

An aerial photograph of a wetland restoration project. The landscape is a mosaic of green, brown, and blue patches, separated by a network of narrow, winding canals and straight lines of reclaimed land. The water in the canals and surrounding areas is a deep blue, while the land shows various shades of green and brown, indicating different stages of vegetation and soil. The overall pattern suggests a complex system of water management and land reclamation.

2

CHAPITRE 2

COMMENT ETABLIR UN PROJET DE RESTAURATION ?

Auteurs : Claudia AGRAZ HERNANDEZ, Julien ANDRIEU et Juliana PROSPERI

1 D'UNE VISION GLOBALE DES MANGROVES À L'ÉCHELLE DU SITE À RESTAURER

La question de l'intérêt et de la faisabilité de la restauration des mangroves se pose à différentes échelles, les échelles spatiales et temporelles auxquelles on observe les phénomènes étant d'une importance majeure.

À l'échelle d'un pays ou d'une région, il est intéressant pour les décideurs et les bailleurs d'avoir une vision globale du statut des mangroves et des zones dégradées qui nécessitent des restaurations, et éviter ainsi des projets qui n'auraient pas de sens. Dans des pays où la mangrove est bien conservée à l'échelle nationale, des zones dégradées peuvent exister localement. Dans des pays où la mangrove disparaît par la conversion en fermes à crevettes, la collecte du bois de chauffe ou autre, il est toujours possible d'observer une aire protégée efficace qui maintient ses mangroves, voire les restaure. Il est donc intéressant d'examiner la question des sites à plusieurs échelles.

À l'échelle nationale, on s'intéressera aux grands traits des mangroves du pays : quelle est la distribution et la surface des forêts de mangroves, quels types de mangroves existent (mangroves de bord de mer, d'estuaire, de rivière ...), quelles sont leurs caractéristiques structurelles, en combien de zones sont-elles réparties ? Quel est l'état de ces mangroves dans le pays ? Les superficies sont-elles en augmentation ou en diminution ces

dernières décennies ? Quel est le statut légal de ces mangroves, qu'en est-il du foncier ? Sont-elles protégées ? En partie ? Pas du tout ? Une revue bibliographique et cartographique des zones côtières permettra de répondre en partie à ces questions ; le Global Mangrove Watch offre également un outil intéressant pour les analyses à l'échelle des pays. L'analyse de l'ensemble des projets de restauration passés et en cours est utile à cette échelle.

Sur la base de cette vision globale, on pourra alors identifier un ensemble de sites potentiels à examiner à une échelle encore plus fine, en fonction des enjeux écologiques, de la dynamique hydro-sédimentaire, des facteurs de dégradation et des enjeux socio-économiques, notamment des besoins et attentes des communautés locales et de l'historique des restaurations passées. Ces sites potentiels pourront alors faire l'objet d'investigations plus précises : ont-ils déjà bénéficié de diagnostic, ont-ils connu des changements récents, quelles sont les causes et les facteurs de ces changements ? quelles communautés sont demandeuses ?

Une fois la zone d'intervention retenue, la restauration doit s'appuyer sur une bonne connaissance du milieu environnemental et socioéconomique. La séquence d'activités à prévoir est la suivante :

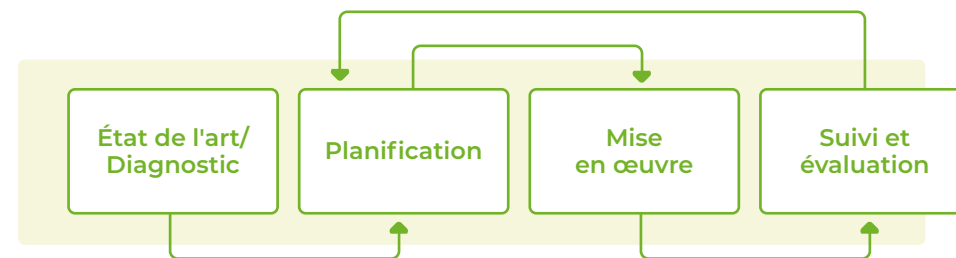


Figure 9.
Séquence
d'activités pour la
restauration d'une mangrove

Diagnostic environnemental et social

- **Comprendre le rapport des communautés à la mangrove** (activités, usages, valeurs), leurs attentes et leurs besoins, de façon à fixer les objectifs et co-construire un programme de restauration qui soit compris et accepté par la population ; leur participation est indispensable pour mener à bien toute initiative de restauration ;
- **Développer une analyse spatio-temporelle des changements dans les conditions environnementales** qui ont pu affecter la structure et la fonction de l'écosystème, en raison d'événements naturels (par exemple, les ouragans, les typhons) et/ou des impacts anthropiques (coupe de bois, aquaculture,...), ou encore les invasions, telle celle de la chenille défoliatrice (*Hyblaea pueria*) à Madagascar. La télédétection sera un outil très précieux à ce stade et au-delà ; on s'appuiera également sur les connaissances des communautés ;
- **Etudier, en fonction des objectifs fixés, la faisabilité de la restauration**, en développant une analyse des conditions environnementales actuelles de l'écosystème à restaurer, évaluées et comparées à celles d'une forêt de référence afin de définir l'ampleur et l'intensité des changements du comportement hydrologique et des paramètres physico-chimiques du sol et de l'eau ; ce diagnostic écologique permet de comprendre l'état de la mangrove, les causes de dégradation et de planifier une restauration adaptée.

Planifier la restauration

Le diagnostic permet la définition de techniques et de méthodes de restauration adaptées à la situation particulière de chaque site à restaurer. La formation des communautés locales leur permet de participer activement à la restauration.

Mettre en œuvre la restauration

Application des techniques et méthodes de restauration en impliquant les populations locales.

Assurer un suivi et une évaluation

En continu et bien au-delà du temps du projet, les suivis permettent d'évaluer le succès de la restauration, le niveau de récupération et adapter la stratégie : surveillance en continu des paramètres physico-chimiques du sol et de l'eau interstitielle sur le site restauré et de référence, afin de définir le niveau de récupération des conditions environnementales, et suivi des variables morphophysiologiques de la végétation récupérée grâce aux actions de reboisement et/ou de régénération naturelle.

ET À LA FIN DU DIAGNOSTIC, PARFOIS, IL FAUT SAVOIR DIRE NON !

Les résultats du diagnostic permettent de déterminer la faisabilité de la restauration, et de décider s'il y a lieu de poursuivre ou non les activités de restauration. Si la faisabilité est faible, il est encore temps de choisir un autre site, de changer de méthode ou de changer d'objectif.

Au moment où l'on envisage un projet de restauration, de nombreuses questions se posent. On ne connaît pas forcément bien les conditions locales, les autres projets, les désirs de la communauté locale sur leur environnement. Si trop de signaux virent à l'orange dans le diagnostic et notamment si les causes de dégradation ne peuvent pas être éliminées, il faut accepter l'idée de renoncer. Il existe d'autres méthodes et d'autres lieux qui s'y prêtent !

2

PRISE EN CONSIDÉRATION DES SAVOIRS LOCAUX ET DES ATTENTES DES COMMUNAUTÉS

Si le choix des sites à restaurer est souvent le fait d'ONG, financées par des bailleurs, ou des services administratifs locaux ou nationaux, un aspect crucial souvent négligé est l'implication des communautés locales. Tout effort de conservation ou de restauration dans une zone donnée sera plus fructueux s'il répond à un besoin des communautés locales et s'il bénéficie du soutien et de la compréhension des personnes vivant dans ou à proximité de cet écosystème. Le choix du site de restauration devra donc s'appuyer sur les besoins et les attentes exprimées par les communautés.

2.1 | PRISE EN CONSIDÉRATION DES SAVOIRS LOCAUX

Le savoir scientifique occidental n'est pas le seul savoir mobilisable pour diagnostiquer un environnement (par exemple diagnostiquer le potentiel de restauration d'une mangrove). Les communautés locales et les populations indigènes sont détentrices de savoirs locaux précieux pour mener à bien une intervention dans le milieu avec lequel elles interagissent. Pour aller plus loin, une part importante des restaurations de mangroves sont des interventions venant de l'extérieur (bailleurs internationaux, intermédiaires gouvernementaux et régionaux potentiellement détachés de la réalité des communautés locales, bureaux d'études étrangers ou urbains) qui manipulent des concepts différents de ceux manipulés par les communautés locales (et pas seulement pour des raisons linguistiques).



Sortie pêche dans les mangroves du delta du Saloum, Sénégal © Cormier-Salem, IRD

Sans renier aucunement tout ce que la science occidentale apportera au diagnostic permettant le choix et l'analyse des sites nous proposons, en vue d'une succession réussie d'intégrer au moins ces 5 conseils.

- **Interroger la communauté locale sans a priori** sur leurs connaissances de la mangrove, sur l'histoire du site et son évolution, sur leurs pratiques. Si de nombreux milieux ont été dégradés par les activités humaines ces dernières décennies, cela ne signifie pas que le site diagnostiqué a nécessairement suivi cette trajectoire. Or, dans le temps imparti par un diagnostic, vous aurez peu d'outils pour remonter loin dans le temps et connaître les états précédents de la mangrove ainsi que les facteurs de ces changements. Interroger les communautés locales pourrait être porteur d'informations cruciales.

Attention, le réflexe de beaucoup de personnes interrogées est de dire ce qu'ils pensent que nous espérons entendre. Si on vous associe à la protection de l'environnement vous risquez de générer un discours faussé qui va noircir le tableau passé et embellir les intentions à venir. Prenez-le temps d'aller au-delà de ce premier discours.

- Accorder un moment de **débat** à chaque fois que **les points de vue** des acteurs scientifiques externes et ceux des communautés locales divergent et ne vous précipitez pas dans votre souhait de convaincre. En effet, quand bien même les outils scientifiques sont parfois plus robustes que le savoir local, cette divergence risquera de se répercuter dans tout le projet si ce point n'a pas été débattu. Faites-le avec tact et montrez du respect quand vous contredisez des personnes sur leur savoir. Et, qui sait, vous pourriez aussi modifier votre compréhension du site.
- Confier aux communautés locales tous les éléments d'expertise qui peuvent leur être délégués. Un **continuum de répartition des tâches** est un objectif idéal. Si certaines tâches

très techniques sont menées uniquement par les intervenants scientifiques externes, d'autres peuvent être réalisées conjointement et certaines opérations pourront être complètement déléguées.

- Penser les choix que vous faites (ou ceux qui résulteront de votre diagnostic) en termes de **justice environnementale pour toutes les catégories**, en particulier les plus marginalisées qui seront celles qui risquent de moins s'exprimer et donc d'être exclues par les choix pris avec les catégories plus influentes. Interrogez-vous sur les rapports de force homme/femme, générationnels, l'existence de castes, de discriminations sur les origines (autochtones VS migrants), les ethnies, les couleurs de peau, etc. Si la communauté locale est dominée par une catégorie, cherchez une manière d'interroger les autres catégories pour ne pas résulter sur des choix injustes. C'est souvent cette catégorie qui dépend des mangroves.
- Délivrer un **accès complet de toutes les données** aux communautés locales, dès les premières étapes du diagnostic. Respectez le protocole de Nagoya. Ils sont détenteurs d'un savoir important et méritent aussi d'avoir accès à votre savoir.

2.2 | PRISE EN CONSIDÉRATION DES ATTENTES ET BESOINS DES COMMUNAUTÉS

Les mangroves que l'on cherche à restaurer sont des systèmes socio-écologiques. La société qui vit autour de ses mangroves (qui vit de ses mangroves) et les écosystèmes (la forêt de palétuviers, les chenaux, les vasières) sont étroitement reliées par un faisceau d'interactions complexes.

L'état de ce système, au moment où est envisagé une restauration, est le résultat de ces interactions (rarement de quelques événements complètement extérieurs au système socio-écologique). Ainsi, si la restauration est envisagée, cela signifie que l'on intervient sur au moins l'une de ces interactions société-mangroves, et donc que la restauration impactera aussi la société locale.

La gouvernance environnementale est mondialisée. Les objectifs que se donnent les principaux acteurs de l'environnement sont issus de cette gouvernance. Les projets de restauration les remobilisent localement. Si la prise en compte des attentes des communautés locales sur cette précise interaction société-mangrove arrive

trop tard, ou qu'elle n'est même pas envisagée (les décideurs peuvent par exemple mener une politique centrée sur des objectifs écologiques uniquement), la communauté locale n'adhérera très probablement pas au projet.

Deux options s'offrent alors au projet, assumer une gouvernance coercitive qui modifie les pratiques au nom d'une gouvernance écologique ou revoir cette gouvernance au regard des attentes des communautés locales.

Attention ici à ne pas confondre « sensibiliser sur les bénéfices attendus de la restauration envisagée » et « dialoguer avec les communautés locales sur leurs attentes ». Si la première est régulièrement et correctement menée, la seconde ne l'est que rarement et, plus gênant pour la réussite de la restauration, on croit parfois que la première suffit à remplacer la seconde (« inutile de leur demander quelle relation ils veulent avec la mangrove, autant leur expliquer pourquoi ils ne doivent pas y toucher »).

UNE NÉCESSAIRE PRISE EN CONSIDÉRATION DU CONTEXTE LOCAL : L'EXEMPLE D'UN PROJET AUX PHILIPPINES

Le Fond Français pour l'Environnement Mondial a financé un projet de renforcement de la résilience des populations côtières d'une région des Philippines fréquemment touchée par des aléas météorologiques (municipalité de Concepción, province de Iloilo). Pour cela, un projet exploratoire visait à tester une combinaison d'infrastructures "grises" (brises lames, pièges à sédiments) et "vertes" (reboisement de mangrove) associée à des projets offrant des sources de revenu supplémentaires. Les populations de pêcheurs habitent souvent en front de mer et garent leurs embarcations en face de leur domicile après la pêche. Si une zone de mangrove doit protéger les habitations elle doit alors occuper le front de plage en face des maisons. Or, d'une part, un bon diagnostic écologique, hydrologique et sédimentaire aurait rappelé que cet habitat n'est pas optimal (vagues et substrat sableux). D'autre part, un diagnostic social, auprès des populations locales, aurait permis de comprendre que, si le désir des infrastructures grises, compatibles avec le parking des bateaux était grand, la plantation des mangroves en face des maisons de pêcheurs, elle, n'était pas désirée, ni même souhaitée. De nombreux riverains ont donc continué à passer sur les reboisements et à garer leur bateau en face de chez eux, dès la fin du projet.



© J. Andrieu

Nous conseillons, très tôt dans le projet de faire mener par des spécialistes de sciences sociales, une enquête sur les attentes de la communauté en termes de gouvernance des mangroves pour concevoir dès les premiers stades du projet un projet inclusif permettant à la fois de restaurer les mangroves mais aussi de laisser aux populations la décision sur ce qui les lie aux mangroves.

Une restauration non désirée par les habitants ne doit pas être programmée. Faire des réunions publiques pour rappeler l'importance des mangroves ne suffit généralement pas à faire changer les désirs d'une communauté sur ses pratiques et ses usages. D'autant que l'on se situe dans un contexte d'intérêts divers, « la communauté locale » au singulier étant composée de catégories différentes aux opinions, en fait, et intérêts différents. Il est donc souvent pertinent de chercher des compromis entre les désirs et la réalité, entre ce qui est nécessaire, faisable et acceptable.

- Puisque la restauration envisagée est considérée comme nécessaire par plusieurs parties prenantes, il devient primordial de co-construire un diagnostic entre ces différentes parties prenantes.
- Puisque le projet doit être faisable faute d'échouer, il est important de bien lister les conditions objectives d'intervention.
- Puisqu'un projet se doit d'être acceptable, il doit d'une part répondre aux besoins et désirs des communautés et d'autre part ne buter sur aucun point de blocage (atteinte à un enjeu économique, contradiction avec une croyance religieuse, etc.)

Cette phase d'études des communautés permettra également d'informer les membres du rôle qu'ils pourront jouer dans la participation au diagnostic et dans la mise en œuvre de la restauration.

2.3 | ENGAGEMENT DE LA PARTICIPATION DES COMMUNAUTÉS

Au-delà de l'acceptabilité par les communautés de la restauration et de leur participation à la connaissance du milieu, la restauration ne peut se faire sans la participation des communautés locales : le creusement des canaux, la création des pépinières nécessitent une importante main d'œuvre et peut constituer pour les participants et leur famille, dans le cadre des projets, un revenu non négligeable.

3. APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION

L'imagerie satellitaire apporte aux diagnostics d'une mangrove pour laquelle on envisage une restauration divers éléments :

- Une cartographie de l'extension actuelle de la mangrove et de ses évolutions dans le temps ;
- Une vision de la zonation des espèces ;
- Des éléments sur les causes de dégradation, sur la pollution, la dynamique sédimentaire

PETIT RAPPEL SUR LES TYPES D'IMAGES ET LEURS CARACTÉRISTIQUES

On peut prendre des images depuis un drone, un avion, un satellite. Ces images peuvent être de simples photographies ou des mesures dites multispectrales (on mesure le rayonnement dans d'autres longueurs d'ondes que les couleurs visibles pour en apprendre plus). Beaucoup d'utilisateurs accordent une importance majeure à la résolution (un appareil avec beaucoup de capteurs produit une image avec beaucoup de pixels). Plus le vecteur vole haut plus ce pixel correspond à une grande surface.

Un bon appareil photographique monté sur un drone qui vole bas photographiera une feuille de palétuvier avec plusieurs milliers de pixels (peu utile, à moins de compter les insectes),

un satellite de moyenne résolution possède un pixel de 30m de côté (donc impossible de compter des jeunes pieds de palétuviers un a un pour savoir combien ont été plantés ou combien sont encore verts 1 an après).

Néanmoins, seul ce dernier type de satellite permet de savoir quel était l'état de la couverture végétale au milieu des années 1980. Les images pour faire une cartographie des dynamiques passées ne sont pas les mêmes que celles pour compter les plantules. Certaines sont gratuites, d'autres payantes (on n'en parlera pas ici). Certaines sont faciles à interpréter visuellement, d'autres demandent une formation, un logiciel spécialisé. Pas facile de s'y retrouver !



© C. Agraz Hernández

3.1 | UNE CARTOGRAPHIE DE L'EXTENSION DES MANGROVES AUJOURD'HUI

Connaître la répartition exacte des mangroves aujourd'hui est une première étape importante du diagnostic. C'est une opération relativement simple dans la majeure partie des sites. Deux options (gratuite) s'offrent à l'opérateur du diagnostic :

- Une interprétation visuelle sur Google Earth et une digitalisation manuelle dans un système d'information géographique. Il faut faire attention à distinguer les mangroves d'autres végétations humides et forestières de terre ferme adjacentes dans les climats humides (plus facile dans les climats secs). Plus rarement il y a des risques de confusion entre des mangroves basses et ouvertes et d'autres milieux infratidaux (herbiers) si l'image est de mauvaise qualité (et à marée basse).

UN CONSEIL

Utiliser conjointement deux ou trois images proches dans le temps dont la météo et les marées (ou la saison) varient pour s'assurer d'une interprétation robuste.

- L'autre option est l'analyse d'une image satellitaire multispectrale. Les images LANDSAT (30m) et Sentinel-2 (10m) sont gratuites et faire une carte de mangrove prend quelques heures à un télédéacteur compétent (voir une méthode assez facilement applicable : Andrieu et Mering, 2009).

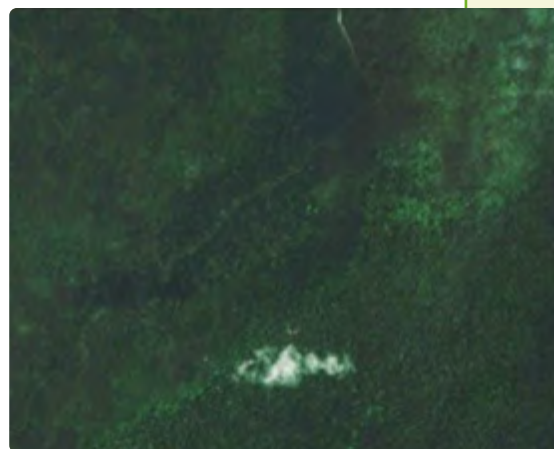


Illustration de la distinction d'une mangrove sur Google Earth dans 3 ou 4 climats différents

Des questions importantes sont à se poser, au regard du projet de restauration :

- à quelle échelle ai-je besoin de connaître l'extension des mangroves aujourd'hui ?
- Une cartographie fine et très locale du site envisagé suffit-elle ?
- A-t-on besoin de connaître l'extension des mangroves dans les alentours ?



© Martial Dosdane

3.2 | UNE CARTOGRAPHIE DES CHANGEMENTS DE LA MANGROVE REMONTANT, DANS LE MEILLEUR DES CAS, À PLUSIEURS DÉCENNIES

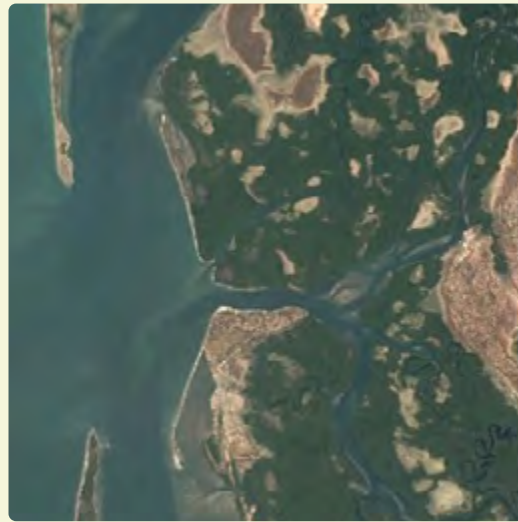
Plusieurs questions doivent guider le projet de restauration et la télédétection peut y répondre : Pourquoi faut-il restaurer ? Qu'est-ce qui est dégradé ? Est-ce local ou régional ? Depuis quand est-ce dégradé ? Peut-on essayer de deviner les facteurs de cette dégradation ?

Une cartographie diachronique de la mangrove sur les 3 ou 4 dernières décennies avec une imagerie LANDSAT sur une petite région (une zone de plusieurs kilomètres de côté) permettra de dire si la mangrove à cette échelle a diminué ou augmenté en surface, est restée stable avec des changements qui se compensent (plus ou moins autant de zones de gain que de zones de pertes) ou a été réellement stable (très peu de changements détectables).

En allant plus loin cette cartographie peut indiquer où ont eu lieu les changements, ce qui aide grandement à en comprendre les facteurs. Il est

Connaître l'état régional de la mangrove est intéressant (cf. paragraphe 1), connaître les sites de référence aussi, tout comme les sites où des propagules peuvent être récoltées. Un bon diagnostic cumulera donc ces deux échelles !

généralement possible d'identifier ce que sont devenues les surfaces où la mangrove a disparu (des zones en eau libre pour l'érosion), des zones inondées fermées pour les bassins à crevettes, des étendues de vase pour les déboisements (naturels et les coupes forestières), des zones bâties... Les dynamiques progressives doivent aussi être examinées ; elles sont plus nombreuses que ce qu'il y paraît : il est possible de voir si la sédimentation permet l'extension des mangroves, si les fermes marines abandonnées se régénèrent ; si d'autres projets de restauration sont des succès et si des dynamiques naturelles sont à l'œuvre, comme des fluctuations de la pluviosité pouvant générer des changements naturels de la mangrove. Tout cela sera à considérer dans un bon diagnostic.



Des années 1950 à la fin des années 1960, le Sénégal a connu une période très humide. Suivi dès 1969 d'une longue phase dramatiquement sèche. La mangrove de l'image de droite est peu étendue en cette année 1986, qui a suivi deux années particulièrement sèche. En revanche, la mangrove reste protégée des effets de houle par la flèche sableuse de Sangomar.

L'année suivante, celle-ci a cédé et face à la brèche, les mangroves ont été soumises à une houle qui leur est défavorable. Une partie

des sédiments fin ont été érodés et d'autres sédiments déposés ailleurs. En comparant avec l'image de droite en 2020, on explique mieux une partie des changements au centre de cette image. En revanche on peut aussi voir, entre 1986 et 2020, à quel point la végétation s'est densifiée et verdie. En effet, la période de sécheresse s'est terminée en 1998 et le retour à des conditions assez pluvieuses a été très favorable à la mangrove, qui possède la capacité de se régénérer quand son milieu s'améliore.

Illustration des dynamiques de la mangrove du Saloum et leur interprétation pour un diagnostic de restauration ©Google Earth

3.3 | UNE VISION DE LA ZONATION DES ESPÈCES

L'imagerie satellitaire offre un aperçu généralement simplifié de la zonation des espèces qui peut renforcer le diagnostic. L'analyse des images est plus délicate et il n'est pas nécessaire d'en réaliser une cartographie détaillée pour tous les projets de

restauration mais cela peut permettre de valider par exemple que l'on a choisi la bonne espèce au regard de la zonation telle qu'on la comprend en l'examinant à une échelle plus petite que celle offerte par les observations botaniques de terrain.



© M.M. Chavarría Díaz

3.4 | QUE VOIT-ON D'AUTRE GRÂCE À L'IMAGERIE ?

Un aperçu des dynamiques sédimentaires

Il est intéressant d'utiliser les images satellites pour une bonne compréhension des dynamiques sédimentaires. C'est tout particulièrement le cas des mangroves protégées de la houle par des flèches sableuses dynamiques. Il est important pour un bon diagnostic de voir si des embouchures s'ouvrent et se ferment, si c'est régulier (saisons) ou irréguliers (cyclone). Cette information peut permettre d'expliquer des changements d'état de la mangrove diagnostiquée.



Une idée des sources de pollution

©Google Earth



Dans le même esprit, un examen attentif des environs de la mangrove diagnostiquée, tout particulièrement à l'amont est important : est-il possible de repérer des sources de pollution à l'amont de la mangrove ? (Fermes marines, usines, grandes villes) ; Est-ce que des barrages sont présents et pourraient provoquer une fragmentation hydro-écologique ? (Séparer l'eau douce à l'amont et l'eau de mer à l'aval est néfaste pour les écosystèmes de mangrove).

LE NDVI UN OUTIL INTÉRESSANT MAIS DÉLICAT À UTILISER



Les palétuviers, comme toutes les plantes chlorophylliennes sont bien vertes et pratiquent une intense photosynthèse dans les meilleures conditions et sont moins vertes et ralentissent leur photosynthèse en cas de stress écologique. L'imagerie satellitaire multispectrale permet de mesurer, pour un même pixel en simultanée parfaite, le signal dans la couleur rouge et dans une longueur d'onde appelée « proche infrarouge » qui est réfléchi par les plantes qui pratiquent la photosynthèse. On combine ces deux mesures dans un indice (Indice normalisé de végétation NDVI en anglais) qui peut renseigner sur la santé du couvert végétal. On peut donc (en

théorie) comparer ce NDVI entre deux zones de la mangrove diagnostiquée ou entre deux périodes. Mais attention, toutes les fluctuations de cet indice ne sont pas significatives et il faut de nombreuses données (donc beaucoup d'images) pour une interprétation robuste qui guidera réellement le diagnostic.



Figure 10. Source schéma : Bikesh Bade, tutoriel All you need to know about NDVI

4 DIAGNOSTIC ÉCOLOGIQUE DE TERRAIN

La zonation des espèces de mangrove dépend d'une combinaison de facteurs chimiques et physiques, résultant des conditions spécifiques générées par la fréquence, l'amplitude et la période de la marée, les précipitations, l'apport d'eau douce, le taux d'évaporation, la température. Ces facteurs déterminent la salinité, le pH, le potentiel d'oxydoréduction (potentiel redox) et les nutriments de l'eau interstitielle du sédiment forestier, déterminants de la distribution des espèces de mangrove. La survie des espèces est limitée par leur tolérance à ces paramètres.

S'il est difficile de ramener la structure et la fonction de l'écosystème à son état d'origine, il est possible de préparer le terrain afin d'accélérer la régénération d'une forêt de mangroves dégradée.

La mise en œuvre d'un diagnostic environnemental aussi détaillé que possible à l'échelle du site, avant restauration, est essentiel pour comprendre les causes de dégradation et concevoir des stratégies de restauration et de conservation mieux adaptées aux besoins spécifiques de chaque localité. Ces stratégies sont diverses, elles peuvent passer par de simples mises en protections pour réduire les activités sources de dégradation, mais elles conduisent le plus souvent à restaurer l'hydrologie du site. Le diagnostic permet de définir les techniques les plus appropriées pour restaurer l'hydrologie en recréant les conditions propices au développement des communautés végétales, accompagner la recolonisation naturelle ou reboiser si nécessaire (reforestation).

Le diagnostic permet de comparer et d'ajuster les paramètres physico-chimiques dans les zones à restaurer par rapport à des zones de référence où la mangrove est en bon état ; une fois les intervalles souhaités atteints pour les différents paramètres, le plan de reboisement peut être envisagé.

La distribution des différents types physiologiques de mangrove et des différentes espèces qui les composent est principalement conditionnée par l'hydrologie, notamment l'hydropériode, la distribution microtopographique et la salinité interstitielle (Flores Verdugo et al., 2007).

Un diagnostic complet doit considérer :

- le comportement de l'**hydropériode** (cycle du niveau d'eau dans la mangrove),
- la **distribution microtopographique**, tant la microtopographie que l'hydropériode établissent les conditions physiques et chimiques uniques qui influencent le type d'écosystème, sa structure et sa fonction,
- de nombreux **paramètres physico-chimiques** tels que la salinité, les nutriments dans l'eau interstitielle, le potentiel d'oxydoréduction et les valeurs de pH, car tous ces facteurs régulent l'habitat de la mangrove.

En outre, la structure de la forêt, les caractéristiques de la végétation, la dominance et la présence d'espèces, l'identification de bio-indicateurs doivent également être considérées.

Ces paramètres sont mesurés régulièrement sur le site de référence et sur le site à restaurer, qui seront étudiés avant, pendant et après la restauration.

Enfin, il est important d'identifier les activités et les usages de la forêt ainsi que l'ensemble des pressions qui, de loin (bassins versants) ou de près, sont sources de dégradation de l'écosystème. Car si la zone à restaurer est soumise à un stress ou à une contrainte quelconque, il est essentiel, pour garantir le succès de la restauration, d'identifier et, dans la mesure du possible, d'éliminer ou réduire les causes de ce stress.

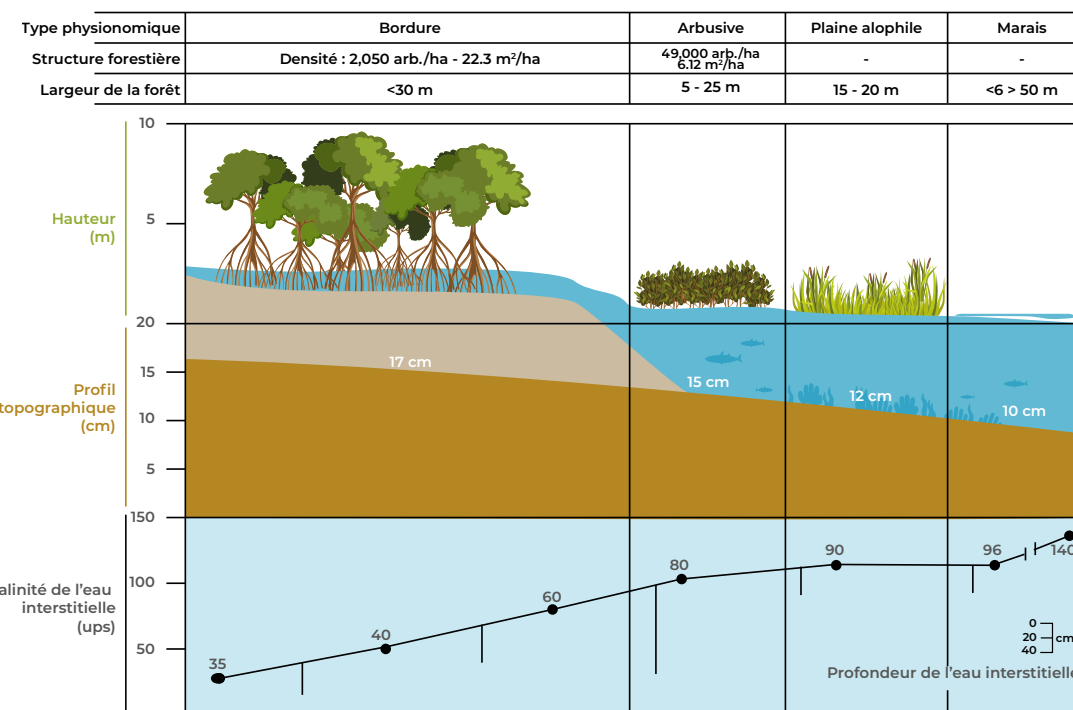
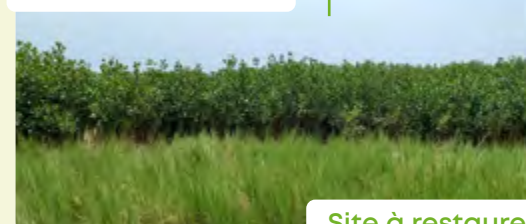


Figure 11. Profil de végétation dans une forêt de mangrove du système Boca Cegada, Nayarit, Mexique. (Agraz Hernández, 1999)

1- Choix d'un site de référence

Pour revenir à la structure de la forêt de référence

Site de référence



Site à restaurer

2- Étude de la physiologie de la forêt (zonation)

Densité, hauteur, fréquence des espèces de palétuviers...



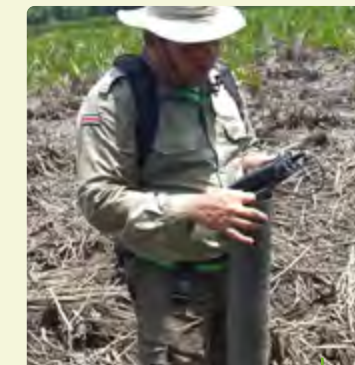
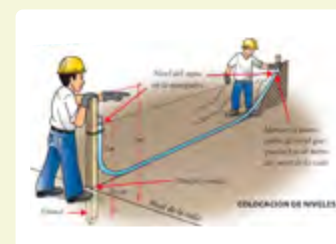
3- Étude de l'hydropériode

(Fréquence, hauteur et durée de l'inondation) Régule de nombreux paramètres et conditionne l'installation des différentes espèces



4- Analyse de la microtopographie

Détermine la distribution des types physiologiques



5- Analyse physico-chimiques des eaux interstitielles

(Salinité, pH, nutriments, potentiel Redox) Régule l'habitat de la mangrove

Figure 12. Principales étapes du diagnostic environnemental

4.1 | ÉTAT DE L'ART

Le diagnostic démarrera par un état de l'art sur la base d'une analyse de la documentation et des cartographies existantes : analyse historique, couverture végétale (analyse spatiale des cartes existantes), faune et flore y compris les espèces

4.2 | LE CHOIX DES SITES

Une visite prospective sera réalisée afin de faire une première reconnaissance du terrain, d'identifier la distribution et l'étendue des forêts, leurs caractéristiques structurales, ainsi que repérer les zones dégradées et la présence d'arbres morts, afin d'évaluer les sites potentiels de restauration et de définir la (les) forêt(s) de référence.

Le choix d'un (des) site(s) de référence

Il est essentiel de sélectionner une forêt de mangrove, en bon état écologique, avec des propagules des espèces de mangrove indigènes de la région afin :

envahissantes, climat (pluie et température), hydrologie, évolution des activités anthropiques (usages historiques et actuels), gouvernance et mode de gestion.

1. de pouvoir comparer ses conditions environnementales avec celles du site de restauration : ces éléments serviront de référence pour déterminer les espèces à réintroduire, pour définir les intervalles de tolérance (minimum et maximum) des différents paramètres à atteindre après les actions de réhabilitation hydrologique, le moment optimal pour la collecte de propagules et la période la plus propice au reboisement, si nécessaire,
2. et collecter le matériel (propagules d'espèces indigènes) pour la restauration.

La comparaison des paramètres physico-chimiques des eaux interstitielles entre les sites



Image aérienne montrant le site de référence et le site à restaurer Cuajiniquil, Costa Rica. Crédits Google Earth année 2013: M. en C. Felipe Chavarria Díaz y M. en C. María Marta Chavarria Díaz (Latitude : 10°55'15.22"N; Longitude : 85°42'55.99"O).

de référence et de restauration sont nécessaires pour définir le type de restauration écologique à effectuer et permettent de définir le « design » de la restauration.

L'objectif de la restauration est ainsi de récupérer, dans le site à restaurer, les paramètres environnementaux au plus près du site de référence et dans la gamme de tolérance des espèces à reboiser, afin d'assurer la récupération du comportement hydrologique et la survie de la végétation reboisée et/ou établie par régénération naturelle.

Dans cette forêt de référence ou dans cette zone sélectionnée uniquement pour la collecte de propagules, il convient d'établir des profils de végétation et de surveiller les paramètres physiques, chimiques et biologiques (conformément à la méthodologie décrite pour le diagnostic environnemental).

4.3 | TYPES PHYSIONOMIQUES DE LA MANGROVE



Mesure du diamètre du tronc pour l'étude de la surface terrière © C. Agraz Hernández

Les variations physico-chimiques de l'eau et du sol et les différences d'inondation, de la mer vers la terre, induisent une zonation de la mangrove, avec une succession de formations végétales en "bandes" distinctes (types physionomiques ou faciès).

Les types physionomiques des forêts de mangrove sont déterminés par l'analyse de la structure forestière à partir du calcul des attributs forestiers (densité, hauteur, diamètre du tronc). Ces attributs présentent une variabilité en raison de la grande hétérogénéité spatiale des paramètres environnementaux qui se manifestent dans les mangroves.

Il est courant que les types physionomiques changent le long des gradients topographiques, de la mer vers la terre, en raison des variations dans le niveau d'inondation, du temps de résidence

de l'eau (hydro période), de la concentration en salinité et de la disponibilité en oxygène dans l'eau interstitielle (eau qui s'écoule entre les espaces des particules composant le sol).

La physionomie des forêts de mangrove le long du profil végétal depuis le bord de l'eau jusqu'à l'intérieur de la forêt, est étudiée lors d'un parcours prospectif afin de définir l'organisation de ces attributs et la dominance des espèces. Dans chaque type physionomique, au minimum deux quadrats de 100 m² (10x10) ou 50 m² sont établis, parallèles ou perpendiculaires à la côte, selon la largeur de la forêt. Chaque quadrat est délimité avec un ruban, et les quatre points cardinaux de chaque quadrat sont géoréférencés.



Claudia Agraz Hernández ©DR

Les premiers quadrats sont d'abord installés à la transition entre la mer et la terre (ligne de côte, estuaire, baie, etc.). La deuxième installation est établie dans la zone suivante, où la hauteur et la densité de la forêt changent, en excluant la zone de transition entre les forêts, et ainsi de suite.

Pour chaque quadrat, toutes les espèces d'arbres sont comptées et identifiées, et la hauteur est déterminée à l'aide d'une règle télescopique graduée, tandis que le diamètre est mesuré à 1,30 m du sol avec un ruban dendrométrique. Dans le cas des espèces présentant des racines aériennes, le diamètre est mesuré à 30 cm au-dessus de la dernière racine aérienne.

Lorsque la densité d'individus est très élevée, il est recommandé de réduire la taille du quadrat, par exemple dans les forêts de type arbustive.



Le calcul des attributs forestiers est effectué pour chaque quadrat, et la moyenne est établie à partir des deux quadrats par communauté, comme indiqué ci-dessous :

- **Densité absolue** : nombre moyen d'individus d'une espèce par zone d'échantillonnage ;
- **Densité relative** : densité absolue de l'espèce par rapport au total des densités absolues de toutes les espèces ;
- **Fréquence** : pourcentage d'unités d'échantillonnage dans lesquelles l'espèce est présente par rapport au nombre total d'unités utilisées ;
- **Hauteur** : hauteur moyenne des individus de l'espèce ;
- **Surface terrière (basal area)** : On divise le diamètre (en cm) par deux pour obtenir le rayon (r). Ensuite, on calcule la surface ($\pi (3,1416) \times r^2$ en cm^2). Le calcul de la moyenne des surfaces basales de chaque espèce de palétuvier fournit l'aire basale moyenne de chaque espèce en cm^2 (ABP). La surface terrière moyenne de chaque espèce (ABP) est multipliée par la densité absolue de chaque espèce, indiquant ainsi la surface par hectare de chaque espèce en particulier. Ensuite, la valeur est divisée par 10 000 pour obtenir la surface terrière par hectare de chaque espèce en $\text{m}^2/\text{hectare}$. La somme des surfaces terrières par hectare des différentes espèces donne la surface terrière totale ;
- **Dominance** : surface terrière totale de l'espèce sur la surface terrière totale de toutes les espèces du peuplement ;
- **Indice de valeur d'importance (IVI)** : caractérise l'importance d'une espèce par rapport à l'ensemble des autres espèces (= densité relative + dominance relative + fréquence relative).

© C. Agraz Hernández



© C. Agraz Hernández

4.4 | IDENTIFICATION DES ESPÈCES BIO INDICATRICES

Plusieurs bioindicateurs, animal ou végétal, et observables à l'œil nu, peuvent donner des informations sur l'état de la mangrove. Nous en citerons quelques-uns ci-dessous :

- **Pneumatophores** : leurs extrémités desséchées indiqueraient des changements du comportement de l'hydropériode ;
- **Changements de la dominance d'une espèce**, ou feuillage dégarni chez d'autres : pourrait être la conséquence d'une modification des paramètres physico-chimiques de l'eau interstitielle ;
- **Augmentation des halophytes** associées aux espèces de mangrove (*Sesuvium*, *Salicornia*, etc) peut indiquer :
 - des changements dans les conditions environnementales favorisant la croissance des plantes halophytes, tels que des variations de la salinité de l'eau ou du sol. Dans certains cas, cette situation peut refléter une dégradation de l'écosystème de mangrove, une approche importante dans l'étude de la dégradation de l'écosystème,
 - un processus naturel de succession écologique ou une plus grande diversité végétale dans l'écosystème, ce qui pourrait être le résultat de la récupération des conditions environnementales grâce à la mise en œuvre d'actions de restauration.
- **L'augmentation de la présence de champignons et d'insectes** est attribuée aux changements environnementaux qui provoquent la dégradation de l'écosystème. L'augmentation de la présence de certains insectes xylophages et de champignons saprophytes dans la zone est due à la présence d'arbres stressés et en processus de sénescence (Macías et al., 2023).

- **Diminution ou absence de crabes**, leur densité peut varier par déficit de l'oxygène dissout dans l'eau interstitielle



Site colonisé par (A) *Salicornia* et (B) *Sesuvium portulacastrum*. (A) © J. Prosperi, (B) © M. Chavarria

4.5 | REPÉRAGE DES ESPÈCES INVASIVES

L'impact des plantes envahissantes sur les écosystèmes côtiers et marins est significatif, car elles peuvent altérer les cycles biogéochimiques, modifier les habitats et affecter des zones clés pour la reproduction et l'alimentation des oiseaux et des tortues aquatiques/côtières (Alonso & Castro-Díez, 2015).

Il existe de nombreux documents mentionnant des événements d'invasion et des espèces envahissantes dans les mangroves du monde entier, comprenant à la fois des espèces exotiques introduites accidentellement et des espèces indigènes devenues invasives en raison de modifications de l'habitat (Biswas et al., 2018). Par exemple, la fougère *Acrostichum aureum* est devenu envahissant dans plusieurs pays, notamment en Malaisie, en Australie, en Inde et dans plusieurs pays d'Amérique centrale et du sud tels que Porto Rico, le Brésil, le Panama, le Mexique et le Costa Rica, mettant en évidence la nécessité de traiter ce problème pour protéger l'intégrité des mangroves et des écosystèmes côtiers.

En Afrique, les activités humaines, la production de sel, la coupe de bois pour la construction, le combustible, ou l'aquaculture, et les apports d'eaux usées ont détérioré l'habitat des mangroves. En conséquence, l'espèce d'herbe envahissante *Paspalum vaginatum*, initialement

introduite pour nourrir le bétail et utilisée dans les terrains de golf, a envahi ces écosystèmes. Cette invasion fragmente et dégrade davantage les mangroves, affectant leur composition, leur structure et leur fonctionnement. Il est essentiel de traiter ces menaces pour préserver la biodiversité et les services écosystémiques fournis par les mangroves.



Colonisation par *Paspalum vaginatum* Ouidah, en Afrique ©DR



Colonisation des berges par la fougère *Acrostichum aureum* (en premier plan). © A. Rosenfeld

MIKOKO, LE PORTAIL D'ÉCHANGE DES SAVOIRS SUR LA MANGROVE

<https://portal.mikoko.co.ke/>

Le projet Mikoko, initiative intégrée pour le renforcement des capacités pour la restauration et la conservation des mangroves au Kenya, s'articule autour d'un outil transversal et stratégique : le Portail d'échange des savoirs sur la mangrove (Portail Mikoko). Ce portail numérique rassemble et échange, en libre accès, des données et des connaissances pertinentes sur l'environnement des mangroves, avec un accent particulier sur la biodiversité (biodiversité animale et végétale géoréférencée, données cartographiques, observations, outil d'identification des plantes, entre autres) fournissant un outil de gestion des mangroves fiable et durable au Kenya. Le Portail Mikoko est constitué de divers modules



dont un outil pédagogique pour l'identification des plantes dédié aux non-spécialistes (pas besoin d'avoir des connaissances botaniques), avec un accès multi-entrées. L'utilisateur pourra se familiariser avec plus de 50 espèces de mangroves des littoraux indopacifiques, les plus diversifiés au monde! Si ce portail concerne le Kenya, ces modules, et notamment celui-ci, constituent des outils mobilisables par tous.

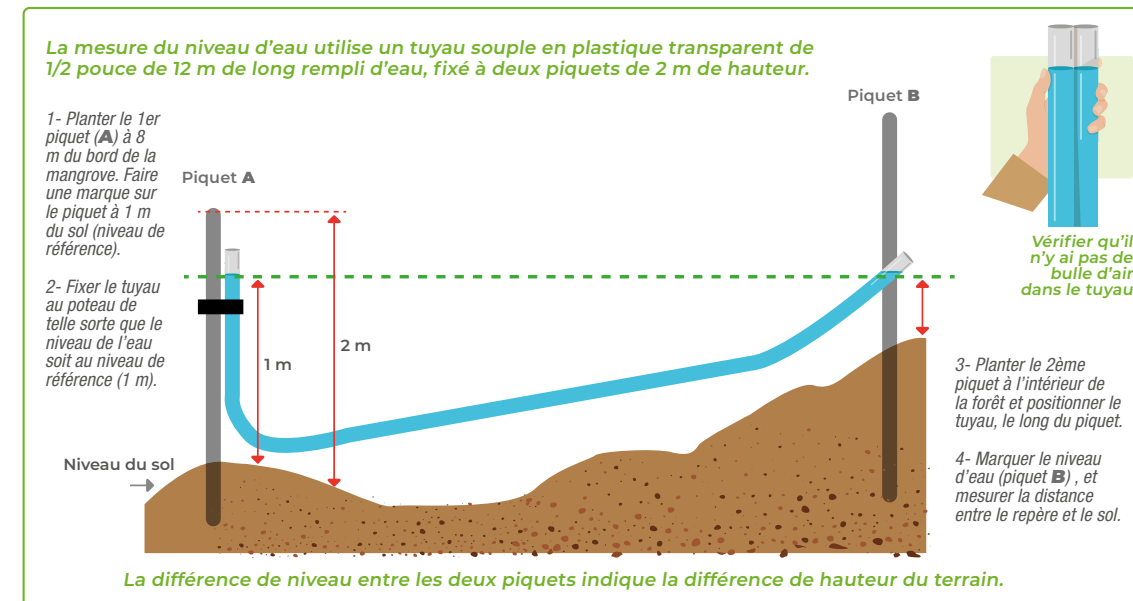
4.6 | ANALYSES DE LA TOPOGRAPHIE DU SITE

Les variations microtopographiques déterminent la distribution des types physiologiques de la mangrove, ainsi que la présence ou l'absence d'espèces pouvant se développer dans des zones potentiellement susceptibles de reboisement ou de reforestation. Elles permettent d'identifier le besoin d'excaver ou, au contraire, de combler le terrain afin de restaurer le niveau topographique adéquat. Dans les mangroves, une différence de seulement 3 cm dans le microrelief du sol et de 60 à 80 ups

de salinité par rapport à l'eau interstitielle distingue une forêt de mangrove en bordure d'un fourré monospécifique d'*Avicennia germinans* (Agraz Hernández, 1999).

Pour déterminer la distribution microtopographique, deux méthodes peuvent être utilisées en fonction de la taille de la zone à restaurer (supérieure ou inférieure à 20 ha) :

Figure 13. Méthode du niveau d'eau



ups : unité pratique de salinité (équivalent approximativement à 1mg/g de sels)

Site de restaurations >20 ha

La "méthode traditionnelle avec une bouteille de niveau" est une technique topographique pour déterminer les différences de hauteur sur le terrain. On utilise un tuyau transparent de 12 mètres, rempli d'eau et connecté à deux points du terrain séparés de 8 m environ (figure 13).

Cette procédure est répétée le long du profil de végétation, en enregistrant le début et la fin de chaque type physionomique, ainsi que la présence d'espèces adultes et de plantules.

La topographie sera déterminée à la fois dans la zone de référence et dans la zone de restauration afin de définir, par comparaison, les zones de reboisement et les espèces à planter.

En cas de détection :

- de subsidences, lorsque le niveau du sol est en dessous de la distribution des espèces de mangrove, les sédiments extraits lors de la construction des canaux artificiels seront déposés pour le combler et le niveler,
- d'accrétions, lorsque le niveau du sol est au-dessus de la distribution des espèces de mangrove, des excavations seront réalisées pour permettre le passage des flux d'eau.

Site de restauration < 20 ha

La méthode RTK (Real-Time Kinematic) est une technique avancée de positionnement utilisée pour obtenir les différences de niveau du sol de la

zone d'intérêt avec précision et en temps réel. Elle repose sur des récepteurs GPS de haute précision et des stations de base, qui transmettent des corrections différentielles au récepteur RTK sur le terrain.

Le processus commence par l'installation d'une station de base en un point connu et stable dans la zone. Ensuite, un récepteur RTK (antenne) est déployé dans la zone à cartographier. Ce récepteur permet de calculer la position du sol avec une précision centimétrique en temps réel, sur la base des corrections différentielles reçues, via satellites, par la station de base. Le récepteur RTK mesure également la hauteur à l'aide de signaux GNSS, fournissant une représentation tridimensionnelle du terrain.

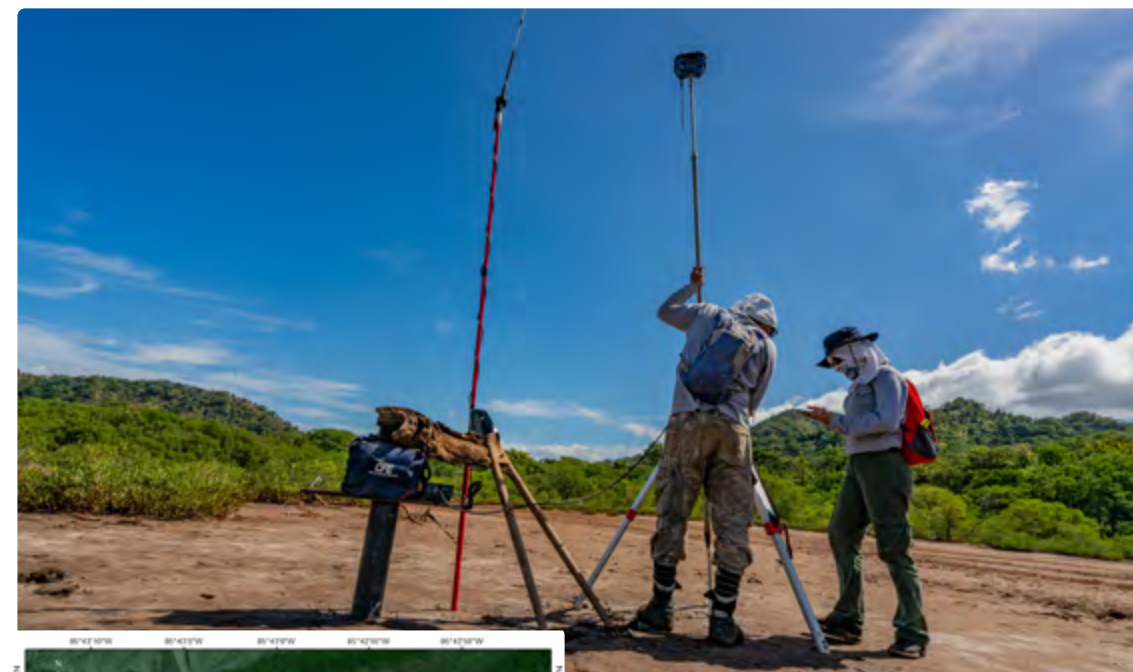
Au fur et à mesure que le récepteur RTK se déplace dans la zone d'intérêt, il enregistre continuellement des données de position et de hauteur, stockées dans une unité de stockage ou transmises en temps réel à un dispositif de traitement des données.

Une fois l'arpentage terminé, les données sont traitées à l'aide de logiciels spécialisés pour créer un modèle numérique du terrain, qui comprend des détails sur l'élévation, la pente et d'autres aspects topographiques de la zone cartographiée. Lors de l'application de la méthode RTK dans les écosystèmes de mangrove, les données sont corrigées par rapport au niveau moyen de la mer.

RTK (REAL TIME KINEMATIC)

Est une technique de topographie qui utilise des mesures de phase de navigateurs GPS, GLONASS et/ou Galileo. Avec une seule station de référence, elle fournit des corrections en temps réel pour atteindre une précision submétrique.

Figure 19. Détermination du niveau topographique avec la méthodologie RTK au Bénin (photo à gauche) et distribution microtopographique d'une forêt de mangrove dégradée sur un site de Cuajiniquil, Costa Rica, 2018 (photo bas).



© A. Rosenfeld



Figure 14. Carte de la microtopographie de la zone à restaurer par la méthode RTK (Cuajiniquil)

4.7 | ANALYSE DE L'HYDROPÉRIODE

L'hydropériode correspond à la fréquence, la hauteur et la durée de l'inondation dans les différentes zones de la mangrove. Cette inondation est le résultat d'une combinaison de facteurs, tels que les effets de la marée, les apports fluviaux, le ruissellement et les fluctuations de la nappe phréatique. Le comportement de ce paramètre physique est également influencé par la microtopographie.

L'hydropériode détermine les conditions physico-chimiques de l'eau interstitielle et du sol, qui conditionne la structure de la mangrove et l'installation des espèces dans les zones ; elle permet de déterminer également les zones adaptées au projet de reboisement (Flores Verdugo et al., 2007). Ainsi, si le régime hydrologique du site a été modifié, il est essentiel d'établir les paramètres nécessaires pour définir les techniques de réhabilitation les plus favorables.

Quantification rapide des niveaux d'inondation

Les modèles hydrodynamiques et de marée sont des outils indispensables pour prévoir les changements dans l'amplitude de l'inondation dans les écosystèmes de mangrove.

Les zones d'inondation nictémérale sont délimitées pendant les marées basses, les marées hautes et pendant la période des marées les plus hautes dans les différentes formations végétales (ou types physionomiques) de la mangrove, tel que déterminé dans l'analyse de la structure forestière. Ceci est réalisé en se basant sur les tables de marées spécifiques au site et en tenant compte de l'heure. Cette détermination sera effectuée lors de l'évaluation de la microtopographie (voir méthode d'étude de la topographie).



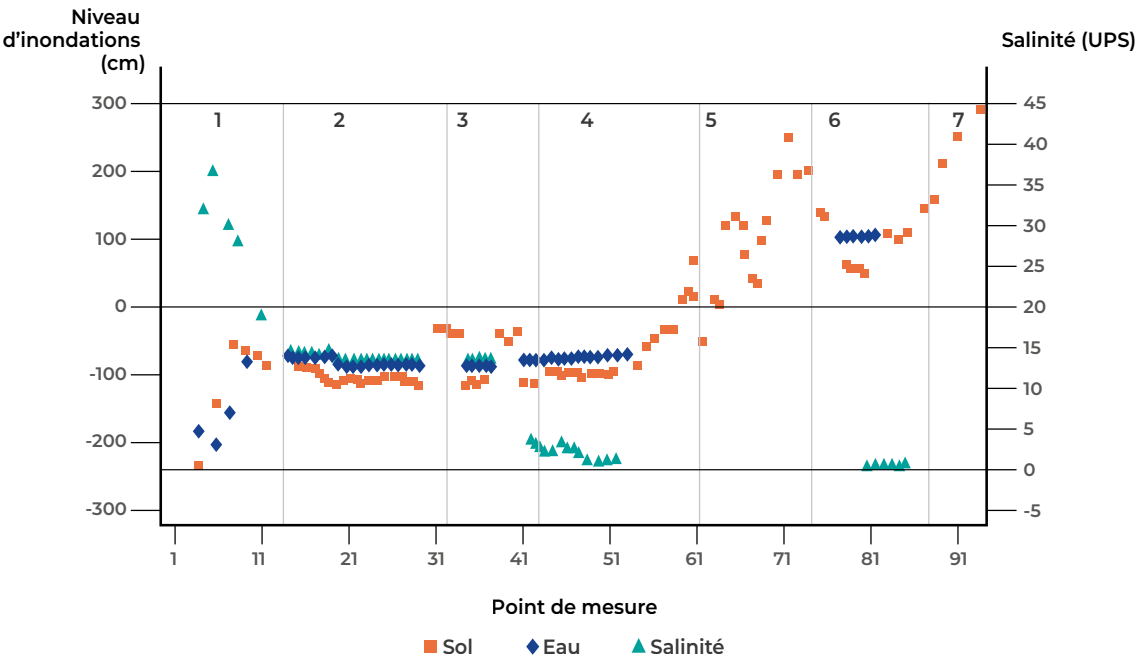
© J. Reyes Castellanos

La méthode est la suivante : plusieurs jalons sont installés le long du profil de végétation, du bord de mer vers la terre ; le premier est placé en dehors de la mangrove, dans l'eau, et un autre au début de la forêt, à 10 mètres après la limite inférieure. Le troisième jalon est situé à 10 mètres du deuxième, et ainsi de suite jusqu'à couvrir les différents types physionomiques.

Une fois les jalons installés, l'amplitude d'inondation est mesurée simultanément sur chacun d'eux, à l'aide d'un mètre ruban, en mesurant la distance entre le sol et le niveau maximum de l'eau (amplitude de marée) au moment des marées les plus hautes et les plus basses.

QUALITÉ DU SOL ET DES SÉDIMENTS (I. SAKHO)

La teneur en eau du sol et la qualité physico-chimique des eaux interstitielles sont contrôlés par la texture du substrat. L'étude granulométrique sur les trois fractions suivantes (sable, silts et argile, sur des échantillons de sol prélevés à différentes profondeurs au niveau des 20 à 30 premiers centimètres) est donc capitale pour l'analyse des facteurs d'échecs ou de succès dans un projet de restauration de mangrove. Ces prélèvements in situ et les analyses texturales en laboratoire peuvent être associés à des observations macroscopiques sur le terrain notamment à partir de la couleur du sol. A Joal (Sénégal) un taux de mortalité important a été observé sur un site où le sol présentait un aspect rouge brun caractéristique d'un sol riche en oxyde de fer et d'alumine.



	(1) Forêt de <i>Rhizophora</i> sp.	(2) Forêt de <i>Avicennia</i> sp. <i>Laguncularia</i> sp.	(3) Zone humide Tular	(4) Zone humide Popal	(5) Zone inondable	(6) Lac interdunaire	(7) Végétation inondable
Végétation	<i>Rhizophora mangle</i>	<i>Avicennia geminans</i> , <i>laguncularia racemosa</i>	<i>Typhia domingensis</i>	<i>Sagittaria lancifolia</i> , <i>Pontederia sagittata</i>	<i>Echinochloa pyramidalis</i>	<i>Pistia stratiotes</i>	<i>Annona globra</i> , <i>Pachira aquatica</i> , <i>Ginoria nudiflora</i>
Potentiel redox pendant la saison sèche (mV)	116.8 ± 13.8	425.7 ± 4.3	311.7 ± 31.7	238.0 ± 21.7	456.6 ± 8.6	430.3 ± 24.9	483.7 ± 13.4

Figure 15. Profil topographique et végétal le long d'une zone humide au nord de la lagune de La Mancha, Veracruz, Mexique. Le niveau de l'eau, du sol et la salinité sont présentés le long des différentes communautés du transect. Le potentiel redox a été mesuré à une époque où la lagune interdunaire était complètement à sec (Flores Verdugo et al., 2007).

4.8 | ANALYSE DE LA QUALITÉ DE L'EAU INTERSTITIELLE

Salinité, pH, potentiel d'oxydoréduction et température

Les études *in situ* des paramètres physico-chimiques de l'eau interstitielle, la température, le pH, la salinité et le potentiel d'oxydoréduction, sont effectuées tout au long de l'année, à une fréquence minimale de deux fois par saison. Ces mesures sont faites à partir de piézomètres, deux par type physionomique.

Les piézomètres sont constitués d'un tuyau en PVC (chlorure de polyvinyle) de 10 cm de diamètre et de 1,5 mètre de long. Des trous de 1 cm de diamètre sont percés dans chaque tube sur les 30 derniers centimètres de chaque tube, correspondant à la zone où se trouve la plus grande quantité de biomasse de racines d'arbres, ce qui permet à l'eau interstitielle de pénétrer à l'intérieur du tube (Flores-Verdugo et al., 2007).



© C. Agraz Hernández



Figure 16. Installation de tuyaux en PVC dans les sous-parcelles de reboisement pour la collecte d'échantillons d'eau et la mesure des paramètres physico-chimiques in situ, conformément à Agraz Hernández et al. (2007). © C. Agraz Hernández

Dans le site de référence

Dans la forêt de référence, le piézomètre doit être placé à la profondeur où la biomasse racinaire maximale est détectée, sur les profils de végétation. Ce processus est crucial pour enregistrer les intervalles des paramètres physico-chimiques de l'eau interstitielle dans la mangrove en bon état, car ces données seront comparées avec les intervalles enregistrés dans la zone à restaurer afin d'établir les stratégies de restauration.

Dans le site de restauration

Le site de restauration doit être divisé en parcelles de 100 m x 100 m qui seront délimitées. Si les gammes de paramètres environnementaux s'avèrent très larges, il est conseillé de réduire les dimensions de la parcelle à 60 m x 60 m, afin d'établir des unités de mesure plus précises.

Installation des piezomètres

Les piézomètres doivent être enterrés jusqu'à une profondeur où le système racinaire est le plus développé (environ 50 cm depuis la surface des sédiments) et l'emplacement de chaque tube doit être géoréférencé (Agraz Hernández et al., 2011 ; Agraz Hernández et al., 2022). Ces tubes sont disposés en fonction du niveau topographique, en prenant en compte les caractéristiques du sol, le niveau d'inondation et les indicateurs biologiques les plus pertinents pour retracer l'histoire du

site. Dans chaque parcelle, il faut placer au moins 8 tubes par hectare, bien que ce nombre puisse varier en fonction de l'hétérogénéité de la topographie, de la variabilité des paramètres chimiques et de la présence de canaux naturels.

Chaque piézomètre est drainé et l'eau interstitielle est prélevée afin de déterminer les paramètres physico-chimiques (pH, potentiel redox, salinité, température et nutriments) à l'aide d'une sonde multiparamétrique ; ces analyses seront faites mensuellement à la fois dans la forêt de référence et sur le site de restauration.

Les concentrations de salinité et les valeurs du potentiel d'oxydoréduction de l'eau seront classées sur la base de Cronk et Siobhan Fennessy (2001), Agraz Hernández et al. (2007a), Chan Keb (2007).

L'analyse de ces paramètres permet de définir les conditions de stress environnemental pour les mangroves sur le site de restauration et ainsi ajuster la conception du modèle de réhabilitation hydrologique proposée.



Détermination de la salinité, du potentiel redox, du pH et de la température de l'eau interstitielle dans une forêt d'Avicennia germinans sur un site en Amérique Centrale. © C. Agraz Hernández



Analyse de l'eau interstitielle (Cuajiniquil, Costa Rica) @ A. Rosenfeld

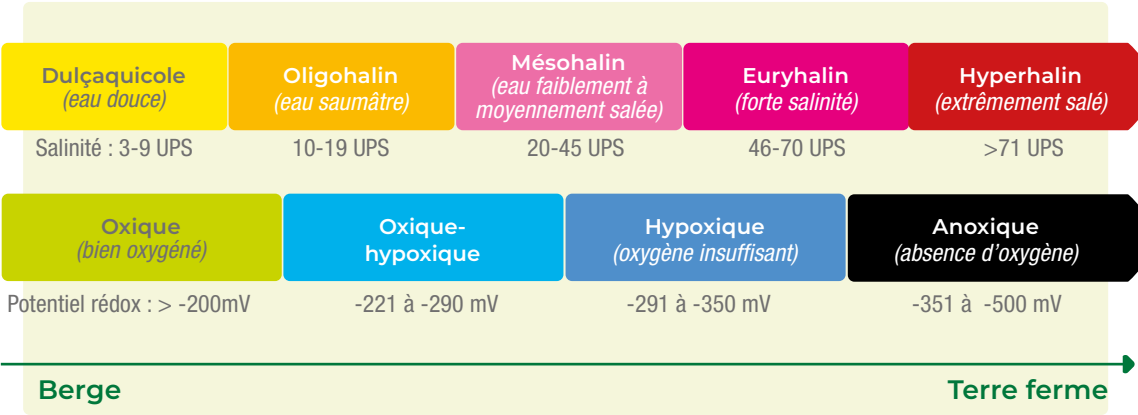


Figure 17. Evolution de la salinité et du potentiel redox le long d'un profil de végétation

Nutriments

L'analyse des nutriments dans l'eau interstitielle est considérée comme un indicateur critique de la santé de l'écosystème, en raison de son influence sur la croissance des plantes, la productivité biologique et la qualité de l'eau.

De plus, elle révèle les effets négatifs à long terme de l'eutrophisation, causée par l'apport constant des eaux usées sur les plantes, une information prioritaire à prendre en compte dans les programmes de récupération de la qualité de l'habitat.

Dans le domaine de la restauration, cette analyse permet d'identifier la disponibilité des nutriments pour les propagules provenant de la régénération naturelle et les espèces plantées, ainsi que pour d'autres organismes de la mangrove.

La collecte des échantillons se fera dans chaque piézomètre. Deux échantillons seront recueillis dans des flacons en polypropylène de 50 ml, préalablement lavés selon les critères de Gasshoff et Johansesen (1973), et Koroleff (1983). Une goutte de phénol sera ajoutée à l'un des flacons pour réduire l'activité bactérienne. Les échantillons seront transportés sur de la glace pendant le travail sur le terrain et conservés à -4°C au laboratoire jusqu'à leur traitement. Il est recommandé d'analyser les composés azotés oxydés (nitrates et nitrites), ainsi que les phosphates, des nutriments liés à la nutrition des plantes. De plus, il est important d'analyser les composés azotés réduits (ammonium) car ils sont liés aux conditions réduites de l'eau interstitielle, les phosphates à la qualité de l'eau et les sulfates à l'entrée de l'eau de mer.



Figure 18. Procédure sur le terrain et en laboratoire pour l'analyse des nutriments dans l'eau interstitielle des mangroves © C. Agraz Hernández