

Sécuriser les réserves cruciales de biodiversité, de carbone et d'eau dans les tourbières du bassin du Congo grâce à une prise de décision éclairée et une bonne gouvernance

Rapport sur les scénarios de développement et de changement climatique

Rapport

Numéro du projet : 11826037

09 Janvier 2026

Préparé pour PNUE



Résumé

Les tourbières du bassin du Congo, en particulier celles de la région de la Cuvette centrale, constituent l'un des plus importants réservoirs terrestres de carbone au monde et jouent un rôle essentiel pour la biodiversité et la stabilité hydrologique. En réponse aux pressions croissantes liées au changement d'affectation des terres, au développement des infrastructures et à la variabilité climatique, le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) a lancé un projet intitulé « **Sécuriser les réserves cruciales de biodiversité, de carbone et d'eau dans les tourbières du bassin du Congo grâce à une prise de décision éclairée et une bonne gouvernance** ».

Dans le cadre de l'étude visant à déterminer les impacts des interventions de développement et du changement climatique sur les tourbières de la Cuvette centrale, un modèle hydrologique et un modèle de biodégradation ont été développés. Les résultats de l'exercice de modélisation et de l'étude ont conduit à l'élaboration d'un système d'aide à la décision hydrologique (HDSS), conçu pour fournir des orientations scientifiques pour la gestion durable des tourbières dans le paysage du lac Télé/lac Tumba.

Le HDSS fournit une base scientifique pour évaluer les impacts potentiels de diverses interventions de développement et de scénarios climatiques sur l'hydrologie des tourbières et la dynamique du carbone. Il aide les décideurs en leur fournissant des conseils sur les conséquences probables des interventions pertinentes au niveau local - identifiées grâce à un processus consultatif avec les parties prenantes - sur le bilan hydrique et les stocks de carbone dans le sol.

Ce rapport résume brièvement la méthodologie technique utilisée et présente certaines des principales conclusions relatives au flux de carbone pour sept types d'interventions, dans deux régimes hydrologiques et en tenant compte du changement climatique. Pour une compréhension complète de la méthodologie, il convient de consulter le rapport technique sur le modèle.

Développement d'un modèle hydrologique et d'un modèle de biodégradation

Au cœur de l'étude se trouve un modèle hydrologique conceptuel adapté aux conditions uniques des tourbières de la Cuvette Centrale. En raison du nombre limité de données géoréférencées, le modèle adopte une structure simplifiée mais robuste qui intègre les processus hydrologiques essentiels régissant le fonctionnement des tourbières. Il distingue les régimes influencés par les précipitations et ceux influencés par les cours d'eau, ce qui permet de simuler à la fois les dômes interfluviaux et les zones riveraines. Le domaine du modèle est une tranche de 40 km sur 2,88 km à travers un dôme de tourbe, discrétisée en mailles de 80 mètres et initialisée dans des conditions saturées. La période de simulation s'étend de 2000 à 2019.

Le modèle hydrologique, construit à l'aide de la plateforme MIKE SHE, simule le cycle complet de l'eau, y compris les précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration, l'écoulement souterrain et l'écoulement de surface. L'évapotranspiration réelle est calculée à l'aide de la méthode de Kristensen & Jensen, l'évapotranspiration de référence étant dérivée de l'équation de Priestley-Taylor. Les données de l'indice de surface foliaire (LAI) provenant des ensembles de données d'observation de la Terre MODIS et Copernicus sont utilisées pour représenter la dynamique de la végétation, tandis que les données climatiques spatiales proviennent des données de réanalyse ERA5. Le modèle intègre un régime pluviométrique saisonnier bimodal et révèle une tendance à long terme à la baisse des précipitations et à l'augmentation de l'évapotranspiration.

Pour évaluer la dynamique du carbone, le modèle hydrologique est couplé à un modèle d'accumulation et de décomposition du carbone inspiré de DigiBog. Les déchets végétaux générés par la croissance des plantes sont divisés en feuilles, bois et racines. La décomposition de la matière organique dans des conditions oxygénées et anaérobies est simulée à l'aide d'une fonction de décomposition exponentielle double, qui inclut à la fois la décomposition rapide des composés labiles et la décomposition lente des matières récalcitrantes. La décomposition de la tourbe est plus intense dans des conditions oxygénées, c'est-à-dire lorsque le pourcentage d'air du sol dépasse 10 %, et augmente

de manière exponentielle avec la température. Les paramètres utilisés pour décrire l'accumulation et la décomposition de la tourbe sont dérivés des données de terrain recueillies dans les tourbières du Congo.

Consultations des parties prenantes et contributions au projet

Entre octobre 2023 et octobre 2025, des consultations des parties prenantes ont été menées à Brazzaville et à Kinshasa afin d'identifier les défis liés à l'eau dans le paysage du lac Télé et du lac Tumba. Un large éventail d'acteurs du secteur public, du monde universitaire, d'organisations non gouvernementales et de partenaires de développement a été associé à une série d'ateliers visant à identifier les défis liés à l'eau, à préciser la portée de l'étude et à fournir des contributions sur les types d'interventions de développement susceptibles d'être envisagées à l'avenir dans le paysage du lac Télé et du lac Tumba.

Au cours du processus de consultation, il a été noté que si bon nombre des interventions identifiées pourraient avoir des impacts significatifs sur l'hydrologie des tourbières, l'exploration de ces scénarios était fortement limitée par le manque de données in situ sur l'hydrologie de la Cuvette centrale. Compte tenu des incertitudes liées à bon nombre de ces interventions à grande échelle (par exemple, les barrages en amont, l'exploration pétrolière à grande échelle), cette étude se concentre sur l'impact direct d'interventions à petite échelle qui sont facilement quantifiables et reproductibles dans toute la zone du projet. Par conséquent, les scénarios de développement étudiés en détail sont des interventions locales à petite échelle qui ont lieu dans le paysage du projet dans la Cuvette centrale.

Interventions en matière de développement, scénarios de changement climatique et régimes hydrologiques

L'étude évalue sept interventions de développement généralisées qui ont été identifiées lors de consultations avec les parties prenantes, complétées par les contributions du CREBBaC.

Table 0-1 Interventions de développement généralisées

Code	Nom	Description
A	Situation de référence sans intervention	La végétation et la topographie des tourbières sont conformes aux conditions actuelles - entre 2010 et 2020.
B	Route construite et opérationnelle	(a) Une route imperméable surélevée d'une largeur de 80 m est construite à 1 mètre au-dessus de la surface naturelle. Elle est finalisée et opérationnelle. (b) La végétation est enlevée et la surface du sol est aplanie. (c) Le remblai de la route est rempli de gravier perméable. (d) La tourbe sous-jacente est comprimée par le poids de la route.
C	Route en cours de construction	(a) Une route imperméable surélevée d'une largeur de 80 m est construite à 1 mètre au-dessus de la surface naturelle. (b) La végétation est enlevée et la surface du sol est aplanie. (c) Le remblai de la route est rempli de gravier perméable. (d) La tourbe sous-jacente est comprimée par le poids de la route. (e) Pendant la construction, un système de drainage est installé à 2 mètres sous le sol, c'est-à-dire à 1 mètre sous la surface environnante.
D	Urbanisation	(a) Une agglomération est mise en place dans la tourbière boisée. (b) La topographie est surélevée de 50 cm pour éviter les inondations. (c) La végétation est éliminée et la surface du sol est partiellement pavée. (d) La tourbe est comprimée sous la charge des bâtiments.
E	Incendie de forêt – Déforestation	(a) Un feu de forêt élimine complètement la végétation. Il en va de même pour la déforestation. (b) En conséquence, les propriétés du sol changent : la densité apparente augmente et le rendement spécifique diminue.

Code	Nom	Description
F	Une plantation de palmiers remplace la forêt	Déforestation et conversion en plantations de palmiers à huile : (a) La végétation naturelle est déboisée pour créer de nouvelles plantations de palmiers à huile. (b) Les palmiers à huile prospèrent lorsque le niveau moyen de l'eau se situe entre 40 et 60 cm sous le sol. Il y a un drainage à 50 cm de profondeur. (c) Les propriétés de la végétation sont modifiées pour simuler une plantation mature de palmiers à huile âgée de 15 ans. (d) La microtopographie est lissée par le défrichage. (e) Les propriétés du sol sont modifiées par le drainage : augmentation de la densité apparente, baisse du rendement spécifique et baisse de la conductivité hydraulique à saturation. (f) La topographie est abaissée de 50 cm en raison de la subsidence du sol induite par le drainage.
G	Une rizière remplace la forêt	Déforestation et conversion à la culture du riz : (a) La végétation naturelle est éliminée et remplacée par des rizières. Le riz est la culture saisonnière inondée la plus commune dans la Cuvette Centrale. (b) Il y a deux récoltes par an. Les rizières sont inondées pendant la saison humide. (c) Les propriétés de la végétation et de la surface varient en fonction du stade de la culture.

Les scénarios de changement climatique sont modélisés à l'aide de la méthode du changement delta, en appliquant des facteurs d'échelle mensuels aux précipitations, à l'évapotranspiration et à la température. Les scénarios d'émission du GIEC AR6 font partie des définitions de scénarios suivantes :

Table 0-2 Scénarios de changement climatique

Code	Nom	Description
1	Climat actuel	Les précipitations, la température et l'évapotranspiration entre 2010 et 2020 sont choisies pour représenter les conditions climatiques actuelles
2	CC Croissance durable	SSP1-2.6 : (a) Le réchauffement de la planète est limité à environ 1,5°C-2°C par rapport aux niveaux préindustriels. (b) Ce scénario s'aligne sur les objectifs de l'Accord de Paris et représente un avenir optimiste avec une croissance économique durable et un impact minimal sur le changement climatique.
3	CC Impact grave	SSP3-7.0 : (a) Réchauffement prévu : 3°C-4°C d'ici 2100, entraînant de graves conséquences climatiques. (b) Ce scénario représente un avenir à haut risque, caractérisé par un changement climatique important, des inégalités sociales et une dégradation de l'environnement.

Afin de refléter la diversité hydrologique de la Cuvette Centrale, le modèle hydrologique intègre deux représentations distinctes : l'une pour les tourbières alimentées par les précipitations et l'autre pour celles influencées par les crues fluviales. Cela permet de garantir que les deux régimes hydrologiques sont correctement pris en compte :

Table 0-3 Régimes hydrologiques

Code	Nom	Description
1	Tourbières pluviales	Précipitations et évapotranspiration uniquement : Les processus hydrologiques dans les tourbières sont régis par les précipitations et l'évapotranspiration. C'est principalement le cas dans les dômes interfluviaux, principalement situés en République du Congo.
2	Tourbières fluviales	Précipitations et évapotranspiration plus niveaux d'eau des cours d'eau : Les processus hydrologiques dans les tourbières sont déterminés par les précipitations et l'évapotranspiration, ainsi que par les fluctuations des niveaux d'eau dans les masses d'eau limitrophes (par exemple, les

Code	Nom	Description
		tronçons fluviaux). C'est principalement le cas dans les parties adjacentes aux principales rivières de la région.

Les régions hydrologiques sont représentées dans les modèles sous forme de conditions aux limites : dans la configuration basée sur les précipitations, les limites ouest et est ont un niveau constant fixé au niveau de la surface. Ces niveaux d'eau fluctuent dans les modèles alimentés par les cours d'eau. Les conditions aux limites sont des facteurs déterminants du modèle, tout comme les facteurs déterminants du modèle climatique. La structure et la paramétrisation du modèle sont conçues pour s'aligner sur les caractéristiques hydrologiques, climatiques et géomorphologiques de la région, tout en tenant compte des lacunes existantes dans les données.

En combinant les sept interventions de développement avec trois scénarios climatiques et deux régimes hydrologiques, **l'étude, et ainsi le HDSS, génèrent des résultats pour 42 scénarios différents.**

Méthode d'évaluation des scénarios à l'aide d'indicateurs

L'évaluation des scénarios utilise des indicateurs dérivés des résultats détaillés de la simulation. Les indicateurs sont définis de manière à permettre une évaluation simplifiée des scénarios et des comparaisons :

Table 0-4 Indicateurs utilisés pour générer les résultats

Nom	Description de l'indicateur
Flux de carbone à l'intérieur	Evolution du stock de carbone en kg par m ² par an à l'intérieur de l'empreinte de l'intervention
Flux de carbone en dehors	Evolution du stock de carbone en kg par m ² par an en dehors de l'empreinte de l'intervention
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	Profondeur moyenne d'oxygène à l'intérieur de l'empreinte de l'intervention : Profondeur du sol où l'oxygène est encore présent, ce qui affecte le cycle des nutriments, c'est-à-dire les transformations du carbone. Cela influence le taux de décomposition de la matière organique et donc la séquestration du carbone.
Profondeur d'oxydation en dehors	Profondeur moyenne d'oxygène en dehors de l'empreinte de l'intervention : Profondeur du sol où l'oxygène est encore présent, ce qui affecte le cycle des nutriments, c'est-à-dire les transformations du carbone. Cela influence le taux de décomposition de la matière organique et donc la séquestration du carbone.
Profondeur de la nappe phréatique à l'intérieur	Profondeur moyenne de la nappe phréatique à l'intérieur de l'empreinte de l'intervention - en mètres sous la surface
Profondeur de la nappe phréatique en dehors	Profondeur moyenne de la nappe phréatique en dehors de l'empreinte de l'intervention - en mètres sous la surface

Résumé des résultats

Les impacts hydrologiques et sur les émissions de carbone des interventions sont évalués à l'intérieur et autour de la zone d'intervention. Les valeurs des indicateurs sont résumées dans le tableau ci-dessous. Les valeurs surlignées en rouge et en vert indiquent respectivement des pertes de carbone dans le sol élevées et faibles.

Table 0-5 Résultats des scénarios de développement dans le climat actuel des tourbières pluviales

Nom abrégé de l'indicateur	Unité	Valeurs des indicateurs pour les scénarios						
		A.1.1	B.1.1	C.1.1	D.1.1	E.1.1	F.1.1	G.1.1
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	m	0,20	0,92	2,12	0,37	0,18	0,73	0,14
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	m	0,15	1,06	2,00	0,40	0,14	0,73	0,10
Flux de carbone à l'intérieur	kg/m ² /an	-4,72	0	0,00	-8,77	-4,67	-15,64	-3,77
Profondeur d'oxydation en dehors	m	0,20	0,13	0,68	0,16	0,20	0,77	0,20
Profondeur des eaux souterraines en dehors	m	0,15	0,05	0,68	0,10	0,16	0,79	0,15
Flux de carbone en dehors	kg/m ² /an	-4,72	-2,90	-14,26	-3,80	-4,78	-15,01	-4,70

Table 0-6 Résultats des scénarios de développement dans le climat actuel des tourbières alimentées par des cours d'eau

Indicateur Nom abrégé	Unité	Valeurs des indicateurs pour les scénarios						
		A.1.2	B.1.2	C.1.2	D.1.2	E.1.2	F.1.2	G.1.2
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	m	0,12	0,89	2,12	0,34	0,12	0,71	0,09
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	m	0,03	1,03	2,01	0,35	0,03	0,69	0
Flux de carbone à l'intérieur	kg/m ² /an	-2,82	0	0	-8,10	-3,17	-14,55	-2,46
Profondeur d'oxydation en dehors	m	0,12	0,07	0,61	0,09	0,12	0,65	0,12
Profondeur des eaux souterraines en dehors	m	0,03	-0,05	0,59	-0,01	0,03	0,64	0,03
Flux de carbone en dehors	kg/m ² /an	-2,82	-1,40	-12,88	-2,08	-2,85	-13,53	-2,79

Scénarios de changement climatique

Les niveaux d'eau dans les tourbières devraient baisser dans les scénarios SSP1-2.6 et SSP3-7.0. Bien que les précipitations devraient augmenter de 1,5 % par an dans le scénario SSP1-2.6, l'augmentation de l'évapotranspiration réelle est plus marquée. Dans le scénario SSP3-7.0, une augmentation substantielle de l'évapotranspiration réelle, associée à une légère diminution des précipitations, entraîne une baisse des niveaux d'eau. À mesure que les niveaux d'eau baissent sous l'effet du changement climatique, la décomposition de la tourbe s'accélère.

Focus sur le flux de carbone en dehors de la zone d'intervention

Pour toutes les interventions, à l'exception des interventions liées à l'urbanisation et aux incendies, les flux de carbone à l'intérieur et à l'extérieur de l'empreinte suivent la même tendance par rapport à la référence dans toutes les conditions climatiques : si les pertes de carbone pour une intervention donnée sont inférieures à la référence dans les conditions climatiques actuelles, elles le sont également dans les scénarios de changement climatique futur.

Les résultats démontrent également que toute forme d'intervention future en matière de développement qui inclut le drainage aura un impact significatif sur la capacité des tourbières environnantes à

séquestrer le carbone et entraînera une augmentation des pertes de carbone dans la zone environnante.

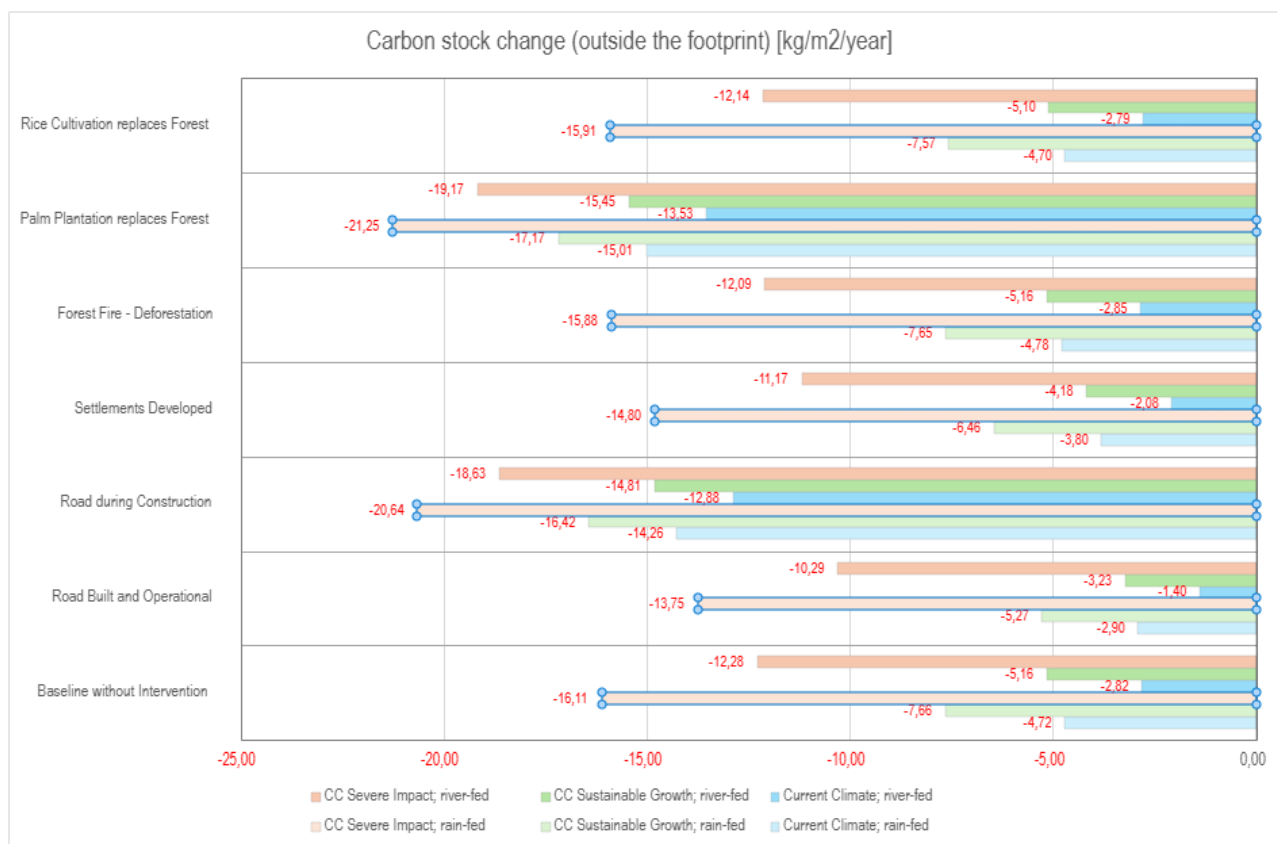


Figure 0-1 Résumé de tous les résultats des interventions pour le changement du stock de carbone en dehors de la zone d'intervention

Pour les autres interventions localisées sans drainage, telles que les routes opérationnelles, les zones d'habitation ou les zones exposées aux incendies, la perte de carbone est concentrée dans la zone d'intervention et a un impact limité sur les tourbières environnantes.

L'indicateur est une valeur normalisée par mètre carré qui caractérise l'impact sur une unité de surface. Par conséquent, pour des interventions de taille spécifique, le décideur doit multiplier les valeurs respectives de l'indicateur par la superficie de la zone d'intervention effective.

Conclusions

Les conclusions de ce rapport soulignent le rôle essentiel du niveau de la nappe et de la saturation du sol dans la détermination des flux de carbone des tourbières. Les analyses de scénarios révèlent que le développement des infrastructures et le changement d'affectation des terres peuvent augmenter considérablement les pertes de carbone, tandis que la restauration et la gestion adaptative de l'eau peuvent atténuer ces impacts.

Les conclusions du rapport soulignent l'importance cruciale de cinq mesures de gestion clés :

- **Maintenir des nappes phréatiques élevées** : donner la priorité aux pratiques de gestion hydrologique qui maintiennent la nappe phréatique près de la surface. Lorsque le drainage est inévitable, limiter la profondeur et la durée du drainage afin de minimiser l'oxydation et l'affaissement de la tourbe.
- **Protéger et restaurer la végétation** : conserver les zones tampons de végétation naturelle, en particulier le long des cours d'eau et des marges des dômes de tourbe, afin de favoriser la rétention d'eau et la résilience des écosystèmes. La restauration des zones dégradées par la réhumidification et le reboisement doit être encouragée afin de réduire les émissions et d'améliorer le fonctionnement des tourbières.

- **Réduire au minimum les perturbations de surface** : éviter le nivellement à grande échelle de la microtopographie naturelle et limiter le compactage du sol par les infrastructures lourdes. Dans la mesure du possible, concevoir des interventions visant à préserver ou à imiter les caractéristiques naturelles de la surface.
- **Mettre en œuvre un drainage adaptatif** : lorsque le drainage est nécessaire au développement, utiliser des systèmes de drainage contrôlés (par exemple, des déversoirs réglables) pour permettre une gestion dynamique des niveaux d'eau en fonction des variations saisonnières et climatiques.
- **Surveiller et s'adapter** : mettre en place une surveillance à long terme des indicateurs hydrologiques et écologiques afin d'éclairer la gestion adaptative et de garantir que les interventions ne compromettent pas l'intégrité des tourbières.

L'étude souligne également l'importance d'une surveillance à long terme et de l'engagement des parties prenantes pour garantir une gouvernance efficace et une planification durable de l'utilisation des terres. Ces conclusions offrent des informations exploitables pour une planification durable de l'utilisation des terres qui peut jeter les bases d'une gouvernance fondée sur des données probantes, d'une surveillance à long terme et d'un engagement des parties prenantes, éléments essentiels pour préserver l'un des écosystèmes les plus riches en carbone et les plus importants sur le plan écologique au monde.

Prochaines étapes

Les résultats complets de l'étude peuvent être consultés dans le Système d'aide à la décision hydrologique. La République démocratique du Congo et la République du Congo utiliseront ces conclusions et le Système d'aide à la décision hydrologique comme outil interactif pour développer et gérer de manière durable les eaux des tourbières du lac Télé et du lac Tumba.

Table de matières

Résumé	2
1 Introduction.....	11
1.1 Approche d'analyse de scénarios	12
1.2 Structure du rapport.....	12
1.3 Public cible.....	13
2 Consultations des parties prenantes et contributions à l'étude.....	14
2.1 Identification des défis liés à l'eau	14
2.1.1 Défis liés à l'eau en République du Congo :	14
2.1.2 Défis liés à l'eau en République démocratique du Congo :	14
2.1.3 Des défis aux scénarios pour une meilleure gestion des tourbières	15
2.2 Identification des scénarios de développement	15
2.3 Résumé des types d'interventions identifiés par les parties prenantes	15
2.3.1 République du Congo	15
2.3.2 République Démocratique du Congo	18
2.4 Traduction des interventions en scénarios.....	22
2.4.1 Interventions à petite échelle ayant des impacts locaux.....	22
3 Méthodologie d'évaluation et définitions des scénarios	25
3.1 Méthodologie d'évaluation	25
3.1.1 Modèle hydrologique	25
3.1.2 Modèle d'accumulation et de dégradation du carbone	26
3.2 Définitions des scénarios.....	27
3.2.1 Interventions de développement	27
3.2.2 Scénarios climatiques.....	28
3.2.3 Régions hydrologiques	29
3.3 Indicateurs à des fins d'évaluation	29
4 Résumé des résultats	32
4.1 Pour les tourbières pluviales	32
4.2 Pour les tourbières alimentées par les rivières	33
4.3 Impact du changement climatique.....	35
5 Résultats par type d'intervention : focus sur l'évolution des stocks de carbone dans les tourbières adjacentes	37
5.1 A : Référence.....	37
5.2 B : Route opérationnelle.....	38
5.3 C : Construction d'une route.....	38
5.4 D : Urbanisation	39
5.5 E : Incendies de forêt / Déforestation.....	40
5.6 F : Une plantation de palmiers remplace la forêt	40
5.7 G : La culture du riz remplace la forêt	41
5.8 Conclusion	42
5.8.1 Remarque concernant l'indicateur « Variation du stock de carbone en kg par m ² par an » à l'intérieur et à l'extérieur de l'empreinte de l'intervention :	43
6 Applicabilité et limites.....	44
6.1 Configuration hydrologique et validation du modèle	44
6.2 Processus hydrologiques	44
6.3 Modélisation de scénarios	44
6.4 Accumulation et perte de carbone.....	45
6.5 Conclusion	45
7 Résumé et conclusion	46
7.1 Recommandations.....	47

7.2	Prochaines étapes.....	48
8	Abréviations	49

Figures

Figure 0-1	Résumé de tous les résultats des interventions pour le changement du stock de carbone en dehors de la zone d'intervention	7
Figure 1-1	Aperçu du paysage du projet (CRREBaC 2025)	11
Figure 2-1	Carte indiquant l'emplacement des villes identifiées où l'extension du réseau routier est envisagée pour relier ces communautés, en traversant les tourbières de la réserve communautaire du lac Télé	16
Figure 2-2	Feu de brousse dans la réserve communautaire du lac Télé (WCS 2024)	17
Figure 2-3	Emplacement de la zone d'exploration de Ngoki	18
Figure 2-4	Types de routes existantes en RDC dans le cadre du projet	19
Figure 2-5	Blocs pétroliers dans la zone du projet en RDC	20
Figure 2-7	Aperçu des scénarios identifiés par le CREBBaC pour la RDC	23
Figure 3-	Résumé des cinq scénarios d'émissions qui alimentent le dernier rapport du GIEC AR6	28
Figure 3-	Carte de la réserve communautaire du lac Télé, montrant les différents types de paysages – le vert clair et le vert moyen indiquent la plaine inondable forestière et la forêt marécageuse où se trouvent les tourbières (WCS 2025).	31
Figure 5-1	Changement du stock de carbone pour l'intervention de référence	37
Figure 5-2	Émissions de CO ₂ à proximité d'une route en service	38
Figure 5-3	Émissions de CO ₂ à proximité d'une route pendant la construction	39
Figure 5-4	Émissions de CO ₂ à proximité d'un nouveau lotissement	39
Figure 5-5	Émissions de CO ₂ à proximité d'un incendie qui détruit toute la végétation	40
Figure 5-6	Émissions de CO ₂ à proximité d'une plantation de palmiers à huile	41
Figure 5-7	Émissions de CO ₂ à proximité des rizières	42
Figure 5-8	Aperçu des émissions de CO ₂ à proximité de tous les scénarios	42

Tableaux

Table 0-1	Interventions de développement généralisées	3
Table 0-2	Scénarios de changement climatique	4
Table 0-3	Régimes hydrologiques	4
Table 0-4	Indicateurs utilisés pour générer les résultats	5
Table 0-5	Résultats des scénarios de développement dans le climat actuel des tourbières pluviales	6
Table 0-6	Résultats des scénarios de développement dans le climat actuel des tourbières alimentées par des cours d'eau	6
Table 2-1	Aperçu des catégories d'interventions élaborées à Brazzaville en mars 2025 avec les parties prenantes	23
Table 3-1	Aperçu des interventions de développement	27
Table 3-2	Aperçu des scénarios de changement climatique	29
Table 3-3	Aperçu des régions hydrologiques	29
Tableau 4-1	Résumé des valeurs des indicateurs pour les scénarios de tourbières pluviales	32
Table 4-2	Résumé des valeurs des indicateurs pour les scénarios de tourbières influencées par les cours d'eau	34

1 Introduction

Les tourbières du bassin du Congo, en particulier celles de la région de la Cuvette centrale, constituent l'un des plus importants réservoirs terrestres de carbone au monde et jouent un rôle essentiel pour la biodiversité et la stabilité hydrologique. En réponse aux pressions croissantes liées au changement d'affectation des terres, au développement des infrastructures et à la variabilité climatique, le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) a lancé un projet intitulé « Préserver la biodiversité, les réserves de carbone et les réserves d'eau essentielles dans les tourbières du bassin du Congo ». Cette initiative a conduit à la mise au point d'un système d'aide à la décision hydrologique (HDSS), conçu pour fournir des orientations scientifiques en vue d'une gestion durable des tourbières dans le paysage du lac Télé/lac Tumba. Le paysage du lac Télé et du lac Tumba

Le paysage du lac Télé-lac Tumba chevauche la frontière entre la République démocratique du Congo (RDC) et la République du Congo (RC), couvrant une superficie d'environ 126 440 km² dans la cuvette centrale du bassin du Congo. On estime que 72 439 km² se trouvent dans la partie orientale du paysage en RDC, tandis que 54 001 km² sont situés dans la partie occidentale en RC. Le paysage abrite trois lacs importants : le lac Tumba et le lac Mai-Ndombe en RDC, et le lac Télé en RC. La région est reliée par un vaste réseau fluvial, comprenant le fleuve Congo, l'Oubangui, la Sangha et la Likouala aux Herbes.

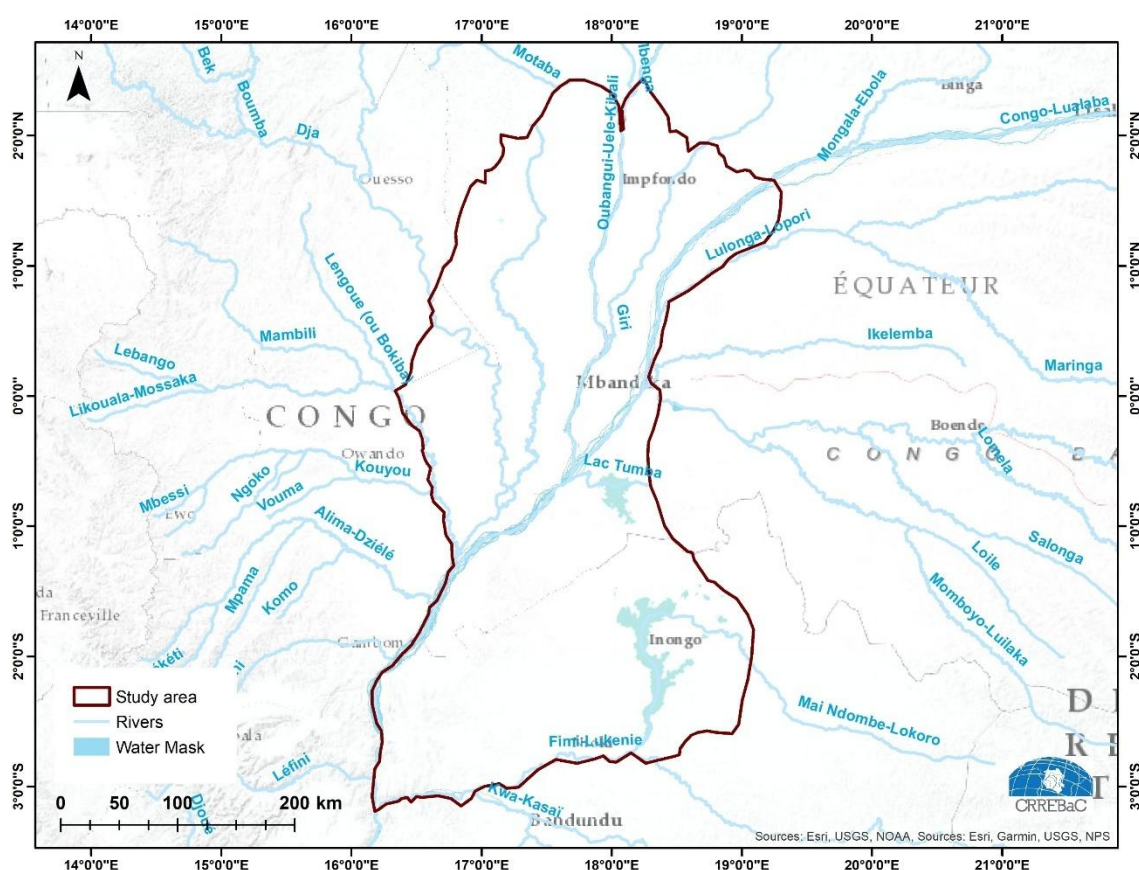


Figure 1-1 Aperçu du paysage du projet (CRREBaC 2025)

La classification des terres dans le paysage révèle des forêts marécageuses tourbeuses dominées par des palmiers (en particulier dans les zones centrales et sud-est), des forêts de terra firme et des savanes (principalement dans le sud-ouest) et des forêts marécageuses tourbeuses dominées par des feuillus (en particulier dans le nord-ouest). Cet écosystème est l'un des plus importants points chauds pour la biodiversité et le climat dans le bassin du Congo et soutient les moyens de subsistance de la population locale dans le paysage et les zones environnantes.

La population du paysage était estimée à 2 millions d'habitants en 2012 (principalement situés en RDC), principalement concentrés dans des zones telles que Lukolela et Mbandaka en RDC, et Epena et Impfondo en RC. Le paysage comprend également des établissements humains plus petits et dispersés, habités par des populations locales et autochtones, en particulier dans les régions de terra firme et de savane, avec des établissements dans des endroits comme Bobanga et Ikendji, entre autres. Cependant, le paysage reste largement inaccessible, densément boisé et peu peuplé. La population, y compris les quelque 1,2 million de personnes vivant dans la ville de Mbandaka, n'a toujours pas accès de manière fiable aux services de base tels que l'électricité, l'eau potable et l'assainissement. La pauvreté économique et les défis qui y sont associés continuent d'affliger la région. Les principales activités dans la région comprennent la pêche dans les rivières et les tourbières, la plantation, la cueillette de produits forestiers comestibles et non comestibles, la chasse et l'élevage pour la subsistance et la génération de revenus.

L'importance de l'écosystème du paysage dépasse ses frontières et ses environs en termes de services environnementaux ; il revêt également une importance mondiale, notamment du point de vue climatique. Le paysage est situé dans la cuvette centrale du bassin du Congo, où des estimations récentes indiquent que 167 600 km² de tourbières stockent 29 gigatonnes de carbone, soit l'équivalent de près de deux ans d'émissions mondiales de CO₂. Par conséquent, la conservation de ces tourbières et la promotion de modes de développement respectueux de l'écosystème sont cruciales pour le climat, la biodiversité et les populations dont les moyens de subsistance dépendent de la santé de l'écosystème.

1.1 Approche d'analyse de scénarios

Les tourbières du bassin du Congo représentent l'un des plus importants réservoirs mondiaux de carbone terrestre, de biodiversité et de ressources en eau douce. La protection de ces écosystèmes est essentielle non seulement pour l'intégrité environnementale régionale, mais aussi pour la régulation du climat mondial. Cependant, les tourbières sont soumises à des pressions croissantes dues au développement local, au changement d'affectation des terres et à la variabilité climatique, qui peuvent tous modifier profondément leur équilibre hydrologique et écologique.

En réponse à ces défis, le projet « Préserver la biodiversité, les réserves de carbone et d'eau essentielles dans les tourbières du bassin du Congo en favorisant une prise de décision fondée sur des données probantes et une bonne gouvernance », mis en œuvre par le PNUE, vise à soutenir la gestion durable des tourbières dans le paysage du lac Télé/lac Tumba. Au cœur de cet effort se trouve le développement d'un système d'aide à la décision hydrologique (HDSS), qui fournit une base scientifique pour évaluer les impacts potentiels de diverses interventions de développement et scénarios climatiques sur l'hydrologie des tourbières et la dynamique du carbone. Le développement d'un modèle hydrologique et d'un système d'aide à la décision pour les tourbières est un moyen de réaliser des analyses de scénarios qui aboutissent à des recommandations pour les décideurs et les parties prenantes actives dans la zone du projet.

Le présent rapport documente les principales conclusions des analyses de scénarios qui sous-tendent le HDSS et fournit des orientations sur les conséquences probables des interventions pertinentes au niveau local – identifiées dans le cadre d'un processus consultatif avec les parties prenantes – sur le bilan hydrique et les stocks de carbone dans le sol de la Cuvette Centrale.

1.2 Structure du rapport

Après le chapitre introductif (chapitre 1), le rapport est organisé en six chapitres substantiels qui présentent collectivement l'approche, les conclusions et les implications de l'étude.

Le chapitre 2 décrit le processus de consultation des parties prenantes, détaillant l'éventail des contributions reçues des acteurs locaux, nationaux et internationaux, et la manière dont ces points de vue ont influencé la conception de l'étude.

Le chapitre 3 décrit la méthodologie d'évaluation, y compris le cadre analytique et la définition des scénarios utilisés pour évaluer la dynamique des tourbières dans des conditions climatiques et d'utilisation des terres variables.

Le chapitre 4 présente les résultats pour les différents scénarios définis, en mettant particulièrement l'accent sur l'évolution des résultats des indicateurs de stocks de carbone, et en soulignant les variations spatiales et temporelles des flux de carbone.

Le chapitre 5 synthétise les résultats pour les tourbières pluviales et celles influencées par les cours d'eau, en intégrant les informations issues des projections sur le changement climatique afin d'évaluer les impacts différentiels.

Le chapitre 6 traite de l'applicabilité des résultats de l'étude aux politiques et aux pratiques, tout en reconnaissant les limites méthodologiques et les zones d'incertitude.

Enfin, le chapitre 7 propose une série de recommandations et décrit les prochaines étapes possibles en matière de recherche, d'engagement politique et de mise en œuvre.

1.3 Public cible

Ce rapport s'adresse aux décideurs, aux parties prenantes, aux ONG et aux chercheurs qui s'intéressent à la Cuvette Centrale et aux impacts du développement et du changement climatique sur ses écosystèmes sensibles. Il répond au manque de données fiables in situ sur l'hydrologie, le climat et la dynamique des tourbières dans la région, et vise à soutenir l'élaboration de politiques et la planification fondées sur des données probantes.

En identifiant les principales lacunes dans les connaissances et les domaines nécessitant des recherches et des investissements supplémentaires, le rapport contribue à jeter les bases d'une gestion durable et d'efforts de conservation dans l'un des paysages les plus importants au monde sur le plan écologique.

2 Consultations des parties prenantes et contributions à l'étude

2.1 Identification des défis liés à l'eau

En octobre 2023, une mission exploratoire à Brazzaville et Kinshasa a mis en évidence plusieurs points clés pour éclairer cette étude. Il s'agit notamment de la limitation des données hydrologiques in situ, de l'importance d'impliquer les communautés locales et de prendre en compte les pratiques locales de gestion de l'eau, de garantir la transparence des données (y compris le partage des données) et de renforcer les capacités.

En mars 2024, une deuxième mission a souligné la nécessité de renforcer les synergies avec d'autres initiatives et projets, d'impliquer les parties prenantes à différents niveaux, d'exploiter les données existantes et les plateformes nationales en ligne liées à l'environnement, et d'intégrer la dimension de genre dans les activités. La mission a permis de cartographier divers défis liés à l'eau dans le paysage, tant au niveau local que national, afin d'alimenter cette étude, les limites en matière de données étant particulièrement importantes. Les défis identifiés par les parties prenantes sont résumés ci-dessous.

2.1.1 Défis liés à l'eau en République du Congo :

Défis environnementaux

- Niveaux d'acidité élevés dans le lac Télé.
- Fréquents feux de brousse présentant des risques écologiques.

Défis socio-économiques

- Pratiques de pêche non durables.
- Absence de planification durable de l'utilisation des terres.
- Accès limité à l'eau potable et à l'assainissement (ne relève pas directement du champ d'application du projet, mais est considéré comme un sujet de préoccupation).

Défis institutionnels

- Nécessité d'une législation plus claire en matière de gestion des ressources naturelles.
- Cadres de coopération internationale insuffisants.
- Chevauchement des responsabilités entre le ministère de l'Environnement et d'autres entités chargées de la gestion des tourbières.
- Nécessité d'améliorer la coordination et le dialogue entre les parties prenantes.

Défis liés aux données et à la surveillance

- Disponibilité insuffisante des données environnementales.
- Absence de systèmes de surveillance in situ.
- Nécessité d'assurer la viabilité à long terme des initiatives de surveillance et de conservation.

2.1.2 Défis liés à l'eau en République démocratique du Congo :

Défis environnementaux

- Pollution, dégradation des terres et érosion des sols.
- Pratiques agricoles non durables affectant la qualité des sols et de l'eau.
- Risques accrus liés aux catastrophes naturelles et à l'évolution des régimes pluviométriques.

Défis socio-économiques

- Accès limité à l'eau potable.
- Manque d'initiatives efficaces en matière de communication et de sensibilisation.
- Conflits entre les communautés concernant l'utilisation des ressources.

- Nécessité de trouver des alternatives durables génératrices de revenus pour améliorer les moyens de subsistance.

Défis institutionnels

- Cadres juridiques inadéquats pour la gestion des tourbières et des ressources en eau.
- Absence de plans intégrés de gestion des ressources en eau.
- Participation limitée des communautés autochtones à la prise de décision.
- Faiblesse des outils décisionnels locaux et des capacités institutionnelles.

Défis liés aux données et aux politiques

- Absence de politiques spécifiques de gestion de l'eau incluant les tourbières.
- Insuffisance de la collecte et de l'analyse des données pour éclairer les décisions.
- Besoin d'informations plus claires et plus accessibles pour les parties prenantes.

Défis en matière de collaboration

- Engagement fragmenté des parties prenantes.
- Nécessité de cadres de consultation inclusifs pour soutenir des stratégies intégrées.

2.1.3 Des défis aux scénarios pour une meilleure gestion des tourbières

Les défis identifiés mettent en lumière la nécessité de mieux comprendre les impacts potentiels des aménagements et du changement climatique sur les tourbières, ainsi que de développer un outil d'aide à la décision à des fins de planification.

À la suite de ces consultations, le projet s'est attaché à concevoir un modèle hydrologique et un système d'aide à la décision (HDSS) afin d'étudier plus en détail les impacts des scénarios de développement et les effets du changement climatique sur les tourbières de la Cuvette Centrale.

2.2 Identification des scénarios de développement

En 2025, des experts locaux de la région ont été intégrés à l'équipe du projet afin de fournir des contributions pour identifier les interventions de développement pertinentes à prendre en compte dans l'étude.

En mars 2025, une consultation a été organisée à Brazzaville afin de recueillir les commentaires des parties prenantes nationales sur le type de scénarios de développement et d'interventions pouvant être étudiés à l'aide de la modélisation hydrologique afin de développer un système d'aide à la décision. Un atelier similaire destiné aux parties prenantes, qui devait se tenir à Kinshasa, n'a pas eu lieu en mars 2025 pour des raisons de sécurité, mais le CRREBaC a apporté sa contribution à l'étude.

La section suivante présente un résumé des interventions locales identifiées par les parties prenantes. Seuls les scénarios les plus pertinents sur le plan hydrologique ont été retenus à des fins de modélisation.

2.3 Résumé des types d'interventions identifiés par les parties prenantes

2.3.1 République du Congo

Construction routière prévue : deux grands projets routiers en République du Congo, traversant des terrains marécageux et des tourbières, présentent des risques environnementaux importants s'ils ne sont pas soigneusement conçus. Des remblais surélevés pourraient perturber l'écoulement naturel de l'eau, entraînant un assèchement de la tourbe et une augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Si ces routes promettent d'améliorer l'accès, le commerce et les opportunités économiques pour les communautés isolées, elles illustrent également l'équilibre délicat entre développement et préservation écologique.

- Epena-Mboua-Pokola, traversant environ 300 km de terrain marécageux
- Pokola-Eyino-Bouanela

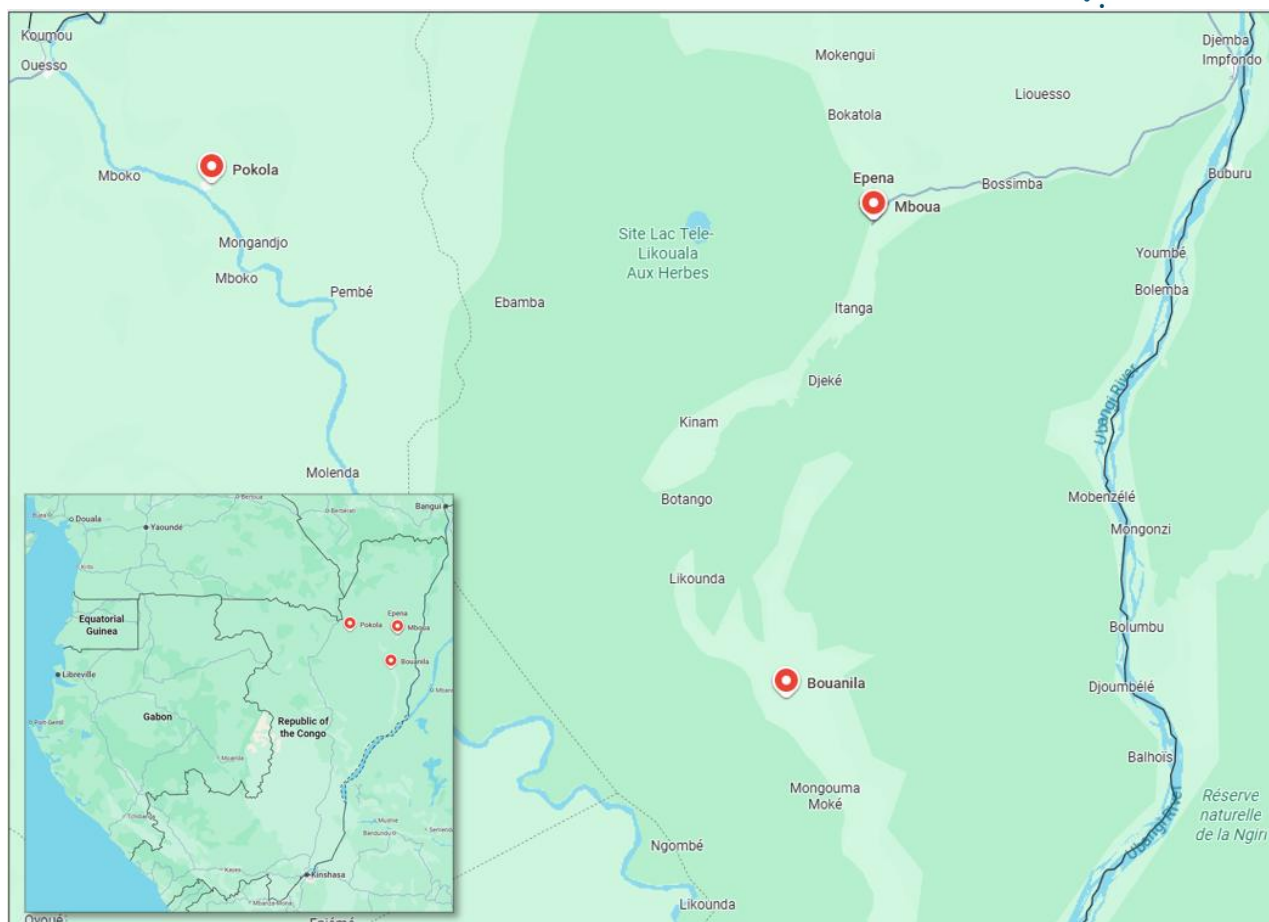


Figure 2-1 Carte indiquant l'emplacement des villes identifiées où l'extension du réseau routier est envisagée pour relier ces communautés, en traversant les tourbières de la réserve communautaire du lac Télé

Projets d'expansion agro-industrielle : plusieurs projets visant à établir des plantations agricoles à proximité des zones de tourbières dans le nord du Congo ont été identifiés.

- Projet Paysage Forestier du Nord Congo (PPFNC)
- ProClimat
- Projet Agroforesterie Nord Congo (PANC)

D'après les enquêtes menées en 2016¹, trois types d'utilisateurs de l'écosystème à des fins de production agricole ont été identifiés dans le paysage :

- Les utilisateurs des forêts de montagne, situées sur les terres des Kaboungas, les plateaux élevés de Boha, Impongui et Dzeké, et les terres des districts d'Impfondo, Dongou, Liranga et Loukolela.
- Les utilisateurs des forêts inondables dans le segment nord-ouest (Mabongo Koto, Bokatola, Matoko, Epéna), la zone centrale (Mongouma Bailly, Botongo, Mossengué, Bouanela, Bokoma, Ebambi et de nombreux autres villages) et la zone sud (par exemple, Youmba, Boleko, Sossolo et les villages du district de Mossaka).
- Les utilisateurs des plaines inondables (Youmba, Botouali, Mikoungou et les villages du district de Mossaka).

Dans les régions du centre et du sud, l'agriculture sur brûlis est courante dans les forêts et les plaines inondables.

¹ Madouka, G & B, Ikati. (2016). Rapport des enquêtes biologiques_Lac Télé –Lac Tumba

Pratiques de pêche non durables : les communautés locales vivant à proximité des cours d'eau des tourbières ont signalé des pratiques de pêche non durables, telles que l'empoisonnement des poissons, l'utilisation de filets à mailles fines et la construction de barrages sur les cours d'eau, qui, bien qu'il ne s'agisse pas d'interventions de développement officielles, causent des dommages à l'environnement. Ces méthodes contribuent à l'envasement, à la baisse du niveau des eaux et à la détérioration de la vie aquatique, en particulier dans les canaux vulnérables des marécages tourbeux. À long terme, ces pratiques peuvent assécher les sols tourbeux et dégrader l'écosystème.

Bien qu'elles assurent la sécurité alimentaire à court terme, leur impact à long terme menace à la fois la pêche et la santé des tourbières. Le HDSS ne simule peut-être pas directement ces effets, mais tout plan de gestion devrait les prendre en compte par le biais de l'éducation et de la réglementation.

Feux de brousse saisonniers : Les feux de brousse saisonniers, souvent allumés pour la chasse ou l'agriculture dans les savanes voisines, se propagent parfois aux marges des tourbières, ce qui présente de graves risques pour l'environnement. Si la surface de la tourbe est sèche, les

incendies peuvent enflammer le sol tourbeux lui-même, provoquant une combustion souterraine qui libère de grandes quantités de carbone et endommage la structure du sol. La discussion a souligné que les incendies combinés au drainage créent le pire scénario possible, car les tourbières drainées sont plus susceptibles de brûler.

Barrages en amont : le ministère de l'Énergie et de l'Hydraulique a présenté des plans pour la construction de petits barrages hydroélectriques en amont de la Cuvette Centrale, qui pourraient modifier considérablement les débits d'eau dans les zones de tourbières. Les barrages pourraient inonder les zones en amont et réduire le réapprovisionnement en eau en aval, risquant ainsi d'assécher la tourbe ou de l'inonder de manière permanente, ce qui pourrait entraîner des émissions de carbone et une perte de tourbe. L'extraction d'eau souterraine par des forages a également été mentionnée comme une menace potentielle si elle est effectuée à proximité des tourbières. Bien que l'hydroélectricité offre des avantages économiques tels que l'électricité et la croissance, les participants ont souligné l'importance de situer ces projets loin des zones de tourbières sensibles et de gérer soigneusement les débits d'eau afin d'éviter tout préjudice écologique.

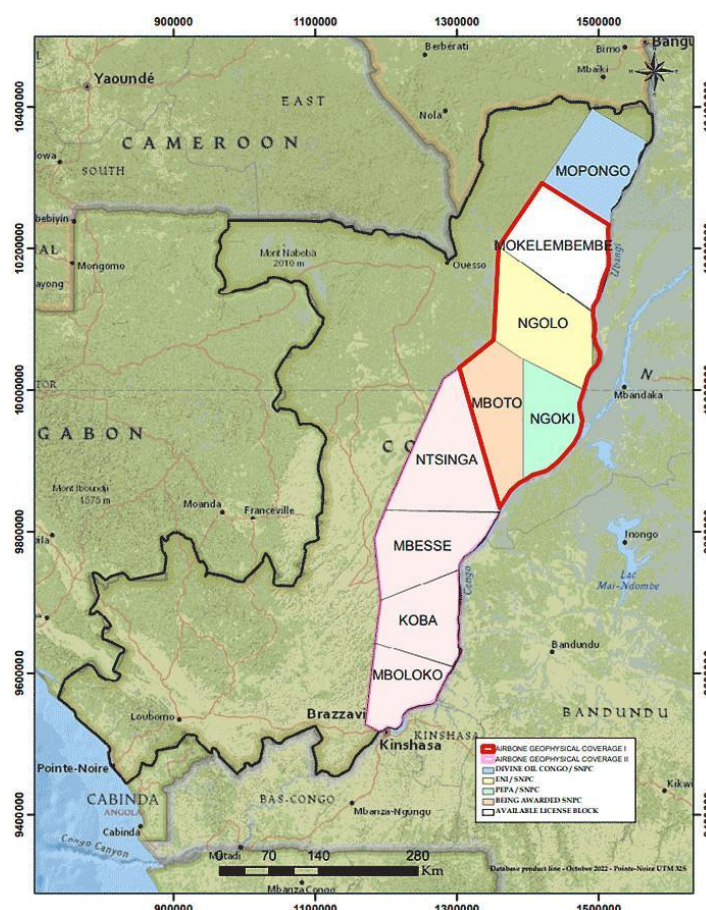


Figure 2-2 Feu de brousse dans la réserve communautaire du lac Télé (WCS 2024)

Exploitation minière et développement des hydrocarbures : le projet du champ pétrolifère de Ngoki a été cité comme un exemple susceptible d'introduire des infrastructures d'exploration dans ou à proximité des zones tourbeuses, ce qui soulève des inquiétudes quant à la dégradation de la tourbe, la pollution et la perturbation hydrologique. Des activités telles que la construction de routes et le forage peuvent assécher ou inonder les zones tourbeuses, entraînant des émissions de carbone et des dommages à l'écosystème. Des mesures d'atténuation, telles que le maintien des débits d'eau et la création de zones d'exclusion dans les zones tourbeuses sensibles, peuvent s'avérer nécessaires.

Figure 2-3 Emplacement de la zone d'exploration de Ngoki

Extraction de la tourbe : bien que l'extraction de la tourbe ne soit pas pratiquée actuellement dans la région, les participants l'ont évoquée comme un scénario futur potentiel en raison de ses graves conséquences environnementales. Si elle était pratiquée à des fins horticoles ou énergétiques, l'exploitation de la tourbe entraînerait l'élimination directe des dépôts de tourbe, libérant ainsi de grandes quantités de carbone et détruisant l'habitat. Elle a été identifiée comme l'une des pratiques les plus dommageables et les moins durables, susceptible d'accélérer le changement climatique et de réduire considérablement l'étendue des tourbières. Il a été jugé important d'inclure ce scénario dans la planification, étant donné que l'extraction de la tourbe est courante dans d'autres pays et pourrait être proposée dans un contexte économique ou politique en mutation.



Écotourisme : Un scénario impliquant le développement de l'écotourisme dans la réserve communautaire du lac Télé a été présenté comme un exemple positif d'utilisation durable des terres. Si elles sont gérées avec soin, des activités telles que les visites guidées de la faune sauvage et les promenades sur des passerelles en bois pourraient générer des revenus pour les communautés locales et soutenir les efforts de conservation, avec un impact minimal sur les tourbières. Contrairement aux grands projets d'infrastructure, l'écotourisme a une faible empreinte écologique et peut s'aligner sur les objectifs environnementaux, offrant des avantages socio-économiques sans perturbation hydrologique significative. Ce scénario souligne que tous les développements ne sont pas nuisibles, certains pouvant contribuer activement à la protection des écosystèmes des tourbières.

Bonne gouvernance : Les participants ont également discuté de la réforme de la gouvernance comme d'un scénario susceptible d'avoir des effets transformateurs sur la conservation des tourbières. Le renforcement des protections juridiques, de l'application de la loi et de la cogestion communautaire pourrait réduire considérablement les interventions néfastes et contribuer à maintenir l'intégrité des tourbières, conformément au scénario de référence existant.

2.3.2 République Démocratique du Congo

Construction routière prévue : les infrastructures de transport dans la zone étudiée sont obsolètes et mal intégrées entre les réseaux routier, ferroviaire, aérien et fluvial. Les ruptures de connectivité et l'incohérence des normes entre les modes de transport entravent le développement économique et la

croissance industrielle, malgré la présence de ressources naturelles. Cette situation augmente les coûts de transport et fait grimper les prix des marchandises, en particulier des denrées alimentaires. Cependant, des initiatives sont en cours pour améliorer le transport fluvial et réformer le secteur des transports dans son ensemble. Le lac Tumba est une voie navigable vitale qui relie des sites clés tels que Bikoro et Ingende. Les axes prioritaires pour le développement routier futur sont les suivants : Kisangani-Buta-Bumba-Gemena-Zongo et Mbandaka-Inongo-Kinshasa.

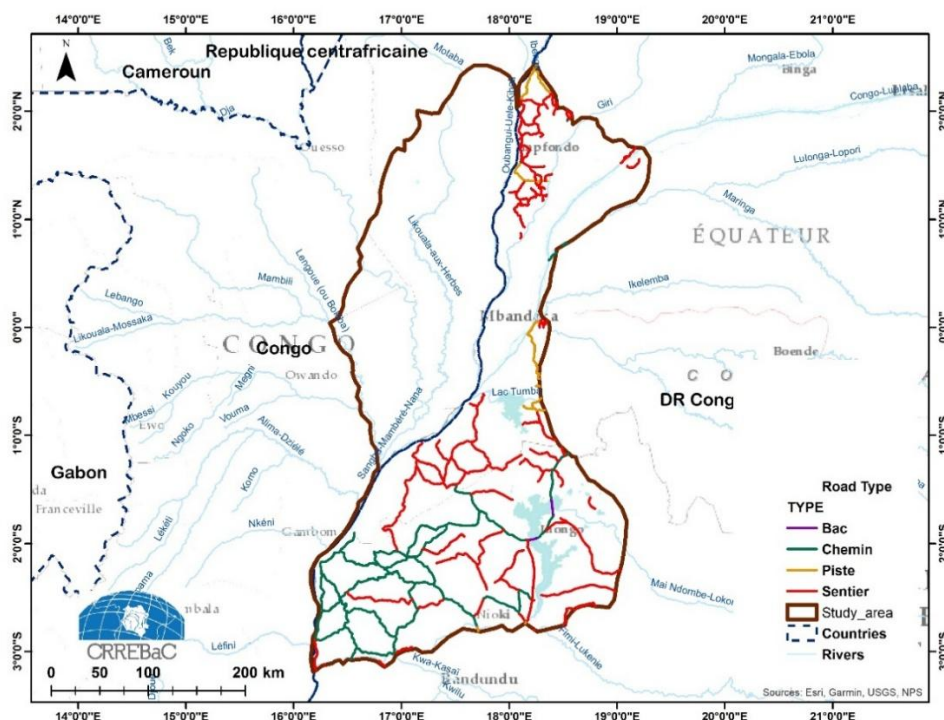


Figure 2-4 Types de routes existantes en RDC dans le cadre du projet

La province de l'Équateur dispose d'un réseau routier étendu, mais celui-ci est actuellement en mauvais état. Néanmoins, les perspectives de réhabilitation et d'entretien sont favorables, compte tenu de la topographie et de la disponibilité des matériaux de construction. Cependant, la présence importante de cours d'eau et la grande superficie qu'ils occupent dans la zone forestière méridionale rendent difficile et coûteux le développement continu d'un réseau routier bien entretenu. Dans la province du Mai-Ndombe, les voies navigables restent le moyen de transport le plus utilisé pour les personnes et les marchandises.

Développement énergétique : L'approvisionnement en énergie est quasi inexistant dans la région. Plusieurs blocs d'exploration pour le pétrole et les hydrocarbures ont été désignés dans la région du lac Tumba.

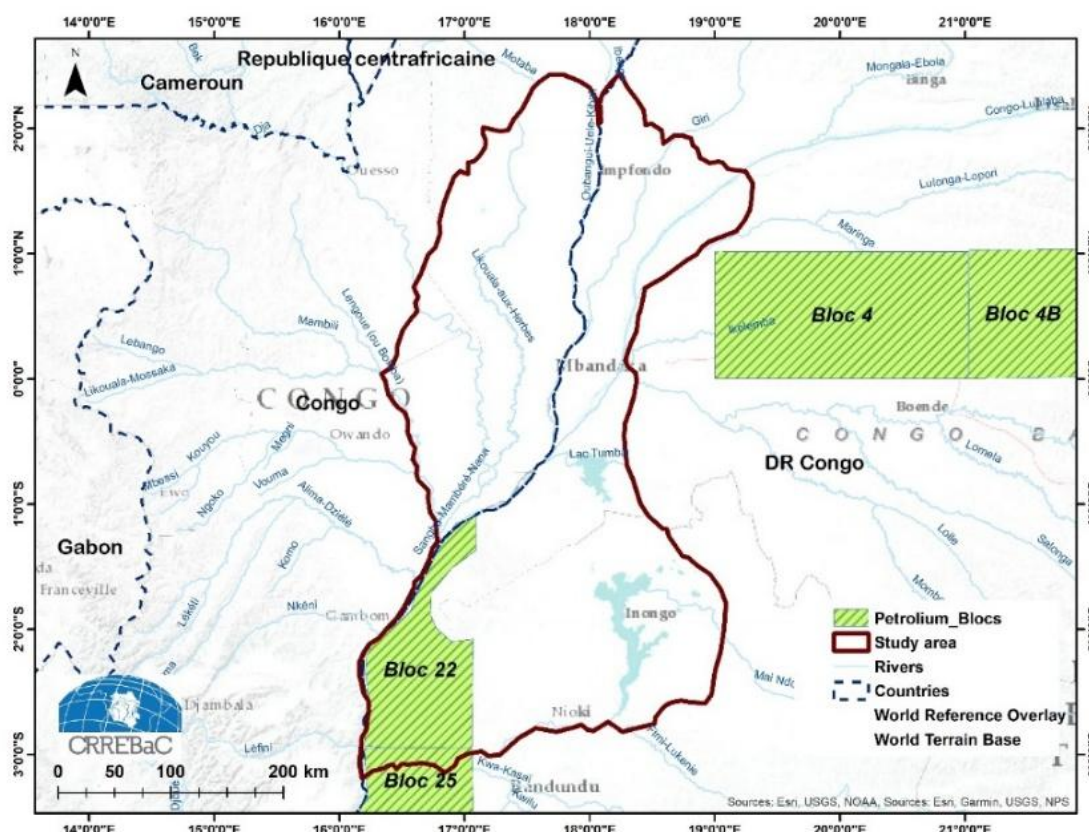


Figure 2-5 Blocs pétroliers dans la zone du projet en RDC

Développement minier : En outre, la présence de **sites miniers riches en fer, cuivre et minéraux associés, or, diamants, calcaire, kaolin, argile, granit, niobium et ocre** pourrait entraîner une exploration et un drainage supplémentaires des tourbières.

Pêche à grande échelle à Mai-Ndombe : le projet vise à stimuler la pisciculture dans la province de Mai-Ndombe en augmentant la production et en améliorant l'accès au marché, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire et à la conservation des espèces de poissons locales. Il introduira des innovations en matière d'aquaculture adaptées à l'environnement, aux traditions et à la capacité des pêcheurs de la région à adopter de nouvelles techniques de manière responsable, garantissant ainsi la protection de la biodiversité pour les générations futures.

La base opérationnelle sera située à Inongo, sur le lac Mai-Ndombe, et les activités s'étendront sur trois zones d'intervention le long des fleuves Lokoro et Lutoyi, ainsi que sur le lac lui-même. Les résultats attendus comprennent la création d'une éclosierie à Inongo, d'une installation de production d'aliments pour animaux, de cages flottantes dans divers plans d'eau, l'amélioration des sites de débarquement, la production de 200 000 alevins par cycle, 240 tonnes de poissons par an et des intrants pour la transformation des produits de la pêche.

Développement agricole à petite et grande échelle : Le paysage abrite plus de deux millions de personnes, dont près de la moitié vit dans la ville de Mbandaka, au nord, et le reste dans des villes plus petites (Lukolela, Makanza, Bikoro, Bomongo, Inongo, Kwamouth, Bolobo, etc.) et des villages situés le long des rivières et des lacs. L'agriculture, tout comme la pêche, la chasse et la collecte de produits forestiers non ligneux (PFNL), est l'une des principales sources de revenus des communautés rurales. Les types de développement agricole comprennent :

- Cultures vivrières : riz, maïs, manioc, légumes, bétail et poisson
- Fruits : ananas, bananes, agrumes, mangues, etc.

- Cultures commerciales : café robusta, cacao, palmier à huile, caoutchouc, coton

Le développement de la riziculture peut avoir des effets cumulatifs sur la saturation des tourbières, les inondations et le drainage. En outre, la présence de grandes entreprises agro-industrielles dans le secteur de l'huile de palme dans la région pourrait avoir des implications importantes pour le paysage. D'autres types d'interventions potentielles comprennent :

- Relance des secteurs abandonnés : caoutchouc (hévéa), café, cacao
- Développement de la riziculture
- Industrie pharmaceutique et cosmétique utilisant des plantes à forte valeur ajoutée
- Zones économiques spéciales (ZES)
- Activités agro-pastorales

Développement des zones d'habitation : développement du corridor fluvial de Kisangani via Lisala-Mbandaka jusqu'à Lukulola, y compris les centres urbains situés le long du corridor fluvial, dans le cadre des plans plus larges de développement des infrastructures visant à relier l'Afrique centrale.

Exploitation forestière : la province de Mai-Ntombe dispose d'importantes réserves forestières avec des essences de bois de haute qualité (wengé, tola, bokungu, kambala, etc.). En raison de son potentiel forestier, l'industrie du bois et l'industrie pharmaceutique pourraient se développer davantage dans la région. L'exploitation forestière (coupe de bois) ne crée pas de richesse locale, mais profite plutôt à des intérêts étrangers. En fin de compte, les concessions forestières peuvent modifier le régime hydrologique, le couvert végétal et la faune sauvage. Une exploitation incontrôlée pourrait avoir des impacts graves et cumulatifs sur toutes les dimensions écologiques.

Les feux de brousse saisonniers : ils ont été identifiés comme l'une des principales menaces environnementales dans cette région, particulièrement dangereux lorsque les tourbières subissent un assèchement saisonnier. La tourbe sèche devient hautement inflammable et les incendies peuvent se propager sous terre, provoquant une combustion lente de la matière organique, libérant de grandes quantités de carbone dans l'atmosphère et entraînant des transformations irréversibles du sol. Ces feux de tourbe sont extrêmement difficiles à contrôler et peuvent persister pendant des jours, voire des semaines. Ils réduisent également la biodiversité locale, détruisent les habitats de nombreuses espèces et compromettent la capacité naturelle des tourbières à stocker le carbone. Enfin, la littérature souligne que la fréquence des incendies augmente généralement après les périodes de sécheresse, révélant une forte interaction entre les événements extrêmes : l'assèchement prépare le terrain, puis les incendies amplifient la dégradation écologique.



Burning is used as land-clearing method for agriculture near Yangambi, Democratic Republic of Congo. Axel Fassio, CIFOR

Les infrastructures hydrologiques à grande échelle, susceptibles de modifier considérablement l'hydrologie des tourbières, notamment :

- La construction de barrages en amont et la proximité de plusieurs sites présentant un potentiel hydroélectrique, notamment les sites de Zongo et Mobayi-Mbongo actuellement en exploitation.

Le projet de transfert d'eau entre le fleuve Congo et le lac Tchad est une initiative à grande échelle visant à lutter contre la pénurie d'eau et la dégradation de l'environnement dans le bassin du lac Tchad. Le projet prévoit de détourner une partie de l'eau du système fluvial du Congo, l'une des plus grandes sources d'eau douce au monde, grâce à un réseau de canaux et de stations de pompage afin de remplir le lac Tchad, qui s'est considérablement réduit au cours des dernières décennies en raison du changement climatique et de la surexploitation. L'objectif est de rétablir l'équilibre écologique, de soutenir l'agriculture et les moyens de subsistance, et de renforcer la stabilité régionale en Afrique centrale et occidentale. Cependant, le projet implique des considérations environnementales, techniques et géopolitiques complexes.

2.4 Traduction des interventions en scénarios

Au cours du processus de consultation, il a été noté que, bien que bon nombre des interventions identifiées puissent avoir des impacts significatifs sur l'hydrologie des tourbières, l'exploration de ces scénarios était fortement limitée par le manque de données in situ sur l'hydrologie de la Cuvette centrale. Compte tenu des incertitudes liées à bon nombre de ces interventions à grande échelle (par exemple, les barrages en amont, l'exploration pétrolière à grande échelle), cette étude se concentre sur l'impact direct des interventions à petite échelle qui sont facilement quantifiables et reproductibles dans toute la zone du projet.

En conséquence, les scénarios de développement étudiés en détail sont des interventions locales à petite échelle qui se déroulent dans le cadre du projet dans la Cuvette centrale.

En général, toute intervention à grande échelle qui modifie de manière significative l'hydrologie des tourbières en changeant les régimes hydrologiques, en créant des réservoirs d'eau en amont ou en transférant de l'eau à l'extérieur du bassin aura un impact négatif sur les tourbières si elle entraîne une baisse, même saisonnière, du niveau de la nappe phréatique.

2.4.1 Interventions à petite échelle ayant des impacts locaux

Tous les scénarios de développement identifiés par les parties prenantes à Brazzaville ont été analysés et classés en types d'interventions pouvant être modélisés lors d'un processus de consultation participative. Les mêmes catégories d'interventions sont pertinentes pour les scénarios identifiés en République démocratique du Congo par le CRREBaC et pouvant être modélisés dans un dôme de tourbe.

Table 2-1 Aperçu des catégories d'interventions élaborées à Brazzaville en mars 2025 avec les parties prenantes.

Thème	SC#	Nom du scénario	Type d'intervention						
			1	2	3	4	5	6	7
			Remblais de terre	Drainage	Abaissement du niveau de l'eau	Pas de végétation	Nouvelle végétation	Retenue d'eau	Change du régime
Groupe 1	1	Route Epena-Mboua- Pokola	X			X			
Groupe 1	2	Route Pokola- Eyino-Bouanela	X			X			
Groupe 2	3	Projet Paysage Forestier Nord Congo (PPFNC)					X		
Groupe 2	4	Proclimat					X		
Groupe 2	5	Projet Agroforesterie Nord Congo (PANC)					X		
Groupe 4	6	Mauvaises techniques de Pêche						(x)	(x)
Groupe 4	7	Contstruction des barrages hydroélectrique				X			(x)
Groupe 4	8	Construction des forages d'eau							
Groupe 4	9	Projet NGOKI				X	X		
Groupe 5	10	Extensions des plantations agricoles (Plantation de Cacao et du palmier à huile)					X		
Groupe 5	11	Développement de Eco-tourisme							
Groupe 5	12	Exploitation de la tourbe							
Groupe 5	13	Renforcement du cadre juridique, institutionnel et legal							
Groupe 6	14	Zone Economique Special	X				X		X

Figure 2-6 Aperçu des scénarios identifiés par le CREBBaC pour la RDC

Catégorie	Types d'interventions	Scenarios d'Impacts							
		Programme	Niveau de saturation des Tourbières	Mode d'inondation des Tourbières	Drainage et Assèchement des Tourbières	Qualité d'eau	Sédimentation et minéralisation	Végétation des Tourbières	Faune des Tourbières
Agro-industrie	Relance des filières abandonnées (hévéa, café, cacao)	PDI				x			
	Développement de la riziculture	PDI	x	x	x				
	Pêche industriel (conserverie, transformation)	PDI							
	Industrie pharmaceutique et cosmétique avec plantes à valeur ajoutée	PDI						x	
	Zone Economique Spéciale	PDI	x	x	x	x			
	Agropastoral				x	x			
Industrie du bois	Concession forestière	Privés	x	x	x	x		x	x
	Exploitation forestière	Non contrôlée	x	x	x	x	x	x	x
Transport, communication et infrastructure	Construction chantiers navales: SCPT, entreprises privées;	PNUD	x	x	x		x	x	x
	Réhabiliter 354 km des routes de dessertes agricole, entretenir 1176 km et construire 15 ouvrages d'art (pont, ponceaux et dalots)	PDL 145	x	x	x	x	x	x	x
	Aménagement de dix ports	PDL 146	x	x	x				x
	Implantation de la dorsale à fibre optique	PDL 147	x						
Eau et Energie	Développement des centrales à biomasse et des centrales solaires	PNUD, KOICA							

	Vingt mini-centrales solaires en cours de de construction pour améliorer l'accès à l'électricité et 26 km d'artères seront éclairés (Equateurs)	PDI							
	Pico et micro barrages	PDI			-				
	158 forages avec pompes intégrées, 23 sources d'eau aménagées	PDL 145			-				
	Transfert d'eau vers le lac Chad	Transaqua	x	x	-	x	x	x	x
	Construction barrage de Palambo (RCA)	RCA	x	x	-	x	x	x	x
	Construction barrage de Cholet (Cameroun)	Gouv. Camerounais	x	x		x	x	x	x
Mines	Exploitation du fer, cuivre et minéraux associés, or, diamant, calcaire, kaolin, argile, granite, niobium, ocre	PDI	x		x	x	x	x	x
	Exploitation blocs pétroliers et gaziers	PDI	x		x	x	x	x	x
Chaines de valeurs et artisanat	Structuration de 500 ménages de producteurs par territoire	PDL 145							
	Pisciculture en cage flottantes (écloserie, proveniendie, points de débarquement, entrepôts):	ERA Congo							
	*Axe 1: Nkolobeke-Lokolama sur la rivière Iokoro;								
	*Axe 2: Nkolobeke- Ndongese-Kiri sur la rivière Lutoyi;								
	*Axe 3: Inongo-Kutu et hinterland, sur le lac Mai-Ndombe,	PDI							
	Les petites et moyennes entreprises de transformation et de conservation (Huileries, Brasserie, Distilleries, Savonneries, Boulangeries, Pêcheries et conserveries, Charbonneries, Fabrique de pirogues et hors-bords, Extraction des moellons et du sable								

Sept types d'interventions ont été définis à l'issue de la consultation des parties prenantes et sont examinés dans cette étude sous forme de scénarios. Les interventions de développement généralisées sont énumérées ci-dessous et présentées plus en détail au chapitre 4.

- A. Référence sans intervention
- B. Route construite et opérationnelle
- C. Route en cours de construction
- D. Lotissements développés
- E. Incendie de forêt - Déforestation
- F. Plantation de palmiers remplaçant la forêt
- G. Culture du riz remplaçant la forêt

Un résumé des impacts de ces scénarios est présenté au chapitre 5 du présent rapport. Pour un aperçu complet des résultats, veuillez consulter le rapport technique du modèle ou l'outil HDSS.

3 Méthodologie d'évaluation et définitions des scénarios

La méthodologie d'évaluation a pour objectif d'évaluer comment différentes interventions de développement et différents scénarios de changement climatique affectent l'évolution du stock de carbone dans les sols des tourbières. Pour ce faire, l'approche intègre deux modèles complémentaires : un modèle hydrologique et un modèle de cycle de carbone. Bien que les deux modèles génèrent des résultats pour un large éventail de variables d'état, l'accent est mis sur les indicateurs qui reflètent les changements dans la profondeur de la nappe phréatique, l'oxygénation des sols et les flux de carbone. Le couplage de l'hydrologie et du cycle de carbone est essentiel, car la décomposition de la tourbe et les flux de carbone sont fortement influencés par la saturation du sol.

Ce chapitre résume la méthodologie d'évaluation utilisée pour obtenir les résultats de l'étude. Pour un aperçu complet de la méthodologie utilisée pour développer le modèle hydrologique et le modèle de biodégradation, veuillez consulter le rapport technique sur les modèles.

3.1 Méthodologie d'évaluation

La méthodologie d'évaluation est conçue pour évaluer les impacts des interventions de développement et des scénarios de changement climatique sur les émissions de carbone des tourbières du bassin du Congo. Cette évaluation est réalisée à l'aide de deux modèles :

1. Un **modèle hydrologique** qui simule le cycle hydrologique, y compris la dynamique de l'eau dans les différentes couches solides des tourbières
2. Un **modèle de production et dégradation de la tourbe**, qui estime l'évolution du stock de carbone dans le sol en fonction de l'état hydrologique des tourbières

Les émissions de carbone dans les tourbières sont très sensibles aux conditions hydrologiques, en particulier au niveau des nappes phréatiques et à la saturation du sol. Par conséquent, une simulation précise de ces conditions hydrologiques est indispensable pour évaluer la biodégradation et les flux de carbone associés.

Le modèle de cycle du carbone utilisé est un modèle heuristique, ce qui signifie qu'il applique des règles et des relations simplifiées pour approximer des processus biologiques complexes. Bien qu'il ne soit pas mécaniste, il permet de saisir efficacement le lien essentiel entre la dynamique de la nappe phréatique et la décomposition de la tourbe, ce qui permet de comparer, à partir de scénarios, les stocks de carbone dans le sol dans des conditions de développement et climatiques variables.

3.1.1 Modèle hydrologique

Le modèle hydrologique constitue la colonne vertébrale du cadre d'évaluation des scénarios et est mis en œuvre à l'aide de l'outil de modélisation MIKE SHE. Il simule le cycle hydrologique terrestre complet, ce qui est essentiel pour comprendre la dynamique de l'eau qui régit la stabilité des tourbières et l'évolution du stock de carbone dans le sol.

Le modèle intègre les processus clés suivants :

- Précipitations : apport d'eau provenant des pluies, qui déclenche le cycle hydrologique.
- Évapotranspiration : perte d'eau par évaporation du sol et transpiration de la végétation, influencée par le climat et le type de végétation.
- Infiltration : mouvement de l'eau de la surface vers le sol et les couches de tourbe.

- Écoulement souterrain : mouvement souterrain de l'eau à travers la zone saturée, essentiel au maintien des nappes phréatiques des tourbières.
- Écoulement superficiel : ruissellement de surface généré lors des précipitations, en particulier dans les zones à faible capacité d'infiltration.
- Interactions fluviales : échange d'eau entre les tourbières et les cours d'eau adjacents, qui peut recharger ou drainer le système tourbeux en fonction des niveaux d'eau.

Deux régimes hydrologiques distincts sont modélisés pour refléter la diversité des types de tourbières dans le bassin du Congo :

1. Tourbières **pluviales** – On les trouve principalement en République du Congo, où les processus hydrologiques pertinents sont dominés par les précipitations directes et l'évapotranspiration. Dans ces tourbières, il n'y a pas de grands cours d'eau dont les fluctuations importantes du niveau d'eau pourraient affecter de manière significative les niveaux des eaux souterraines. On peut supposer que les niveaux des eaux souterraines dans ces régions sont plutôt constants. Les conditions aux limites sont définies en conséquence.
2. Tourbières **alimentées par les rivières** – Elles se trouvent principalement en République démocratique du Congo, où les processus hydrologiques pertinents sont déterminés non seulement par les précipitations et l'évapotranspiration, mais aussi par les fluctuations du niveau d'eau des rivières adjacentes. Ces zones sont modélisées avec des conditions aux limites dynamiques, ce qui permet aux niveaux des eaux souterraines de fluctuer en fonction des variations du niveau des rivières.

Cette approche de modélisation hydrologique permet de simuler les variations saisonnières et spatiales de la profondeur de la nappe phréatique, qui est un facteur déterminant de la vulnérabilité des tourbières. Une baisse du niveau de la nappe phréatique augmente les conditions oxygénées dans le sol, accélérant la décomposition de la tourbe et les émissions de dioxyde de carbone.

En représentant avec précision le cycle hydrologique, le modèle fournit les données nécessaires au modèle de biodégradation, garantissant ainsi que les estimations du flux de carbone sont fondées sur une dynamique hydrologique réaliste.

3.1.2 Modèle d'accumulation et de dégradation du carbone

Le modèle de biodégradation est un modèle heuristique conçu pour estimer l'accumulation et la biodégradation du carbone dans les tourbières de la Cuvette Centrale. Il s'agit d'une approche simplifiée qui rend compte des relations clés entre les conditions hydrologiques et les flux de carbone.

Ses principales caractéristiques sont les suivantes

- Différenciation entre les zones oxygénées et anoxiques du sol
- Taux de décomposition des matières organiques labiles et récalcitrantes
- Taux de décomposition modifiés en fonction de la température sur la base de scénarios climatiques
- Hypothèses statiques pour le stockage du carbone et l'affaissement du sol

Le modèle est couplé au modèle hydrologique, car la biodégradation dans les tourbières dépend fortement de la profondeur de la nappe phréatique. Une nappe phréatique plus basse augmente les conditions oxygénées, accélérant la décomposition et la modification du stock de carbone dans le sol. Ce couplage est essentiel pour simuler de manière réaliste les impacts du développement et du changement climatique sur la dynamique du carbone.

3.2 Définitions des scénarios

Les scénarios sont des représentations de réponses à des questions du type « Que se passe-t-il si... ? ». Des modèles sont développés pour chaque scénario. Ceux-ci représentent les questions. Les résultats de simulation respectifs des modèles représentent la réponse à la question.

La partie « si » de la question qui définit un scénario comporte les aspects suivants :

- **Intervention de développement** : que se passe-t-il si des infrastructures sont développées, ou que se passe-t-il dans des conditions de développement agricole ? Les interventions de développement étudiées dans les analyses sont issues de consultations avec les parties prenantes.
- **Climat** : que se passe-t-il dans les conditions climatiques actuelles et dans des conditions spécifiques de changement climatique ?
- **Régime hydrologique** : Les processus hydrologiques dans les tourbières sont-ils uniquement déterminés par les précipitations et l'évapotranspiration ? Ou bien sont-ils également influencés par les fluctuations du niveau d'eau dans les cours d'eau limitrophes (par exemple, les tronçons fluviaux), comme c'est le cas dans les zones centrales adjacentes aux principaux cours d'eau de la région ?

3.2.1 Interventions de développement

Les interventions de développement généralisées issues des consultations des parties prenantes sont les suivantes :

Table 3-1 Aperçu des interventions de développement

Code	Nom	Description
A	Situation de référence sans intervention	La végétation et la topographie des tourbières sont conformes aux conditions actuelles - entre 2010 et 2020.
B	Route construite et opérationnelle	(a) Une route imperméable surélevée d'une largeur de 80 m est construite à 1 mètre au-dessus de la surface naturelle. Elle est finalisée et opérationnelle. (b) La végétation est enlevée et la surface du sol est aplanie. (c) Le remblai de la route est rempli de gravier perméable. (d) La tourbe sous-jacente est comprimée par le poids de la route.
C	Route en cours de construction	(a) Une route imperméable surélevée d'une largeur de 80 m est construite à 1 mètre au-dessus de la surface naturelle. (b) La végétation est enlevée et la surface du sol est aplanie. (c) Le remblai de la route est rempli de gravier perméable. (d) La tourbe sous-jacente est comprimée par le poids de la route. (e) Pendant la construction, un système de drainage est installé à 2 mètres sous le sol, c'est-à-dire à 1 mètre sous la surface environnante.
D	Urbanisation	(a) Une agglomération est mise en place dans la tourbière boisée. (b) La topographie est surélevée de 50 cm pour éviter les inondations. (c) La végétation est éliminée et la surface du sol est partiellement pavée. (d) La tourbe est comprimée sous la charge des bâtiments.
E	Incendie de forêt – Déforestation	(a) Un feu de forêt élimine complètement la végétation. Il en va de même pour la déforestation. (b) En conséquence, les propriétés du sol changent : la densité apparente augmente et le rendement spécifique diminue.
F	Une plantation de palmiers remplace la forêt	Déforestation et conversion en plantations de palmiers à huile : (a) La végétation naturelle est déboisée pour créer de nouvelles plantations de palmiers à huile. (b) Les palmiers à huile prospèrent lorsque le niveau moyen de l'eau se situe entre 40 et 60 cm sous le sol. Il y a un drainage à

Code	Nom	Description
		50 cm de profondeur. (c) Les propriétés de la végétation sont modifiées pour simuler une plantation mature de palmiers à huile âgée de 15 ans. (d) La microtopographie est lissée par le défrichement. (e) Les propriétés du sol sont modifiées par le drainage : augmentation de la densité apparente, baisse du rendement spécifique et baisse de la conductivité hydraulique à saturation. (f) La topographie est abaissée de 50 cm en raison de la subsidence du sol induite par le drainage.
G	Une rizière remplace la forêt	Déforestation et conversion à la culture du riz : (a) La végétation naturelle est éliminée et remplacée par des rizières. Le riz est la culture saisonnière inondée la plus commune dans la Cuvette Centrale. (b) Il y a deux récoltes par an. Les rizières sont inondées pendant la saison humide. (c) Les propriétés de la végétation et de la surface varient en fonction du stade de la culture.

3.2.2 Scénarios climatiques

Les scénarios de changement climatique du sixième rapport d'évaluation (AR6) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (GIEC, 2021) ont été utilisés pour évaluer l'impact du changement climatique. Les résultats du GIEC AR6 s'appuient sur le projet CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), dans le cadre duquel plusieurs groupes de modélisation climatique à travers le monde utilisent des modèles climatiques globaux (MCG) avec des paramètres d'entrée convenus pour simuler différents scénarios.

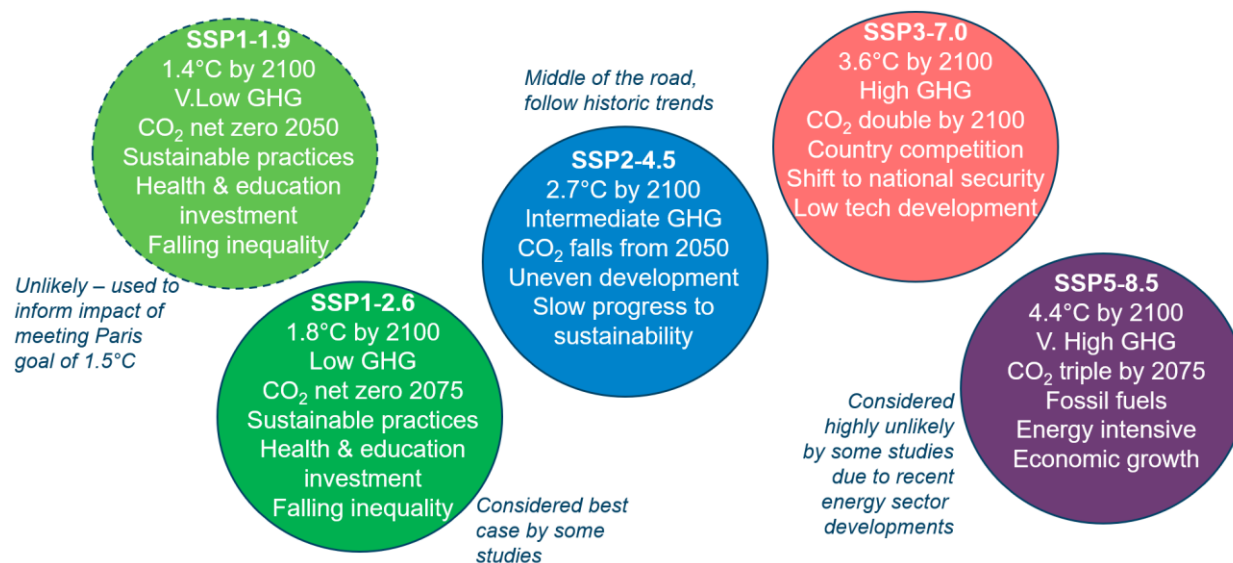


Figure 3-1 Résumé des cinq scénarios d'émissions qui alimentent le dernier rapport du GIEC AR6

Parmi les scénarios d'émissions du rapport AR6 du GIEC, nous avons choisi les suivants pour définir nos scénarios :

Table 3-2 Aperçu des scénarios de changement climatique

Code	Nom	Description
1	Climat actuel	Les précipitations, la température et l'évapotranspiration entre 2010 et 2020 sont choisies pour représenter les conditions climatiques actuelles
2	CC Croissance durable	SSP1-2.6 : (a) Le réchauffement de la planète est limité à environ 1,5°C-2°C par rapport aux niveaux préindustriels. (b) Ce scénario s'aligne sur les objectifs de l'Accord de Paris et représente un avenir optimiste avec une croissance économique durable et un impact minimal sur le changement climatique.
3	CC Impact grave	SSP3-7.0 : (a) Réchauffement prévu : 3°C-4°C d'ici 2100, entraînant de graves conséquences climatiques. (b) Ce scénario représente un avenir à haut risque, caractérisé par un changement climatique important, des inégalités sociales et une dégradation de l'environnement.

Les climats sont représentés par des séries chronologiques de précipitations et d'évapotranspiration utilisées comme forçages pour le modèle hydrologique. L'effet du changement de température prévu est inclus indirectement comme entrée pour l'évapotranspiration de référence prévue et directement comme paramètre de modification de la température dans le modèle de biodégradation. La période de projection correspond au climat futur, et nous avons choisi la période 2041-2060 (20 ans) avec l'année centrale en 2050. La période de référence du modèle climatique est 1990-2014 (25 ans) et celle de notre modèle est 2012-2019 (7 ans).

3.2.3 Régions hydrologiques

Les régions hydrologiques suivantes font partie de la définition du scénario :

Table 3-3 Aperçu des régions hydrologiques

Code	Nom	Description
1	Tourbières pluviales	Précipitations et évapotranspiration uniquement : Les processus hydrologiques dans les tourbières sont régis par les précipitations et l'évapotranspiration. C'est principalement le cas dans les dômes interfluviaux, principalement situés en République du Congo.
2	Tourbières fluviale	Précipitations et évapotranspiration plus niveaux d'eau des cours d'eau : Les processus hydrologiques dans les tourbières sont déterminés par les précipitations et l'évapotranspiration, ainsi que par les fluctuations des niveaux d'eau dans les masses d'eau limitrophes (par exemple, les tronçons fluviaux). C'est principalement le cas dans les parties centrales, qui sont adjacentes aux principales rivières de la région.

Les régions hydrologiques sont représentées dans les modèles sous forme de conditions aux limites du modèle : dans la configuration basée sur les précipitations, les limites ouest et est ont un niveau constant fixé au niveau de la surface. Ces niveaux d'eau fluctuent dans les modèles alimentés par les cours d'eau. Les conditions aux limites sont des facteurs déterminants du modèle, tout comme les facteurs déterminants du modèle climatique.

3.3 Indicateurs à des fins d'évaluation

Derrière chaque définition de scénario se cache un modèle complet avec ses paramètres d'entrée et ses résultats de simulation. Les deux modèles génèrent un large éventail de variables d'état hydrologiques et écologiques.

L'évaluation des scénarios utilise des indicateurs dérivés des résultats détaillés de la simulation. Les indicateurs suivants sont définis afin de permettre une évaluation simplifiée des scénarios et des comparaisons :

À des fins d'évaluation et de comparaison des scénarios, ces variables d'état - avec des variations spatiales et temporelles - sont agrégées comme suit :

- **Profondeur de la nappe phréatique (GWT)** : profondeur moyenne de la nappe phréatique sous le sol à l'intérieur de l'empreinte d'une intervention et dans une zone adjacente à l'extérieur de l'empreinte
- **Profondeur oxygénée** : profondeur moyenne de la couche de sol oxygénée à l'intérieur de l'empreinte d'une intervention et dans une zone adjacente à l'extérieur de l'empreinte
- **Flux de carbone** : variation du stock de carbone en kg/m²/an à l'intérieur de la zone d'intervention et dans une zone adjacente à l'extérieur de la zone d'intervention

Ces indicateurs sont utilisés pour évaluer et comparer les scénarios.

Nom	Description de l'indicateur
Flux de carbone à l'intérieur	Evolution du stock de carbone en kg par m ² par an à l'intérieur de l'empreinte de l'intervention
Flux de carbone en dehors	Evolution du stock de carbone en kg par m ² par an en dehors de l'empreinte de l'intervention
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	Profondeur moyenne d'oxygène à l'intérieur de l'empreinte de l'intervention : Profondeur du sol où l'oxygène est encore présent, ce qui affecte le cycle des nutriments, c'est-à-dire les transformations du carbone. Cela influence le taux de décomposition de la matière organique et donc la séquestration du carbone.
Profondeur d'oxydation en dehors	Profondeur moyenne d'oxygène en dehors de l'empreinte de l'intervention : Profondeur du sol où l'oxygène est encore présent, ce qui affecte le cycle des nutriments, c'est-à-dire les transformations du carbone. Cela influence le taux de décomposition de la matière organique et donc la séquestration du carbone.
Profondeur de la nappe phréatique à l'intérieur	Profondeur moyenne de la nappe phréatique à l'intérieur de l'empreinte de l'intervention - en mètres sous la surface
Profondeur de la nappe phréatique en dehors	Profondeur moyenne de la nappe phréatique en dehors de l'empreinte de l'intervention - en mètres sous la surface

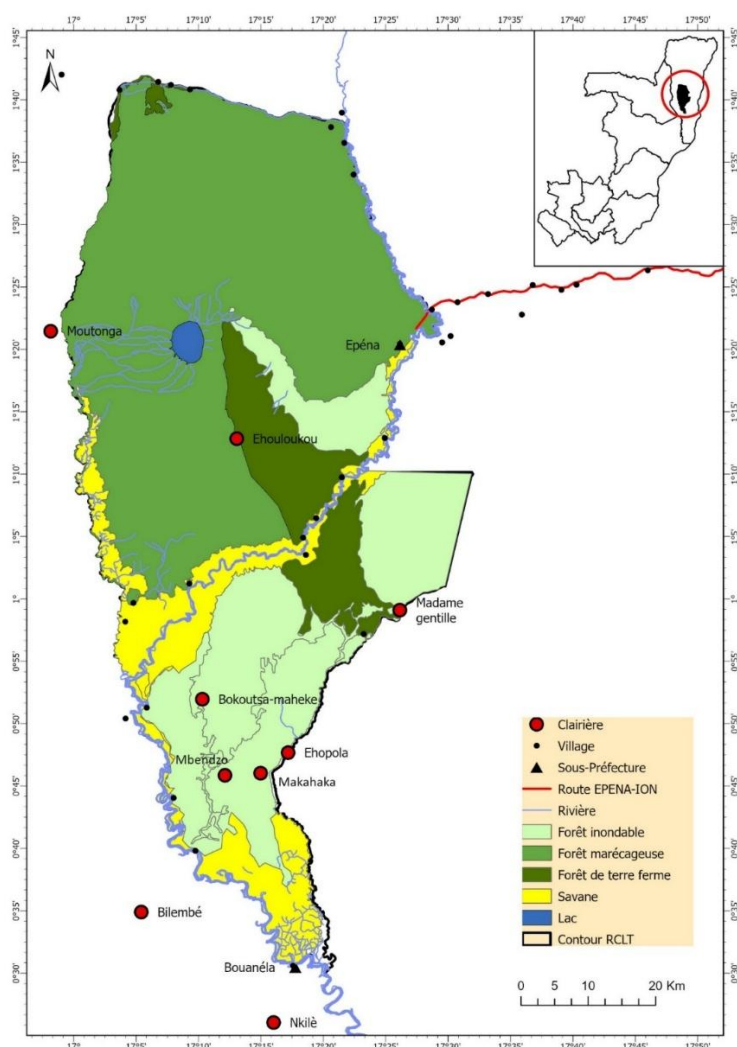


Figure 3-2 Carte de la réserve communautaire du lac Télé, montrant les différents types de paysages – le vert clair et le vert moyen indiquent la plaine inondable forestière et la forêt marécageuse où se trouvent les tourbières (WCS 2025).

4 Résumé des résultats

Pour un aperçu complet de tous les résultats de la modélisation, veuillez consulter le rapport technique sur la modélisation.

4.1 Pour les tourbières pluviales

Les niveaux d'eau et les flux de carbone dans la zone modélisée ont été analysés pour différentes interventions. La zone modélisée est hydrologiquement hétérogène, avec un centre plat en forme de dôme tourbeux qui est presque en permanence gorgé d'eau et des zones périphériques assez escarpées où les niveaux d'eau sont profonds. La période de simulation de 7 ans comprend à la fois des années humides et des années sèches, ce qui permet d'évaluer les effets des interventions dans différentes conditions climatiques. Pendant les périodes sèches, les nappes phréatiques profondes et les zones oxygénées aux limites ouest et est de la zone modélisée entraînent une dégradation importante de la tourbe. Dans le scénario de référence, la dégradation de la tourbe au centre du dôme est faible car la nappe phréatique se trouve principalement au-dessus du sol et la profondeur oxygénée est donc très faible.

Les interventions modélisées modifient la topographie, les propriétés hydrauliques de la tourbe, la végétation et l'utilisation des terres. Ces changements sont représentés par une bande horizontale de 240 m de large s'étendant sur toute la longueur de la zone modélisée. Les impacts hydrologiques et les émissions de carbone des interventions sont évalués à l'intérieur et autour de l'empreinte de l'intervention. Les valeurs des indicateurs sont résumées dans le tableau ci-dessous. Les valeurs surlignées en rouge et en vert indiquent respectivement des pertes de carbone dans le sol élevées et faibles.

Tableau 4-1 Résumé des valeurs des indicateurs pour les scénarios de tourbières pluviales

Nom abrégé de l'indicateur	Unité	Valeurs des indicateurs pour les scénarios						
		A.1.1	B.1.1	C.1.1	D.1.1	E.1.1	F.1.1	G.1.1
Flux de carbone à l'intérieur	m	0,20	0,92	2,12	0,37	0,18	0,73	0,14
Flux de carbone en dehors	m	0,15	1,06	2,00	0,40	0,14	0,73	0,10
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	kg/m ² /an	-4,72	0	0,00	-8,77	-4,67	-15,64	-3,77
Profondeur d'oxydation en dehors	m	0,20	0,13	0,68	0,16	0,20	0,77	0,20
Profondeur de la nappe phréatique à l'intérieur	m	0,15	0,05	0,68	0,10	0,16	0,79	0,15
Profondeur de la nappe phréatique en dehors	kg/m ² /an	-4,72	-2,90	-14,26	-3,80	-4,78	-15,01	-4,70

Les changements topographiques ont une incidence significative sur les niveaux d'eau, avec des répercussions qui s'étendent au-delà de l'empreinte de l'intervention. Cela est particulièrement évident dans les scénarios de route, d'urbanisation et de palmiers à huile. Le sol est surélevé de 1 m dans le scénario de route (B.1.1) et de 50 cm dans le scénario d'urbanisation (D.1.1), ce qui entraîne une élévation des niveaux d'eau, mais aussi un abaissement des nappes phréatiques dans l'empreinte. Les niveaux d'eau augmentent également fortement en dehors de la zone d'intervention, bien que les effets diminuent avec la distance par rapport à l'empreinte. Dans le scénario palmiers à huile (F.1.1), un affaissement du sol de 50 cm résultant de l'oxydation de la tourbe a été pris en compte. L'affaissement entraîne une augmentation substantielle de la profondeur de la nappe phréatique à l'intérieur et autour de l'empreinte, ce qui se traduit par des pertes de carbone plus importantes. Dans ce cas,

l'affaissement se produit parallèlement au drainage, et ces deux processus combinés entraînent une baisse de la nappe phréatique.

Le drainage a un impact important sur les niveaux d'eau et donc sur les stocks de carbone dans le sol, comme l'illustrent les scénarios de la route drainée et de la palmeraie à huile. Dans le scénario de la route drainée (C.1.1), le sol est drainé à 2 m sous terre, tandis que dans le scénario de la palmeraie à huile (F.1.1), le drainage se fait à 50 cm sous terre. Comme toute l'eau au-dessus du niveau de drainage est évacuée, la profondeur de la nappe phréatique augmente fortement dans l'empreinte. Il en résulte des pertes de carbone plus importantes dans la plantation de palmiers à huile. Cela diffère du cas de la route drainée, où le gravier - et non la tourbe - constitue le sol au-dessus du drain. Le drainage entraîne également une baisse prononcée du niveau de la nappe en dehors de la zone d'intervention, ce qui conduit à une décomposition importante de la tourbe dans toute la zone modélisée.

Les changements dans les propriétés du sol et la végétation ont une incidence moindre sur les niveaux d'eau, et généralement uniquement dans la zone d'intervention. L'évapotranspiration réelle est réduite dans la zone touchée par les incendies (E.1.1) et dans les rizières (G.1.1), ce qui entraîne une élévation du niveau des eaux souterraines. Ces effets sont perceptibles près des limites, où le niveau de la nappe est profond, mais pas au centre du dôme, où les niveaux d'eau sont supérieurs au niveau du sol et où l'évaporation se produit à partir de l'eau stagnante. Le compactage de la tourbe (B.1.1, C.1.1, D.1.1), la combustion (E.1.1) et l'oxydation (F.1.1) ont été représentés dans les modèles par une diminution de la porosité, de la perméabilité et/ou de la capacité de stockage de l'eau du sol. L'impact le plus évident de ces changements a été une plus grande fluctuation des niveaux de la nappe phréatique et un approfondissement de celle-ci pendant les saisons sèches. Dans le scénario d'incendie (E.1.1), qui combine des changements dans les propriétés du sol et la végétation, les flux de carbone sont similaires à ceux du scénario de référence à l'intérieur et à l'extérieur de l'empreinte.

L'artificialisation des sols et les changements de végétation entraînent une baisse de l'absorption de carbone par la végétation, ce qui se traduit par un flux net de carbone plus élevé lorsque la décomposition de la tourbe reste constante. Cela signifie que des niveaux d'eau moins profonds ne se traduisent pas nécessairement par un flux net de carbone plus faible si les avantages hydrologiques sont compensés par une baisse de la production de litière. Cette situation se produit dans le scénario d'intervention incendie (E.1.1), où la variation du stock de carbone dans le sol est comparable à celle du scénario de référence malgré des niveaux d'eau moyens plus élevés.

Les impacts de chaque intervention diffèrent selon l'emplacement dans la tourbière. Les deux scénarios de drainage (C.1.1 et F.1.1) se caractérisent par une baisse des niveaux d'eau et, par conséquent, par une augmentation des émissions de dioxyde de carbone dans toute la zone modélisée, surtout là où les niveaux d'eau sont élevés, c'est-à-dire près du centre du dôme. Toutes les autres interventions affectent principalement les niveaux d'eau dans les zones limites, où la nappe phréatique est profonde, tandis que les niveaux d'eau au centre du dôme restent pour la plupart au-dessus du sol. Les modèles présentés ici sont configurés comme des dômes avec des pentes raides et des niveaux d'eau limites constants. Cette configuration produit des nappes phréatiques profondes et, par conséquent, des émissions de dioxyde de carbone élevées près des limites. Cependant, les zones basses situées aux bords du dôme sont sujettes aux inondations fluviales. L'analyse de la section suivante se concentrera sur la manière dont les fluctuations des niveaux d'eau aux limites influencent la dynamique des eaux souterraines et les émissions de dioxyde de carbone, tant aux limites que dans l'ensemble du dôme de tourbe.

4.2 Pour les tourbières alimentées par les rivières

Les niveaux d'eau et les flux de carbone dans la zone modélisée ont été analysés pour différentes interventions. La zone modélisée est hétérogène sur le plan hydrologique, avec un centre plat en forme de dôme de tourbe qui est presque en permanence gorgé d'eau et des zones périphériques escarpées qui sont soumises à des crues fluviales annuelles. Les rivières inondent les cellules proches des limites et alimentent l'aquifère. Les émissions de dioxyde de carbone dans la plaine inondable se produisent entre les crues fluviales, lorsque les niveaux d'eau sont inférieurs au niveau du sol.

L'apport fluvial entraîne une élévation soutenue du niveau de la nappe par rapport au scénario de référence basé sur les précipitations, ce qui se traduit par de faibles pertes de carbone dans les zones périphériques. Comme dans le scénario de référence basé sur les précipitations, les pertes de carbone

au centre du dôme sont faibles, car le niveau de la nappe est principalement au-dessus du sol et la profondeur oxygénée est donc très faible. Les pertes de carbone les plus importantes se situent à la périphérie de la zone inondée par les rivières.

Les interventions modélisées modifient la topographie, les propriétés hydrauliques de la tourbe, la végétation et l'utilisation des terres. Ces changements sont représentés par une bande horizontale de 240 m de large s'étendant sur toute la longueur de la zone modélisée. Les impacts hydrologiques et les émissions de carbone des interventions sont évalués à l'intérieur et autour de l'empreinte de l'intervention. Les valeurs des indicateurs sont résumées dans le tableau ci-dessous. Les valeurs surlignées en rouge et en vert indiquent respectivement des pertes de carbone élevées et faibles dans la tourbe.

Table 4-2 Résumé des valeurs des indicateurs pour les scénarios de tourbières influencées par les cours d'eau

Nom abrégé de l'indicateur	Unité	Valeurs des indicateurs pour les scénarios						
		A.1.2	B.1.2	C.1.2	D.1.2	E.1.2	F.1.2	G.1.2
Flux de carbone à l'intérieur	m	0,12	0,89	2,12	0,34	0,12	0,71	0,09
Flux de carbone en dehors	m	0,03	1,03	2,01	0,35	0,03	0,69	0
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	kg/m ² /an	-2,82	0	0	-8,10	-3,17	-14,55	-2,46
Profondeur d'oxydation en dehors	m	0,12	0,07	0,61	0,09	0,12	0,65	0,12
Profondeur de la nappe phréatique à l'intérieur	m	0,03	-0,05	0,59	-0,01	0,03	0,64	0,03
Profondeur de la nappe phréatique en dehors	kg/m ² /an	-2,82	-1,40	-12,88	-2,08	-2,85	-13,53	-2,79

Les flux de carbone à l'intérieur et à l'extérieur de l'empreinte suivent la même tendance par rapport à la référence que dans les scénarios basés sur les précipitations : si les pertes de carbone pour une intervention donnée sont inférieures à la référence dans le cas basé sur les précipitations, elles le sont également dans le cas basé sur l'alimentation fluviale.

Comme dans le cas des tourbières régies par les précipitations, le drainage et les changements topographiques ont un impact significatif sur les niveaux d'eau à l'intérieur et à l'extérieur de l'empreinte, tandis que les changements dans les propriétés du sol et la végétation ont un impact moindre. Étant donné que les résultats en dehors des plaines inondables sont similaires à ceux des scénarios basés sur les précipitations, seule la situation dans les zones inondées par les rivières est décrite ici.

Comme le drainage réduit l'humidité du sol dans la zone non saturée par rapport au scénario de référence alimenté par les cours d'eau, l'infiltration dans la tourbe est plus importante lors des crues fluviales. Les inondations se propagent donc plus lentement, ce qui explique pourquoi la plaine inondable est plus petite dans le scénario de la route drainée (C.1.2) et dans le scénario de la palme à huile (F.1.2) que dans le scénario de référence alimenté par les cours d'eau. Les pertes de carbone dans le sol au sein des plaines inondables sont plus importantes dans les deux scénarios, car les niveaux d'eau sont plus élevés pendant les saisons sèches. Le drainage entraîne donc des pertes de carbone plus importantes dans les zones alimentées par les précipitations et dans celles alimentées par le niveau des cours d'eau.

Les changements topographiques affectent les nappes phréatiques dans la plaine inondable et donc les flux de carbone, principalement de la même manière que dans les zones alimentées par les précipitations. Néanmoins, quelques caractéristiques spécifiques des zones alimentées par les cours d'eau peuvent être soulignées. Dans le scénario route (B.1.2), les pics d'inondation sous la route sont plus faibles et plus étendus, car le niveau de la nappe se trouve sous le sol et la dynamique des eaux souterraines est beaucoup plus lente que l'écoulement de surface. Les pics d'inondation sont également plus étendus sous les zones d'habitation surélevées (D.1.2). Dans le scénario de culture du

palmier à huile (F.1.2), la plaine inondable s'étend davantage sous la plantation en raison de l'affaissement du sol.

Bien que moins importantes que dans les zones pluviales, les modifications des propriétés du sol et de la végétation influencent également les nappes phréatiques et donc les flux de carbone dans la plaine inondable. La microtopographie est lissée dans les scénarios incendie (E.1.2) et riz (G.1.2), ce qui réduit la formation de mares par rapport au scénario de référence alimenté par les cours d'eau et augmente l'écoulement de surface vers les cellules situées plus bas. Ce ruissellement entraîne une baisse plus rapide du niveau de la nappe dans la plaine inondable au début de la saison sèche. Dans le scénario incendie (E.1.2), la baisse du niveau d'eau pendant les périodes sèches peut également s'expliquer en partie par le rendement spécifique plus élevé du sol résultant de la combustion lente de la tourbe.

Les caractéristiques spécifiques des tourbières induites par le niveau d'eau de la rivière mises en évidence ici ne doivent pas masquer le fait que les interventions simulées ont des impacts globalement similaires dans les cas induits par les précipitations et ceux induits par le niveau d'eau de la rivière. Dans l'empreinte, les pertes de carbone du sol augmentent dans les zones d'habitation (D.1.2) et les plantations de palmiers à huile (C.1.2), mais diminuent dans les rizières (G.1.2). En dehors de l'empreinte, les pertes de carbone augmentent pour les scénarios de route drainée (C.1.2) et de palmiers à huile (F.1), tandis qu'elles diminuent pour les scénarios de route (B.1.2) et d'urbanisation (D.1.2). Ces simulations ont été réalisées dans les conditions climatiques actuelles.

La section suivante examine les scénarios de changement climatique afin d'évaluer si les impacts des interventions resteraient similaires à l'avenir.

4.3 Impact du changement climatique

Les niveaux d'eau dans les tourbières devraient baisser dans les scénarios SSP1-2.6 et SSP3-7.0.

Bien que les précipitations devraient augmenter de 1,5 % par an dans le scénario SSP1-2.6, l'augmentation de l'évapotranspiration réelle est plus marquée. Dans le scénario SSP3-7.0, une augmentation substantielle de l'évapotranspiration réelle, associée à une légère diminution des précipitations, entraîne une baisse des niveaux d'eau.

À mesure que les niveaux d'eau baissent sous l'effet du changement climatique, la décomposition de la tourbe s'accélère. Dans les tourbières alimentées par les précipitations, les pertes de carbone du sol devraient augmenter de manière constante dans toute la zone modélisée, les cellules situées près des limites ouest et est restant d'importantes sources de carbone. Dans les tourbières alimentées par les cours d'eau, les pertes de carbone augmentent également dans toute la zone modélisée, tandis que la plaine inondable est plus étroite que dans les conditions climatiques actuelles.

Pour toutes les interventions, à l'exception des interventions relatives à l'urbanisation et aux incendies, les flux de carbone à l'intérieur et à l'extérieur de l'empreinte suivent la même tendance par rapport à la référence dans toutes les conditions climatiques : si les pertes de carbone pour une intervention donnée sont inférieures à la référence dans les conditions climatiques actuelles, elles sont également inférieures dans les scénarios SSP1-2.6 et SSP3-7.0. Dans les scénarios de route (B et C), les flux de carbone provenant des remblais de gravier sont nuls. Cela signifie qu'ils sont inférieurs à la référence dans tous les scénarios climatiques.

Pour l'intervention urbanisation, les pertes de carbone à l'intérieur de l'empreinte sont supérieures à la référence dans les conditions climatiques actuelles et dans le scénario SSP1-2.6, mais inférieures dans le scénario SSP3-7.0. Dans le climat actuel, la nappe phréatique sous l'empreinte est plus profonde que dans les cellules environnantes, car le sol est surélevé. L'évapotranspiration réelle est légèrement réduite par rapport à la zone située en dehors de l'empreinte. Dans le scénario SSP3-7.0, comme l'évapotranspiration réelle dans le scénario de référence est très élevée par rapport à la zone urbanisée, le niveau moyen de la nappe phréatique est moins profond dans l'empreinte de la zone urbanisée que dans le scénario de référence, ce qui entraîne une moindre décomposition de la tourbe.

En ce qui concerne l'intervention feu de brousse, les pertes de carbone dans le sol à l'intérieur de l'empreinte sont inférieures à celles de référence dans les scénarios SSP1-2.6 et SSP3-7.0, contrairement à ce qui se passe dans les conditions climatiques actuelles. Dans les tourbières alimentées par les cours d'eau, les pertes de carbone dans la zone brûlée sont supérieures à celles de référence dans le climat actuel, en raison du lissage du sol, du compactage de la tourbe par le brûlage

et de la baisse de l'absorption de carbone par la végétation brûlée. Dans les tourbières alimentées par les précipitations, les flux de carbone dans la zone brûlée sont similaires à ceux de référence, car les effets susmentionnés sont compensés par une évapotranspiration réelle plus faible. À mesure que les niveaux d'eau baissent dans les scénarios SSP1-2.6 et SSP3-7.0, l'évapotranspiration réelle augmente fortement dans l'intervention de référence, mais seulement légèrement dans la zone brûlée, car la couche supérieure du sol s'assèche, ce qui entraîne des pertes de carbone comparativement plus faibles pour l'intervention contre les incendies.

5 Résultats par type d'intervention : focus sur l'évolution des stocks de carbone dans les tourbières adjacentes

Ce chapitre présente le type de résultats pouvant être générés par l'outil HDSS. Les résultats complets pour tous les indicateurs peuvent être consultés et comparés dans l'outil.

Ce chapitre résume les résultats de chaque type d'intervention pour tous les scénarios pour un indicateur clé : l'évolution du stock de carbone au-delà de l'empreinte de la zone d'intervention.

Ces résultats donnent un aperçu de l'impact que certaines interventions peuvent avoir sur l'environnement environnant, démontrant que les interventions peuvent avoir un impact significatif dans la zone environnante et pas seulement localement, là où des changements d'utilisation des terres sont effectués. Les résultats du modèle montrent que certains types d'intervention peuvent être préférables à d'autres si l'objectif est de limiter la variation des stocks de carbone dans le paysage.

5.1 A : Référence

Intervention de développement La végétation et la topographie des tourbières correspondent aux conditions actuelles, entre 2010 et 2020.

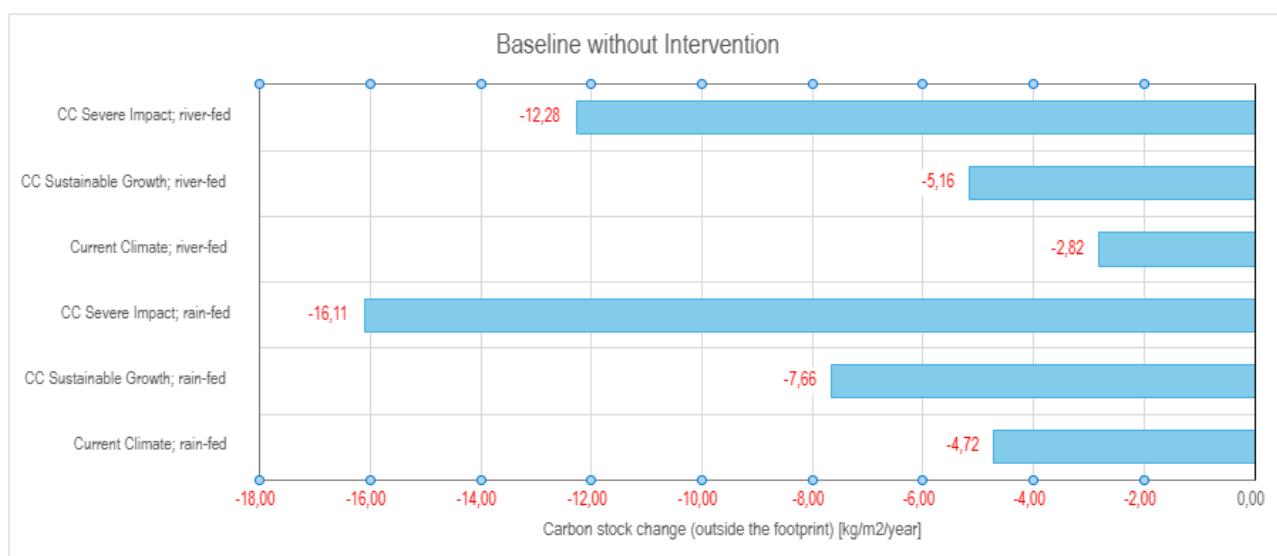


Figure 5-1 Changement du stock de carbone pour l'intervention de référence

Pour les scénarios de référence, où la tourbière est intacte, les résultats montrent que, dans les deux scénarios de changement climatique, la décomposition de la tourbe est plus importante que dans les conditions climatiques actuelles en raison de la baisse du niveau de l'eau et de l'exposition accrue de la tourbe à des conditions aérobies.

Quel que soit le scénario climatique considéré, la tourbière alimentée par les rivières est un meilleur puits de carbone que celle alimentée par les pluies. Dans ce dernier scénario, les pertes de carbone dans le scénario climatique d'impact sévère sont trois fois supérieures aux conditions climatiques actuelles. La baisse du niveau de la nappe phréatique dans les deux scénarios de changement climatique s'explique par une augmentation plus importante de l'évapotranspiration par rapport aux précipitations.

5.2 B : Route opérationnelle

Intervention de développement (a) Une route imperméable surélevée d'une largeur de 80 m est construite à 1 mètre au-dessus de la surface naturelle. Elle est finalisée et opérationnelle. (b) La végétation est enlevée et la surface du sol est aplanie. (c) Le remblai de la route est rempli de gravier perméable. (d) La tourbe sous-jacente est comprimée par le poids de la route.

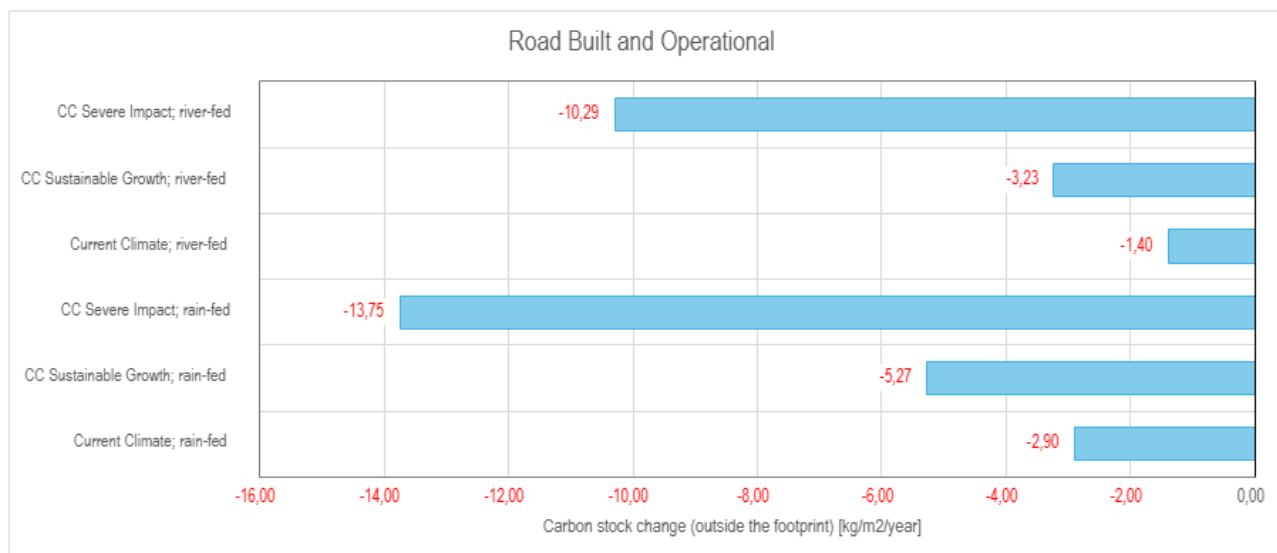


Figure 5- Émissions de CO2 à proximité d'une route en service

Pour le scénario de route développée et opérationnelle, les résultats sont similaires à ceux du scénario de référence. Une fois la route opérationnelle, les résultats obtenus dans les tourbières environnantes au-delà de l'intervention montrent que les tourbières stockent le carbone de manière similaire au scénario de référence (conditions actuelles). En fait, à mesure que le niveau de l'eau baisse en raison du changement climatique, la décomposition de la tourbe augmente à proximité de l'empreinte de la route, tout en restant inférieure à celle du scénario de référence.

Cependant, il est important de tenir compte des impacts de la construction de la route, en particulier lorsque de vastes zones peuvent devoir être drainées pendant les travaux - voir le scénario suivant « C ».

5.3 C : Construction d'une route

Intervention de développement (a) Une route imperméable surélevée d'une largeur de 80 m est construite à 1 mètre au-dessus de la surface naturelle. (b) La végétation est enlevée et la surface du sol est aplanie. (c) Le remblai de la route est rempli de gravier perméable. (d) La tourbe sous-jacente est comprimée par le poids de la route. (e) Pendant la construction, un système de drainage est installé à 2 mètres sous le sol, c'est-à-dire à 1 mètre sous la surface environnante.

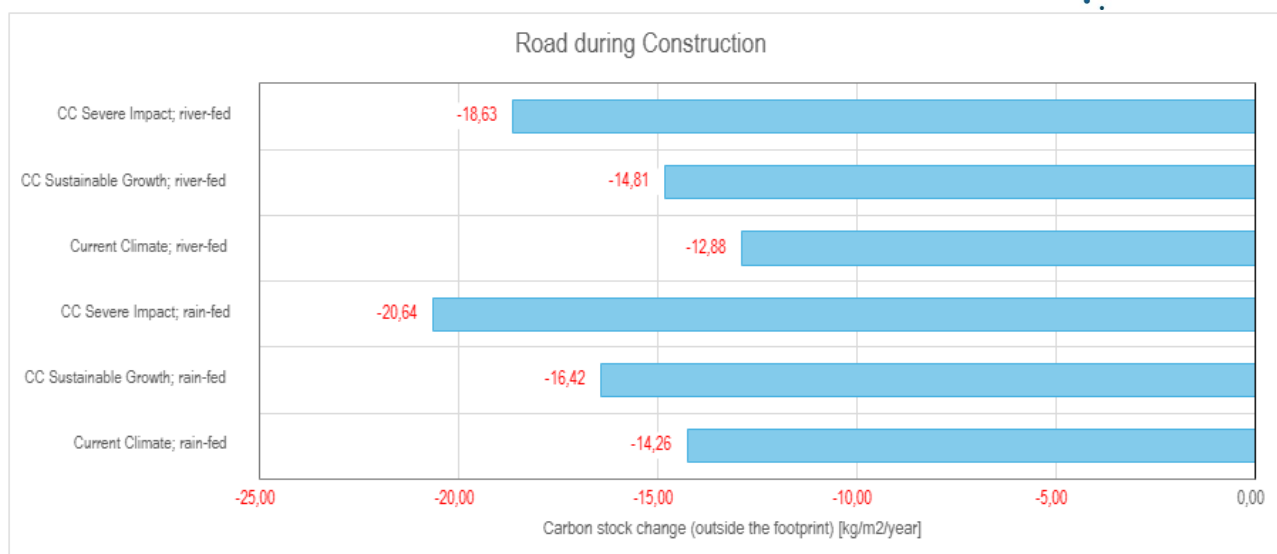


Figure 5-2 Émissions de CO₂ à proximité d'une route pendant la construction

Les résultats montrent que si un système de drainage est installé pendant la construction de la route, la décomposition de la tourbe dans la zone environnante augmente considérablement. La baisse du niveau d'eau due au drainage est si importante que l'impact du changement climatique sur les niveaux d'eau est réduit par rapport à l'intervention de référence dans le climat actuel. Cela vaut pour tous les scénarios qui comportent un élément de drainage.

5.4 D : Urbanisation

Intervention de développement (a) Une agglomération est développée dans la tourbière boisée. (b) La topographie est surélevée de 50 cm pour éviter les inondations. (c) La végétation est éliminée et la surface du sol est partiellement pavée. (d) La tourbe est comprimée sous la charge des bâtiments.

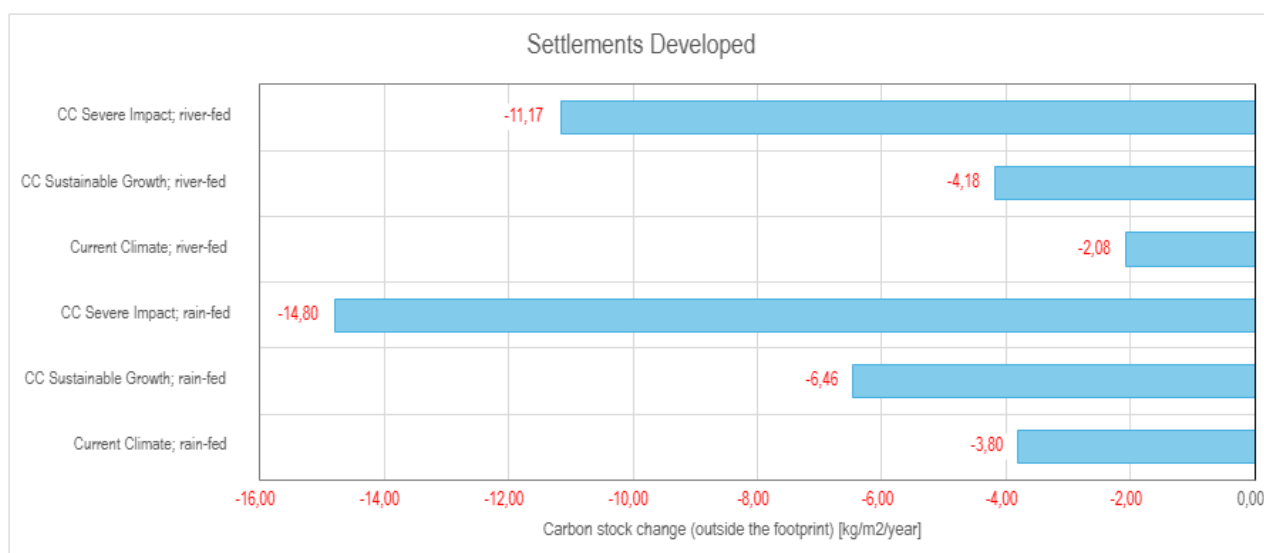


Figure 5- Émissions de CO₂ à proximité d'un nouveau lotissement

À mesure que le niveau de l'eau baisse en raison du changement climatique, la décomposition de la tourbe s'accélère à l'intérieur et à l'extérieur de l'empreinte de la colonie, tout en restant inférieure à la référence à l'extérieur de l'empreinte.

Si un drainage était nécessaire pour développer la zone d'habitation, nous savons, d'après les résultats du scénario C, que cela augmenterait considérablement les pertes de carbone.

5.5 E : Incendies de forêt / Déforestation

Intervention de développement (a) Un feu de forêt élimine complètement la végétation. Il en va de même pour la déforestation. (b) En conséquence, les propriétés du sol changent : la densité apparente augmente et le rendement spécifique diminue.

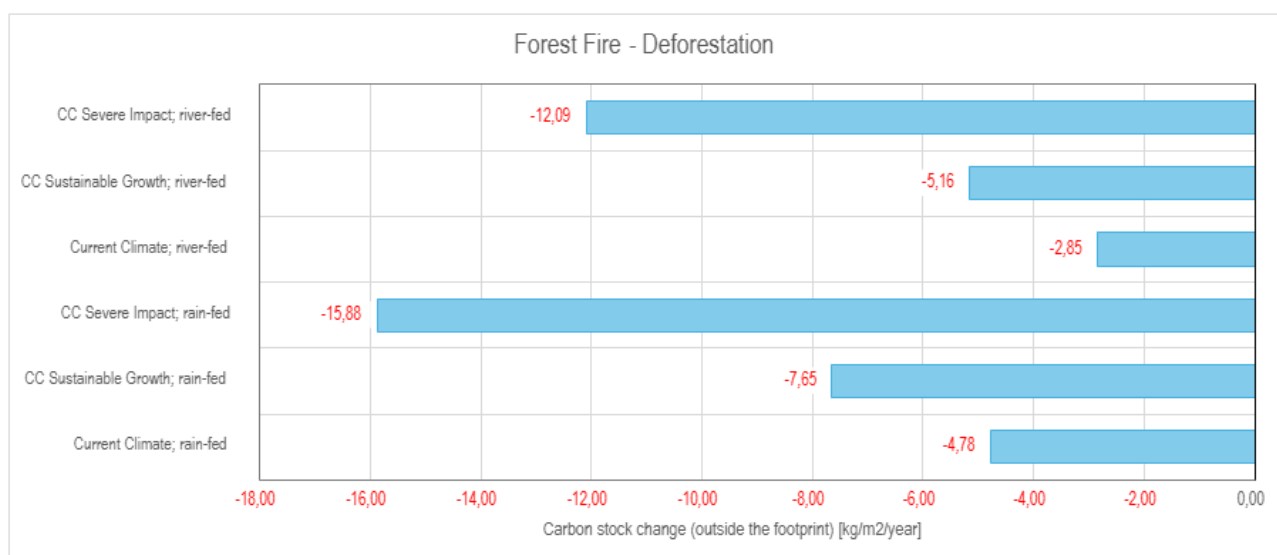


Figure 5-3 Émissions de CO₂ à proximité d'un incendie qui détruit toute la végétation

À mesure que le niveau des eaux baisse en raison du changement climatique, la décomposition de la tourbe s'accélère à l'intérieur et à l'extérieur de la zone touchée par l'incendie. L'évapotranspiration de la zone brûlée diminue lorsque la nappe phréatique s'abaisse profondément sous le sol, ce qui entraîne une augmentation du niveau de la nappe phréatique. Les flux de carbone en dehors de la zone touchée par l'incendie sont similaires à ceux de référence. Si des incendies ou des techniques de défrichage par brûlis sont utilisés en conjonction avec d'autres interventions de développement, par exemple pour défricher des terres à des fins agricoles, de construction ou de drainage, d'autres résultats de scénarios doivent être pris en compte.

5.6 F : Une plantation de palmiers remplace la forêt

Intervention de développement Déforestation et conversion en plantations de palmiers à huile : (a) La végétation naturelle est déboisée pour créer de nouvelles plantations de palmiers à huile. (b) Les palmiers à huile prospèrent lorsque le niveau moyen de l'eau se situe entre 40 et 60 cm sous le sol. Il y a un drainage à 50 cm de profondeur. (c) Les propriétés de la végétation sont modifiées en fonction de la plantation mature de palmiers à huile âgée de 15 ans. (d) La microtopographie est lissée par le défrichage. (e) Les propriétés du sol sont modifiées par le drainage : augmentation de la densité apparente, baisse du rendement spécifique et baisse de la conductivité hydraulique à saturation. (f) La topographie est abaissée de 50 cm en raison de la subsidence du sol induite par le drainage.

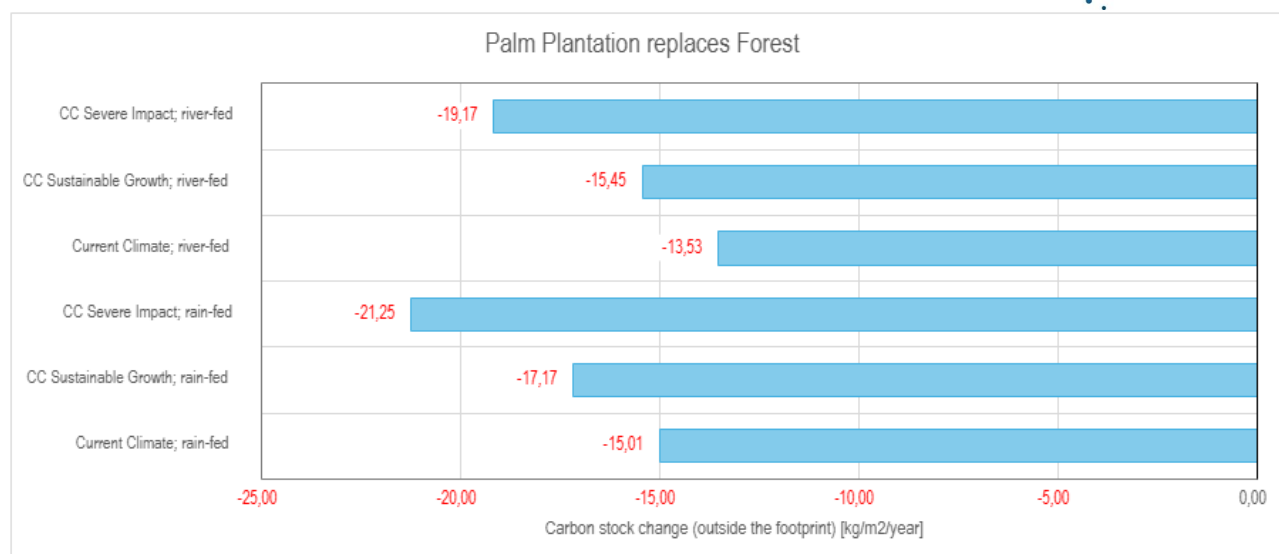


Figure 5-4 Émissions de CO₂ à proximité d'une plantation de palmiers à huile

Dans ce scénario, la baisse du niveau d'eau due à l'affaissement du sol et au drainage est si importante que l'impact du changement climatique sur les niveaux d'eau est réduit par rapport à l'intervention de référence. La décomposition de la tourbe augmente par rapport aux conditions climatiques actuelles en raison de la baisse du niveau des nappes phréatiques. Les pertes de carbone restent beaucoup plus élevées que dans le scénario de référence, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'empreinte de la plantation.

Les résultats de ce scénario sont comparables à ceux du scénario de drainage pour la construction de routes. Des pertes de carbone importantes sont à prévoir dans tous les scénarios de drainage, tant dans les modèles climatiques actuels, de croissance durable, que dans ceux à impact sévère. Bien que le drainage dans ce scénario soit à une profondeur de 50 cm, contre 1 m dans le scénario de construction de routes, les pertes de carbone sont légèrement plus élevées dans ce scénario de développement de palmiers à huile.

5.7 G : La culture du riz remplace la forêt

Intervention de développement Déforestation et conversion à la culture du riz : (a) La végétation naturelle est éliminée et remplacée par des rizières. Le riz est la culture saisonnière inondée la plus commune dans la Cuvette Centrale. (b) Il y a deux récoltes par an. Les rizières sont inondées pendant la saison humide. (c) Les propriétés de la végétation et de la surface varient en fonction du stade de la culture.

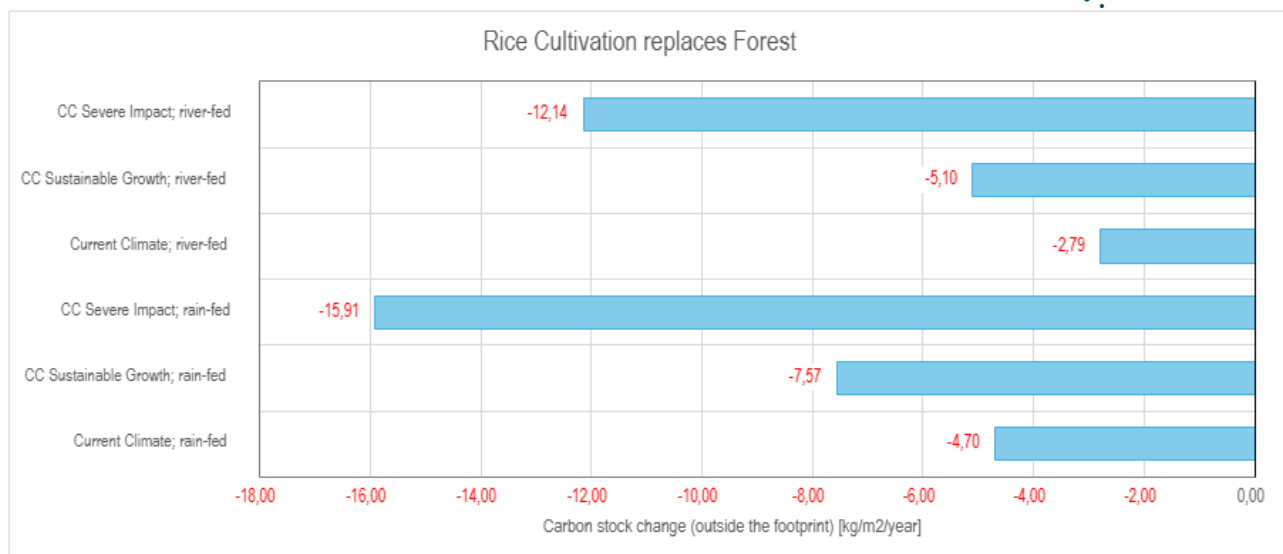


Figure 5- Émissions de CO₂ à proximité des rizières

Dans ce dernier scénario, la culture du riz reproduit les résultats du scénario de référence. À mesure que le niveau de l'eau baisse en raison du changement climatique, la décomposition de la tourbe s'accélère à l'intérieur et à l'extérieur de la rizière. Par rapport à la plantation de palmiers à huile, la culture du riz dans la cuvette centrale entraînerait des pertes de carbone moins importantes et permettrait de mieux préserver les tourbières entourant les interventions.

5.8 Conclusion

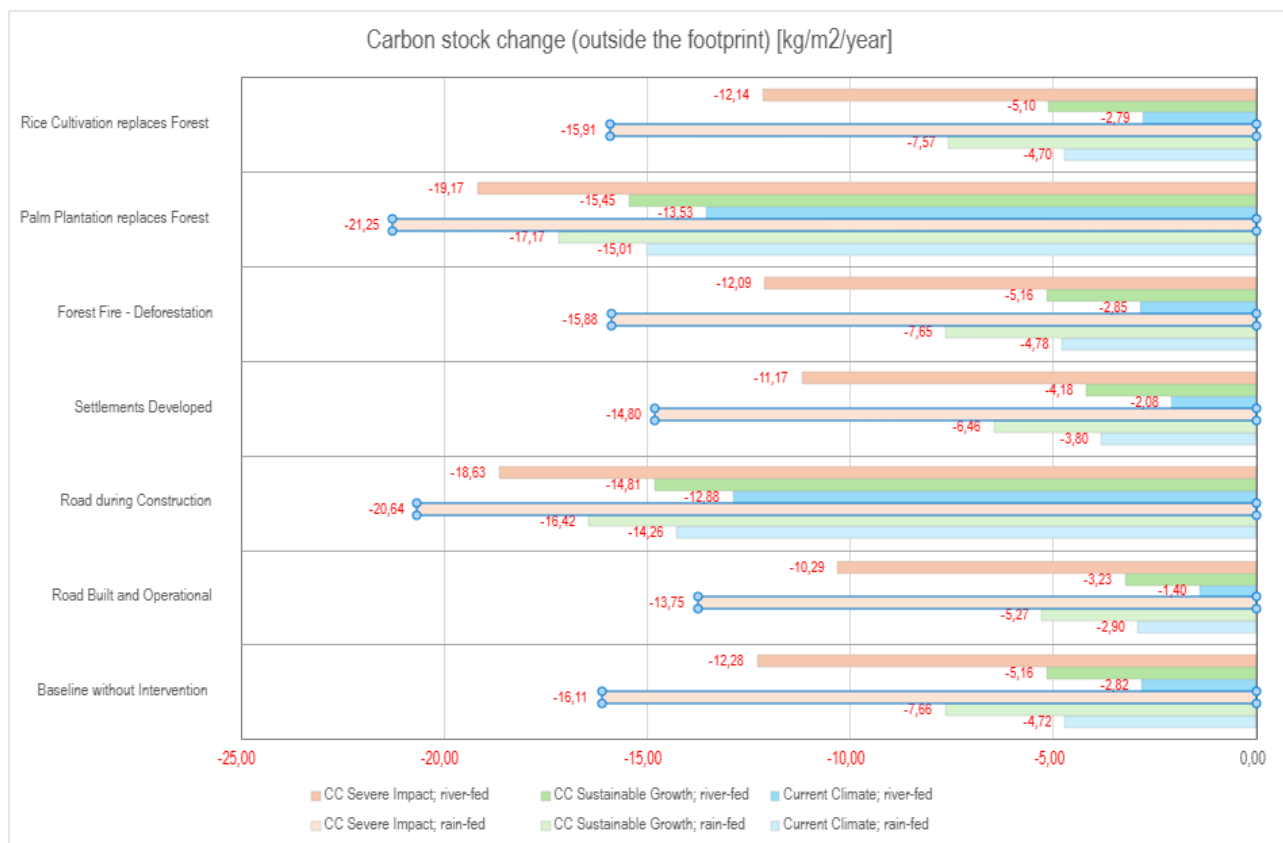


Figure 5- Aperçu des émissions de CO₂ à proximité de tous les scénarios

Pour toutes les interventions, à l'exception des interventions liées à l'urbanisation et aux incendies, les flux de carbone à l'intérieur et à l'extérieur de l'empreinte suivent la même tendance par rapport au scénario de référence dans toutes les conditions climatiques : si les pertes de carbone pour une intervention donnée sont inférieures au scénario de référence dans les conditions climatiques actuelles, elles le sont également dans les scénarios de changement climatique futur.

Les résultats démontrent également que toute forme d'intervention incluant du drainage aura un impact significatif sur la capacité des tourbières environnantes à séquestrer le carbone et entraînera une augmentation des pertes de carbone dans la zone environnante.

Pour les autres interventions localisées sans drainage, telles que les routes opérationnelles, l'urbanisation ou les zones exposées aux incendies, la perte de carbone est concentrée dans la zone d'intervention et a un impact limité sur les tourbières environnantes.

5.8.1 Remarque concernant l'indicateur « Variation du stock de carbone en kg par m² par an » à l'intérieur et à l'extérieur de l'empreinte de l'intervention :

L'indicateur est une valeur normalisée par mètre carré qui caractérise l'impact sur une unité de surface. Par conséquent, pour des interventions de taille spécifique, le décideur doit multiplier les valeurs respectives de l'indicateur par les zones significatives des interventions concrètes.

Exemple avec hypothèses : pour une zone de tourbières de 20 km x 20 km, le décideur souhaite comparer les éléments suivants :

- Scénario A : situation actuelle (aucune intervention) ; superficie de référence = $4 \times 10^8 \text{ m}^2$ (400 km²)
- Scénario B : route construite et opérationnelle, supposons que la route mesure 30 m de large et traverse la tourbière : superficie de l'empreinte de la route = $30 \text{ m} \times 20 \times 10^3 \text{ m} = 6 \times 10^5 \text{ m}^2$; superficie hors empreinte = $4 \times 10^8 \text{ m}^2 - 6 \times 10^5 \text{ m}^2 = 399,4 \text{ km}^2$
- Scénario F : une plantation de palmiers remplace une forêt : supposons que la superficie de la plantation soit de 10 km x 10 km : superficie de la plantation = 10^8 m^2 (100 km²) ; superficie extérieure = $4 \times 10^8 \text{ m}^2 - 10^8 \text{ m}^2 = 3 \times 10^8 \text{ m}^2$ (300,0 km²)

Si l'on prend par exemple les résultats des scénarios A.1.1, B.1.1 et F.1.1, les variations du stock de carbone seraient les suivantes :

- Scénario A : -4,716 kg/m² /an
- Scénario B : -17,975 kg/m² /an à l'intérieur de l'empreinte et -2,905 kg/m² /an à l'extérieur de l'empreinte
- Scénario F : -15,639 kg/m² /an à l'intérieur de l'empreinte et -15,010 kg/m² /an à l'extérieur de l'empreinte

Par conséquent, pour l'exemple ci-dessus, les variations du stock de carbone seraient les suivantes

- Scénario A : -1,89 million de tonnes/an
- Scénario B : -1,17 million de tonnes/an si la zone d'impact en dehors de l'empreinte est surestimée, -1,89 million de tonnes/an (identique au scénario de référence) si l'impact en dehors de l'empreinte est négligé
- Scénario F : -6,09 millions de tonnes/an

6 Applicabilité et limites

Ce chapitre présente une évaluation critique de l'approche intégrée de modélisation hydrologique et des flux de carbone utilisée pour évaluer la dynamique des tourbières et les changements dans les stocks de carbone du sol dans la Cuvette Centrale. Il met en évidence les points forts de la méthode en matière d'analyse de scénarios et d'aide à la décision, tout en reconnaissant les limites imposées par la rareté des données, les hypothèses du modèle et les incertitudes des projections climatiques.

6.1 Configuration hydrologique et validation du modèle

En raison de la disponibilité limitée de données complètes, il n'a pas été possible de développer un modèle géoréférencé. À la place, un modèle conceptuel a été adopté, axé sur les processus hydrologiques dominants qui façonnent la dynamique des tourbières. Ce modèle rend compte à la fois des régimes des tourbières pluviales et fluviales, ce qui permet une représentation globale de la diversité hydrologique de la Cuvette Centrale. La validation a été effectuée à l'aide de comparaisons qualitatives avec des mesures sur le terrain réalisées entre 2013-2014 et 2018-2019, qui ont montré que les niveaux d'eau simulés correspondaient généralement aux fluctuations saisonnières observées. Cependant, certaines dynamiques, telles que la montée rapide des eaux souterraines après les précipitations, n'ont pas été bien reproduites. Le modèle a également simulé des nappes phréatiques plus profondes aux bords du dôme, bien que les données de terrain ne corroborent pas ce schéma, ce qui soulève des inquiétudes quant à une éventuelle surestimation des pertes de carbone dans les tourbières alimentées par les cours d'eau. Ces divergences soulignent la nécessité de mener des travaux supplémentaires sur le terrain afin de mieux comprendre la variabilité spatiale du niveau d'eau et d'améliorer la précision du modèle.

6.2 Processus hydrologiques

Une estimation précise de l'évapotranspiration est essentielle pour comprendre le bilan hydrique de la Cuvette Centrale. Dans MIKE SHE, la transpiration est modélisée à l'aide de l'évapotranspiration de référence et de paramètres spécifiques aux plantes, avec une distribution logarithmique de la densité racinaire qui suppose une plus grande absorption d'eau dans la couche arable et dépend de la profondeur maximale des racines, fixée à 1 m selon Sciumbata et al. (2023). Cependant, les fortes baisses observées dans la production de racines fines avec la profondeur contrastent avec la distribution progressive par défaut de MIKE SHE, ce qui peut conduire à une surestimation de la transpiration et de la profondeur de la nappe phréatique pendant les périodes sèches. Les propriétés hydrauliques de la tourbe, telles que la conductivité et le rendement spécifique, sont dérivées des tourbières d'Asie du Sud-Est en raison du manque de données locales, ce qui introduit une incertitude dans la dynamique des eaux souterraines. En outre, le modèle montre un écoulement latéral minimal vers les limites, malgré des preuves d'un écoulement important vers les rivières, ce qui suggère que les interactions avec les eaux souterraines pourraient être sous-estimées. Des mesures sur le terrain des propriétés hydrauliques et de l'écoulement latéral des eaux souterraines sont nécessaires pour améliorer la précision du modèle.

6.3 Modélisation de scénarios

Les simulations alimentées par les rivières montrent que les inondations s'étendent progressivement au fil du temps à mesure que les apports fluviaux rechargent la zone non saturée, ce qui indique que l'équilibre hydrologique n'est pas atteint dans le délai actuel ; il est donc recommandé de prolonger les périodes de simulation. L'amélioration des modèles d'intervention nécessite des données locales, notamment des informations géotechniques sur les routes et les zones urbanisées, les schémas de

drainage des plantations et les mesures du sol dans les zones de tourbières dégradées, tandis que la surveillance des propriétés de la tourbe sous compression, brûlée ou drainée est essentielle pour évaluer les impacts des interventions. Les projections climatiques des modèles CMIP6 présentent un degré d'incertitude élevé, avec des tendances pluviométriques contradictoires et une grande variabilité entre les scénarios, ce qui signifie que les résultats relatifs au changement climatique doivent être interprétés avec prudence. La prise en compte des projections pluviométriques p10 et p90 et la réalisation d'études supplémentaires sur les impacts du débit fluvial permettraient de mieux comprendre la dynamique hydrologique future des tourbières alimentées par les cours d'eau.

6.4 Accumulation et perte de carbone

Dans le modèle actuel, le stockage du carbone est supposé constant, mais en réalité, la productivité primaire brute (GPP) varie en fonction des conditions météorologiques et hydrologiques, ralentissant les jours nuageux et diminuant sous l'effet de la fumée des feux de tourbe, comme l'ont observé Hirano et al. (2012). L'intégration de ces effets et l'introduction d'un facteur de réduction lorsque les nappes phréatiques sortent des plages optimales améliorerait la précision. L'affaissement du sol dû à la décomposition prolongée de la tourbe est représenté par un abaissement fixe de 50 cm dans le modèle de palmier à huile, mais le couplage dynamique du flux de carbone et de l'hydrologie serait plus précis, bien que complexe. Les taux de décomposition dépendent également des propriétés hydrauliques de la tourbe, mais le manque de données empêche leur inclusion. L'étude se concentre sur le bilan carbone plutôt que sur les émissions de gaz à effet de serre, ce qui signifie que les effets sur le réchauffement climatique ne peuvent être pleinement évalués ; la plupart de la décomposition se produit dans des conditions oxygénées, produisant du CO₂, mais des conditions anaérobies peuvent générer du méthane et du carbone organique dissous. Une évaluation complète des flux de carbone dans des conditions variables nécessite des mesures supplémentaires sur le terrain.

6.5 Conclusion

L'approche de modélisation combinée décrite ici permet aux décideurs d'évaluer les effets d'interventions spécifiques sur les niveaux d'eau et les flux de carbone dans diverses conditions hydrologiques et climatiques. La précision du modèle est limitée par la compréhension encore insuffisante de l'hydrologie des tourbières de la Cuvette Centrale, en particulier des échanges entre les cours d'eau et les tourbières. Des mesures sur le terrain permettraient d'affiner le modèle, notamment les paramètres hydrauliques du sol et les séries chronologiques des niveaux d'eau à des fins de validation. Afin d'estimer plus précisément les impacts d'une intervention donnée dans une zone spécifique, le modèle conceptuel rectangulaire actuel pourrait être converti en un modèle géoréférencé couvrant la zone d'intervention réelle avec des paramètres spécifiques au site.

7 Résumé et conclusion

Ce rapport a présenté le développement et l'application d'un système d'aide à la décision hydrologique (HDSS) adapté aux caractéristiques uniques des tourbières du bassin du Congo. Grâce à l'intégration d'un modèle hydrologique conceptuel (MIKE SHE) et d'un modèle heuristique de biodégradation, le HDSS fournit un cadre permettant de comprendre l'interaction entre la dynamique de l'eau et les émissions de carbone dans la Cuvette Centrale.

Le modèle hydrologique simule des processus clés tels que les précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration, l'écoulement souterrain et l'écoulement de surface. Deux zones hydrologiques distinctes sont modélisées : (1) celles qui dépendent uniquement des précipitations et (2) celles qui dépendent des précipitations et du niveau des cours d'eau. Malgré la nature conceptuelle du modèle et la disponibilité limitée des données in situ, les résultats de l'étalonnage correspondent bien aux schémas saisonniers et spatiaux observés dans la littérature concernant les niveaux des eaux souterraines. Le modèle rend compte de la sensibilité du système des tourbières à la variabilité climatique, en particulier à la tendance au dessèchement observée au cours des dernières décennies.

Associés au modèle de biodégradation, les flux de carbone sont estimés sur la base des conditions oxygénées et anaérobies du sol. L'heuristique distingue les matières organiques labiles et récalcitrantes et tient compte de leurs taux de dégradation respectifs sous différents niveaux de saturation. Cette approche permet de comprendre comment les changements hydrologiques, qu'ils soient dus à la variabilité climatique ou aux interventions humaines, se traduisent en flux de carbone.

Les analyses de scénarios démontrent l'impact significatif des interventions de développement telles que la construction de routes, l'expansion des zones d'habitation et la conversion des terres sur l'hydrologie des tourbières et les émissions de carbone. Par exemple, le drainage associé au développement des infrastructures peut réduire considérablement le niveau des nappes phréatiques, augmentant ainsi la profondeur oxydante et accélérant la décomposition de la tourbe. À l'inverse, les scénarios qui maintiennent ou restaurent des nappes phréatiques élevées montrent une baisse des émissions et une meilleure préservation des stocks de carbone de la tourbe.

Les analyses de scénarios menées dans le cadre de cette étude mettent en évidence plusieurs vulnérabilités critiques des tourbières, liées à leur sensibilité hydrologique, à la nature des interventions de développement et aux impacts du changement climatique.

- **Vulnérabilités hydrologiques** : Les tourbières sont très sensibles aux variations du niveau des nappes phréatiques. L'abaissement du niveau des nappes phréatiques, qu'il soit dû au drainage, au développement des infrastructures ou à des périodes de sécheresse prolongées, expose la tourbe à des conditions oxydantes, accélérant ainsi sa décomposition et augmentant les émissions de dioxyde de carbone. La perte de microtopographie et l'augmentation du ruissellement exacerbent encore la perte d'eau, en particulier dans les zones où les caractéristiques naturelles de la surface sont modifiées.
- **Vulnérabilités liées aux interventions de développement** : Le développement des infrastructures, comme la construction de routes, l'expansion des zones d'habitation et la conversion à l'agriculture (par exemple, la culture du palmier à huile ou du riz), implique généralement le drainage et la compression des sols tourbeux. Ces interventions entraînent un abaissement significatif du niveau de la nappe phréatique, une augmentation de la profondeur oxydante et une décomposition accrue de la tourbe. La suppression de la végétation naturelle et le nivellement de la surface du sol réduisent la capacité des tourbières à retenir l'eau et à amortir les extrêmes hydrologiques.
- **Vulnérabilités liées au changement climatique** : avec le changement climatique, les tourbières de la Cuvette Centrale devraient devenir plus sèches. Les taux d'évapotranspiration devraient augmenter considérablement, sous l'effet de la hausse des températures dans la région. Cette projection est particulièrement préoccupante pour la Cuvette Centrale, où les tourbières sont plus vulnérables à la sécheresse que leurs homologues d'Asie du Sud-Est en raison de précipitations annuelles plus faibles. La région pourrait connaître des saisons sèches plus longues et plus intenses, entraînant une baisse du niveau des nappes phréatiques, un risque accru d'incendies et une perte accélérée de carbone.

L'interaction entre ces trajectoires climatiques incertaines et les interventions humaines en cours pose un défi important pour la résilience et la stabilité à long terme de l'écosystème des tourbières. Toutefois, ces résultats doivent être interprétés avec prudence compte tenu du degré élevé d'incertitude des projections de précipitations du CMIP6. Alors que la médiane de l'ensemble ne montre que des changements modestes des précipitations, les modèles individuels projettent une fourchette beaucoup plus large, allant de fortes augmentations à de fortes diminutions, soulignant l'importance de prendre également en compte les scénarios p10 et p90. Des recherches supplémentaires sur le débit régional des cours d'eau sont nécessaires, car il s'agit d'un facteur clé du niveau d'eau dans les tourbières alimentées par les cours d'eau.

7.1 Recommandations

Pour remédier à ces vulnérabilités, les mesures de gestion suivantes sont recommandées :

- **Maintenir des nappes phréatiques élevées** : donner la priorité aux pratiques de gestion hydrologique qui maintiennent la nappe phréatique près de la surface. Lorsque le drainage est inévitable, limiter la profondeur et la durée du drainage afin de minimiser l'oxydation et l'affaissement de la tourbe.
- **Protéger et restaurer la végétation** : conserver les zones tampons de végétation naturelle, en particulier le long des cours d'eau et des marges des dômes de tourbe, afin de favoriser la rétention d'eau et la résilience des écosystèmes. La restauration des zones dégradées par la réhumidification et le reboisement doit être encouragée afin de réduire les émissions et d'améliorer le fonctionnement des tourbières.
- **Réduire au minimum les perturbations de surface** : éviter le nivellement à grande échelle de la microtopographie naturelle et limiter le compactage du sol par les infrastructures lourdes. Dans la mesure du possible, concevoir des interventions visant à préserver ou à imiter les caractéristiques naturelles de la surface.
- **Mettre en œuvre un drainage adaptatif** : lorsque le drainage est nécessaire au développement, utiliser des systèmes de drainage contrôlés (par exemple, des déversoirs réglables) pour permettre une gestion dynamique des niveaux d'eau en fonction des variations saisonnières et climatiques.
- **Surveiller et s'adapter** : mettre en place une surveillance à long terme des indicateurs hydrologiques et écologiques afin d'éclairer la gestion adaptative et de garantir que les interventions ne compromettent pas l'intégrité des tourbières.

En résumé, les tourbières du bassin du Congo sont très vulnérables aux perturbations hydrologiques, à l'utilisation non durable des terres et au changement climatique. Le maintien d'un niveau élevé de la nappe phréatique, la protection de la végétation naturelle et la restauration des zones dégradées sont essentiels pour préserver leurs stocks de carbone, leur biodiversité et leurs fonctions hydrologiques.

Le HDSS développé dans le cadre de ce projet jette les bases d'une gouvernance fondée sur des données probantes et d'une planification durable dans les tourbières du bassin du Congo. À l'avenir, les orientations clés suivantes peuvent être envisagées pour l'engagement des parties prenantes et l'intégration des politiques : les résultats du HDSS peuvent éclairer la planification de l'utilisation des terres, les stratégies de conservation et les lignes directrices pour le développement des infrastructures. Une collaboration continue avec les parties prenantes locales et les décideurs politiques sera essentielle pour garantir la pertinence et l'impact du système.

En conclusion, cette étude représente une étape cruciale vers la préservation de l'intégrité écologique et de la fonction de stockage du carbone des tourbières du bassin du Congo. En établissant un lien entre l'hydrologie, la dynamique du carbone, les projections climatiques et le développement humain, elle fournit un outil permettant d'équilibrer la conservation et le développement durable dans l'une des régions de tourbières tropicales les plus importantes au monde.

7.2 Prochaines étapes

Les résultats complets de l'étude peuvent être consultés dans le Système d'aide à la décision hydrologique. La République démocratique du Congo et la République du Congo utiliseront ces résultats et le Système d'aide à la décision hydrologique comme outil interactif pour développer et gérer de manière durable les eaux des tourbières du lac Télé et du lac Tumba, respectivement.

La compréhension et la connaissance de l'hydrologie de la Cuvette centrale pourraient être considérablement renforcées par de nouveaux investissements et recherches dans le bassin du Congo, notamment en matière de surveillance et de collecte de données sur le débit des cours d'eau et les niveaux d'eau dans le paysage du lac Télé et du lac Tumba.

8 Abréviations

CREBBAC	Centre de recherche sur les ressources en eau du bassin du Congo
RDC	République démocratique du Congo
ET :	Évapotranspiration
MCG :	Modèle climatique global
GPP :	Productivité primaire brute
GWT :	Eaux souterraines
HDSS :	Système d'aide à la décision hydrologique
IKI :	Initiative internationale pour la protection du climat
GIEC :	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
LAI :	Indice de surface foliaire
MODIS :	Spectroradiomètre imageur à résolution modérée
RCP :	Trajectoire de concentration représentative
SSP :	Trajectoire socio-économique partagée
PNUE :	Programme des Nations Unies pour l'environnement