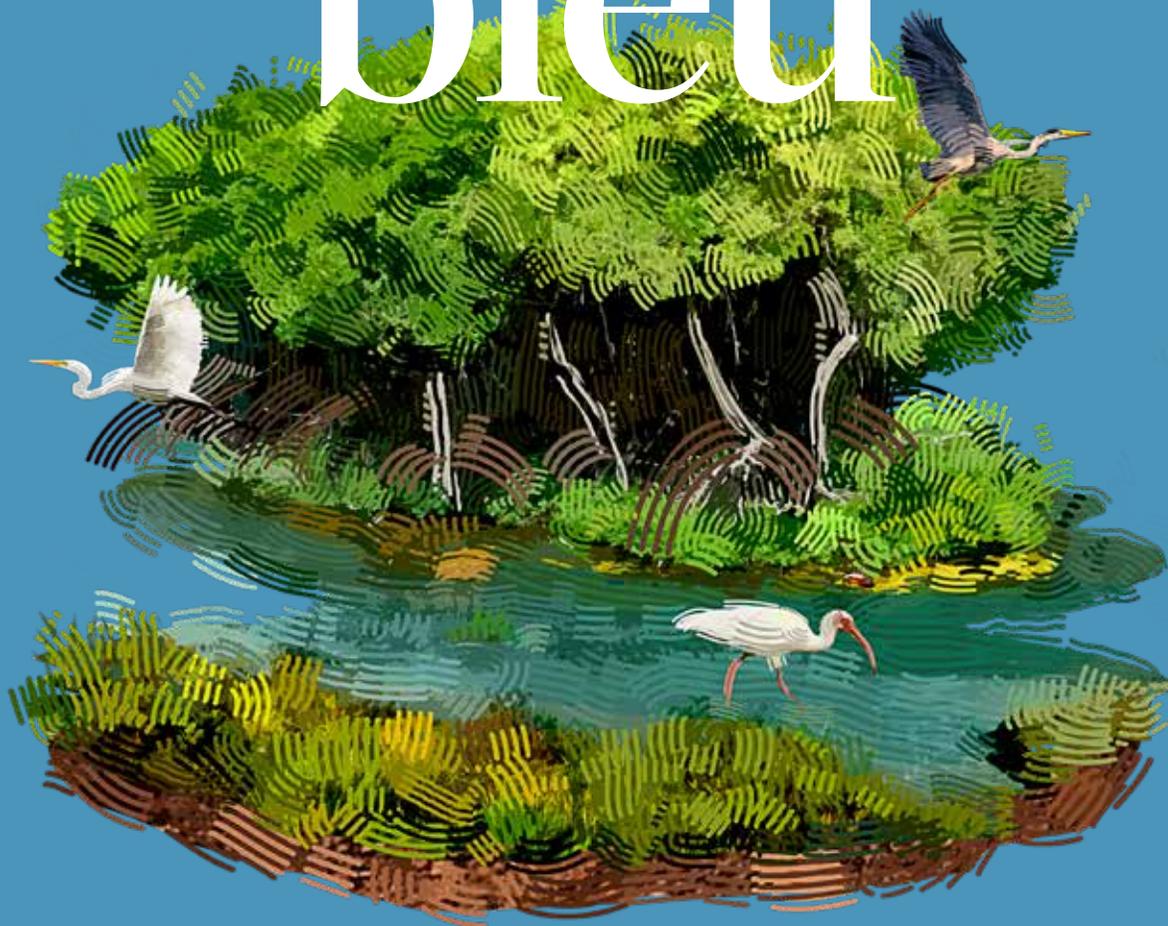


GUIDES DES BONNES PRATIQUES SCIENTIFIQUES
POUR LES PROJETS CARBONE TERRESTRES

Carbone bleu



Août 2024

Stefanie Simpson et Lindsey Smart

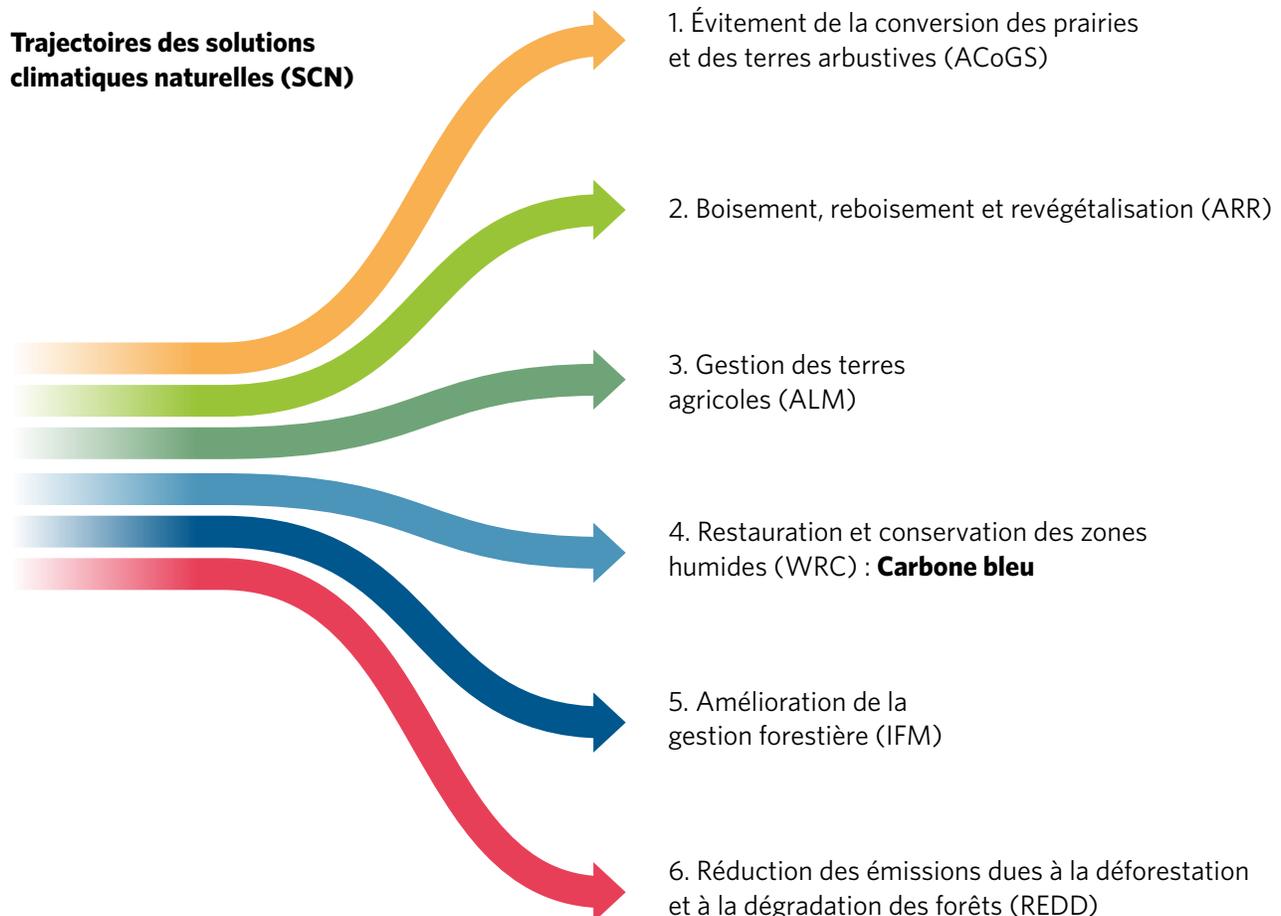
The Nature
Conservancy 

Les méthodes de comptabilité carbone axées sur les meilleures pratiques scientifiques sont la pierre angulaire de toutes les approches rigoureuses des mécanismes de crédits carbone. Cependant, bien que des dizaines d'années d'études scientifiques aient considérablement renforcé la qualité des crédits carbone à ce jour, la recherche continue d'évoluer et d'améliorer la comptabilité des projets.

Les Guides des meilleures pratiques scientifiques sont une série de documents explicatifs sur les meilleures pratiques scientifiques actuelles et les insuffisances existantes en ce qui concerne les projets carbone développés dans six filières émergentes des solutions climatiques naturelles (SCN) :

Ce guide donne un aperçu de la manière dont les projets de **carbone bleu** de haute qualité utilisent les dernières avancées scientifiques et outils techniques pour créer des projets dotés d'une grande intégrité dans leur définition des scénarios de référence, la mesure et la quantification des réductions d'émissions et de séquestration, l'estimation de l'incertitude et le suivi des activités et de la permanence du projet. Grâce à ce résumé, les acheteurs de crédits carbone de haute qualité peuvent mieux évaluer si les projets déploient effectivement des approches et des outils scientifiques rigoureux. Pour des recommandations plus détaillées sur les projets de carbone bleu de haute qualité, voir le rapport [Principes et directives en matière de carbone bleu de haute qualité : Un investissement triplement bénéfique pour les populations, la nature et le climat.](#)

Trajectoires des solutions climatiques naturelles (SCN)

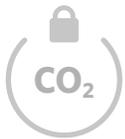


Qu'est-ce qu'un projet de carbone bleu ?

Les activités de projet dépendent du contexte spécifique du projet et de la méthodologie utilisée, mais doivent s'attaquer à la cause profonde de la perte ou de la dégradation de l'habitat. Diverses causes de la dégradation des zones humides pourraient être atténuées grâce à la finance carbone, notamment l'aménagement du littoral, l'aquaculture et l'agriculture, les infrastructures côtières (créant des restrictions de marées) et la réduction de la qualité de l'eau. Les zones humides dégradées qui en résultent peuvent être soumises à un risque supplémentaire du fait de l'élévation du niveau de la mer et de l'érosion. Les projets de carbone bleu peuvent inclure les activités suivantes :



Ces activités génèrent des crédits principalement à partir des changements dans cinq réservoirs de carbone et sources de gaz à effet de serre (GES) :



Les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) retirées de l'atmosphère par les plantes et séquestrées sous forme de carbone organique du sol (COS).



Les émissions de CO₂ retirées de l'atmosphère par les plantes et séquestrées dans la biomasse vivante aérienne.



Les émissions de CO₂ retirées de l'atmosphère par les plantes et séquestrées dans la biomasse vivante souterraine (par exemple, les racines).



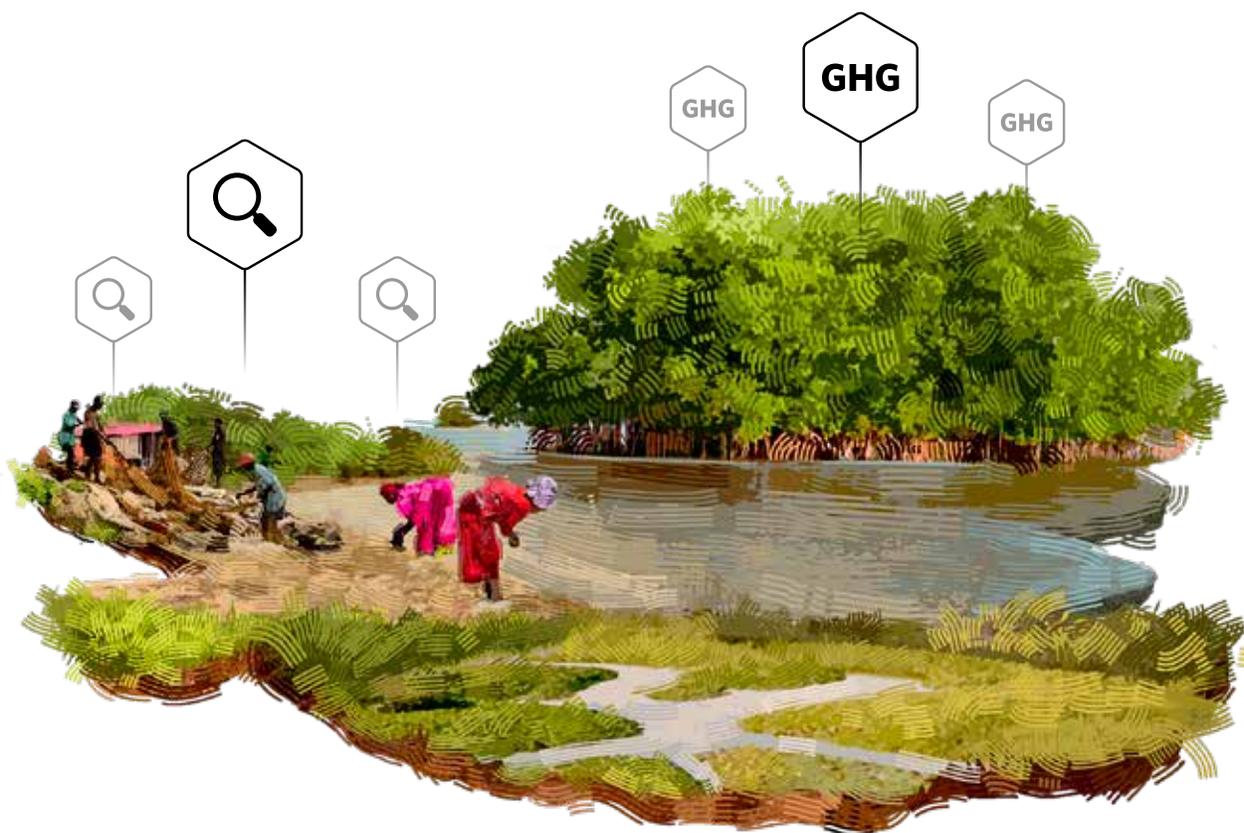
La réduction des émissions d'oxyde nitreux (N₂O) des sols vers l'atmosphère.



La réduction des émissions de méthane (CH₄) des sols vers l'atmosphère.

Les projets de carbone bleu génèrent des crédits carbone en mettant en œuvre des activités de restauration et/ou de conservation (perte évitée) dans les habitats humides côtiers, que sont **les mangroves, les marais salants et les herbiers marins**. Bien que d'autres habitats soient explorés (par exemple les macroalgues), la recherche scientifique actuelle et les méthodologies approuvées limitent le carbone bleu à ces trois habitats côtiers végétalisés (Howard et al. 2023). Le carbone bleu se distingue des autres trajectoires par l'accent mis sur le réservoir de carbone du sol (bien que d'autres réservoirs puissent être inclus dans la comptabilité de projet). Le carbone du sol représente un réservoir de carbone plus permanent (tant que l'habitat reste intact et sain) que les réservoirs de carbone de la biomasse.

Le paysage côtier est particulièrement dynamique, ce qui rend les projets de carbone bleu du marché volontaire particulièrement difficiles à mettre en œuvre. Ainsi, l'état de la recherche scientifique sur le carbone bleu est en constante évolution et doit être réévalué régulièrement. Un projet de carbone bleu réussi et de haute qualité trouve un équilibre entre l'impact environnemental, le bien-être des communautés locales et le respect de la législation. Les projets ne se contentent pas d'identifier et de quantifier les émissions de tous les réservoirs et sources susceptibles d'être affectés par les activités du projet à l'intérieur de son périmètre, mais prennent également en compte les bénéfices pour les communautés et leurs besoins. Les projets de haute qualité doivent s'appuyer sur les connaissances scientifiques les plus récentes et les meilleures pratiques disponibles pour réaliser quatre tâches essentielles :



1.

Suivi de la mise en œuvre des activités de restauration ou de conservation avant et après la date de début du projet.

2.

Quantification des réductions d'émissions de GES et de séquestration carbone dans les scénarios de référence et de projet.

3.

Collaboration directe avec les communautés locales tout au long de la conception et de la mise en œuvre du projet.

4.

Quantification d'autres services écosystémiques tels que l'amélioration de la biodiversité, de la qualité de l'eau, de la résilience côtière, etc.¹

Suivi des activités de projet



Les projets carbone entraînent des changements de comportement positifs pour le climat, qui sont motivés ou soutenus par des incitations commerciales. Il est donc essentiel de surveiller les conditions du projet de carbone bleu avant et après la mise en œuvre d'un projet carbone pour s'assurer qu'un changement de pratique a été mis en place et que le bénéfice climatique qui en résulte est dû à ce changement de pratique. Cette documentation est un élément essentiel de la démonstration de l'additionnalité d'un projet par rapport à un scénario de référence de statu quo.

Contrôle préalable au projet

DÉMONSTRATION DE L'ADDITIONNALITÉ

Dans le cadre du standard de certification Verified Carbon Standard (VCS) de Verra, le taux de réalisation des projets de restauration et de protection du carbone bleu au niveau mondial est si faible que la plupart des projets répondront aux exigences d'additionnalité,

à condition qu'ils répondent également au critère d'additionnalité réglementaire (c'est-à-dire que les activités du projet ne sont pas prescrites par une loi, une ordonnance ou un autre cadre réglementaire en vigueur). Toutefois, il est également recommandé que les projets démontrent leur additionnalité financière (c'est-à-dire la façon dont la finance carbone comble les lacunes budgétaires du projet).

CONSIDÉRATIONS JURIDIQUES

Les paysages côtiers peuvent faire l'objet de toutes sortes de types de propriété foncière, ce qui a une influence sur l'étendue de la zone concernée par les crédits carbone. Par exemple, les zones intertidales peuvent être détenues ou gérées par plusieurs entités et, avec l'élévation du niveau de la mer, ces limites peuvent changer au fur et à mesure que les terres sont submergées. Même dans les cas où la propriété foncière est claire, les gouvernements peuvent revendiquer des droits sur le carbone en tant que ressource nationale. **Les porteurs de projets devront montrer qu'ils ont des droits clairement définis pour développer le projet et qui sera propriétaire des crédits générés.**

ÉTABLIR LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE

Les crédits des projets de haute qualité sont quantifiés en fonction de l'impact net des activités du projet sur les émissions de GES par rapport à un scénario de référence contrefactuel dans lequel le projet n'aurait pas été mis en œuvre. **Pour les projets de carbone bleu, la référence la plus crédible est généralement la poursuite de l'utilisation historique des terres au cours des dix années précédant la date de démarrage du projet.** Par exemple, si un projet vise à encourager la restauration des flux de marée dans une zone humide endiguée, le scénario de référence devrait représenter la continuation de l'endiguement de la zone humide et des émissions de GES qui y sont associées en l'absence de réintroduction des flux de marée. Des données détaillées sur les activités du projet sont donc nécessaires pour les années précédant le projet ainsi que pour la durée du projet lui-même.

Les paysages côtiers sont dynamiques et peuvent être exposés à d'autres impacts climatiques qui doivent être pris en compte lors de la planification d'un projet. **Les projets doivent tenir compte des risques potentiels pour l'intégrité de l'activité de conservation ou de restauration résultant du changement climatique et des phénomènes météorologiques extrêmes (par exemple, l'élévation du niveau de la mer et les ouragans).**

Les informations nécessaires pour satisfaire à toutes ces exigences légales et de surveillance sont les suivantes :

- **Délimitation de la zone du projet :** Coordonnées GPS, données de télédétection et/ou registres cadastraux légaux pour la zone où les activités du projet sont prévues.
- **Facteurs d'émission et taux de séquestration :** Données précises sur les facteurs d'émission (la vitesse à laquelle les GES sont émis) et les taux de séquestration (la vitesse à laquelle les GES sont retirés de l'atmosphère).
- **Facteurs de gestion des terres :** Informations détaillées sur l'utilisation des terres et les activités de gestion avant et après la mise en œuvre du projet.
- **Réaction à l'élévation du niveau de la mer :** Projections des effets de l'élévation du niveau de la mer sur le site du projet, notamment la manière dont le projet surveillera les changements dans la répartition et l'élévation des zones humides au fil du temps.
- **Permanence:** Les bénéfices de la séquestration du carbone doivent être protégés pendant au moins 40 ans (certaines normes, comme Verra, exigent 100 ans) ou tenir compte des inversions ultérieures. Les projets de haute qualité intègrent des stratégies visant à traiter les risques (par exemple, l'élévation du niveau de la mer, les catastrophes naturelles).
- **Fuites :** Les projets doivent tenir compte des émissions causées par les activités du projet en dehors de la zone du projet. Pour les projets utilisant la méthodologie VCS VM0033, on considère qu'il n'y a pas de fuite si les conditions d'applicabilité de la méthodologie sont remplies.
- **Propriété non ambiguë :** L'entité qui enregistre le projet carbone doit avoir des droits de propriété clairs sur les crédits carbone.
 - Dans les projets menés par le gouvernement, les agences gouvernementales d'aménagement du territoire doivent être en mesure de prouver qu'elles sont autorisées par la loi à participer à des projets de carbone bleu. En général, cette autorité permet de collaborer avec les financeurs des projets de restauration, les prestataires de services et les autres parties prenantes.
 - Dans certaines zones géographiques, il peut y avoir plusieurs groupes de parties prenantes ayant des droits différents d'accès et d'utilisation des terres. Les données de cartographie des parties prenantes sont importantes pour déterminer qui serait affecté par les activités du projet, de façon positive ou négative.
 - Lorsque les terres appartiennent à des propriétaires privés, les porteurs du projet doivent évaluer les politiques locales et nationales afin de déterminer si le gouvernement peut revendiquer des droits sur le carbone ou les minéraux.

Les projets carbone de haute qualité doivent utiliser les mêmes méthodes pour quantifier les émissions et les absorptions dans le cadre des scénarios de référence et de projet pendant toute la durée de la période de comptabilisation du projet. Les scénarios de référence doivent être évalués tous les six ans (comme l'exige Verra) et prendre en compte les émissions et les absorptions qui se seraient produites pendant les années du projet si celui-ci n'avait pas été mis en œuvre. L'utilisation des mêmes outils et méthodes pour quantifier les émissions et les absorptions dans chaque scénario garantit une comptabilité carbone cohérente qui maintient l'intégrité du scénario de référence tout en réduisant l'incertitude des crédits générés par le projet (Zhou et al. 2023).

DÉPLOIEMENT DES TECHNIQUES DE TÉLÉDÉTECTION

Pour délimiter une zone de projet appropriée, il est essentiel de comprendre la dynamique de l'occupation et de l'utilisation des sols au niveau local. Les données de télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) constituent des outils rentables pour (1) cartographier l'étendue et le changement des habitats (par exemple, estimer les taux de perte), (2) identifier les risques ou les menaces, et (3) quantifier les stocks de carbone. En utilisant des combinaisons de bandes spectrales, d'indices de végétation dérivés de l'imagerie satellitaire et de modèles altimétriques numériques, les écosystèmes côtiers peuvent être classés à différents moments, ce qui permet d'établir des cartes de référence de l'étendue et de l'évolution dans le temps.

Outre les bandes spectrales et les indices de végétation, les mesures texturales dérivées des données radar et d'autres mesures structurelles tridimensionnelles dérivées des données LiDAR (Light Detection and Ranging) peuvent également être utilisées pour

guider la classification, mais aussi pour prédire la biomasse aérienne (et donc le carbone aérien) dans certains cas, étant donné la forte relation entre la structure du couvert forestier et la biomasse pour les systèmes comportant des mangroves. En outre, des mesures répétées de ces caractéristiques texturales et structurelles, ainsi que des indices de végétation, peuvent être utilisés pour surveiller la santé et l'état de l'écosystème (par exemple, la dégradation) au fil du temps et mettre en évidence les zones à restaurer.

Certains écosystèmes de carbone bleu sont plus faciles à cartographier et à surveiller que d'autres à l'aide d'approches de télédétection. Par exemple, les mangroves ont des caractéristiques spectrales uniques qui se prêtent bien à l'identification à l'aide de données d'observation de la terre. Elles séquestrent et stockent également une quantité importante de carbone en surface dans la biomasse vivante, qui peut être cartographiée et surveillée à l'aide de la télédétection. Les herbiers marins, souvent subtidiaux, sont plus difficiles à surveiller à l'aide de données de télédétection accessibles au public en raison des limites de la capacité de l'imagerie satellitaire à pénétrer dans la colonne d'eau. Il est donc important de comprendre les limites de l'applicabilité de la télédétection dans ces différents systèmes. Les outils de télédétection présentent également des incertitudes inhérentes, qui conduisent parfois à une classification erronée de la couverture de l'habitat ou des changements dans la couverture. **Tous les projets carbone de haute qualité qui s'appuient sur des analyses de télédétection pour combler les lacunes en matière de données doivent suivre des protocoles appropriés pour identifier et signaler les incertitudes par le biais de méthodes d'AQ/CQ telles que des évaluations de la précision et d'autres mesures de performance.** Ces incertitudes peuvent être traitées de manière systématique, en collaboration avec les gestionnaires fonciers, en améliorant la précision des analyses grâce à des efforts de vérification sur le terrain et à la consultation/validation d'experts.



CONSEILS POUR LES ACHETEURS

- Demander qui est propriétaire des terres, qui est propriétaire des crédits et comment cela a été déterminé.
- Demander comment la zone du projet a été délimitée et quelles méthodes ont été utilisées pour s'assurer que seules les terres mettant en œuvre les activités du projet ont été incluses dans la zone du projet.
- Demander à voir des images historiques pour vérifier l'utilisation des terres avant la mise en œuvre du projet.
- Demander comment la dégradation et la conversion des habitats ont été mesurées et demander à voir un rapport documentant la précision et les incertitudes des méthodes (si des données de télédétection ont été utilisées, il s'agit généralement d'un rapport d'évaluation de la précision).
- Demander comment la cause profonde de la dégradation a été identifiée et comment les activités du projet y remédieront directement.
- Demander si/comment l'élévation du niveau de la mer aura un impact sur la zone du projet, les activités du projet et les futures émissions de GES. Demander si ces impacts ont été pris en compte dans le scénario de référence du projet.
- Demander quelles méthodes ont été utilisées pour quantifier les émissions et les absorptions dans les scénarios de référence et de projet.
- Demander comment les activités du projet seront contrôlées au fil du temps (par exemple, avant, pendant et après le projet).
 - Si des méthodes de télédétection ou de modélisation sont utilisées, demander une documentation sur les méthodes et leur précision (taux de faux positifs et de faux négatifs).
 - Demander s'il existe un plan de validation sur le terrain pour corroborer les méthodes appliquées et si les parties prenantes seront invitées à fournir un retour d'information pour étayer les résultats.

Quantification des réductions et des absorptions d'émissions



Quantification des réservoirs de carbone et des sources de GES

La quantification précise des réductions et absorptions nettes d'émissions de GES réalisées par un projet constitue un élément essentiel de tous les projets carbone, même s'il faut prendre en compte de manière conservatrice l'incertitude liée à ce chiffre. Ce chiffre pour l'ensemble du projet est la somme de l'impact du projet sur tous les réservoirs de carbone et toutes les sources de GES identifiés dans le périmètre des GES du projet. Les différents réservoirs de carbone et sources de GES nécessitent souvent des méthodes de quantification différentes pour estimer avec précision l'impact d'un projet. Les différentes méthodes de quantification comprennent différents types d'incertitude.

Les projets carbone de haute qualité décrivent de manière transparente les méthodes de quantification et les types d'incertitude pris en compte pour tous les réservoirs de carbone et sources de GES générant des crédits.

La disponibilité des données existantes sur les émissions et la séquestration du carbone bleu peut être limitée dans de nombreuses régions, et la collecte de ces données peut être difficile et coûteuse. Pour réduire cette charge, la méthodologie actuelle (en cours de mise à jour à la date de publication) de Verra pour la restauration des zones humides côtières (VM0033) permet aux développeurs de projets d'utiliser certaines valeurs par défaut², en fonction du système et du réservoir/de la source de GES (Tableau 1). Lorsque les valeurs locales ne sont pas disponibles, ces valeurs par défaut représentent les meilleures données disponibles pour les projets de carbone bleu. Cependant, les projets qui investissent dans des données de terrains locales améliorent encore la précision et réduisent l'incertitude du volume de crédit estimé.

Tableau 1 : Approches de quantification des sources et des réservoirs de GES de carbone bleu à l'aide de la méthodologie VM0033.

Réservoir/source de GES	Valeur par défaut	Indicateur indirect	Publié/modélisé	Mesure directe
Taux de séquestration du carbone de la biomasse herbacée	3 tonnes/ha, extrapolé à 100 % de couverture, en une fois	Non	Non	Méthodes de biologie de terrain
Réservoir de carbone de la biomasse ligneuse	Non	Non	Non	Méthodes d'inventaire forestier
Taux de séquestration du carbone dans le sol	1,46 tonnes/ha/an si au moins 50 % de couverture* Déduction pour le carbone allocht ³ en cas de sol non organique	Systèmes identiques ou similaires	Systèmes identiques ou similaires	Carottes de sol avec plan de référence
Taux d'émission de CH ₄ du sol	>18 ppt** = 0,011 tonne/ha/an >20 ppt** = 0,005 tonne/ha/an			Chambre fermée ou covariance des turbulences
Taux d'émission de N ₂ O du sol	Varie en fonction de la salinité et du système			

*Le carbone du sol par défaut (Chmura et al. 2003) ne peut être utilisé qu'en l'absence de valeurs publiées.

**Le CH₄ du sol par défaut (Poffenbarger et al. 2011) ne peut être utilisé qu'en l'absence de valeurs publiées.

Les principaux aspects à prendre en compte dans l'utilisation des approches de quantification du carbone bleu sont les suivants :

- 1. Les facteurs d'émission par défaut peuvent être utilisés lorsqu'ils sont scientifiquement crédibles et qu'il n'existe pas de données pertinentes publiées localement.** Les valeurs par défaut autorisées comprennent les données publiées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) à utiliser dans les inventaires nationaux de GES (niveau 1), les données spécifiques au pays pour les facteurs clés (niveau 2) ou les données sur les stocks de carbone et les taux d'émission d'un inventaire détaillé résultant de mesures répétées dans le temps ou d'une modélisation (niveau 3). Les données de niveau 1 ou 2 peuvent être associées à de larges marges d'erreur, par exemple +/-50 % pour les réservoirs aériens et +/-90 % pour les réservoirs variables de carbone du sol ; toutefois, ces valeurs par défaut sont considérées comme conservatrices et donc autorisées, à moins que des données obtenues localement ne soient disponibles.
- 2. Des indicateurs indirects sont parfois utilisés pour estimer les émissions de GES ; cependant, ils sont peu développés pour les systèmes de carbone bleu. Un indicateur couramment utilisé est la salinité pour estimer les émissions de méthane, sur la base de Poffenbarger et al. 2011, qui suggère que pour les zones humides dont la salinité est supérieure à 18 ppt, les émissions de méthane sont négligeables. Toutefois, de nouvelles recherches (en cours de publication, publication prévue en 2024) suggèrent que cette fourchette est plus variable. **Les indicateurs indirects doivent être utilisés avec prudence.****
- 3. Les valeurs publiées** peuvent être utilisées pour le taux moyen d'émissions de GES et peuvent constituer une approche valable, à condition qu'elles soient dérivées de données publiées et évaluées par des pairs et que les données proviennent **d'un système « identique ou similaire » à celui de la zone du projet.**
- 4. Les modèles** sont une autre option pour estimer les émissions de GES ; cependant, de nombreux modèles actuels ne sont pas encore suffisamment développés et testés pour le carbone bleu. Pour être utilisé, le modèle doit être validé par des mesures directes provenant d'un système dont la profondeur de la nappe phréatique, la salinité, l'hydrologie des marées, l'apport en sédiments et la communauté végétale sont identiques ou similaires à ceux du système du projet. **Toutes les sources possibles d'incertitude du modèle doivent être évaluées à l'aide d'approches statistiques reconnues telles que celles décrites dans les Lignes directrices 2006 du GIEC.**
- 5. Les données collectées sur le terrain** comprennent les taux d'émission de GES directement mesurés ou les changements de stock de carbone par le biais d'un échantillonnage sur le terrain. **Pour parvenir à une comptabilité robuste du carbone bleu par le biais d'un échantillonnage sur le terrain, la stratification doit être utilisée pour subdiviser la zone de projet en strates spatialement explicites qui sont similaires.** Par exemple, les strates peuvent être choisies en fonction

du type et de la profondeur du sol, de la profondeur de la nappe phréatique, de la couverture végétale, de la salinité, du type de terrain ou des changements attendus dans les caractéristiques au cours de la durée de vie du projet. Lors de la mesure, l'augmentation du nombre de strates améliorera la précision de la comptabilité en réduisant la zone d'échantillonnage.

Comme les flux de GES du carbone bleu peuvent varier, les données collectées sur le terrain sont les plus fiables et les plus précises et doivent être privilégiées dans la mesure du possible.

Collecte de données sur le carbone du sol et les flux de GES

CARBONE DU SOL

Les stocks de COS (la densité de carbone organique dans le sol) doivent toujours être mesurés au début d'un projet et périodiquement (au moins tous les 5 ans) pendant la durée de vie du projet. La mesure initiale représente le point de départ commun pour les scénarios de référence et de projet, qui divergent du stock initial de COS une fois le projet lancé. Pour déterminer le COS, des carottes de sol sont prélevées et analysées pour 1) la profondeur de sol, 2) la densité apparente sèche et 3) la teneur en carbone

organique du sol (%Corg). La densité apparente sèche multipliée par la teneur en carbone organique du sol donne le stock de carbone en unités de masse par volume.

Comme indiqué ci-dessus, les stocks de COS doivent être mesurés à l'aide d'un plan d'échantillonnage aléatoire stratifié. Cette approche divise une zone de projet en petites unités homogènes afin de réduire la variation mesurée des stocks de COS au sein de chaque strate. Des échantillons de sol doivent être prélevés et analysés pour permettre le calcul ultérieur des stocks de COS et de leurs variations. La densité d'échantillonnage (nombre d'échantillons par unité de surface) dans chaque strate doit être choisie de manière à équilibrer le compromis entre les coûts d'échantillonnage et les réductions de crédits dues à une erreur d'échantillonnage. La densité d'échantillonnage optimale dépendra de la géographie spécifique et de la variabilité associée des caractéristiques environnementales au sein de cette géographie, ainsi que des activités de projet générant des crédits.

La meilleure pratique actuelle pour obtenir des données sur les COS consiste à collecter des échantillons physiques de sol et à les envoyer à un laboratoire accrédité pour analyse. Ce processus est long et coûteux et peut représenter un obstacle financier pour de nombreux projets, mais les données sont cruciales pour l'intégrité des projets carbone de haute qualité. Comme les valeurs par défaut et les valeurs nationales ont tendance à être conservatrices, les données collectées localement seront non seulement plus précises, mais pourront également donner lieu à la production d'un plus grand nombre de crédits. Les acheteurs de crédits carbone de haute qualité peuvent envisager d'investir dans des efforts de recherche afin de réduire les coûts de mesure du COS et d'augmenter le potentiel de production de crédits.

Tableau 2 : Comparaison des techniques de laboratoire pour déterminer le pourcentage de carbone organique d'après le Blue Carbon Manual (Howard et al. 2014).

	Méthode de combustion sèche		Méthode de combustion humide
	Analyseur élémentaire	Perte au feu (Loss on ignition - LOI)	Digestion au H ₂ O ₂ et au bichromate (méthode Walkley-Black)
Avantages	Mesure quantitative de la teneur en carbone	Mesure semi-quantitative de la teneur en carbone organique ; technologie simple et peu coûteuse	Mesure semi-quantitative de la teneur en carbone organique ; faible coût et chimie simple
Inconvénients	Nécessite des instruments spéciaux ; peut être coûteuse.	Le pourcentage de carbone organique est déterminé à partir de relations empiriques entre le carbone et la matière organique.	Le H ₂ O ₂ ne digère pas toujours le carbone de manière égale ; produit des déchets dangereux.

Un autre élément important de la mesure de la séquestration du carbone consiste à comprendre à quel moment l'accumulation de carbone commence résultant des activités du projet. Certaines méthodologies imposent l'installation d'horizons marqueurs comme principale méthode de mesure de l'accumulation de carbone dans le sol après le début du projet. Le carottage ne permet pas à lui seul de déterminer la quantité de matière accumulée en raison du projet. Il faut tenir compte d'un élément temporel, et les horizons marqueurs constituent la méthode la plus rentable.

BIOMASSE AÉRIENNE ET SOUTERRAINE

La biomasse vivante aérienne (AGB) peut être herbacée (principalement dans les marais et les herbiers marins) ou ligneuse (principalement dans les mangroves), tandis que la biomasse vivante souterraine (BGB) est constituée de racines et de rhizomes. Les protocoles de mesure du carbone de la biomasse peuvent différer selon les types et les densités d'habitats. Dans de nombreux cas, des équations allométriques peuvent être utilisées pour décrire la relation entre les paramètres mesurables (par exemple, la hauteur, le diamètre à hauteur de poitrine, la densité, la couverture, etc.) et la biomasse totale et sont couramment utilisées pour éviter les pratiques de mesure destructrices. **Les équations utilisées doivent si possible provenir du même système ou d'un système similaire et/ou des mêmes espèces ou d'espèces similaires, et être bien reconnues dans les publications scientifiques (c'est-à-dire évaluées par des pairs).** La biomasse de chaque type de matériel végétal est ensuite multipliée par le facteur de conversion du carbone correspondant pour obtenir les stocks du réservoir de carbone aérien. La mesure des réservoirs de carbone dans les habitats de carbone bleu peut s'avérer difficile en raison de problèmes d'accessibilité. Les forêts de mangroves peuvent être particulièrement difficiles à échantillonner, car elles ont souvent d'abondantes racines échasses ou des pneumatophores, sont entourées de cours d'eau diffluent et sont soumises à des marées.

Les mangroves sont parfois traitées de la même manière que les forêts terrestres pour ce qui est de la quantification de la biomasse ; cependant, il existe certaines différences essentielles à prendre en compte dans la

manière dont la biomasse des mangroves est évaluée. Par exemple, lors de l'échantillonnage des palétuviers dans une parcelle d'échantillonnage, il est recommandé de mesurer tous les arbres vivants (plutôt que les arbres qui ne mesurent que 10 cm ou plus dans les parcelles des forêts terrestres), ou d'utiliser des sous-parcelles dans les zones d'échantillonnage dans lesquelles on trouve principalement de petits arbres. Dans de nombreuses régions géographiques, les variétés de mangroves dominantes ont une structure aérienne plus courte, et sont souvent appelées mangroves naines. La disponibilité d'équations allométriques appropriées pour les systèmes de mangroves naines est beaucoup plus limitée. Les quelques équations existantes pour les systèmes nains proviennent principalement de Floride (États-Unis) ; cependant, l'approche la plus précise consiste à développer des équations pour les plantes de la zone d'intérêt. En raison de la grande variabilité entre les espèces et entre les zones géographiques, le développement d'équations allométriques pertinentes au niveau local est un domaine qui doit faire l'objet d'études complémentaires. De même, pour la BGB, il existe peu d'équations allométriques utilisables pour les mangroves, alors que le réservoir de carbone de la BGB peut être un élément clé. Les publications scientifiques font état de quelques équations allométriques et, bien que certaines d'entre elles soient conservatrices, des études supplémentaires qui développent des équations plus spécifiquement adaptées aux différentes régions apporteraient une contribution précieuse dans ce domaine. Pour obtenir une estimation générale de la biomasse souterraine, on utilise souvent les ratios biomasse souterraine/biomasse aérienne. Les ratios par défaut entre la biomasse souterraine et la biomasse aérienne des mangroves varient de 0,29 à 0,96 (Howard et al., 2014).

Pour les marais littoraux, il est important de différencier les habitats des bas, moyens et hauts marais lors de la conception d'un plan d'échantillonnage. La majorité du carbone stocké dans les marais littoraux se trouve dans la biomasse souterraine et les sols, tandis que la biomasse aérienne est plus importante dans les hauts marais. Pour les BGB, les réservoirs de carbone peuvent être estimés en développant des équations allométriques ou par des mesures directes. Les équations allométriques peuvent être développées pour une espèce et un lieu spécifiques, ce qui constitue l'approche la plus précise.

La biomasse vivante aérienne des herbiers marins peut varier selon les saisons et, dans certains sites, elle peut être entièrement perdue pendant l'hiver. L'échantillonnage des prairies subtidales nécessite l'utilisation d'un tuba ou d'un équipement de plongée, ce qui peut nécessiter des ressources importantes.

Le choix du moment de l'échantillonnage dans les habitats de carbone bleu est important, car les réservoirs de carbone peuvent varier en fonction de la saison, de l'humidité du sol et de la salinité. **Il est important d'avoir un plan d'échantillonnage bien conçu, qui tienne compte des horaires des marées, des inondations potentielles, de l'accessibilité aux sites d'échantillonnage, du caractère temporaire ou permanent des parcelles d'échantillonnage et de la taille de la zone d'échantillonnage nécessaire pour obtenir un échantillonnage représentatif des végétaux.** Il est recommandé de procéder à l'échantillonnage au plus fort de la saison de croissance, de manière constante d'une année à l'autre, généralement au milieu ou à la fin de l'été.

Le Blue Carbon Manual (Howard et al. 2014) fournit des conseils et des détails supplémentaires pour la collecte de données sur l'AGB et la BGB dans les habitats de carbone bleu, notamment sur la détermination de la teneur en carbone des palmiers et d'autres végétaux non ligneux, des pneumatophores et de la litière.

FLUX DE GES

Les flux de GES sont les émissions nettes naturellement absorbées et émises par la zone du projet, qui sont finalement prises en compte dans le nombre de crédits générés. Les émissions utilisées pour quantifier le flux peuvent être déterminées à l'aide de mesures directes ou par le biais d'indicateurs indirects. Lors de l'utilisation de mesures directes, le flux de GES est estimé entre le sol et la végétation et l'atmosphère/la colonne d'eau par des mesures ou des modélisations précises. Les flux de GES peuvent être mesurés avec précision à l'aide de tours à covariance des turbulences ou de chambres statiques. Chacune de ces approches présente des avantages. Si les tours à covariance des turbulences offrent un minimum de travail de surveillance, leur coût peut être prohibitif car elles nécessitent l'achat de tours à flux et de capteurs coûteux et le paiement du personnel chargé d'effectuer un traitement

complexe des données. Les méthodes des chambres statiques peuvent être moins coûteuses à installer, mais nécessitent plus de temps et d'efforts pour la mise en place et la surveillance (et requièrent toujours l'achat de capteurs). Les chambres nécessitent la construction ou l'achat de passerelles pour éviter de perturber le site où les flux seront mesurés.

Si l'on utilise un indicateur indirect pour les flux de GES, les changements dans les stocks de carbone peuvent être déterminés de deux manières : 1) la méthode de différence des stocks qui estime la différence entre les stocks de carbone mesurés à deux moments donnés (estimation de niveau 3), ou 2) la méthode gains-pertes, qui estime la différence entre les stocks de carbone sur la base des facteurs d'émission d'activités spécifiques et qui est dérivée des études scientifiques et des données d'activité du pays (estimations de niveaux 1 et 2) (Howard et al 2014).

Si des indicateurs indirects peuvent être utilisés pour les émissions de CO₂, et pour les émissions de CH₄ dans les cas où la salinité est supérieure à 18 ppt, des mesures directes des flux sont nécessaires pour mesurer les émissions de N₂O et de CH₄ en cas de salinité plus faible. Les émissions de N₂O sont principalement liées aux apports aqua/agricoles et sont généralement négligeables à moins qu'une charge en nitrates n'existe dans le système (par exemple, due au ruissellement des engrais), tandis que la production de CH₄ est directement liée à la salinité (Poffenbarger et al 2011).

Le Blue Carbon Manual (Howard et al 2014) est une ressource standard pour les méthodes de collecte et de comptabilisation de la quantification du carbone bleu. Nous avons inclus ici quelques informations synthétisées, en particulier sur le carbone organique du sol et les flux de GES qui sont d'une importance particulière dans la comptabilisation du carbone bleu. Pour plus d'informations sur les étapes de la collecte, de l'analyse et du calcul du carbone organique du sol, des flux de GES et de la mesure du carbone de la biomasse aérienne et souterraine dans les écosystèmes de carbone bleu, veuillez vous reporter au manuel : [The Blue Carbon Manual - Coastal Blue Carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows](#)

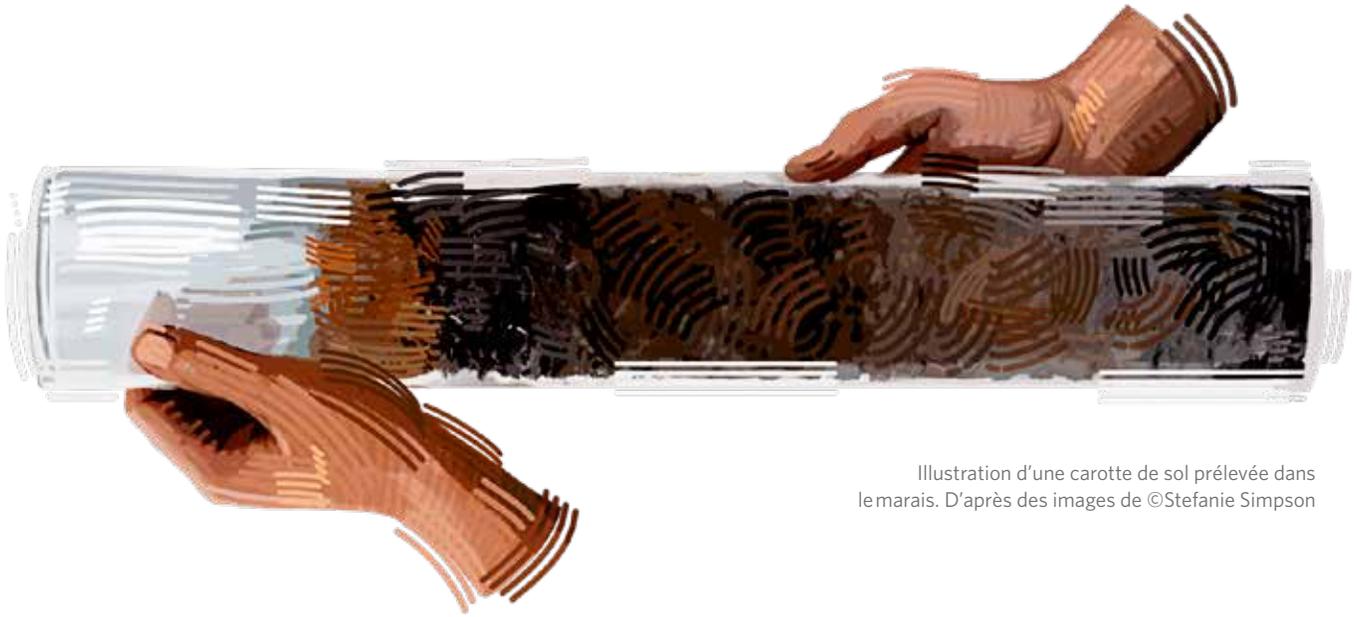


Illustration d'une carotte de sol prélevée dans le marais. D'après des images de ©Stefanie Simpson



Exemple de surveillance des GES à l'aide de chambres statiques et d'une passerelle installée sur site. D'après des images de ©NOAA

Modélisation des GES

Les systèmes côtiers étant très dynamiques, les modèles biogéochimiques côtiers doivent être très sophistiqués et intégrer un grand nombre de paramètres. Les modèles côtiers sont connus pour leur grande variabilité et sont sujets à des erreurs ou à des simplifications excessives. Si un développeur choisit d'utiliser cette approche, **les modèles utilisés pour simuler les effets des activités du projet sur les réductions et les absorptions de GES doivent toujours être étalonnés et validés par rapport à des ensembles de données mesurées des mêmes GES.** La validation des modèles devrait signaler de manière transparente les erreurs de prédiction des modèles et tenir compte de ces erreurs dans les simulations de modèles ultérieures. Les projets carbone de haute qualité disposeront de rapports de validation de modèles accessibles au public, comprenant toutes les données utilisées pour l'étalonnage et la validation et proposant un affichage intuitif en regard des prédictions du modèle sous la forme de simples nuages de points. **Les modèles utilisés dans les projets pour quantifier les absorptions de COS devraient être validés sur la base de leur capacité à prédire les changements des stocks de COS et pas seulement les stocks de COS.**

Des données de terrain très spécifiques sont nécessaires pour valider les modèles utilisés dans les projets de carbone bleu de haute qualité. Les meilleures données proviennent d'études à long terme (>5 ans) dans lesquelles on procède à des mesures répétées de la source ou du réservoir de GES cible, au fil du temps, dans des parcelles appariées montrant la mise en œuvre d'une part de l'activité améliorée par le projet, et de l'autre l'activité dans le cadre du scénario de statu quo. Pour le carbone bleu, de tels modèles vérifiés sur le terrain sont encore en cours de développement et doivent faire l'objet de validations

complémentaires sur le terrain pour être largement applicables. Les études qui ne répondent pas à ces critères ne mesurent souvent que les sources et les réservoirs de GES à un moment donné, ce qui limite leur utilité pour la validation des modèles. Les acheteurs de crédits carbone de haute qualité peuvent envisager d'investir dans des travaux de recherche afin de générer les données nécessaires pour valider de façon rigoureuse les modèles de GES basés sur les processus.

Prise en compte de l'incertitude

Les projets de haute qualité qui quantifient plusieurs sources d'incertitude doivent tenir compte de l'impact de cette incertitude sur le nombre de crédits attribués au projet de manière conservatrice. Une prise en compte correcte de l'incertitude crée une distribution de probabilité autour d'une estimation ponctuelle de l'impact climatique d'un projet. Le volume final de crédits attribués à un projet peut alors être sélectionné à partir de cette distribution pour représenter une attribution conservatrice basée sur les incertitudes signalées. **Les normes de haute qualité exigent que les projets appliquent des déductions de l'incertitude dans la comptabilité du projet lorsqu'il y a plus de 20 % d'erreur avec un intervalle de confiance de 90 % ou 30 % d'erreur avec un intervalle de confiance de 95 %.** Étant donné que la distribution de l'incertitude est créée à partir des incertitudes dans les méthodes de quantification du projet, cette approche des mécanismes de crédit encourage les projets qui réduisent l'incertitude par des mesures telles que la réduction des erreurs de prédiction du modèle (amélioration de la validation du modèle), l'investissement dans des données locales et la réduction des erreurs d'échantillonnage (collecte d'un plus grand nombre d'échantillons).



CONSEILS POUR LES ACHETEURS

- Demander un rapport résumant toutes les sources et tous les réservoirs de GES crédités par le projet, les méthodes de quantification associées et les types d'incertitude pris en compte.
 - Veiller à ce que les mêmes méthodes de quantification soient utilisées pour les scénarios de référence et de projet pour chaque source ou réservoir de GES.
- Demander quelles sont les données collectées localement sur le site du projet et quelles sont les méthodes utilisées. Les mesures sur le terrain suivent-elles les protocoles définis dans le Blue Carbon Manual (Howard et al 2014) ?
- Veiller à ce que l'émission finale de crédits tienne compte de manière conservatrice de l'incertitude et des risques en délivrant moins que le volume moyen de crédits prévu pour le projet (c'est-à-dire en contribuant à un fonds tampon de non-permanence, soit plus de 20 % en moyenne pour les projets de carbone bleu, car le risque d'élévation du niveau de la mer peut à lui seul entraîner une réduction de 20 points). Beaucoup de données spécifiques au site sont requises pour affiner et réduire au minimum le score de risque. Des investissements supplémentaires sont nécessaires dans ce domaine.
- Pour les projets mesurant les stocks et les variations de stocks du COS :
 - Demander si la zone du projet a fait l'objet d'une stratification avant la collecte des échantillons de sol.
 - Demander si des méthodes de calcul à masse équivalente de sol ont été utilisées pour calculer les variations des stocks de COS.
 - Se renseigner sur la densité d'échantillonnage et demander si la marge d'erreur d'échantillonnage est prise en compte dans le volume final de crédits.
 - Si d'autres méthodes de mesure sont utilisées, demander quel est la marge d'erreur de ces méthodes et si elle est prise en compte dans la délivrance définitive des crédits.
- Pour les projets mesurant la biomasse aérienne et souterraine :
 - Demander si le projet utilise des équations allométriques adaptées aux espèces ou à la région, et si ces équations ont fait l'objet d'une évaluation par les pairs.
- Pour les projets de modélisation des émissions de GES :
 - Demander à voir le rapport de validation du modèle du projet et veiller à ce qu'il présente un simple nuage de points des performances du modèle pour les données provenant d'études antérieures de l'activité du projet.
- Demander comment l'élévation du niveau de la mer a été prise en compte.

Travailler avec les communautés locales



Les projets de carbone bleu côtier font souvent intervenir diverses parties prenantes et des terres dont le régime foncier n'est pas toujours clair. Les projets de carbone bleu peuvent se dérouler dans des zones où vivent et travaillent ces communautés et avoir un impact significatif sur les économies locales. Les projets de haute qualité mettent en œuvre des garanties sociales pour protéger les droits des communautés, mobilisent les savoirs écologiques locaux et leur gestion dans tous les éléments de la conception et de la mise en œuvre du projet, et assurent un accès équitable aux terres et aux revenus du carbone. Les meilleures pratiques sont notamment les suivantes :

- Mettre en place un processus de consentement libre, informé et préalable (CLIP) ;
- Garantir une participation inclusive des peuples autochtones et des communautés locales, des femmes, des jeunes et des autres groupes marginalisés dans la planification, la conception et la gouvernance des projets ;
- Mettre en place des mécanismes accessibles de retour d'information et de réclamation ;
- Respecter l'utilisation des terres et les cultures locales ;

- Donner aux communautés locales les moyens de définir un partage équitable des revenus (de préférence en permettant aux communautés d'obtenir un pourcentage plus élevé des bénéfices à mesure que les prix augmentent et en indemnisant les développeurs de projets par un taux fixe) ;
- Opérer localement et de façon adaptée au contexte ;
- Concevoir des accords et des contrats transparents et équitables.

Pour obtenir des conseils supplémentaires permettant de guider les décisions et les actions lors de la collaboration avec les parties prenantes sur les projets de carbone bleu, consultez les ressources suivantes :

- [Principes et recommandations pour des projets de carbone bleu de haute qualité : un investissement à triple bénéfice pour les populations, la nature et le climat](#)
- [Including Local Ecological Knowledge \(LEK\) in Mangrove Conservation & Restoration: A Best-Practice Guide for Practitioners and Researchers](#)
- [Guide des droits de la personne pour travailler avec les peuples autochtones et les communautés locales](#)



CONSEILS POUR LES ACHETEURS

- Demander si une cartographie des parties prenantes a été réalisée et comment la communauté locale a été/est impliquée dans la planification et la mise en œuvre du projet.
- Demander à voir un compte rendu du processus de CLIP.
- Demander comment les questions de genre ont été prises en compte dans la sensibilisation et l'implication des parties prenantes.
- Demander comment les questions de barrières linguistiques ont été abordées.
- Demander qui est propriétaire de la zone du projet et si c'est la même entité qui conservera les droits sur le carbone.
 - Si la propriété du crédit a été transférée, comment la communauté bénéficie-t-elle des revenus carbone ? Le propriétaire du crédit est-il implanté dans la communauté ou les revenus vont-ils en grande partie à des entités extérieures ?
- L'approche du partage des bénéfices des revenus carbone utilise-t-elle des pourcentages ou des taux fixes ?

Revue des méthodologies de carbone bleu



Peu de standards carbone proposent des méthodologies couvrant la délivrance de crédits pour les projets de carbone bleu, et les exigences minimales en matière d'utilisation d'outils scientifiques varient considérablement d'une méthodologie à l'autre. Le tableau ci-dessous résume les méthodologies existantes publiées par les principaux standards carbone volontaires.

Tableau 3 : Résumé des méthodologies disponibles pour les zones humides côtières.

Norme	Méthodologie	Année de publication	État d'avancement	Type de marché	En cours de mise à jour
VCS	VCS VM0033 - Methodology for Restoration of Tidal Wetlands and Seagrass Meadows, (Méthodologie pour la restauration des zones humides intertidales et des herbiers marins), v2.0 (en cours de mise à jour vers v2.1)	2023	Terminé	Volontaire	x
VCS	VCS VM0007 - REDD+ Methodology Framework (Cadre méthodologique REDD+) (REDD+MF), v1.6 (en cours de mise à jour vers v1.7)	2020	Terminé	Volontaire	x
ACR	ACR - Restoration of California Deltaic and Coastal Wetlands (Restauration des zones humides deltaïques et côtières de Californie)	2017	Terminé	Volontaire	
Programme chinois de réduction certifiée des émissions	The Methodology of Greenhouse Gas Emissions Voluntary Reduction Project: Mangrove Vegetation Creation (Méthodologie du projet de réduction volontaire des émissions de gaz à effet de serre : Création de végétation de mangrove) (CCER-14- 002-V01)	2023	Terminé	Réglementé	
Dispositif de crédits carbone australien	Carbon Farming Initiative—Tidal Restoration of Blue Carbon Ecosystems, using the Blue Carbon Accounting Model (Initiative d'agriculture carbone - Restauration des marées des écosystèmes de carbone bleu, à l'aide du modèle de comptabilisation du carbone bleu) (BlueCAM)	2021	Terminé	Réglementé	
Plan Vivo (PV Climate V5)	PM001 : Agriculture and Forestry Carbon Benefit Assessment Methodology (Méthodologie d'évaluation des bénéfices carbone de l'agriculture et de la sylviculture)	2023	Terminé	Volontaire	x
Gold Standard	Methodology for Sustainable Management of Mangroves (Méthodologie pour la gestion durable des mangroves), v1.0	2024	<i>En cours de développement</i>	Volontaire	En projet

Remarque : Cette liste vise à présenter les différents types de méthodologies au moment de la rédaction (mai 2024), mais n'est pas exhaustive et n'exprime en aucune façon leur approbation par The Nature Conservancy.



CONSEILS POUR LES ACHETEURS

- La méthodologie VCS VM0033 exige que les projets respectent les meilleures pratiques scientifiques actuelles. Les projets vérifiés dans le cadre d'autres méthodologies doivent faire l'objet d'un examen approfondi afin de s'assurer qu'ils répondent à un niveau de rigueur similaire.
- Il convient de noter que les méthodologies VM0007 et VM0033 sont toutes deux en cours de mise à jour. Il est prévu que les modules de carbone bleu de la méthodologie VM0007 soient transférés dans la méthodologie VM0033.

NOTES DE FIN DE DOCUMENT

- 1 Il convient de noter que ce rapport ne définit pas la manière d'évaluer les services écosystémiques des projets carbone. Pour des options sur la manière d'évaluer ces bénéfices, voir les méthodologies disponibles dans le cadre de la norme SDVISTA (Sustainable Development Verified Impact Standard) ou de la norme CCB (Climate, Community, Biodiversity) de Verra.
- 2 La valeur par défaut est un facteur d'émission « global » qui n'est pas spécifique à un site et qui peut surestimer ou sous-estimer les émissions/la séquestration sur un site donné. Ces facteurs sont généralement développés par le GIEC et approuvés pour être utilisés dans le cadre d'une méthodologie donnée. Toutefois, un facteur d'émission de haute qualité peut (doit) être mesuré sur le terrain en fonction du site (niveau 3).
- 3 Abréviation de « allochtone ». Le carbone allochtone est le carbone qui a été séquestré à un endroit, transporté et déposé à un autre endroit.

RÉFÉRENCES

- Chmura, Gail & Anisfeld, Shimon & Cahoon, Donald & Lynch, James. (2003). Global carbon sequestration in tidal, saline wetlands. *Global Biogeochem Cycles*. 17.
- Emmer, I., von Unger, M., Needelman, B., Crooks, S., Emmett-Mattox, S. 2015.
- Coastal Blue Carbon in Practice: A manual for using the VCS Methodology for Tidal Wetland and *Seagrass Restoration VM0033*. Restore America's Estuaries and Silvestrum. Arlington, VA. <https://estuaries.org/wp-content/uploads/2018/08/rae-coastal-blue-carbon-methodology-web.pdf>
- Grimm, Spalding, Leal et al. 2024. *Including Local Ecological Knowledge (LEK) in Mangrove Conservation & Restoration: A best practice guide for practitioners and researchers*. www.mangrovealliance.org: *Global Mangrove Alliance*. <https://doi.org/10.5479/10088/118227>.
- Howard, J., Sutton-Grier, A.E., Smart, L.S., Lopes, C.C., Hamilton, J., Kleypas, J., Simpson, S., McGowan, J., Pessarrodona, A., Alleway, H.K., Landis, E., 2023. Blue carbon pathways for climate mitigation: known, emerging and unlikely, *Marine Policy*, Volume 56, <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105788>
- Howard J., Hoyt S., Isensee K., Telszewski M., Pidgeon E., Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, Tidal Saltmarshes Seagrasses ("The Blue Carbon Manual") (2014) doi:https://www.cifor.org/publications/pdf_files/Books/BMurdiyarsol401.pdf
- Poffenbarger H.J., Needelman B.A., Megonigal J.P., Salinity influence on methane emissions from tidal marshes, *Wetlands* 31 (5) (2011) 831-842.
- Zhou et al. 2023. How does uncertainty of soil organic carbon stock affect the calculation of carbon budgets and soil carbon credits for croplands in the U.S. Midwest? *Geoderma*, 429, 116254.

REMERCIEMENTS ET CLAUSE DE NON-RESPONSABILITÉ

Les auteurs tiennent à remercier les experts et les réviseurs qui ont rendu ce travail possible : Diana Rodriguez-Paredes, Kathleen Onorevole, Kim Myers, Ryan Moyer, Emily Landis et Sophia Bennani-Smires.

Ce travail a été partiellement financé par Shell plc avec un versement de 26 000 USD. Le rapport a été rédigé par The Nature Conservancy sous son entière responsabilité éditoriale. Les opinions, données et analyses contenues dans ce rapport sont indépendantes des opinions de Shell plc et de ses filiales.

