont disponibles, comprenant :

- [Restoring Tropical Forests: A practical guide](#). Elliott et al., *Royal Botanic Gardens, Kew*, 2013.
- [Implementing Forest Landscape Restoration: A practitioner's guide](#). Stanturf et al., *IUFRO: International Union of Forest Research Organizations*, 2017.
- [Guidelines for the Restoration, Management and Rehabilitation of Degraded and Secondary Tropical Forests](#). ITTO: *International Tropical Timber Organisation*, 2002.



SECTION 5 :

SÉLECTION DES ESPÈCES ET DES MATÉRIELS VÉGÉTAUX

Quelques études comparent les choix de spécimens à travers différents traitements. Cette section délivre des principes pragmatiques basés sur l'expérience de terrain la sélection de l'arbre et des autres espèces de plantes (Fig. 14). Toutes les espèces sélectionnées doivent convenir aux conditions du site, y compris la gamme d'altitude, la précipitation, la saisonnalité, le type et l'aspect du sol sur lequel la restauration aura lieu.

CONSIDÉRATIONS ÉCOLOGIQUES

1. Choisir des combinaisons d'espèces qui incluent :

A. Au moins une espèce à croissance rapide capable de s'établir dans un espace ouvert avec une canopée qui se propage (la propagation par les branches est une manière importante avec laquelle la NA ferme la canopée). Les espèces qui croissent rapidement puis meurent (par exemple l'*Inga edulis* dans l'exemple de cas 1), qui laissent de l'espace aux espèces de remplacement moyennes à tardives, sont particulièrement utiles (22). Garibello (exemple de cas 3) a aussi déterminé que dans une forêt des bas contreforts montagneux en Colombie, la plantation en nucléi avec soit *Heliocarpus americanus* ou des arbres de la famille des Fabaceae (*Inga marginata*, *Inga* sp. Et *Erythrina poeppigiana*) était plus efficace pour faciliter la survie des arbres menacés, par rapport aux nucléi formés par rapport aux triplets qui colonisent généralement les anciens terrains (*Miconia* sp., *Piper aduncum*, *Vismia baccifera*).

B. Quelques espèces à croissance lente et moyenne (remplacement moyen), en particulier les espèces qui sont peu susceptibles de coloniser les sites de leur propre chef, telles que les espèces barophores ou les espèces avec de grosses graines zoophores. Les espèces de remplacement tardif à grosses graines tendent à être absentes, ou sont lentes à revenir sur les parcelles restaurées sans assistance supplémentaire (22, 46, 82, 83). Celles-ci peuvent aussi être introduites via une plantation d'enrichissement au cours de la phase de maintenance du projet (section 7 ci-dessous).

C. Une fois les critères ci-dessus satisfaits, considérer aussi de choisir des espèces qui :

- i. Sont faciles à produire dans les pépinières locales et/ou croître comme il faut à partir de boutures (les stocks en pépinière peuvent s'avérer

un facteur très limitant dans les projets de restauration tropicaux) ;

- ii. Ont un taux de renouvellement élevé : les parties (feuilles, branchettes, branches et racines etc.) sont fréquemment perdues puis croissent à nouveau, ce qui crée de la matière organique et améliore les sols.

- iii. Ont une capacité facilitée à pousser rapidement et de façon répétée après des dommages physiques (abattage et/ou brûlage partiel).

2. Inclure des arbres fruitiers pour les espèces zoophores : Les arbres plantés attirent les animaux en fournissant de la nourriture, un abri contre les prédateurs, des zones de nidification et de l'ombre (84). Les arbres fruitiers peuvent accroître les visites par les animaux, la dissémination des graines, et la recrutement en plantules par rapport aux arbres anémophores (85). Les arbres avec des fruits mangés par une grande variété d'animaux disséminateurs de graines peuvent attirer davantage de disséminateurs (86). Les figuiers (*Ficus* sp.) sont recommandés pour la plantation dans les endroits où ils sont indigènes car ils sont largement répandus et leurs fruits sont mangés par une grande variété d'animaux (87-89).

3. Utiliser les espèces indigènes si possible, et éviter de choisir des espèces qui vont entrer en compétition avec les espèces d'arbres indigènes et empêcher leur établissement. Sélectionner des espèces indigènes lorsque c'est possible puisque ces espèces vont probablement rester dans l'écosystème, et éviter les espèces suppressives d'arbres ou particulièrement compétitives (22, 90). Par exemple, les plantations de teck dans les pâturages du Costa Rica ont fait preuve d'une capacité à supprimer la croissance des arbres par rapport à la régénération naturelle sans arbre planté (91).

4. Inclure des espèces fixatrices de l'azote sur les sites où l'infertilité du sol limite la régénération naturelle des arbres. De

nombreuses études ont montré de bons résultats via l'usage d'arbres fixateurs d'azote, qui souvent croissent rapidement et accroissent la disponibilité de l'azote (par exemple la famille des Fabaceae ; Inga spp. et Erythrina poeppigiana) (92) (exemple de cas n° 3).

- 5. Considérer les conceptions d'îlots « résistants aux incendies » dans les zones sujettes aux incendies fréquents (en plus des coupe-feux).** En théorie, les arbres résistants aux incendies plantés sur la bordure doivent pouvoir être en mesure de protéger des espèces plus sensibles aux incendies présentes vers l'intérieur. Les espèces à utiliser, ainsi que les dimensions des « couches résistantes au feu » requises, seront fortement dépendantes du contexte, et il n'y a actuellement aucune démonstration expérimentale concluante pour prouver cela. Il s'agit d'un domaine important pour de la recherche continue (voir l'exemple de cas n° 5).

- 6. Sélectionner des espèces non arborées selon ce qui est approprié dans différents contextes.** Les arbrisseaux peuvent être des espèces convenables à ajouter au mélange d'espèces dans la NA en parallèle des arbres, et les herbes peuvent aussi être importantes pour apporter un complément total d'espèces dans certains contextes.

CONSIDÉRATIONS SOCIO-ÉCONOMIQUES

- 7. Intégrer des connaissances indigènes et locales, et mobiliser les peuples locaux dans le processus de sélection des espèces.** Les peuples locaux peuvent être en mesure d'identifier les espèces qui répondent aux objectifs/critères à la fois sociaux et écologiques pour la NA, en particulier dans les lieux ayant un historique d'usage forestier/de systèmes d'agroforesterie (93). Les peuples locaux ont été impliqués dans la sélection des espèces dans un certain nombre de cas présentés dans ce guide (exemples de cas n° 2, 3, 4 et 5, au Brésil, en Colombie et à Madagascar).

Caractéristique	Description et analyse raisonnée
Taux de croissance	Gain rapide de biomasse pour le stockage de carbone ; formation rapide de la canopée pour mettre à l'ombre la végétation de remplacement rapide demandeuse de lumière ; espèces végétales avec des taux de croissance variables afin que certaines s'établissent rapidement et que d'autres vivent plus longtemps
Forme de croissance – c'est-à-dire herbe, arbrisseau, arbre	Les formes de croissance sélectionnées vont affecter la diversité et la structure de la végétation
Tolérance des sols à faibles nutriments et fixation de l'azote	Capacité à croître et à améliorer les conditions du sol sur les sites dégradés
Tolérance aux conditions de stress et de changement climatique	Tolérance aux conditions variables de température et d'humidité afin d'être en mesure de s'établir sur les sites dégradés et de survivre à un climat en évolution
Caractéristiques attirant la faune	Les fruits qui attirent les animaux disséminateurs de graines, les sources de nectar, ou les espèces qui fournissent une structure d'habitation pour la faune
Problème de conservation	Les espèces qui sont rares et focalisations sur les efforts de conservation
Propension à s'établir naturellement	Espèces végétales qui sont peu susceptibles de coloniser naturellement pour accroître la diversité
Possibilité de collecte et de propagation/disponibilité dans les pépinières locales	Accroît l'efficacité économique et la facilité de restauration
Attrait en tant que bois, produits forestiers autres que le bois, ou autres raisons économiques ou culturelles	Délivre des revenus, de l'alimentation ou d'autres produits, ce qui accroît l'incitation pour les propriétaires de terrains à planter et maintenir la végétation

Figure 14 : Caractéristiques potentielles à considérer dans la sélection des espèces de plantes pour la restauration (modifié à partir de (4)).

8. **Considérer une plantation avec des espèces qui répondent à des objectifs sociaux/économiques/écologiques spécifiques.** En assumant que les exigences écologiques minimums sont satisfaites, les espèces peuvent être choisies pour leur valeur économique ou culturelle, ou leur potentiel en matière de séquestration du carbone.

OUTILS ET RESSOURCES

- [Plant Functional Traits and Species Selection in Tropical Forest Restoration.](#) Lachlan C. S., *Tropical Conservation Science*, 11(1), 2020.
- [Agroforestry Tree Domestication: A primer.](#) Dawson et al., *ICRAF: The World Agroforestry Centre*, 2012
- [Restoring Ecosystem Services Tool \(REST\): A computer program for selecting species for restoration projects using a functional-trait approach.](#) Rayome et al., *USDA: United States Department of Agriculture*, 2019.
- [Preparing to Plant Tropical Trees.](#) Longman, K. A., *Commonwealth Secretariat*, 1995.
- [Tree Species Planted for the Atlantic Forest Restoration: A floristic and functional analysis \(Espécies arbóreas plantadas na restauração da Mata Atlântica\).](#) Almeida et al., *LASPEF-UFSCar: Laboratório de Silvicultura e Pesquisas Florestais*, 2020. (En portugais. Les tableaux ont des légendes en anglais).
- [Primer for Ecological Restoration.](#) Holl, K., *Island Press*, 2020.



© ATELOPUS - STOCK.ADOBE.COM



SECTION 6 :

MAINTENANCE POUR LA NUCLÉATION APPLIQUÉE

La nucléation appliquée requiert souvent de maintenir des arbres à la fois plantés et s'établissant naturellement. La maintenance doit favoriser les objectifs du projet, être incluse dans les budgets, et doit être alignée sur la surveillance pour permettre des interventions adaptatives (1, 94). La nucléation appliquée vise à restaurer le couvert de canopée avec des espèces forestières natives ; au minimum, la maintenance dans les systèmes doit faciliter la recroissance forestière native, mais la quantité de maintenance dépend des objectifs du projet et des conditions locales du site (1, 57). Cette section définit les activités de maintenance essentielles pour le système NA. Les ressources concernant les directives sur la maintenance des surfaces plantées avec des arbres et une RN assistée s'appliquent à la NA et sont fournies à la fin de ce chapitre.

1. S'assurer que la zone est protégée des facteurs de stress qui pourrait endommager les forêts en régénération, tels que les incendies, le broutement, les espèces herbivores, et la suppression des arbres pour la récolte (à moins que la sélection d'arbres pour la récolte ne fasse partie de la stratégie). La protection du site est essentielle pour assurer le succès à long terme. Le maintien des clôtures, des coupe-feux, et la mise en application des règles locales d'usage de la terre constituent des activités importantes. Dans certains endroits, la prédation des rongeurs peut aussi affecter la régénération (comme on a pu l'observer dans un projet GEF-CI dans les Hautes Andes (95)). La protection contre le broutement (par exemple en maintenant des clôtures) est particulièrement importante dans la NA car la végétation qui croît entre les parcelles d'arbres est souvent savoureuse pour les animaux, en particulier au cours de la saison sèche lorsque le fourrage peut être rare ailleurs (52). La protection contre l'incendie est aussi essentielle - la végétation entre les îlots peut être plus inflammable autour des îlots, induisant des dommages accrus sur les arbres à leur périmètre (exemple de cas n° 5, Madagascar). Les activités de maintenance peuvent s'adapter à différents environnements et contextes : par exemple, des coupe-feux « verts » de végétation inflammable plantée peuvent être utilisés, ce qui requiert moins de maintenance que pour les coupe-feux à sol nu (96).

2. Encourager la croissance des arbres plantés et en régénération dans, et entre les îlots forestiers. Dans les espaces où les arbres semblent régénérer correctement, la protection de la terre peut être suffisante. Lorsqu'elles sont fortement compétitives, les plantes héliophiles - telles que l'herbe à pâturage plantée - sont présentes, et le déboisement périodique avant et après la plantation entre et au milieu des îlots peut être nécessaire jusqu'à l'établissement des plantules plantées et en régénération. La durée de la maintenance dépend des taux de croissance des arbres et de la végétation sur le site, mais dans de nombreux contextes tropicaux, le déboisement mécanique (par exemple

avec des machettes ou autres outils coupants - éviter d'utiliser un incendie et les produits chimiques puisque ces derniers peuvent endommager les arbres en régénération) deux à quatre fois par an pendant deux à trois ans est chose commune (1, 58, 92). Après l'établissement du couvert de canopée, le déboisement n'est plus nécessaire puisque les îlots en expansion mettent les autres végétations à l'ombre. (Comme noté ci-dessus, les espèces hautement invasives tolérantes à l'ombre - en particulier les espèces d'arbres - peut signifier que la nucléation appliquée ne fonctionnera pas puisque ces derniers ne seront pas mis à l'ombre par les îlots en expansion (14)).

Le processus général du déboisement entre les îlots est : 1) identifier les arbres en régénération qui devraient être protégés, 2) déboiser la végétation autour des plantules en régénération, et 3) appliquer un fertilisant si nécessaire (1, 57). Le déboisement de la végétation autour des plantules plantées peut s'avérer difficile, en particulier lorsque les arbres sont petits. Le marquage soigneux des limites autour des arbres plantés dans les îlots peut aider à empêcher la coupe accidentelle des plantules d'arbres qui ont été plantées.

- 3. Protéger les disséminateurs de graines** contre la chasse et autres menaces. Les disséminateurs de graines sont essentielles pour favoriser le processus de régénération naturelle. Cela peut impliquer de travailler avec les communautés locales afin de limiter la chasse (1). Cela peut aussi impliquer de garder les chats ou les chiens en dehors des sites de restauration.
- 4. Replanter des arbres dans les îlots** si un nombre substantiel d'arbres meurt. Un certain pourcentage de mortalité et de replantation des arbres devrait être inclus dans le budget du projet.
- 5. Contrôler les insectes** qui endommagent les arbres plantés et/ou en régénération (tels que les fourmis parasol) si nécessaire.
- 6. L'irrigation ou la fertilisation** peuvent être nécessaires pour favoriser la survie et la croissance initiale des arbres plantés dans les zones où les pénuries d'eau existent,

ou lorsque la qualité du sol est faible.

- 7. Pratiquer la plantation d'enrichissement sur les sites en régénération pour répondre aux objectifs sociaux et écologiques.** Autant dans la plantation de style plantation et dans la NA, les espèces à grosses graines et à remplacement tardif tendent à être en nombre faible ou absentes des parcelles restaurées (17, 22, 46). Au Costa Rica, une étude sur 15 années a démontré que la NA ainsi que les parcelles de style plantation ont obtenu un nombre supérieur d'arbres à grosses graines par rapport aux parcelles en régénération naturelle, mais avec une densité bien plus faible que les forêts plus anciennes de référence à proximité (45). Ces résultats démontrent que les ressources pour une maintenance à long terme et une gestion adaptative sont importantes pour déterminer si une plantation d'enrichissement est nécessaire une fois la canopée établie (boîte de dialogue n° 3).

OUTILS ET RESSOURCES

- [Restoring Forest Landscapes through Assisted Natural Regeneration \(ANR\) – A Practical Manual](#). *FAO: Food and Agricultural Organization of the United Nations*, 2019.
- [Application of Assisted Natural Regeneration to Restore Degraded Tropical Forestlands](#). Shono et al., *Restoration Ecology*, 15(4), 2007. (Fournit des consignes détaillées pour réaliser une régénération naturelle assistée sur le terrain, y compris l'identification et le soin des arbres en régénération).
- [Un guide sur la Méthodologie d'évaluation des opportunités de restauration \(MEOR\) : Évaluation des opportunités de restauration de paysage forestier au niveau national ou sous-national](#). *IUCN : International Union for Conservation of Nature & WRI : World Resources Institute*, 2014.
- [International Principles and Standards for the Practice of Ecological Restoration, Second Edition](#). Gann et al., *SER: Society for Ecological Restoration*, 2019.
- [Guidelines for the Restoration, Management and Rehabilitation of Degraded and Secondary Tropical Forests](#). *ITTO: International Tropical Timber Organisation*, 2002. (Inclut la maintenance comme étape essentielle pour un enrichissement réussi des pratiques de plantation. Les activités de maintenance peuvent être adaptées à différents environnements et contextes (tels que l'usage de coupe-feux « verts », constituées de végétations inflammables plantées, ce qui requiert moins de maintenance que les options à sol nu).

BOÎTE DE DIALOGUE 3 : CARACTÉRISTIQUES POUR LES ESPÈCES D'ARBRES IDÉALES POUR LA « PLANTATION D'ENRICHISSEMENT » (MODIFIÉ PAR (96))

Floraison et production de fruits régulières ; vastes amplitudes écologiques ; tolérance au stress d'humidité. Les espèces à graines plus grosses qui ne s'établissent pas naturellement ; ont un taux de survie supérieur lorsqu'elles sont plantées sous une canopée ouverte ; les espèces menacées ou localement menacées ; les espèces ayant une haute valeur culturelle

Si les arbres sont destinés à produire des avantages économiques directs (PFNL, bois) considérer aussi :

de produire du bois de haute valeur ou du PFNL ; une croissance rapide en hauteur ; une bonne forme naturelle de branche ; une absence de nuisibles et de maladies ; un diamètre de la cime faible

Les espèces autres que les arbres sont aussi importantes pour l'écologie de nombreuses forêts.

Considérer la plantation :

d'épiphytes : lents à recoloniser les forêts secondaires, mais jouent un rôle important pour fournir un contrôle sur la nourriture, l'eau, et le climat pour les organismes vivant dans la canopée (28, 97) ; des buissons ou des arbrisseaux forestiers de valeur de culture, économique ou écologique élevée.



SECTION 7 :

SURVEILLANCE

La surveillance de la NA est essentielle pour guider les interventions de gestion et évaluer les résultats. Nous incluons ci-dessous des directives spécifiques à la NA, comprenant les indicateurs concernés pour la surveillance. De nombreuses ressources décrivent la manière de développer des protocoles de surveillance pour la régénération naturelle (Directive générale en 1, 57, 94) et pour la restauration forestière/la restauration forestière et paysagère de façon plus large (4, 31, 98). Se référer aussi aux outils et aux ressources listées à la fin de cette section.

Surveillance générale et gestion adaptative

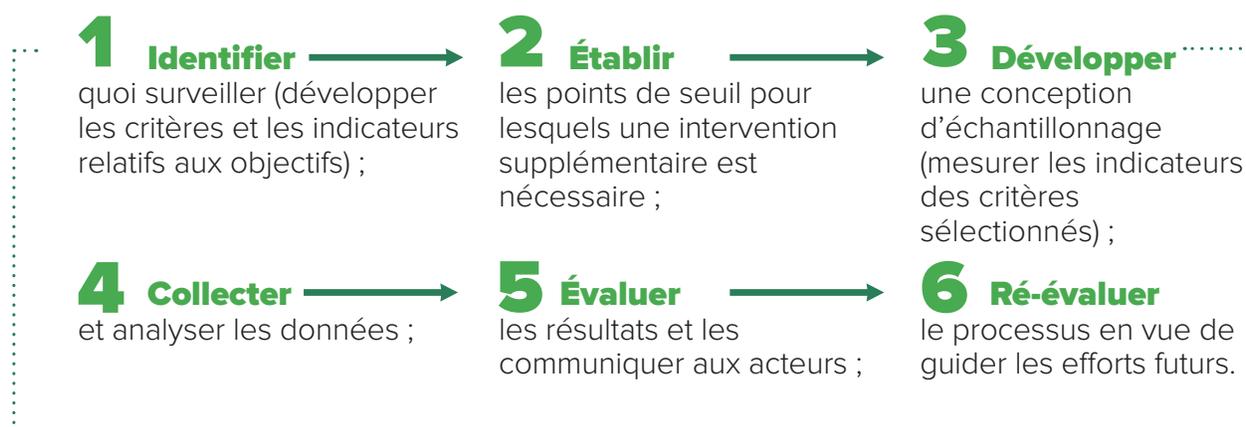


Figure 15 : Key steps in monitoring and adaptive management. (Adapté à partir de Stanturf et al., 2017 (pg. 67).

DÉVELOPPER UN PLAN DE SURVEILLANCE

Un programme de surveillance commence lors des étapes de planification d'un projet lorsque les objectifs sont définis. Cela doit être associé avec les indicateurs appropriés pour 1) évaluer si le travail progresse dans une direction qui répond à certains ou tous les objectifs du projet, et 2) saisir les attributs supplémentaires importants pour les résultats du projet (Figure 1, Figure 15). Le processus de définition et de surveillance des objectifs doit être développé en collaboration avec les propriétaires de terrains et/ou la communauté dans son ensemble, et doit être vu comme une manière de les mobiliser stratégiquement le long du processus. Dans la mesure où la surveillance et la maintenance peuvent fournir des formations, un développement capacitatif ainsi que de l'emploi local, cela peut renforcer fortement l'investissement et la pérennité à long terme du projet (98).

INDICATEURS POTENTIELS POUR LES PROJETS NA

Les indicateurs découleront des critères/objectifs d'un projet de restauration spécifique. Plusieurs d'entre eux qui peuvent s'appliquer aux projets NA dans l'objectif primaire d'aider et accélérer les processus naturels de succession sont :

- **la survie et le diamètre de la tige (qui peuvent être utilisés pour calculer la biomasse) des arbres plantés.**
- **Le nombre et l'identité des espèces des recrues nouvellement établies dans, et entre les îlots.** Si le nombre est faible, des interventions supplémentaires (telles que le déboisement autour des plantules en régénération ou la plantation d'arbres supplémentaires) peuvent être nécessaires.
- **Pourcentage du couvert de canopée** au bout de trois ans. Si la canopée n'est pas correctement établie à ce point, une action doit être entreprise pour accroître le couvert de Canopée, et celui-ci doit être surveillé à intervalles réguliers. Une canopée fermée est importante pour la création de conditions qui vont permettre aux espèces de remplacement plus tardives de s'établir.
- **Étalement de l'îlot forestier (c'est-à-dire à quelle distance s'est étalée la canopée entre les îlots).** Même si une canopée fermée est établie au sein de l'îlot, si les îlots ne s'étalement pas, alors il se peut qu'une plantation supplémentaire soit nécessaire. L'étalement de l'îlot peut être mesuré comme évolution au cours du temps de la distance jusqu'à la bordure de la canopée depuis le fût d'un arbre planté sur la bordure de la plantation.

- **Présence/absence d'espèces végétales clés.** Lorsque c'est approprié, la surveillance de la présence d'espèces ayant été identifiées comme importantes pour des objectifs écologiques ou sociaux sera importante. Notez que s'il existe des espèces clés qui doivent être incluses, elles devraient être plantées au départ ou via une plantation d'enrichissement.
- **La surabondance d'espèces invasives pouvant surpasser les recrues en termes de compétition.** Il s'agit d'un indicateur négatif qui suggère qu'une intervention supplémentaire est nécessaire.
- **Les plantules en régénération sont diverses et représentatives des espèces trouvées dans les sites de référence.** La comparaison des arbres en régénération par rapport aux forêts de référence s'avère précieuse, à la fois pour comprendre à quel degré fonctionne la NA pour restaurer la forêt native, et pour contribuer à faire des recherches dans ce domaine (se référer à la section 9). Surveiller la proportion d'espèces anémophores par rapport aux espèces zoophores s'avère aussi utile pour comprendre aussi la NA parvient à attirer les disséminateurs sur le site.

Si le soutien des modes de subsistance locaux constitue un objectif du projet, les indicateurs suivants peuvent aussi s'appliquer :

- **Les produits forestiers non ligneux** mesurés comme 1) présents sur le site (récoltes potentielles) et 2) les quantités réellement récoltées (récoltes/rendements réels).
- **Nombre d'emplois locaux créés,** et sur quelle période de temps. Cela peut inclure les emplois relatifs à la planification, la plantation, la surveillance, le maintien et la récolte des sites restaurés.
- **La contribution du projet aux revenus des foyers** à travers les salaires pour la plantation, la surveillance et la maintenance, et/ou les produits récoltés sur le site.
- **La valeur et la distribution (par exemple le nombre de foyers, le pourcentage de contribution aux revenus des foyers, la mesure de l'équité de la distribution)**

de tout paiement pour les services environnementaux, tels que l'eau ou le piégeage du carbone ?

OUTILS ET RESSOURCES

- [Monitoreo a Procesos de Restauración Ecológica Aplicado a Ecosistemas Terrestres.](#) Aguilar-Garavito, M., & Ramírez, W. (Eds), *IAvH: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.* 2015.
- [Implementing Forest Landscape Restoration: A practitioner's guide.](#) Stanturf et al., *IUFRO: International Union of Forest Research Organizations,* 2017.
- [Participatory Monitoring in Tropical Forest Management: A review of tools, concepts and lessons learned.](#) Evans, K., & Guariguata, M. R., *CIFOR: Center for International Forestry Research,* 2008. (Décrit un processus pour la surveillance collaborative impliquant les communautés et autres acteurs, ce qui peut s'avérer approprié dans les zones où les communautés utilisent activement le terrain).
- [International Principles and Standards for the Practice of Ecological Restoration, Second Edition.](#) Gann et al., *SER: Society for Ecological Restoration,* 2019. (Contient des directives basiques pour un processus de surveillance, et des remarques quant au fait que la surveillance doit démarrer lors de la phase de planification des projets et doit être orientée vers des indicateurs de succès faciles à mesurer, un processus qui sera utile en impliquant les acteurs).
- [Primer for Ecological Restoration.](#) Holl, K., *Island Press,* 2020. (Contient un chapitre décrivant le processus et les considérations principales pour la surveillance et la maintenance d'une restauration écologique).



SECTION 8 :

APPRENDRE DE LA PRATIQUE- CRÉATION D'EXPÉRIMENTATIONS DE TERRAIN

Malgré ses promesses et ses performances en tant que technique de restauration, des lacunes significatives en matière de recherche subsistent toujours pour informer la pratique de la NA. Planifier la mise en œuvre et la surveillance de manière à permettre aux données d'être collectées sans compromettre les résultats du projet serait une avancée extrêmement précieuse pour le domaine. Cette section définit six questions de recherche principales, ainsi que des directives pour l'usage de la mise en œuvre sur le terrain pour y répondre.

1. Quelles sont les meilleures combinaisons d'espèces d'arbres à utiliser ?

Peu de recherches ont évalué l'impact de l'usage de différentes combinaisons d'espèces en îlots forestiers (mais on peut se référer à (85) et à l'exemple de cas n° 3). De subséquents travaux pourraient tester différentes combinaisons d'espèces avec différentes caractéristiques fonctionnelles.

- Quel est l'équilibre optimal entre les espèces de remplacement précoces et tardives dans les îlots forestiers ?
- Existe-t-il des avantages significatifs à obtenir en ajoutant davantage d'espèces ?
- Y a-t-il un bénéfice supplémentaire dans l'ajout de plantes non arborées telles que les arbrisseaux, les herbes et les épiphytes dans les plantations NA ?

2. Quelle importance revêt la plantation d'espèces avec des graines zoophores pour attirer les disséminateurs ?

Les anciens travaux ont démontré que les animaux disséminent tout de même les semences vers les parcelles n'ayant aucune espèce fournissant de bons fruits (22), ainsi qu'un effet minimal concernant le fait de planter des arbres anémophores plutôt que zoophores sur le recrutement de plantules (99). Mais il est raisonnable de penser que les ressources alimentaires accroissent l'efficacité de la NA. Davantage d'exemples et de comparaisons sont nécessaires dans différents contextes.

3. Comment les différentes configurations de plantation affectent la régénération à l'intérieur et à l'extérieur des îlots forestiers ?

- Comment les différentes formes des îlots forestiers affectent-elles les résultats écologiques ?
- Comment le renouvellement forestier se comporte-t-il dans les zones plantées avec les îlots forestiers par rapport aux parcelles linéaires ?
- La distance entre les îlots forestiers affecte-t-elle l'expansion de ces derniers ?
- La distance des arbres entre les arbres plantés au sein des îlots affecte-t-elle l'expansion des îlots forestiers ?

- Quels sont la configuration et l'espacement optimums des îlots forestiers ?
- L'espacement doit-il être égal, ou doit-il y avoir des clusters d'îlots forestiers ?
- De quelle distance les îlots peuvent-ils être espacés ?

4. Comment et avec quelle efficacité la NA fonctionne-t-elle dans une gamme de types de forêts tropicales ? (par exemple, forêt de haute altitude, forêt sèche, mangrove) ? La plupart des recherches sur la NA ont été réalisées sur des forêts de contreforts montagneux ou de forêts plus basses (47, 100). Les questions concernant l'espacement peuvent varier selon les différents types de forêts ou les régions biogéographiques.

5. Avec quelle efficacité fonctionne la NA sur des échelles plus grandes (idéalement, des surfaces supérieures à 5000 ha) ; cependant, des études à échelle moyenne (> 100 ha) seraient aussi utiles. Il n'y a actuellement aucune étude déterminant l'efficacité de la NA sur de plus grandes échelles.

- Quelles conditions paysagères sont les plus appropriées pour utiliser la NA à grande échelle ?
- Quels ratios taille des parcelles sur espacement sont les meilleurs pour des NA à grande échelle ?

6. Avec quelle rapidité les nucléis se propagent-ils dans différents écosystèmes ? Une manière potentielle d'évaluer cela, serait d'utiliser des vols et des images de drones afin d'estimer la surface de la canopée sur plusieurs années. Cela sera le plus utile au cours des premières années, lorsqu'on peut voir clairement ce qui fait partie ou non de la canopée.

DÉFINIR LA NA COMME EXPÉRIENCE APPLIQUÉE

Chaque effort de restauration peut servir d'expérience afin d'informer un travail futur. Souvent, les projets sont mis en œuvre sans planification ni suivi pour apprendre de la pratique. Mais dans le cadre d'un programme

de surveillance, les projets peuvent améliorer leur capacité de contribution sur le terrain grâce à une quantité minimale d'effort supplémentaire. L'objectif doit être intégré au cours du stade de planification.

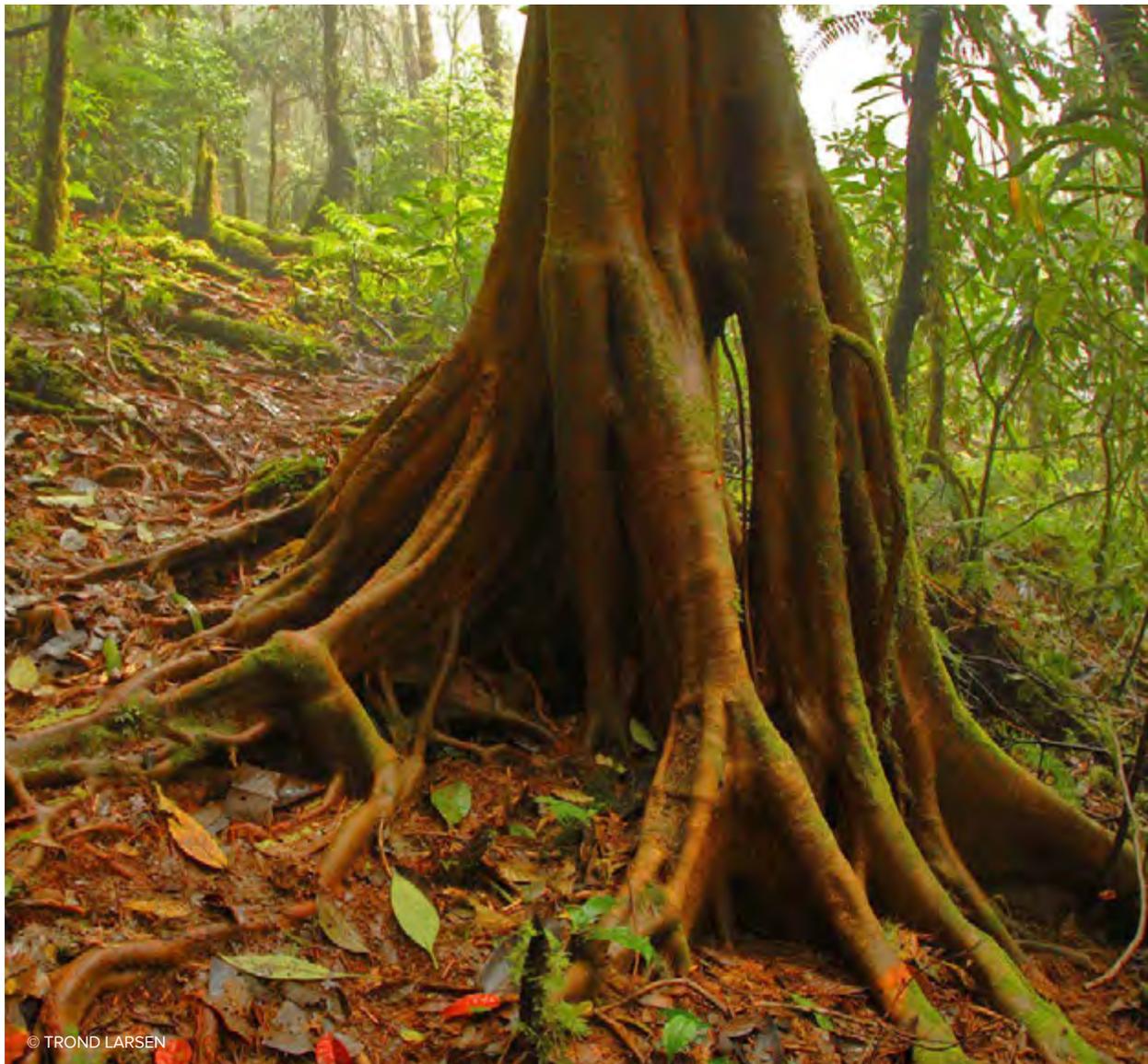
CONSIDÉRATIONS BASIQUES POUR DÉFINIR LA NA COMME EXPÉRIENCE APPLIQUÉE :

1. Afin de comprendre l'efficacité de la NA par rapport aux autres méthodes de restauration commune, **la mise en œuvre doit inclure trois traitements basiques :**
 - A. un contrôle en régénération naturelle (RN),

- B. une zone plantée en utilisant des plantations de style plantations standards et/ou des plantations en parcelles. Les espèces utilisées ainsi que les autres méthodes doivent être consignées.

- C. Une zone avec des traitements NA. La conception doit être consignée, ainsi que les espèces utilisées.

Les coûts doivent aussi être consignés pour chaque technique. Notez que la surface de chacune ne doit pas nécessairement être la même - même les petites zones de RN et de plantations peuvent être utilisées comme point de comparaison avec la NA.



© TROND LARSEN

2. **Les traitements doivent être appliqués dans les espaces ayant des caractéristiques** environnementales similaires, dans la mesure du possible, telles que l'historique d'usage du terrain, la distance jusqu'aux vestiges forestiers, la pente, l'aspect et l'altitude. Tous ces attributs doivent être consignés, parallèlement au type forestier, à la pluviométrie, et tout autre attribut écologique pertinent du site. Alternativement, il doit y avoir assez de sites de réplification pour prendre en compte la variabilité dans le paysage.
3. **Afin de comprendre les différentes configurations des îlots forestiers** (par exemple, différentes distances entre les îlots) **ou des assemblages d'espèces plantées** (c'est-à-dire utiliser différentes combinaisons d'espèces), les parcelles de NA doivent être divisées en différents types de NA. Voir aussi les exemples de cas à la fin de ce guide.
4. **Au minimum, les expériences écologiques nécessiteront la surveillance :**
 - A. du couvert de canopée
 - B. du nombre ainsi que de l'identité des espèces des arbres en régénération après cinq années (et idéalement avec des intervalles plus longs, par exemple 10 – 15 ans).

Idéalement, les expériences écologiques devront aussi :

 - C. identifier les individus en régénération par mécanisme de dispersion afin de comprendre l'effet de la NA sur les processus de remplacement. Il peut aussi s'avérer utile de classer le « statut de remplacement » si les informations sont disponibles.
 - D. surveiller les autres aspects du renouvellement forestier, en particulier s'il y a une expertise locale pouvant être utilisée (à savoir des enquêtes sur les oiseaux, les plantes ou les arthropodes).
 - E. Relever le coût de mise en œuvre et des traitements de maintenance, y compris les fournitures, la main-d'œuvre et le transport.

5. **Jusqu'à présent, les éléments sociaux de l'application de la NA n'ont pas été systématiquement examinés.** Il pourrait être utile de collecter des données sur :
 - A. la manière dont cette technique est perçue par les communautés locales,
 - B. la rapidité et en quelles circonstances celle-ci est adoptée (par exemple, sur les fermes privées),
 - C. les enjeux spécifiques de la mise en place de la NA dans une variété de contexte, et
 - D. les résultats sur les modes de subsistance et l'usage de la terre.

Consigner le processus de mise en œuvre constitue une étape importante vers l'obtention des données sociales. Les techniques d'appréciation participatives - importantes pour les phases de planification dans de nombreux contextes - peuvent aussi être utilisées pour évaluer les conditions de base et mesurer le suivi après la mise en place. Même s'il n'est pas possible de définir des projets avec une composante expérimentale, la surveillance régulière en utilisant des procédures standardisées est importante pour en apprendre davantage d'après les projets individuels et faire des comparaisons entre les différents projets.



SECTION 9 :

RESSOURCES

Ci-dessous se trouve une liste des outils et des ressources délivrées dans les autres sections de ce guide, plus d'autres ressources générales.

RESTORING FORESTS FOR CLIMATE CHANGE MITIGATION. CI: CONSERVATION INTERNATIONAL, FORTHCOMING.

[Society for Ecological Restoration \(SER\) Project Database.](#) *SER.*

Ces ressources délivrent une base de données de projets de restauration à travers différentes régions et écosystèmes et visent à faire office de ressources pour les praticiens et les acteurs potentiels. La base de données est consultable ou peut être filtrée par biome, région, pays, écosystème, ou cause de dégradation. Les descriptions de projets incluent généralement un aperçu, le créneau temporel, une définition du problème, la planification et la conception, les activités et les résultats du projet, les leçons clés, la gestion à long terme, et le financement.

[Restoration Opportunities Assessment Methodology \(ROAM\).](#) *IUCN: International Union for Conservation of Nature & WRI : World Resources Institute.*

Le ROAM délivre un cadre, un processus, ainsi que des outils pour aider à identifier les zones prioritaires pour la restauration au niveau national ou infra national et à les analyser pour trouver le meilleur type d'intervention possible. Pour chaque type d'intervention possible, une évaluation peut quantifier les coûts et les bénéfices, estimer les valeurs de piégeage du carbone, analyser les options de financement, déterminer « l'aptitude à la restauration », et répondre à la politique existante ou au bloc institutionnel afin d'améliorer la planification et la mise en place de la restauration.

Directives pour la restauration du paysage forestier dans les tropiques. *ITTO: International Tropical Timber Organization, 2020.*

Ces directives, se basant sur les Directives ITTO de 2002 pour la restauration, la gestion et la réhabilitation des forêts tropicales secondaires et dégradées, délivrent une expertise politique et technique pour les personnes mettant en place ou intéressées par la restauration du paysage forestier. Un certain nombre d'éléments de guidage sont présentés pour structurer les interventions et les actions recommandées afin de suivre les six principes centraux de la restauration du paysage forestier. Cela inclut aussi 18 études de cas sur la restauration des régions tropicales, et il existe aussi une note de politique affiliée.

Primer for Ecological Restoration. *Holl, K., Island Press, 2020.*

Ce livre introduit les bases de la planification, de la surveillance et de la gestion adaptative d'un projet de restauration écologique. Il explique les facteurs abiotiques tels que le relief, le sol et l'hydrologie, et couvre d'autres sujets tels que les espèces invasives ainsi que les considérations légales et financières. De plus amples lectures ou références recommandées pour chaque chapitre, une liste d'études de cas, ainsi que d'autres ressources d'apprentissage sont aussi incluses.

Implementing Forest Landscape Restoration: A practitioner's guide. *Stanturf et al., IUFRO: International Union of Forest Research Organizations, 2017.*

Un guide pour l'approche de restauration du paysage forestier systématique depuis la mise en place jusqu'à la surveillance, principalement au niveau paysager, avec un accent porté sur l'adaptation et la mutilation du changement climatique, présenté par l'IUFRO. Ceci délivre des directives pratiques pour les praticiens et les acteurs dans un contexte local. Il est organisé en modules qui couvrent le « démarrage », la navigation dans les enjeux de gouvernance, la conception d'un projet de restauration, les aspects techniques de la mise en œuvre, de la surveillance, et plus.

Sustainable Forest Management (SFM) Toolbox. *FAO: Food and Agricultural Organization of the United Nations.*

Le SFM Toolbox de FAO est un hub d'informations pour les acteurs investis dans la gestion forestière durable. Il inclut une variété d'outils, de cas, ainsi que d'autres ressources organisés en modules. Les modules incluent des sujets techniques, tels que l'agroforesterie, la restauration forestière et paysagère, ou la planification de la gestion forestière, en parallèle de modules non techniques sur la gouvernance forestière, la gestion collaborative d'un conflit et bien plus.

Le mécanisme de restauration forestier et paysager. *FAO: Food and Agricultural Organization of the United Nations.*

Le FAO a établi le Mécanisme de restauration paysager et forestier (MRPF) en 2014 pour soutenir les activités de planification, de mise en place d'une surveillance de la restauration du paysage forestier dans les pays comme moyen de contribution pour atteindre les Objectifs Aichi et du Bonn Challenge sur la biodiversité. Le MRPF inclut des communautés en ligne interactives de pratiques pour faciliter le partage de connaissances et la communication, une bibliothèque de ressources, et des opportunités pour prendre des cours.

Reforestation, Nurseries, and Genetic Resources. *USDA: United States Department of Agriculture, Forest Service and Southern Regional Extension Forestry*

Ce programme, sponsorisé par le Département de l'agriculture américain, services forestiers, délivre des informations pour les personnes cultivant des plantules dans des objectifs de foresterie ou de conservation. Leur section sur les pépinières tropicales inclut une liste de publications ainsi que divers manuels pour guider le travail avec les plantes tropicales.

Lien vers le document de référence des études de cas : <https://docs.google.com/document/d/1sYnH0GUfCjBxpBWNZVCR-TceKU12C8A2eOCVA084-10/edit?usp=sharing>



SECTION 10 :

EXEMPLES DE CAS

EXEMPLE DE CAS N° 1 :

Îlots arborés dans la forêt tropicale en contrefort montagneux du Costa Rica méridional. Karen Holl (University of California, Santa Cruz) ; Rakan Zahawi (Lyon Arboretum et School of Life Sciences, University of Hawaii à Mānoa).

Contexte : Cette expérience a démarré au Costa Rica méridional en 2004 – 2006 afin de comparer l'efficacité écologique à long terme de la nucléation appliquée par rapport à la régénération naturelle ainsi qu'à une plantation d'arbres de style plantation plus intensive. L'étude a été principalement définie comme expérience scientifique, mais les auteurs ont travaillé avec de nombreux propriétaires de terres locaux qui ont accepté de recevoir l'expérimentation sur leurs terres et qui ont été impliqués dans divers programmes à portée éducative dans la région. La région d'études est principalement un paysage agricole avec des pâturages extensifs ainsi que quelques fermes à café, avec des parcelles de vestiges forestiers parsemés. Les sites utilisés dans l'expérience ont tous été précédemment utilisés pour l'agriculture pendant plus de 18 ans (principalement pour le pâturage de troupeaux ou la production de café), et au moment de la mise en place, ils étaient recouverts d'herbes exotiques ou de mélange d'herbes, d'herbes non graminéennes et de fougères.

Mise en œuvre, conception et coût de la nucléation appliquée : L'expérience a été menée dans la zone forestière des contreforts montagnes dans le Costa Rica méridional sur des sites dont l'altitude variait entre 1100 et 1430 m, et recevant entre 3500 et 4000 mm de pluie chaque année. Un total de 18 sites de 1 ha ont été originellement établis, dont 12 toujours actifs en 2020. Sur chaque site, trois parcelles de 50 par 50 m ont été établies, chacune avec un traitement : la nucléation appliquée, la plantation d'arbres de type plantation, ou la régénération naturelle sans intervention (figure 1). Il y avait trois différentes tailles d'îlots forestiers plantés au sein de chaque parcelle de nucléation appliquée (4 x 4, 8 x 8, et 12 x 12 m). Quatre espèces d'arbres ont été plantées, deux espèces natives, *Terminalia amazonia* et *Vochysia guatemalensis*, et deux espèces naturalisées fixa triste de l'azote communément utilisé dans les systèmes de culture intercalaire, *Erythrina poeppigiana* et *Inga edulis* (Holl et

al., 2017, 2020). Ces quatre espèces ont été sélectionnées en se basant sur 1) les taux de croissance et de survie élevée ainsi que la provision d'un couvert de canopée substantiel au cours de leurs toutes premières années, 2) la disponibilité dans les pépinières locales, et 3) l'usage commun dans les systèmes d'agroforesterie ou autres systèmes de restauration en Amérique centrale (Holl et al., 2011). Les plantules faisaient 20 à 30 cm de haut au moment de la plantation. Au total, 313 plantules ont été plantées dans les parcelles de plantation, 86 dans les parcelles d'îlots forestiers, et 0 dans les parcelles de contrôle. La végétation a été déboisée des parcelles avant la plantation, puis déboisée de manière continue à environ trois mois d'intervalle au cours des premiers 30 mois pour favoriser la croissance des plantules par rapport aux herbes. Holl and Zahawi (2018) estiment les coûts de plantation et de maintenance pour la nucléation appliquée à 357 - 620 USD par hectare par rapport à 1 462 - 2 282 USD par hectare pour les plantations.

Les auteurs ont collecté une grande quantité de données au cours des 15 dernières années sur le renouvellement végétatif, y compris la survie et la croissance des arbres plantés ; la structure, la croissance, la survie et le recrutement de la végétation ligneuse ; ainsi que la richesse en espèces épiphytes. Ils ont aussi collecté des données en abondance, richesse, et composition des espèces d'oiseaux, de chauves-souris, et d'insectes utilisateurs de feuilles, ainsi qu'en dissémination des graines, sur les insectes herbivores présents sur les plantules, la biomasse et les nutriments relatifs à la litière. Ces résultats sont résumés dans Holl et al. (2020)

Résultats : Les résultats ont montré que la nucléation appliquée était bien plus efficace que la régénération naturelle et similaire à la plantation, en termes de couvert de canopée, de recrutement en espèces, et autres métriques clés (Holl et al., 2020).

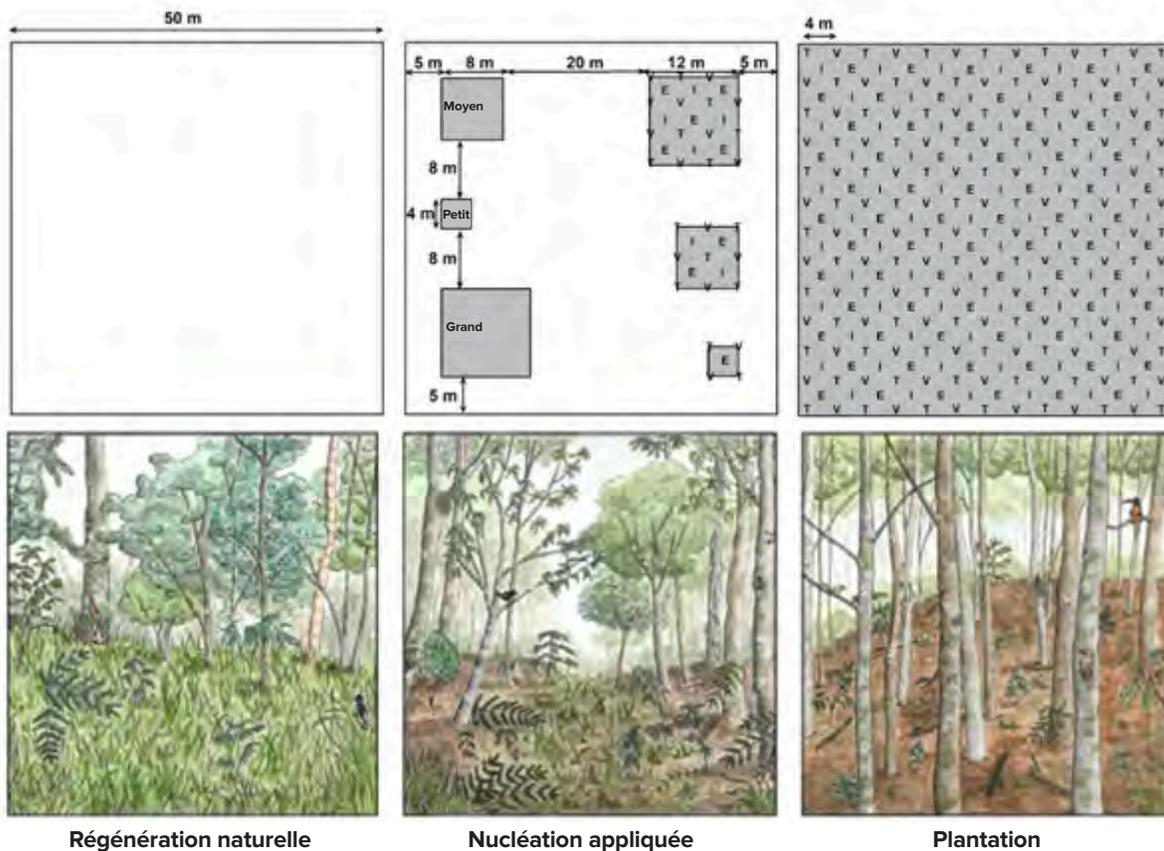


Figure 1 : De Holl et al. (2020). Les panneaux supérieurs détaillent le conception de plantation originale et les panneaux inférieurs illustrent les parcelles après 15 ans, en montrant à la fois la végétation plantée et naturelle. Dans les panneaux supérieurs, les zones grisées ont été plantées avec *Erythrina poeppigiana* (E), *Inga edulis* (I), *Terminalia amazonia* (T) et *Vochysia guatemalensis* (V). Sm = petit (small) ; Med = médium. *Crédit artistique : Michelle Pastor*

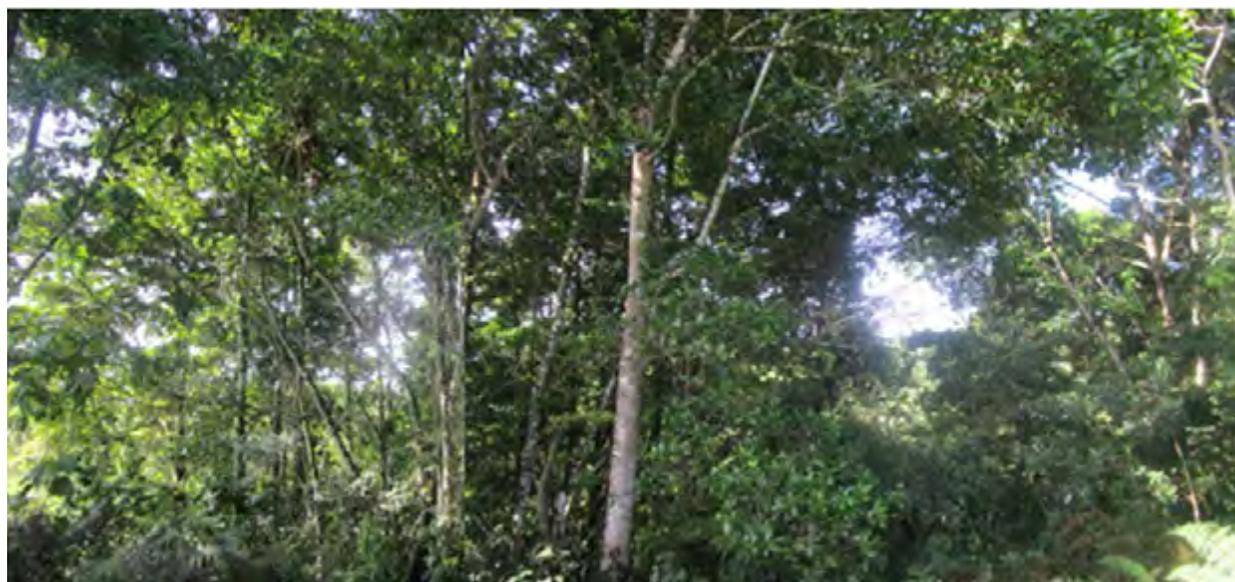


Figure 2 : Parcelle de nucléation appliquée. La végétation est un mélange d'arbres plantés et naturels. *Crédit photo : Karen D. Holl*

La régénération naturelle a eu la plus faible densité en arbres à grosses graines zoophores, et les forêts de référence dans les alentours du site avait dit plus haut, tandis que pour la nucléation appliquée et les plantations, les niveaux étaient intermédiaires (voir Figure 3). Après 15 années, il y avait encore quelques espèces à remplacement tardif dans toutes les parcelles de traitement, mais cela indique largement l'évolution et le processus pluridécennal de la régénération d'une forêt. Les données concernant l'abondance des oiseaux et des chauves-souris, les arthropodes de litières foliaires, la richesse en épiphytes, la production de litière foliaire, et les nutriments

de résidus de litière étaient similaires ou équivalentes entre les parcelles de plantation et de nucléation appliquée, et supérieures aux parcelles en régénération naturelle (Figure 3).

Les résultats de cette étude ainsi que de celle de Zahawi and Augspurger (2006), qui ont étudié l'annulation appliquée dans les forêts tropicales du Honduras, montrent que les nucléis arboricoles plus grands (64 et 144 m² de surface plantée) ont des taux de visite par les oiseaux, de dispersion des graines zoophores et de recrutement de plantules bien supérieurs à ceux des nucléis plus réduits (4 et 16 m²) (Fig. 4A et B). Ce résultat était certainement dû à un

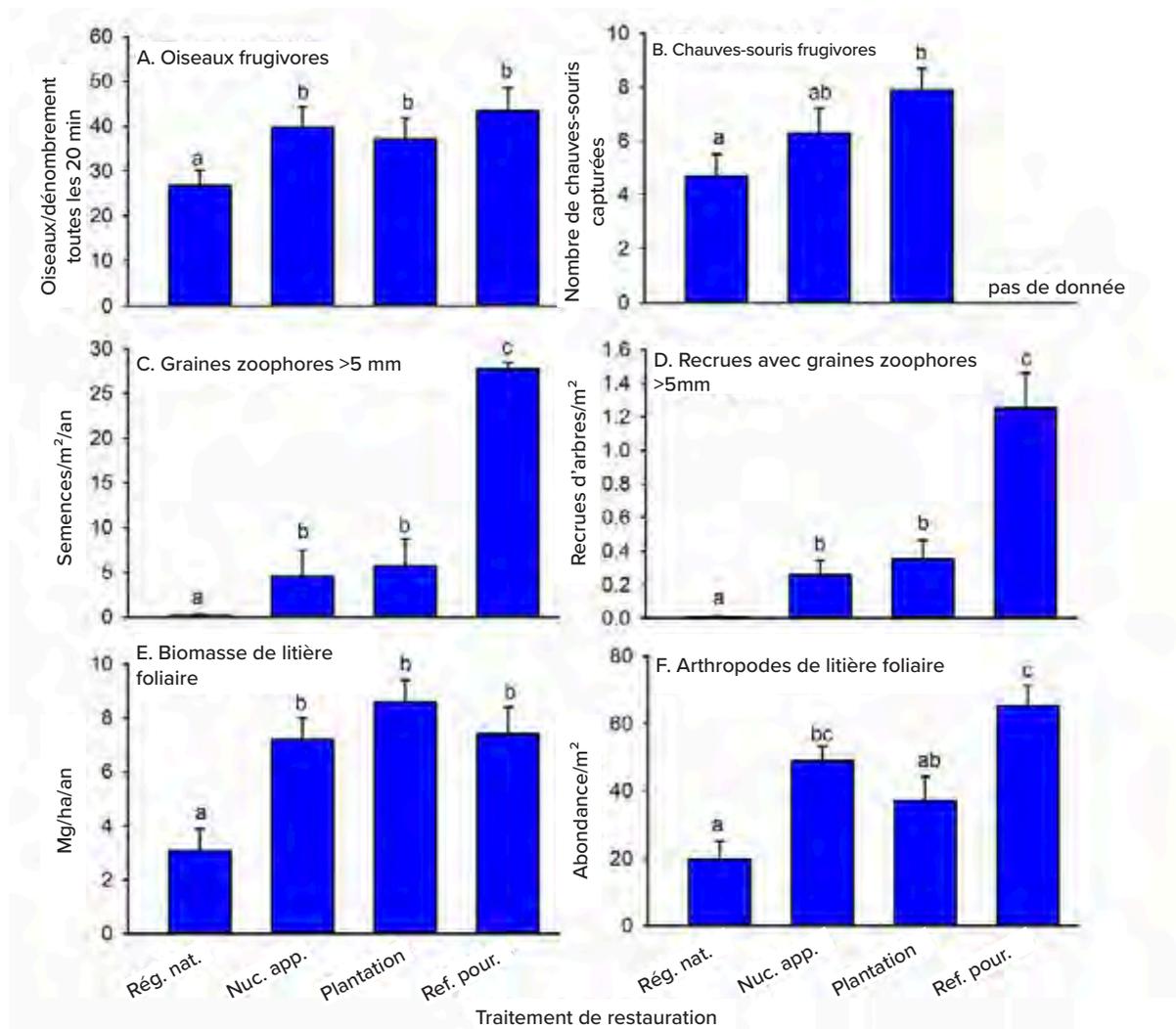


Figure 3 : Modifié de Holl et al. (2020). Réponses des variables écologiques aux traitements de restauration forestière. (A) Abondance en oiseaux frugivores ; (B) Abondance en chauve-souris frugivores (C) ; Abondance de graines zoophores > 5 mm (D) ; Abondance de recrutements en graines zoophores > 5 mm ; (E) Biomasse en litière foliaire (F) ; Arthropodes de litière foliaire en 2012. Les valeurs correspondent à la M ± 1 E.T. Les moyennes avec la même lettre n'ont pas de différence significative en utilisant le test de comparaison multiple de Tukey parmi les traitements.

pourcentage plus élevé de couvert de canopée dans les nucléis moyens et gros, couvert qui attire les disséminateurs et font de l'ombre aux herbes de pâturage hautement compétitives et demandeuses de lumière. Malgré une plantation de seulement 27 % du nombre de plantules d'arbres dans les parcelles de nucléation appliquée, un couvert de canopée > 2 m a substantiellement augmenté jusqu'à 45,5 % ± 9,0 % dans ces parcelles, par rapport aux 14,2 % ± 6,1 % dans les parcelles de régénération naturelle et 78,2 % ± 9,1 % dans les parcelles de plantation après sept à neuf années.

Leçons apprises : Globalement, cette étude a démontré que la nucléation appliquée peut améliorer le recrutement des arbres et la diversité des espèces en comparaison à la régénération naturelle, avec des résultats écologiques similaires par rapport à la plantation d'arbres de style plantations, mais à un coût bien moindre. Le couvert forestier environnant a montré avoir un effet réduit sur le recrutement, et au lieu de cela, les conditions

du site local ont été jugées comme étant un facteur plus important, indiquant que la nucléation appliquée peut potentiellement être efficace dans différents contextes paysagers (Holl et al. 2017).

Bien qu'écologiquement efficaces, certains propriétaires de terrains ont perçu la nucléation appliquée et la régénération naturelle comme « désordonnées » et pas aussi « productives » que la plantation d'une zone entière avec des arbres. Nous avons dû être vigilants concernant la prévention contre l'entrée du bétail, en particulier dans les parcelles de nucléation appliquée et de régénération naturelle, où l'herbe plus abondante était perçue comme inutilisée par les fermiers. En effet, la nucléation appliquée est probablement la plus appropriée dans les vastes surfaces de terre qui sont désignées pour des objectifs de conservation, et qui nécessiteront des discussions intensives avec les propriétaires des terres pour être utilisées dans les paysages de travail.

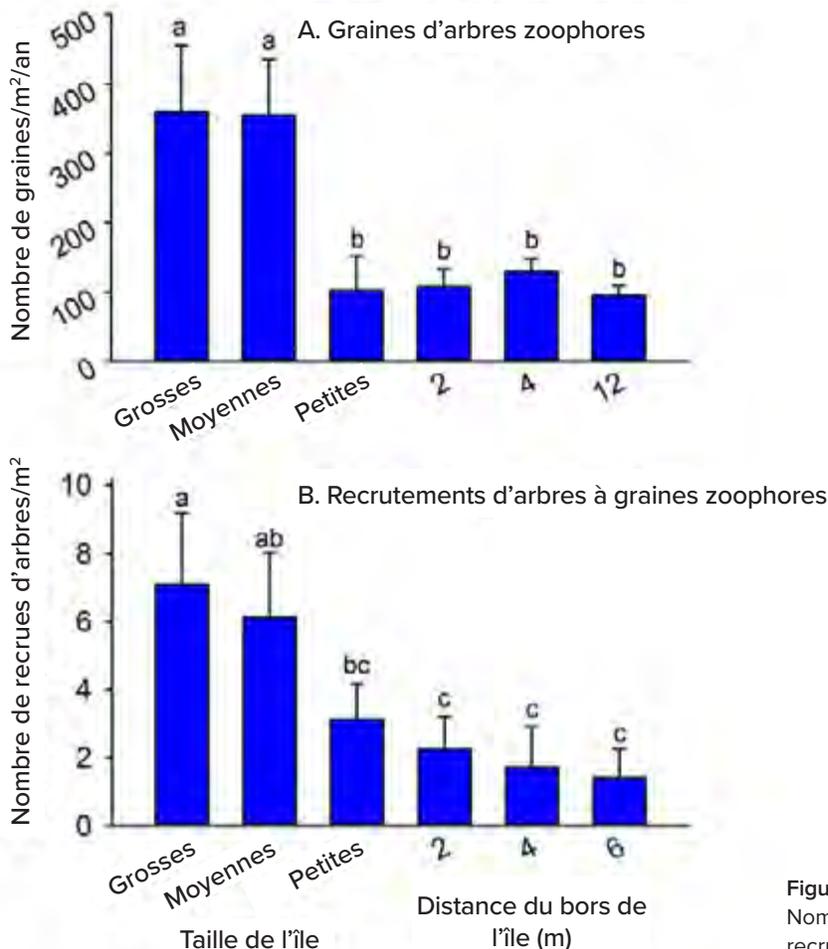


Figure 4 : Modifié de Holl et al. (2020). Nombre de (A) graines zoophores, (B) recrues d'arbres.

Pour davantage d'informations et de publications, visiter holl-lab.com/tropical-forests.html et vous pourrez visualiser la vidéo du projet en [anglais](#) ou en [espagnol](#).

Références :

- Holl, K. D., Zahawi, R. A., Cole, R. J., Ostertag, R., & Cordell, S. (2011). Planting Seedlings in Tree Islands Versus Plantations as a Large-Scale Tropical Forest Restoration Strategy. *Restoration Ecology*, 19(4), 470–479. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00674.x>
- Holl, K. D., Reid, J. L., Chaves-Fallas, J. M., Oviedo-Brenes, F., & Zahawi, R. A. (2017). Local tropical forest restoration strategies affect tree recruitment more strongly than does landscape forest cover. *Journal of Applied Ecology*, 54(4), 1091–1099. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12814>
- Holl, K. D., & Zahawi, R. A. (2018). Applied nucleation is a straightforward, cost-effective forest restoration approach: Reply to Ramírez-Soto et al. (2018). *Restoration Ecology*, 26(4), 618–619. <https://doi.org/10.1111/rec.12701>
- Holl, K. D., Reid, J. L., Cole, R. J., Oviedo-Brenes, F., Rosales, J. A., & Zahawi, R. A. (2020). Applied nucleation facilitates tropical forest recovery: Lessons learned from a 15-year study. *Journal of Applied Ecology*, 57, 2316–2328. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13684>
- Reid, L. (2016, Nov. 3). Tree islands for tropical forest restoration: the outlook is rosy after 10 years. *Natural History of Ecological Restoration*. <https://mbgecologicalrestoration.wordpress.com/2016/11/03/tree-islands-for-tropical-forest-restoration-the-outlook-is-rosy-after-10-years/>
- Zahawi, R. A., & Augspurger, C. K. (2006). Tropical Forest Restoration: Tree Islands As Recruitment Foci In Degraded Lands Of Honduras. *Ecological Applications*, 16(2), 464–478. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[0464:TFRTIA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[0464:TFRTIA]2.0.CO;2)

EXEMPLE DE CAS N° 2 :

Nucléation pour évaluer l'effet de la densité de plantation et de la taille foliaire sur les performances de plantation et de régénération de l'ajonc (*Ulex europaeus*). Iván Rodríguez (Universidad Distrital) ; Juan Garibello (Instituto Humboldt) ; Ángela Parrado (Universidad Distrital).

Contexte : Expérience a été menée dans les collines orientales de Bogotá, Colombie, à 3 200 m d'altitude, dans l'écotone situé entre la forêt de la zone des brouillards des contreforts montagneux supérieurs et les fruticées inférieures de Páramo. Les précipitations annuelles sont de 1 200 mm et les sols sont volcaniques. Le site est détenu par la municipalité, mais a été illégalement occupé pour la production de pommes de terre et de bétail entre 2000 et 2012. Par conséquent, il y a eu une sévère invasion par les ajoncs (*Ulex europaeus*) sur plus de 19 ha. Les objectifs de gestion incluent l'élimination des fourrés d'ajoncs dans différents états de développement, limitant la régénération des ajoncs, introduisant de la végétation native pouvant faire une meilleure compétition que les ajoncs, et facilitant la participation et l'habilitation des membres de la communauté locale.

Mise en œuvre, conception et coût de la nucléation appliquée : Notre expérience a été établie en 2017. Préalablement à cela, à partir de 2012, le gouvernement local a restauré le site en défrichant périodiquement les ajoncs et en plantant des arbres natifs. Nous avons utilisé la nucléation appliquée en fonction de sa caractéristique peu onéreuse, et des mauvaises performances des arbres précédemment plantés (dans le schéma

traditionnel avec cinq à dix mètres entre les individus). La zone d'étude couvrait 19 ha, et la nucléation a été appliquée sur plus de 5 ha en incluant 200 « îlots forestiers » ou nucléi. Chaque îlot circulaire faisait 6 m de diamètre avec une distance de six à dix mètres entre les îlots (Figure 1), et densément peuplé avec des arbres. Nous avons installé six répliquats de chaque traitement avec une combinaison de deux facteurs : 1) la densité de plantation (1,1 m et 0,9 m de séparation) et 2) composition de l'assemblage des espèces en fonction de la taille des feuilles. La régénération des ajoncs peut être affectée par des plantations denses (Díaz & Vargas, 2009) - nous avons donc testé différentes densités de plantation : 0,9 et 1,1 m entre les arbres plantés (Figure 2). La densité la plus faible utilise 33 % d'arbres en moins et réduit les coûts de mise en œuvre. Nous avons planté des plantules d'arbres natives délivrées par des pépinières locales opérées par le gouvernement. Nous avons utilisé la taille ou la surface des feuilles - initialement évaluées à l'œil - comme proxy pour d'autres caractéristiques, telles que la taille de la plante (Pérez-Harguindeguy et al., 2016) qui en retour, peuvent être associées à une capacité compétitive (Reynolds, 1999). Les îlots ont été plantés avec trois traitements de taille de feuilles : (1) espèces à grandes feuilles (= 36,7 ; E.T. = 4,7 cm²), (2) espèces à petites feuilles



Figure 1 : Vue panoramique des nuclei et du site de l'étude à la frontière entre la zone urbaine de Bogotá et ses collines orientales (photo par Iván Rodríguez en 2018 un an après la plantation).

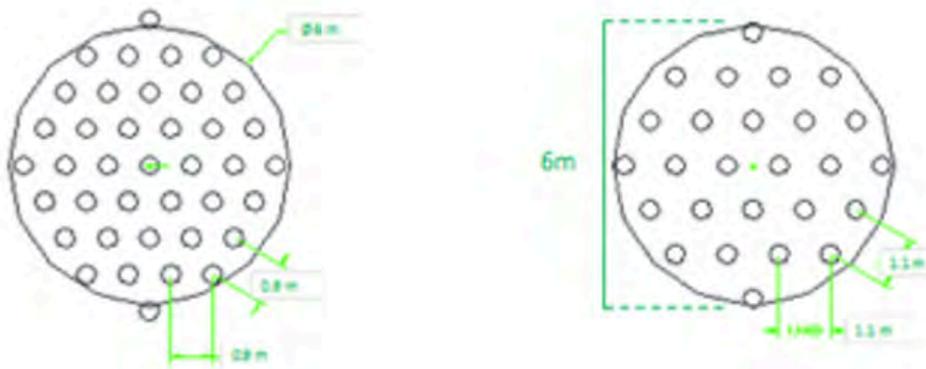


Figure 2 : Diagramme des nucléi plantés. Gauche. Nucléus de haute densité (0,9 m entre les plantules). Droit. Nucléus à densité plus faible (1,1 m entre les plantules)

(= 3,2 ; E.T. = 0,5 cm²) et (3) une combinaison des deux (= 22,0 ; E.T. = 2,6 cm²).

Nous avons aussi établi des parcelles de contrôle dans lesquelles aucune plantation n'a été réalisée. À la fois dans les sites contrôles et les îlots forestiers, le jonc a été retiré juste avant la plantation, 15 mois plus tard et deux années plus tard après la surveillance. Le coût d'établissement de 200 nucléi était approximativement de 23 000 USD. Ce montant inclut les équipes, la propagation et le transport des arbres, mais pas la surveillance.

Pour mettre en œuvre son programme de restauration à Bogotá, le gouvernement local recrute une population vulnérable qui inclut des personnes sans domicile, sans emploi, africaines, indigènes ainsi que des minorités LGBT. Grâce à cette approche, plusieurs des personnes employées ont obtenu des diplômes techniques dans les domaines environnementaux afin d'avancer avec le programme et faire progresser leur carrière.

Résultats : social et écologique Nous avons mesuré la régénération des ajoncs, le recrutement des arbres, et la performance des individus plantés. Après analyse des données grâce à des modèles linéaires, voici des résultats écologiques ci-dessous 24 mois après la plantation :

- la NA a réussi à augmenter le recrutement d'arbres : les gaules ont été recrutées sous

les îlots forestiers, mais pas dans les zones en régénération.

- Différents traitements ont eu différents niveaux de recrutement en arbres et ont réduit le couvert herbacé : Les nucléi à haute densité à grandes feuilles (= 23,7 ; E.T. = 8,4) et les nucléi de faible densité avec une combinaison de tailles de feuilles (= 7,2 ; E.T. = 2,9 pousses par nucléi) ont eu les abondances les plus élevées en matière de recrutement d'arbres. Le couvert herbacé a aussi été réduit de 11 à 29 % dans les nucléi plantés par rapport à la régénération naturelle ($p < 0,0001^2$). Les contrôles de régénération naturelle sont co-dominés par les herbes non natives *Holcus lanatus* et *Pennisetum clandestinum*.
- Les arbres ont grandi plus haut dans les nucléi de plus faible densité avec des espèces à feuilles plus grandes (= 100,8 ; E.T. = 9,6 cm) et ont été plus courts dans les nucléi denses avec des espèces à petites feuilles (56,7 ; E.T. = 2,9 cm). Les arbres dans tous les autres traitements avaient une hauteur similaire (= 75,6 ; E.T. = 2,7 cm).³
- La NA a augmenté le recrutement en ajoncs par rapport au contrôle en régénération naturelle, probablement parce que la suppression de l'herbe et la perturbation du sol pour la plantation des

² après régression linéaire avec une distribution binomiale des erreurs

³ selon les comparaisons jumelées après régression linéaire ($F = ; 7,194 p < 0,0001$).

arbres ont créé des conditions favorables pour l'ajonc.

- Parmi les traitements NA, les nucléi de densités inférieures et les espèces à petites feuilles possèdent le meilleur potentiel pour conserver la régénération des ajoncs à des niveaux inférieurs (Figure 3).
- La restauration à la zone d'étude a utilisé environ 120 personnes des minorités vulnérables depuis 2007. 30 lycéens ont aussi participé pour développer des compétences en recherche ainsi qu'un engagement dans les problèmes environnementaux (Figure 4), et plus de 20 groupes de membres de la communauté locale ont été formés au contrôle des ajoncs en dehors de la zone d'étude, et aussi à détecter et à faire état des incendies.

Enjeux et leçons apprises : Conseil basé sur ces résultats pour un travail futur de NA.

- Les nucléi les moins denses (densité de plantation de 1,1 m) sont plus efficaces pour contrôler la régénération des ajoncs et possèdent des taux de croissance plus rapides sur les arbres. Les nucléi moins denses coûtent aussi environ 30 % moins

cher que les nucléi les plus denses - mais de par le fait des impacts sociaux positifs dus à l'effort, nous recommandons de planter des surfaces plus grandes avec les mêmes ressources. La régénération des ajoncs était plus faible sous les espèces à petites feuilles, les espèces à grandes feuilles semblent croître plus vite. Une surveillance supplémentaire nécessaire pour déterminer s'il existe un assemblage d'espèce idéal.

- Des vaches ont été occasionnellement vues sur les sites - des négociations avec certains membres de la communauté locale sont nécessaires pour arrêter l'entrée du bétail.
- À cause de l'impact social dû à la génération d'emploi à travers son programme de restauration, le gouvernement de Bogota

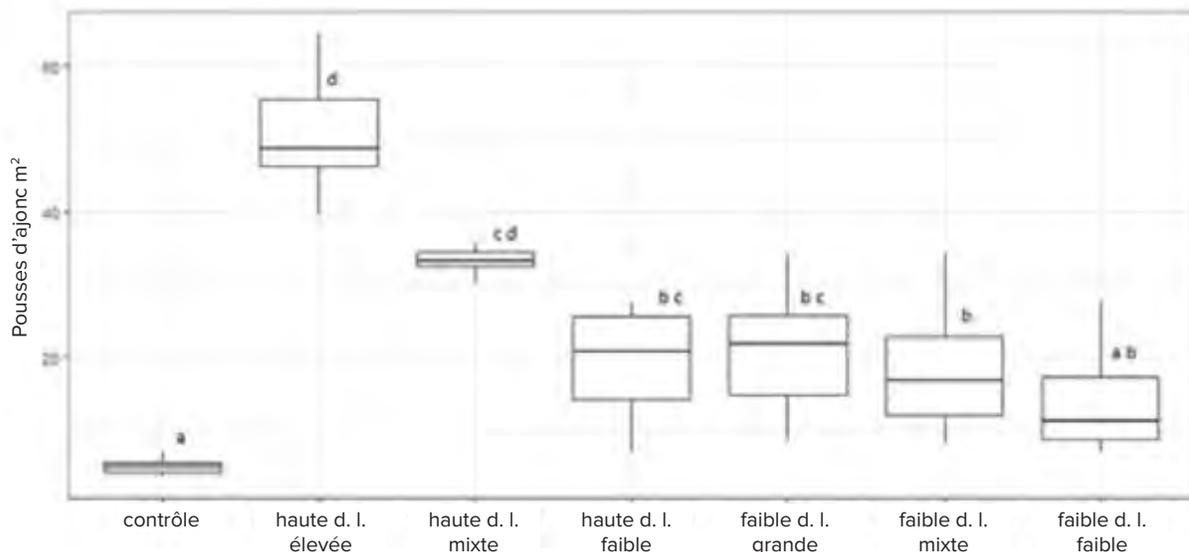


Figure 3 : Boîte à moustaches de densité des pousses d'ajonc sur les nucléi contrôle et plantés deux années après la plantation ; sur l'axe horizontal, « d » signifie « densité » et « l » signifie « feuilles » (« leaves » en anglais) des plantules plantées ; « mixed » (« mélange ») correspond à une combinaison des deux types de feuilles. Les lettres indiquent les différences après les comparaisons par test de Tukey post hoc.

A récemment augmenté le soutien financier aux agences responsables de la mise en œuvre du programme (Gobierno de Bogotá, 2020), restant dans la ligne d'une croissance soutenue depuis la création du programme de restauration en 2000 (Murcia et al., 2017).

Références :

Díaz, A., & Vargas, O. (2009). Efecto de la siembra de leguminosas herbáceas y arbustivas sobre el control en el establecimiento de la especie invasora *Ulex europaeus* L.(Fabaceae), en los alrededores de Chisacá (localidad de Usme. Bogotá DC). In O. Vargas, O León & A Díaz (Eds.), *Restauración ecológica en zonas invadidas por retamo espinoso y plantaciones forestales de especies exóticas* (pp. 93-130). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Gobierno de Bogotá (2020). Proyecto de acuerdo no 123 de 2020 segundo debate. http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/edici_n_3001_pa_123_sd_de_2020.pdf

Murcia, C., Guariguata, M. R., Peralvo, M., & Gálmez, V. (2017). *La restauración de bosques andinos tropicales: Avances, desafíos y perspectivas del futuro*. Center for International

Forestry Research (CIFOR). <https://doi.org/10.17528/cifor/006524>

Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M. S., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Gurvich, D. E., Urcelay, C., Veneklaas, E. J., Reich, P. B., Poorter, L., Wright, I. J., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J. G., Vos, A. C. de, ... Cornelissen, J. H. C. (2016). Corrigendum to: New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 64(8), 715–716. https://doi.org/10.1071/bt12225_co

Reynolds, H.L. (1999). Plant interactions: Competition. In: Pugnaire, F.I. & Valladares, F. (Eds.), *Handbook of Functional Plant Ecology* (pp. 649–676). Marcel Dekker, Inc.



Figure 4 : Des lycéens plantant des nucléi sur la zone d'étude. (Photo par Juan Garibello)

EXEMPLE DE CAS N° 3 :

Nucléation appliquée pour la restauration des populations d'espèces d'arbres localement menacées. Juan Garibello (Instituto Humboldt) ; Iván Rodríguez (Universidad Distrital) ; Ignacio Barrera (Universidad Javeriana).

Introduction et contexte : La restauration a été entreprise dans la forêt tropicale des contreforts montagneux de basse altitude (1 200 - 1 350 m d'altitude) sur le côté ouest de Serranía de Los Yariquíes, Colombia, déclaré parc national en 2005. La restauration faisait partie intégrante d'une compensation d'entreprise pour la construction d'un barrage hydroélectrique dans la province de Santander en Colombie. Les précipitations annuelles sont d'environ 2 500 mm. La région entière a été fortement impactée par des conflits de guérillas, entre les groupes paramilitaires et les forces officielles. Les terres ont été déboisées en 1977 et ont été utilisées pour l'agriculture - la paissance des troupeaux, et les cultures de cacao, de café, d'avocat et d'agrumes - jusqu'en 2012 lorsque le service du parc national a fait l'acquisition de la ferme. Entre 2012 et 2014, le site a été affecté par le braconnage et de l'exploitation forestière occasionnelle.

Nous avons restauré deux zones différentes : 1) les anciens terrains (anciens parcs), et 2) végétation ligneuse (ci-après forêt secondaire) à différentes étapes du renouvellement. Ensemble avec la communauté locale, nous avons établi deux objectifs principaux : 1) renouveler les populations d'espèces menacées par l'exploitation forestière (dans les forêts) et 2) dans les anciens champs, établir une forêt secondaire pleinement fonctionnelle d'ici 2025. Nous avons comparé la performance de trois espèces d'arbres menacés dans la forêt secondaire et dans les nucléi plantés dans les anciens champs. Nous avons choisi la nucléation par rapport à un schéma de plantation traditionnelle principalement par ce qu'il s'agissait d'une manière plus économe pour surpasser les herbes non natives en compétition via la génération rapide d'une canopée dense.

Mise en œuvre, conception et coût de la nucléation appliquée : Le projet a été mis en place entre 2014 et 2016, dans deux sites localisés sur la même ligne de partage des eaux. Une O.N.G. basée à Bogotá était en charge de la mise en place, sous la

supervision du service du parc national et de l'entreprise responsable de la compensation. Les communautés locales ont été recrutées selon les politiques gouvernementales pour la plantation, la collecte des graines et la production de plantules, mais ont rejoint le projet plus tôt pour reconstituer l'historique d'usage de la terre et définir les stratégies et les priorités de restauration.

Nous avons établi 48 nucléi dans un ancien champ (11 - 13 ha) environné par une forêt secondaire et mature. Les nucléi étaient des cercles d'un diamètre de 25 m (soit une surface de 491 m²), plantés avec 567 plantules de 9 à 12 espèces, et placées à une distance de 30 à 40 m. Les arbres plantés étaient espacés de 1 m afin de créer rapidement un couvert de canopée pouvant surpasser en compétition les herbes non natives *Megathyrsus maximus* et *Brachiaria radicans*. 96 % des plantules étaient des espèces pionnières : les 4 % restantes étaient communément des espèces exploitées que les locaux ont identifié comme étant menacées par la surexploitation. Les herbes ont été défrichées avant la plantation et une fois par mois pendant trois mois après la plantation (Kettenring & Adams, 2011 ; Gaertner et al., 2012 ; conseil de la part des membres communautaires). Nous avons planté différentes espèces dans quatre types différents de nucléi : Type 1 - espèces abondantes sur les bordures et dans les clairières des forêts ; type 2 - arbrisseaux colonisant généralement les anciens terrains ; type 3 - arbres de la famille des Fabaceae communément trouvés dans les forêts secondaires ; et type 4 - combinaison d'espèces avec toutes les autres (Tableau 1). Dans les forêts secondaires, les espèces menacées ont aussi été plantées à 10 m d'espacement dans des rangées mono-spécifiques. La mise en place de l'intégralité du projet coûtait 824 440 USD (environ 2 550 USD/ha) (taux de change de devise : 1 USD = 3 748 pesos colombiens ; 323 ha ; plantation de 102 000 plantules). La surveillance coûtait environ 51 500 USD.

	Nucléi 1	Nucléi 2	Nucléi 3	Nucléi mixtes
Espèces pionnières	<i>Heliocarpus americanum</i> (tr) <i>Solanum aphyodendrum</i> (tl) <i>Urera bacciferat</i> (tl)	<i>Miconia</i> sp. (tl) <i>Piper aduncum</i> (tl) <i>Vismia bacciferat</i> (tl)	<i>Erythrina poeppigiano</i> (tr) <i>Inga marginata</i> (tr) <i>Inga</i> sp. (tr)	Espèces incluses dans les autres nucléi
Espèces ciblées		<i>Carapa</i> cf. <i>guianensis</i> (tr) <i>Caryodaphnopsis</i> sp. (tr) <i>Margaritaria nobilis</i> (tr) <i>Matisia</i> cf. <i>cordata</i> (tr) <i>Nectandra</i> sp. (tr) <i>Tabebuia rosea</i> (tr)		

Tableau 1 : Assemblages d'espèces formant différents types de nucléi sur la zone d'étude. (Tr) signifie « arbres » (« trees ») et tl pour arbrisseaux (« treelets »).

Résultats : social et écologique :

- 19 à 26 mois après la plantation, les nucléi avec des canopées formés principalement par *Heliocarpus americanus* et ceux avec codominance d'arbres de la famille des Fabaceae (*Inga marginata*, *Inga* sp. et *Erythrina poeppigiana*) se sont montrés plus efficaces pour faciliter la survie de nos espèces cibles par rapport au nucléi formés d'arbrisseaux qui colonisent habituellement les anciens terrains (*Miconia* sp., *Piper aduncum*, *Vismia baccifera* entre autres) et les nucléi comprenant toutes les espèces susmentionnées (Tableau 2).
- La survie des espèces cibles (*Carapa* cf. *guianensis*, *Margaritaria nobilis* et *Nectandra* sp.) était similaire entre les nucléi qui ont réussi et la forêt secondaire, mais les nucléi ont favorisé une croissance plus rapide (Figure 1).
- Le projet comprenant ces résultats a impliqué 121 personnes des communautés locales. Leur participation à la sélection des espèces végétales et à la conception des stratégies de restauration a constitué une part essentielle dans le succès du projet (Figure 2).

Enjeux et leçons apprises : Conseil basé sur ces résultats pour un travail futur de NA.

- Les nucléi de plantation avec des espèces arborées de grande taille et à croissance rapide ont mieux fonctionné que les espèces qui colonisent les anciens terrains, et promeuvent la survie et la croissance des espèces cibles.
- Les nucléi de diamètre de 25 m, la densité de plantation de 1 m entre les arbres et plusieurs défrichements des espèces invasives ont produit de bons résultats.
- Les forêts secondaires conviennent pour promouvoir la survie, mais non la croissance de nos espèces cibles. Cependant, nous maintenons que cette végétation doit aussi être incluse pour renouveler les populations ce type d'espèces de manière à contribuer à la fonction forestière.

Une vidéo en espagnol décrivant le projet est disponible sur https://youtu.be/k7_jvheKXR0

Références :

Gaertner, M., Fisher, J., Sharma, G., & Esler, K. (2012). Insights into invasion and restoration ecology: Time to collaborate towards a holistic approach to tackle biological invasions. *NeoBiota*, 12, 57–76. <https://doi.org/10.3897/neobiota.12.2123>

Kettenring, K. M., & Adams, C. R. (2011). Lessons learned from invasive plant control experiments: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 48(4), 970–979. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.01979.x>

	Forêt secondaire	Nucléi 1	Nucléi 2	Nucléi 3	Nucléi mixtes
<i>Carapa cf. guianensis</i>	0,87 (30)	1,00 (20)	0,56 (16)	1,00 (20)	0,40 (20)
<i>Margaritaria nobilis</i>	0,67 (30)	1,00 (20)	0,60 (40)	1,00 (20)	0,48 (40)
<i>Nectandra sp.</i>	0,87 (30)	1,00 (20)	0,45 (40)	1,00 (20)	0,55 (40)
Total	0,80 (90)	1,00 (60)	0,53 (96)*	1,00 (60)	0,49 (100)**

Tableau 2 : Fraction des arbres survivants d'espèces localement menacées dans différents types de végétation et nombre de parcelles de plantation évaluées (entre parenthèses) deux ans après plantation. * = $p < 0,05$ et ** = $p < 0,01$ après régression linéaire avec une distribution binomiale des erreurs dans laquelle la survie dans les forêts secondaires était comparée avec la survie dans chaque type de nucléi établi dans un ancien terrain de 10 ha.

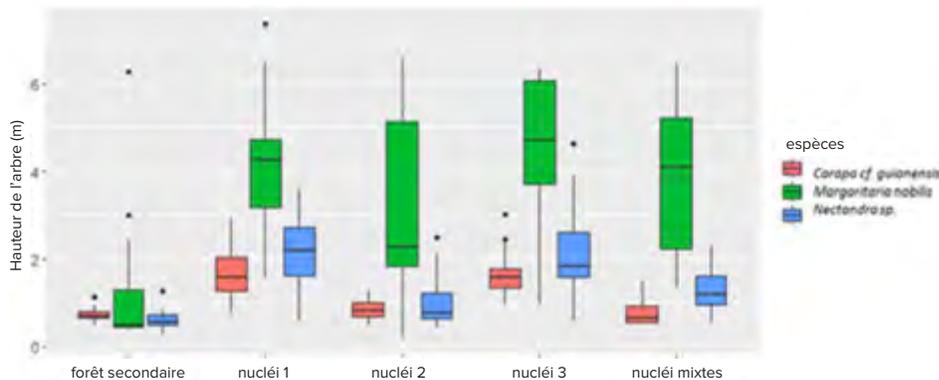


Figure 1 : Boîte à moustache avec hauteur des arbres des espèces localement menacées dans une forêt secondaire et différents types de nucléi différenciés par composition. Les arbres des nucléi 1 et 3 sont plus grands que les arbres de la forêt secondaire d'après la régression linéaire (valeurs $p < 0,0001$) après deux années de plantation.



Figure 2 : Membres de la communauté locale traitant les semences et sélectionnant les espèces pour la restauration des espèces localement menacées (photo par Angélica Cogollo)

EXEMPLE DE CAS N° 4 :

Nucléation appliquée pour restaurer la ripisylve à l'école agricole de la Maranhão University, Brésil.
Guillaume Xavier Rousseau¹ et Danielle Celentano^{1,2}

Contexte : Ce cas décrit les efforts de nucléation appliquée par la Maranhão State University, São Luís, État de Maranhão, Brésil. Le climat est tropical avec un été sec (As) et le couvert forestier original correspond à une ripisylve humide amazonienne. Cependant, la rivière Paciência n'a pas été permanente sur le site depuis les années 80. Historiquement, les terres ont été utilisées pour un basculement agricole mais ont été converties en agriculture intense de 1985 à 2004, ce qui a supprimé la végétation forestière et a dégradé le sol. Entre 2005 et 2012, la terre a été abandonnée, et une régénération forestière spontanée a été parsemée d'herbe, puis accidentellement brûlée environ tous les deux ans. L'état de Maranhão a un déficit de couvert forestier de 1 million d'hectares d'après le code forestier du Brésil (gouvernement fédéral brésilien, 2012 ; Soares et al., 2014) et les ripisylves sont fortement dégradées, ce qui conduit à une dégradation du sol et de la rivière, ainsi qu'à des pénuries d'eau (Silva Junior et al., 2020). La restauration du couvert forestier dans la région est vitale, mais des techniques adaptées au niveau local sont manquantes - en particulier les techniques à faible coût pour les fermiers modestes. Ce projet visait à tester les méthodes de restauration adaptée à la région qui peuvent être aussi attractives pour les fermiers modestes.

Conception et mise en place de la nucléation appliquée : La nucléation appliquée (NA) a été appliquée sur une surface de 0,54 ha, en parallèle de parcelles avec traitement en système d'agroforesterie (SAF) et de régénération naturelle (RN) dans une conception complète en bloc avec six réplicats (total de 18 parcelles, 0,09 ha chacune, 1,6 ha au total) (Fig. 1). Le SAF visait à imiter la succession naturelle avec un mélange de récolte annuelle agricole, d'arbrisseaux pérennes et d'arbres d'intérêt pour les fermiers

locaux (Celentano et al., 2020), identifiés à travers un travail réalisé sur les parcelles SAF de proximité, où les petits propriétaires ont participé en concevant la restauration et en choisissant les espèces. Ce partenariat a permis un partage de connaissances et a amélioré les initiatives scientifiques et fermières.

Le site avait un gradient hétérogène de régénération naturelle (Fig. 1b), et les îlots forestiers ont été placés à distance régulière (20 m) dans les zones avec une régénération naturelle faible et élevée. Les parcelles de NA ont été distribuées aléatoirement entre les six blocs de l'expérience et consistaient en quatre îlots forestiers (2 m de diamètre) avec 13 plantules séparées de 0,5 m et disposées en croix. Du *Ceiba pentandra* (fromager) était toujours planté au centre (Fig. 2). Les autres espèces plantées étaient : *Handroanthus* sp., *Anacardium occidentale* (anacardier), *Moringa oleifera* (moringa), *Gustavia augusta* (Jeniparana), *Hancornia speciosa* (Mangaba), *Inga edulis* (Inga), *Schizolobium amazonicum* (Paricá), *Mimosa caesalpinifolia* (Sabiá), *Samanea tubulosa* (Bordão de velho), *Talisia esculenta* (Pitomba). *Cajanus cajan* (Guandu), *Bixa orellana* (Urucum) et *Manihot esculentum* (Manihot) ont été semés à partir de semences ou de boutures pour protéger les plantules et produire du paillis. Les îlots ont été désherbés deux fois par an au cours des trois ans après la plantation. Les parcelles de contrôle (traitement RN) n'ont été maintenues qu'à travers l'exclusion des troupeaux et le coupe-feu a été maintenu durant toute l'expérience (Fig. 1). Les sites de référence de forêt primaire n'existent plus dans l'île de São Luís, et les anciennes parcelles de croissance existantes n'ont pas été inventoriées (Serra et al., 2016).

¹ Agroecology Graduate Program (PPG Agroecologia), State University of Maranhão (UEMA), Av. Lourenço Vieira da Silva, 1000, Jardim São Cristóvão, 65055-310, São Luís, MA, Brazil.

² Conservation International Brazil

Résultats sociaux et écologiques : Malgré trois incendies accidentels et une mortalité élevée des plantules (70 %), l'expérience fut un « succès » : la NA a permis un rétablissement rapide de la végétation native (Fig. 1 et 2). La NA a accumulé $11 (\pm 8)$ t.ha de carbone en biomasse (2012 - 2018) et a eu une richesse végétale supérieure (arbre et arbrisseau) (moyenne de 12 ± 2 espèces/parcelle) par rapport à la RN (4 ± 2) ou la SAF (8 ± 3). La nucléation a permis d'offrir à la fois une restauration structurelle et un enrichissement en espèces. La NA a eu un impact plus fort en termes de renouvellement forestier dans les zones où une régénération naturelle faible s'est produite, mais aussi a augmenté la richesse spécifique dans les zones avec une régénération naturelle supérieure. Les résultats de l'expérience de restauration ont suscité beaucoup d'intérêt récemment, et ont été publiés dans des projets de premier cycle, des thèses de Master scientifique, ainsi qu'une publication scientifique (Celentano et al., 2020). Le site est régulièrement visité par

les étudiants, les agents gouvernementaux, les fermiers ainsi que les organisations de la société civile. Le principal résultat du projet est la réapparition d'une source permanente en 2017 dans l'ancien cours de la rivière qui traverse la zone en restauration.

Leçons apprises : Conseil basé sur ces résultats pour un travail futur de NA : La NA a eu différentes fonctions selon le degré de régénération avant la mise en place. Lorsqu'une RN faible a eu lieu initialement, les îlots ont aidé à établir la structure et la diversité de la végétation, mais dans les zones avec davantage de RN, leur effet principal a été l'enrichissement. Dans les efforts de restauration à large échelle, le choix des espèces doit se faire avec finesse pour considérer l'hétérogénéité de la zone à restaurer. Des parcelles irrégulières de régénération naturelle ou de gradient naturel sont souvent présentes ainsi qu'une légère variation topographique qui affectent le développement des plantules.

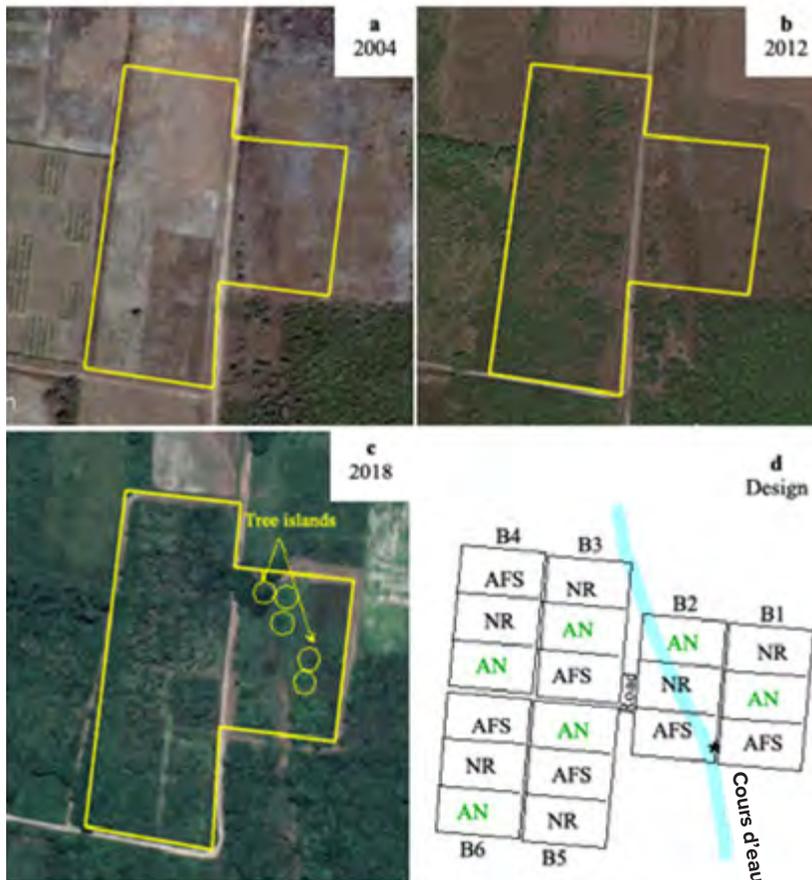


Figure 1 : Couvert du terrain du site expérimental : a) dernier usage agricole en 2004 ; b) installation de l'expérience en 2012 ; c) dernière surveillance en 2018 ; d) design expérimental avec emplacement du nouveau cours d'eau (*) (NA = nucléation appliquée, SAF = système d'agroforesterie, RN = régénération naturelle).

Considérer les variations naturelles et ajuster le choix des espèces et le design de plantations à ces variations permet d'optimiser les résultats, réduisant ainsi les coûts totaux. La nucléation appliquée est particulièrement bien adaptée dans cet objectif, puisque les îlots forestiers peuvent facilement être positionnés et la composition des espèces ajustée.

En général, le contrôle des troupeaux et des incendies ont été les plus grosses difficultés. Même à l'intérieur de l'école, la communauté n'était pas impliquée dans les mesures de conservation et de restauration. L'implication des communautés voisines autant que possible lors des étapes précoces de la conception et de l'installation du projet est quelque chose d'essentiel. L'intérêt communautaire est aussi directement relié aux éléments visant à soutenir le succès de la restauration - il est important de montrer les états initiaux, tout en reconnaissant que le travail continuera dans l'innovation et l'évolution.

Références :

Gouvernement fédéral brésilien. (2012). Loi fédérale n°12,651, du 25 mai 2012. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm

Celentano, D., Rousseau, G. X., Paixão, L. S., Lourenço, F., Cardozo, E. G., Rodrigues, T. O., e Silva, H. R., Medina, J., de Sousa, T. M. C., Rocha, A. E., & de Oliveira Reis, F. (2020). Carbon sequestration and nutrient cycling in agroforestry systems on degraded soils of Eastern Amazon, Brazil. *Agroforestry Systems*, 94(5), 1781–1792. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00496-4>

Serra, F. C. V., Lima, P. B., Almeida Jr, E. B. de, Serra, F. C. V., Lima, P. B., & Almeida Jr, E. B. de. (2016). Species richness in restinga vegetation on the eastern Maranhão State, Northeastern Brazil. *Acta Amazonica*, 46(3), 271–280. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201504704>

Silva Junior, C. H. L., Celentano, D., Rousseau, G. X., de Moura, E. G., Varga, I. van D., Martinez, C., & Martins, M. B. (2020). Amazon forest on the edge of collapse in the Maranhão State, Brazil. *Land Use Policy*, 97, 104806. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104806>

Soares-Filho, B., Rajão, R., Macedo, M., Carneiro, A., Costa, W., Coe, M., Rodrigues, H., & Alencar, A. (2014). Cracking Brazil's Forest Code. *Science*, 344(6182), 363. <https://doi.org/10.1126/science.1246663>



Figure 2 : Développement d'un îlot forestier avec différentes ouvertures de canopée : a) canopée ouverte 2016 ; b) canopée semi-fermée 2016 ; c) canopée ouverte 2018 ; canopée semi-fermée 2018.

EXEMPLE DE CAS N° 5 :

Adaptation de la nucléation appliquée à la menace d'incendie dans la zone orientale de Madagascar. J. Leighton Reid (School of Plant and Environmental Sciences, Virginia Tech) ; Donald Matthew Hill (Green Again Restoration, Department of Forest Resources, University of Minnesota); Jean François Solofoniaina Fidy (Parc Ivoloïna Madagascar Fauna and Flora Group) ; Lee Frelich (Department of Forest Resources, University of Minnesota) ; Rebecca Montgomery (Department of Forest Resources, University of Minnesota).

Contexte : Les besoins de Madagascar en termes de restauration sont aigus. Cette île tropicale est plus petite que le Texas mais recèle 5 % des espèces mondiales connues, dont 90 % sont introuvables ailleurs sur Terre. Il y a une déforestation rampante dans la bande étroite de forêt humide sur le tiers oriental de l'île. Si la déforestation continue à la vitesse actuelle, il n'y aura plus de forêts humides en dehors des zones protégées d'ici 2080. L'un des enjeux essentiels de la restauration forestière à Madagascar est la rareté en ressources. Madagascar fait partie des pays les plus pauvres du monde au niveau économique. Les gestionnaires de terres sont intéressés dans les stratégies de restauration telles que la nucléation appliquée qui peuvent réduire les coûts du projet.

Notre projet de restauration a été réalisé sur la côte est de Madagascar, 14 km au nord-ouest de la ville de Toamasina (-18.051966° lat, 49.350280° lon). Ce site se situe au sein de la distribution historique de la forêt humide des basses-terres, ce qui jusqu'à récemment, couvrait la côte est de l'île. Les précipitations annuelles à proximité de l'aéroport de Toamasina varient entre 3 et 3,5 m par an, avec les plus lourdes précipitations entre février et avril au cours de la saison des cyclones. La température annuelle moyenne est de 24°C avec des fluctuations saisonnières mineures. La topographie régionale consiste en une répétition de colline de 100 m de haut avec des pentes allant jusqu'à 50°. Les sols sont en argile rouge ferrallitique, parsemée de blocs granitiques.

Nos objectifs étaient : (1) de restaurer la forêt native sur quatre hectares de terre qui a été dégradée par des incendies répétés résultant du tavy - une forme d'agriculture basée sur les rémanents et les incendies, et (2) d'étudier la capacité des arbres natifs à supprimer la

végétation rudérale, en particulier la fougère *Dicranopteris linearis*. Nous avons sélectionné un design de nucléation appliqué car c'était moins onéreux, et parce que c'était faisable sur la parcelle de réplication que nous souhaitions pour notre expérience

Conception et mise en place de la nucléation appliquée : Ce projet a été mis en place par une organisation à but non lucratif, Green Again Restoration, sur la terre privée du coauteur Jean François Solofoniaina Fidy, le leader du fokontany d'Ambonivato (petit village régional). Jean François a recherché Green Again pour restaurer ses terres car il souhaitait créer un exemple positif pour inspirer les autres villageois quant à la restauration de leur propre terre familiale. Ceci s'est avéré être une stratégie efficace. Il y a actuellement des dizaines de projets de restauration dans le fokontany d'Ambonivato.

Les peuples locaux ont été impliqués dans tous les aspects du projet, de la conceptualisation jusqu'à la mise en œuvre, en passant par la surveillance et l'interprétation. Les semences ont été récoltées à partir d'arbres de fermes locales. Le désherbage et l'arrosage en pépinière ont été réalisés par des équipes de mères seules d'Ambonivato pendant que leurs enfants étaient à l'école. Le défrichage du terrain et la plantation d'arbres ont été réalisés par de jeunes hommes du village, et les marques d'identification des arbres ont été réalisées par des femmes locales. Les mesures et les saisies de données ont toutes été effectuées par les villageois locaux. DMH a vécu à Ambonivato pendant quatre ans au cours de ce projet, et son rôle se limitait à l'éducation, à la validation des données, et au contrôle qualité.

Notre site était un champ de 4 ha sur une pente raide orientée sud-est, dont l'attitude variait entre 30 et 70 mètres au-dessus du niveau de la mer. Les villageois locaux ont préparé le site de plantation en défrichant la végétation uniquement dans les zones devant recevoir les arbres à planter (Fig. 1). La végétation environnante comprenait principalement une fougère (*Dicranopteris linearis*) et l'arbre du voyageur (*Ravenala madagascariensis*). Ensuite, ils ont planté 160 îlots forestiers carrés de 16 m². Chaque îlot forestier comprenait 25 plantules d'une unique espèce d'arbre plantées à 1 m d'espacement dans une grille de 5 × 5. Un total de 4000 arbres ont été plantés. Les espèces d'arbres comprenaient 11 espèces natives dont les semences ont été localement collectées et semées dans une pépinière. Le coût approximatif de la préparation du site de la plantation des arbres était de 1 USD par arbre (soit environ 4000 \$ au total, ou encore 1000 \$ par ha).

Résultats : social et écologique : Notre projet a été planté entre juin et septembre 2016. En octobre 14, un incendie s'est propagé à travers le site (Fig. 2). Nous avons inspecté chaque plantule et développé un indice d'intensité de l'incendie basé sur l'étendue des dommages sur les marquages plastique des plantules, les poteaux en bois, et les marquages aluminium

des parcelles. Après plusieurs mois, nous avons à nouveau visité le site et inspecté chaque position de plantation pour rechercher des preuves de nouvelle germination des plantules.

Sur les 4000 arbres plantés, 379 (9,5 %) ont survécu à l'incendie. Le pourcentage de survie variait entre les espèces entre 0 % et 18 % (Fig. 3). Les arbres des angles et des bordures des plantations de nucléation appliquée ont été exposés à la plus haute intensité de l'incendie, et la survie était inférieure pour ces arbres plantés à ces positions. La survie était jusqu'à cinq fois plus importante pour les arbres plantés au cœur de l'îlot.

Une des leçons essentielles de ce projet est que les plantations de nucléation appliquée sont particulièrement vulnérables aux incendies à cause de leur plus grande densité de bordures (c'est-à-dire qu'il y a davantage de bordure par surface de forêt par rapport à une plantation continue). Les fougères *Dicranopteris* et leur masse végétale formaient la matrice entre les îlots forestiers de nos plantations. Cette masse végétale était hautement inflammable, et par conséquent, les plantules présents sur les bordures des îlots ont subi des dommages plus importants au cours de l'incendie que les plantules situées au cœur des îlots.



Figure 1 : Les villageois d'Ambonivato établissent une plantation en nucléation appliquée dans un fourré dense de fougères. L'arbre du voyageur (*Ravenala madagascariensis*) est une plante à larges feuilles au fond à droite. Autant les fougères que l'arbre du voyageur sont hautement inflammables. Les positions de plantation sont marquées avec des piquets en bois, qui ont ensuite été utilisés pour créer un standard pour l'indice l'intensité des incendies. Photo par D. M. Hill.



Figure 2 : Un incendie qui s'est propagé sur le site de restauration en octobre 2016. Il a éradiqué 91,5 % des plantules plantées, et a révélé une vulnérabilité cruciale de la nucléation appliquée. Photo par D. M. Hill.

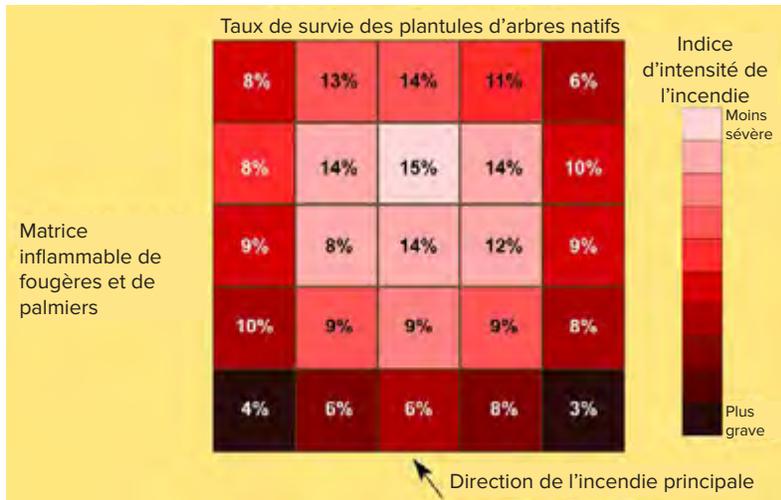


Figure 3 : Moyennes de la survie des plantules d'arbres et de l'intensité des incendies dans 160 plantations en nucléation appliquée sur notre site du côté oriental de Madagascar. Les positions les plus dangereuses pour les plantules étaient les angles et les bordures des plantations de nucléation appliquée.



Figure 4 : Une nouvelle expérience en nucléation appliquée comparant les îlots forestiers conventionnels par rapport aux îlots forestiers résistants aux incendies. Les îlots forestiers résistants aux incendies utilisent un anneau d'espèces résistantes au feu faisant office de tampon pour les espèces vulnérables aux incendies qui sont, elles, plantées dans la zone la plus sécurisée, à savoir au centre. Les îlots forestiers de cette expérience font 8 x 8 m avec un espacement de 1 m entre les arbres.

Pour corriger ce problème, nous testons actuellement des îlots forestiers résistants aux incendies (Fig. 4). Les îlots résistants aux incendies possèdent des arbres résistants incendie planter sur la bordure, où nous avons observé l'intensité d'incendie la plus sévère. Les espèces d'arbres qui sont sensibles aux incendies sont implantées au cœur de l'îlot, ce qui leur permet d'être protégées des températures les plus élevées. Nous avons planté plus de deux dizaines de sites permettant de comparer les îlots forestiers conventionnels aux îlots résistants à l'incendie. Nous nous attendons à ce que les incendies démontrent rapidement si les îlots résistants aux incendies sont plus résistants face à cette perturbation commune. Nous avons aussi recommandé que pour les endroits où les incendies constituent un risque, les praticiens pensent à maintenir des zones tampons défrichées tout autour du site (pas les îlots individuels) afin de minimiser le risque de perte des arbres en cas d'incendie.

EXEMPLE DE CAS N° 6 :

Comparaison de trois designs de peuplements arboricoles pour la restauration de la forêt atlantique au Brésil

Pedro H. S. Brancalion¹ & Karen D. Holl²

¹Department of Forest Sciences, "Luiz de Queiroz" College of Agriculture, University of São Paulo, Piracicaba, SP, Brazil

²Environmental Studies Department, University of California, Santa Cruz, CA 95064, USA.

Contexte : Cet exemple de cas pour la nucléation consiste en un projet de recherche établi à la station expérimentale des sciences forestières de l'université de Sao Paulo, localisée à Itatinga-SP, Brésil. La région a une température annuelle moyenne de 17 °C, des étés chauds et humides, des hivers froids et secs, une précipitation annuelle d'environ 1200 mm et un déficit hydrique annuel de 20 mm. Le sol est caractérisé par un latosol dystrophique jaune, avec un pH acide et une faible teneur en nutriments, ainsi qu'une texture sableuse. La végétation naturelle est un écotone entre des forêts saisonnières semi-caducifoliées (forêt atlantique) et des terrains boisés de la savane (Cerrado), qui constituent tous deux des points cruciaux en matière de priorité de conservation globale. Le site de l'étude n'est pas légalement protégé et était recouvert par une monoculture d'eucalyptus au cours des 70 dernières années. Nous avons établi cette expérience pour tester l'efficacité de la nucléation sur des échelles opérationnelles, et en utilisant des bandes (plutôt que des « îlots » traditionnels) pour distribuer les arbres à travers le site de restauration.

Conception et mise en place de la nucléation appliquée : Les arbres ont été plantés en bandes (entre trois et quatre lignes d'arbres) de manière comparable à une plantation de style plantation, mais en laissant des bandes non plantées entre les lignes pour laisser place à une recolonisation naturelle. Ceci est similaire à l'approche de l'exploitation forestière en bande qui facilite la régénération naturelle ainsi que la survie et la croissance de certaines espèces natives plantées (Ashton et al., 1998 ; Rondon et al., 2009). Ceci comporte

quelques avantages potentiels : tout comme la nucléation appliquée, la plantation en bandes doit résulter en des coûts réduits en matière de plantation et de maintien des plantules plantées, et cela peut fournir une meilleure hétérogénéité de l'habitat en fournissant à la fois des surfaces plantées et non plantées. En outre, cela présente moins d'obstacles logistiques pour la plantation et la sélection de plantules pour la maintenance, puisque rencontrer à nouveau des parcelles d'îlots forestiers récemment plantés peut s'avérer complexe dans les zones peuplées d'herbes à pâturage denses (Holl et al., 2020). En outre, de nombreux espaces nécessitant d'être restaurés en vertu du code forestier brésilien sont des zones tampons de ripisylve - une plantation en bandes peut s'avérer particulièrement adaptée à ce contexte. Nous ne savons pas, cependant, ce qu'il en est des expériences à grande échelle jusqu'à présent concernant des tests sur une approche de plantation en bande pour la restauration des forêts tropicales.

Nous avons établi une étude sur la restauration forestière en août 2017 afin de comparer la plantation de style plantation (en plantant toute la zone avec des arbres), la nucléation appliquée (en plantant des parcelles/des îlots d'arbres), et la plantation en bandes (en plantant des rangées d'arbres séparées par des bandes ouvertes). L'étude a été définie de manière cohérente avec les pratiques forestières actuelles à grande échelle, ce qui peut s'avérer judicieux pour informer les efforts de restauration sur le terrain. Nous avons testé les traitements suivants : 1) îlots carrés couvrant 25 % de la surface ; 2) îlots carrés couvrant 50 % de la surface ; 3) arbres plantés

⁴L'université de Sao Paulo a fourni le site d'expérimentation, et le secrétariat environnemental de l'état de Sao Paulo ainsi que l'O.N.G. SOS Mata Atlântica ont fourni le financement pour l'établissement et la maintenance à long terme, respectivement. Une compagnie privée a été recrutée pour planter les arbres et une autre entreprise, composée de personnes locales, pour les maintenir.

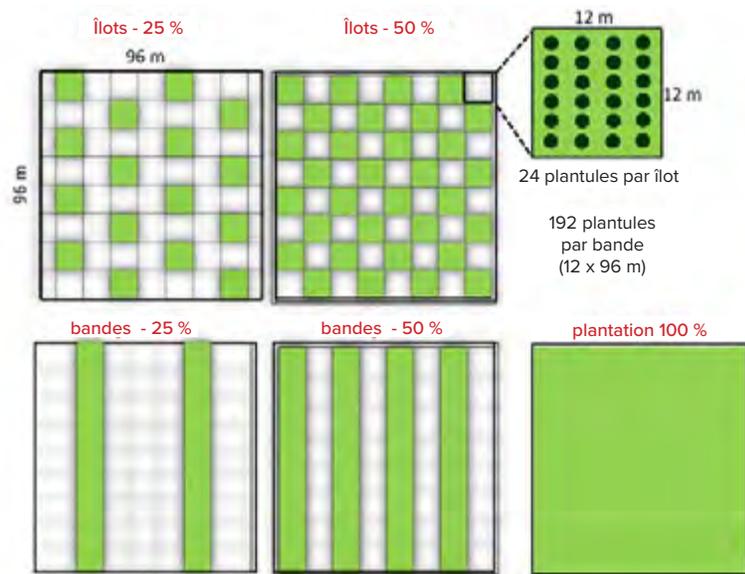


Figure 1 : Traitements de plantation d'arbres testés dans l'expérience.

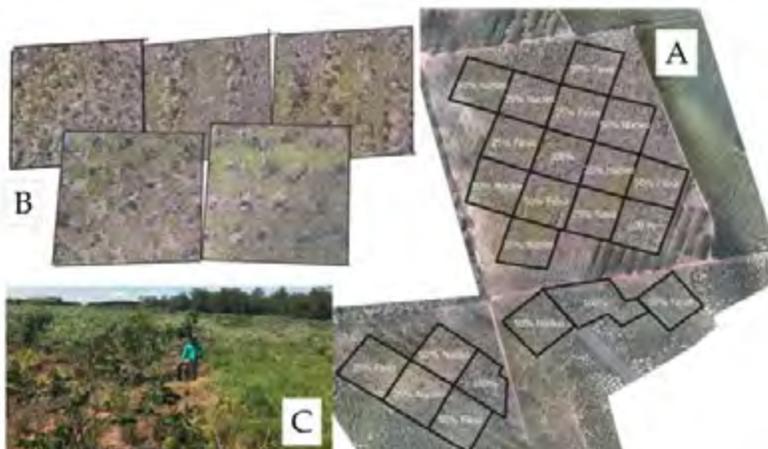


Figure 2 : Aperçu aérien des l'expérience (A) et des traitements (B), et contraste entre une zone plantée et non plantée (C), un an après plantation.

en bandes couvrant 25 % de la surface ; 4) arbres plantés en bandes couvrant 50 % de la surface ; et 5) plantation couvrant toute la surface (Fig. 1, 2). Nous avons utilisé des parcelles de 1 ha avec une conception de bloc aléatoire ayant chacun cinq réplicats, soit un total de 25 ha sur l'expérience. Nous n'avons pas fait varier la taille des îlots, puisque Zahawi and Augspurger (2006) et Zahawi et al. (2013) ont montré qu'il y a une taille d'îlot minimum critique d'environ 100 m² nécessaire pour à la fois attirer les oiseaux disséminateurs de graines et favoriser l'établissement des plantules. Nous avons utilisé des îlots de 12 x 12 m, quatre lignes plantées séparées de 3 m les unes des autres.

Nous avons cherché à établir rapidement une canopée, à fournir de l'hétérogénéité dans l'architecture de la canopée, et à attirer la faune disséminatrice de graines. Toutes les zones plantées ont utilisé les mêmes proportions d'espèces : cinq à croissance rapide, trois espèces natives à large canopée, et 36 espèces à croissance intermédiaire (dont la moitié est zoophore et l'autre moitié disséminée de façon abiotique). Nous avons sélectionné des espèces qui sont faciles à trouver dans les pépinières forestières de la région. La priorité a été donnée aux espèces à croissance intermédiaire pouvant atteindre une taille individuelle plus grande. *Inga vera* a été planté à une densité plus élevée que

les autres espèces d'arbres à croissance rapide et à large canopée parce qu'il a une remarquable expansion latérale de canopée et qu'il s'agit d'un pionnier à longue durée de vie. Le nombre d'espèces plantées est inférieur à celui des projets de restauration des forêts atlantiques du Brésil qui sont plus diversifiées (Rodrigues et al., 2009), mais notre focalisation portait sur le fait de garder la capacité de gestion du design général, et sur la manière dont les différents designs de plantations facilitent la colonisation des autres espèces.

Nous avons comparé les effets de ces méthodes de plantation en termes de (1) croissance et survie des plantules plantées, (2) régénération naturelle, (3) le couvert d'herbes invasives, (4) les coûts de mise en œuvre et de maintenance, et (5) l'efficacité économique pour la séquestration du carbone, le renouvellement de la biodiversité, et la conformité juridique avec des standards de restauration prédéfinis. Nous avons des résultats préliminaires, mais ils ne sont pas encore prêts pour une présentation détaillée.

Résultats : social et écologique : Les opérations de plantation ont été bien plus rapides et moins onéreuses pour l'établissement de lignes de plantations par rapport aux îlots, car nous avons utilisé une charrue sous-soleuse forestière. Il n'est pas possible d'utiliser une charrue sous-soleuse pour les îlots parce qu'il est impossible de la relocaliser en-dedans et à l'extérieur du sol. Après trois ans, la performance des plantules est similaire entre les traitements. Comme attendu, le contrôle des herbes invasives a été plus difficile dans les bandes et dans les nucléi arborées par rapport aux plantations de style plantation. Des résultats plus détaillés sont en cours d'analyse par cette équipe.

Littérature citée

Ashton, P. M. S., Gamage, S., Gunatilleke, I. A. U. N., & Gunatilleke, C. V. S. (1998). Using Caribbean pine to establish a mixed plantation: Testing effects of pine canopy removal on plantings of rain forest tree species. *Forest Ecology and Management*, 106(2), 211–222. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00314-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00314-9)

Brancalion, P. H. S., Viani, R. A. G., Calmon, M., Carrascosa, H., & Rodrigues, R. R. (2013). How to Organize a Large-Scale Ecological Restoration Program? The Framework Developed by the Atlantic Forest Restoration Pact in Brazil. *Journal of Sustainable Forestry*, 32(7), 728–744. <https://doi.org/10.1080/10549811.2013.817339>

Corbin, J. D., & Holl, K. D. (2012). Applied nucleation as a forest restoration strategy. *Forest Ecology and Management*, 265, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.10.013>

Elliott, S., Navakitbumrung, P., Kuarak, C., Zangkum, S., Anusarnsunthorn, V., & Blakesley, D. (2003). Selecting framework tree species for restoring seasonally dry tropical forests in northern Thailand based on field performance. *Forest Ecology and Management*, 184(1), 177–191. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00211-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00211-1)

Holl, K. D., Reid, J. L., Cole, R. J., Oviedo-Brenes, F., Rosales, J. A., & Zahawi, R. A. (2020). Applied nucleation facilitates tropical forest recovery: Lessons learned from a 15-year study. *Journal of Applied Ecology*, 57(12), 2316–2328. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13684>

Holl, K. D., Stout, V. M., Reid, J. L., & Zahawi, R. A. (2013). Testing heterogeneity–diversity relationships in tropical forest restoration. *Oecologia*, 173(2), 569–578. <https://doi.org/10.1007/s00442-013-2632-9>

Holl, K. D., Zahawi, R. A., Cole, R. J., Ostertag, R., & Cordell, S. (2011). Planting Seedlings in Tree Islands Versus Plantations as a Large-Scale Tropical Forest Restoration Strategy. *Restoration Ecology*, 19(4), 470–479. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00674.x>

Lamb, D. (2011). *Regreening the bare hills: Tropical forest restoration in the Asia-Pacific region*. Springer.

Reis, A., Bechara, F. C., & Tres, D. R. (2010). Nucleation in tropical ecological restoration. *Scientia Agricola*, 67(2), 244–250. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000200018>

Benayas, J. M. R., Bullock, J. M., & Newton, A. C. (2008). Creating woodland islets to reconcile ecological restoration, conservation, and agricultural land use. *Frontiers in Ecology and*

the Environment, 6(6), 329–336. <https://doi.org/10.1890/070057>

Rodrigues, R. R., Lima, R. A. F., Gandolfi, S., & Nave, A. G. (2009). On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. *Biological Conservation*, 142(6), 1242–1251. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.12.008>

Rondon, X. J., Gorchov, D. L., & Cornejo, F. (2009). Tree species richness and composition 15 years after strip clear-cutting in the Peruvian Amazon. *Plant Ecology*, 201(1), 23–37. <https://doi.org/10.1007/s11258-008-9479-x>

Zahawi, R. A., & Augspurger, C. K. (2006). Tropical forest restoration: Tree islands as recruitment foci in degraded lands of Honduras. *Ecological Applications*, 16(2), 464–478. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[0464:TFRTIA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[0464:TFRTIA]2.0.CO;2)

Zahawi, R. A., Holl, K. D., Cole, R. J., & Reid, J. L. (2013). Testing applied nucleation as a strategy to facilitate tropical forest recovery. *Journal of Applied Ecology*, 50(1), 88–96. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12014>

RÉFÉRENCES

1. FAO, Restoring forest landscapes through assisted natural regeneration (ANR) - A practical manual, 55(2019).
2. R. Crouzeilles, N. Alexandre, H. Beyer, B. Bodin, M. R. Guariguata, R. L. Chazdon, Giving nature a hand: Innovations in planning to assist natural regeneration of forests to mitigate climate change, save species from extinctions, and enhance well-being. CI IIS CIFOR, 24 (2019).
3. E. J. Sterling, E. Betley, A. Sigouin, A. Gomez, A. Toomey, G. Cullman, C. Malone, A. Pekor, F. Arengo, M. Blair, C. Filardi, K. Landrigan, A. L. Porzecanski, Assessing the evidence for stakeholder engagement in biodiversity conservation. *Biol. Conserv.* **209**, 159–171 (2017).
4. K. D. Holl, Primer of Ecological Restoration (Island Press, Washington, DC, 2020; <https://islandpress.org/books/primer-ecological-restoration>).
5. New UN Decade on Ecosystem Restoration offers unparalleled opportunity for job creation, food security and addressing climate change. UNEP - UN Environ. Programme, (disponible sur <http://www.unenvironment.org/news-and-stories/press-release/new-un-decade-ecosystem-restoration-offers-unparalleled-opportunity>).
6. Global Forest Watch, Forest Monitoring, Land Use & Deforestation Trends, (available at <https://www.globalforestwatch.org/>).
7. Food and Agriculture Organization of the United Nations, *Global forest resources assessment 2015: how are the world's forests changing?* (2015).
8. A platform for the trillion tree community. 1t.org, (available at <https://www.1t.org/>).
9. F. Huwyler, J. Käppeli, K. Serafimova, E. Swanson, J. Tobin, Conservation Finance: Moving beyond donor funding toward an investor-driven approach (2014), (available at <https://www.cbd.int/financial/privatesector/g-private-wwf.pdf>).
10. K. D. Holl, P. H. S. Brancalion, Tree planting is not a simple solution. *Science*. **368**, 580–581 (2020).
11. R. L. Chazdon, P. H. S. Brancalion, L. Laestadius, A. Bennett-Curry, K. Buckingham, C. Kumar, J. Moll-Rocek, I. C. G. Vieira, S. J. Wilson, When is a forest a forest? Forest concepts and definitions in the era of forest and landscape restoration. *Ambio*. **45**, 538–550 (2016).
12. R. Crouzeilles, H. L. Beyer, L. M. Monteiro, R. Feltran-Barbieri, A. C. M. Pessôa, F. S. M. Barros, D. B. Lindenmayer, E. D. S. M. Lino, C. E. V. Grelle, R. L. Chazdon, M. Matsumoto, M. Rosa, A. E. Latawiec, B. B. N. Strassburg, Achieving cost-effective landscape-scale forest restoration through targeted natural regeneration. *Conserv. Lett.* **13**, e12709 (2020).
13. R. Heilmayr, C. Echeverría, E. F. Lambin, Impacts of Chilean forest subsidies on forest cover, carbon and biodiversity. *Nat. Sustain.* **3**, 701–709 (2020).
14. J. D. Corbin, K. D. Holl, Applied nucleation as a forest restoration strategy. *For. Ecol. Manag.* **265**, 37–46 (2012).
15. M. Pensa, H. Karu, A. Luud, E. Rull, R. Vaht, The effect of planted tree species on the development of herbaceous vegetation in a reclaimed opencast. *Can. J. For. Res.* **38**, 2674–2686 (2008).
16. A. B. Sampaio, K. D. Holl, A. Scariot, Does Restoration Enhance Regeneration of Seasonal Deciduous Forests in Pastures in Central Brazil? *Restor. Ecol.* **15**, 462–471 (2007).
17. K. D. Holl, T. M. Aide, When and where to actively restore ecosystems? *For. Ecol. Manag.* **261**, 1558–1563 (2011).

18. R. L. Chazdon, Beyond Deforestation: Restoring Forests and Ecosystem Services on Degraded Lands. *Science*. **320**, 1458–1460 (2008).
19. R. L. Chazdon, D. Lindenmayer, M. R. Guariguata, R. Crouzeilles, J. M. R. Benayas, E. L. Chavero, Fostering natural forest regeneration on former agricultural land through economic and policy interventions. *Environ. Res. Lett.* **15**, 043002 (2020).
20. K. D. Holl, M. E. Loik, E. H. V. Lin, I. A. Samuels, Tropical Montane Forest Restoration in Costa Rica: Overcoming Barriers to Dispersal and Establishment. *Restor. Ecol.* **8**, 339–349 (2000).
21. R. L. Chazdon, Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances. *Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst.* **6**, 51–71 (2003).
22. K. D. Holl, J. L. Reid, R. J. Cole, F. Oviedo Brenes, J. A. Rosales, R. A. Zahawi, Applied nucleation facilitates tropical forest recovery: Lessons learned from a 15 year study. *J. Appl. Ecol.*, **57**, 2316–2329 (2020).
23. P. H. S. Brancalion, K. D. Holl, Guidance for successful tree planting initiatives. *J. Appl. Ecol.* **57**, 2349–2361 (2020).
24. D. H. Dent, S. Joseph Wright, The future of tropical species in secondary forests: A quantitative review. *Biol. Conserv.* **142**, 2833–2843 (2009).
25. S. Wilson, J. Rhemtulla, Small montane cloud forest fragments are important for conserving tree diversity in the Ecuadorian Andes. *Biotropica* (2017), doi:10.1111/btp.12542.
26. J. E. M. Watson, T. Evans, O. Venter, B. Williams, A. Tulloch, C. Stewart, I. Thompson, J. C. Ray, K. Murray, A. Salazar, C. McAlpine, P. Potapov, J. Walston, J. G. Robinson, M. Painter, D. Wilkie, C. Filardi, W. F. Laurance, R. A. Houghton, S. Maxwell, H. Grantham, C. Samper, S. Wang, L. Laestadius, R. K. Runting, G. A. Silva-Chávez, J. Ervin, D. Lindenmayer, The exceptional value of intact forest ecosystems. *Nat. Ecol. Evol.* **2**, 599–610 (2018).
27. R. L. Chazdon, S. Careaga, C. Webb, O. Vargas, Community and Phylogenetic Structure of Reproductive Traits of Woody Species in Wet Tropical Forests. *Ecol. Monogr.* **73**, 331–348 (2003).
28. J. L. Reid, J. M. Chaves-Fallas, K. D. Holl, R. A. Zahawi, Tropical forest restoration enriches vascular epiphyte recovery. *Appl. Veg. Sci.* **19**, 508–517 (2016).
29. Forest Trends Association, The Mitigation Hierarchy - Forest Trends. *For.-Trendsorg*, (available at <https://www.forest-trends.org/bbop/bbop-key-concepts/mitigation-hierarchy/>).
30. B. B. N. Strassburg, H. L. Beyer, R. Crouzeilles, A. Iribarrem, F. Barros, M. F. de Siqueira, A. Sánchez-Tapia, A. Balmford, J. B. B. Sansevero, P. H. S. Brancalion, E. N. Broadbent, R. L. Chazdon, A. O. Filho, T. A. Gardner, A. Gordon, A. Latawiec, R. Loyola, J. P. Metzger, M. Mills, H. P. Possingham, R. R. Rodrigues, C. A. de M. Scaramuzza, F. R. Scarano, L. Tambosi, M. Uriarte, Strategic approaches to restoring ecosystems can triple conservation gains and halve costs. *Nat. Ecol. Evol.* **3**, 62–70 (2019).
31. J. Stanturf, S. Mansourian, M. Kleine, *Implementing Forest Landscape Restoration* (International Union of Forest Research Organizations, Special Programme for Development of Capacities (IUFRO-SPDC), Vienna, Austria, 2017).
32. P. H. S. Brancalion, R. L. Chazdon, Beyond hectares: four principles to guide reforestation in the context of tropical forest and landscape restoration: Forest and landscape restoration principles. *Restor. Ecol.* **25**, 491–496 (2017).
33. K. D. Holl, J. L. Reid, F. Oviedo-Brenes, A. J. Kulikowski, R. A. Zahawi, Rules of thumb for predicting tropical forest recovery. *Appl. Veg. Sci.* **21**, 669–677 (2018).
34. S. D. Sprenkle-Hyppolite, A. M. Latimer, T. P. Young, K. J. Rice, Landscape Factors and Restoration Practices Associated with Initial Reforestation Success in Haiti. *Ecol. Restor.* **34**, 306–316 (2016).

35. H. D. Le, C. Smith, J. Herbohn, What drives the success of reforestation projects in tropical developing countries? The case of the Philippines. *Glob. Environ. Change.* **24**, 334–348 (2014).
36. S. J. Wilson, O. T. Coomes, ‘Crisis restoration’ in post-frontier tropical environments: Replanting cloud forests in the Ecuadorian Andes. *J. Rural Stud.* **67**, 152–165 (2019).
37. J. L. Reid, S. J. Wilson, G. S. Bloomfield, M. E. Cattau, M. E. Fagan, K. D. Holl, R. A. Zahawi, How Long Do Restored Ecosystems Persist? *Ann. Mo. Bot. Gard.* **102**, 258–265 (2017).
38. S. M. Galatowitsch, Carbon Offsets as Ecological Restorations. *Restor. Ecol.* **17**, 563–570 (2009).
39. N. Shaw, R. S. Barak, R. E. Campbell, A. Kirmer, S. Pedrini, K. Dixon, S. Frischie, Seed use in the field: delivering seeds for restoration success. *Restor. Ecol.* **28**, S276–S285 (2020).
40. G. A. Yarranton, R. G. Morrison, Spatial Dynamics of a Primary Succession: Nucleation. *J. Ecol.* **62**, 417–428 (1974).
41. L. Reid, Applied Nucleation: What It Is. Cave Gulch Rev. (2012), (disponible sur <https://cavegulchreview.wordpress.com/2012/11/04/applied-nucleation-what-it-is/>).
42. S. Saha, C. Kuehne, J. Bauhus, Lessons learned from oak cluster planting trials in central Europe. *Can. J. For. Res.* **47**, 139–148 (2017).
43. C. E. Grygiel, J. E. Norland, M. E. Biondini, Precision Prairie Reconstruction (PPR): 15 Years of Data. *Ecol. Restor.* **36**, 276–283 (2018).
44. K. B. Hulvey, E. A. Leger, L. M. Porensky, L. M. Roche, K. E. Veblen, A. Fund, J. Shaw, E. S. Gornish, Restoration islands: a tool for efficiently restoring dryland ecosystems? *Restor. Ecol.* **25**, S124–S134 (2017).
45. K. D. Holl, J. L. Reid, J. M. Chaves-Fallas, F. Oviedo-Brenes, R. A. Zahawi, Local tropical forest restoration strategies affect tree recruitment more strongly than does landscape forest cover. *J. Appl. Ecol.* **54**, 1091–1099 (2017).
46. F. C. Bechara, S. J. Dickens, E. C. Farrer, L. Larios, E. N. Spotswood, P. Mariotte, K. N. Suding, Neotropical rainforest restoration: comparing passive, plantation and nucleation approaches. *Biodivers. Conserv.* **25**, 2021–2034 (2016).
47. K. D. Holl, R. A. Zahawi, Applied nucleation is a straightforward, cost-effective forest restoration approach: reply to Ramírez-Soto et al. (2018). *Restor. Ecol.* **26**, 618–619 (2018).
48. F. Bechara, thesis, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (2006).
49. P. G. Molin, R. Chazdon, S. F. de B. Ferraz, P. H. S. Brancalion, A landscape approach for cost-effective large-scale forest restoration. *J. Appl. Ecol.* **55**, 2767–2778 (2018).
50. P. H. S. Brancalion, P. Meli, J. R. C. Tymus, F. E. B. Lenti, R. M. Benini, A. P. M. Silva, I. Isernhagen, K. D. Holl, What makes ecosystem restoration expensive? A systematic cost assessment of projects in Brazil. *Biol. Conserv.* **240**, 108274 (2019).
51. R. L. Chazdon, *Second Growth: The Promise of Tropical Forest Regeneration in an Age of Deforestation*, Chazdon (University of Chicago Press, Chicago, 2014; <https://press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/S/bo17407876.html>).
52. R. A. Zahawi, J. L. Reid, K. D. Holl, Hidden Costs of Passive Restoration. *Restor. Ecol.* **22**, 284–287 (2014).
53. R. Sierra, E. Russman, On the efficiency of environmental service payments: A forest conservation assessment in the Osa Peninsula, Costa Rica. *Ecol. Econ.* **59**, 131–141 (2006).
54. M. E. Fagan, R. S. DeFries, S. E. Sesnie, J. P. Arroyo, W. Walker, C. Soto, R. L. Chazdon, A. Sanchun, Land cover dynamics following a deforestation ban in northern Costa Rica. *Environ. Res. Lett.* **8**, 034017 (2013).
55. J. L. Reid, M. E. Fagan, J. Lucas, J. Slaughter, R. A. Zahawi, The ephemerality of secondary forests in

- southern Costa Rica. *Conserv. Lett.* **12**, e12607 (2019).
56. M. Elias, B. Vinceti, Restoring lands and livelihoods in Burkina Faso. *Approp. Technol.* **44**, 32–34 (2017).
 57. K. Shono, E. A. Cadaweng, P. B. Durst, Application of Assisted Natural Regeneration to Restore Degraded Tropical Forestlands. *Restor. Ecol.* **15**, 620–626 (2007).
 58. P. Dugan, in *Elliott, S., Kerby, J., Blakesley D., Hardwick, K., Woods, K., & Anusarnsunthorn, V editors. Forest restoration for wildlife conservation* (International Tropical Timber Organization and Forest Restoration Research Unit, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, 2000), pp. 195–200.
 59. R. A. Zahawi, C. K. Augspurger, Tropical Forest Restoration: Tree Islands As Recruitment Foci In Degraded Lands Of Honduras. *Ecol. Appl.* **16**, 464–478 (2006).
 60. R. A. Zahawi, K. D. Holl, R. J. Cole, J. L. Reid, Testing applied nucleation as a strategy to facilitate tropical forest recovery. *J. Appl. Ecol.* **50**, 88–96 (2013).
 61. C. Uhl, R. Buschbacher, E. A. S. Serrao, Abandoned Pastures in Eastern Amazonia. I. Patterns of Plant Succession. *J. Ecol.* **76**, 663 (1988).
 62. S. L. R. Wood, J. M. Rhemtulla, O. T. Coomes, Intensification of tropical fallow-based agriculture: Trading-off ecosystem services for economic gain in shifting cultivation landscapes? *Agriculture, Ecosystems & Environment* **215**, 47-56 (2016).
 63. D. Lawrence, Erosion of tree diversity during 200 years of shifting cultivation in Bornean rain forest. *Ecological Applications* **14**, 1855-1869 (2004).
 64. D. Hill, thesis (2018). Forest restoration in eastern Madagascar: Post-fire survival of select Malagasy tree species. University of Minnesota.
 65. E. M. Caves, S. B. Jennings, J. HilleRisLambers, J. J. Tewksbury, H. S. Rogers, Natural Experiment Demonstrates That Bird Loss Leads to Cessation of Dispersal of Native Seeds from Intact to Degraded Forests. *PLOS ONE*. **8**, e65618 (2013).
 66. J. L. Reid, R. A. Zahawi, D. A. Zárrate-Chary, J. A. Rosales, K. D. Holl, U. Kormann, Multi-scale habitat selection of key frugivores predicts large-seeded tree recruitment in tropical forest restoration (In Review).
 67. L. C. Beltrán, H. F. Howe, The frailty of tropical restoration plantings. *Restor. Ecol.* **28**, 16–21 (2020).
 68. J. L. Reid, C. D. Mendenhall, R. A. Zahawi, K. D. Holl, Scale-dependent effects of forest restoration on Neotropical fruit bats. *Restor. Ecol.* **23**, 681–689 (2015).
 69. N. B. Schwartz, T. M. Aide, J. Graesser, H. R. Grau, M. Uriarte, Reversals of Reforestation Across Latin America Limit Climate Mitigation Potential of Tropical Forests. *Front. For. Glob. Change*. **3** (2020), doi:10.3389/ffgc.2020.00085.
 70. R. D. Fink, C. A. Lindell, E. B. Morrison, R. A. Zahawi, K. D. Holl, Patch Size and Tree Species Influence the Number and Duration of Bird Visits in Forest Restoration Plots in Southern Costa Rica. *Restor. Ecol.* **17**, 479–486 (2009).
 71. R. J. Cole, K. D. Holl, R. A. Zahawi, Seed rain under tree islands planted to restore degraded lands in a tropical agricultural landscape. *Ecol. Appl.* **20**, 1255–1269 (2010).
 72. J. H. G. Smith, D. L. Reukema, Effects of plantation and juvenile spacing on tree and stand development. *Oliver Chadwick Dearing Hanley Donald P Johns. Jay Eds Douglas-Fir Stand Manag. Future Proc. Symp. 1985 June 18-20 Seattle WA Contrib. No 55 Seattle Coll. For. Resour. Univ. Wash.* 239-245 (1986) (available at <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/20031>).
 73. M. L. Anderson, Spaced - Group planting. *Unasylva*. 7 (1953) (available at <http://www.fao.org/3/x5367e/x5367e02.htm>).

74. C. Spadeto, G. Wilson Fernandes, D. Negreiros, S. H. Kunz, Facilitative effects of tree species on natural regeneration in an endangered biodiversity hotspot. *Braz. J. Bot.* **40**, 943–950 (2017).
75. K. R. Eversole, Spacing tests in a Douglas-fir plantation. *For. Sci.* **1**, 14–18 (1955).
76. F. Hébert, C. Krause, P.-Y. Plourde, A. Achim, G. Prigent, J. Ménétrier, Effect of Tree Spacing on Tree Level Volume Growth, Morphology, and Wood Properties in a 25-Year-Old *Pinus banksiana* Plantation in the Boreal Forest of Quebec. *Forests.* **7**, 276 (2016).
77. T. Strong, E. Hansen, Hybrid poplar spacing/productivity relations in short rotation intensive culture plantations. *Biomass Bioenergy.* **4**, 255–261 (1993).
78. E. E. Oldfield, A. J. Felson, D. S. N. Auyeung, T. W. Crowther, N. F. Sonti, Y. Harada, D. S. Maynard, N. W. Sokol, M. S. Ashton, R. J. Warren, R. A. Hallett, M. A. Bradford, Growing the urban forest: tree performance in response to biotic and abiotic land management. *Restor. Ecol.* **23**, 707–718 (2015).
79. F. Schwerz, E. Eloy, E. F. Elli, B. O. Caron, Reduced planting spacing increase radiation use efficiency and biomass for energy in black wattle plantations: Towards sustainable production systems. *Biomass Bioenergy.* **120**, 229–239 (2019).
80. I. S. Alemdag, W. M. Stiehl, Spacing and Age Effects on Biomass Production in Red Pine Plantations. *For. Chron.* **58**, 220–224 (1982).
81. A. Trakhtenbrot, G. G. Katul, R. Nathan, Mechanistic modeling of seed dispersal by wind over hilly terrain. *Ecological Modelling* **274**, 29–40 (2014).
82. P. H. S. Brancalion et al., Maximizing biodiversity conservation and carbon stocking in restored tropical forests. *Conservation Letters* **11**, e12454 (2018).
83. C. Martínez-Garza, H. F. Howe, Restoring tropical diversity: beating the time tax on species loss. *Journal of Applied Ecology* **40**, 423–429 (2003).
84. C. A. Lindell, J. L. Reid, R. J. Cole, Planting Design Effects on Avian Seed Dispersers in a Tropical Forest Restoration Experiment. *Restor. Ecol.* **21**, 515–522 (2013).
85. P. H. S. A. Camargo, M. A. Pizo, P. H. S. Brancalion, T. A. Carlo, Fruit traits of pioneer trees structure seed dispersal across distances on tropical deforested landscapes: Implications for restoration. *J. Appl. Ecol.*, 1365–2664.13697 (2020).
86. H. F. Howe, Making dispersal syndromes and networks useful in tropical conservation and restoration. *Glob. Ecol. Conserv.* **6**, 152–178 (2016).
87. C. Kuaraksa, S. Elliott, The Use of Asian Ficus Species for Restoring Tropical Forest Ecosystems. *Restor. Ecol.* **21**, 86–95 (2013).
88. H. E. W. Cottee Jones, O. Bajpai, L. B. Chaudhary, R. J. Whittaker, The Importance of Ficus (Moraceae) Trees for Tropical Forest Restoration. *Biotropica.* **48**, 413–419 (2016).
89. R. A. Zahawi, J. L. Reid, Tropical secondary forest enrichment using giant stakes of keystone figs. *Perspect. Ecol. Conserv.* **16**, 133–138 (2018).
90. R. A. Zahawi, C. K. Augspurger, Early Plant Succession in Abandoned Pastures in Ecuador¹. *Biotropica.* **31**, 540–552 (1999).
91. S. P. Healey, R. I. Gara, The effect of a teak (*Tectona grandis*) plantation on the establishment of native species in an abandoned pasture in Costa Rica. *For. Ecol. Manag.* **176**, 497–507 (2003).
92. K. D. Holl, R. A. Zahawi, R. J. Cole, R. Ostertag, S. Cordell, Planting Seedlings in Tree Islands Versus Plantations as a Large-Scale Tropical Forest Restoration Strategy. *Restor. Ecol.* **19**, 470–479 (2011).
93. V. Reyes García, Á. Fernández Llamazares, P. McElwee, Z. Molnár, K. Öllerer, S. J. Wilson, E. S. Brondizio, The contributions of Indigenous Peoples and local communities to ecological restoration. *Restor. Ecol.* **27**,

3–8 (2019).

94. G. D. Gann, T. McDonald, B. Walder, J. Aronson, C. R. Nelson, J. Jonson, J. G. Hallett, C. Eisenberg, M. R. Guariguata, J. Liu, F. Hua, C. Echeverría, E. Gonzales, N. Shaw, K. Decler, K. W. Dixon, International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restor. Ecol.* **27**, S1–S46 (2019).
95. J. M. Rey Benayas, L. Martínez-Baroja, L. Pérez-Camacho, P. Villar-Salvador, K. D. Holl, Predation and aridity slow down the spread of 21-year-old planted woodland islets in restored Mediterranean farmland. *New For.* **46**, 841–853 (2015).
96. International Tropical Timber Organization, *ITTO guidelines for the restoration, management and rehabilitation of degraded and secondary tropical forests*. (International Tropical Timber Organization, Yokohama, Japan, 2002).
97. E. P. Fernandez Barrancos, J. L. Reid, J. Aronson, Tank bromeliad transplants as an enrichment strategy in southern Costa Rica. *Restor. Ecol.* **25**, 569–576 (2017).
98. K. Evans, M. R. Guariguata, Participatory monitoring in tropical forest management: a review of tools, concepts and lessons learned. *CIFOR* (2008), , doi:10.17528/cifor/002486.
99. L. Li, M. W. Cadotte, C. Martínez-Garza, M. de la Peña-Domene, G. Du, Planting accelerates restoration of tropical forest but assembly mechanisms appear insensitive to initial composition. *J. Appl. Ecol.* **55**, 986–996 (2018).
100. A. Ramírez-Soto, C. R. Lucio-Palacio, R. Rodríguez-Mesa, I. Sheseña-Hernández, F. N. Farhat, B. Villa-Bonilla, L. Landa Libreros, G. Gutiérrez Sosa, O. Trujillo Santos, I. Gómez Sánchez, E. Ruelas Inzunza, Is applied nucleation a straightforward, cost-effective forest restoration approach? Counter-response to Holl and Zahawi (2018). *Restor. Ecol.* **26**, 620–621 (2018).

**Pour savoir comment jouir des
bénéfices que peut vous offrir la
restauration, veuillez contacter :**

Conservation International (CI)

2011 Crystal Dr #600,
Arlington, VA 22202 USA

<https://www.conservation.org>