

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 de documentation du modèle pour le système
d'aide à la décision hydrologique (HDSS)

Rapport technique

Numéro de 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** ». 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 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.

Développement du modèle et du HDSS

Au cœur du HDSS se trouve un modèle hydrologique conceptuel adapté aux conditions uniques des tourbières de la Cuvette Centrale. En raison du manque 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.

Les propriétés hydrauliques du sol sont paramétrées sur la base de la littérature et des efforts de modélisation antérieurs. Dans la zone non saturée, le modèle utilise l'équation de Richards. La zone saturée comprend des couches de tourbe et d'argile, la profondeur de la tourbe variant entre 1,15 et 4 mètres. L'écoulement de surface est modélisé à l'aide d'une approximation par onde diffusive en 2D, avec un stockage de rétention fixé à 6,5 cm pour refléter la variabilité microtopographique.

L'étalonnage du modèle a été effectué à partir des données de terrain de Dargie et al. (2017) et Crezee et al. (2022). Le paramètre de forme de la courbe de rétention d'eau du sol et l'évapotranspiration de référence ont été augmentés de 5 % afin de mieux modéliser les fluctuations saisonnières du niveau de la nappe. Le modèle reproduit avec succès les schémas observés, notamment la variation spatiale de la profondeur des eaux souterraines et les tendances saisonnières d'assèchement liées au changement climatique. L'analyse du bilan hydrique montre que les précipitations et

l'évapotranspiration sont de loin les flux hydrologiques les plus importants dans la région, l'évapotranspiration dépassant légèrement les précipitations pendant la période de simulation.

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 oxiques 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 oxiques, c'est-à-dire lorsque la 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 (Young et al., 2023). Dans des conditions de référence, la perte annuelle nette de carbone dans le sol est estimée à 4,72 kg C/m², tandis que les scénarios d'engorgement permanent entraînent une perte de carbone dans le sol de 2,82 kg/m²/an.

Interventions de développement, scénarios de changement climatique et régimes hydrologiques

Le HDSS évalue sept interventions de développement (référence, construction routière, route opérationnelle, développement de zones d'habitation, incendies de forêt (déforestation), plantation de palmiers à huile et culture du riz) dans le cadre de trois scénarios climatiques (actuel, SSP1-2.6 croissance durable, SSP3-7.0 impact sévère) et de deux régimes hydrologiques (influencé par les précipitations et influencé par les cours d'eau).

Les interventions de développement ont été identifiées lors de consultations avec les parties prenantes à Brazzaville. Chaque intervention modifie la couverture végétale, la topographie et les propriétés hydrauliques du sol, avec des implications importantes pour la dynamique de la nappe phréatique et le stock de carbone dans le sol. Les interventions de développement généralisées issues des consultations avec les parties prenantes sont les suivantes :

Tableau 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.

Code	Nom	Description
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 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.

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. À partir des scénarios d'émissions du GIEC AR6, les éléments suivants font partie des définitions des scénarios :

Tableau 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

Code	Nom	Description
		l'évapotranspiration. C'est principalement le cas dans les zones centrales adjacentes aux principales rivières de la région.
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 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 alimentée par les précipitations, les limites ouest et est ont un niveau d'eau 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 du modèle, tout comme les facteurs 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, le HDSS génère des résultats pour 42 scénarios différents.

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

Derrière chaque définition de scénario se cache un modèle complet avec ses paramètres d'entrée et ses résultats de simulation. 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 :

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

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

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.

Conclusions

Les analyses de scénarios réalisées 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 de la nappe phréatique. L'abaissement du niveau de la nappe phréatique, 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 pertes 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 une baisse significative du niveau de la nappe, une augmentation de la profondeur oxygène 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. Ces conclusions doivent être interprétées avec prudence, compte tenu du degré élevé d'incertitude des projections pluviométriques du CMIP6.

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 de nappes phréatiques élevées, 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.

Applicabilité et limites

Le système d'aide à la décision hydrologique (HDSS) améliore la compréhension et la gestion des tourbières du bassin du Congo. En intégrant les processus hydrologiques à la dynamique du carbone et aux projections climatiques, le HDSS peut être utilisé pour aider à évaluer comment les fluctuations du niveau de la nappe, induites par la variabilité climatique et les interventions humaines, affectent les pertes de carbone des sols tourbeux.

Malgré les limites des données et la nécessité de recourir à des simplifications conceptuelles, le HDSS parvient à saisir les principaux schémas hydrologiques et le rôle essentiel de la profondeur des eaux souterraines et de la saturation des sols dans la détermination des flux de carbone des tourbières. En outre, il offre 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'un suivi 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 vitaux sur le plan écologique au monde.

Les efforts futurs devraient se concentrer sur l'amélioration de la collecte de données in situ, le raffinement des paramètres hydrauliques du sol et l'amélioration de la résolution spatiale du modèle.

Néanmoins, le HDSS représente une étape importante vers l'intégration de l'hydrologie, de la dynamique du carbone et des projections climatiques dans un cadre décisionnel unifié pour la gestion durable et la conservation des tourbières dans le bassin du Congo.

Table de matières

Résumé	2
1 Introduction.....	11
2 Approche de modélisation : objectif, justification et méthodologie	12
2.1 Objectif et justification.....	12
2.2 Approche générale de modélisation.....	12
2.3 Aperçu de la structure du modèle	13
3 Modélisation de l'hydrologie des tourbières de la Cuvette Centrale.....	14
3.1 Méthodologie	14
3.2 Développement du modèle	17
3.3 Calage des modèles et résultats	28
3.4 Conclusion	37
4 Modèle de biodégradation	38
4.1 Paramètres d'accumulation et de biodégradation.....	39
4.2 Masse initiale	40
4.3 Variation du stock de carbone dans le sol	40
4.4 Résultats de la simulation.....	41
5 Définitions des scénarios et méthode d'évaluation	45
5.1 Interventions de développement	45
5.2 Scénarios climatiques.....	55
5.3 Régions hydrologiques	60
5.4 Ensemble de scénarios résultant	61
5.5 Méthode d'évaluation des scénarios à l'aide d'indicateurs	62
6 Analyses de scénarios pour le climat actuel dans des conditions uniquement déterminées par les précipitations.....	64
6.1 Scénario A.1.1	64
6.2 Scénario B.1.1	65
6.3 Scénario C.1.1	68
6.4 Scénario D.1.1	71
6.5 Scénario E.1.1	74
6.6 Scénario F.1.1	77
6.7 Scénario G.1.1.....	81
6.8 Résumé des résultats.....	83
7 Analyses de scénarios pour le climat actuel avec des fluctuations saisonnières du niveau des rivières	86
7.1 Scénario A.1.2	86
7.2 Scénario B.1.2	87
7.3 Scénario C.1.2.....	90
7.4 Scénario D.1.2.....	93
7.5 Scénario E.1.2	96
7.6 Scénario F.1.2	99
7.7 Scénario G.1.2.....	102
7.8 Résumé des résultats.....	104
8 Effets du changement climatique	107
8.1 Intervention A – Référence.....	107
8.2 Intervention B – Route construite et opérationnelle	111
8.3 Intervention C – Route pendant la construction	112

8.4	Intervention D – Développement des zones d'habitation.....	113
8.5	Intervention E – Incendies de forêt / Déforestation.....	114
8.6	Intervention F – Forêt remplacée par des plantations de palmiers à huile.....	116
8.7	Intervention G – Forêt remplacée par des rizières.....	117
8.8	Résumé des résultats.....	118
9	Applicabilité et limites de la méthodologie	120
9.1	Configuration hydrologique et validation du modèle	120
9.2	Processus hydrologiques	121
9.3	Scénarios.....	121
9.4	Modèle d'accumulation et de perte de carbone	122
9.5	Conclusion	123
10	Résumé et conclusion	124
11	Liste des figures et tableaux.....	126
12	Abréviations	130
13	Références	131

1 Introduction

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 liées 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 « 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 », 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 présent rapport documente l'approche de modélisation et les analyses de scénarios qui sous-tendent le HDSS. Le modèle est conçu pour les tourbières de la Cuvette Centrale, reflétant leurs caractéristiques hydrologiques, climatiques et géomorphologiques. Il aide les décideurs en leur fournissant des indications 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.

Les chapitres suivants décrivent l'objectif et la justification de l'approche de modélisation, la structure et la vérification du modèle, la définition et l'évaluation des scénarios, ainsi que les principales conclusions et recommandations pour une gestion durable des tourbières.

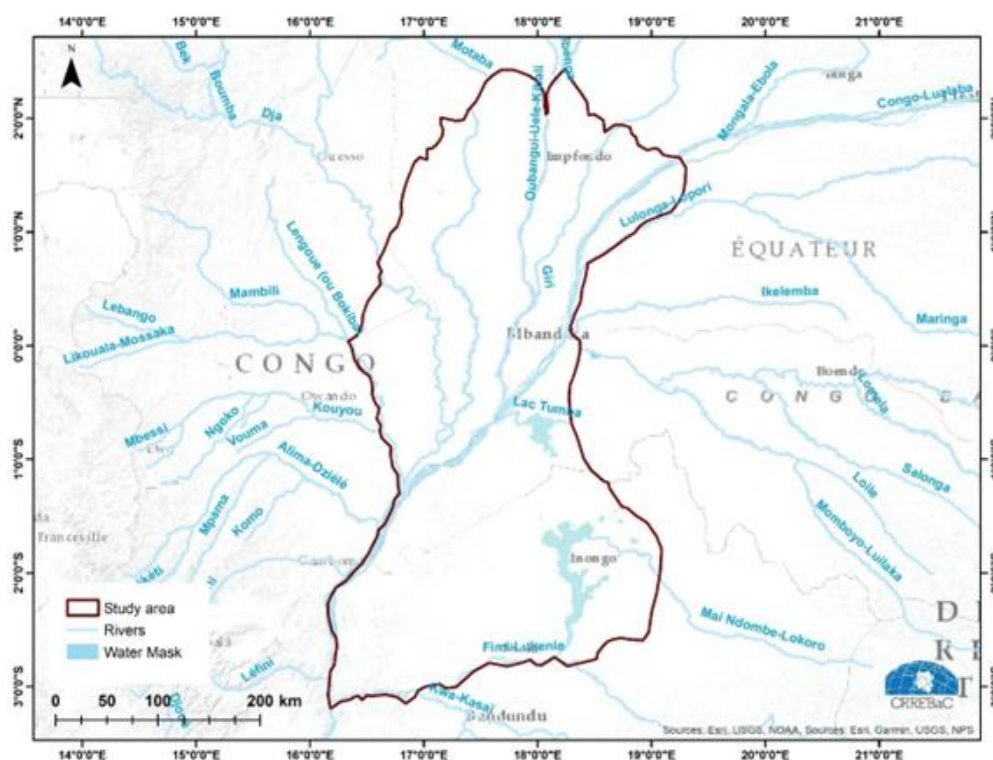


Figure 1-1 Aperçu du paysage du projet Lac Télé Lac Tumba

2 Approche de modélisation : objectif, justification et méthodologie

L'approche de modélisation adoptée dans cette étude est adaptée au contexte hydrologique et écologique des tourbières de la Cuvette Centrale dans le bassin du Congo.

2.1 Objectif et justification

L'objectif du modèle est de fournir des orientations scientifiquement fondées aux décideurs lors de la préparation d'interventions susceptibles d'affecter l'écosystème des tourbières, en mettant particulièrement l'accent sur l'estimation des changements dans le stock de carbone du sol.

Les principaux aspects de la justification sont les suivants :

1. **Approche de modélisation expérimentale** : en raison de la disponibilité limitée de données géoréférencées et exhaustives pour la région, il n'a pas été possible de développer un modèle spatialement explicite. À la place, un modèle conceptuel « expérimental » a été développé, axé sur les principaux processus hydrologiques qui régissent le fonctionnement des tourbières. Cette approche est adaptée à l'objectif visé, car elle permet une analyse de scénarios robuste tout en tenant compte des incertitudes.
2. **Prise en compte de la diversité hydrologique** : les tourbières de la Cuvette Centrale présentent une diversité hydrologique, certaines zones étant uniquement influencées par les précipitations et d'autres également affectées par les crues fluviales. Le modèle tient compte de cette diversité en établissant deux types de représentations hydrologiques, garantissant ainsi que les tourbières influencées par les précipitations et celles influencées par les cours d'eau sont correctement prises en compte.
3. **Développement d'un modèle approprié** : le modèle est conçu pour refléter les caractéristiques clés des tourbières de la Cuvette Centrale. Sa structure, ses hypothèses et sa paramétrisation reflètent les conditions hydrologiques, climatiques et géomorphologiques de cette région, ainsi que les données disponibles et les lacunes dans les connaissances.
4. **Étendue spatiale et sensibilité** : L'étendue spatiale du modèle a été déterminée à travers l'expérimentation de la gamme d'effets de différentes interventions locales, garantissant ainsi que le domaine du modèle est approprié pour les scénarios envisagés.
5. **Interventions dérivées localement** : L'ensemble des interventions analysées dans l'analyse de scénarios a été dérivé d'un processus consultatif impliquant les parties prenantes régionales, notamment dans le cadre d'un atelier dédié organisé à Brazzaville en mars 2025. En conséquence, toutes les interventions reflètent les scénarios de développement et de gestion locaux.

2.2 Approche générale de modélisation

Les tourbières sont des zones humides caractérisées par l'accumulation de matière organique dans des conditions saturées et anoxiques. Elles stockent environ un tiers du carbone mondial présent dans les sols, bien qu'elles ne couvrent que 3 % de la surface terrestre (Gorham, 1991). L'hydrologie des tourbières, en particulier la position et la variabilité de la nappe phréatique, est essentielle à leur fonctionnement écologique et à la dynamique du carbone. Les apports d'eau de surface (précipitations, écoulement superficiel) et les pertes (évapotranspiration, ruissellement, drainage) régulent la nappe phréatique, qui à son tour contrôle les conditions redox dans le profil de la tourbe. Lorsque le niveau d'eau baisse, l'oxygène s'infiltre dans les couches de tourbe plus profondes, stimulant la décomposition microbienne et augmentant les émissions de CO₂. À l'inverse, les conditions de saturation favorisent la

production de méthane (CH_4) mais limitent les émissions de CO_2 . Il est donc essentiel de comprendre l'hydrologie pour prévoir et gérer l'impact climatique.

Les tourbières tropicales, que l'on trouve dans des régions telles que l'Asie du Sud-Est, le bassin du Congo et l'Amazonie, sont particulièrement vulnérables aux perturbations hydrologiques. Contrairement aux tourbières tempérées, les systèmes tropicaux sont souvent plus profonds, avec des taux d'accumulation de carbone plus rapides, et sont exposés à des pressions anthropiques plus intenses telles que la déforestation, le drainage par canaux et la conversion agricole (Page et al., 2011 ; Dargie et al., 2017). Le drainage et l'assèchement augmentent la décomposition aérobie et la vulnérabilité aux incendies, ce qui entraîne des émissions de CO_2 disproportionnées par rapport à la superficie.

Les tourbières de la Cuvette Centrale dans le bassin du Congo comptent parmi les plus grands gisements de tourbe tropicale de la planète, mais leur hydrologie reste mal comprise. Dargie et al. (2017) ont révélé l'étendue et la capacité de stockage de carbone de ces systèmes, établissant ainsi leur importance pour la régulation du climat mondial. Plus récemment, Apers et al. (2022) ont étudié la dynamique saisonnière de la nappe phréatique, mettant en évidence la variabilité spatiale des contrôles hydrologiques et soulignant la nécessité d'une surveillance in situ plus approfondie. Ces études constituent la base d'une compréhension croissante, mais encore limitée, du fonctionnement de ces tourbières et de leur réponse aux changements environnementaux.

Compte tenu de la disponibilité limitée des données pour la région, le modèle est conceptuel plutôt que géoréférencé. Il est néanmoins validé à l'aide des meilleures données disponibles dans la littérature et sur le terrain. Afin d'améliorer la compréhension de la dynamique du carbone dans les tourbières de la Cuvette Centrale, ce modèle hydrologique conceptuel est associé à une approche qui estime le stockage et la décomposition du carbone du sol sur la base des fluctuations du niveau de la nappe et d'heuristiques dérivées d'études scientifiques pertinentes.

2.3 Aperçu de la structure du modèle

1. **Représentation hydrologique** : le modèle simule les processus clés du cycle de l'eau, notamment les précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration, l'écoulement souterrain et l'écoulement de surface. Il distingue les conditions des tourbières influencées par les précipitations de celles influencées par les cours d'eau.
2. **Analyse de scénarios** : le modèle permet d'évaluer les interventions pertinentes au niveau local, telles qu'identifiées lors de l'atelier avec les parties prenantes, ainsi que leurs impacts sur l'hydrologie et les stocks de carbone dans le sol.
3. **Résultats** : Les principaux résultats comprennent les niveaux des eaux souterraines, la teneur en eau du sol et l'estimation de l'évolution des stocks de carbone dans le sol, fournissant ainsi des indicateurs pour la gestion et la politique environnementales.

3 Modélisation de l'hydrologie des tourbières de la Cuvette Centrale

Le modèle de référence vise à reproduire le bilan hydrique actuel des tourbières de la Cuvette Centrale dans le bassin du Congo. Plus précisément, il cherche à simuler avec précision¹ les fluctuations saisonnières et interannuelles du niveau des eaux souterraines, à saisir la dynamique et l'évolution de l'humidité du sol et à estimer l'évapotranspiration réelle. Une représentation hydrologique précise de la zone est essentielle pour comprendre sa dynamique du carbone.

3.1 Méthodologie

3.1.1 Le modèle hydrologique MIKE SHE

MIKE SHE est un système de modélisation hydrologique conçu pour simuler l'ensemble de la phase terrestre du cycle hydrologique. Développé par DHI, il englobe tous les processus clés du cycle de l'eau, notamment les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement, les écoulements souterrains saturés et non saturés, ainsi que les écoulements dans les rivières et les lacs. MIKE SHE fait partie de la plateforme MIKE Zero et prend en charge l'intégration SIG.

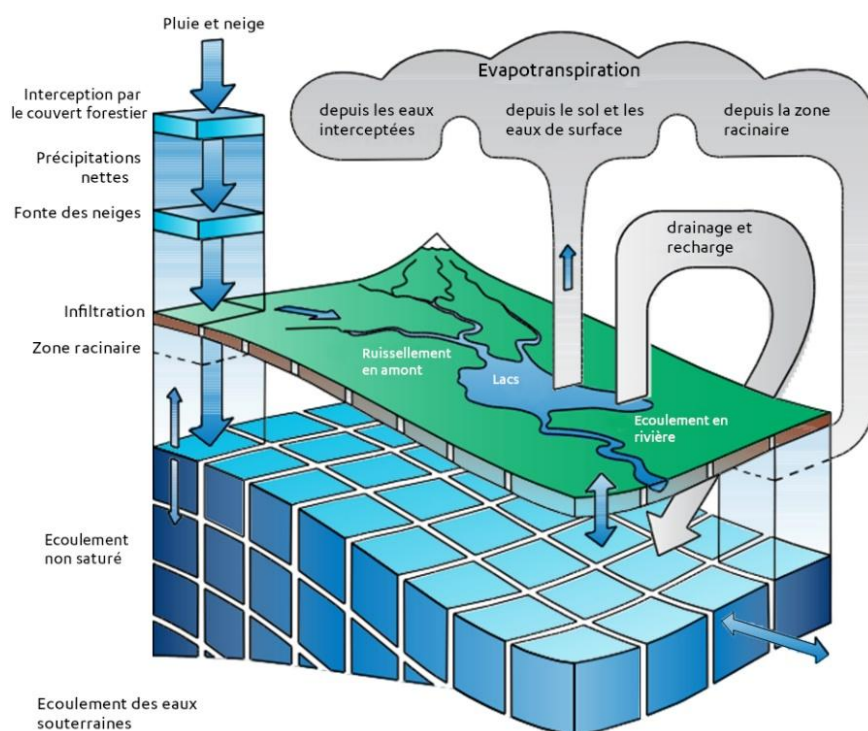


Figure 3-1 MIKE SHE modélise l'ensemble du cycle de l'eau

Les tourbières se caractérisent par des nappes phréatiques peu profondes et des interactions étroites entre l'aquifère et les eaux de surface. Un outil de modélisation intégré de surface et de sous-sol tel que MIKE SHE permet de représenter avec précision cette dynamique complexe. MIKE SHE prend en charge la représentation de processus clés tels que la variation de l'humidité du sol dans la zone non saturée, l'écoulement de surface et l'écoulement latéral dans la zone saturée, qui sont essentiels pour comprendre

¹ Précision : Les ensembles de données disponibles pour le développement du modèle présentent des limites en termes d'applicabilité. Cependant, tous les ensembles de données pouvant être obtenus ont été compilés et soumis à un contrôle qualité. La configuration du modèle et les résultats sont donc précis par rapport à la portée et à la qualité des ensembles de données utilisés.

le comportement des tourbières. L'outil peut utiliser des entrées et des sorties réparties dans l'espace, ce qui permet de modéliser l'hétérogénéité des précipitations, de l'évaporation, de la végétation, du sol et de la topographie.

3.1.2 Construction d'un modèle MIKE SHE

Le modèle MIKE SHE est développé comme suit :

- **Définition des spécifications de simulation** : sélection des moteurs de calcul pour la représentation des écoulements de surface (différence finie) et pour la zone non saturée (équation de Richards) ; sélection des pas de temps de calcul ;
- **Définition du domaine modélisé et de la résolution de la grille du modèle** ;
- **Définition des entrées météorologiques et des caractéristiques d'évapotranspiration en fonction de l'utilisation des sols** : spatialisées à l'échelle de la parcelle, avec les typologies d'utilisation des sols et les propriétés associées (par exemple, le stade de développement de la végétation) ;
- **Définition de la structure du modèle hydrogéologique et des propriétés des couches de la zone saturée** : conductivité hydraulique, rendement spécifique, stockage spécifique
- **Définition des caractéristiques pour la modélisation des processus d'infiltration dans la zone non saturée** : en particulier les profils de sol (teneur en eau du sol, conductivité hydraulique) et le choix des paramètres de modélisation de l'infiltration ;
- **Définition des caractéristiques pour la modélisation des écoulements de surface** : y compris la rugosité de surface, les zones d'interception et les conditions initiales ;
- **Définition des sorties exportées (types de variables) et de leur fréquence d'exportation.**

3.1.3 Processus clés du cycle de l'eau

Les tourbières sont généralement classées en deux types : ombrotrophes et minérales, en fonction de leurs sources d'eau et de nutriments. Les tourbières ombrotrophes, telles que les tourbières hautes, sont alimentées par les précipitations atmosphériques. En revanche, les tourbières minérales, qui comprennent les marais et les forêts marécageuses, sont alimentées par les eaux souterraines ou de surface, ce qui signifie qu'elles reçoivent des apports provenant de sources riches en minéraux telles que les rivières, les lacs ou les écoulements souterrains. On trouve à la fois des tourbières alimentées par les précipitations et des tourbières alimentées par les rivières dans la cuvette centrale (Dargie et al. 2017 ; Crezee, 2022).

Le modèle MIKE SHE modélise les principaux processus du cycle de l'eau : précipitations, évapotranspiration, infiltration à travers la zone non saturée, écoulement souterrain et écoulement de surface. Le bilan hydrique simplifié est le suivant :

$$P + Q = ET + GW + OL + \Delta S$$

où

- P représente les précipitations,
- Q est le débit fluvial (>0 si affluent, <0 si effluent),
- ET est l'évapotranspiration
- GW est l'échange avec les eaux souterraines : >0 pour l'infiltration et <0 pour la recharge des eaux souterraines
- OL est le ruissellement entrant (<0) ou sortant (>0)
- ΔS représente l'accumulation en surface.

L'équilibre entre les précipitations et l'évapotranspiration est essentiel pour comprendre le comportement hydrologique des tourbières. Q résulte du gradient entre le niveau d'eau de la rivière (condition limite) et le niveau des eaux souterraines.

MIKE SHE permet d'ajuster les différents flux. Le volume des précipitations est obtenu à partir des données d'observation terrestre des précipitations. Les paramètres calibrés ici ont été ajustés afin de mieux prédire les volumes d'évapotranspiration (ET), d'échange des eaux souterraines (GW), d'écoulement de surface (OL) et de stockage en surface (ΔS).

3.1.4 Méthodes numériques

L'outil fournit un cadre de modélisation flexible où des méthodes physiques et des approches conceptuelles plus simples peuvent être utilisées pour simuler les différents processus (voir les méthodes disponibles **Error! Reference source not found.**). Les méthodes retenues pour la présente étude sont d'écrites ci-dessous.

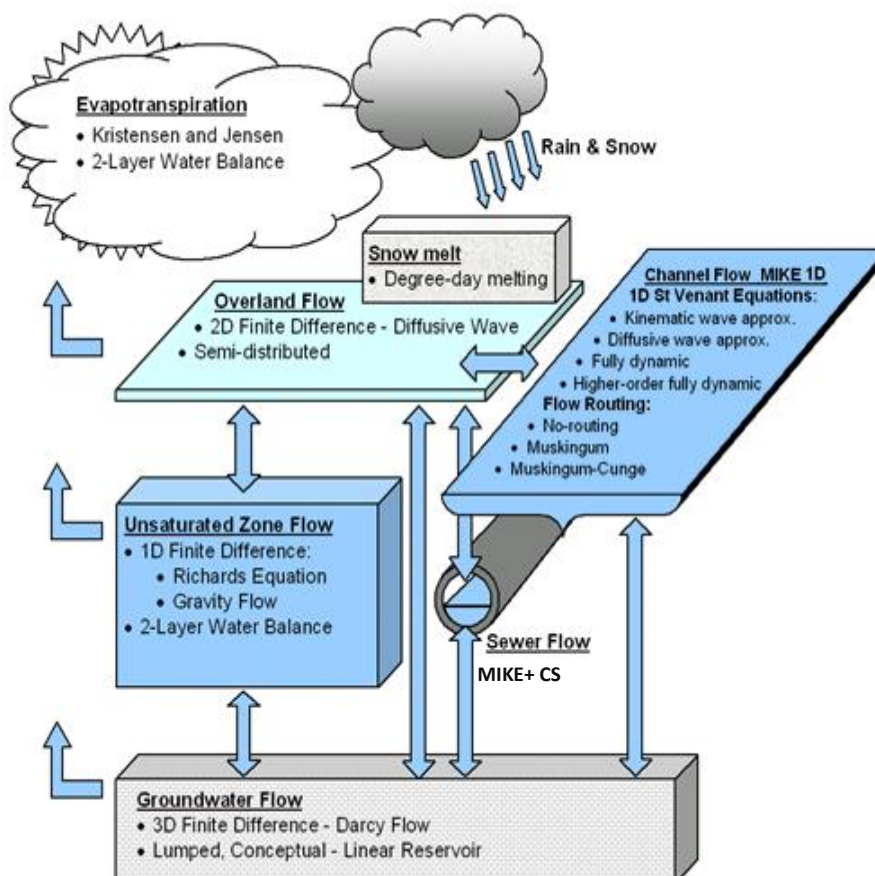


Figure 3-2 Aperçu des méthodes numériques utilisées pour simuler les processus du cycle de l'eau dans MIKE SHE

L'évapotranspiration réelle est calculée à l'aide de la méthode de Kristensen et Jensen, une approche empirique utilisée pour estimer l'évapotranspiration réelle sur la base de l'absorption d'eau par les racines, de l'état d'humidité du sol et du développement des cultures, offrant une alternative simple et rapide aux modèles plus physiques.

Le ruissellement est simulé à l'aide de la méthode des différences finies 2D avec approximation par ondes diffusives, qui inclut les termes de frottement au fond, de gravité et de pression hydrostatique, en supposant que les forces d'inertie sont négligeables. Cette méthode est adaptée à la modélisation de la propagation lente des ondes de crue et du ruissellement de surface sur de grandes surfaces.

L'équation de Richards modélise l'écoulement vertical non saturé dans le sol à l'aide d'une approche basée sur la capillarité totale, permettant une simulation détaillée de la teneur en eau et des flux, et est recommandée pour les sols à texture fine ou lorsqu'une grande précision des profils d'humidité est requise.

Dans la zone saturée, l'écoulement des eaux souterraines est résolu à l'aide de la méthode des différences finies 3D basée sur la loi de Darcy, ce qui permet une simulation détaillée des niveaux des eaux souterraines, de leur écoulement et de leur interaction avec les eaux de surface, ce qui est particulièrement important pour les systèmes hydrogéologiques complexes.

3.1.5 Résultats générés

Des résultats spatialisés sont générés par le modèle pour toute la période de simulation. Les résultats les plus pertinents dans ce contexte sont les suivants :

- Niveaux des eaux souterraines et profondeur de la nappe phréatique²
- La teneur en eau du sol et les niveaux de saturation
- Les éléments clés du bilan hydrique : évapotranspiration réelle, infiltration dans la zone saturée, écoulement de surface et écoulement latéral des eaux souterraines vers les limites du domaine modélisé.

Les niveaux des eaux souterraines et la teneur en eau du sol sont ensuite utilisés pour estimer la dynamique du dioxyde de carbone (voir la section 4).

3.2 Développement du modèle

3.2.1 Domaine du modèle et topographie

Les tourbières se développent souvent en structures en forme de dôme, appelées dômes de tourbe, en raison de l'accumulation de matière organique au fil des siècles dans des conditions d'engorgement constant et de précipitations abondantes. Ces dômes sont généralement plus élevés au centre, où l'accumulation de tourbe est la plus importante, et s'inclinent doucement vers l'extérieur, créant un gradient naturel qui favorise l'écoulement latéral de l'eau du dôme vers ses bords.

Les informations sur le type de sol, l'utilisation des terres, la topographie, etc. dans les tourbières sont limitées, et les informations sur les variations spatiales sont particulièrement rares. Pour cette raison, il est difficile de développer un modèle géoréférencé des tourbières. À la place, un modèle « expérimental » - non géoréférencé - est développé, en s'appuyant sur autant d'informations que possible provenant des tourbières.

Le modèle est configuré sous la forme d'un rectangle de 40,00 km de long et 2,88 km de large (voir Figure 3-3). La taille des cellules est de 80 m x 80 m, ce qui donne une longueur de 500 cellules et une largeur de 36 cellules. Le rectangle représente une coupe à travers un dôme de tourbe. Pour simplifier, on suppose que le rectangle est aligné de manière à ce que la direction y soit sud-nord et la direction x ouest-est. La coupe conceptuelle du dôme est située entre deux rivières à l'ouest et à l'est du modèle. Cela permet de simuler à la fois les tourbières pluviales au centre du dôme et les tourbières fluviales à la périphérie du dôme.

² La recherche sur les eaux souterraines dans le bassin du Congo reste limitée, ce qui se traduit par une pénurie de données empiriques pour étayer la validation des simulations du niveau des eaux souterraines.

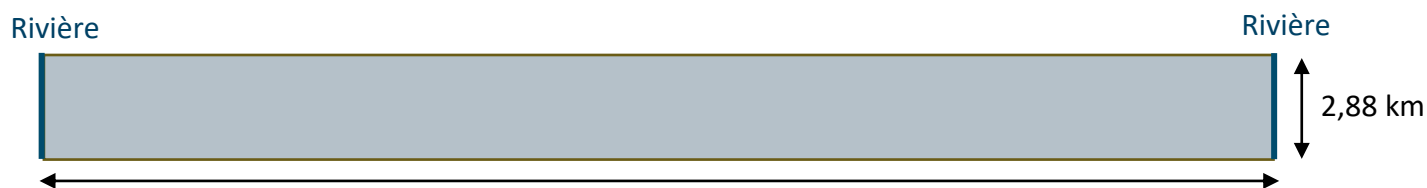


Figure 3-3 Zone du modèle conceptuel 40 km

Le modèle est configuré pour la période 2000-2019. Le dôme est supposé être entièrement saturé au début de la simulation, avec un niveau d'eau initial correspondant à la topographie.

Les mesures topographiques ont été effectuées dans les tourbières de la Cuvette Centrale par Dargie et al. (2017) et Crezee et al. (2022). Leurs résultats indiquent que les dômes de tourbe de la Cuvette Centrale sont extrêmement plats, avec des gradients topographiques très faibles malgré leur grande étendue spatiale. Selon Crezee, ces dômes ne s'élèvent généralement que de 1 à 3 mètres sur des dizaines de kilomètres, créant un profil convexe subtil qui n'en est pas moins important sur le plan hydrologique. Un dôme très plat est donc modélisé.

En fonction de la topographie environnante et des niveaux d'eau, un dôme a été créé avec une altitude de 307 m à une extrémité et de 309 m à l'autre extrémité. Le dôme atteint une hauteur maximale de 3 m. La hauteur du dôme est constante dans la direction y, représentant ainsi une coupe à travers le dôme. Le dôme vu de côté est représenté dans la figure Figure 3-4. Les pentes sont plus élevées aux bords du dôme.

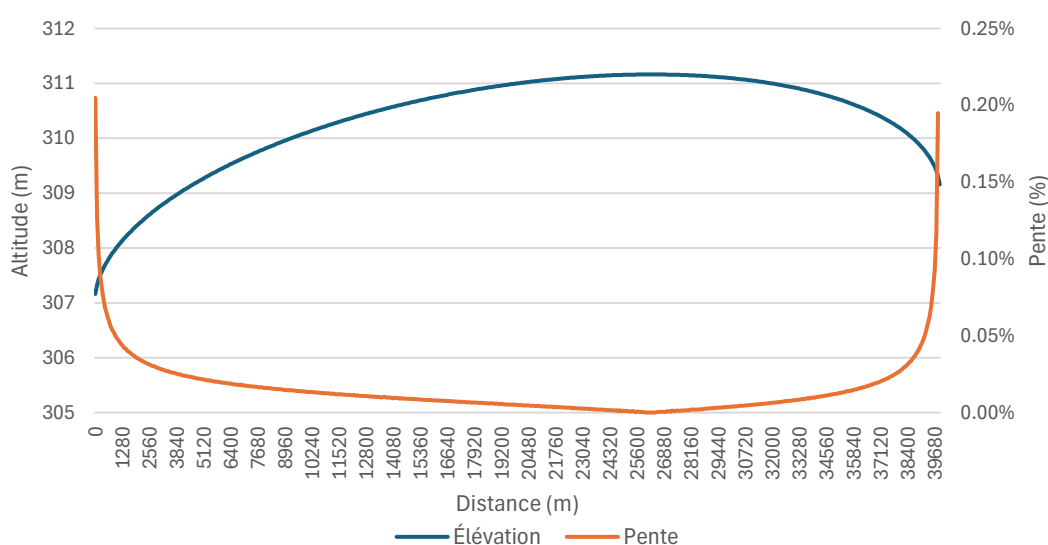


Figure 3-4 Représentation du dôme vu de côté. La hauteur du dôme est constante dans la direction y.

3.2.2 Évapotranspiration

Dans MIKE SHE, l'évapotranspiration réelle est calculée à l'aide de la méthode de Kristensen et Jensen. Cette approche repose sur plusieurs paramètres physiques, notamment l'évapotranspiration de référence, l'indice de surface foliaire (LAI) et la profondeur des racines.

L'évapotranspiration de référence est calculée à l'aide de l'équation de Priestley-Taylor, qui est une simplification de l'équation bien connue de Penman-Monteith :

$$ET_0 = \alpha \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{(R_n - G)}{\lambda}$$

Où :

- ET_0 : évapotranspiration de référence
- α : coefficient de Priestley-Taylor (généralement $\sim 1,26$ dans des conditions d'irrigation adéquate)
- Δ : Pente de la courbe de pression de vapeur saturante
- γ : constante psychrométrique
- R_n : Rayonnement net à la surface
- G : Flux thermique du sol (souvent négligeable à l'échelle quotidienne)
- λ : chaleur latente de vaporisation

Le rayonnement net est calculé à partir de la température quotidienne moyenne, des températures quotidiennes minimales et maximales, de l'humidité relative et de la latitude de la zone. Les données de température sont obtenues à partir du modèle météorologique numérique ERA5, et les températures moyennes du bassin versant sont calculées pour le bassin versant indiqué dans Figure 3-7 en suivant la même procédure que pour les précipitations dans la section 3.2.2.

Afin de mieux correspondre aux niveaux observés de la nappe phréatique, la série chronologique d'évapotranspiration de référence calculée à l'aide de la méthode Priestley-Taylor a ensuite été multipliée par 1,05 (voir la section sur l'étalonnage).

Le LAI est dérivé des ensembles de données d'observation de la Terre fournis par Copernicus et MODIS et intègre les variations saisonnières. Une valeur mensuelle moyenne extraite pour l'étendue de la Cuvette Centrale est utilisée comme paramètre d'entrée dans le modèle. La profondeur des racines est supposée constante à 1 mètre.

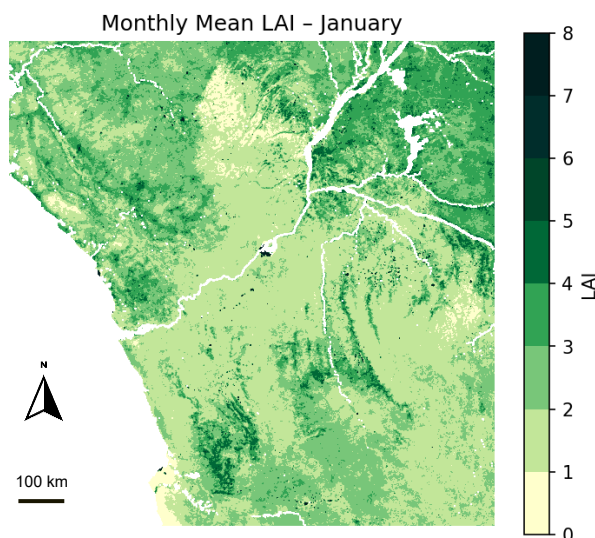


Figure 3-5 Indice de surface foliaire (LAI) mensuel moyen en janvier entre 2020 et 2024
Source : Ensemble de données MODIS Earth Observation MYD15A2H

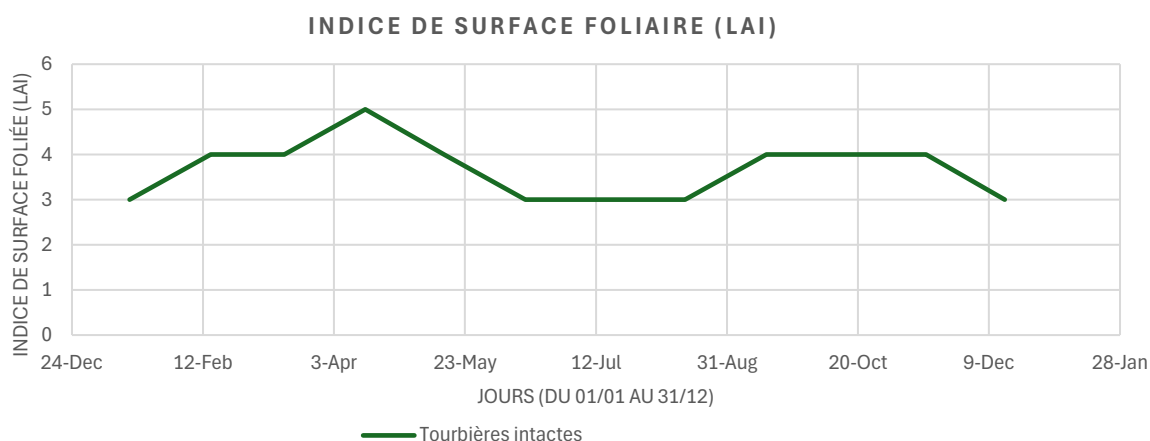


Figure 3-6 Variations annuelles de l'indice de surface foliaire (LAI) utilisé dans le modèle
 Dérivé de l'ensemble de données MODIS Earth Observation MYD15A2H

3.2.3 Précipitations

Les séries chronologiques quotidiennes des précipitations sont obtenues à partir du modèle numérique de prévision météorologique ERA5 de l'ECWMF (Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme). ERA5 est un produit maillé couvrant une période continue allant du 2 janvier 1981 au 10 janvier 2025, date à laquelle les données ont été traitées. Les données maillées sont converties en une série chronologique unidimensionnelle des précipitations en calculant la moyenne des précipitations du sous-bassin versant dans les tourbières indiquées dans Figure 3-5. Le sous-bassin versant couvre la zone de drainage de la rivière Likouala aux Herbes et est considéré comme représentatif.



Figure 3-7 Sous-bassin versant représentatif (en rouge) situé dans les tourbières du Congo.

ERA5 fournit une longue série chronologique continue permettant d'analyser l'évolution du climat au cours des 43 dernières années. Figure 3-10 montre les précipitations quotidiennes moyennes annuelles ainsi que l'évapotranspiration de référence. Sur les 43 années, ERA5 montre une baisse des précipitations et une augmentation de l'évapotranspiration de référence à partir du graphique supérieur.

Les fluctuations mensuelles des précipitations quotidiennes et de l'évapotranspiration potentielle sont détaillées Figure 3-8³. On distingue un régime pluviométrique saisonnier bimodal avec deux saisons sèches et deux saisons humides. L'évapotranspiration de référence varie moins d'un mois à l'autre. Les séries chronologiques climatiques annuelles sont analysées pour la période 1981-2024 (voir Figure 3-9). Une tendance à la hausse est observable pour l'évapotranspiration de référence. Il semble y avoir une tendance à la baisse pour les précipitations, ce qui est cohérent avec les études scientifiques récentes menées dans le bassin du Congo (Sonwa et al., 2020 ; Cook et al., 2020). Cependant, cette tendance semble moins prononcée depuis 2000 (voir Figure 3-10).

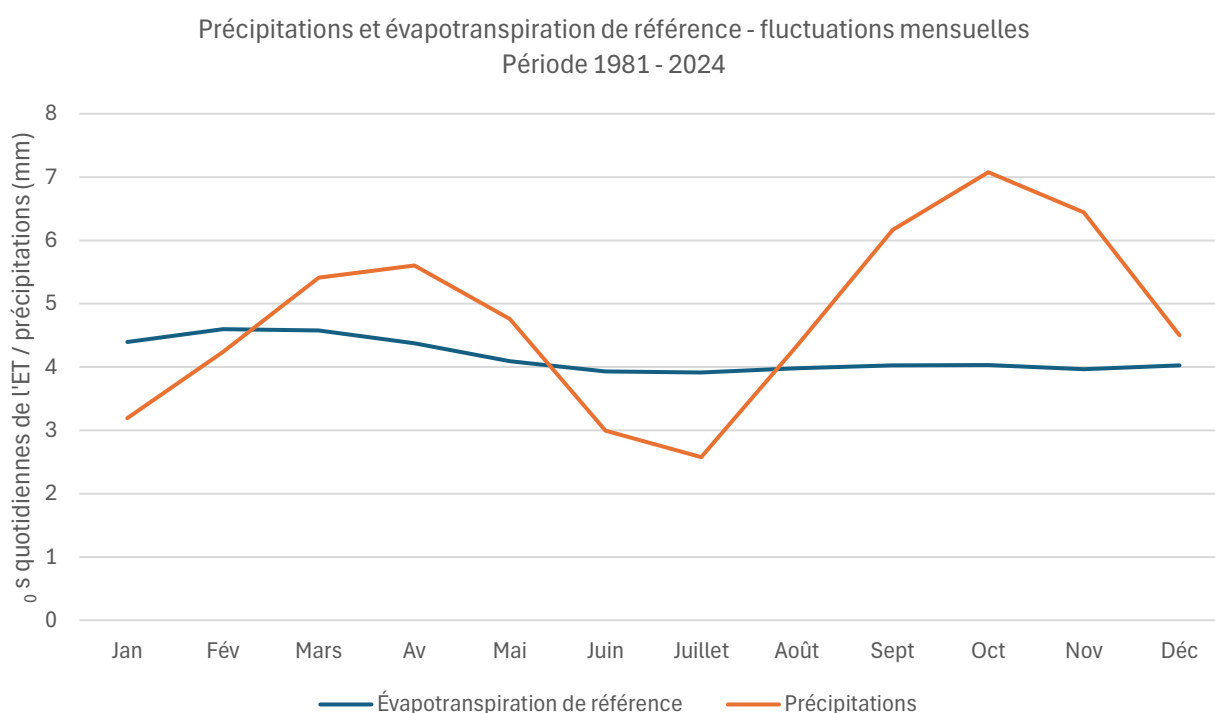


Figure 3-8 Fluctuations mensuelles des précipitations quotidiennes et de l'évapotranspiration de référence pour la période 1981-2024

³ Remarque : la validation de ces ensembles de données mondiaux est intrinsèquement difficile, compte tenu des nombreuses incertitudes liées à la représentation des données climatiques dans la cuvette centrale. Le recours aux connaissances locales pour valider ces ensembles de données mondiaux pourrait contribuer à atténuer ce problème. Cependant, comme l'ont montré plusieurs études, les connaissances locales en matière de données sont également ambiguës.

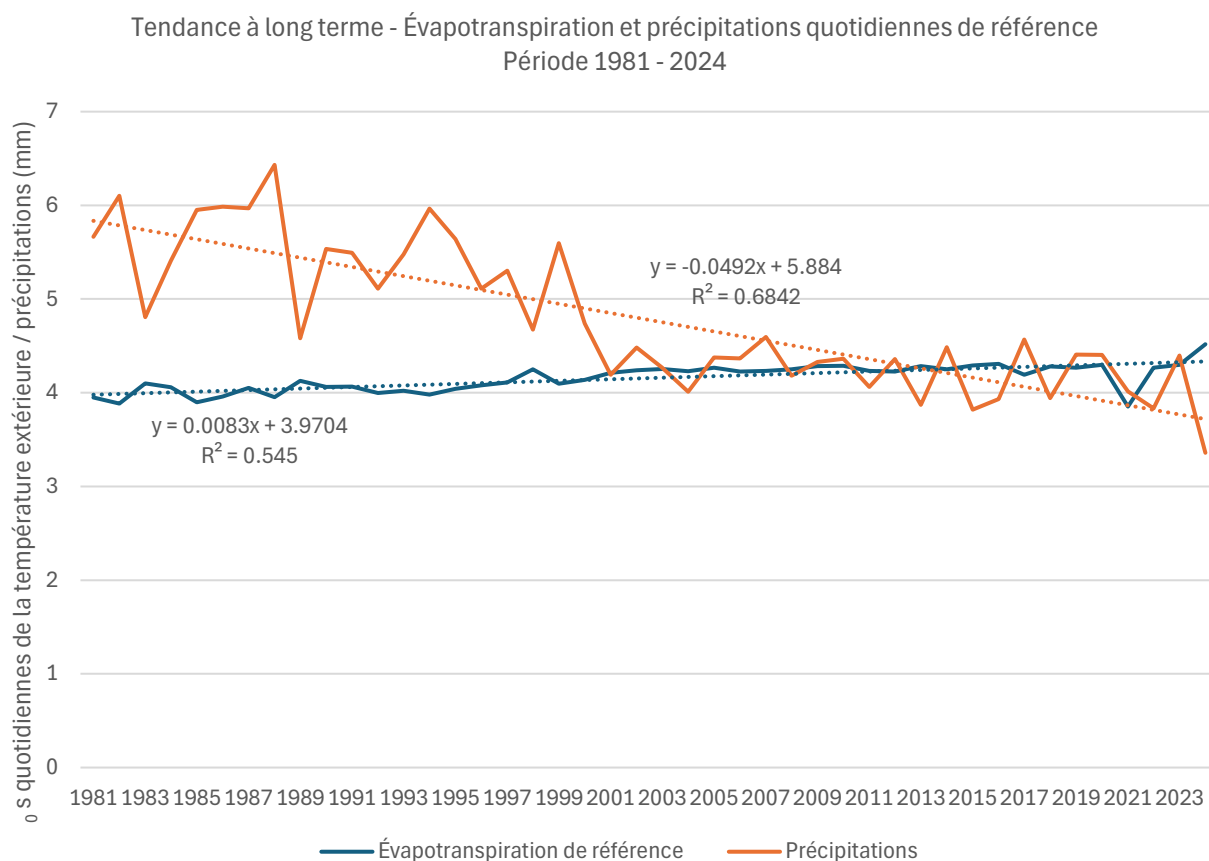


Figure 3-9 Tendances à long terme des précipitations quotidiennes et de l'évapotranspiration de référence pour la période 1981-2024

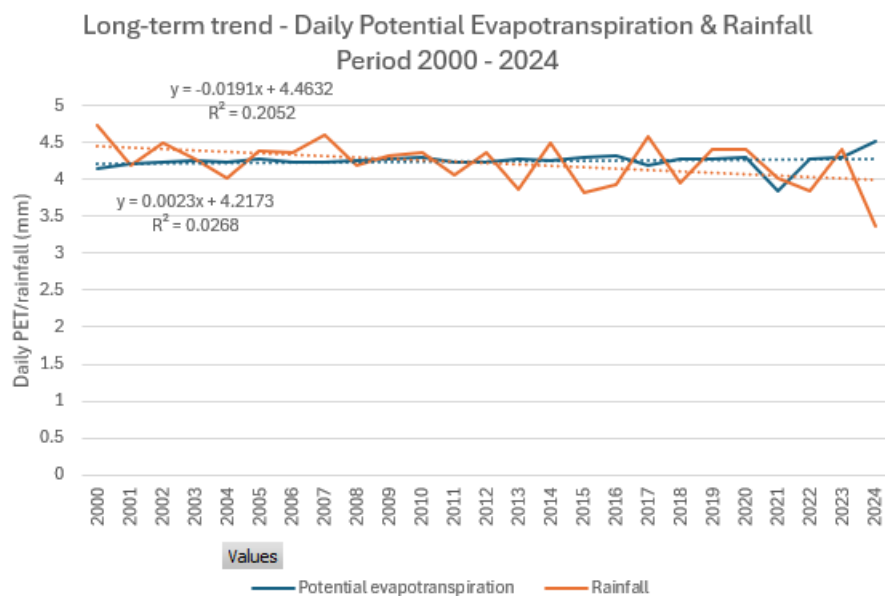


Figure 3-10 Précipitations annuelles (orange) et évapotranspiration de référence (bleu) avec courbes de tendance linéaires

3.2.4 Zone non saturée

L'infiltration dans la zone non saturée est modélisée à l'aide de l'équation de Richard. Cette équation nécessite les paramètres suivants :

- Conductivité hydraulique à saturation (K_{sat})
- Paramètres de forme de la courbe de conductivité (α , n , l)
- Teneur en humidité saturée (θ_s)
- Teneur en humidité résiduelle (θ_r)
- Paramètres de forme de la courbe de rétention (α , n)

Aucune mesure de terrain n'a été effectuée pour ces paramètres dans la Cuvette Centrale⁴. Les valeurs des paramètres d'autres tourbières sont donc utilisées ici. Apers et al. (2022) ont développé un modèle de tourbière tropicale et l'ont utilisé pour simuler l'hydrologie des tourbières de la Cuvette Centrale. Ils ont choisi les propriétés hydrauliques du sol sur la base d'une analyse approfondie de la littérature sur les tourbières tropicales. La conductivité hydraulique à saturation utilisée dans le modèle est tirée de cette étude. D'autres paramètres, tels que les paramètres de forme des courbes de conductivité et de rétention, ont été tirés d'un modèle de tourbière précédent au Danemark et calibrés pour mieux correspondre à la situation de la Cuvette Centrale. Les teneurs en humidité saturée et résiduelle (respectivement 0,80 et 0,29) ont également été tirées du modèle de tourbière danois précédent, mais sont cohérentes avec les estimations d'Apers (0,88 et 0,3).

Tableau 3-1 Paramètres décrivant les propriétés du sol utilisés dans la configuration du modèle

Paramètre	Valeur
Conductivité hydraulique à saturation K_s (m/s)	6×10^{-5}
Paramètres de forme de la courbe de conductivité	$\alpha = 0,067 \text{ cm}^{-1}$
	$n = 1,446$
	$l = 0,5$
Teneur en humidité saturée θ_s	0,80
Teneur en eau résiduelle θ_r	0,29
Paramètres de forme de la courbe de rétention	$\alpha = 0,2 \text{ cm}^{-1}$
	$n = 1,813$
Rendement spécifique* (θ_s , θ_{FC})	0,47

*où θ_{FC} est la teneur en eau à la capacité au champ

La colonne de sol est discrétisée verticalement en 13 cellules, dont la profondeur varie de 5 cm dans les points de grille supérieurs à 1 m au bas du profil. Cette discrétisation permet de mieux représenter les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

3.2.5 Zone saturée

La zone saturée est la composante essentielle du modèle, car les tourbières sont généralement inondées et se trouvent donc dans la zone saturée. La zone saturée est constituée d'une épaisse couche de tourbe recouvrant une base argileuse.

Selon les mesures effectuées par Dargie le long de transects dans les tourbières interfluviales de la République du Congo, la tourbe dans cette région a une profondeur moyenne de 2,4 m et une profondeur maximale de 5,9 m. Crezee (2022) a mesuré l'épaisseur de la tourbe le long de transects en République démocratique du Congo (RDC) et a constaté que la profondeur moyenne de la tourbe était légèrement supérieure (3,3 m), atteignant 7 m dans un transect. Une profondeur moyenne de tourbe de 3,3 m a donc

⁴ Il est recommandé de prévoir à l'avenir la collecte de données in situ afin d'améliorer la qualité du modèle hydrologique.

été retenue dans ce modèle. La profondeur de la tourbe varie entre 1,15 m aux bords du modèle et 4 m au centre.

La méthode des différences finies 3D basée sur la loi de Darcy nécessite les paramètres suivants dans MIKE SHE :

- Conductivité hydraulique verticale et horizontale (K)
- Rendement spécifique (S_y) (= porosité)
- Stockage spécifique (S_s)

La conductivité hydraulique verticale de la tourbe est fixée à 10^{-5} m/s. Cette valeur est du même ordre de grandeur que la conductivité hydraulique à saturation dans la zone non saturée dérivée de l'article d'Apers et al (6×10^{-5} m/s). Cependant, elle est légèrement inférieure afin de tenir compte de la compression de la tourbe en profondeur. La tourbe a tendance à s'accumuler en couches horizontales, ce qui la rend anisotrope avec une conductivité plus élevée dans les directions horizontales x et y que dans la direction verticale z. Une conductivité horizontale plus élevée est donc prise ici. Les valeurs des paramètres sont détaillées dans le tableau Tableau 3-2 . Les propriétés hydrauliques de l'argile sont tirées de projets antérieurs.

Tableau 3-2 Propriétés physiques de la zone saturée

Paramètre	Tourbe	Argile
Conductivité hydraulique verticale K_v (m/s)	10^{-5}	10^{-7}
K_h s de conductivité hydraulique horizontale (m/s)	10^{-4}	5×10^{-6}
Rendement spécifique S_y	0,47	0,15
Stockage spécifique S_s	0,001	0,004

3.2.6 Écoulement superficiel

L'écoulement superficiel est simulé à l'aide de la méthode des différences finies 2D avec approximation par onde diffusive. L'un des paramètres régissant la vitesse d'écoulement superficiel est le coefficient de Manning-Strickler, qui varie en fonction de l'utilisation des sols. Plus la valeur du coefficient est faible, plus la zone est accidentée et plus l'écoulement est lent. Un coefficient de rugosité de $10 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$ est utilisé dans cette étude.

Un autre paramètre utilisé pour configurer la composante écoulement de surface d'un modèle MIKE SHE est le stockage de rétention. Il sert à limiter la quantité d'eau pouvant s'écouler à la surface du sol. La profondeur de l'eau stagnante doit dépasser le stockage de rétention avant que l'eau ne s'écoule sous forme de ruissellement vers la cellule adjacente. Par exemple, si le stockage de rétention est fixé à 2 mm, la profondeur de l'eau à la surface doit dépasser 2 mm avant qu'elle ne puisse s'écouler sous forme de ruissellement. Cela équivaut à retenir l'eau de surface dans de petits étangs ou des dépressions au sein d'une cellule de la grille.

La surface du sol dans les forêts tropicales tourbeuses présente des microformes : des zones surélevées appelées « hummocks » et des dépressions appelées « hollows ». Cette microtopographie affecte le débit latéral, car l'eau est stockée dans les hollows avant de s'écouler latéralement. Lampela et al. (2016) ont étudié la microtopographie des tourbières tropicales naturelles en Indonésie et ont constaté que les mesures d'élévation de la surface peuvent être approximées par une distribution normale à moyenne nulle avec un écart type σ de 16 cm. Pour une distribution normale, l'erreur absolue moyenne (MAE) peut être approximée de la manière suivante :

$$MAE \approx \sigma \times \sqrt{\frac{2}{\pi}} \approx 13 \text{ cm}$$

Où σ est l'écart type de l'échantillon

La valeur de stockage de rétention est donc prise comme étant $13/2 = 6,5$ cm.

3.2.7 Conditions aux limites

Les conditions aux limites nord et sud du dôme sont des limites sans écoulement. On suppose que l'eau s'écoule vers ou depuis les rivières de chaque côté du dôme et que l'écoulement dans la direction y est négligeable.

Dans la configuration alimentée par les précipitations, les limites ouest et est ont une hauteur constante fixée au niveau de la surface.

Dans le scénario alimenté par les rivières, des séries chronologiques de niveaux d'eau variables dans le temps sont utilisées pour les limites ouest et est du modèle de dôme de tourbe. Ces séries chronologiques sont tirées de la base de données sur les séries chronologiques hydrologiques des eaux intérieures (DAHITI), développée par l'Institut allemand de recherche géodésique (voir Schwatke et al., 2015). La base de données compile les mesures altimétriques satellitaires de plusieurs missions depuis 1985.

Des stations altimétriques virtuelles sont disponibles dans la Cuvette Centrale, notamment le long des rivières Likouala, Sangha, Likouala aux Herbes et Oubangui en République du Congo (RoC), et des cours d'eau Congo, Ngiri, Lulonga et Ruki ainsi que du lac Tumba en République démocratique du Congo (RDC). Sur la base des données disponibles pour la période de simulation 2012-2019, des stations ont été sélectionnées dans les cours inférieurs des rivières Likouala aux Herbes, Oubangui et Ngiri. L'emplacement de ces stations et leur couverture de données sont indiqués dans la Figure 3.11. Si toutes les stations sélectionnées fournissent une couverture continue pour la période 2016-2019, la couverture est plus limitée pour la période 2012-2015, une seule station fournissant des données pour chacun des trois fleuves sélectionnés.

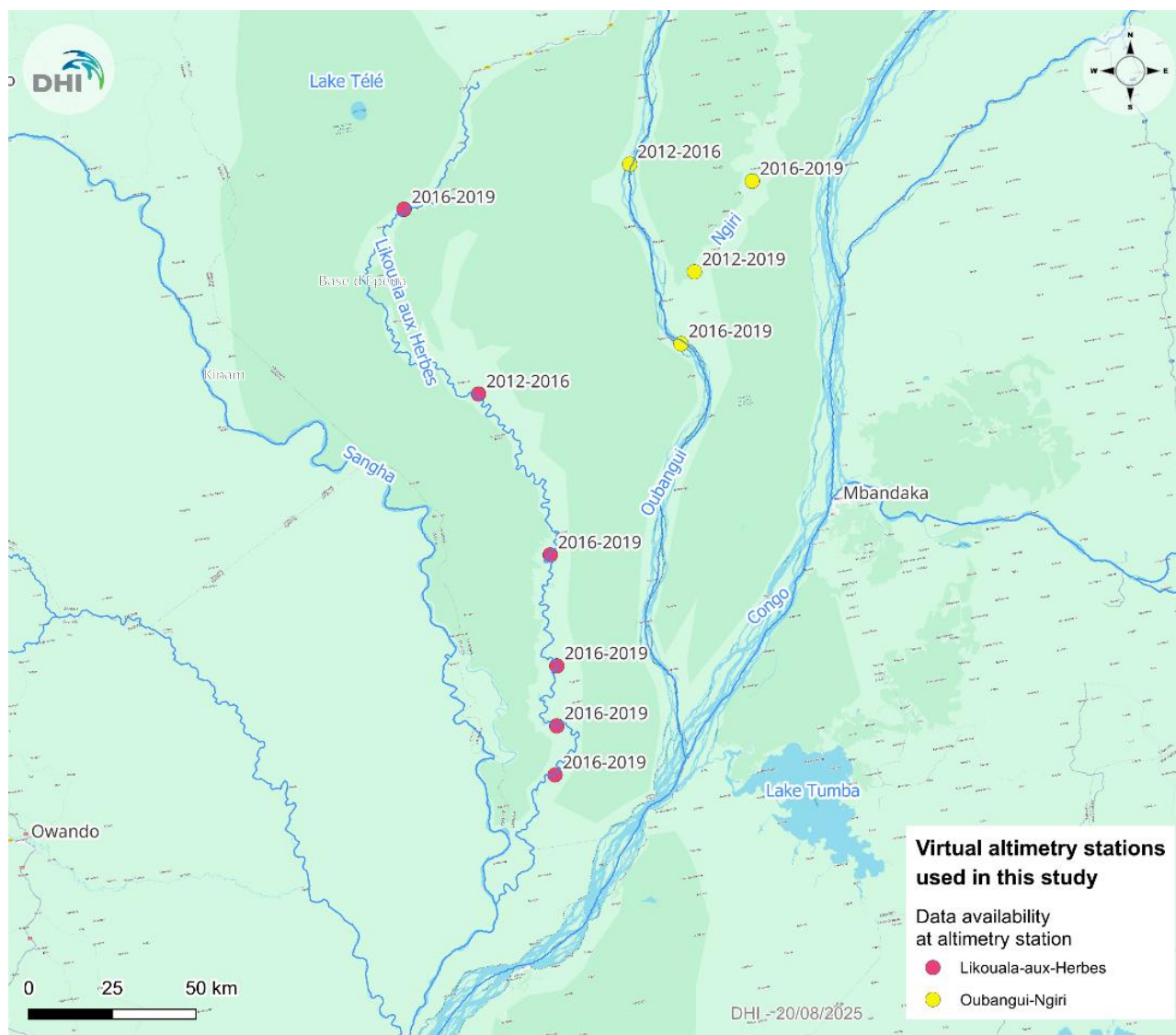


Figure 3-11 Emplacement des stations altimétriques sélectionnées et périodes de couverture des données pendant la période de simulation 2012-2019

Les données sont moyennées sur deux grappes et utilisées pour définir les limites du modèle : les stations situées le long de la rivière Likouala-aux-Herbes sont utilisées pour la limite occidentale, tandis que celles situées le long des rivières Oubangui et Ngiri sont utilisées pour la limite orientale. Les séries chronologiques moyennes sont ensuite lissées à l'aide d'un filtre gaussien. Pour 2012, aucune donnée n'étant disponible pour le groupe Likouala-aux-Herbes, les données du groupe Oubangui-Ngiri sont appliquées aux deux groupes.

Les niveaux d'eau des deux groupes sont ajustés de manière à ce que leurs valeurs moyennes sur la période de simulation correspondent à l'élévation du sol à la limite respective. De cette manière, les niveaux d'eau moyens aux limites sont cohérents entre les configurations alimentées par les pluies et celles alimentées par les rivières. Les séries chronologiques des niveaux d'eau aux limites pour la période de simulation sont présentées dans Figure 3-12. L'amplitude annuelle moyenne entre les niveaux d'eau maximum et minimum est légèrement plus élevée dans le groupe Oubangui-Ngiri (3,8 m) que dans le groupe Likouala-aux-Herbes (3,55 m).

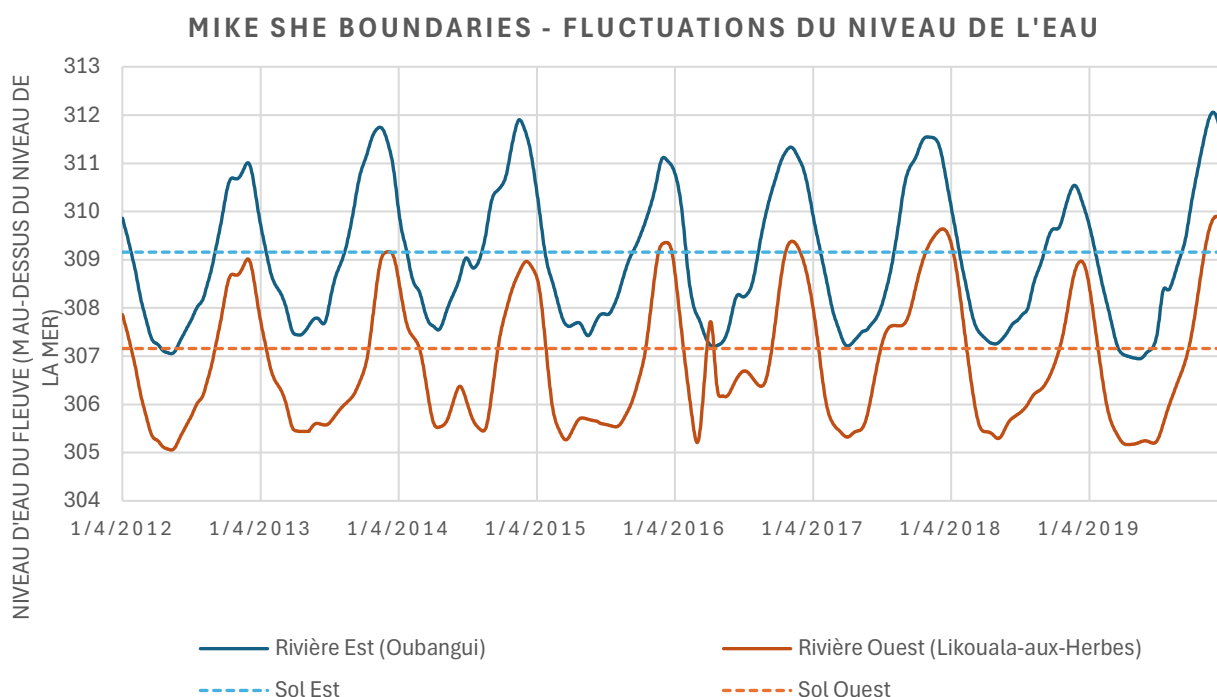


Figure 3-12 Niveaux d'eau fluctuants utilisés comme limites du modèle

Des mesures météorologiques et hydrométriques ont été effectuées à la base d'Epena, située dans le cours supérieur de la rivière Likouala aux Herbes. Ces données ont récemment été publiées et analysées dans un rapport conjoint de la Réserve Communautaire du Lac Télé et de la Wildlife Conservation Society⁵. Les niveaux d'eau mesurés à Epena entre 2016 et 2017 sont comparés dans **Error! Reference source not found.** avec les niveaux d'eau moyens du groupe Likouala aux Herbes.

Les deux ensembles de données montrent une amplitude similaire de 4 à 5 m entre les niveaux bas et élevés. Si les tendances générales du niveau d'eau sont comparables, les séries chronologiques obtenues à partir de l'observation de la Terre affichent un décalage de 1 à 2 mois par rapport aux mesures sur le terrain. Ce décalage est normal, car les valeurs dérivées des satellites sont calculées comme des moyennes à partir de stations virtuelles situées en aval d'Epena (voir l'emplacement des stations dans Figure 3-11). Cette analyse concise à Epena suggère que l'approche par observation terrestre fournit des estimations fiables des niveaux d'eau des rivières.

⁵ Romani, T., & Ossere, J. (2025, avril). Rapport d'expertise – Météo (température et pluie) et hauteur d'eau de la rivière Likouala aux Herbes à la Base d'Epena (2000-2023) (Version 1). Ministère de l'Économie Forestière ; Réserve Communautaire du Lac Télé ; Wildlife Conservation Society.

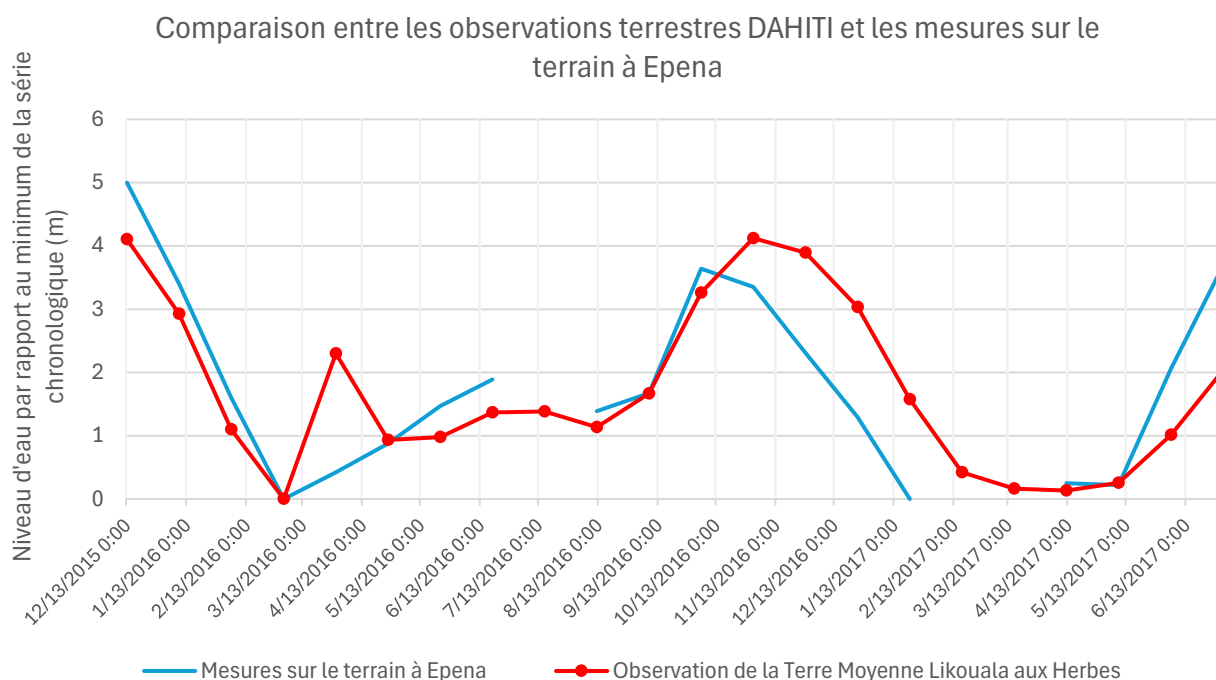


Figure 3-13 Comparaison entre les niveaux d'eau obtenus par observation de la Terre et les mesures sur le terrain à Epena

3.3 Calage des modèles et résultats

L'étalonnage consiste à s'assurer que les modèles reflètent fidèlement l'hydrologie des tourbières. Les différents paramètres du modèle sont ajustés en comparant les résultats du modèle avec les mesures tirées de la littérature.

Il existe quelques mesures du niveau de la nappe pour la zone afin de calibrer le modèle hydrologique. Dargie et al. (2017) ont mesuré la profondeur de la nappe phréatique le long de plusieurs transects dans les tourbières interfluviales de la République du Congo. Crezee et al. (2022) ont effectué des mesures de la nappe phréatique le long de transects dans les tourbières interfluviales et influencées par les cours d'eau de la République démocratique du Congo (RDC).

Le modèle hydrologique étant de nature conceptuelle, il serait erroné de tenter de faire correspondre ses résultats simulés à une série chronologique observée à un endroit donné. L'objectif de l'étalonnage du modèle est plutôt de reproduire avec précision le niveau moyen de la nappe phréatique et ses fluctuations saisonnières.

3.3.1 Données d'étalonnage

Les mesures de la profondeur de la nappe phréatique ont été effectuées par Dargie et al. le long de plusieurs transects dans la Cuvette centrale congolaise (voir Figure 3-14). Il existe des schémas communs entre les transects. La nappe phréatique est basse entre mars et juin et haute entre septembre et décembre. La nappe phréatique reste au-dessus du sol pendant plusieurs mois consécutifs : la forêt est inondée. Au cours de la période 2013-2014, la nappe phréatique moyenne se situe à peu près au niveau de la surface.

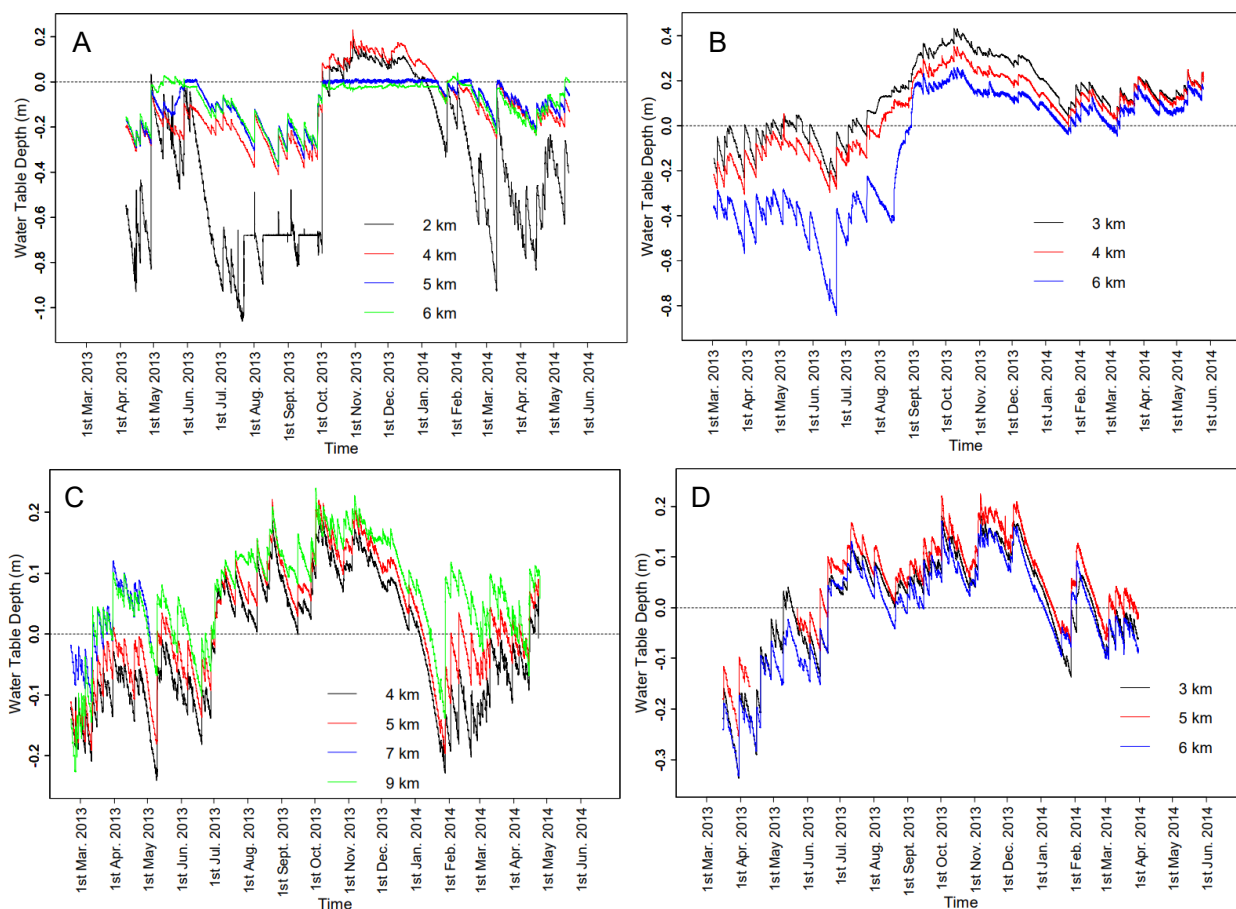


Figure 3-14 Séries chronologiques des niveaux de la nappe phréatique le long des transects interfluviaux A) Bondoki, B) Bondzale, C) Ekolongouma et D) Itanga. Les distances par rapport au fleuve situé au début de chaque transect sont indiquées. La série chronologique en noir dans le transect A ne se trouve pas dans une tourbière, mais dans une forêt inondée de façon saisonnière.

Source : Dargie et al., 2015

Crezee (2022) a mesuré la profondeur de la nappe phréatique le long de plusieurs transects dans les tourbières de la RDC en 2018-2019 (voir Figure 3-15). Les deux transects diffèrent car Lokolama est beaucoup moins influencé par les cours d'eau qu'Ikelemba. Le niveau de la nappe est bas entre juin et août 2019 et élevé en 2018 et fin 2019. La profondeur moyenne du niveau de la nappe se situe entre 0 et -20 cm selon le point du transect.



Figure 3-15 Série chronologique des niveaux de la nappe phréatique le long des transects Lokolama et Ikelemba. Les distances par rapport au fleuve situé au début de chaque transect sont indiquées.

Source : Crezee, 2022

3.3.2 Profondeur de la nappe phréatique – Scénario pluvial

Les profondeurs de la nappe phréatique pour un transect le long de l'axe x sont affichées Figure 3-16 pour la période 2012-2019. Les séries chronologiques du niveau d'eau sont similaires entre les scénarios pluviaux et fluviaux pour les points situés à 10 km et 25 km. En ce qui concerne le point situé à 2 km de la limite ouest, seuls les résultats du modèle pluvial sont inclus.

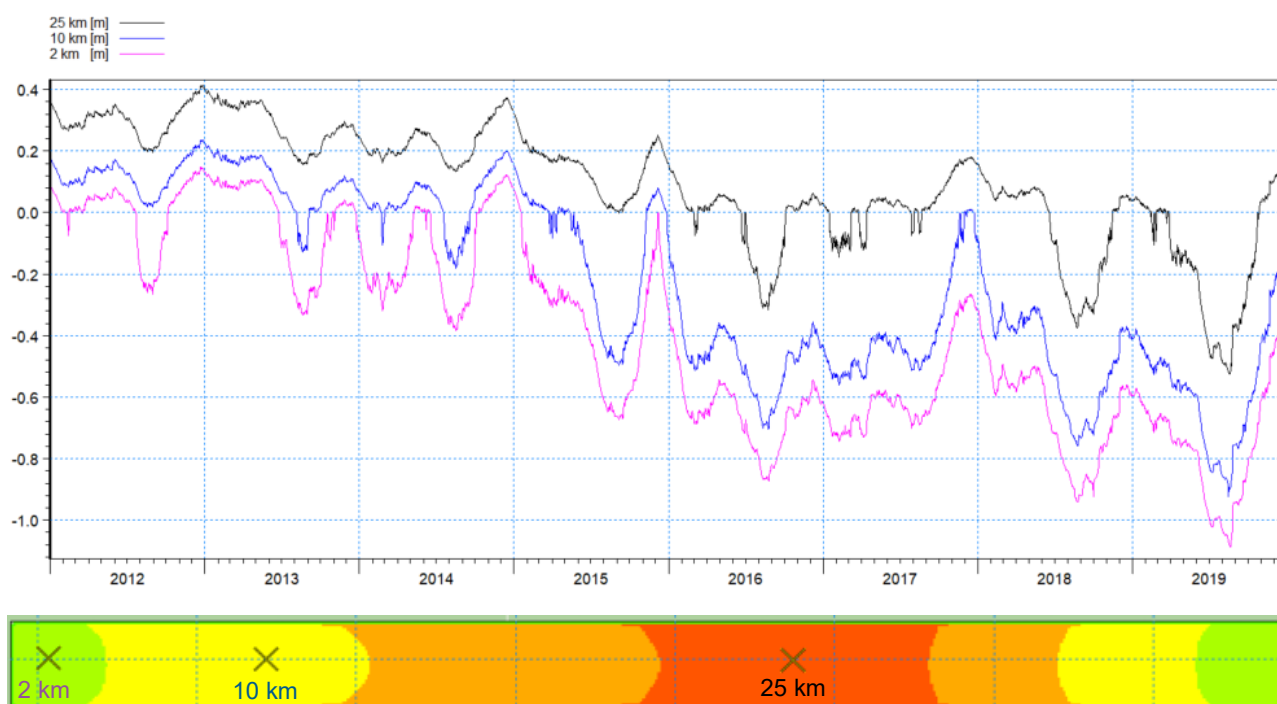


Figure 3-16 Profondeur simulée de la nappe phréatique le long d'un transect dans la direction x. Les distances par rapport à la rivière située au début du transect sont indiquées.

La profondeur de la nappe phréatique diminue progressivement en tous points tout au long de la période de simulation. Cette tendance à l'assèchement s'explique par l'augmentation concomitante de la température et donc de l'évapotranspiration de référence, ainsi que par la diminution des précipitations (voir section 3.2.2). Les fluctuations saisonnières sont clairement perceptibles : le niveau de la nappe est élevé pendant la saison humide (septembre à novembre, mars à mai) et bas pendant la saison sèche.

En raison des caractéristiques spécifiques du rendement de la tourbe, où l'élévation du niveau de la nappe dépend de la porosité et de la conductivité hydraulique de la tourbe, une quantité donnée de précipitations entraînera des changements plus importants dans le niveau de la nappe sous la surface de la tourbe qu'au-dessus. Cela explique pourquoi les variations du niveau de la nappe sont plus importantes sous terre qu'en surface.

Dans le modèle, la profondeur de la nappe phréatique diminue avec la distance par rapport au fleuve. Cela s'explique par l'augmentation du débit latéral des eaux souterraines vers les rivières dans les zones périphériques escarpées (voir le profil de pente Figure 3-4). Les niveaux moyens de la nappe phréatique par rapport à la surface et à l'élévation de la surface sont superposés dans

Figure 3-17 . Les profondeurs de la nappe phréatique diminuent aux bords du modèle, car la profondeur de la nappe phréatique est fixée à 0 aux limites ouest et est.

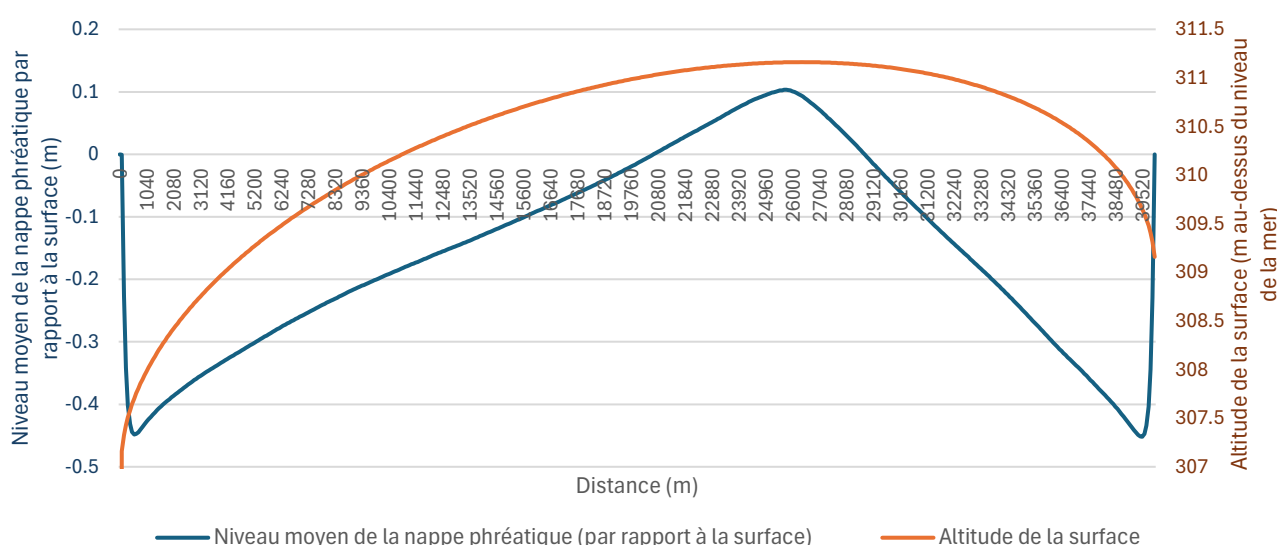


Figure 3-17 Profondeur et niveau moyens de la nappe phréatique sur toute la longueur de la tranche du dôme.

Les fluctuations des niveaux d'eau simulés pendant la période 2013-2014 diffèrent des mesures effectuées par Dargie (Figure 3-14). En effet, les mesures de Dargie montrent une augmentation progressive du niveau de la nappe phréatique en 2013, suivie d'une diminution progressive en 2014. Les séries chronologiques simulées se caractérisent par une baisse en 2014, suivie de deux pics fin 2013 et début 2014. Les niveaux d'eau moyens simulés se situent dans la même fourchette que les valeurs observées à une distance comprise entre 0 et 10 km de la rivière.

En 2018-2019, les profondeurs simulées de la nappe phréatique présentent des tendances similaires dans les séries chronologiques simulées et observées. Les deux séries chronologiques montrent une baisse importante entre mars et août et des pics fin 2018 et fin 2019. Les niveaux de la nappe phréatique sont en moyenne plus élevés dans les mesures que dans la simulation. Ce meilleur alignement avec les résultats de 2018-2019 qu'avec ceux de 2013-2014 pourrait s'expliquer par la localisation des données de précipitations utilisées dans cette étude. En effet, les données ont été extraites d'un point situé en République démocratique du Congo, au sud de l'équateur. Les régimes de précipitations y montrent une saison sèche majeure entre juin et août et une saison sèche mineure en décembre-janvier. Cela contraste avec la région de la Cuvette centrale, située au nord de l'équateur, où la saison sèche majeure se produit en décembre-janvier et la saison sèche mineure entre juin et août.

3.3.3 Profondeur de la nappe phréatique – Scénario alimenté par les rivières

Les niveaux d'eau au centre du dôme de tourbe et près de la limite ouest sont indiqués dans la Figure 3-18. Les résultats indiquent que la rivière Likouala aux Herbes inonde saisonnièrement les zones basses de la tourbière (graphiques supérieurs). Cet apport supplémentaire entraîne une élévation soutenue du niveau de la nappe par rapport au scénario de référence basé sur les précipitations. Dans le scénario de référence basé sur les précipitations, plusieurs années de sécheresse successives créent un déséquilibre dans le bilan hydrique et entraînent une baisse progressive du niveau de la nappe au cours de la période de simulation. Cette tendance à la baisse ne se produit pas dans le scénario alimenté par les rivières, où l'aquifère est alimenté par les crues saisonnières. Près de la limite, le niveau de la nappe reste au-dessus du sol la plupart du temps, sauf pendant la saison sèche (en haut à gauche).

Les faibles niveaux des rivières semblent n'affecter le niveau de la nappe que dans les deux premières cellules proches de la frontière, où il descend en dessous du niveau de référence basé sur les précipitations pendant certaines années sèches (en haut à gauche). Aucune baisse supplémentaire du niveau de la nappe due aux faibles niveaux des rivières n'est observée à trois cellules de la frontière (en haut à droite).

Le graphique en bas à gauche montre le niveau de la nappe dans une cellule située à 4 km de la limite, à une altitude de 309 m. Bien que le niveau de la rivière dépasse régulièrement 309 m, la cellule n'a pas été inondée avant la fin de 2017. Cela s'explique par le fait que l'écoulement de surface n'est pas instantané ; il dépend de la rugosité du sol et du stockage de rétention. Dans MIKE SHE, l'écoulement de surface vers une cellule voisine ne se produit que lorsque la profondeur de l'eau stagnante dépasse la valeur de stockage de rétention, soit 65 mm dans le scénario de référence. Cela explique pourquoi le niveau de la nappe ne s'écarte du niveau de référence déterminé par les précipitations qu'en 2017, après une longue période d'inondation à la limite. Une fois qu'une cellule est inondée, le niveau de la nappe reste constamment supérieur au niveau de référence déterminé par les précipitations, même lorsque le niveau des rivières baisse.

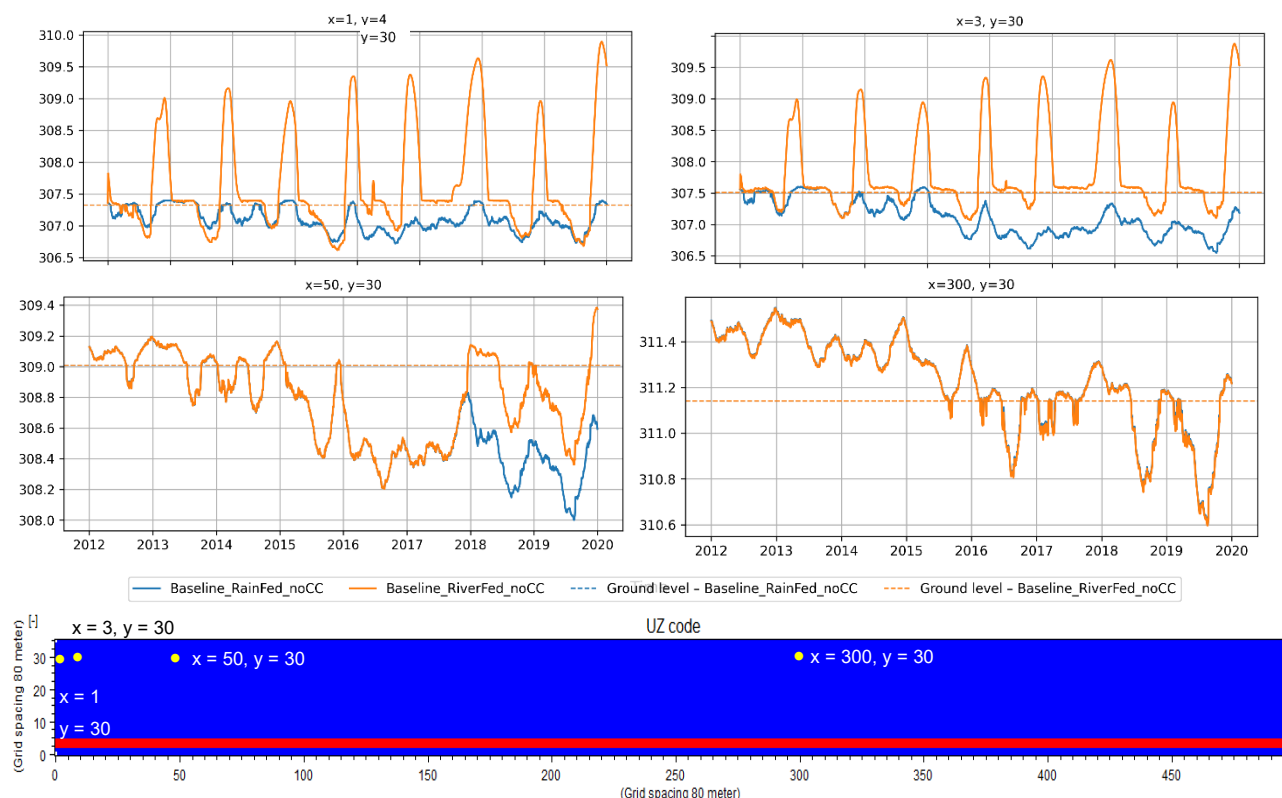


Figure 3-18 Niveaux d'eau à trois endroits donnés dans la zone modélisée, scénario A.1.2 (Baseline_RiverFed_noCC)

Les profondeurs d'eau à la surface dans les zones limites augmentent progressivement tout au long de la période de simulation. Ces profondeurs sont comparées dans **Error! Reference source not found.** la Figure 3-19 pour deux événements d'inondation fluviale : l'un au début de la simulation en 2012 (en haut) et l'autre à la fin en 2019 (en bas). Au plus fort de la première crue annuelle en 2012, la zone inondée s'étend sur 2,2 km à l'intérieur des terres à l'ouest et sur 2,6 km à l'est, couvrant 12 % du dôme de tourbe. En revanche, lors de la crue de 2019, la zone inondée simulée s'étend sur 4,2 km à l'intérieur des terres à l'ouest et sur 6,3 km à l'est, couvrant un quart du dôme de tourbe.

À mesure que les apports fluviaux reconstituent la zone non saturée, la zone inondée s'étend progressivement d'année en année. La période de simulation considérée ici n'est pas suffisamment longue pour déterminer si la zone inondée finira par atteindre un équilibre. Au cours de la période actuelle, le niveau de la nappe au centre du dôme de tourbe n'est pas affecté par les crues fluviales (voir le graphique en bas à droite dans Figure 3-19). Cependant, l'ensemble du dôme pourrait finir par être influencé par les crues fluviales, car le niveau de l'Oubangui dépasse régulièrement l'altitude du sommet du dôme. Pour générer les niveaux d'eau initiaux de cette simulation, le modèle de référence basé sur les précipitations a été utilisé pour la période 2000-2012. En conséquence, la tourbière est probablement plus sèche qu'elle ne devrait l'être au début de la simulation et atteint progressivement l'équilibre au fil du temps. Cependant, comme les conditions initiales sont les mêmes pour toutes les interventions, les résultats peuvent être directement comparés au scénario de référence alimenté par les rivières.

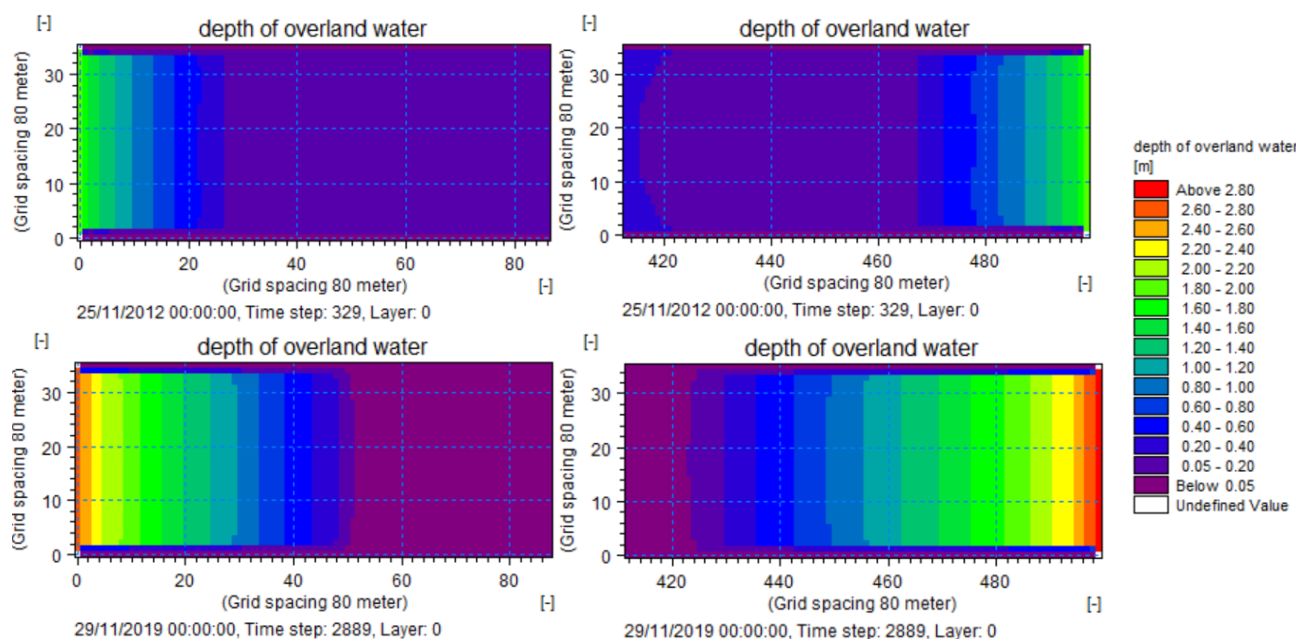


Figure 3-19 Profondeurs des eaux de surface dans les zones limites du modèle au pic de deux crues fluviales

3.3.4 Bilan hydrique

Les différentes composantes du bilan hydrique total pendant la période de simulation sont représentées dans la Figure 3-20 pour le scénario de référence alimenté par les précipitations. L'évapotranspiration dépasse légèrement les précipitations (+2 %) et le volume stocké dans la zone saturée diminue, ce qui est cohérent avec la tendance au dessèchement du bassin du Congo. Les flux aux limites sont très faibles par rapport à la quantité totale de précipitations. Cela s'explique par la topographie très plate du dôme, qui empêche tout écoulement important à la surface. L'apport de la rivière vers la zone saturée est également très faible, ce qui souligne le fait que la tourbière simulée est alimentée par les précipitations.

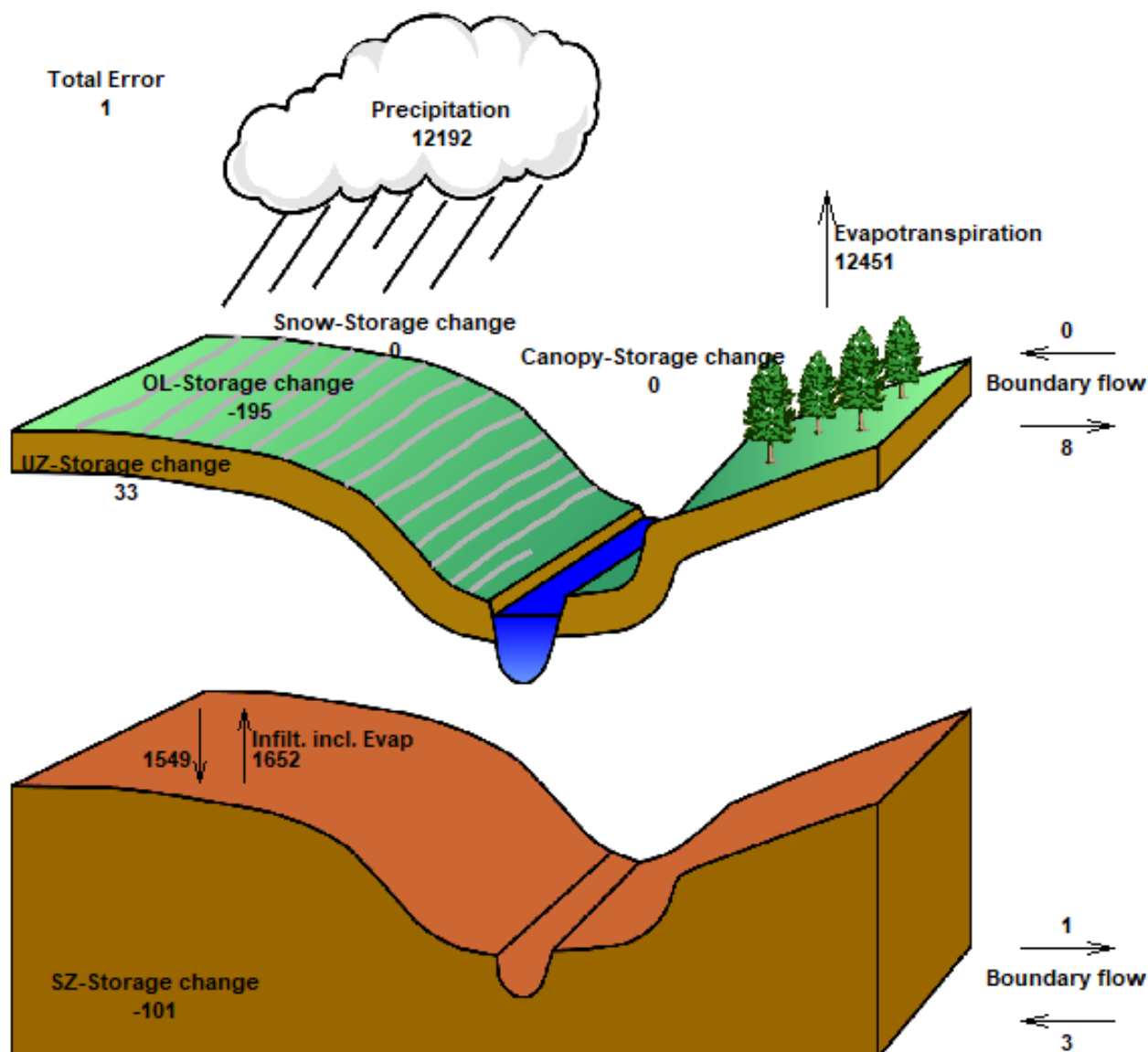


Figure 3-20 Bilan hydrique
Période 2012-2019

3.3.5 Calage et analyse de sensibilité

Les paramètres du modèle ont été ajustés afin de mieux représenter la réalité physique et de mieux reproduire les observations (voir Tableau 3-3). Les paramètres calibrés sont expliqués en détail dans les sections précédentes.

Tableau 3-3 Paramètres calibrés

Paramètre	Valeur initiale	Valeur calibrée / changement relatif	Commentaire
Évapotranspiration			
Évapotranspiration de référence		+ 5	Baisse du niveau de la nappe phréatique
Indice de surface foliaire	7	Fluctuation entre 3 et 5 (ensemble de données MODIS)	Meilleure représentation des fluctuations saisonnières
Profondeur des racines	250 mm	1000 mm	Plus précise pour une forêt
Zone non saturée			
Conductivité hydraulique à saturation K_s	2×10^{-6} m/s	6×10^{-5} m/s	Voir Apers et al.
Paramètre de forme α de la courbe de rétention	0,12	0,2	Réduit les fluctuations du niveau de la nappe sous terre
Zone saturée			
Conductivité hydraulique verticale K_v	10^{-4} m/s dans le premier mètre sous terre, 10^{-6} m/s en dessous	10^{-5} m/s	Simplification + cohérence avec la zone non saturée
Conductivité hydraulique horizontale K_h	10^{-3} m/s dans le premier mètre sous terre, 5×10^{-5} m/s en dessous	10^{-4} m/s	Simplification + Cohérence avec la zone non saturée

Les essais d'étalonnage ont permis de mieux comprendre la sensibilité des différents paramètres. L'évapotranspiration de référence est un facteur clé de la profondeur moyenne de la nappe phréatique. De légères augmentations de l'évapotranspiration de référence entraînent une baisse rapide du niveau de la nappe phréatique. En revanche, les variations des paramètres d'évapotranspiration réelle, tels que la profondeur des racines et l'indice de surface foliaire (LAI), ont très peu d'impact sur la nappe phréatique. En effet, la surface foliaire et la profondeur des racines sont suffisamment élevées pour ne pas limiter l'évapotranspiration réelle, qui est égale à l'évapotranspiration de référence.

La sensibilité à la conductivité hydraulique à saturation de la zone non saturée (K_{sat}) a également été examinée. Des valeurs K_{sat} plus faibles ont entraîné un retard dans la réponse du niveau de la nappe, en raison d'une réduction du mouvement vertical de l'eau. Des valeurs K_{sat} plus élevées n'ont entraîné aucun changement significatif, ce qui indique qu'au-delà d'un certain seuil, K_{sat} n'est pas un facteur limitant dans la réponse du système.

Une autre courbe de rétention d'eau du sol avec un rendement spécifique plus faible a été mise en œuvre à l'aide de la paramétrisation d'Apert et al. Cette modification a entraîné une baisse notable du niveau de

la nappe pendant les périodes sèches, le sol s'étant drainé plus rapidement. Une autre simulation avec des rendements spécifiques plus élevés a entraîné des fluctuations moins importantes sous terre, ce qui correspondait mieux aux observations sur le terrain de Dargie et Crezee.

3.4 Conclusion

Un modèle hydrologique conceptuel a été développé à l'aide de MIKE SHE pour décrire le cycle de l'eau dans les tourbières de la Cuvette Centrale. Le modèle reproduit une tranche d'un dôme de tourbe interfluvial. Tous les principaux processus hydrologiques sont simulés : précipitations et interception par la canopée, évapotranspiration, infiltration à travers la zone non saturée, eaux souterraines et écoulement de surface.

Le modèle est configuré pour la période 2000-2020. Les niveaux simulés de la nappe phréatique sont comparés aux observations effectuées lors de deux campagnes de mesure documentées dans la littérature, l'une en 2013-2014 dans les tourbières de la République du Congo et l'autre en 2018-2019 en République démocratique du Congo. Compte tenu de la rareté des mesures et du fait que le modèle hydrologique conceptuel n'est pas développé pour un lieu spécifique, il n'a pas été possible de procéder à un étalonnage complet des paramètres du modèle par rapport aux données observées. Cependant, les résultats du modèle sont considérés comme satisfaisants pour les raisons suivantes :

- Comme dans la plupart des sites de mesure, les niveaux d'eau moyens simulés varient entre 0 et -20 cm dans la majeure partie de la zone modélisée.
- Les niveaux d'eau varient dans l'espace avec l'augmentation de la distance par rapport au fleuve.
- Le niveau de la nappe fluctue de manière saisonnière en fonction des précipitations. Les tendances saisonnières sont les mêmes que celles observées dans les mesures effectuées par Crezee en République démocratique du Congo.

Il est essentiel d'estimer avec précision les niveaux de la nappe phréatique, car ceux-ci déterminent la dynamique du carbone dans la tourbière. Le stock de carbone dans le sol s'épuise principalement dans des conditions oxiques, c'est-à-dire dans la zone du sol située au-dessus du niveau de la nappe phréatique. La tourbe se décompose lentement dans des conditions totalement anaérobies, lorsque toute la colonne de sol est saturée. Le modèle de biodégradation et de dynamique du carbone développé dans le cadre de ce projet utilise les données relatives au niveau de la nappe phréatique et à la saturation du sol pour estimer le bilan carbone. Cette méthode est expliquée dans le chapitre suivant.

4 Modèle de biodégradation

Pour simuler l'accumulation et la biodégradation du carbone dans les tourbières de la Cuvette Centrale, un modèle a été développé en suivant dans les grandes lignes l'approche de modélisation utilisée dans DigiBog, telle que décrite dans les deux articles rédigés par les auteurs à l'origine de DigiBog (Young et al., 2017) et (Young et al., 2023). Les dômes de tourbe des tourbières du Congo font partie de zones humides qui se dégradent généralement lentement dans des conditions principalement anoxiques. Lorsque la tourbe est exposée à des conditions oxydantes, le taux de dégradation peut augmenter considérablement. Pour modéliser l'exposition, nous utilisons le résultat du modèle hydrologique distribué décrit dans la section 3 et estimons la profondeur oxydante à partir de la saturation du sol modélisée dans le dôme de tourbe. Le modèle hydraulique est réparti spatialement dans le plan horizontal (x et y) et verticalement (profondeur à partir de la surface) afin de donner une représentation spatiale complète de la saturation du sol dans le dôme de tourbe.

Nous considérons que les conditions du sol sont oxydantes lorsque la porosité remplie d'air est supérieure à 10 % et utilisons cette valeur comme indicateur de la profondeur de décomposition aérobie dans le profil du sol. Pour chaque cellule du plan horizontal, nous estimons la profondeur de dégradation oxydante dans le profil du sol en calculant l'évolution dans le temps de la profondeur maximale où la porosité remplie d'air est égale ou supérieure à 10 %.

La dégradation de la tourbe est estimée à l'aide d'une fonction de décroissance exponentielle double afin de représenter une phase initiale rapide dominée par la décomposition des composés labiles, suivie d'une phase plus lente impliquant des matériaux plus récalcitrants :

$$M(t + 1) = M_1(t) \cdot e^{\{-k_1 \cdot f_Q \cdot dt\}} + M_2(t) \cdot e^{\{-k_2 \cdot f_Q \cdot dt\}} \quad (1)$$

Où $M(t)$ est la masse totale restante de matière organique au temps t , M_1 et M_2 sont les quantités initiales de matière labile et récalcitrante, et k_1 et k_2 sont les constantes de vitesse de désintégration pour la fraction labile et la fraction récalcitrante. f_Q est le facteur de modification de la température représentant une augmentation du taux de dégradation avec l'augmentation de la température :

$$f_Q = Q_{10}^{\left(\frac{t-tbc}{10}\right)} \quad (2)$$

Où Q_{10} est la sensibilité à la température, t est la température moyenne et tbc est la température de référence de base. Dans (Young et al., 2017), t est une température moyenne hebdomadaire, mais dans cette étude, t est la température moyenne sur la période de simulation, ce qui entraîne un ajustement constant du taux de dégradation par rapport à la période de référence où nous supposons que le taux de dégradation a été mesuré. En fixant t à tbc , on supprime la sensibilité à la température de l'équation. t est ajusté en fonction des scénarios de changement climatique (voir la section 5.2).

La sensibilité à la saturation du sol pourrait également être incluse de la même manière que la sensibilité à la température en tant que modification du taux de dégradation, mais il serait difficile d'estimer les paramètres, et nous considérons que les conditions sont oxydantes au-delà de 10% d'air dans le sol.

Profondeur du sol ↓	Labile (M1) Dégradation oxygène	Récalcitrant (M2) Dégradation oxygène
	Labile (M1) Dégradation anoxique	Récalcitrant (M2) Dégradation anoxique

Figure 4-1 Illustration de la décomposition d'un profil de sol intégré verticalement en matière labile (M1) et récalcitrante (M2) et dégradation oxygène et anoxique en fonction de la profondeur du sol.

Figure 4-1 illustre la décomposition du sol dans le profil de sol intégré verticalement en 4 masses de tourbe. Les matières labiles et récalcitrantes sont comptabilisées séparément et la dégradation est calculée à l'aide de la fonction de décroissance exponentielle double. Nous calculons en outre la fraction entre les profondeurs de sol oxygène et anoxique à chaque étape temporelle, car les matières labiles et récalcitrantes se dégradent à des vitesses différentes dans des conditions oxygènes et anoxiques, ce qui donne un total de 4 taux de dégradation et masses différents, comme illustré dans la figure. À chaque étape, les matières labiles et récalcitrantes sont séparées individuellement en décomposition oxygène et anoxique avec des taux de dégradation différents. Pour les matières labiles, nous supposons que la profondeur oxygène inférieure à la profondeur de la zone racinaire signifie que toutes les matières labiles se dégradent dans des conditions oxygènes, au lieu de considérer que les matières labiles sont entièrement mélangées dans l'ensemble du profil du sol.

Le modèle actuel ne tient pas compte des changements de profondeur de la tourbe dus à sa dégradation, qui peuvent modifier le drainage du dôme de tourbe. Il est plutôt découplé du modèle hydrologique et constitue une étape post-calculatoire après la simulation hydrologique.

Le modèle comprend une méthode simple pour calculer l'accumulation de carbone. La litière végétale générée par la croissance des plantes est calculée en ajoutant une fraction constante de nouveaux matériaux à la tourbe une fois par an, répartis entre les feuilles, le bois et les racines. La composition de chaque type de litière en matériaux labiles et récalcitrants est également définie.

Plusieurs types fonctionnels de plantes peuvent être définis comme paramètres d'entrée et utilisés dans la simulation de la dégradation et de l'accumulation de la tourbe.

4.1 Paramètres d'accumulation et de biodégradation

Les paramètres d'entrée pour la biodégradation et l'accumulation sont présentés dans le Tableau 4-1, « ParameterID » est le nom du paramètre et « Parameter_description » en donne une brève description. Nous utilisons deux types fonctionnels de plantes (PFT), à savoir les palmiers (« Palm_PFT ») et les feuillus (« Hardwood_PFT »), avec 50 % de la production de litière attribuée à chacun, comme indiqué dans le paramètre « plant_type_prop ». Les paramètres utilisés dans le modèle sont les mêmes que ceux utilisés dans (Young et al., 2023), où les paramètres ont été mesurés à partir d'échantillons de tourbe oxygène et anoxique prélevés dans un dôme de tourbe dans les tourbières du Congo. La colonne « Parameter_type » indique les différents types de paramètres. Les types de litière (feuilles, bois et racines) se voient attribuer des taux de dégradation oxygène et anoxique distincts pour leurs parties labiles et récalcitrantes respectives. Comme l'étude (Young et al., 2023) a montré que les matières récalcitrantes se décomposaient à peu près au même rythme que les matières labiles une fois exposées à des conditions oxygènes, nous attribuons le même taux de décomposition aux matières labiles et récalcitrantes dans des conditions oxygènes.

Tableau 4-1 Paramètres d'entrée pour le modèle de biodégradation.

Parameter_type	Parameter_description	ParameterID	Palm_PFT	Hardwood_PFT	Units
Oxic decay (labile and recalcitrant litter pools)	Leaves oxic decay: labile and recalcitrant	decay_oxic_leaves	0.180000	0.280000	prop. year-1
Oxic decay (labile and recalcitrant litter pools)	Wood oxic decay: labile and recalcitrant	decay_oxic_wood	0.390000	0.200000	prop. year-1
Oxic decay (labile and recalcitrant litter pools)	Roots oxic decay: labile and recalcitrant	decay_oxic_roots	0.350000	0.260000	prop. year-1
Anoxic decay (labile litter pool)	Leaves anoxic decay: labile	decay_anoxic_labile_leaves	0.050000	0.080000	prop. year-1
Anoxic decay (labile litter pool)	Wood anoxic decay: labile	decay_anoxic_labile_wood	0.110000	0.030000	prop. year-1
Anoxic decay (labile litter pool)	Roots anoxic decay: labile	decay_anoxic_labile_roots	0.070000	0.120000	prop. year-1
Anoxic decay (recalcitrant litter pool)	Anoxic decay recalcitrant: all fractions	decay_anoxic	0.000100	0.000100	prop. year-1
Proportion of recalcitrant material (all litter fractions)	Leaves prop. of recalcitrant material	prop_recal_leaves	0.120000	0.120000	prop.
Proportion of recalcitrant material (all litter fractions)	Wood prop. of recalcitrant material	prop_recal_wood	0.400000	0.400000	prop.
Proportion of recalcitrant material (all litter fractions)	Roots prop. of recalcitrant material	prop_recal_roots	0.650000	0.650000	prop.
Litter addition	Leaves new mass	litter_leaves	10.000000	819.000000	g m-2 year-1
Litter addition	Wood new mass	litter_wood	275.000000	283.000000	g m-2 year-1
Litter addition	Roots new mass	litter_roots	556.000000	406.000000	g m-2 year-1
Shared PFT parameters	Dry bulk density (all litter fractions)	bulk_density	0.170000	0.170000	g cm-3
Shared PFT parameters	Maximum root depth	root_depth	0.300000	0.300000	m
Shared PFT parameters	PFT proportion	plant_type_prop	0.500000	0.500000	prop.

4.2 Masse initiale

La décomposition initiale de la masse de tourbe au début de la simulation est définie comme la fraction de matière récalcitrante dans la litière pour chaque PFT. La fraction initiale des racines de palmiers, par exemple, est calculée comme suit :

$$\text{fraction de racines de palmier} = \frac{\text{litière racinaire} \cdot \text{fraction récalcitrante}}{\text{masse total récalcitrante de palmier}} \cdot \text{fraction PFT}$$

Nous supposons que les matières récalcitrantes, lorsqu'elles sont exposées à des conditions oxydantes, se décomposent au même rythme que les matières labiles, les taux de dégradation variant selon les types de litière. La composition initiale est donc importante, mais nous ne pouvons pas facilement reproduire la composition des différentes couches de la tourbe. Comme nous nous intéressons à l'impact des scénarios futurs, nous considérons que cette approche est adaptée à notre objectif.

4.3 Variation du stock de carbone dans le sol

La variation du stock de carbone dans le sol, résultant de la dégradation et de l'accumulation de la tourbe au fil du temps, est estimée à l'aide de la formule suivante :

$$\Delta_C = m_{peat} \cdot f_C$$

Où Δ_C est la variation du stock de carbone dans le sol exprimée en $\text{kg C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$, m_{peat} la différence entre la masse initiale et finale de la tourbe à la fin de la simulation et f_C la fraction de carbone dans la tourbe. Nous supposons que la fraction de carbone est de 0,55.

Dans des conditions oxygènes, le carbone de la tourbe se décompose principalement sous forme d'émissions de CO_2 , tandis que la décomposition anoxique de la tourbe entraîne un mélange de flux de CO_2 et de CH_4 dans l'atmosphère et un flux de carbone dissous dans les eaux (Rieley et al., 2008). Dans des conditions oxygènes, les émissions nettes cumulées de CO_2 peuvent donc être estimées à l'aide de la formule suivante :

$$m_{\text{CO}_2} = \Delta_C \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_C}$$

Où M_{CO_2} est le poids moléculaire du CO_2 (44 g/mol) et M_C le poids moléculaire du carbone (12 g/mol).

4.4 Résultats de la simulation

4.4.1 Bilan du stock de carbone

Les résultats présentés ici concernent les modèles hydrologiques de référence (voir section 3). L'absorption de carbone par la végétation est constante dans l'espace et dans le temps et s'élève à $0,65 \text{ kg C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$. La dégradation du carbone varie dans le temps et dans l'espace. La dégradation oxygène et anoxique moyenne s'élève à $5,05 \text{ kg C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ dans le modèle pluvial et à $3,26 \text{ kg C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ dans le scénario fluvial. La perte de carbone est plus faible dans le modèle pluvial et fluvial, car l'apport saisonnier des cours d'eau augmente les niveaux d'eau le long des limites ouest et est. La décomposition oxygène l'emporte largement sur la décomposition anoxique dans les deux modèles de tourbières, puisque 97 à 98 % de la masse de carbone décomposée est dégradée dans des conditions oxygènes. La décomposition oxygène étant prépondérante, on peut supposer que le carbone du sol se décompose par le biais des émissions de CO_2 , qui s'élèvent à $18,51 \text{ kg CO}_2 \text{ -C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ dans le modèle pluvial et à $11,94 \text{ kg CO}_2 \text{ -C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ dans le scénario pluvial et fluvial.

L'absorption de carbone est donc bien inférieure à la dégradation, ce qui se traduit par un bilan carbone négatif pour les deux modèles de référence : $-5,05 \text{ kg C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ dans le modèle pluvial et $-3,26 \text{ kg C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ dans le scénario fluvial.

Ces chiffres relatifs au bilan carbone contrastent fortement avec les taux d'accumulation de tourbe calculés par Dargie et al. (2017) et Crezee et al. (2022) sur la base de mesures effectuées sur le terrain dans la Cuvette Centrale. Les premiers ont estimé un taux d'accumulation de tourbe de $18,4$ à $69,4 \text{ g C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ selon l'emplacement des carottes prélevées au cours des 2000 à 9000 dernières années, tandis que les seconds ont trouvé un taux de $11,8$ à $36,8 \text{ g C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$, avec un âge des carottes compris entre 10 000 et 42 000 ans avant le présent.

Les émissions annuelles nettes de dioxyde de carbone simulées sont du même ordre de grandeur que les mesures effectuées dans la région. Mander et al. (2025) ont mesuré les flux de gaz à effet de serre dans la forêt marécageuse de feuillus et la savane tourbeuse d'Epena, en République du Congo. Ils ont mesuré des émissions de CO_2 s'élevant à $50\text{-}90 \text{ kg CO}_2 \text{ -C m}^{-2}$ ($13\text{-}25 \text{ kg C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$) pendant la saison sèche (mars 2024) et de 17 à $26 \text{ kg CO}_2 \text{ -C m}^{-2}$ ($4\text{-}7 \text{ kg C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$) pendant la saison humide (novembre 2024). Les auteurs indiquent que les émissions pendant la saison sèche, supérieures aux émissions nettes annuelles de dioxyde de carbone simulées dans la présente étude, sont élevées en raison de la chaleur et de la sécheresse extrêmes qui ont sévi en mars 2024.

Ribeiro et al. (2021) ont compilé dans une méta-étude les mesures des stocks de carbone, des taux d'accumulation de carbone et des émissions de CO_2 et de CH_4 dans les tourbières tropicales d'Asie, d'Amérique et d'Afrique. Les valeurs mesurées se situent entre 20 et $200 \text{ g C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour l'accumulation de carbone et entre 7 et $15 \text{ kg CO}_2 \text{ -C m}^{-2}$ ($2\text{-}4 \text{ kg C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$) pour les émissions de CO_2 dans les tourbières intactes. Les émissions de CO_2 estimées dans la présente étude se situent dans la même fourchette que ces mesures.

Plusieurs facteurs pourraient expliquer l'écart entre le bilan carbone obtenu avec l'approche actuelle et les valeurs rapportées dans la littérature, même si les émissions de CO_2 sont conformes aux mesures.

L'absorption de carbone, basée sur les données de terrain collectées dans la Cuvette Centrale entre 2019 et 2021 (Young et al., 2023), se situe dans la partie inférieure de la fourchette rapportée pour les tourbières tropicales. Moore et al. (2018) ont mesuré, dans les forêts sempervirentes du Ghana, une production primaire nette (PPN) — c'est-à-dire la quantité de carbone produite par les producteurs primaires par unité de surface et par unité de temps — de $1,31 \text{ kg C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$, soit le double de l'absorption de carbone utilisée ici. Une étude similaire menée en Indonésie fait état d'une PPN de $0,97 \text{ kg C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (Kurnianto et al., 2015). Même si les valeurs d'absorption de carbone utilisées ici sont inférieures à celles rapportées dans ces études, elles sont basées sur des mesures et peuvent donc être considérées comme assez fiables. Elles ne peuvent donc expliquer que partiellement l'écart observé dans le bilan carbone.

Les valeurs d'accumulation de carbone recueillies à partir des mesures des carottes de tourbe correspondent à des taux d'accumulation de carbone à long terme sur des milliers d'années, alors que seule la période 2012-2019 est simulée dans cette étude. Le bilan carbone négatif modélisé ici pourrait s'expliquer par les conditions climatiques sèches actuelles (voir la section 3.2.3).

4.4.2 Décomposition oxique et anoxique

Dans la Figure 4-2, on voit le résultat temps-profondeur de la saturation du sol à partir du modèle de référence alimenté par la pluie pour une seule cellule au centre du dôme de tourbe. Le sol est considéré comme oxique lorsque la saturation tombe en dessous de 90 %, c'est-à-dire lorsque plus de 10 % de la porosité est rempli d'air. Le graphique montre une variabilité importante au fil des ans : la sécheresse des dernières années entraîne une augmentation significative de la profondeur oxique et expose la tourbe à une dégradation oxique.

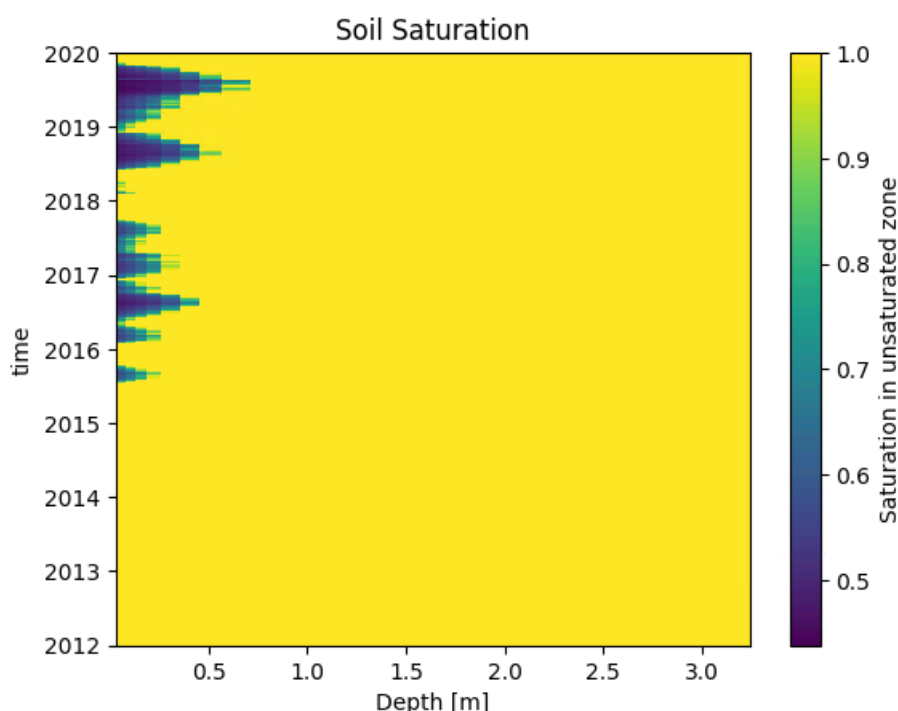


Figure 4-2 Saturation du sol en fonction de la profondeur dans une cellule centrale du dôme de tourbe pour le modèle de référence alimenté par les précipitations.

Le profil de saturation du sol pour le scénario de référence, présenté dans Figure 4-2, est utilisé comme donnée d'entrée pour les résultats de simulation présentés dans Figure 4-3, avec les paramètres présentés dans la section 4.1. Dans la figure, les types de fonctions végétales et les différentes compositions de litière sont regroupés en quatre groupes à partir de Figure 4-1. La ligne bleue correspond à la profondeur oxique et représente la profondeur à partir de la surface où les conditions du sol sont oxiques et où, plus en profondeur, la décomposition est considérée comme anoxique. On constate que la masse « labile oxique » et « récalcitrante oxique » augmente lorsque la profondeur oxique augmente, tandis que la masse « labile anoxique » et « récalcitrante anoxique » diminue de manière correspondante à mesure que la masse de tourbe passe de l'anoxie à l'oxie.

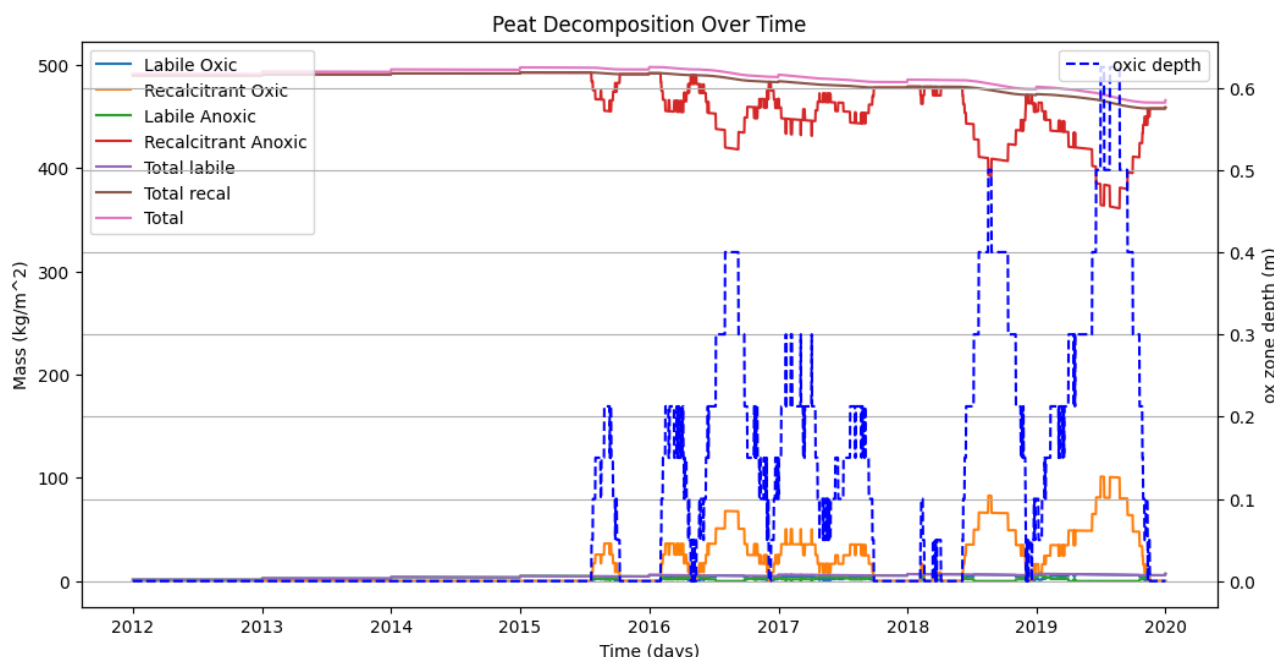


Figure 4-3 Simulation de la dégradation de la tourbe et de la masse de tourbe divisée en 4 catégories, comme indiqué dans la Figure 4-1, masse labile et récalcitrante, puis décomposition oxydante et anoxique. La ligne bleue correspond à la profondeur oxydante.

La sensibilité de la dégradation de la tourbe lorsqu'elle est exposée à des conditions oxydantes est clairement visible, car les années sèches à partir de 2016 environ entraînent une perte de masse de tourbe, mais au cours des premières années jusqu'en 2015-2016, avec des conditions anoxiques dans tout le profil du sol, la masse de tourbe « totale » augmente.

4.4.3 Répartition spatiale de la décomposition de la tourbe

La répartition spatiale de l'évolution du stock de carbone dans le sol pour le scénario de référence en régime pluvial est juxtaposée à la profondeur moyenne de la nappe phréatique dans la Figure 4-4. Une profondeur moyenne négative indique que la nappe phréatique se trouve principalement au-dessus du sol. Les deux variables sont logiquement corrélées : la dégradation de la tourbe se produit principalement près des limites du modèle, où la nappe phréatique est profonde. La dégradation de la tourbe est limitée près du centre du dôme, où la nappe phréatique se trouve la plupart du temps au-dessus du sol.

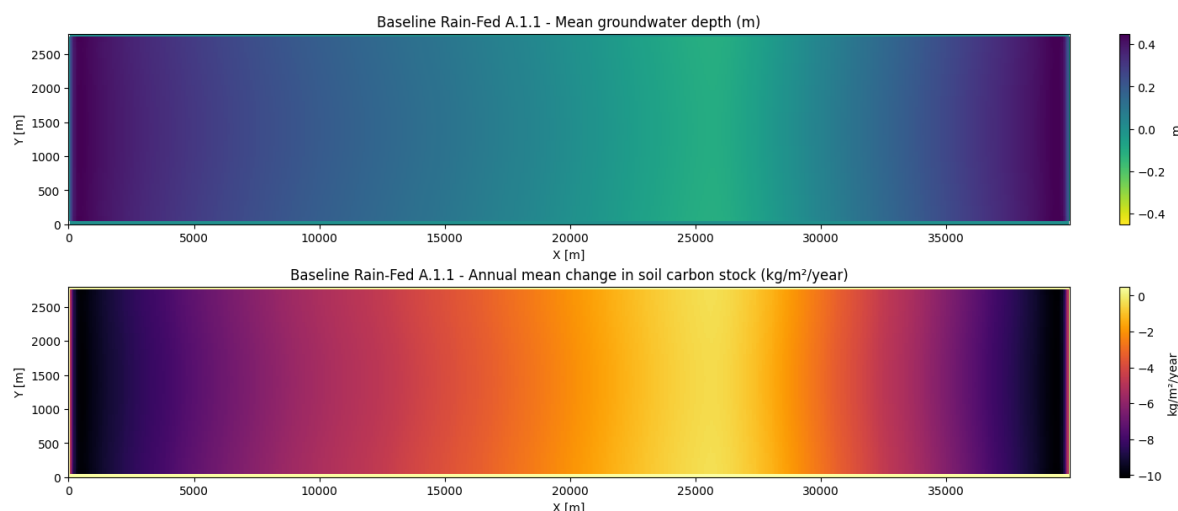


Figure 4-4 Profondeur moyenne de la nappe phréatique et variation du stock de carbone dans le sol sur l'ensemble du domaine modélisé pour le modèle de référence basé sur les précipitations (A.1.1). Une profondeur négative de la nappe phréatique indique que le niveau moyen de l'eau est au-dessus du sol.

Dans le scénario alimenté par les cours d'eau, la tourbe se décompose davantage que dans le scénario de référence basé sur les précipitations, car les nappes phréatiques sont plus élevées dans les zones limites. On observe même une accumulation de tourbe près du cours d'eau oriental. Les pertes de carbone dans le sol les plus importantes se situent désormais à la périphérie de la zone inondée par le cours d'eau. Le centre du dôme n'est pas touché par les inondations, et la variation du stock de carbone dans le sol y reste similaire dans les deux scénarios.

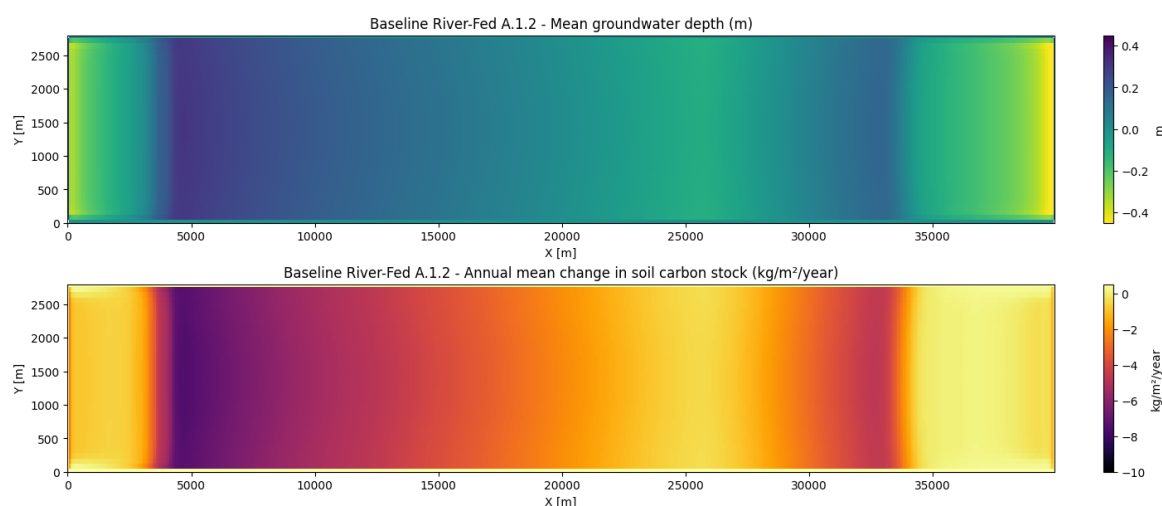


Figure 4-5 Profondeur moyenne de la nappe phréatique et variation du stock de carbone dans le sol dans l'ensemble du domaine modélisé pour le modèle de référence basé sur les précipitations (A.1.2). Une profondeur négative de la nappe phréatique indique que le niveau moyen de l'eau est supérieur au niveau du sol.

5 Définitions des scénarios et méthode d'évaluation

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 ?
- **Région hydrologique** : les processus hydrologiques dans les tourbières sont-ils uniquement déterminés par les précipitations et l'évapotranspiration (ce qui est principalement le cas dans les parties nord de la région) ? Ou les processus hydrologiques dans les tourbières sont-ils déterminés par les précipitations et l'évapotranspiration, ainsi que par les fluctuations du niveau d'eau dans les plans d'eau limitrophes (par exemple, les tronçons fluviaux), comme c'est principalement le cas dans les parties centrales adjacentes aux principaux cours d'eau de la région ?

5.1 Interventions de développement

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

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.

Code	Nom	Description
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 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.

Toutes les interventions ont lieu dans une zone donnée du modèle conceptuel. Cette zone est une bande horizontale de 240 m de large qui s'étend sur toute la longueur de la zone du modèle (voir Figure 5-1). Les effets de l'intervention sur la zone d'intervention et sur la zone environnante sont étudiés ici.

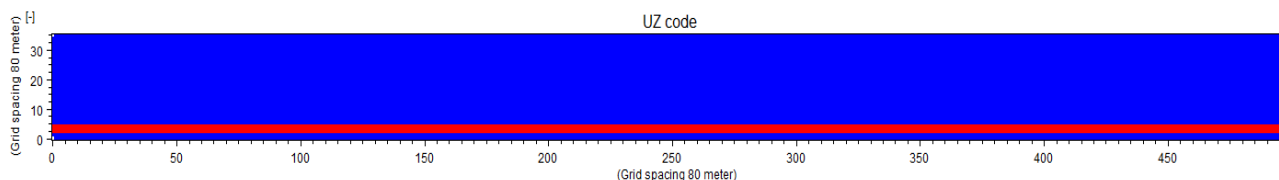


Figure 5-1 Zone d'intervention (en rouge) et zone environnante (en bleu)

Dans chaque modèle représentant le modèle d'intervention de développement respectif, les paramètres sont ajustés de manière à pouvoir simuler de manière adéquate les processus hydrologiques concernés. Les modifications apportées au modèle de référence (voir la section description3.2) sont détaillées ci-dessous.

5.1.1 Intervention A – Référence

Voir la section3.2 .

5.1.2 Intervention B – Route construite et opérationnelle

Étant donné que la surface de la tourbière est régulièrement inondée, la route est surélevée d'un mètre par rapport au terrain environnant. La végétation à la surface de la route est supprimée. L'indice de surface foliaire et la profondeur d'enracinement étant fixés à 0, il n'y aura pas de transpiration dans la zone d'intervention. L'évaporation peut toujours se produire à partir du sol.

Avec leur surface lisse, les routes agissent comme des voies principales d'écoulement superficiel. Le coefficient de rugosité de Manning-Strickler, fixé à $10 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$ dans le modèle de référence, est donc porté à $20 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$ sur la route. Le stockage de rétention, fixé à 65 mm dans le modèle de référence, est réduit à 1 mm car la végétation est éliminée et l'eau ne peut pas s'accumuler dans les dépressions de surface comme dans les tourbières intactes.

Le profil du sol modélisé est représenté dans la Figure 5-2. Une zone pavée modélisant la couche superficielle imperméable est ajoutée au-dessus de la route afin d'empêcher l'infiltration dans la colonne de sol. Le remblai routier est composé de deux horizons horizontaux. Sous la zone pavée et s'étendant jusqu'à 1 m sous la surface se trouve une couche de gravier compacté qui stabilise le remblai routier. Elle a une conductivité hydraulique horizontale (K_h) de 3×10^{-4} m/s et une conductivité hydraulique verticale (K_v) de 3×10^{-5} m/s. En dessous se trouve une couche de gravier plus perméable, d'une épaisseur de 1 m.

La couche de tourbe située sous le remblai de gravier, comprimée par le poids de la route, a une faible conductivité hydraulique. Les valeurs de conductivité pour tous les horizons pédologiques sont indiquées dans le tableau **Error! Reference source not found.**. Les valeurs de rendement spécifique et de stockage spécifique du gravier sont tirées de la littérature. On suppose que la tourbe comprimée a une conductivité hydraulique 10 fois inférieure à celle de la tourbe non altérée et un rendement spécifique de 0,15, ce qui reflète la réduction de son volume de macropores. Comme la couche de tourbe compressée se trouve à plus de 2 m sous terre, elle est toujours située sous la surface phréatique. Il n'est donc pas nécessaire d'inclure la tourbe compressée dans les couches de la zone non saturée.

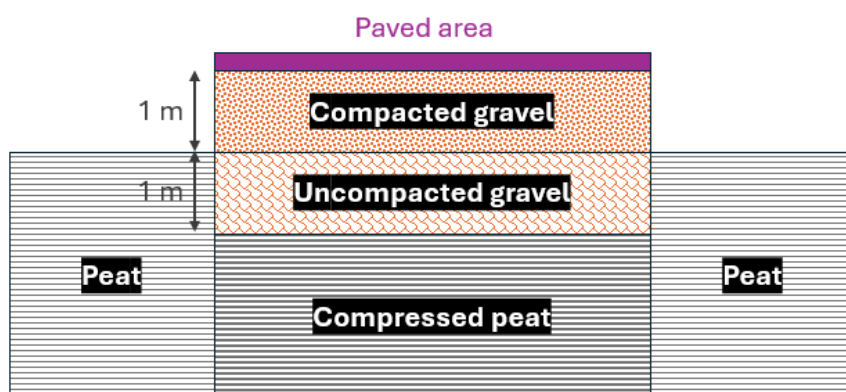


Figure 5-2 Structure du profil du sol pour l'intervention route

Table 5-1 Propriétés hydrauliques des horizons du sol dans les zones non saturées et saturées.

K_{sat} = conductivité hydraulique à saturation, K_v = conductivité hydraulique verticale, K_h = conductivité hydraulique horizontale, S_y = rendement spécifique

Horizon du sol	Route	Ligne de base
Zone non saturée		
Gravier compacté	$K_{sat} = 3,27 \times 10^{-5}$ m/s $S_y = 0,37^*$	$K_{sat} = 6 \times 10^{-5}$ m/s $S_y = 0,47^*$
Gravier non compacté	$K_{sat} = 3,27 \times 10^{-4}$ m/s $S_y = 0,39^*$	(Tourbe)
Zone saturée		
Gravier compacté	$K_v = 3,27 \times 10^{-5}$ m/s $K_h = 3,27 \times 10^{-4}$ m/s $S_y = 0,37$	$K_v = 10^{-5}$ m/s $K_h = 10^{-4}$ m/s $S_y = 0,47$
Gravier non compacté	$K_v = 3,27 \times 10^{-4}$ m/s $K_h = 3,27 \times 10^{-3}$ m/s $S_y = 0,39$	(Tourbe)
Tourbe compactée	$K_v = 10^{-6}$ m/s	

Horizon du sol	Route	Ligne de base
	$K_h = 10^{-5} \text{ m/s}$ $S_y = 0,28$	
Moyenne pondérée gravier et tourbe	$10^{-6} < K_v < 7 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ $7 \times 10^{-4} < K_h < 2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ $0,32 < S_y < 0,38$	

**Dans la zone non saturée, le rendement spécifique est défini ici comme la différence entre la teneur totale en eau et la teneur en eau à la capacité au champ.*

Dans la zone saturée, les couches de gravier et de tourbe sont combinées en une seule couche de calcul. La conductivité horizontale est calculée comme une moyenne arithmétique pondérée par l'épaisseur, tandis qu'une moyenne harmonique pondérée par l'épaisseur est utilisée pour la conductivité verticale. Comme les valeurs de conductivité peuvent couvrir plusieurs ordres de grandeur, une simple moyenne pondérée serait dominée par les valeurs les plus élevées. Cette approche est appropriée pour la conductivité horizontale, car l'écoulement horizontal est contrôlé par les couches les plus transmissives. Pour la conductivité verticale, cependant, une moyenne harmonique est plus appropriée, car l'écoulement vertical est largement limité par la couche la moins perméable. Le rendement spécifique est interpolé à l'aide d'une moyenne pondérée simple. Les plages moyennes sont surlignées en rouge dans le tableau **Error! Reference source not found.** . Les propriétés hydrauliques moyennes varient en fonction de l'épaisseur de la couche de tourbe, qui est la plus importante au centre du dôme de tourbe.

La décomposition de la tourbe et les émissions de carbone dans l'empreinte de la route sont simulées de la même manière que dans le scénario de référence. La production de litière est désactivée dans l'empreinte de la route.

5.1.3 Intervention C – Route en cours de construction

L'intervention C est basée sur l'intervention B, mais comprend un drain pour évacuer l'eau du remblai routier. La structure et les caractéristiques de la route sont les mêmes que dans l'intervention B. Le drain est situé à une profondeur de 2 mètres, sous la couche de gravier non compactée. Le débit à travers le drain est régulé dans MIKE SHE par la constante de temps, qui dans ce cas est fixée à 1,16 /s, ce qui la place dans la partie supérieure de la fourchette typique.

La décomposition de la tourbe et les émissions de carbone dans l'empreinte de la route sont simulées de la même manière que dans le cas de référence. La production de litière est désactivée dans l'empreinte de la route.

5.1.4 Intervention D – Urbanisation

Les effets de la construction d'un lotissement dans la tourbière sont modélisés. La topographie du lotissement est surélevée de 50 cm afin de garantir que le sol reste hors de l'eau pendant toute la durée de la simulation. Comme dans l'intervention routière, la végétation à la surface de la route est supprimée. L'indice de surface foliaire et la profondeur d'enracinement étant fixés à zéro, il n'y a pas de transpiration dans la zone d'intervention ; cependant, l'évaporation peut toujours se produire à partir du sol. Les paramètres d'écoulement superficiel sont identiques à ceux du scénario route : le coefficient de rugosité de Manning-Strickler est porté à $20 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$ sur la route et le stockage de rétention est réduit à 1 mm en raison de l'élimination de la végétation.

Comme dans le cas de l'intervention route, une zone pavée est placée au-dessus de la colonne de sol. Cependant, comme les zones urbaines comprennent généralement des zones non pavées telles que des jardins, des parcs et des installations sportives, où l'eau peut s'infiltrer, la zone pavée incluse ici ne couvre qu'un tiers de la superficie de l'empreinte. La pression exercée par les bâtiments comprime la

tourbe et modifie ses propriétés hydrauliques (voir, par exemple, Li et al., 2020). Peu d'études scientifiques examinent ces effets. Parmi celles-ci, les expériences en laboratoire menées par Jelisić (2005) ont montré que la compression relative de la tourbe peut atteindre jusqu'à 60 %. Dans cette étude, on suppose que la compression affecte la tourbe jusqu'à une profondeur d'un mètre sous le sol.

Dans un petit village composé principalement de bâtiments à un étage, la charge exercée est inférieure à celle exercée sous une route. Les routes exercent une charge plus uniforme sur toute leur surface et sont également soumises aux charges du trafic. En outre, les villages peuvent utiliser des pieux enfoncés dans la tourbe jusqu'à des couches plus stables, contournant ainsi une grande partie de la compression dans la tourbe elle-même. Pour ces raisons, les propriétés hydrauliques sélectionnées pour la tourbe comprimée dans ce scénario représentent un juste milieu entre celles de la tourbe non altérée et celles de la tourbe comprimée utilisée dans l'intervention route (voir **Error! Reference source not found.**). La tourbe comprimée est moins poreuse et moins perméable dans la zone saturée que dans la zone non saturée, ce qui reflète l'augmentation de la densité de la tourbe avec la profondeur.

Table 5-2 Propriétés hydrauliques de la tourbe comprimée dans les zones non saturées et saturées.

Horizon du sol	Urbanisation	Route (interventions B et C)	Référence
Zone non saturée			
K_{sat} - Conductivité hydraulique saturée (m/s)	10^{-5}	/	6×10^{-5}
θ_s - Teneur en eau saturée (-)	0,6	/	0,8
Zone saturée			
K_v - Conductivité hydraulique verticale (m/s)	5×10^{-6}	10^{-6}	10^{-5}
K_h - Conductivité hydraulique horizontale (m/s)	5×10^{-5}	10^{-5}	10^{-4}
S_y - Rendement spécifique (-)	0,3	0,28	0,47

Les couches de tourbe comprimées et régulières sont fusionnées en une seule couche de calcul dans la zone saturée. La conductivité hydraulique et le rendement spécifique sont plus élevés au centre du dôme, car la couche de tourbe régulière est plus épaisse qu'aux bords du modèle.

Les courbes de rétention utilisées comme données d'entrée dans les modèles MIKE SHE (voir Figure 5-3) décrivent la capacité de rétention d'eau de la tourbe intacte et de la tourbe sous le tassement à différentes pressions d'aspiration. La tourbe comprimée a une macroporosité plus faible et retient donc moins d'eau à saturation. La compression affecte l'ensemble de la courbe de rétention, car pour une pression d'aspiration donnée, la teneur en humidité est plus faible dans la tourbe comprimée.

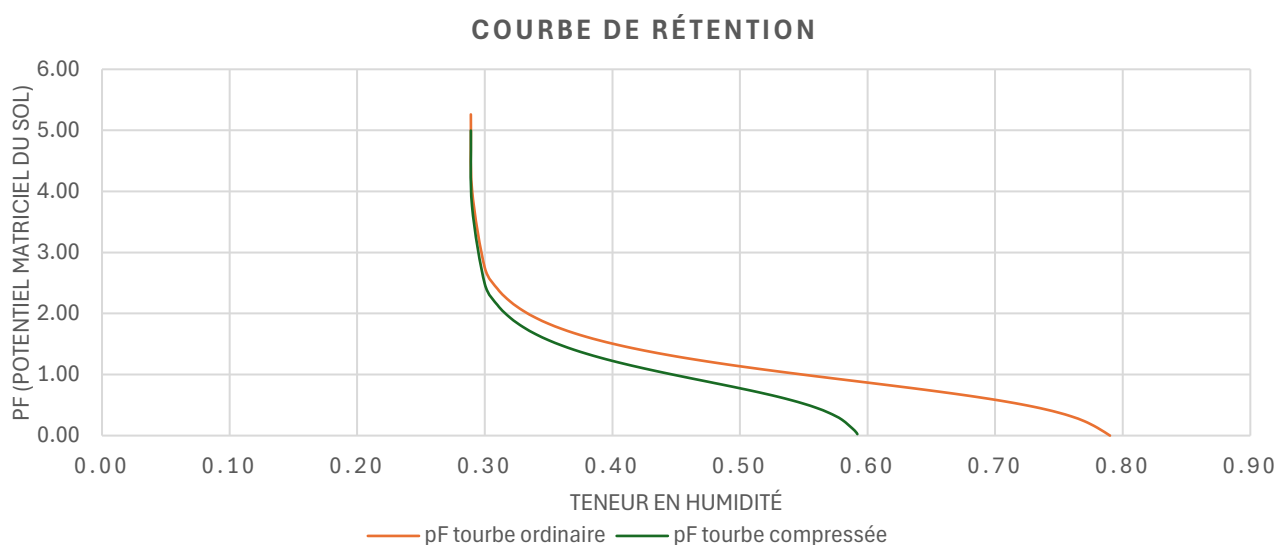


Figure 5-3 Courbes de rétention de la tourbe normale et de la tourbe comprimée par un lotissement

La décomposition de la tourbe et les émissions de carbone dans l'empreinte du lotissement sont simulées de la même manière que dans le scénario de référence. La production de litière est désactivée dans l'empreinte du lotissement.

5.1.5 Intervention E – Incendie de forêt / Déforestation

Dans cette intervention, la végétation est défrichée après un feu de brousse. L'indice de surface foliaire et la profondeur d'enracinement étant fixés à zéro, il n'y a pas de transpiration dans la zone d'intervention ; cependant, l'évaporation peut toujours se produire à partir du sol. La rugosité du sol diminue après le défrichage, de sorte que le coefficient de Manning-Strickler passe de 10 à 15 m^{1/3} /s et que le stockage de rétention est réduit de 65 à 32 mm afin de refléter la perte de creux et de bosses causée par la combustion lente de la tourbe.

Dans les forêts tropicales typiques, les incendies consomment la biomasse aérienne, mais pénètrent rarement profondément dans le sol. En revanche, les incendies de tourbières peuvent se propager dans la tourbe, brûler les systèmes racinaires et altérer la structure du sol. Bien que les incendies de tourbières soient fréquents et répandus en Asie du Sud-Est, leurs effets sur les propriétés hydrauliques de la tourbe sont relativement peu connus. Sinclair et al. (2020) ont mesuré la densité apparente de la tourbe dans des tourbières dégradées et intactes du Kalimantan central, en Indonésie. Ils ont comparé cinq sites intacts à neuf sites dégradés soumis à des incendies annuels fréquents et ont constaté que la densité apparente des 50 cm supérieurs était en moyenne 20 % plus élevée dans les sites qui avaient subi trois incendies au cours des deux dernières décennies que dans les sites non brûlés (0,155 contre 0,130 g/cm³).

Liu et al. (2020) ont compilé les données hydrophysiques de 39 études publiées sur les tourbières tempérées et boréales et ont montré que la densité apparente est négativement corrélée à la porosité, à la conductivité hydraulique saturée et au rendement spécifique. En utilisant les densités apparentes moyennes de la tourbe intacte et brûlée rapportées par Sinclair et al. et les équations de régression polynomiale reliant la densité apparente aux paramètres hydrophysiques de Liu et al., il est possible d'estimer les changements dans les principaux paramètres hydrauliques du sol pour les modèles IKI Congo MIKE SHE. La conductivité hydraulique saturée est réduite de 80 % et le rendement spécifique, défini dans l'article comme la différence entre la teneur totale en eau et la teneur en eau à pF = 1, est réduit de 20 % (voir **Error! Reference source not found.** et Figure 5.4). La diminution de la porosité totale due au feu, qui est inférieure à 2 %, n'est pas prise en compte ici.

Les propriétés hydrauliques de la zone saturée (voir **Error! Reference source not found.**) sont dérivées de celles de la zone non saturée. Comme dans le scénario de référence, la conductivité hydraulique verticale est supérieure à la conductivité hydraulique saturée afin de tenir compte de la compression de la tourbe en profondeur. Les couches de tourbe brûlées et non brûlées sont fusionnées en une seule couche de calcul dans la zone saturée. La conductivité hydraulique et le rendement spécifique sont plus élevés au centre du dôme, car la couche de tourbe intacte est plus épaisse qu'aux bords du modèle.

Table 5-3 Propriétés hydrauliques de la tourbe brûlée dans les zones non saturées et saturées.

Horizon du sol	Incendie	Référence
Zone non saturée		
K_{sat} - Conductivité hydraulique saturée (m/s)	$1,31 \times 10^{-5}$	6×10^{-5}
S_y – Rendement spécifique modifié*	0,2	0,25
Zone saturée		
K_v - Conductivité hydraulique verticale (m/s)	5×10^{-6}	10^{-5}
K_h - Conductivité hydraulique horizontale (m/s)	5×10^{-5}	10^{-4}
S_y - Rendement spécifique (-)	0,45	0,47

*Liu et al. utilisent le terme « rendement spécifique » pour désigner la différence entre la teneur totale en eau et la teneur en eau à $pF = 1$.

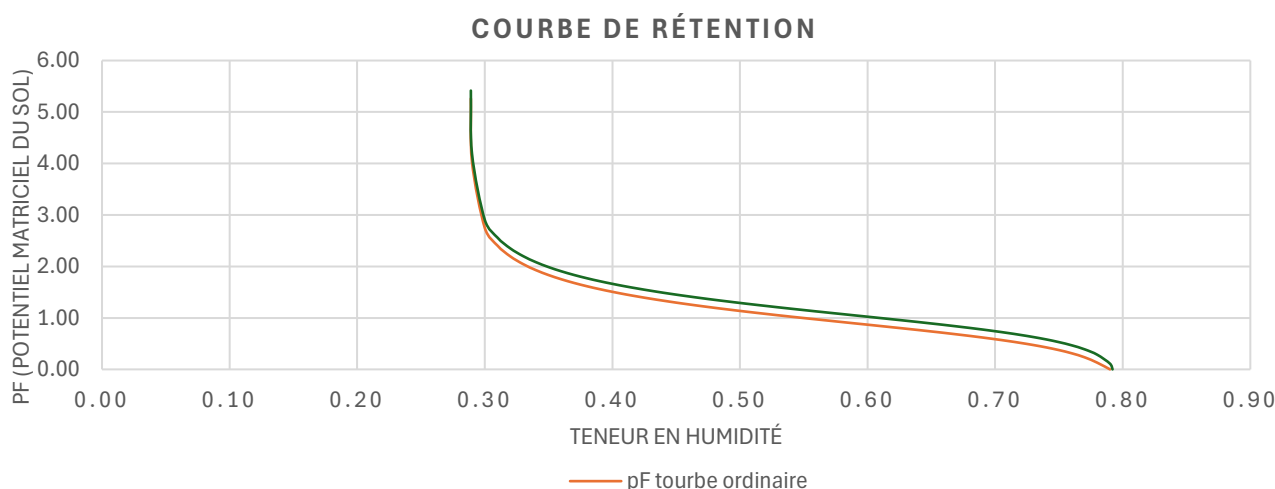


Figure 5-4 Courbes de rétention de la tourbe normale et de la tourbe brûlée par le feu

La décomposition de la tourbe et les émissions de carbone dans la zone brûlée sont simulées de la même manière que dans le scénario de référence. La production de litière est désactivée dans la zone brûlée.

5.1.6 Intervention F – Forêt remplacée par des plantations de palmiers à huile

L'intervention F consiste à convertir les tourbières boisées en plantations de palmiers à huile. La culture du palmier à huile existe dans la région depuis plus d'un siècle, et une nouvelle expansion des plantations est prévue⁶. La végétation naturelle est défrichée pour établir de nouvelles plantations de palmiers à huile. L'indice de surface foliaire (LAI) des plantations de palmiers à huile a été mesuré dans de nombreuses études et augmente généralement avec l'âge de la plantation, atteignant une valeur

⁶ De Augustinis, F., & Kambale, J. (22 avril 2025). *La RDC prévoit d'augmenter considérablement sa production d'huile de palme*. Pulitzer Center.

d'environ 4 dans les plantations matures de 15 ans (voir Awal et al., 2008 ; Rusli et al., 2014). En conséquence, un LAI de 4 est utilisé dans cette intervention (voir comparaison avec l'intervention de référence dans Figure 5-5). Une profondeur d'enracinement constante de 1 m, comme dans l'intervention de référence, est également appliquée ici (voir Safitri et al., 2018).

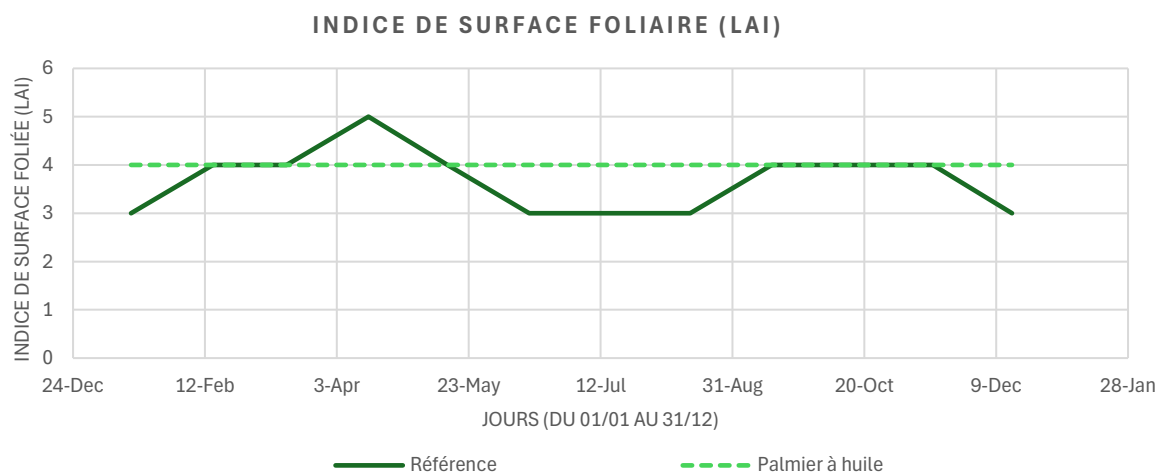


Figure 5-5 Variations annuelles de l'indice de surface foliaire (LAI) utilisé dans le modèle – Référence vs palmier à huile

Le palmier à huile prospère lorsque le niveau moyen de l'eau est maintenu entre 40 et 60 cm sous le sol (voir Ginting et al., 2016). Un drain est donc introduit dans le modèle à une profondeur de 50 cm. Le drainage induit des changements majeurs dans les propriétés du sol. Apers et al. (2022) ont compilé des données issues de la littérature sur les tourbières d'Asie du Sud-Est afin de dériver des courbes moyennes de rétention et de conductivité du sol pour les tourbières tropicales intactes et drainées. Les changements dans les paramètres hydrauliques du sol rapportés par Apers et al. ont été utilisés ici pour définir les paramètres hydrauliques de la tourbe drainée dans la présente étude (voir **Error! Reference source not found.**). Le drainage de la tourbe entraîne une réduction de la porosité (teneur en eau saturée), du rendement spécifique et de la conductivité hydraulique. La microporosité n'est toutefois pas affectée par le drainage : les courbes de rétention de la tourbe intacte et drainée sont presque identiques au-dessus de $pF = 1$ (voir Figure 5-6).

Table 5-4 Propriétés hydrauliques de la tourbe drainée dans les zones non saturées et saturées.

Horizon du sol	Palmier à huile (tourbière drainée)	Référence
Zone non saturée		
K_{sat} - Conductivité hydraulique saturée (m/s)	2×10^{-6}	6×10^{-5}
θ_s - Teneur en eau saturée (-)	0,62	0,8
Zone saturée		
K_v - Conductivité hydraulique verticale (m/s)	10^{-6}	10^{-5}
K_h - Conductivité hydraulique horizontale (m/s)	10^{-5}	10^{-4}
S_y - Rendement spécifique (-)	0,28	0,47

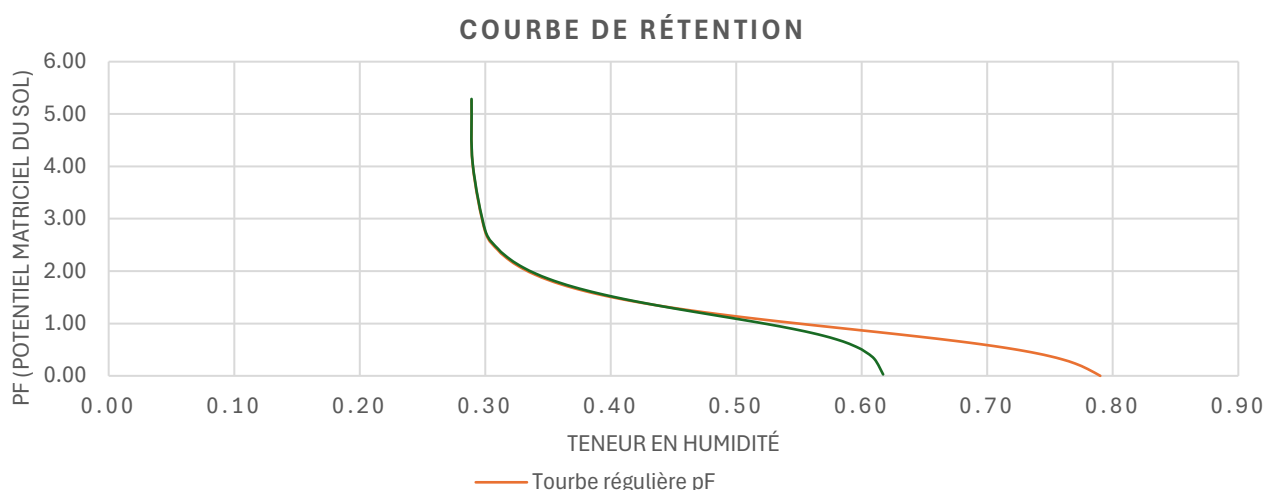


Figure 5-6 Courbes de rétention de la tourbe normale et de la tourbe drainée

Les couches de tourbe drainée et non drainée sont fusionnées en une seule couche de calcul dans la zone saturée. La conductivité hydraulique et le rendement spécifique sont plus élevés au centre du dôme, car la couche de tourbe non drainée est plus épaisse qu'aux bords du modèle.

Dans les tourbières tropicales, la topographie du sol se caractérise par des zones surélevées, ou buttes, et des dépressions locales, ou creux. Lampela et al. (2016, 2017) ont effectué des milliers de mesures d'élévation de surface sur deux sites représentant respectivement des tourbières intactes et drainées en Indonésie. À partir de ces données, Apers et al. (2022) ont dérivé des distributions microtopographiques pour les deux conditions (voir section 3.2.6). Le drainage lisse la microtopographie des tourbières : sur la base des résultats d'Apers, le stockage de rétention est fixé à 50 mm dans cette intervention, contre 65 mm dans le scénario de référence. La rugosité du sol diminue après la plantation de palmiers à huile, de sorte que le coefficient de Manning-Strickler passe de 10 à $15 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$.

Le drainage des tourbières tropicales entraîne également une perte de carbone par oxydation, ce qui se traduit par un affaissement du sol. De nombreuses études menées en Asie du Sud-Est ont quantifié les taux d'affaissement dans les tourbières drainées, synthétisés dans Hooijer et al. (2012) et Evans et al. (2019). Ces résultats montrent que les plantations de palmiers à huile drainées connaissent initialement des taux d'affaissement très élevés, qui se stabilisent à 3-5 cm/an. Les taux d'affaissement augmentent considérablement avec la profondeur de drainage. Comme MIKE SHE ne permet pas de faire varier le niveau du sol dans le temps, la surface du sol dans la plantation de palmiers à huile est abaissée de 50 cm, ce qui correspond aux conditions quelques années après le drainage initial. Un affaissement plus important devrait être appliqué lors de la modélisation des plantations dans leur deuxième ou troisième rotation. Evans et al. (2019) ont constaté que les tourbières forestières intactes situées à proximité des plantations de palmiers à huile drainées étaient également soumises à un affaissement, avec des taux dépassant 2 cm/an à une distance de 3 km de la limite entre la forêt et la plantation. Cet effet n'est toutefois pas pris en compte dans les modèles actuels.

La décomposition de la tourbe, la production de litière et les émissions de carbone au sein de la plantation de palmiers à huile sont simulées de la même manière que dans le scénario de référence.

5.1.7 Intervention G – Forêt remplacée par des rizières

Comme l'intervention F, l'intervention G examine la conversion de la forêt en cultures, en l'occurrence des rizières. Le riz est bien adapté aux zones inondées de façon saisonnière et est traditionnellement cultivé dans la région, en particulier autour du lac Tumba. Il est également considéré comme une option appropriée pour les tourbières dégradées et drainées (voir Surahman et al., 2018).

Les rizières sont généralement inondées pendant les dernières phases de croissance des cultures. Après les deux principales saisons des pluies, il y a deux cycles de culture par an dans la Cuvette

Centrale : le premier de mars-avril à juillet-août, et le second d'août-septembre à décembre-janvier (Food Security Cluster, 2024 ; Mayengo et al., 2005). L'indice de surface foliaire (LAI) et la profondeur d'enracinement, paramètres utilisés dans MIKE SHE pour calculer la transpiration, varient au cours du cycle de croissance des cultures.

L'ILF du riz augmente progressivement pendant la croissance de la culture et atteint un plateau pendant la phase de maturation (voir Figure 5-7). Comme aucune donnée sur l'ILF du riz n'est disponible pour l'Afrique centrale, les valeurs mesurées dans les rizières indiennes sont utilisées ici (Mahajan et al., 2012 ; Prabhakar et al., 2024). Les racines du riz s'étendent plus profondément au cours des premiers stades de croissance, puis ont tendance à se propager horizontalement pendant les stades de montaison et de maturation. Les séries chronologiques de profondeur d'enracinement utilisées dans le modèle sont adaptées aux variétés africaines (Samejima et al., 2016).

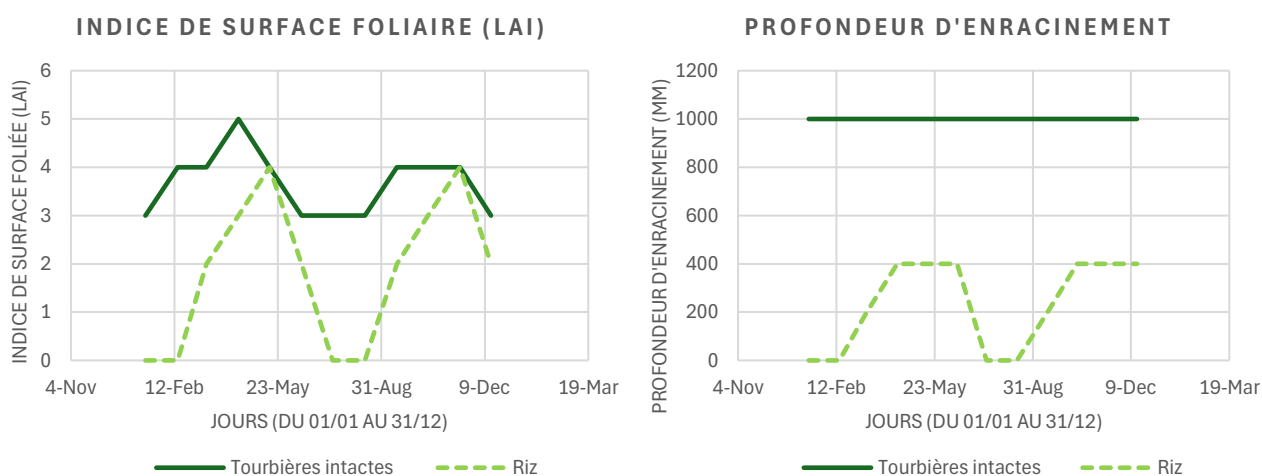


Figure 5-7 Variations annuelles de l'indice de surface foliaire (LAI) et de la profondeur d'enracinement utilisées dans le modèle – Référence vs Riz

Pour permettre la culture du riz, la microtopographie est nivelée dans le modèle et le stockage de rétention est réduit de 65 mm à 2 mm. La rugosité du sol varie en fonction du stade de croissance des cultures (voir Figure 5-8) : elle augmente lorsque le riz est mûr et diminue lorsque le sol est nu entre deux cycles de culture. Les propriétés du sol sont supposées être les mêmes que dans l'intervention de référence.

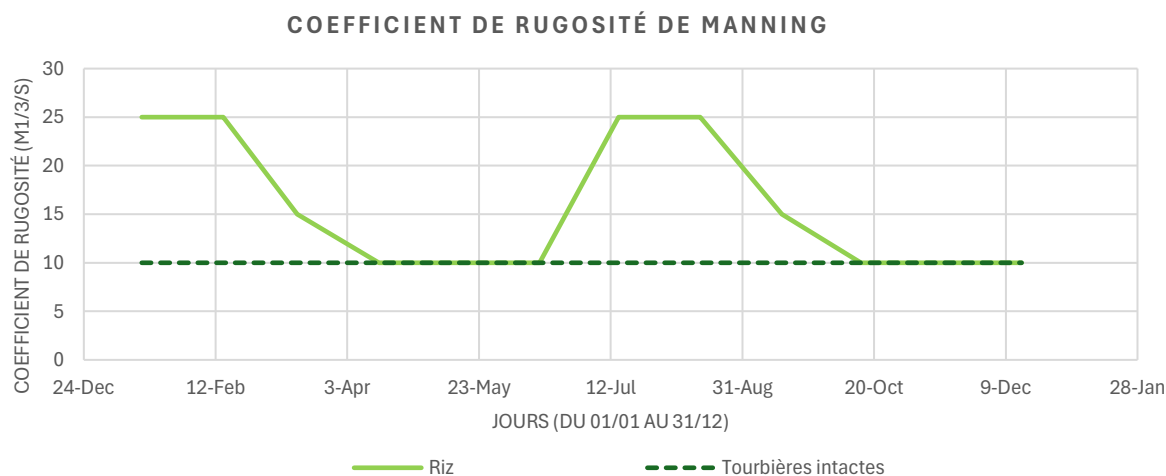


Figure 5-8 Variations annuelles du coefficient de rugosité de Manning-Strickler utilisé dans le modèle – Référence vs Riz

Comme dans les autres interventions, la zone touchée par le changement d'affectation des terres est représentée dans le modèle sous la forme d'une bande s'étendant sur toute la longueur de la tranche de tourbe conceptuelle. La tourbe peu profonde, plus fertile, est mieux adaptée à la culture du riz que la tourbe profonde. Il est donc peu probable que le riz soit cultivé sur la tourbe profonde située au centre du dôme.

Les rizières ne sont pas drainées dans ce modèle. Comme des niveaux d'eau supérieurs à 10 cm dans les rizières sont préjudiciables à la croissance du riz, un drainage pourrait être nécessaire dans les zones où les niveaux d'eau sont élevés, près du centre du dôme.

La décomposition de la tourbe et les émissions de carbone dans les rizières sont simulées de la même manière que dans le scénario de référence. La production de litière est désactivée dans la plantation de riz.

5.2 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.

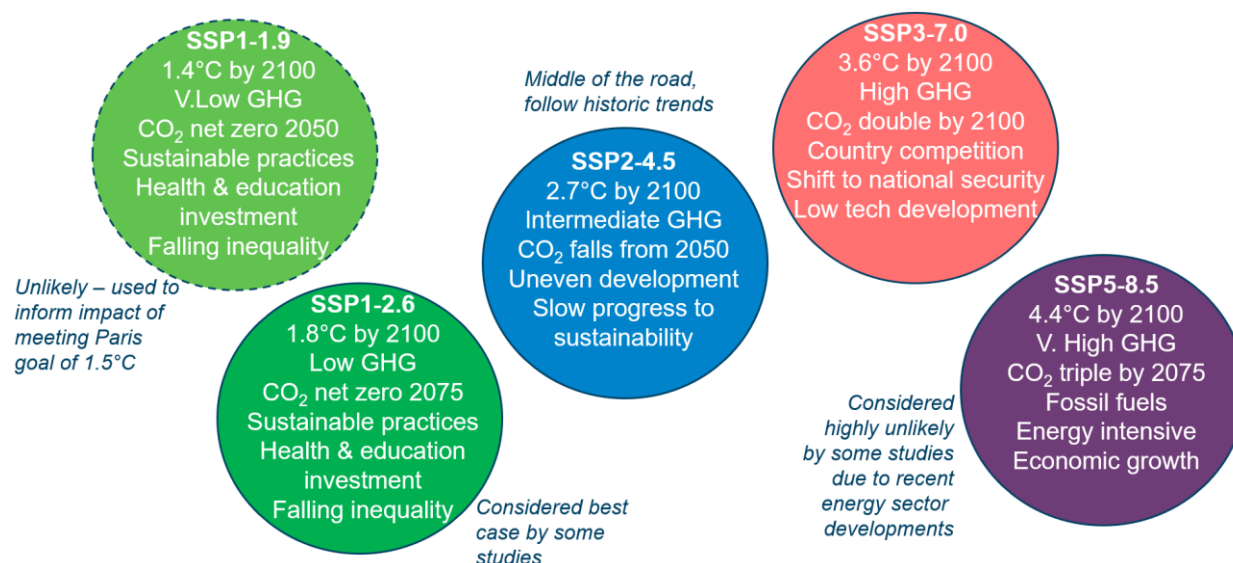


Figure 5-9 Résumé des cinq scénarios d'émissions qui alimentent le dernier rapport du GIEC AR6

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

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.

Code	Nom	Description
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, comme décrit dans les chapitres 3.2.2 et 3.2.2. 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 décrit au chapitre 4. Les taux de biodégradation sont modifiés par un facteur constant, f_Q , en utilisant la différence entre la température moyenne (tbc) pendant la période de référence et le scénario de changement climatique (t). L'évapotranspiration de référence est calculée à l'aide de l'équation de Priestley-Taylor, voir 3.2.2.

Les MCG simulent les changements climatiques à grande échelle et ne sont pas calibrés pour des régions spécifiques. Ils présentent généralement des biais importants qui rendent les résultats du modèle inadaptés comme forçages pour les modèles hydrologiques locaux. Nous supposons que le biais et les autres sources de déviation présents dans le modèle climatique de référence se retrouvent également dans la période de projection et que le changement relatif entre la référence et la projection est approprié pour décrire le changement climatique général pour notre emplacement. Le changement climatique relatif est utilisé pour modifier les forçages de base de notre modèle afin de générer des forçages climatiques projetés à l'aide de la méthode statistique couramment utilisée, la méthode du changement delta. Nous utilisons donc les données de forçage de base du modèle décrites dans la section 3.2, mais nous les recalibrons pour la période de projection afin de tenir compte du changement climatique.

5.2.1 Période de projection

Cette section explique la période de référence et la période de projection du CMIP6 GCM ainsi que la période de référence du modèle (période de simulation du modèle hydrologique de cette étude). Les périodes de référence représentent la période que nous considérons comme représentative du climat actuel. 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 la période de référence de notre modèle est 2012-2019 (7 ans).

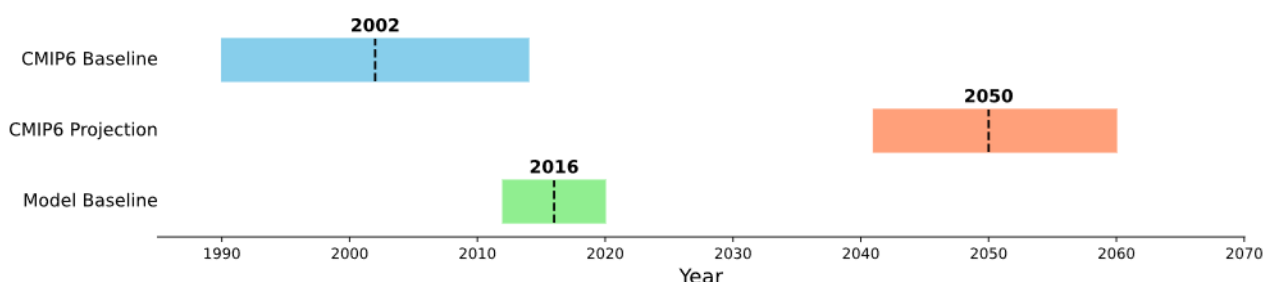


Figure 5-10 Période de projection et de référence CMIP6 et période de référence du modèle (période de simulation). L'année centrale est indiquée par une ligne pointillée.

En comparant la période de référence et la période de projection des MCG CMIP6, nous pouvons estimer comment les variables climatiques que sont les précipitations et la température ont évolué entre les deux périodes. Notre modèle de référence ne coïncide pas avec la période de référence CMIP6 et nous calculons une réduction que nous appelons BRF (facteur de réduction de référence), utilisée dans la méthode du changement delta.

$$BRF = \frac{X_{GCM,projection} - X_{Model,baseline}}{X_{GCM,projection} - X_{GCM,baseline}} = \frac{2050 - 2016}{2050 - 2002} = 0,708$$

Où X représente l'année centrale de chaque période. Comme notre période de simulation est postérieure à la période de référence CMIP6, nous réduisons le changement climatique d'un facteur correspondant afin de refléter la partie du changement climatique qui s'est déjà produite pendant la période de référence de notre modèle.

5.2.2 Méthode du changement delta

La méthode du changement delta consiste à appliquer une mise à l'échelle fixe que nous dérivons des simulations CMIP6 GCM aux variables de forçage du modèle : précipitations, évapotranspiration de référence et température. Les facteurs de mise à l'échelle sont dérivés en comparant la moyenne d'une période de référence du scénario à la moyenne de la période de projection pour chacune des variables de forçage. Nous divisons en outre les périodes en 12 mois de l'année en utilisant 12 facteurs d'échelle mensuels au lieu d'un seul afin d'inclure les variations saisonnières. Les facteurs d'échelle sont multiplicatifs pour les précipitations et l'évaporation, et additifs pour la température :

Précipitations et évaporation :

$$y_{i+T,m}^f = x_{obs,i}^p * \frac{\overline{y_{mod,m}^f}}{\overline{x_{mod,m}^p}} * BRF$$

Température :

$$y_{i+T,m}^f = x_{obs,i}^p + \left(\overline{y_{mod,m}^f} - \overline{x_{mod,m}^p} \right) * BRF$$

Où m est le mois civil, $y_{i+T,m}^f$ est la variable corrigée dans le futur au temps i, $\overline{y_{mod,m}^f}$ est la moyenne des résultats du modèle pour le mois m dans la période future, $\overline{x_{mod,m}^p}$ est la moyenne des résultats du modèle pour le mois m dans la période de référence et $x_{obs,i}^p$ est la variable observée au temps i. BRF est un facteur de réduction introduit parce que la base de référence du modèle est postérieure aux bases de référence CMIP6. Voir « période de projection » ci-dessus pour plus d'explications.

En utilisant la méthode du changement delta, nous obtenons les facteurs d'échelle suivants pour les précipitations, la température et l'évapotranspiration de référence pour les scénarios choisis. Le facteur d'échelle pour la température est additif. Les données sont extraites pour la région du lac Télé - lac Tumba.

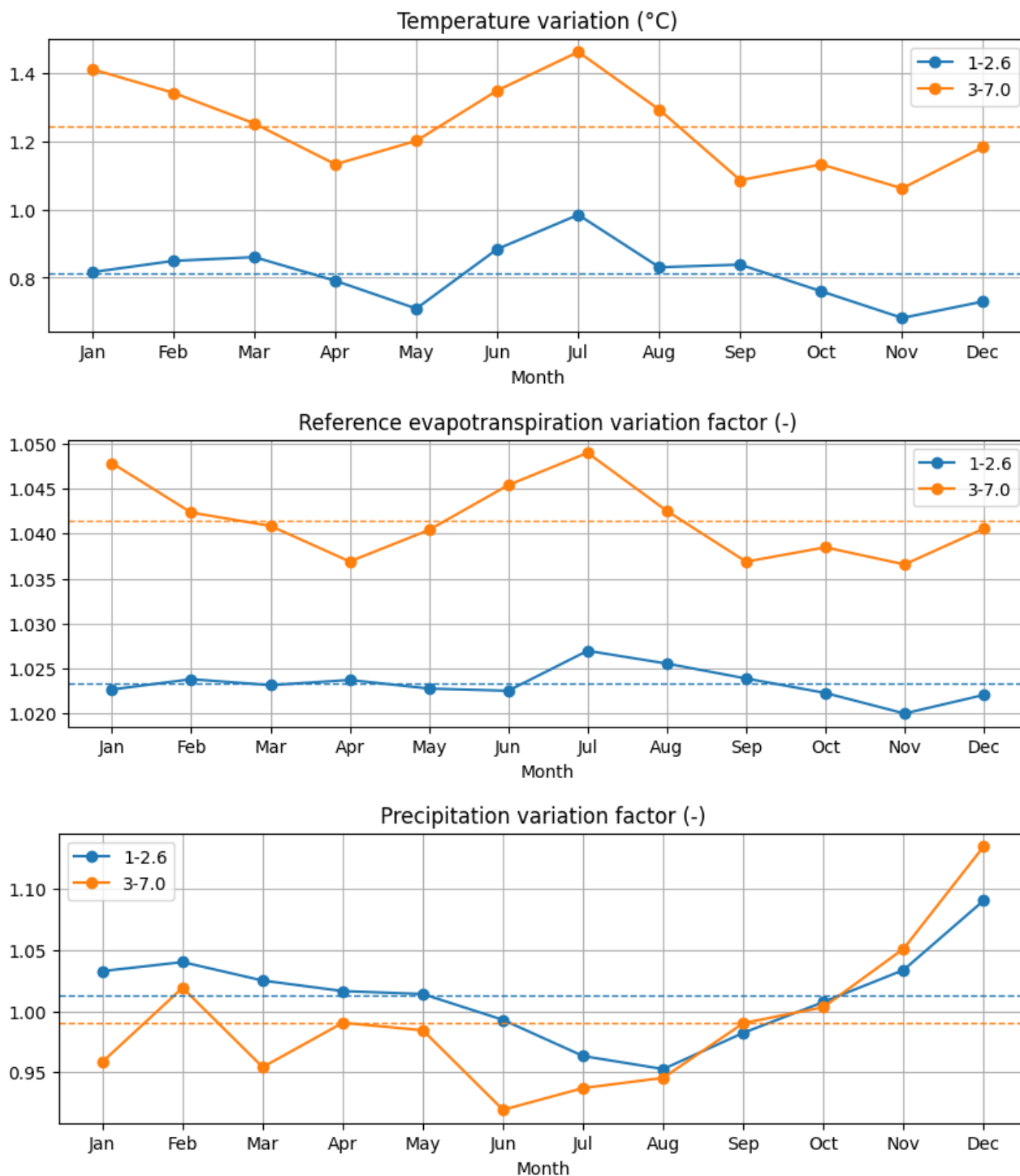


Figure 5-11 Facteurs d'échelle du changement climatique pour les précipitations, la température et l'évapotranspiration de référence

Les facteurs d'échelle sont multiplicatifs pour les précipitations et l'évapotranspiration de référence et additifs pour la température. Les lignes pointillées représentent les valeurs moyennes des facteurs mensuels.

Les températures devraient augmenter dans les deux scénarios, avec une hausse annuelle moyenne de 0,8 °C dans le scénario SSP1-2.6 et de 1,2 °C dans le scénario SSP3-7.0 d'ici 2050, par rapport à la période de simulation 2012-2019. Les augmentations sont plus prononcées pendant la saison sèche. L'évapotranspiration de référence augmente en raison de la hausse des températures, de 2,3 % par an dans le scénario SSP1-2.6 et de 4,1 % par an dans le scénario SSP3-7.0.

Les précipitations annuelles moyennes devraient augmenter de 0,8 % dans le scénario SSP1-2.6 et diminuer de 0,8 % dans le scénario SSP3-7.0. Dans les deux cas, les précipitations devraient augmenter pendant la principale saison humide, en octobre-novembre, et diminuer pendant la principale saison sèche, de juin à août. Entre janvier et mai, les précipitations devraient augmenter dans le scénario SSP1-2.6 et diminuer dans le scénario SSP3-7.0.

Après avoir redimensionné les forçages du modèle, nous pouvons les appliquer aux modèles hydrologiques et biologiques afin de simuler l'effet du changement climatique en comparant les projections futures simulées pour les scénarios de changement climatique à la simulation de référence du modèle. La température utilisée dans l'équation de décomposition de la tourbe (équation 2 dans la section 4) augmente de 0,92 °C dans le scénario SSP1-2.6 et de 1,25 °C dans le scénario SSP3-7.0.

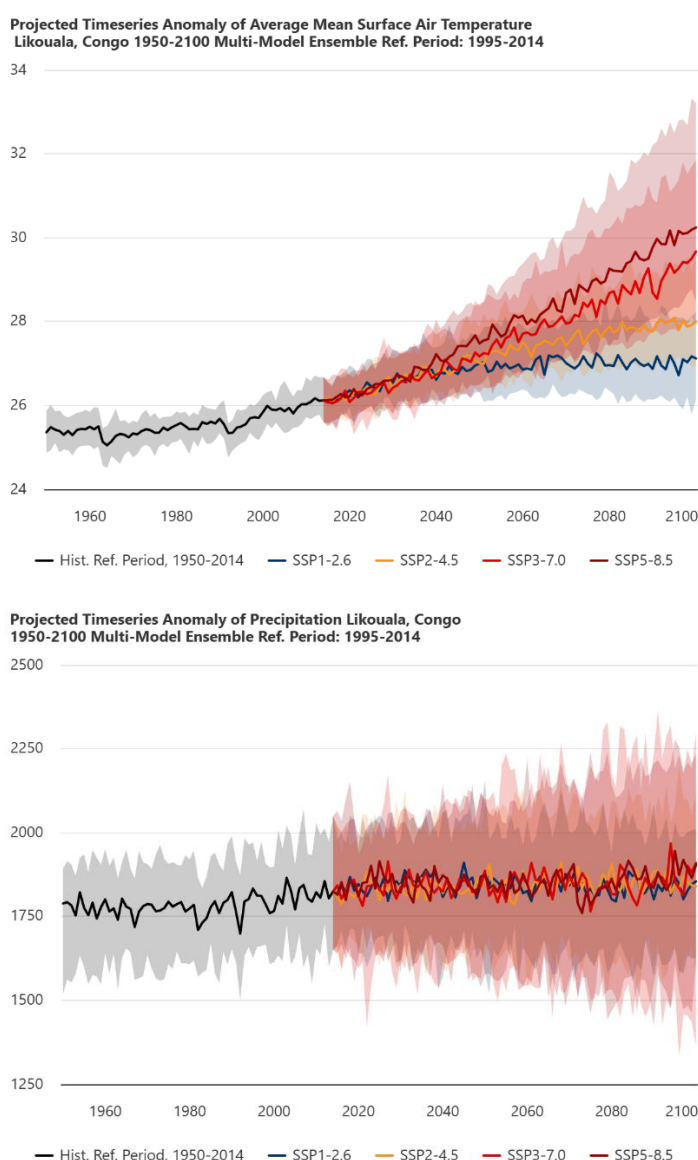


Figure 5-12 Changements prévus en matière de température (en haut) et de précipitations (en bas) et incertitudes associées (Source : Portail de connaissances sur le changement climatique, Banque mondiale)

Les zones ombrées p10 et p90 indiquent les fourchettes du 10e et du 90e centile parmi les différents modèles climatiques de l'ensemble, ce qui donne un aperçu de l'incertitude ou de la dispersion des projections.

Dans la Figure 5-12 , les zones ombrées p10 et p90 donnent un aperçu de l'incertitude des projections CMIP6 dans la province de Likouala en République du Congo. Alors que les températures montrent une nette tendance au réchauffement, les modèles de l'ensemble multiple donnent des résultats très différents pour les précipitations. Les incertitudes importantes associées aux prévisions de précipitations dans la région signifient que les résultats des scénarios de changement climatique (section8) doivent être interprétés avec prudence.

5.3 Régions hydrologiques

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

Code	Nom	Description
1	Tourbières Pluviale	Les processus hydrologiques dans les tourbières sont régis par les précipitations et l'évapotranspiration. C'est principalement le cas dans les zones centrales adjacentes aux principales rivières de la région.
2	Tourbières fluviales	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 alimentée par les précipitations, les limites ouest et est ont un niveau d'eau 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.

5.3.1 Conditions déterminées uniquement par les précipitations

Voir la section 3.2 .

5.3.2 Conditions alimentées par les précipitations et les cours d'eau

Voir la section3.2 .

Les niveaux d'eau variables dans le temps sont utilisés comme limites dans la simulation du dôme de tourbe afin de tenir compte des variations saisonnières du niveau d'eau, décrites dans la section3.2.7 . Le changement climatique pourrait entraîner une modification du débit des cours d'eau, ce qui aurait une incidence sur les résultats de la simulation. L'estimation de la variation du niveau d'eau dans un scénario de changement climatique nécessiterait une modélisation complète du bassin versant en amont dans des conditions climatiques modifiées. Cela impliquerait des efforts considérables en termes d'acquisition de données, d'élaboration de scénarios et de modélisation hydrologique. Une approche plus simple, basée sur une analyse documentaire de la région, est donc préférable dans le cas présent.

À l'aide des projections régionales à échelle réduite du changement climatique CORDEX basées sur le CMIP5, Karam et al. (2023) ont estimé que le débit des fleuves Sangha, Oubangui et Likoula aux Herbes devrait diminuer de 5 % d'ici 2041-2070 dans le cadre du RCP 4.5 (voir Figure 5-13). Ces résultats contrastent avec ceux d'une étude précédente de Tshimanga et Hughes (2012), qui estimaient une diminution du débit de 8 % et 13 % respectivement pour les fleuves Sangha et Oubangui dans le scénario A2 du GIEC, en utilisant des modèles climatiques globaux (MCG) à échelle réduite et corrigés des biais. Aloysius et Saiers (2017) ont appliqué un modèle hydrologique du bassin du Congo avec les projections climatiques de 25 modèles climatiques mondiaux et ont constaté que le ruissellement total dans la région équatoriale du bassin devrait augmenter de 7 % d'ici le milieu du siècle selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5.

Les divergences importantes entre les études mentionnées ci-dessus nous amènent à penser qu'il est raisonnable d'utiliser les séries chronologiques actuelles du niveau de l'eau aux limites du modèle dans les scénarios de changement climatique sans modifications. En outre, les résultats relatifs au débit ne peuvent être convertis en niveaux d'eau sans évaluer les sections transversales des fleuves.

Figure 6. Percent change of average annual Congo River Basin discharge (%) for RCP 4.5 for three future periods (2011–2040); (2041–2070); (2071–2100).

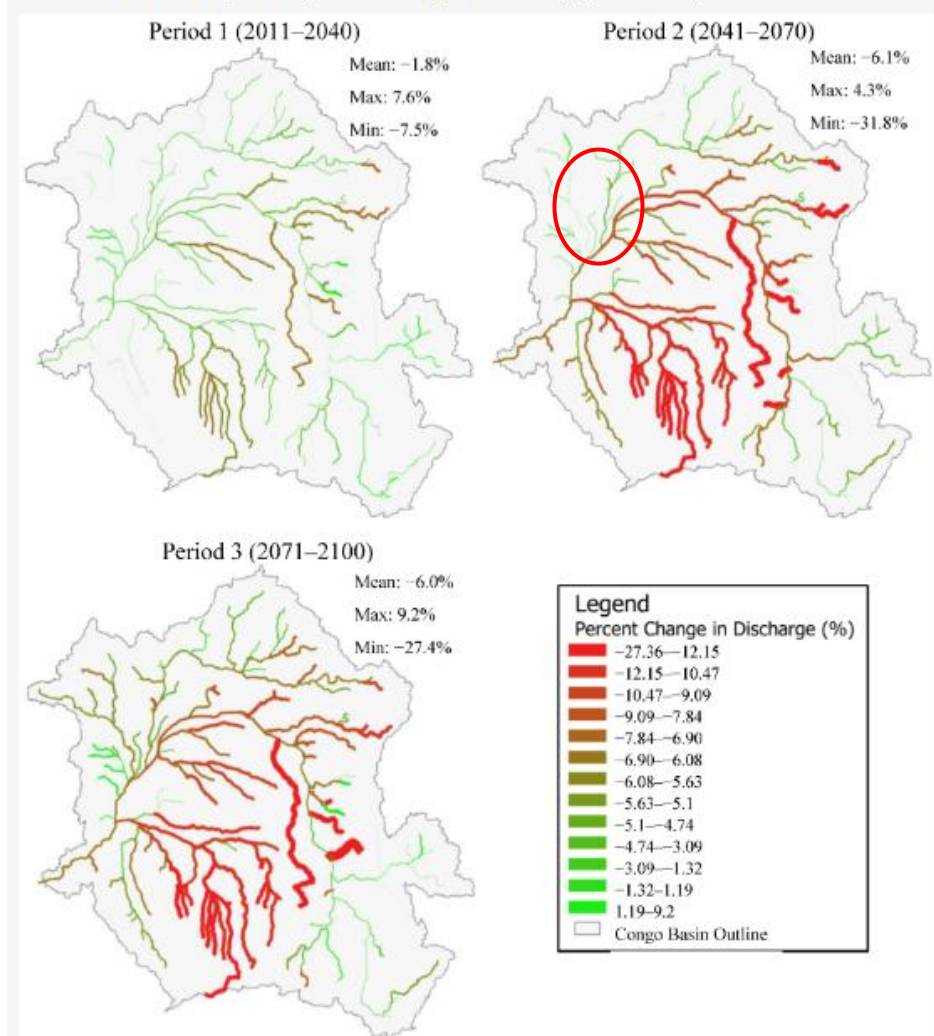


Figure 5-13 Effets du changement climatique sur les débits dans le bassin du Congo, tirés de Karam, et al., 2023

5.4 Ensemble de scénarios résultant

Avec 7 interventions de développement, 3 scénarios climatiques et 2 régions hydrologiques, le nombre de scénarios étudiés est de $42 = 7 \times 3 \times 2$.

Par exemple, le scénario **B.3.2** représente ce qui suit : Que se passerait-il dans les tourbières dans les circonstances suivantes ?

Intervention de développement B : Route construite et opérationnelle : (a) Une route imperméable surélevée est construite à 1 mètre au-dessus de la surface naturelle. Elle est achevée et opérationnelle. (b) La végétation est supprimée 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 en raison du poids de la route.

Climat	3 : SSP3-7.0 : (a) Réchauffement prévu : 3 °C à 4 °C d'ici 2100, avec des conséquences climatiques graves. (b) Ce scénario représente un avenir à haut risque, caractérisé par des changements climatiques importants, des inégalités sociales et une dégradation de l'environnement.
Région hydrologique	2 : Tourbières fluviales : 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 plans d'eau limitrophes (par exemple, les tronçons fluviaux). C'est le cas le plus souvent observé dans les tourbières riveraines, situées principalement en République démocratique du Congo.

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

Derrière chaque définition de scénario se cache un modèle complet avec ses paramètres d'entrée et ses résultats de simulation. 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 :

Les émissions de CO₂ dépendent de la profondeur oxique, qui est elle-même liée à la profondeur des eaux souterraines. Lorsque le niveau moyen de l'eau est inférieur au niveau du sol, la profondeur oxique est inférieure à la profondeur de la nappe phréatique. Au niveau de la nappe phréatique, le sol est complètement saturé. Le sol est considéré comme oxique lorsque la saturation est inférieure à 90 %, c'est-à-dire lorsque plus de 10 % de la porosité est rempli d'air. La remontée capillaire fait monter l'eau dans la colonne de sol, de sorte que la teneur en eau diminue progressivement au-dessus de la nappe phréatique jusqu'à atteindre la profondeur oxique. Les valeurs de profondeur oxique sont toutefois supérieures aux valeurs de profondeur des eaux souterraines lorsque les niveaux moyens d'eau sont supérieurs au niveau du sol. Dans ce cas, la profondeur oxique est en effet fixée à 0, tandis que la profondeur des eaux souterraines est négative. Ce sujet est expliqué en détail dans la section 4 .

Nom	Description de l'indicateur
Flux de carbone à l'intérieur	Changement 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	Changement 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

Remarque concernant l'indicateur « Variation du stock de carbone en kg par m² par an » à l'intérieur et à l'extérieur de la zone d'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 surfaces 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 la forêt : supposons que la superficie de la plantation soit de 10 km x 10 km : superficie de l'empreinte de la plantation = 10^8 m^2 (100 km²) ; superficie de l'empreinte 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 (voir respectivement les chapitres 6.1.3, 6.2.3 et 6.6.3), 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 Analyses de scénarios pour le climat actuel dans des conditions uniquement déterminées par les précipitations

Cette section examine comment diverses interventions affectent la profondeur des eaux souterraines et, par conséquent, les flux de carbone dans les tourbières. L'accent est mis sur la situation dans le climat actuel sous des conditions uniquement pluviales (avec des niveaux d'eau fixes aux limites). La section est organisée comme suit : pour chaque intervention, les résultats hydrologiques sont présentés en premier, suivis des flux de carbone. Enfin, des recommandations sont fournies à l'intention des décideurs politiques et des gestionnaires de tourbières.

6.1 Scénario A.1.1

6.1.1 Définition

Que se passerait-il dans les tourbières dans les circonstances suivantes ?

Intervention de développement	La végétation et la topographie des tourbières sont conformes aux conditions actuelles - entre 2010 et 2020
Climat	Les précipitations, la température et l'évapotranspiration entre 2010 et 2020 sont choisies pour représenter les conditions climatiques actuelles.
Région hydrologique	Les processus hydrologiques dans les tourbières sont uniquement déterminés par les précipitations et l'évapotranspiration. C'est principalement le cas dans les parties nord de la région.

6.1.2 Résultats hydrologiques

Voir la section 3.3 .

6.1.3 Indicateurs

Voir les détails dans la section 4 .

Nom abrégé de l'indicateur	Valeur de l'indicateur	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur/ en dehors	0,20	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur/ en dehors	0,15	m
Flux de carbone à l'intérieur/en dehors	-4,72	kg/m ² /an

6.1.4 Effets clés

(a) Ce scénario de référence révèle des fluctuations saisonnières des niveaux des eaux souterraines, avec une tendance à la baisse observée entre 2012 et 2019. (b) Les niveaux d'eau varient entre 1 mètre sous le sol et 50 centimètres au-dessus du sol. (c) Variabilité spatiale : des nappes phréatiques peu profondes sont observées dans les zones centrales plates, tandis que des nappes phréatiques plus profondes se trouvent sur les bords escarpés du dôme.

6.1.5 Recommandations

Les principales menaces qui pèsent sur les tourbières sont les suivantes : (1) accélération de la décomposition de la tourbe et des émissions de carbone, entraînant la perte de stocks de carbone millénaires, (2) augmentation des émissions de gaz à effet de serre, et (3) dégradation d'un puits de carbone d'importance mondiale. Ces menaces seraient déclenchées par les facteurs suivants : (a) abaissement du niveau des nappes phréatiques, (b) assèchement climatique, (c) intensification et allongement de la saison sèche, (d) augmentation du ruissellement due à la croissance des dômes de tourbe, (e) drainage (par exemple, à l'aide de canaux et de fossés) qui augmenterait la perte d'eau souterraine.

Pour favoriser le développement tout en préservant les tourbières, il convient de tenir compte des éléments suivants : (a) éviter les activités qui abaissent le niveau de la nappe (par exemple, le drainage, l'extraction excessive d'eau), (b) se protéger contre l'assèchement induit par le climat en intégrant la conservation des tourbières dans les stratégies d'adaptation au changement climatique et d'atténuation de ses effets, (c) réduire au minimum la conversion des terres, (d) réglementer la construction de canaux et de fossés dans les zones de tourbières.

6.2 Scénario B.1.1

6.2.1 Définition

Quelles seraient les conséquences d'une intervention dans les tourbières dans les circonstances suivantes ?

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 achevée et opérationnelle. (b) La végétation est supprimée 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.
Climat	Les précipitations, la température et l'évapotranspiration entre 2010 et 2020 sont choisies pour représenter les conditions climatiques actuelles.
Région hydrologique	Les processus hydrologiques dans les tourbières ne sont influencés que par les précipitations et l'évapotranspiration. C'est principalement le cas dans les parties nord de la région.

6.2.2 Résultats hydrologiques

Les niveaux d'eau dans et autour de la zone d'intervention sont indiqués dans la Figure 6-1. Dans la zone d'intervention (graphiques supérieurs), les fluctuations sont atténuées par rapport au scénario de référence. Cela s'explique par le fait que le sol est protégé par la surface pavée, que l'infiltration et la transpiration des plantes sont empêchées et que l'aquifère n'est alimenté que par les écoulements latéraux des eaux souterraines. Les précipitations sur la route s'écoulent rapidement vers les cellules voisines situées plus bas. Cet afflux supplémentaire explique pourquoi les niveaux d'eau dans ces cellules sont, en moyenne, plus élevés que dans le scénario de référence (graphiques du milieu). L'effet diminue à mesure que l'on s'éloigne de la route (graphiques du bas).

La route a un impact différent sur le centre du dôme de tourbe et sur les zones proches des limites ouest et est. Au centre du dôme, les nappes phréatiques restent principalement au-dessus du sol pendant la période de simulation, tandis qu'à proximité des limites, elles sont principalement sous le sol. En raison des caractéristiques spécifiques du rendement de la tourbe - où les fluctuations du niveau de la nappe phréatique dépendent de la porosité et de la conductivité hydraulique - un afflux similaire provenant de la route produit des changements plus importants dans la nappe phréatique sous la surface de la tourbe qu'au-dessus (voir les graphiques du milieu à gauche et du milieu à droite). Près des limites, le niveau de la nappe baisse rapidement avec la distance par rapport à la route, car

l'eau s'écoule vers la limite (en bas à gauche). En revanche, au centre du dôme, l'impact de la route reste visible même à 2 km de distance, le niveau de la nappe étant jusqu'à 10 cm plus élevé que dans le scénario de référence (en bas à droite).

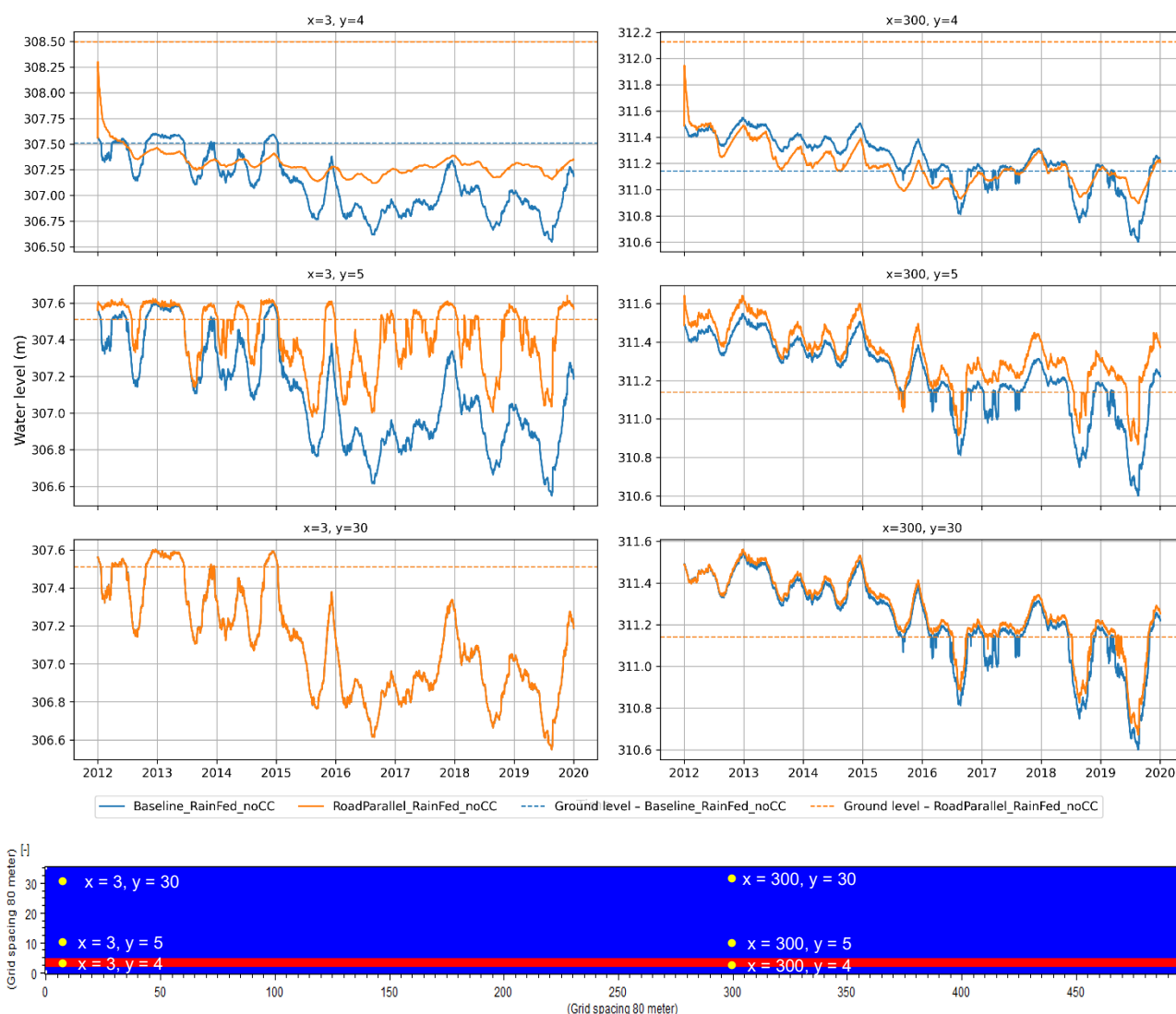


Figure 6-1 Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée : scénario B.1.1 (RoadParallel_RainFed_noCC)

Figure 6-2 montre un profil du niveau d'eau dans la direction y au centre du dôme de tourbe à un moment donné. Elle illustre l'effet de la route sur la nappe phréatique locale. Sans infiltration, le niveau d'eau baisse sous la route, mais il est élevé dans les cellules voisines en raison de l'écoulement superficiel provenant de la surface de la route. Cet effet diminue progressivement avec la distance par rapport à la route.

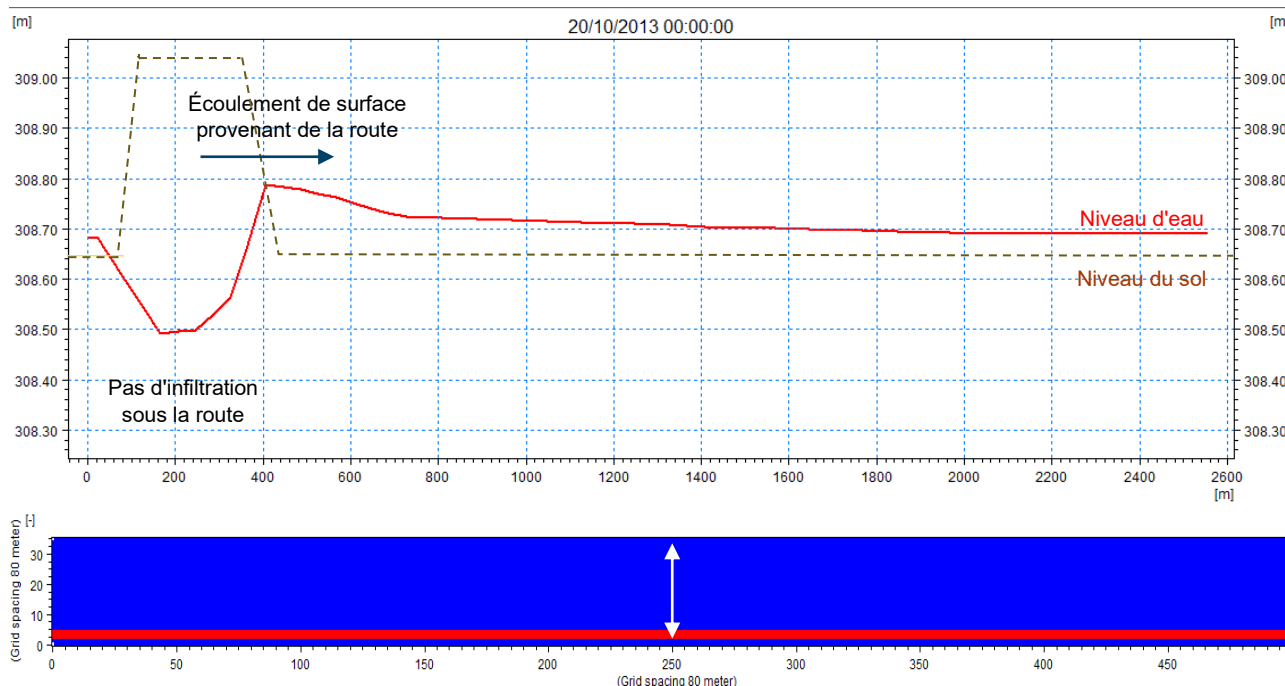


Figure 6-2 Profil du niveau d'eau dans la direction Y

6.2.3 Indicateurs

Les valeurs des indicateurs sont présentées dans le tableau ci-dessous. La profondeur oxygène et la profondeur de la nappe phréatique sous la route sont élevées, car la route a été surélevée d'un mètre. Cela ne semble toutefois pas entraîner d'émissions de CO₂ significatives. La profondeur de la nappe phréatique ne dépasse jamais 2 m, ce qui correspond à la profondeur du remblai de gravier sous la route. La tourbe sous-jacente n'est donc soumise qu'à une lente décomposition anoxique tout au long de la simulation.

En dehors de la zone routière, le niveau moyen des eaux souterraines est moins profond que dans le scénario de référence (voir les résultats hydrologiques ci-dessus). Ici, la profondeur oxygène dépasse la profondeur des eaux souterraines, car le niveau moyen des eaux souterraines est supérieur au niveau du sol sur une grande partie de l'empreinte du modèle, bien qu'il reste inférieur à celui du scénario de référence. Cette profondeur oxygène plus faible explique pourquoi le flux de carbone en dehors de la route est environ deux fois moins important que dans le scénario A.1.1.

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur B.1.1	Valeur de l'indicateur A.1.1	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,92	0,20	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	1,06	0,15	m
Flux de carbone à l'intérieur	0,00	-4,72	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,13	0,20	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,05	0,15	m
Flux de carbone en dehors	-2,90	-4,72	kg/m ² /an

Une représentation spatiale des flux de carbone (voir Figure 6-3) montre que la construction d'une route non drainée réduit la décomposition de la tourbe dans les cellules environnantes, bien qu'elle reste importante près des limites ouest et est.

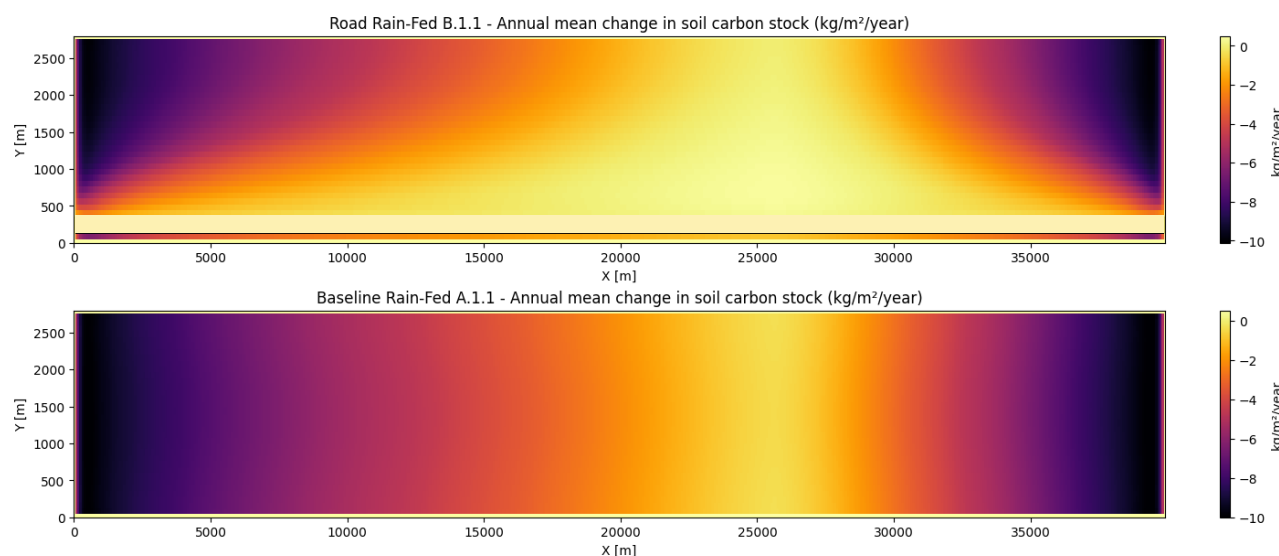


Figure 6-3 Flux annuels moyens de carbone dans le sol – Route (B.1.1) vs scénario de référence (A.1.1)

6.2.4 Effets clés

(a) L'infiltration ne se produit pas directement sur la route ; les précipitations s'écoulent à la surface vers les zones adjacentes situées plus bas, où elles s'infiltrent et rechargent l'aquifère. (b) La route surélevée augmente la profondeur des eaux souterraines en dessous. (c) Les niveaux d'eau augmentent près de la route, leur influence diminuant avec la distance par rapport à celle-ci. (d) En conséquence, la décomposition de la tourbe est réduite par rapport aux conditions actuelles (référence).

6.2.5 Recommandations

L'influence de la route s'étend généralement jusqu'à 2 km de son bord. La pente de la surface près de la route serait modifiée, ce qui entraînerait une modification des schémas d'infiltration et d'écoulement de surface. Cela pourrait conduire à un assèchement à long terme et irréversible du sol le long de la route.

Les mesures recommandées pour atténuer ces effets sont les suivantes : Dans une zone tampon le long de la route, maintenir l'humidité des tourbières en : (1) réhumidifiant - bloquer les canaux de drainage et les fossés afin d'élever le niveau de la nappe et de restaurer l'hydrologie naturelle ; et (2) gérant la végétation - favoriser la végétation indigène retenant l'eau (comme les espèces forestières marécageuses) qui aide à ombrager la tourbe et à réduire l'évaporation.

6.3 Scénario C.1.1

6.3.1 Définition

Que se passerait-il dans les tourbières dans les circonstances suivantes ?

Intervention de développement (a) Une route surélevée imperméable d'une largeur de 80 m est en cours de construction à 1 mètre au-dessus de la surface naturelle. (b) La végétation est supprimée 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, soit 1 mètre sous la surface environnante.

Climat

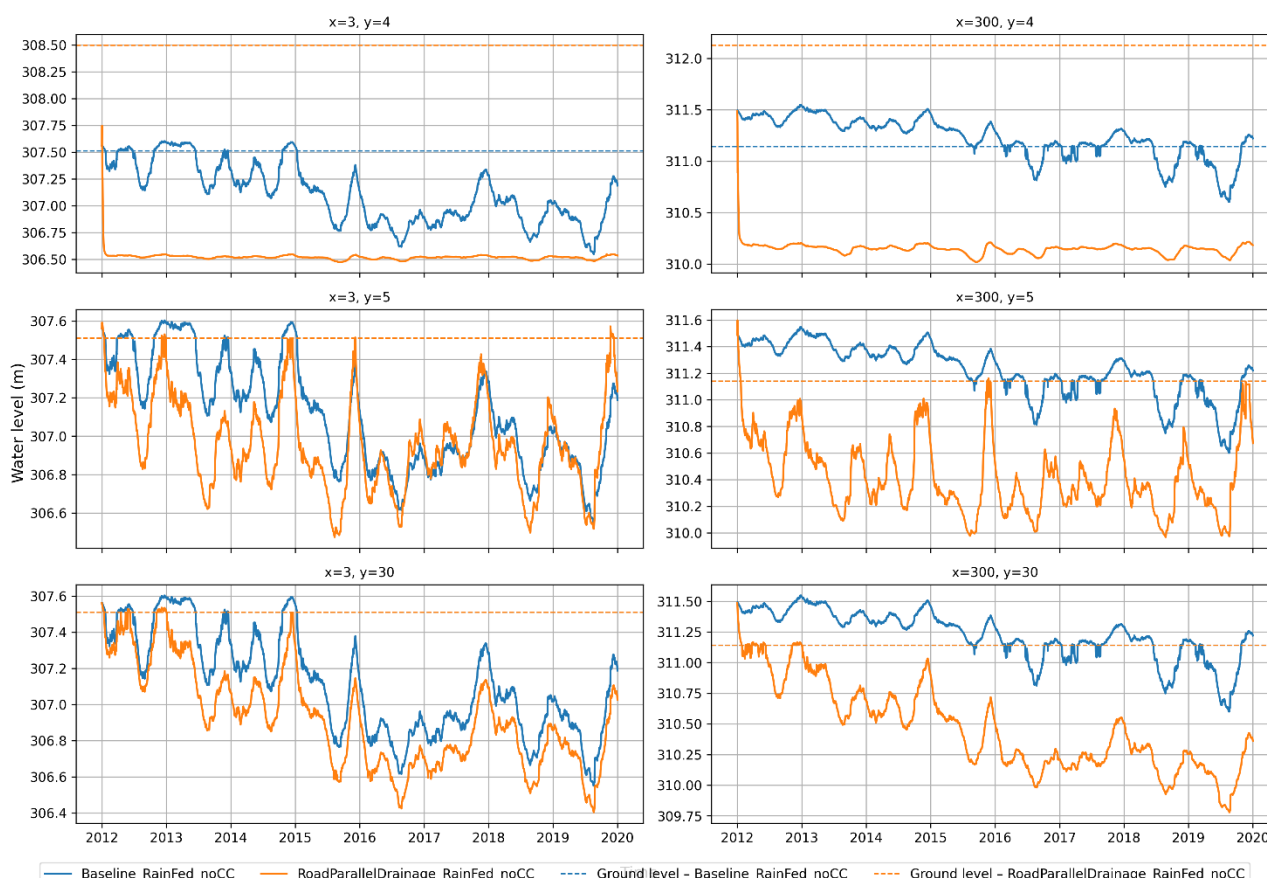
Les précipitations, la température et l'évapotranspiration entre 2010 et 2020 sont choisies pour représenter les conditions climatiques actuelles.

Région hydrologique

Les processus hydrologiques dans les tourbières ne sont influencés que par les précipitations et l'évapotranspiration. C'est principalement le cas dans les parties nord de la région.

6.3.2 Résultats hydrologiques

Les niveaux d'eau dans et autour de la zone d'intervention sont indiqués dans l'Figure 6-4. En l'espace d'un mois, les niveaux d'eau sous la route descendent jusqu'au niveau du drain, à 2 m sous terre (graphiques supérieurs). Le drainage affecte également les cellules voisines, où la nappe phréatique est plus profonde que dans le scénario de référence près du centre du dôme, malgré l'afflux des eaux de ruissellement provenant de la surface de la route (au milieu à droite). L'impact du drainage reste significatif même à 2 km de la route, où les niveaux d'eau près du centre du dôme sont 1 m plus bas que dans le scénario de référence à la fin de la simulation (en bas à droite). Les différences entre les deux scénarios sont moins prononcées près des limites ouest et est, car le niveau de la nappe phréatique dans ces zones est déjà profond dans le scénario de référence (à gauche).



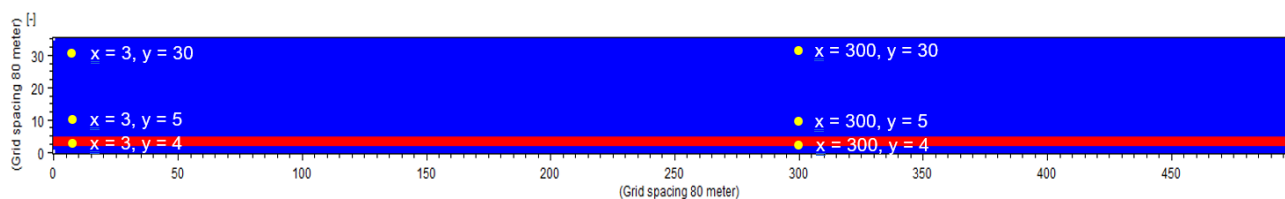


Figure 6-4 Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée, scénario C.1.1 (RoadParallelDrainage_RainFed_noCC)

6.3.3 Indicateurs

Les valeurs des indicateurs sont présentées dans le tableau ci-dessous. Comme dans le scénario B.1.1, la profondeur oxygène et la profondeur de la nappe phréatique sous la route sont élevées, car la route a été surélevée d'un mètre. Cela n'entraîne pas de décomposition significative de la tourbe, car la profondeur de la nappe phréatique dépasse rarement 2 m, ce qui correspond à la profondeur du remblai de gravier sous la route. La tourbe sous-jacente n'est donc soumise qu'à une lente décomposition anoxique tout au long de la simulation.

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur C.1.1	Valeur de l'indicateur A.1.1	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	2,12	0,20	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	2,00	0,15	m
Flux de carbone à l'intérieur	0,00	-4,72	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,68	0,20	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,68	0,15	m
Flux de carbone en dehors	-14,26	-4,72	kg/m ² /an

Contrairement au scénario de référence A.1.1, la décomposition de la tourbe est très élevée dans l'ensemble du domaine modélisé, ce qui montre l'influence majeure du drainage sur les niveaux d'eau (voir Figure 6-5).

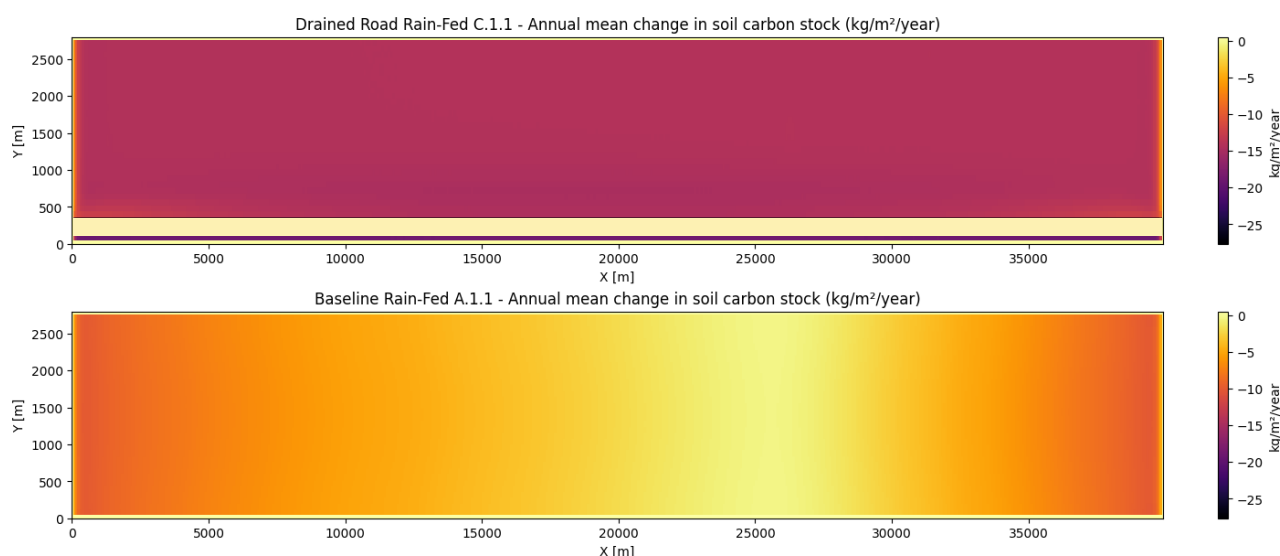


Figure 6-5 Variation annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Route drainée (C.1.1) par rapport au scénario de référence (A.1.1)

6.3.4 Effets clés

(a) Les niveaux des eaux souterraines se stabilisent à 2 mètres de profondeur sous la route. (b) L'influence du drainage s'étend au-delà de la zone d'intervention, réduisant les niveaux des eaux souterraines dans les zones adjacentes. (c) La décomposition de la tourbe est accrue en raison des faibles niveaux d'eau dans les zones adjacentes.

6.3.5 Recommandations

Les effets du drainage pendant la construction sont considérables. L'objectif est donc de limiter leur impact autant que possible.

Pendant la construction, les éléments suivants doivent être pris en compte : (1) systèmes de drainage temporaires - concevoir un drainage qui minimise l'abaissement de la nappe phréatique et qui soit facile à retirer ou à bloquer après la construction ; (2) installer des barrières anti-sédiments et des pièges à sédiments ; (3) limiter la durée du drainage ; (4) réhumidifier immédiatement après la construction - bloquer les fossés temporaires et permettre aux niveaux d'eau naturels de revenir rapidement ; (5) utiliser des techniques de construction à faible impact - utiliser des routes surélevées, des géotextiles ou des tapis pour réduire le compactage du sol et la perturbation du débit d'eau ; (6) restaurer rapidement la végétation - planter des espèces indigènes des zones humides pour stabiliser le sol et aider à retenir l'humidité.

6.4 Scénario D.1.1

6.4.1 Définition

Que se passerait-il dans les tourbières dans les circonstances suivantes ?

Intervention de développement	(a) Une ville se développe dans la forêt tourbeuse. (b) Le relief est surélevé de 50 cm pour éviter les inondations. (c) La végétation est défrichée et la surface du sol est partiellement pavée. (d) La tourbe est comprimée sous le poids des bâtiments.
Climat	Les précipitations, la température et l'évapotranspiration entre 2010 et 2020 sont choisies pour représenter les conditions climatiques actuelles.
Région hydrologique	Les processus hydrologiques dans les tourbières ne sont influencés que par les précipitations et l'évapotranspiration. C'est principalement le cas dans les parties nord de la région.

6.4.2 Résultats hydrologiques

Les niveaux d'eau dans et autour de la zone d'intervention sont indiqués dans la Figure 6-6. Dans la zone de peuplement surélevée (graphiques supérieurs), les niveaux de la nappe phréatique sont plus élevés que dans le scénario de référence, en particulier le long des limites ouest et est. La nappe phréatique monte dans la colonne de sol car la tourbe a un fort potentiel capillaire. De plus, comme la végétation est défrichée dans le scénario D.1.1, il n'y a pas de transpiration. Pendant les périodes humides, la transpiration est compensée par l'évaporation à la surface du sol, de sorte que le volume total évaporé est le même que dans le scénario A.1.1. La teneur totale en eau et le rendement spécifique de la tourbe sont réduits en raison de la compression due à l'affaissement. Cette réduction du volume stockable signifie qu'il y a moins d'eau disponible pour l'évaporation à partir de la couche arable pendant les périodes sèches.

Ainsi, en raison de la remontée capillaire sous le tassement élevé et comme l'évapotranspiration est plus faible que dans le scénario de référence, le niveau de la nappe ne présente pas le même déclin progressif que celui observé dans la simulation de référence. L'influence du tassement est également visible dans les cellules voisines où le niveau de la nappe est moins profond que dans le scénario de référence (graphiques du milieu). Les profondeurs du niveau de la nappe dans le tassement sont

initialement beaucoup plus élevées que dans le scénario de référence, mais elles convergent progressivement vers celui-ci au fil du temps.

En raison des caractéristiques de rendement spécifiques de la tourbe, où la montée du niveau phréatique dépend de la porosité et de la conductivité hydraulique, le niveau de la nappe fluctue davantage sous la surface de la tourbe qu'au-dessus (voir les graphiques du milieu à gauche et du milieu à droite). Près des limites, le niveau de la nappe baisse rapidement avec la distance par rapport à l'affaissement, car l'eau s'écoule vers la limite (en bas à gauche). Autour du centre du dôme de tourbe, les niveaux d'eau fluctuent beaucoup plus sous l'affaissement que dans le scénario de référence pendant la première moitié de la simulation, étant donné que la topographie a été relevée de 50 cm et que le niveau de la nappe se trouve sous le sol plutôt qu'au-dessus (en haut à droite).

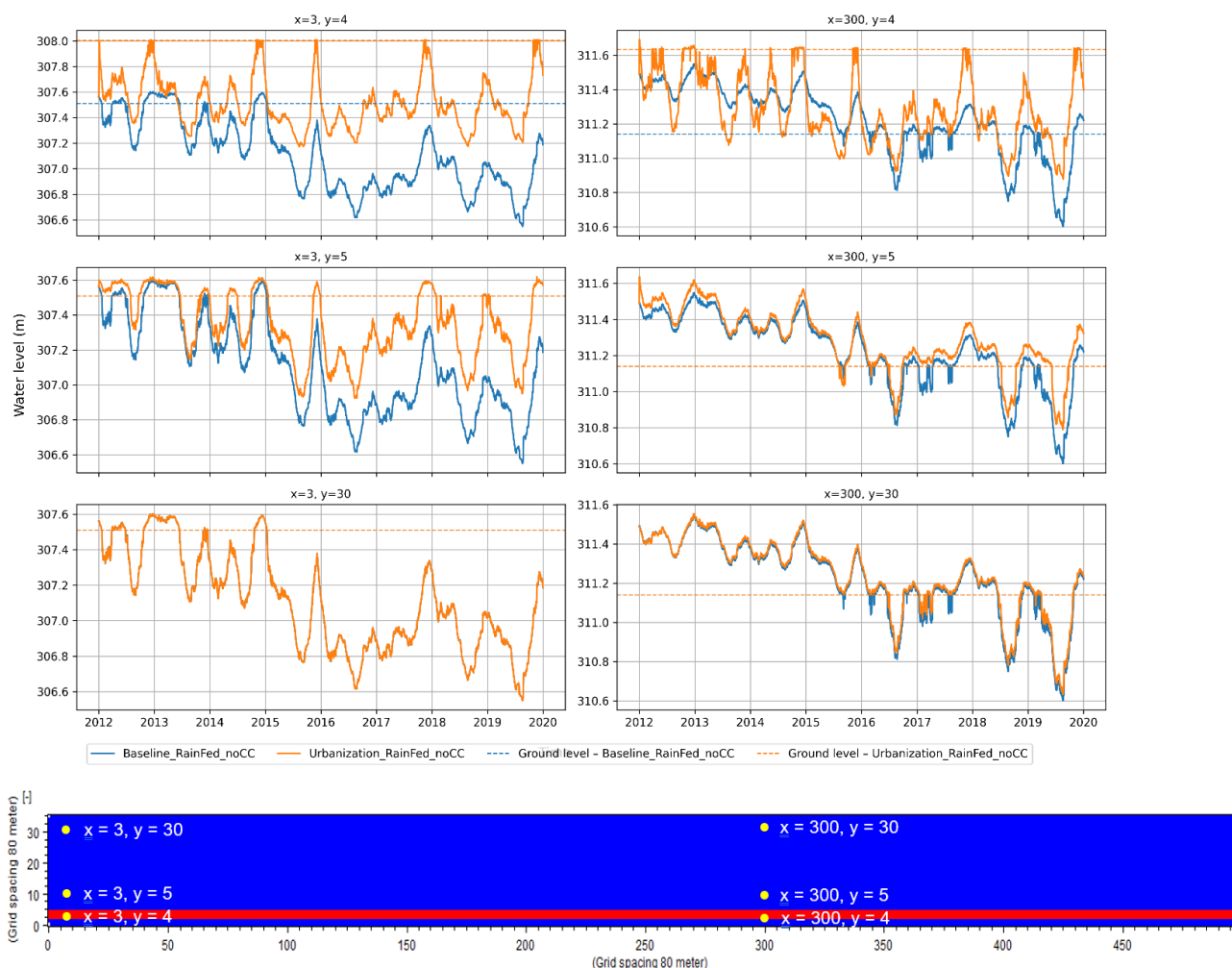


Figure 6-6 Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée, scénario D.1.1 (Urbanisation_RainFed_noCC)

6.4.3 Indicateurs

Les valeurs des indicateurs sont présentées dans le tableau ci-dessous. La profondeur oxygène et la profondeur de la nappe phréatique sous la zone urbanisée sont plus élevées que dans le scénario de référence, car le niveau du sol a été relevé de 50 cm. Il en résulte une perte importante du stock de carbone dans le sol. En dehors de la zone urbanisée, la profondeur moyenne de la nappe phréatique est moins importante que dans le scénario de référence (voir les résultats hydrologiques ci-dessus). La profondeur oxygène est réduite, ce qui entraîne une décomposition de la tourbe moins importante que dans le scénario A.1.1.

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur D.1.1	Valeur de l'indicateur A.1.1	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,37	0,20	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	0,40	0,15	m
Flux de carbone à l'intérieur	-8,77	-4,72	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,16	0,20	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,10	0,15	m
Flux de carbone en dehors	-3,80	-4,72	kg/m ² /an

Une représentation spatiale de la variation moyenne du stock de carbone dans le sol (voir Figure 6-7) montre que la construction d'un lotissement augmente fortement la décomposition de la tourbe dans l'empreinte du lotissement et la réduit dans les cellules environnantes, bien qu'elle reste importante près des limites ouest et est.

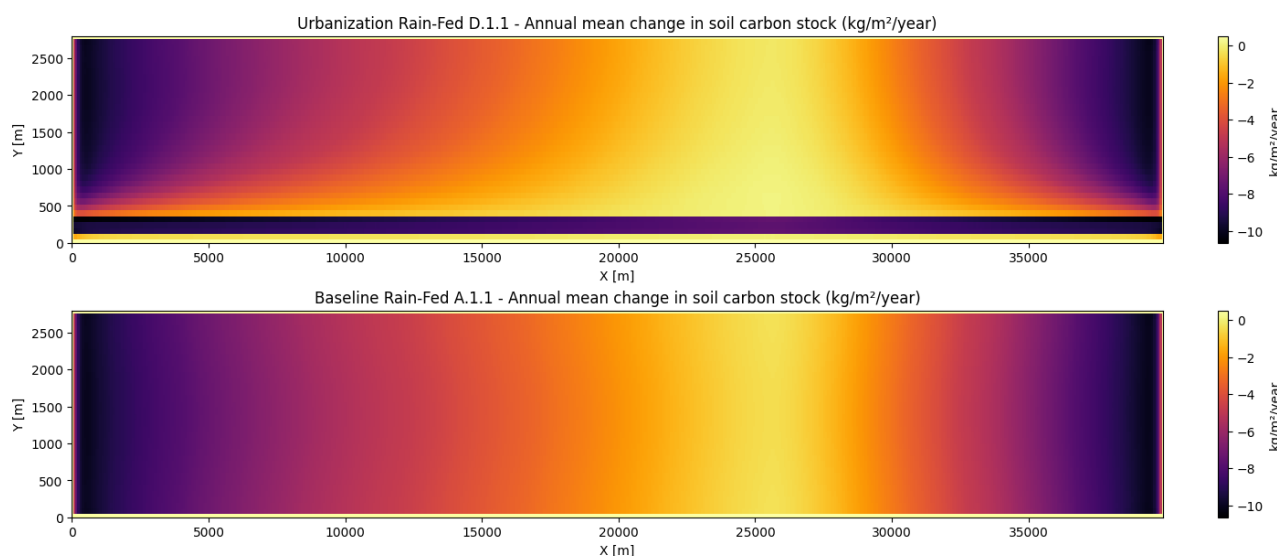


Figure 6-7 Variation annuelle moyenne du stock de carbone de la tourbe – Lotissement (D.1.1) par rapport au scénario de référence (A.1.1)

6.4.4 Effets clés

(a) Le rehaussement du sol de la zone urbanisée entraîne un abaissement du niveau des nappes phréatiques. (b) Les niveaux moyens d'eau augmentent en dehors de l'empreinte urbaine, mais cet effet s'estompe avec la distance. (c) La dégradation de la tourbe en dehors de la zone d'intervention est réduite en raison de niveaux moyens d'eau plus élevés.

6.4.5 Recommandations

La construction d'un lotissement dans les tourbières aurait de graves conséquences sur l'environnement, telles que (1) l'abaissement du niveau phréatique, (2) l'augmentation de la décomposition de la tourbe qui en résulterait, (3) l'affaissement du sol et (4) l'augmentation du risque d'incendie.

Les mesures d'atténuation à envisager sont les suivantes : (a) zonage - utiliser l'aménagement du territoire pour orienter le développement vers d'autres zones ; (b) conception minimale du drainage - utiliser des fondations surélevées ou des passerelles pour réduire le besoin de drainage et la perturbation des sols ; (c) zones tampons hydrologiques - maintenir les zones humides environnantes afin de préserver le débit naturel de l'eau et l'humidité ; (d) plans de prévention des incendies - mettre

en place des coupe-feu, sensibiliser la communauté et mettre en place des systèmes d'intervention d'urgence.

6.5 Scénario E.1.1

6.5.1 Définition

Que se passerait-il dans les tourbières dans les circonstances suivantes ?

Intervention de développement	(a) Un incendie de forêt détruit complètement la végétation. (b) En conséquence, les propriétés du sol changent : la densité apparente augmente et le rendement spécifique diminue.
Climat	Les précipitations, la température et l'évapotranspiration entre 2010 et 2020 sont choisies pour représenter les conditions climatiques actuelles.
Région hydrologique	Les processus hydrologiques dans les tourbières ne sont influencés que par les précipitations et l'évapotranspiration. C'est principalement le cas dans les parties nord de la région.

6.5.2 Résultats hydrologiques

Les niveaux d'eau dans et autour de la zone d'intervention sont indiqués dans l'Figure 6-8 . Près des limites ouest et est, les niveaux de la nappe phréatique dans la zone brûlée sont plus élevés que dans le scénario de référence A.1.1 pendant la seconde moitié de la période de simulation (voir graphique en haut à gauche). Comme il ne reste aucune végétation dans le scénario E.1.1, il n'y a pas de transpiration. Pendant les périodes humides, la transpiration est compensée par l'évaporation à la surface du sol, de sorte que le volume total évaporé est le même que dans le scénario A.1.1. À partir de 2015, cependant, la teneur en humidité de la couche superficielle tombe en dessous de la capacité au champ, ce qui signifie que moins d'eau est disponible pour l'évaporation. En conséquence, le niveau de la nappe s'élève progressivement au-dessus du scénario de référence. Cette augmentation du niveau de la nappe est également perceptible juste à l'extérieur de la zone brûlée (au milieu à gauche).

Au centre du dôme de tourbe (en haut à droite), la nappe phréatique est moins profonde qu'à proximité des limites, ce qui empêche la teneur en humidité de la couche superficielle de descendre en dessous de la capacité au champ, même pendant les périodes sèches. L'évapotranspiration est donc la même que dans le scénario de référence. Cependant, la nappe phréatique descend plus profondément pendant les saisons sèches, car la capacité au champ de la tourbe brûlée est réduite par rapport à celle de la tourbe intacte. Pour un volume évaporé donné, une capacité au champ plus faible entraîne une baisse plus importante du niveau de l'eau.

Étant donné que le feu a lissé la microtopographie du terrain, la zone brûlée agit comme un chemin d'écoulement préférentiel, ce qui explique pourquoi la profondeur de l'eau de surface est réduite par rapport au scénario de référence (en haut à gauche). Le ruissellement de surface peut également expliquer pourquoi les nappes phréatiques souterraines sont également plus basses pendant la première moitié de la période de simulation (en haut et au milieu à gauche).

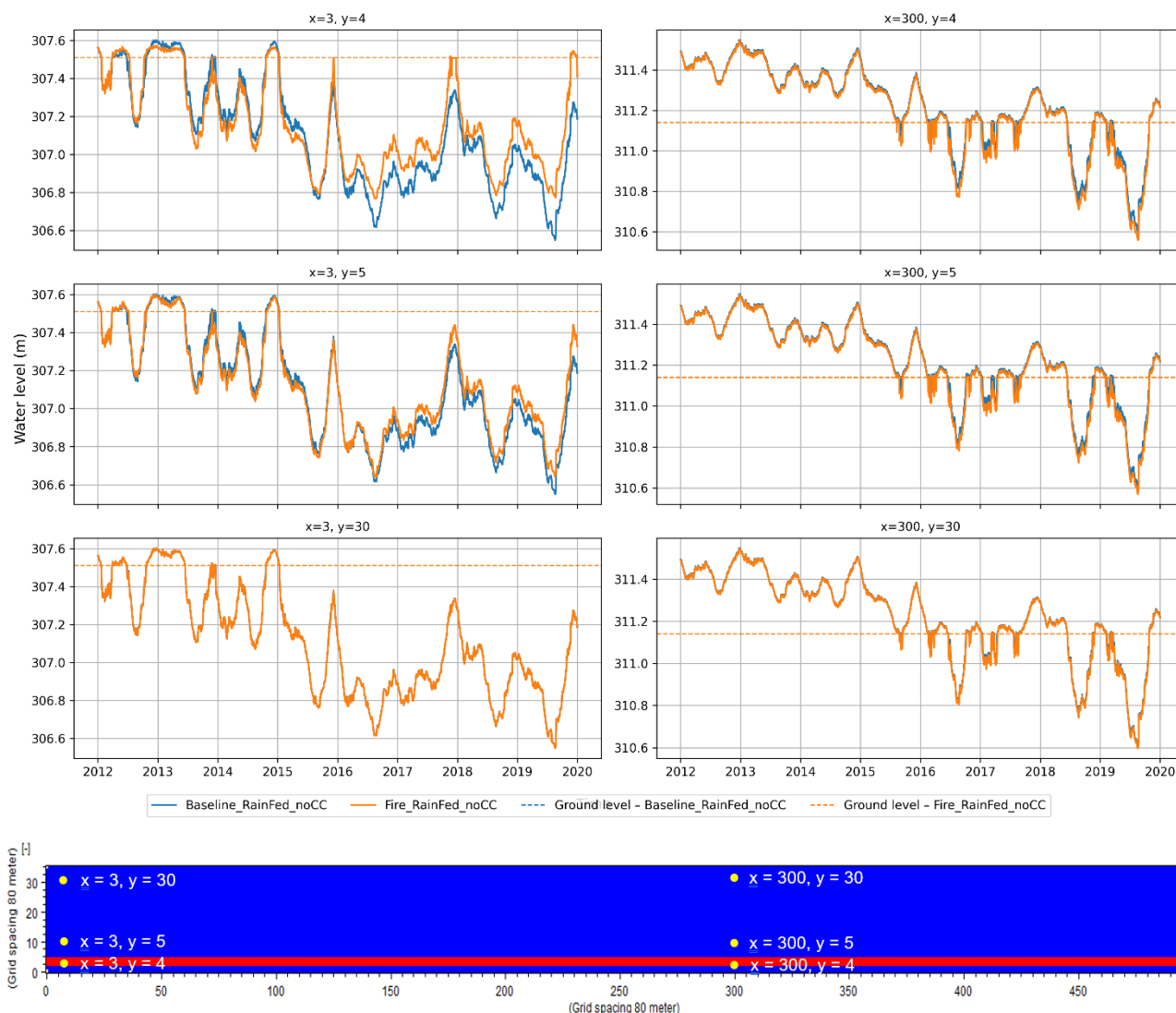


Figure 6-8 Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée, scénario E.1.1 (Fire_RainFed_noCC)

6.5.3 Indicateurs

Les valeurs des indicateurs sont présentées dans le tableau ci-dessous. La réduction de l'évapotranspiration dans la zone brûlée entraîne une augmentation de la teneur en humidité du sol et donc une diminution de la profondeur moyenne de la zone oxygène. La diminution de la profondeur de la zone oxygène ne se traduit pas ici par une diminution du flux net de carbone provenant de la zone brûlée. En effet, cet effet est compensé par l'absence de production de litière/stockage de carbone dans la zone brûlée. En dehors de la zone d'intervention, les différences entre les scénarios E.1.1 et A.1.1 sont faibles.

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur E.1.1	Valeur de l'indicateur A.1.1	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,18	0,20	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	0,14	0,15	m
Flux de carbone à l'intérieur	-4,67	-4,72	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,20	0,20	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,16	0,15	m
Flux de carbone en dehors	-4,78	-4,72	kg/m ² /an

La répartition spatiale de la variation moyenne du stock de carbone dans la zone modélisée montre que des flux moyens similaires dans les deux scénarios masquent des différences spatiales : dans la zone brûlée, la décomposition de la tourbe est légèrement plus importante que dans le scénario de référence près du centre du dôme de tourbe et moins importante près des limites ouest et est (Figure 6-9).

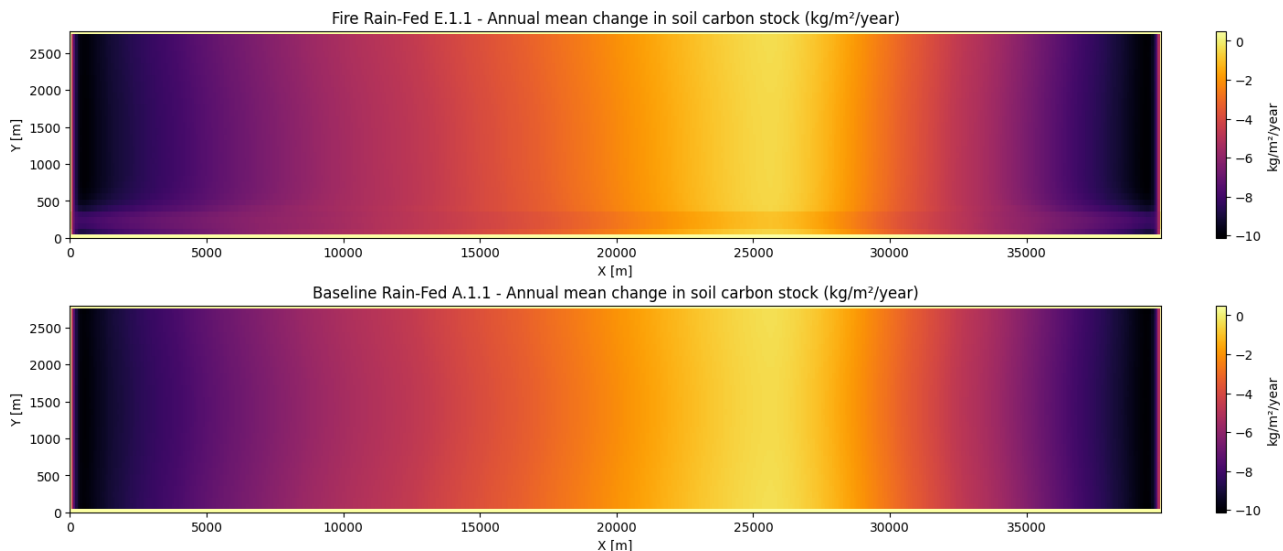


Figure 6-9 Variation annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Incendie (E.1.1) vs scénario de référence (A.1.1)

Comme la décomposition oxydative est prépondérante, on peut supposer que le carbone du sol se décompose par le biais d'émissions de CO_2 , s'élevant à $17,11 \text{ kg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ dans l'empreinte. Hirano et al. (2012) ont comparé les émissions de CO_2 entre les tourbières intactes et les forêts marécageuses brûlées à Kalimantan, en Indonésie, et ont constaté qu'elles sont beaucoup plus élevées dans les forêts brûlées ($18,30 \pm 2,64 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2/\text{an}$) que dans les tourbières intactes ($6,38 \pm 7,47 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2/\text{an}$). Cette différence importante dans les flux de carbone entre les deux tourbières contraste avec les résultats simulés présentés ci-dessus.

6.5.4 Effets clés

(a) Par rapport aux conditions de référence, les niveaux des eaux souterraines augmentent pendant les saisons sèches le long des limites, mais diminuent dans le reste du dôme. (b) En dehors de la zone touchée par les incendies, les niveaux d'eau sont similaires à ceux du scénario de référence. (c) Dans la zone d'intervention, la variation moyenne du stock de carbone dans le sol est similaire à celle du scénario de référence, car la diminution des émissions due à la réduction de la profondeur de la zone oxydative est compensée par l'absence de stockage de carbone par la végétation brûlée. Aucun changement significatif n'est observé dans les flux de carbone en dehors de la zone d'intervention.

6.5.5 Recommandations

Recommandations pour atténuer les effets des incendies de forêt : (1) prévention de la perte de végétation grâce à des pare-feu et des brûlages contrôlés ; (2) maintien ou restauration des nappes phréatiques par réhumidification (bloquer les canaux de drainage et restaurer l'hydrologie naturelle pour maintenir la tourbe humide et réduire les risques d'incendie) et par la construction de structures de rétention d'eau (utiliser des digues ou de petits barrages pour retenir l'eau pendant les saisons sèches) ; (3) restauration après incendie par revégétalisation (replanter des espèces indigènes des tourbières pour stabiliser le sol et restaurer l'évapotranspiration) et amendement du sol (utiliser des paillis organiques ou du biochar pour améliorer la structure du sol et la rétention d'eau).

6.6 Scénario F.1.1

6.6.1 Définition

Que se passerait-il dans les tourbières dans les circonstances suivantes ?

Intervention de développement	Déforestation et conversion en plantations de palmiers à huile : (a) La végétation naturelle est défrichée pour créer de nouvelles plantations de palmiers à huile. (b) Les palmiers à huile prospèrent avec un niveau d'eau moyen de 40 à 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 de palmiers à huile mature âgée de 15 ans. (d) La microtopographie est lissée en raison du déboisement. (e) Les propriétés du sol changent en raison du drainage : augmentation de la densité apparente, réduction du rendement spécifique et réduction de la conductivité hydraulique à saturation. (f) La topographie est abaissée de 50 cm en raison de l'affaissement du sol induit par le drainage.
Climat	Les précipitations, la température et l'évapotranspiration entre 2010 et 2020 sont choisies pour représenter les conditions climatiques actuelles.
Région hydrologique	Les processus hydrologiques dans les tourbières ne sont influencés que par les précipitations et l'évapotranspiration. C'est principalement le cas dans les parties nord de la région.

6.6.2 Résultats hydrologiques

Les niveaux d'eau dans et autour de la zone d'intervention sont indiqués dans la Figure Figure 6-10 . En l'espace d'un mois, les niveaux d'eau près du centre du dôme de tourbe sous la plantation chutent jusqu'au niveau du drain, à 50 cm sous le sol (en haut à droite). Comme dans le scénario de référence, le niveau de la nappe suit une tendance à la baisse tout au long de la simulation et tombe en dessous du niveau de drainage. Le drainage et l'affaissement du sol sous la plantation affectent également les cellules voisines, où le niveau de la nappe est de 1 à 1,5 m plus profond que dans le scénario de référence (au milieu à droite). Même à 2 km de la plantation de palmiers à huile, le niveau de la nappe reste beaucoup plus bas que dans le scénario de référence (en bas à droite).

Les différences entre les deux scénarios sont moins prononcées près des limites ouest et est, car le niveau de la nappe phréatique dans ces zones est déjà profond dans le scénario de référence (à gauche). Dans les cellules proches des limites, la surface du sol sous la plantation se trouve jusqu'à 50 cm en dessous du niveau de l'eau à la limite. Par conséquent, les cellules de plantation proches de la limite reçoivent les eaux de ruissellement provenant de la limite, ce qui explique pourquoi le niveau de la nappe sous la plantation reste moins profond que le niveau de drainage pendant la première moitié de la période de simulation (en haut à gauche).

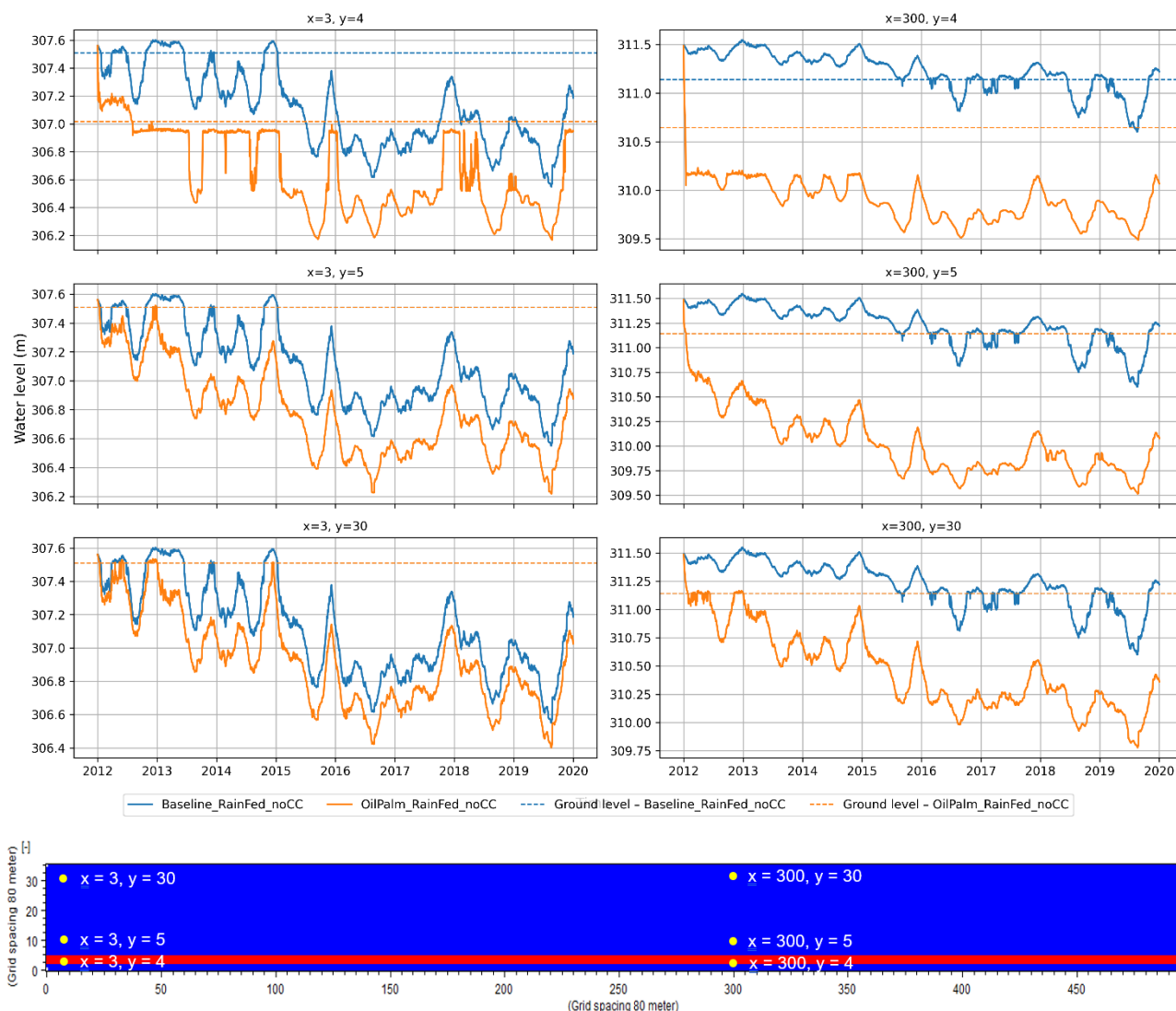


Figure 6-10 Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée, scénario F.1.1 (OilPalm_RainFed_noCC)

6.6.3 Indicateurs

Les indicateurs sont présentés dans le tableau ci-dessous. Le niveau de la nappe phréatique dans et autour de la plantation est plus bas que dans le scénario de référence (voir les résultats hydrologiques ci-dessus), ce qui entraîne un flux de carbone trois fois plus important.

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur F.1.1	Valeur de l'indicateur A.1.1	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,77	0,20	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	0,79	0,15	m
Flux de carbone à l'intérieur	-15,64	-4,72	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,73	0,20	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,73	0,15	m
Flux de carbone en dehors	-15,01	-4,72	kg/m ² /an

Une représentation spatiale de la variation annuelle du stock de carbone dans le sol révèle que celui-ci est plus appauvri à proximité de l'empreinte de la plantation qu'au sein même de celle-ci (voir Figure 6-11). En effet, bien que les niveaux d'eau à l'intérieur et autour de l'empreinte de la plantation soient proches, la surface du sol s'est affaissée sous la plantation, ce qui a entraîné un appauvrissement de la zone oxygène. Comme dans le scénario de la route drainée, la décomposition de la tourbe est très élevée sur l'ensemble du domaine modélisé, ce qui souligne la forte influence du drainage sur les niveaux d'eau.

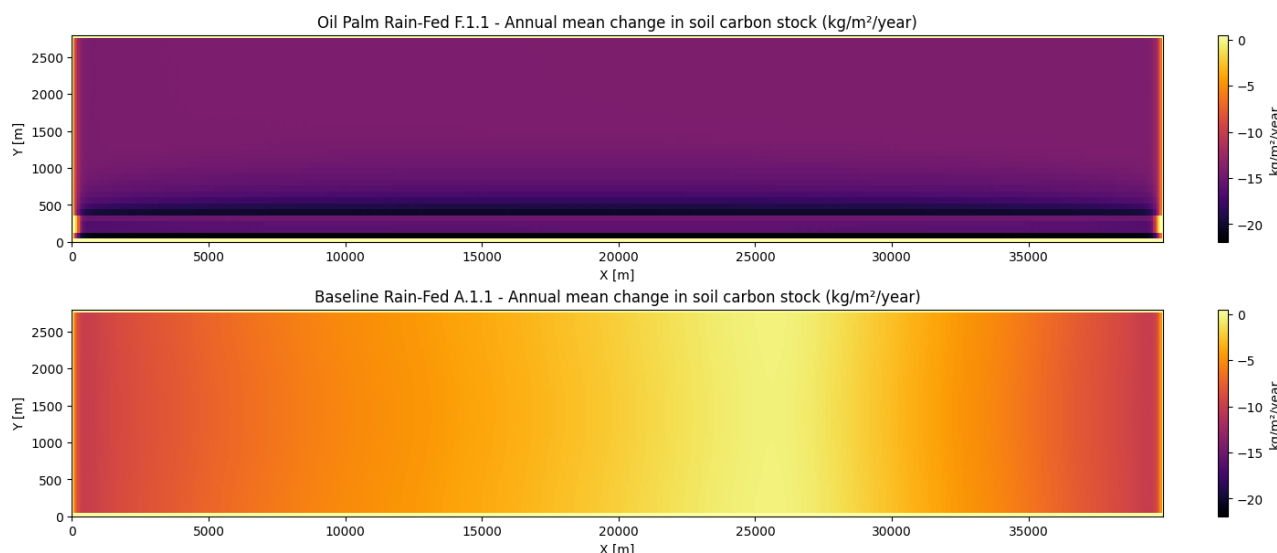


Figure 6-11 Variation annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Plantation de palmiers à huile (F.1.1) par rapport au scénario de référence (A.1.1)

Comme la décomposition oxygène est prépondérante, on peut supposer que le carbone du sol se décompose par le biais d'émissions de CO_2 , s'élevant à $57,34 \text{ kg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ dans l'empreinte. Les émissions nettes de CO_2 simulées peuvent être comparées aux mesures effectuées en Indonésie.

McCalmont et al. (2021) ont mesuré des émissions nettes de $13,8 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2/\text{an}$ dans les tourbières récemment converties en plantations de palmiers à huile drainées et de $1,75 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2/\text{an}$ dans les tourbières matures plantées de palmiers à huile. Ces mesures sont inférieures aux émissions nettes simulées ici dans les plantations de palmiers à huile. Les auteurs ont suggéré que leurs estimations pourraient être prudentes pour les plantations matures, car la profondeur moyenne de la nappe phréatique est moins importante ($0,26 \text{ m}$) que l'objectif typique de $0,6 \text{ m}$, alors qu'elle était plus typique ($0,54 \text{ m}$) dans la plantation nouvellement convertie. La profondeur moyenne de l'eau dans les plantations nouvellement converties est toujours inférieure à la profondeur moyenne simulée ici, ce qui peut expliquer en partie les émissions nettes de CO_2 plus faibles.

Hirano et al. (2012) ont mesuré pendant 4 ans les échanges nets de CO_2 dans des tourbières intactes et des tourbières drainées à des fins agricoles. Ils ont découvert que les émissions de CO_2 dans les tourbières agricoles drainées ($12,0 \pm 7,48 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2/\text{an}$) étaient deux fois plus élevées que dans les tourbières intactes ($6,38 \pm 7,47 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2/\text{an}$). Ces deux études pourraient indiquer que les émissions de carbone simulées ici dans le scénario F.1.1 sont surestimées. Néanmoins, Hirano et al. (2012) ont analysé les séries chronologiques des émissions de CO_2 et ont découvert que l'abaissement du niveau moyen annuel des eaux souterraines de $0,1 \text{ m}$ augmente les émissions nettes annuelles de CO_2 de $8,73$ et $5,90 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$, respectivement, pour les tourbières intactes et drainées. Ces chiffres indiquent qu'une baisse rapide du niveau des eaux souterraines due au drainage peut avoir des conséquences dramatiques sur les émissions de CO_2 et sont conformes à nos estimations.

Hooijer et al. (2006) ont établi une relation entre les émissions de CO_2 et la profondeur de la nappe phréatique dans les tourbières à partir de mesures du flux de gaz trouvées dans la littérature (voir Figure 6-12). Les résultats de l'indicateur présentés ci-dessus correspondent bien à la courbe de tendance pour les tropiques. Pour le modèle de référence, les émissions de CO_2 sont estimées à $17,29 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2/\text{an}$ pour une profondeur moyenne des eaux souterraines de 15 cm , tandis qu'une valeur de

14 kg CO₂/m²/an est obtenue en appliquant la relation de Hooijer et al. à une profondeur similaire de la nappe phréatique. Pour l'intervention sur les palmiers à huile avec une profondeur moyenne estimée de la nappe phréatique de 73 cm, les résultats sont également assez similaires, avec des émissions de CO₂ estimées à 57,34 kg CO₂/m²/an dans la présente étude contre 66 kg CO₂/m²/an en appliquant la relation de Hooijer et al.

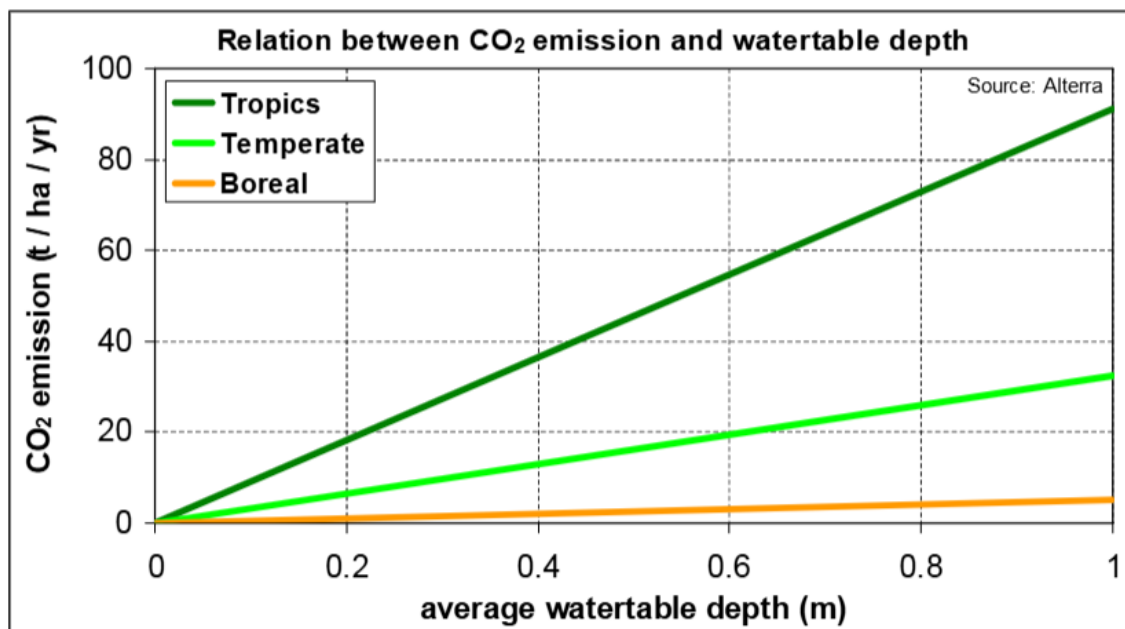


Figure 6-12 Relation empirique entre les émissions de CO₂ et la profondeur de la nappe phréatique
Source : Hooijer et al, 2006

6.6.4 Effets clés

(a) Les niveaux des eaux souterraines sous la plantation sont plus bas que dans la situation de référence, en raison du drainage et de l'affaissement du sol. (b) Une baisse des niveaux des eaux souterraines est observée dans toute la zone. (c) La décomposition de la tourbe augmente en raison de la baisse des niveaux d'eau.

6.6.5 Recommandations

Recommandations pour l'atténuation : (1) gestion hydrologique : (a) conception d'un drainage peu profond en rapprochant la profondeur de drainage de la surface (par exemple, 30 à 40 cm) afin de réduire l'oxydation de la tourbe tout en favorisant la croissance des palmiers à huile, (b) systèmes de drainage contrôlés à l'aide de barrages ou de vannes réglables pour gérer de manière dynamique les niveaux d'eau saisonniers, (2) réduction de l'affaissement du sol : (a) minimiser l'intensité du drainage en réduisant la durée et la profondeur du drainage afin de ralentir la décomposition de la tourbe et l'affaissement, (b) utiliser des couvre-sols en plantant de la végétation de sous-bois afin de réduire l'évaporation et de protéger la structure du sol, (3) zones tampons de végétation et de biodiversité : conserver des bandes de végétation naturelle en maintenant des zones tampons boisées le long des cours d'eau et des dômes de tourbe afin de préserver la biodiversité et la fonction hydrologique, (4) atténuation des émissions de carbone : réhumidification des zones dégradées en restaurant les zones de plantation abandonnées ou marginales et en reboisant, (5) restauration de la topographie et de la microtopographie : (a) éviter de lisser la microtopographie naturelle en préservant les structures en bosses et creux afin de maintenir la rétention d'eau et la diversité des habitats, (b) reconstruire les couches superficielles en utilisant dans les zones dégradées des paillis organiques ou du compost pour reconstruire la tourbe perdue et améliorer la rétention d'eau.

6.7 Scénario G.1.1

6.7.1 Définition

Que se passerait-il dans les tourbières dans les circonstances suivantes ?

Intervention de développement	Déforestation et conversion à la riziculture : (a) La végétation naturelle est supprimée et remplacée par des rizières. Le riz est la culture saisonnière inondée la plus courante dans la Cuvette Centrale. (b) Il y a deux récoltes par an. Les rizières sont inondées pendant la saison des pluies. (c) La végétation et les propriétés/rugosité de la surface varient en fonction du stade de croissance des cultures.
Climat	Les précipitations, la température et l'évapotranspiration entre 2010 et 2020 sont choisies pour représenter les conditions climatiques actuelles.
Région hydrologique	Les processus hydrologiques dans les tourbières ne sont influencés que par les précipitations et l'évapotranspiration. C'est principalement le cas dans le nord de la région.

6.7.2 Résultats hydrologiques

Les niveaux d'eau dans et autour de la zone d'intervention sont indiqués dans la Figure Figure 6-13 . Près des limites ouest et est, les niveaux de la nappe phréatique dans les rizières sont plus élevés que dans le scénario de référence A.1.1 pendant la seconde moitié de la période de simulation (voir graphique en haut à gauche). Pendant les phases de croissance et de maturation, l'indice de surface foliaire (LAI) et la profondeur des racines sont plus faibles dans le scénario E.1.1 que dans le scénario de référence (voir section 5.1.1), ce qui réduit la transpiration. À ces moments-là, la diminution de la transpiration n'est que partiellement compensée par l'évaporation à la surface du sol, de sorte que l'évapotranspiration totale est inférieure à celle du scénario A.1.1. Lorsque le niveau d'eau baisse pendant ces phases de culture, la teneur en humidité de la couche superficielle tombe en dessous de la capacité au champ, ce qui signifie qu'il y a moins d'eau disponible pour l'évaporation. En conséquence, le niveau de la nappe phréatique s'élève progressivement au-dessus du scénario de référence dès que le climat devient plus sec à partir de 2015. Cette augmentation du niveau de la nappe phréatique est également visible juste à l'extérieur des rizières (au milieu à gauche).

Au centre du dôme de tourbe (en haut à droite), le niveau de la nappe est moins profond qu'à proximité des limites, ce qui empêche la teneur en humidité de la couche arable de descendre en dessous de la capacité au champ, même pendant les périodes sèches. L'évaporation est donc la même que dans le scénario de référence. Cependant, la transpiration est légèrement plus faible pendant les phases de croissance et de maturation du riz, ce qui explique pourquoi le niveau de la nappe est moins profond à la fin de la simulation.

Étant donné que la conversion à la culture du riz lisse la microtopographie du terrain, les rizières agissent comme un chemin d'écoulement préférentiel, ce qui explique pourquoi la profondeur de l'eau de surface est réduite par rapport au scénario de référence (en haut à gauche). Le ruissellement à la surface explique pourquoi les nappes phréatiques sont plus basses sous terre pendant la première moitié de la période de simulation (en haut et au milieu à gauche).

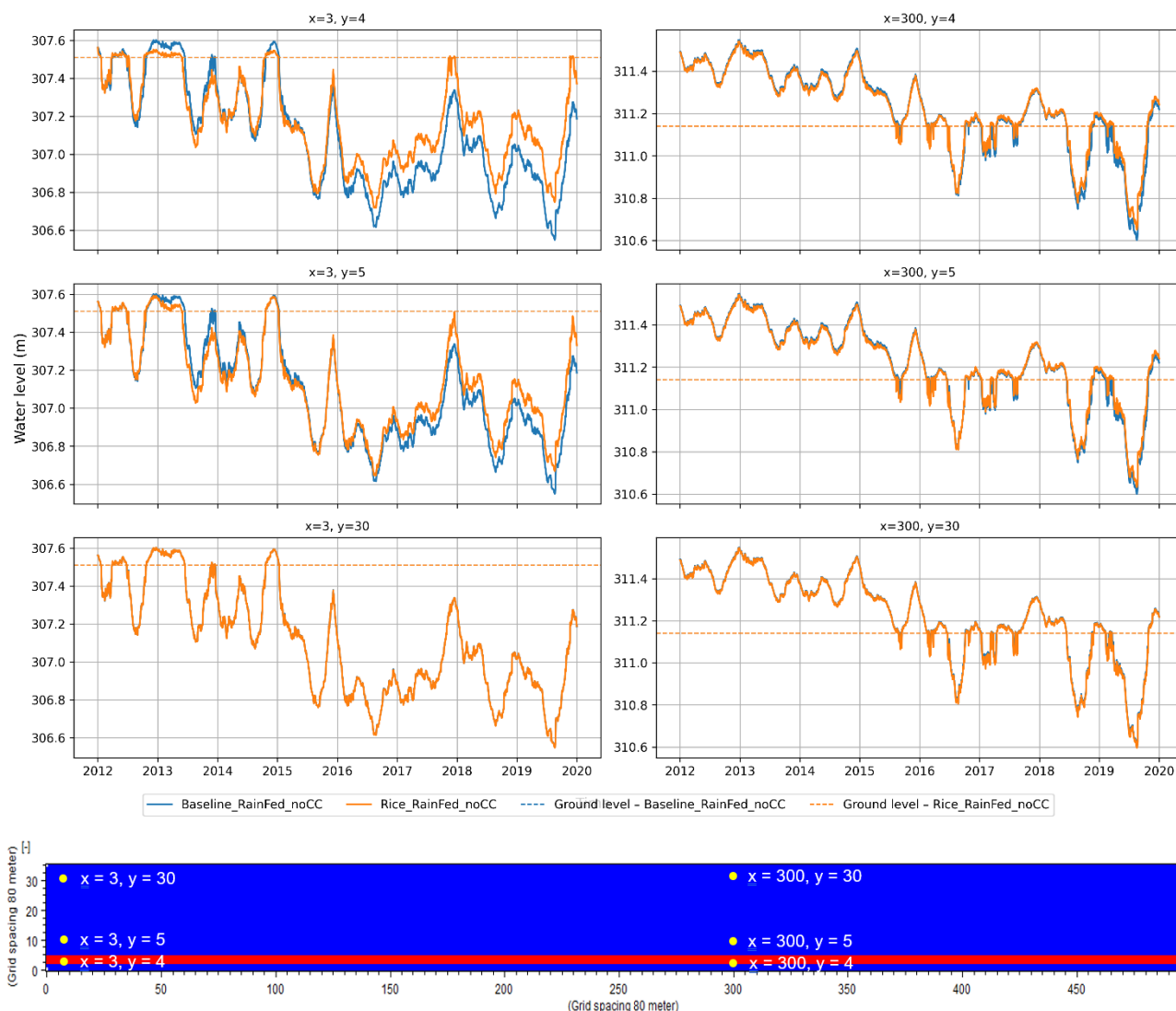


Figure 6-13 Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée, scénario G.1.1 (Rice_RainFed_noCC)

6.7.3 Indicateurs

Les valeurs des indicateurs sont présentées dans le tableau ci-dessous. La réduction de l'évapotranspiration dans les rizières entraîne une augmentation de la teneur en humidité du sol et donc une diminution de la profondeur moyenne de la zone oxygène et de la décomposition de la tourbe. En dehors de la zone d'intervention, les différences entre les scénarios G.1.1 et A.1.1 sont très faibles.

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur G.1.1	Valeur de l'indicateur A.1.1	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,14	0,20	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	0,10	0,15	m
Flux de carbone à l'intérieur	-3,77	-4,72	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,20	0,20	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,15	0,15	m
Flux de carbone en dehors	-4,70	-4,72	kg/m ² /an

La répartition spatiale des variations moyennes du stock de carbone dans le sol au sein de la zone modélisée montre que la tourbe dans la zone brûlée se décompose davantage que dans le scénario de référence sur la majeure partie de la longueur du modèle, sauf près du centre du dôme de tourbe où elle se décompose légèrement moins (Figure 6-14).

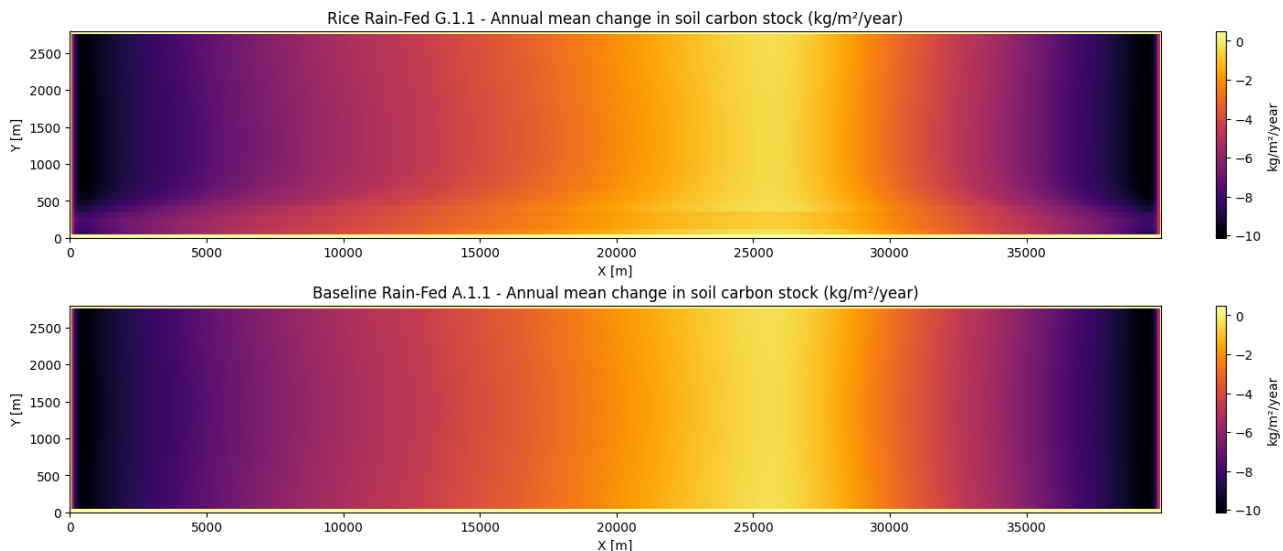


Figure 6-14 Variation nette annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Rice (G.1.1) par rapport au scénario de référence (A.1.1)

6.7.4 Effets clés

(a) Le niveau de la nappe phréatique est jusqu'à 20 cm plus bas que le scénario de référence pendant les périodes sèches en raison de la réduction de l'évapotranspiration. (b) La décomposition de la tourbe est réduite dans la zone d'intervention, aucun changement significatif n'est observé en dehors de la zone d'intervention.

6.7.5 Recommandations

(1) Gestion du niveau de la nappe : utiliser des digues et une irrigation contrôlée pour maintenir un niveau de la nappe peu profond et réduire l'oxydation de la tourbe. (2) Équilibre de l'évapotranspiration : appliquer une alternance humidification-assèchement (AWD) pour optimiser l'utilisation de l'eau et minimiser les émissions de CO₂ et de méthane. (3) Protection des sols : utiliser des amendements organiques (par exemple, biochar, paillis) pour améliorer la structure du sol et la rétention d'eau. (4) Zones tampons végétales : préserver les bandes de végétation indigène autour des rizières afin de favoriser la stabilité hydrologique et la biodiversité. (5) Restauration après conversion : en cas d'arrêt de la culture, réhumidifier et revégétaliser afin de restaurer la fonction des tourbières et de réduire les émissions.

6.8 Résumé des résultats

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 pentues 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 oxiqes 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 est principalement au-dessus du sol et la profondeur oxiqes 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.

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

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 routes, 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 la nappe phréatique est profonde, mais pas au centre du dôme, où le niveau de l'eau est supérieur 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 taux élevés de décomposition de la tourbe 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 flux de carbone, tant aux limites que dans l'ensemble du dôme de tourbe.

7 Analyses de scénarios pour le climat actuel avec des fluctuations saisonnières du niveau des rivières

Cette section présente les résultats des scénarios avec des niveaux d'eau fluctuants aux limites ouest et est. Elle examine comment diverses interventions affectent la profondeur des eaux souterraines et, par conséquent, les changements dans le stock de carbone du sol dans les conditions climatiques actuelles dans une tourbière influencée par les crues fluviales. La section est structurée de la même manière que la précédente : pour chaque intervention, les résultats hydrologiques sont d'abord décrits, suivis des flux de carbone. Enfin, des recommandations sont formulées à l'intention des décideurs politiques et des gestionnaires de tourbières.

7.1 Scénario A.1.2

7.1.1 Définition

Que se passerait-il dans les tourbières dans les circonstances suivantes ?

Intervention de développement	La végétation et la topographie des tourbières sont conformes aux conditions actuelles - entre 2010 et 2020
Climat	Les précipitations, la température et l'évapotranspiration entre 2010 et 2020 sont choisies pour représenter les conditions climatiques actuelles.
Région hydrologique	Les processus hydrologiques dans les tourbières sont déterminés par les précipitations et l'évapotranspiration, ainsi que par les fluctuations du niveau d'eau dans les plans d'eau limitrophes (par exemple, les tronçons fluviaux). C'est principalement le cas dans les tourbières riveraines, situées pour la plupart en République démocratique du Congo.

7.1.2 Résultats hydrologiques

Voir la section 3.3.3 .

7.1.3 Indicateurs

Voir les détails dans la section 4 .

Nom abrégé de l'indicateur	Valeur de l'indicateur A.1.2 Alimentation par les cours d'eau	Valeur de l'indicateur A.1.1 Alimentation par les précipitations	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur/ en dehors	0,12	0,20	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur/ en dehors	0,03	0,15	m
Flux de carbone à l'intérieur/en dehors	-2,82	-4,72	kg/m ² /an

7.1.4 Effets clés

(a) Les niveaux élevés des cours d'eau provoquent des inondations saisonnières sur de vastes zones le long des limites ouest et est. (b) La tourbe est plus saturée à la fin de la période de simulation en

raison des inondations répétées des cours d'eau. (c) Les nappes phréatiques plus élevées le long des limites entraînent une réduction de la décomposition de la tourbe par rapport à la configuration déterminée par les précipitations.

7.1.5 Recommandations

Les principales menaces qui pèsent sur les tourbières sont les suivantes : (1) accélération de la décomposition de la tourbe et des émissions de carbone, entraînant la perte de stocks de carbone millénaires, (2) augmentation des émissions de gaz à effet de serre, et (3) dégradation d'un puits de carbone d'importance mondiale.

Ces menaces seraient déclenchées par les facteurs suivants : (a) réduction des inondations saisonnières due à la modification du débit des rivières, (b) prolongation des saisons sèches et assèchement climatique, (c) régulation ou extraction de l'eau en amont, (d) infrastructures de drainage qui accélèrent la perte d'eau, (e) perturbation des pulsations naturelles des crues.

Pour favoriser le développement tout en préservant les tourbières, il convient de tenir compte des éléments suivants : (a) maintenir la connectivité des crues saisonnières et éviter les interventions en amont qui réduisent les pics de crue, (b) protéger contre l'assèchement induit par le climat en intégrant la conservation des tourbières dans les stratégies relatives à l'eau et au climat, (c) minimiser la conversion des terres dans les zones inondables, (d) réglementer la construction de canaux et de fossés afin d'éviter un drainage involontaire.

7.2 Scénario B.1.2

7.2.1 Définition

Que se passerait-il dans les tourbières dans les circonstances suivantes ?

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 achevée et opérationnelle. (b) La végétation est supprimée 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.
Climat	Les précipitations, la température et l'évapotranspiration entre 2010 et 2020 sont choisies pour représenter les conditions climatiques actuelles.
Région hydrologique	Les processus hydrologiques dans les tourbières sont déterminés par les précipitations et l'évapotranspiration, ainsi que par les fluctuations du niveau d'eau dans les plans d'eau limitrophes (par exemple, les tronçons fluviaux). C'est principalement le cas dans les tourbières riveraines, situées pour la plupart en République démocratique du Congo.

7.2.2 Résultats hydrologiques

Les niveaux d'eau dans et autour de la zone d'intervention sont présentés dans la Figure 7-1 pour le scénario actuel (B.1.2) et le scénario de référence alimenté par les cours d'eau (A.1.2). Comme dans la simulation de référence alimentée par les cours d'eau, le centre du dôme n'est pas affecté par les crues fluviales (graphiques de droite). Les différences entre les scénarios B.1.2 et A.1.2 sont donc les mêmes que dans les simulations basées sur les précipitations (voir les résultats dans la section 6.2).

Cependant, autour des limites ouest et est, le niveau de la nappe est influencé par les crues fluviales. Les pics d'inondation dans l'empreinte de la route sont atténués par rapport au scénario de référence. La route étant surélevée d'un mètre, les vagues de crue se propagent principalement sous terre. Le débit des eaux souterraines étant beaucoup plus lent que celui des eaux de surface, l'élévation du niveau de l'eau pendant les crues fluviales est réduite par rapport au scénario de référence. L'étendue de la zone inondée reste similaire dans les deux scénarios.

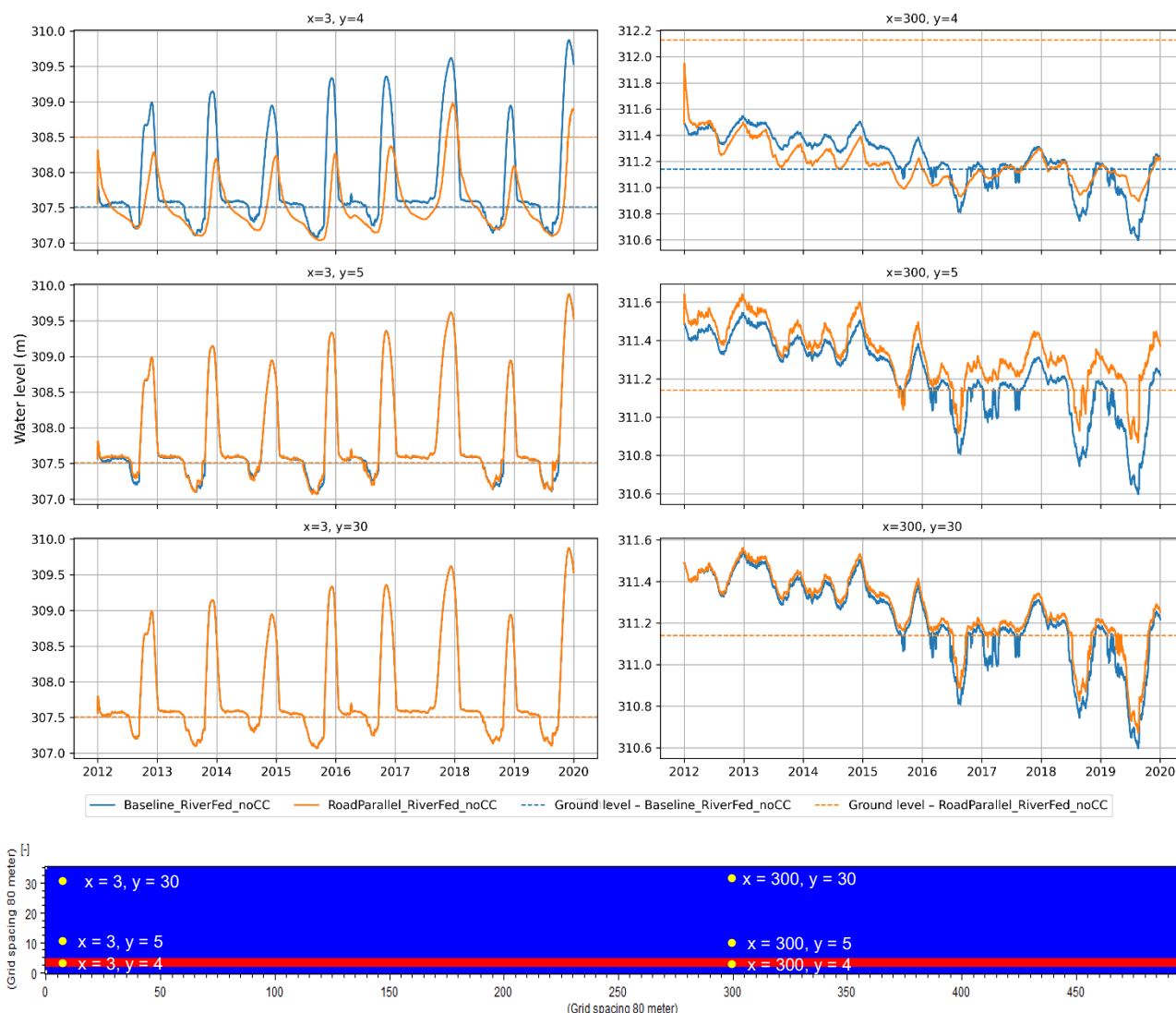


Figure 7-1 Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée ; scénario B.1.2 (RoadParallel_RiverFed_noCC)

7.2.3 Indicateurs

Les valeurs des indicateurs sont présentées dans le tableau ci-dessous. Comme dans le scénario A.1.2, la profondeur oxygène et la profondeur de la nappe phréatique sous la route sont élevées, car la route a été surélevée d'un mètre. Cela n'entraîne aucune émission de CO₂, car la nappe phréatique se trouve toujours dans le remblai de gravier au-dessus de la couche de tourbe. En dehors de la zone routière, le niveau moyen des eaux souterraines est négatif, ce qui indique que la nappe phréatique se trouve principalement au-dessus du sol. Comme dans la simulation basée sur les précipitations, la profondeur oxygène - calculée pendant les périodes où la nappe phréatique est sous le sol - est inférieure à celle du scénario de référence, ce qui entraîne une diminution des pertes de carbone dans le sol.

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur B.1.2	Valeur de l'indicateur A.1.2	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,89	0,12	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	1,03	0,03	m

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur B.1.2	Valeur de l'indicateur A.1.2	Unité
Flux de carbone à l'intérieur	0,00	-2,82	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,07	0,12	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	-0,05	0,03	m
Flux de carbone en dehors	-1,40	-2,82	kg/m ² /an

Une représentation spatiale de l'évolution du stock de carbone dans le sol (voir Figure 6-3) montre que les pertes de carbone sont très faibles dans les zones inondées près des rivières. En dehors des zones inondées, les résultats sont similaires à ceux de la simulation basée sur les précipitations (voir section 6.2).

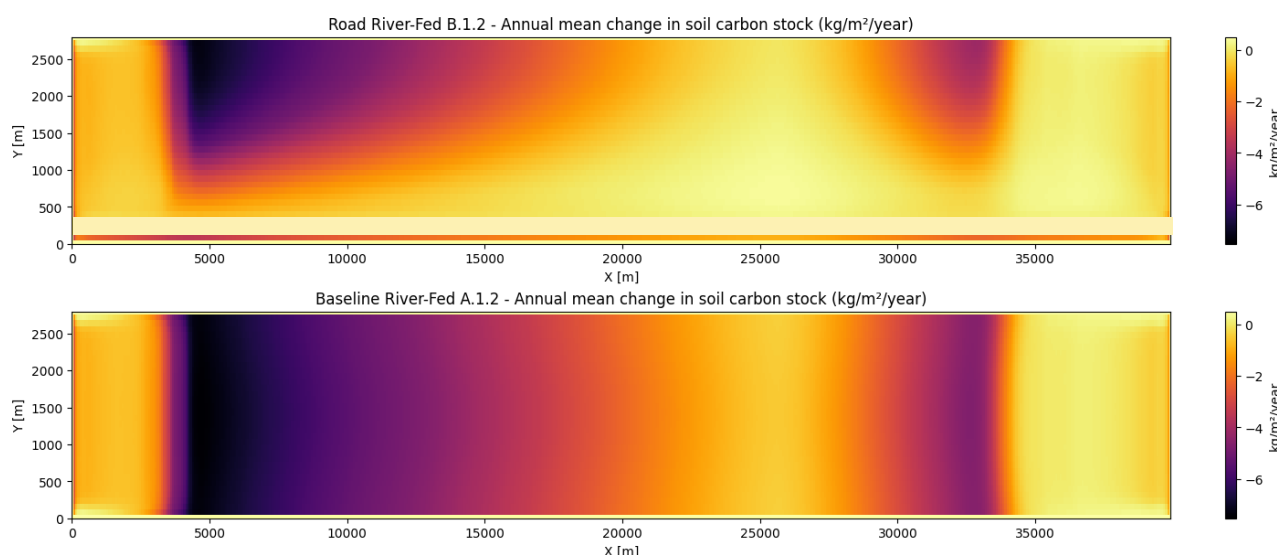


Figure 7-2 Variation annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Route alimentée par les rivières (B.1.2) par rapport à la référence alimentée par les rivières (A.1.2)

7.2.4 Effets clés

(a) L'infiltration ne se produit pas directement sur la route ; l'eau s'écoule à la surface vers les zones adjacentes situées plus bas, où elle s'infiltre et recharge l'aquifère. (b) La route surélevée augmente la profondeur des eaux souterraines en dessous. (c) Dans la plaine inondable, les pics de crue sous la route sont atténués. (d) Les niveaux d'eau augmentent près de la route, leur influence diminuant avec la distance. (e) En conséquence, la décomposition de la tourbe est réduite par rapport aux conditions actuelles (référence).

7.2.5 Recommandations

L'influence de la route s'étend généralement jusqu'à 2 km de son bord. Dans les tourbières alimentées par les rivières, les inondations saisonnières sont essentielles pour maintenir la saturation de la tourbe et empêcher sa décomposition. La route peut perturber les pulsations naturelles des crues et réduire les inondations dans les zones adjacentes, en particulier pendant les saisons sèches prolongées.

Les mesures recommandées pour atténuer ces effets sont les suivantes : Dans une zone tampon le long de la route, maintenir l'humidité des tourbières en : (1) réhumidifiant – bloquer les canaux de drainage et les fossés pour retenir les eaux de crue et restaurer l'hydrologie naturelle ; et (2) gérant la végétation – promouvoir la végétation indigène retenant l'eau (comme les espèces forestières

marécageuses) qui aide à ombrager la tourbe, à réduire l'évaporation et à stabiliser les niveaux d'eau pendant les périodes sèches.

7.3 Scénario C.1.2

7.3.1 Définition

Que se passerait-il dans les tourbières dans les circonstances suivantes ?

Intervention de développement	(a) Une route surélevée imperméable d'une largeur de 80 m est en cours de construction à 1 mètre au-dessus de la surface naturelle. (b) La végétation est supprimée 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, soit 1 mètre sous la surface environnante.
Climat	Les précipitations, la température et l'évapotranspiration entre 2010 et 2020 sont choisies pour représenter les conditions climatiques actuelles.
Région hydrologique	Les processus hydrologiques dans les tourbières sont déterminés par les précipitations et l'évapotranspiration, ainsi que par les fluctuations du niveau d'eau dans les plans d'eau limitrophes (par exemple, les tronçons fluviaux). C'est principalement le cas dans les tourbières riveraines, situées pour la plupart en République démocratique du Congo.

7.3.2 Résultats hydrologiques

Les niveaux d'eau dans et autour de la zone d'intervention sont indiqués dans la figure ci-dessous pour le scénario actuel (C.1.2) et le scénario de référence alimenté par les cours d'eau (A.1.2). Comme dans la simulation de référence alimentée par les cours d'eau, le centre du dôme n'est pas affecté par les crues fluviales (graphiques de droite). Les différences entre les scénarios C.1.2 et A.1.2 sont donc les mêmes que dans les simulations basées sur les précipitations (voir les résultats dans la section 6.3).

En l'espace d'un mois, les niveaux d'eau sous la route descendent jusqu'au niveau du drain, à 2 m sous terre (graphiques supérieurs). Les crues fluviales n'ont qu'une influence marginale sur la nappe phréatique sous la route (en haut à gauche). Comme dans le scénario basé sur les précipitations, le drainage affecte toutes les cellules situées en dehors de l'empreinte, où la nappe phréatique est plus profonde que dans le scénario de référence (graphiques du milieu et du bas). Les pics de niveau d'eau induits par les crues fluviales sont légèrement atténués (graphique du milieu à gauche). Les ondes de crue se propagent en effet plus lentement que dans le scénario de référence, car la tourbe est plus sèche en raison du drainage. Au maximum, 17 % de la superficie du dôme est inondée par les rivières, contre 25 % dans le scénario de référence.

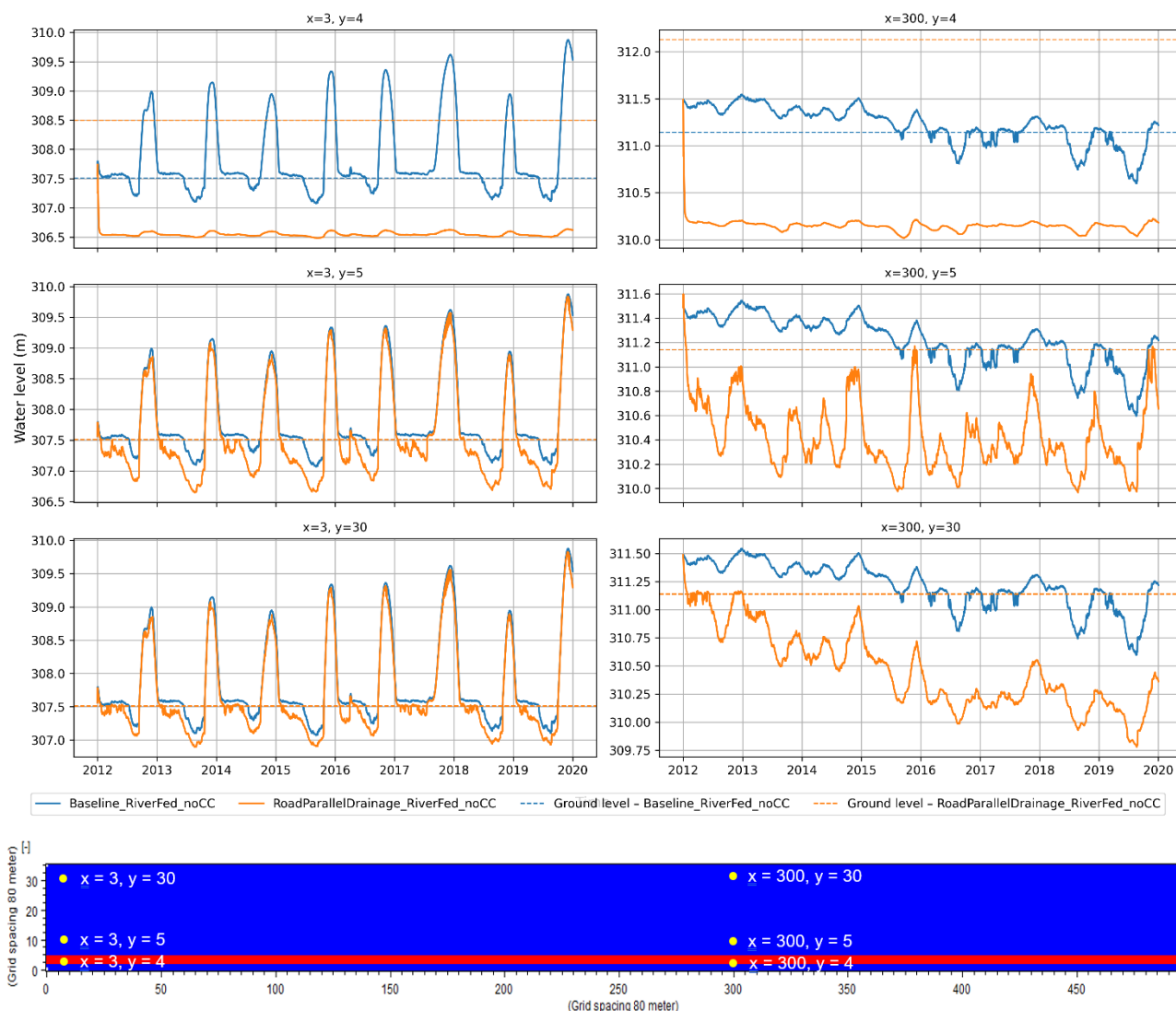


Figure 7-3 Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée ; scénario C.1.2 (RoadParallelDrainage_RiverFed_noCC)

7.3.3 Indicateurs

Les valeurs des indicateurs sont présentées dans le tableau ci-dessous. Comme dans le scénario B.1.2, la profondeur oxygène et la profondeur de la nappe phréatique sous la route sont élevées, car la route a été surélevée d'un mètre. Cela n'entraîne aucune dégradation de la tourbe, car la nappe phréatique se trouve dans le remblai de gravier au-dessus de la couche de tourbe. À l'extérieur de la route, les pertes de carbone du sol augmentent fortement, car le drainage entraîne une baisse de la nappe phréatique.

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur C.1.2	Valeur de l'indicateur A.1.2	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	2,12	0,12	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	2,01	0,03	m
Flux de carbone à l'intérieur	0,00	-2,82	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,61	0,12	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,59	0,03	m
Flux de carbone en dehors	-12,88	-2,82	kg/m ² /an

Figure 7-4 montre que la zone touchée par les crues fluviales est plus petite que dans le scénario de référence et que les pertes de carbone dans cette zone sont plus importantes.

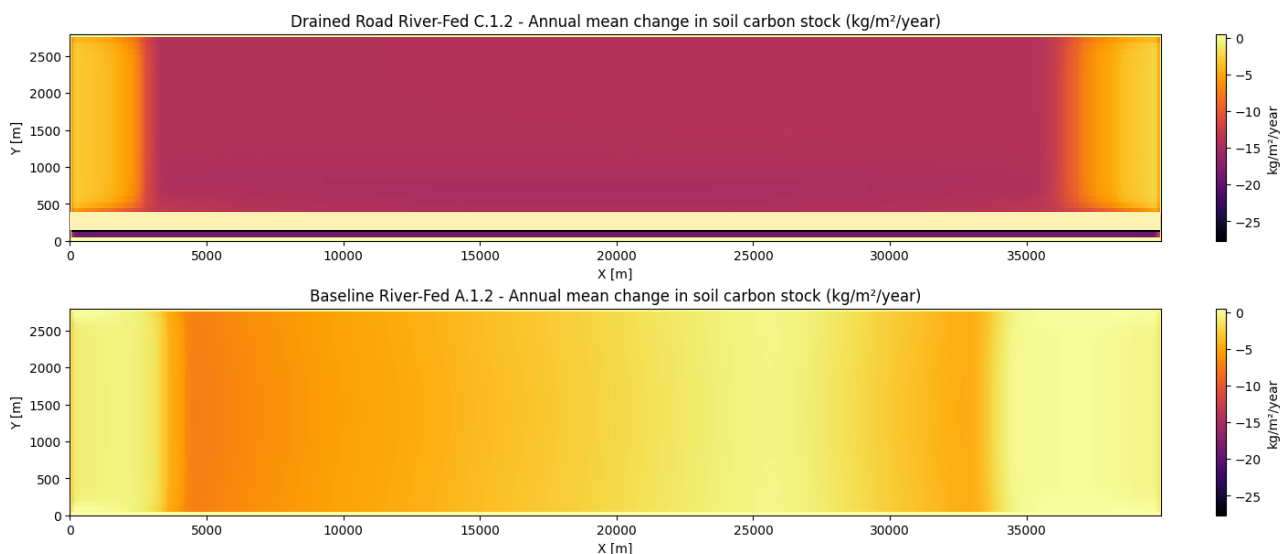


Figure 7-4 Variation annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Route drainée alimenté par des rivières (C.1.2) par rapport au scénario de référence alimenté par des rivières (A.1.2)

7.3.4 Effets clés

(a) Les niveaux des eaux souterraines se stabilisent à 2 mètres de profondeur sous la route. (b) L'influence du drainage s'étend au-delà de la zone d'intervention, réduisant les niveaux des eaux souterraines dans les zones adjacentes. (c) En raison du drainage, la zone inondée par les rivières limitrophes diminue de 25 % à 17 % du dôme. (d) La décomposition de la tourbe augmente partout en raison des faibles niveaux d'eau.

7.3.5 Recommandations

Les effets du drainage pendant la construction sont considérables. L'objectif est donc de limiter autant que possible leur impact. Dans les tourbières alimentées par les rivières, le drainage peut réduire considérablement les inondations saisonnières, qui sont essentielles pour maintenir la saturation de la tourbe et empêcher sa décomposition. Pendant la construction, il convient de tenir compte des éléments suivants :

(1) systèmes de drainage temporaires – concevoir un drainage qui minimise l'abaissement du niveau de la nappe et qui soit facile à retirer ou à bloquer après la construction ; (2) installer des barrières anti-sédiments et des pièges à sédiments ; (3) limiter la durée du drainage ; (4) réhumidifier immédiatement après la construction – bloquer les fossés temporaires et permettre le retour rapide des niveaux d'eau naturels et des pulsations d'inondation ; (5) utiliser des techniques de construction à faible impact – utiliser des routes surélevées, des géotextiles ou des tapis pour réduire le compactage du sol et la perturbation du débit d'eau ; (6) restaurer rapidement la végétation – planter des espèces indigènes des zones humides pour stabiliser le sol, retenir l'humidité et soutenir l'hydrologie des plaines inondables.

7.4 Scénario D.1.2

7.4.1 Définition

Que se passerait-il dans les tourbières dans les circonstances suivantes ?

Intervention de développement	(a) Une zone d'habitation est construite dans la forêt de tourbière. (b) La topographie est surélevée de 50 cm pour prévenir les inondations. (c) La végétation est défrichée et la surface du sol est partiellement pavée. (d) La tourbe est comprimée sous le poids des bâtiments.
Climat	Les précipitations, la température et l'évapotranspiration entre 2010 et 2020 ont été choisies pour représenter les conditions climatiques actuelles.
Région hydrologique	Les processus hydrologiques dans les tourbières sont déterminés par les précipitations et l'évapotranspiration, ainsi que par les fluctuations du niveau d'eau dans les plans d'eau limitrophes (par exemple, les tronçons fluviaux). C'est principalement le cas dans les tourbières riveraines, situées pour la plupart en République démocratique du Congo.

7.4.2 Résultats hydrologiques

Les niveaux d'eau dans et autour de la zone d'intervention sont présentés dans la Figure 7-5 pour le scénario actuel (D.1.2) et le scénario de référence alimenté par les cours d'eau (A.1.2). Comme dans la simulation de référence alimentée par les cours d'eau, le centre du dôme n'est pas affecté par les crues fluviales (graphiques de droite). Les différences entre les scénarios D.1.2 et A.1.2 sont donc les mêmes que dans les simulations basées sur les précipitations (voir les résultats dans la section 6.4).

Pendant les saisons sèches, les niveaux de la nappe phréatique le long de la limite ouest sont plus élevés que dans le scénario de référence dans la zone de peuplement surélevée (en haut à gauche). La nappe phréatique monte dans la colonne de sol car la tourbe a un fort potentiel capillaire. Les profondeurs de la nappe phréatique sont plus élevées car le sol est surélevé. Pendant les crues fluviales, les niveaux d'eau sont les mêmes que dans le scénario de référence. La zone inondée par les rivières reste la même que dans le scénario A.1.2. En dehors de la zone d'intervention, le niveau de la nappe augmente légèrement sous l'influence de l'urbanisation (au milieu à gauche).

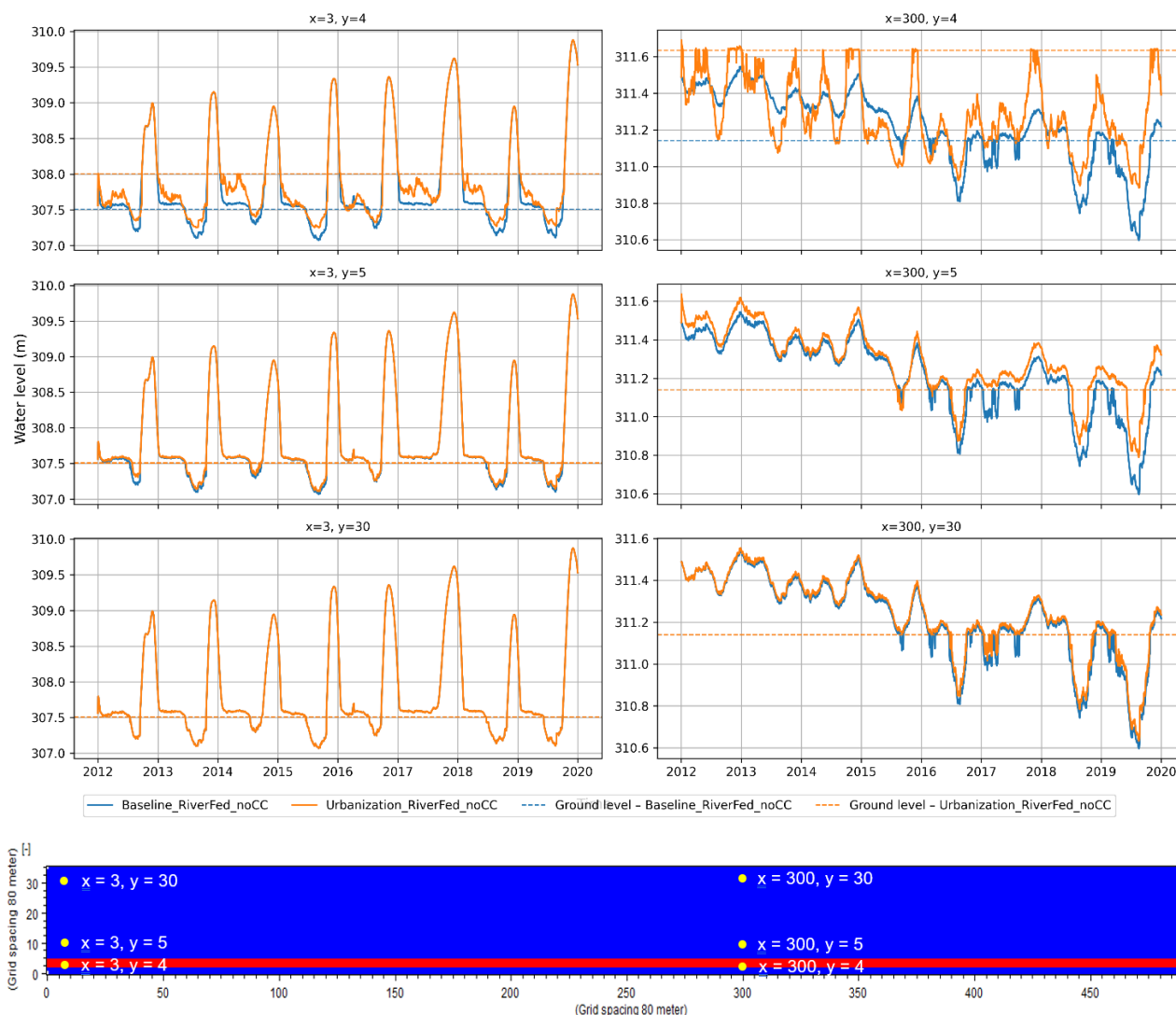


Figure 7-5 Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée ; scénario D.1.2 (Urbanisation_RiverFed_noCC)

7.4.3 Indicateurs

Les valeurs des indicateurs sont présentées dans le tableau ci-dessous. Comme dans le scénario basé sur les précipitations, la profondeur oxygène et la profondeur de la nappe phréatique sous la zone urbanisée sont plus élevées que dans le scénario de référence, car l'urbanisation a été surélevée de 50 cm, ce qui entraîne une décomposition importante de la tourbe. En dehors de la zone urbanisée, la nappe phréatique moyenne, située au-dessus du sol, est plus élevée que dans le scénario de référence (voir les résultats hydrologiques). La profondeur oxygène est réduite, ce qui entraîne des pertes de carbone du sol moins importantes que dans le scénario A.1.2.

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur D.1.2	Valeur de l'indicateur A.1.2	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,34	0,12	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	0,35	0,03	m
Flux de carbone à l'intérieur	-8,10	-2,82	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,09	0,12	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	-0,01	0,03	m
Flux de carbone en dehors	-2,08	-2,82	kg/m ² /an

Une représentation spatiale de la variation moyenne du stock de carbone dans le sol (voir Figure 6-7) montre que la construction d'un lotissement augmente fortement les pertes de carbone dans l'empreinte du lotissement et les réduit dans les cellules environnantes. La zone inondée par les rivières, caractérisée par une décomposition très limitée de la tourbe, reste similaire dans les deux scénarios.

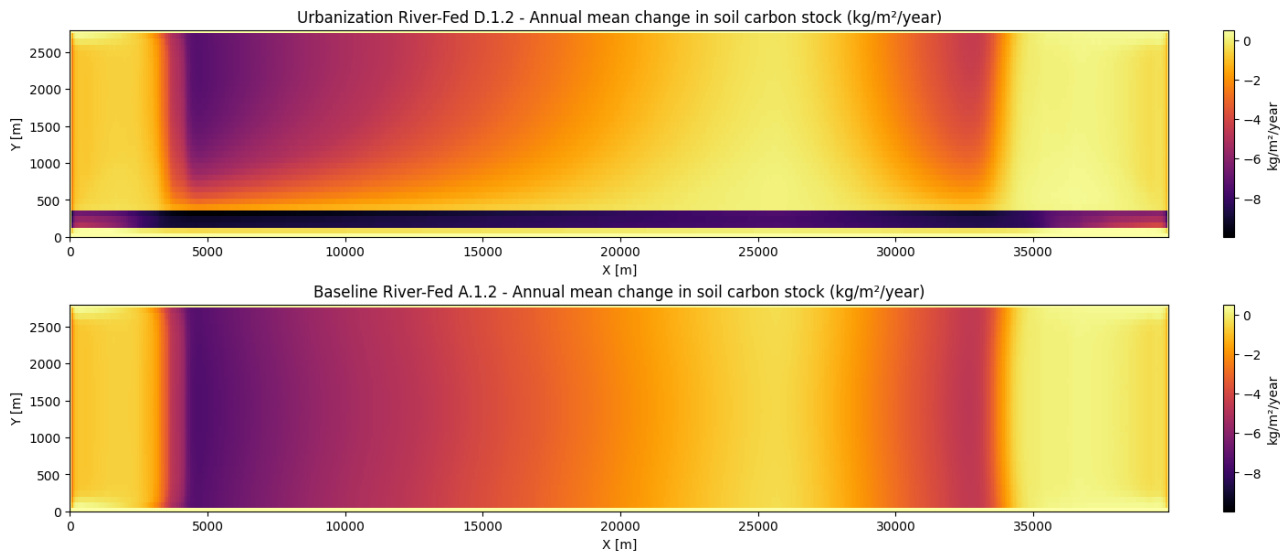


Figure 7-6 Variation annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Lotissement (D.1.2) par rapport au scénario de référence (A.1.2)

7.4.4 Effets clés

Les effets clés sont similaires à ceux du scénario D.1.1 et sont valables à l'intérieur et à l'extérieur de la plaine inondable : (a) Le rehaussement du sol de l'agglomération entraîne une élévation du niveau de l'eau, mais aussi un abaissement de la nappe phréatique. (b) Le niveau moyen de l'eau augmente en dehors de l'empreinte urbaine, mais cet effet s'estompe avec la distance. (c) La décomposition de la tourbe en dehors de la zone d'intervention est réduite en raison de l'élévation du niveau moyen de l'eau.

7.4.5 Recommandations

La construction d'une zone d'habitation dans les tourbières aurait de graves conséquences sur l'environnement, telles que (1) une réduction des inondations saisonnières, (2) une augmentation des émissions de carbone due à l'abaissement du niveau des nappes phréatiques, (3) un affaissement des terres et (4) une perturbation de l'hydrologie de la plaine inondable.

Les mesures d'atténuation à envisager sont les suivantes : (a) zonage – utiliser l'aménagement du territoire pour éloigner le développement des tourbières dépendantes des inondations ; (b) conception minimale du drainage – utiliser des fondations surélevées ou des passerelles pour réduire le besoin de drainage et la perturbation des sols ; (c) zones tampons hydrologiques – maintenir les zones humides environnantes afin de préserver les pulsations naturelles des inondations et la rétention d'humidité ; (d) infrastructures adaptées aux inondations – concevoir des établissements capables de faire face aux inondations saisonnières sans compromettre l'intégrité de la tourbe.

7.5 Scénario E.1.2

7.5.1 Définition

Que se passerait-il dans les tourbières dans les circonstances suivantes ?

Intervention de développement	(a) Un incendie de forêt détruit complètement la végétation. (b) En conséquence, les propriétés du sol changent : la densité apparente augmente et le rendement spécifique diminue.
Climat	Les précipitations, la température et l'évapotranspiration entre 2010 et 2020 sont choisies pour représenter les conditions climatiques actuelles.
Région hydrologique	Les processus hydrologiques dans les tourbières sont déterminés par les précipitations et l'évapotranspiration, ainsi que par les fluctuations du niveau d'eau dans les plans d'eau limitrophes (par exemple, les tronçons fluviaux). C'est principalement le cas dans les tourbières riveraines, situées pour la plupart en République démocratique du Congo.

7.5.2 Résultats hydrologiques

Les niveaux d'eau dans et autour de la zone d'intervention sont présentés dans la Figure 7-7 pour le scénario actuel (E.1.2) et le scénario de référence alimenté par les cours d'eau (A.1.2). Comme dans la simulation de référence alimentée par les cours d'eau, le centre du dôme n'est pas affecté par les crues fluviales. Les différences entre les scénarios E.1.2 et A.1.2 sont donc les mêmes que dans les simulations basées sur les précipitations (voir les résultats dans la section 6.5).

Près des limites ouest et est, les niveaux de la nappe phréatique dans la zone brûlée sont plus bas que dans le scénario de référence A.1.2 en dehors des crues fluviales (voir graphique en haut à gauche). En effet, étant donné que le feu a lissé la microtopographie du terrain, la zone brûlée devient la zone de ruissellement préférentiel. Avec moins de stockage dans les creux, la nappe phréatique baisse plus rapidement au début de la saison sèche. De plus, le niveau de la nappe baisse davantage pendant les saisons sèches, car la capacité au champ de la tourbe brûlée est réduite par rapport à celle de la tourbe intacte. Pour un volume évaporé donné, une capacité au champ plus faible entraîne en effet une baisse plus importante du niveau d'eau. Lors des crues fluviales, le niveau d'eau reste identique à celui du scénario de référence alimenté par les rivières. En dehors de la zone brûlée, les différences entre les deux scénarios sont négligeables (milieu et bas à gauche).

Les graphiques de droite montrent les variations du niveau de la nappe dans une cellule située juste à l'extérieur de la zone influencée par les crues fluviales. Dans cette zone, les niveaux d'eau s'élèvent progressivement au-dessus du niveau de référence (en haut à droite). Comme dans la simulation basée sur les précipitations, cette baisse résulte d'une évaporation réduite du sol pendant les saisons sèches, associée à l'absence de transpiration dans la zone brûlée. L'augmentation du niveau de la nappe est également perceptible juste à l'extérieur de la zone brûlée (au milieu à droite).

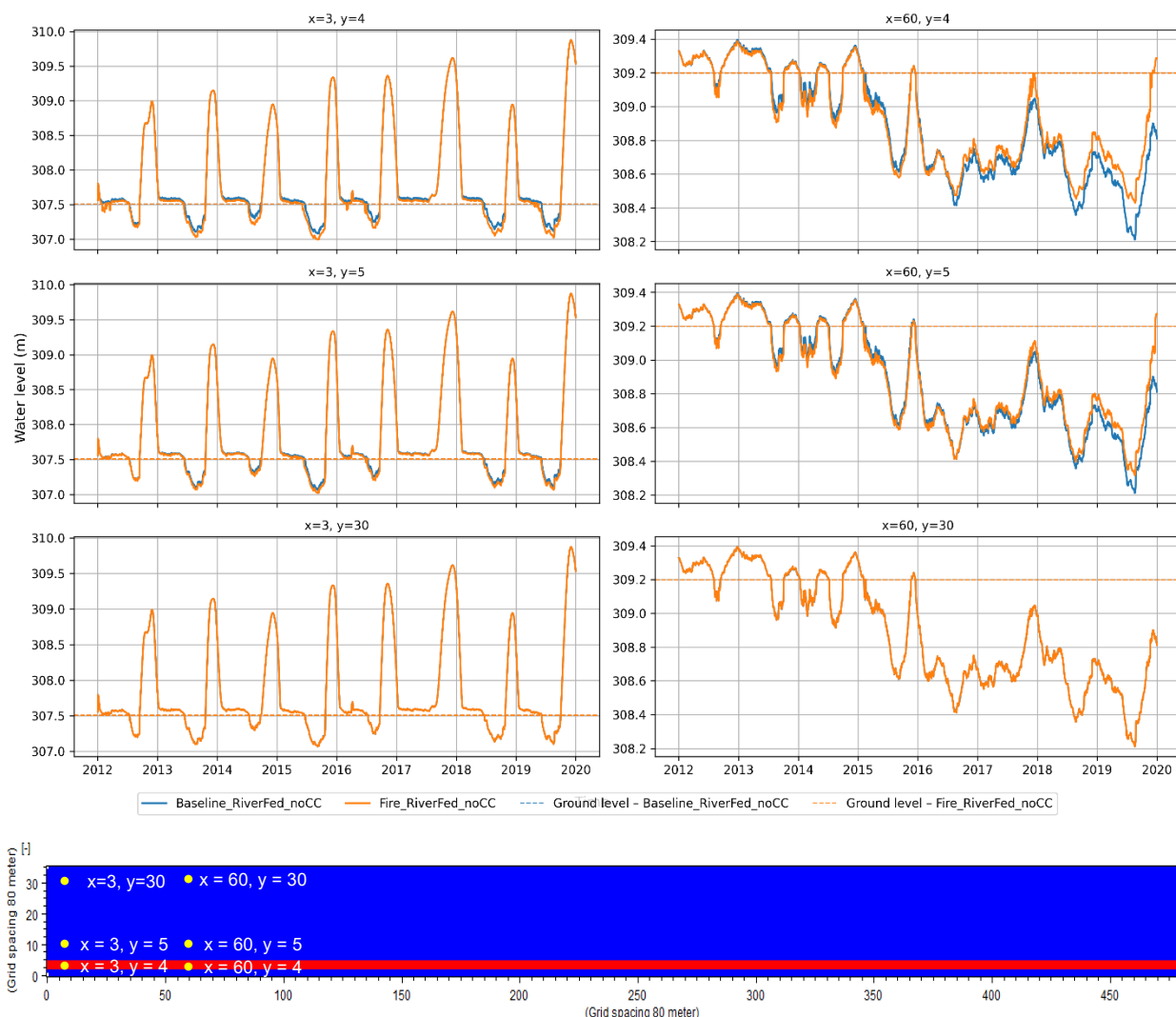


Figure 7-7 Niveaux d'eau à six endroits donnés près de la limite ouest ; scénario E.1.2 (Fire_RiverFed_noCC)

7.5.3 Indicateurs

Les valeurs des indicateurs sont présentées dans le tableau ci-dessous. Bien que les profondeurs moyennes des eaux souterraines et des eaux oxygées à l'intérieur de l'empreinte soient presque identiques à celles du scénario de référence, le flux net de carbone est plus élevé, car la végétation brûlée n'absorbe pas de carbone. En dehors de l'empreinte de l'intervention, les flux de carbone sont similaires à ceux du scénario de référence.

Nom abrégé de l'indicateur	Valeur de l'indicateur E.1.2	Valeur de l'indicateur A.1.2	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,12	0,12	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	0,03	0,03	m
Flux de carbone à l'intérieur	-3,17	-2,82	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,12	0,12	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,03	0,03	m
Flux de carbone en dehors	-2,85	-2,82	kg/m ² /an

Les pertes de carbone dans la zone brûlée sont inférieures à celles du scénario de référence sur toute la durée du modèle (Figure 7-8).

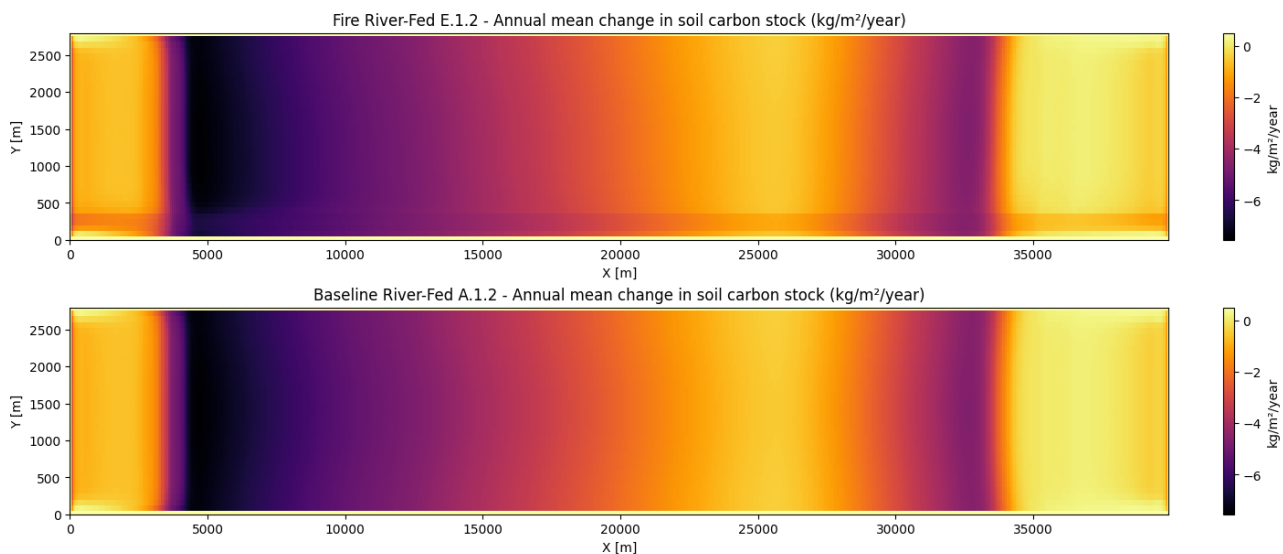


Figure 7-8 Variation annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Incendie (E.1.2) par rapport au scénario de référence (A.1.2)

7.5.4 Effets clés

(a) Dans la plaine inondable et au centre du dôme, les niveaux des eaux souterraines dans la zone touchée par l'incendie sont plus bas que dans les conditions de référence, tandis qu'à l'extérieur de ces zones, ils sont plus élevés en raison de la baisse de l'évapotranspiration. (b) À l'extérieur de la zone touchée par l'incendie, les niveaux des eaux souterraines restent identiques à ceux du scénario de référence. (c) Malgré des profondeurs oxiques similaires, le flux net de carbone dans la zone touchée par l'intervention est plus élevé, car la végétation brûlée n'absorbe pas de carbone. En dehors de la zone touchée par l'intervention, les pertes de carbone sont similaires à celles du scénario de référence.

7.5.5 Recommandations

Les incendies de forêt dans les tourbières alimentées par les cours d'eau peuvent perturber la dynamique saisonnière des inondations et réduire la saturation de la tourbe, en particulier dans les zones inondables.

Pour atténuer ces effets : (1) prévention de la perte de végétation – mettre en place des pare-feu et des brûlages contrôlés pour protéger la végétation des plaines inondables ; (2) maintien ou restauration des nappes phréatiques – réhumidifier les zones brûlées en bloquant les canaux de drainage et en retenant les eaux de crue ; construire de petites digues ou des structures de rétention pour préserver l'humidité pendant les saisons sèches ; (3) restauration après incendie – replanter des espèces indigènes adaptées aux inondations afin de stabiliser le sol et de restaurer l'évapotranspiration ; appliquer des amendements du sol (par exemple, des paillis organiques ou du biochar) pour améliorer la structure et la rétention d'eau dans les sols des plaines inondables.

7.6 Scénario F.1.2

7.6.1 Définition

Que se passerait-il dans les tourbières dans les circonstances suivantes ?

Intervention de développement	Déforestation et conversion en plantations de palmiers à huile : (a) La végétation naturelle est défrichée pour créer de nouvelles plantations de palmiers à huile. (b) Les palmiers à huile prospèrent avec un niveau d'eau moyen de 40 à 60 cm sous le sol. Le drainage se fait à une profondeur de 50 cm. (c) Les propriétés de la végétation sont modifiées pour simuler une plantation de palmiers à huile mature âgée de 15 ans. (d) La microtopographie est lissée en raison du déboisement. (e) Les propriétés du sol changent en raison du drainage : augmentation de la densité apparente, réduction du rendement spécifique et réduction de la conductivité hydraulique à saturation. (f) La topographie est abaissée de 50 cm en raison de l'affaissement du sol induit par le drainage.
Climat	Les précipitations, la température et l'évapotranspiration entre 2010 et 2020 sont choisies pour représenter les conditions climatiques actuelles.
Région hydrologique	Les processus hydrologiques dans les tourbières sont déterminés par les précipitations et l'évapotranspiration, ainsi que par les fluctuations du niveau d'eau dans les plans d'eau limitrophes (par exemple, les tronçons fluviaux). C'est principalement le cas dans les tourbières riveraines, situées pour la plupart en République démocratique du Congo.

7.6.2 Résultats hydrologiques

Les niveaux d'eau dans et autour de la zone d'intervention sont présentés dans la Figure 7-9 pour le scénario actuel (F.1.2) et le scénario de référence alimenté par les cours d'eau (A.1.2). Comme dans la simulation de référence alimentée par les cours d'eau, le centre du dôme n'est pas affecté par les crues fluviales (graphiques de droite). Les différences entre les scénarios F.1.2 et A.1.2 sont donc les mêmes que dans les simulations basées sur les précipitations (voir les résultats dans la section 6.6).

Les niveaux d'eau près de la limite ouest du modèle baissent rapidement par rapport au scénario de référence en raison de l'affaissement du sol. Lorsque le niveau de la nappe descend jusqu'au niveau du drain pendant les saisons sèches, il remonte rapidement en raison des crues fluviales. La profondeur de l'eau dans cette zone n'est donc que légèrement supérieure à celle du scénario de référence alimenté par les rivières. En dehors de la plantation, la nappe phréatique est plus profonde : dans les premières cellules proches de la limite, cela est dû uniquement à l'affaissement, tandis que plus loin du fleuve, cela résulte des effets combinés de l'affaissement du sol et du drainage.

Les pics de niveau d'eau induits par les crues fluviales sont légèrement atténués (graphiques de gauche). Les ondes de crue se propagent en effet plus lentement que dans le scénario de référence, car la tourbe est plus sèche en raison du drainage et de l'affaissement du sol. Au maximum, 19 % de la superficie du dôme est inondée par les rivières, contre 25 % dans le scénario de référence.

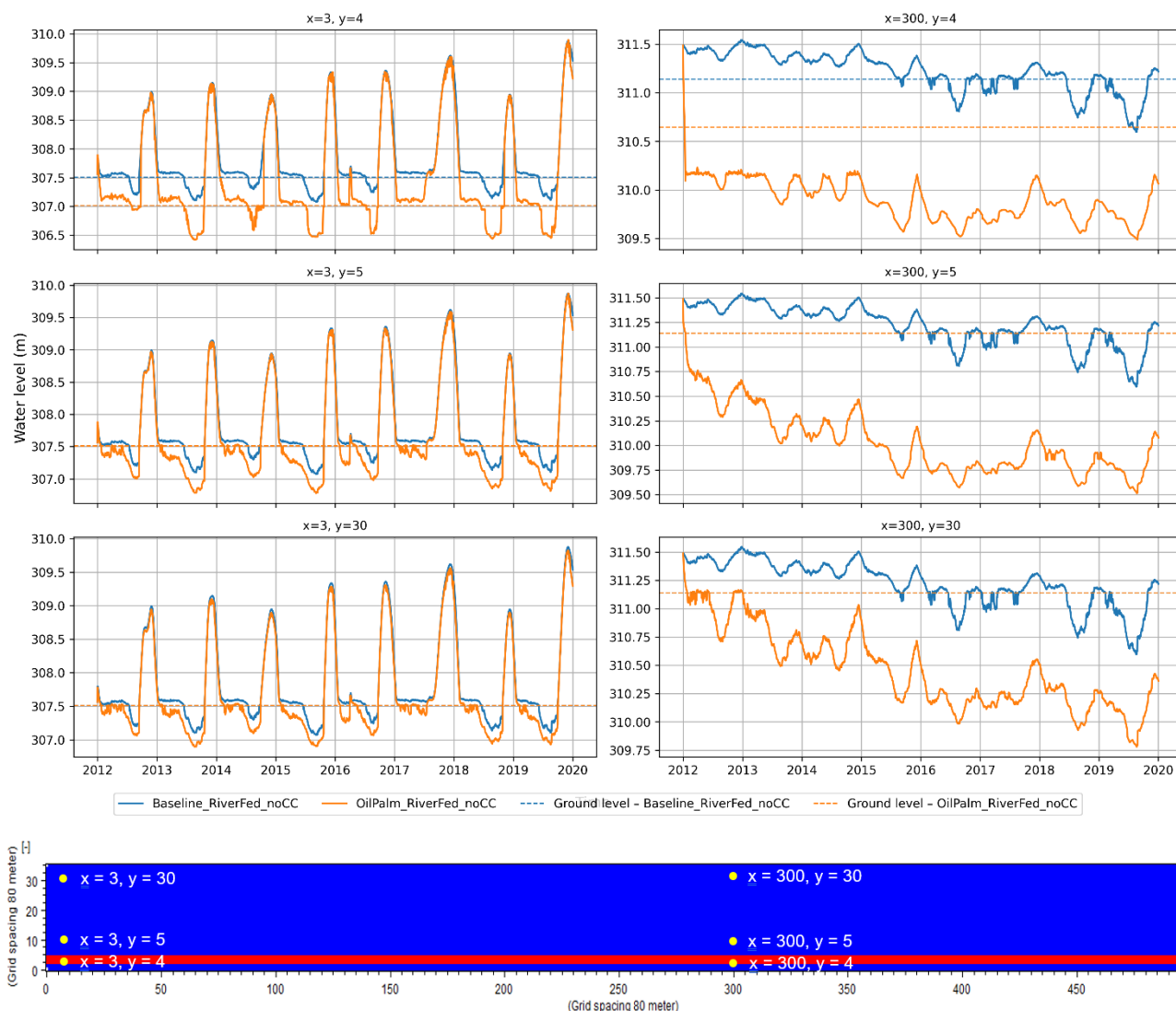


Figure 7-9 Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée ; scénario F.1.2 (OilPalm_RiverFed_noCC)

7.6.3 Indicateurs

Les indicateurs sont présentés dans le tableau ci-dessous. Le niveau de la nappe phréatique dans et autour de la plantation est beaucoup plus bas que dans le scénario de référence en raison de l'affaissement du sol et du drainage, ce qui entraîne une augmentation des émissions de carbone.

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur F.1.2	Valeur de l'indicateur A.1.2	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,71	0,12	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	0,69	0,03	m
Flux de carbone à l'intérieur	-14,55	-2,82	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,65	0,12	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,64	0,03	m
Flux de carbone en dehors	-13,53	-2,82	kg/m ² /an

Une représentation spatiale de la variation moyenne annuelle du stock de carbone dans le sol (Figure 7-10) révèle que la zone touchée par les crues fluviales est plus petite que dans le scénario de référence et que les pertes de carbone dans cette zone sont plus importantes. La plaine inondable est plus large dans l'empreinte de la plantation en raison de son altitude plus basse. Comme dans le scénario basé sur les précipitations, la décomposition de la tourbe est plus importante dans les cellules proches de l'empreinte de la plantation que dans l'empreinte elle-même. En effet, bien que les niveaux d'eau dans et autour de l'empreinte de la plantation soient proches, la surface du sol s'est affaissée sous la plantation, ce qui a entraîné un appauvrissement de la zone oxygène.

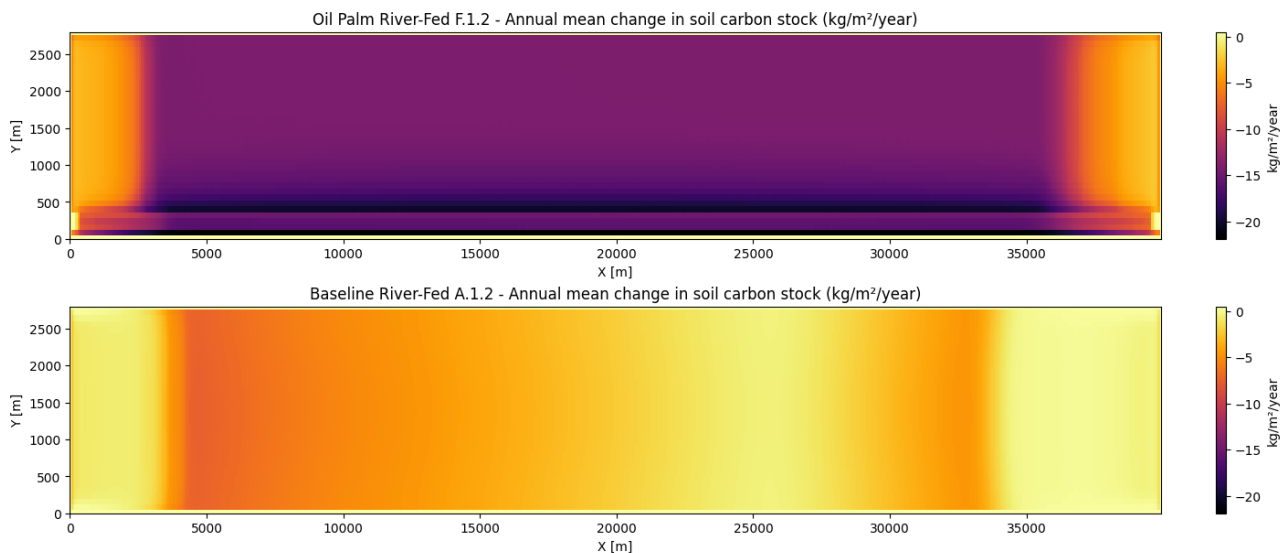


Figure 7-10 Variation nette annuelle moyenne du carbone dans le sol – Plantation de palmiers à huile (F.1.2) par rapport au scénario de référence (A.1.2)

7.6.4 Effets clés

(a) Les niveaux des eaux souterraines sous la plantation sont plus bas que dans la situation de référence, en raison du drainage et de l'affaissement du sol. (b) Une baisse des niveaux des eaux souterraines est observée dans toute la zone. (c) La décomposition de la tourbe est accrue en raison de la baisse des niveaux d'eau. (d) En raison du drainage et de l'affaissement du sol, la zone inondée par les rivières limitrophes diminue de 25 % à 19 % du dôme.

7.6.5 Recommandations

Recommandations pour l'atténuation : (1) gestion hydrologique : (a) conception d'un drainage peu profond en rapprochant la profondeur de drainage de la surface (par exemple, 30 à 40 cm) afin de réduire l'oxydation de la tourbe tout en favorisant la croissance des palmiers à huile, (b) systèmes de drainage contrôlés utilisant des barrages ou des vannes réglables pour gérer les niveaux d'eau saisonniers et maintenir la connectivité des plaines inondables ; (2) réduction de l'affaissement du sol : (a) minimiser l'intensité du drainage en réduisant la durée et la profondeur du drainage afin de ralentir la décomposition de la tourbe et l'affaissement, (b) utiliser des couvre-sols en plantant de la végétation de sous-bois afin de réduire l'évaporation et de protéger la structure du sol ; (3) zones tampons de végétation et de biodiversité : conserver des bandes de végétation naturelle le long des rivières et des zones inondables afin de préserver la biodiversité et la fonction hydrologique ; (4) atténuation des émissions de carbone : réhumidifier les zones dégradées en restaurant les zones de plantation abandonnées ou marginales et en reboisant ; (5) restauration de la topographie et de la microtopographie : (a) éviter de lisser la microtopographie naturelle afin de maintenir la rétention d'eau et la diversité des habitats, (b) reconstruire les couches superficielles dans les zones dégradées à l'aide de paillis organiques ou de compost afin d'améliorer la rétention d'eau et de favoriser les inondations saisonnières.

7.7 Scénario G.1.2

7.7.1 Définition

Que se passerait-il dans les tourbières dans les circonstances suivantes ?

Intervention de développement	Déforestation et conversion à la riziculture : (a) La végétation naturelle est supprimée et remplacée par des rizières. Le riz est la culture saisonnière inondée la plus courante dans la Cuvette Centrale. (b) Il y a deux récoltes par an. Les rizières sont inondées pendant la saison des pluies. (c) La végétation et les propriétés/rugosité de la surface varient en fonction du stade de croissance des cultures.
Climat	Les précipitations, la température et l'évapotranspiration entre 2010 et 2020 ont été choisies pour représenter les conditions climatiques actuelles.
Région hydrologique	Les processus hydrologiques dans les tourbières sont déterminés par les précipitations et l'évapotranspiration, ainsi que par les fluctuations du niveau d'eau dans les plans d'eau limitrophes (par exemple, les tronçons fluviaux). C'est principalement le cas dans les tourbières riveraines, situées pour la plupart en République démocratique du Congo.

7.7.2 Résultats hydrologiques

Les niveaux d'eau dans et autour de la zone d'intervention sont présentés dans la Figure 7-11 pour le scénario actuel (G.1.2) et le scénario de référence alimenté par les cours d'eau (A.1.2). Comme dans la simulation de référence alimentée par les cours d'eau, le centre du dôme n'est pas affecté par les crues fluviales (graphiques de droite). Les différences entre les scénarios G.1.2 et A.1.2 sont donc les mêmes que dans les simulations basées sur les précipitations (voir les résultats dans la section 6.7).

Près des limites ouest et est, les niveaux de la nappe phréatique dans les rizières sont plus bas que dans le scénario de référence A.1.2 en dehors des crues fluviales (voir graphique en haut à gauche). En effet, étant donné que la conversion en rizières a lissé la microtopographie du terrain, la plantation devient la zone de ruissellement préférentiel. Sans stockage dans les creux, la nappe phréatique baisse plus rapidement au début de la saison sèche. Lors des crues fluviales, le niveau de l'eau reste identique à celui du scénario de référence alimenté par les rivières. En dehors des rizières, les différences entre les deux scénarios sont négligeables (milieu et bas à gauche).

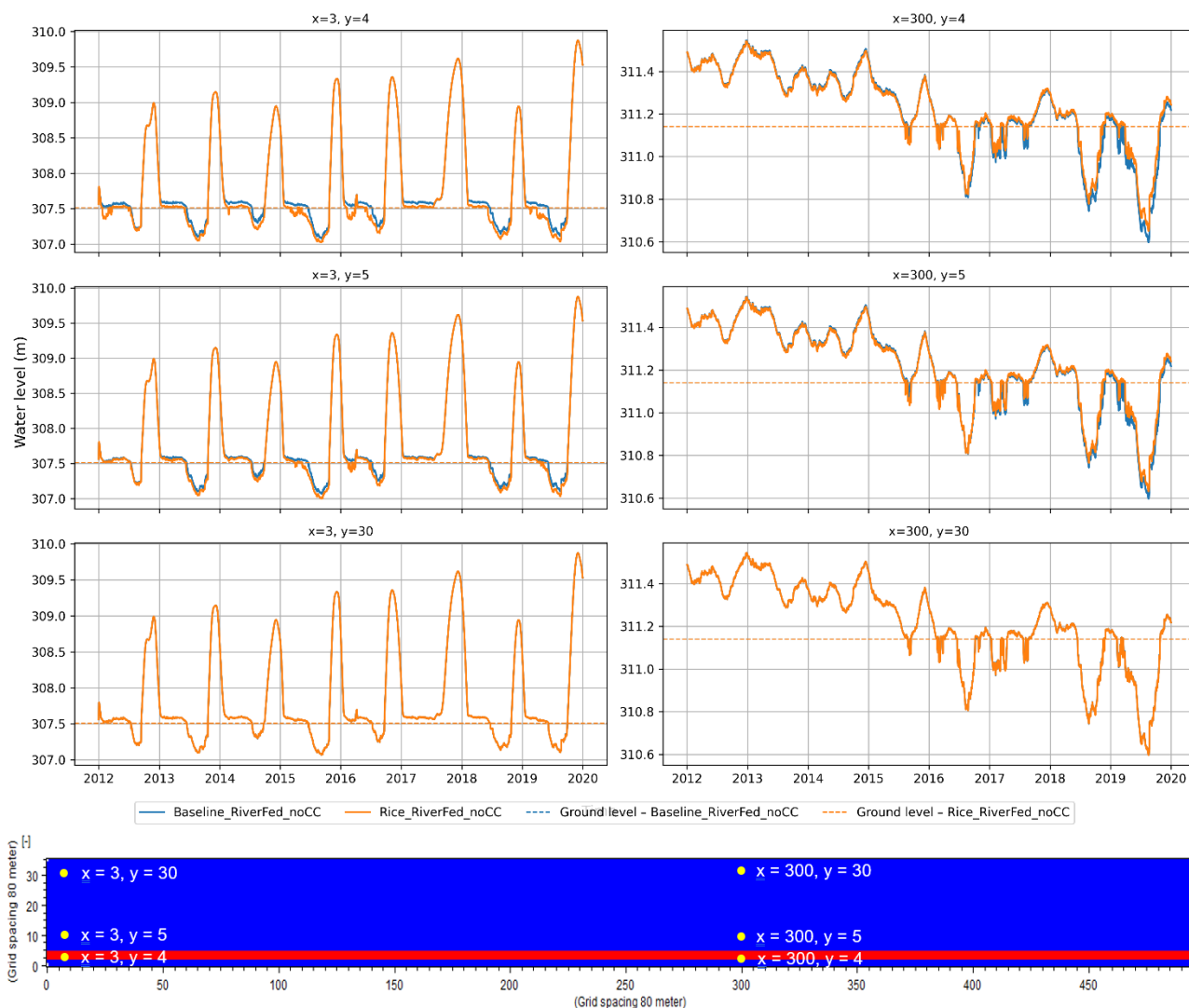


Figure 7-11 Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée ; scénario G.1.2 (Rice_RiverFed_noCC)

7.7.3 Indicateurs

Les valeurs des indicateurs sont présentées dans le tableau ci-dessous. La réduction de l'évapotranspiration dans les rizières situées en dehors de la plaine inondable entraîne une augmentation de la teneur en humidité du sol et donc une diminution de la profondeur moyenne de l'oxygène et de la décomposition de la tourbe. En dehors de la zone d'intervention, les différences entre les scénarios G.1.2 et A.1.2 sont faibles.

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur G.1.2	Valeur de l'indicateur A.1.2	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,09	0,12	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	0,00	0,03	m
Flux de carbone à l'intérieur	-2,46	-2,82	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,12	0,12	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,03	0,03	m
Flux de carbone en dehors	-2,79	-2,82	kg/m ² /an

Les pertes de carbone provenant des rizières sont plus élevées que dans le scénario A.1.2 dans la plaine inondable et au centre du dôme, mais plus faibles entre les deux en raison d'une évapotranspiration réduite. Bien que les niveaux d'eau au centre du dôme soient plus élevés que dans le scénario de référence, le flux net de carbone est également plus élevé, car l'absorption de carbone est réduite dans les rizières. La zone touchée par les crues fluviales est légèrement plus large dans les rizières, car la surface lisse agit comme un chemin d'écoulement préférentiel.

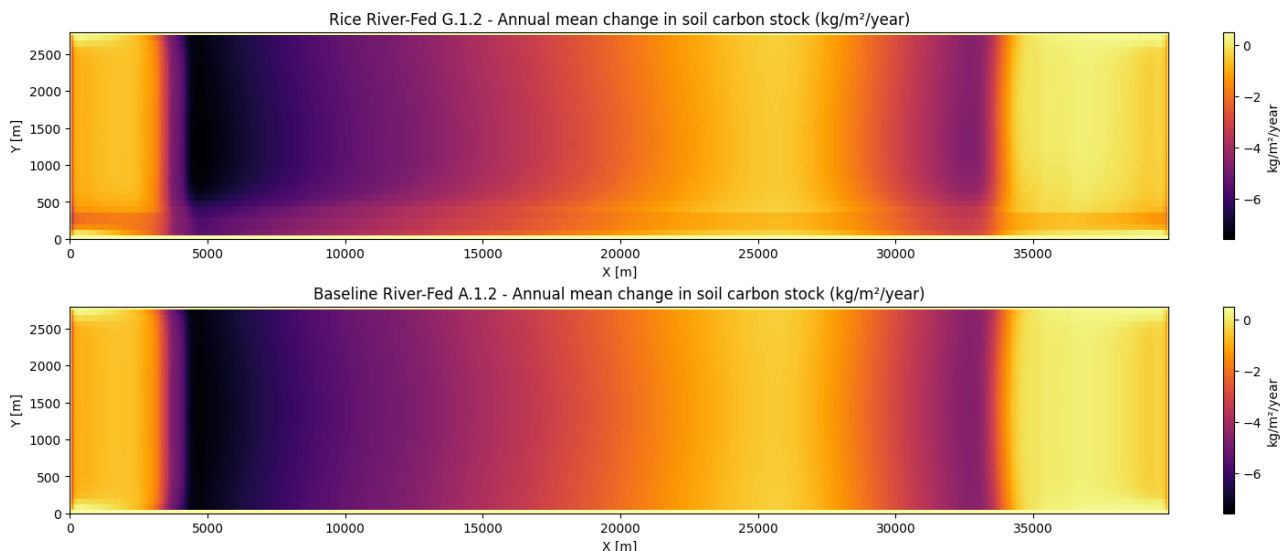


Figure 7-12 Variation nette annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Riz (G.1.2) par rapport au scénario de référence (A.1.2)

7.7.4 Effets clés

(a) Dans la plaine inondable, les niveaux des eaux souterraines dans les rizières sont plus bas que dans le scénario de référence, car l'accumulation d'eau à la surface est réduite sur la surface lisse, tandis qu'en dehors de la plaine inondable, ils sont plus élevés de 25 cm en raison de la réduction de l'évapotranspiration. (b) La décomposition de la tourbe est réduite dans la zone d'intervention - aucun changement majeur en dehors de la zone d'intervention. Les pertes de carbone sont plus importantes dans la plaine inondable et au centre du dôme, car la microtopographie y est plus lisse et l'absorption de carbone par la végétation est réduite.

7.7.5 Recommandations

(1) Stabilisation du niveau de la nappe : utiliser des digues et des structures de rétention pour réduire le drainage rapide pendant les saisons sèches et maintenir les niveaux des eaux souterraines. (2) Contrôle préférentiel des écoulements : restaurer la microtopographie ou introduire des dépressions peu profondes pour réduire les écoulements de surface et améliorer le stockage de l'eau. (3) Gestion de l'évapotranspiration : appliquer une alternance d'humidification et de séchage pour équilibrer l'utilisation de l'eau et réduire les émissions de CO₂ et de méthane. (4) Amélioration des sols : utiliser des amendements organiques (par exemple, biochar, paillis) pour améliorer la rétention d'eau et réduire la dégradation de la tourbe. (5) Zone tampon dans les plaines inondables : maintenir des zones tampons végétalisées près des berges des rivières afin de ralentir la propagation des eaux de crue.

7.8 Résumé des résultats

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 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. La décomposition de la tourbe dans la plaine inondable se produit 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 limites. 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 se situe principalement au-dessus du sol et la profondeur oxique est donc très faible. Les pertes de carbone les plus importantes se situent à la périphérie de la zone inondée par le fleuve.

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 sur les flux 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.

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
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

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 rivières. Les pertes de carbone du sol dans les 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 les rivières.

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 soumises aux précipitations. Néanmoins, quelques caractéristiques spécifiques des zones alimentées par les cours d'eau peuvent être soulignées. Dans le scénario de 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 l'agglomération surélevée (D.1.2). Dans le scénario de la palmeraie 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 alimentées par les cours d'eau mises en évidence ici ne doivent pas occulter le fait que les interventions simulées ont des impacts globalement similaires dans les cas alimentés par les précipitations et dans ceux alimentés par les cours d'eau. 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 dans les scénarios de route drainée (C.1.2) et de palmiers à huile (F.1.2), tandis qu'elles diminuent dans 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.

8 Effets du changement climatique

Cette section vise à comparer les résultats hydrologiques et les flux de carbone pour différents scénarios de changement climatique. Deux trajectoires socio-économiques partagées (SSP) sont comparées ici : SSP1-2.6 et SSP3-7.0 (voir la section 5.2).

8.1 Intervention A – Référence

8.1.1 Cas basé sur les précipitations

Les niveaux d'eau au centre de la tourbière et près de la limite ouest sont indiqués dans la Figure 8-1 pour les scénarios SSP1-2.6 et SSP3-7.0. Dans le scénario SSP1-2.6, les niveaux d'eau baissent davantage que dans les conditions climatiques actuelles. Comme dans le climat actuel, le niveau de la nappe au centre du dôme baisse pendant les années sèches 2015 et 2016 et ne se rétablit pas par la suite. Après 2015, les niveaux d'eau restent principalement sous la surface du sol, atteignant jusqu'à 20 cm de moins que dans les conditions actuelles. Les niveaux d'eau dans le scénario SSP3-7.0 sont beaucoup plus bas que dans les conditions climatiques actuelles. Le niveau de la nappe baisse dans l'ensemble du dôme de tourbe, atteignant jusqu'à 1 m de moins que dans les conditions actuelles au centre du dôme. Près des limites ouest et est, le niveau de la nappe baisse si fortement pendant la simulation qu'il atteint le fond de la couche de tourbe à la fin de la période.

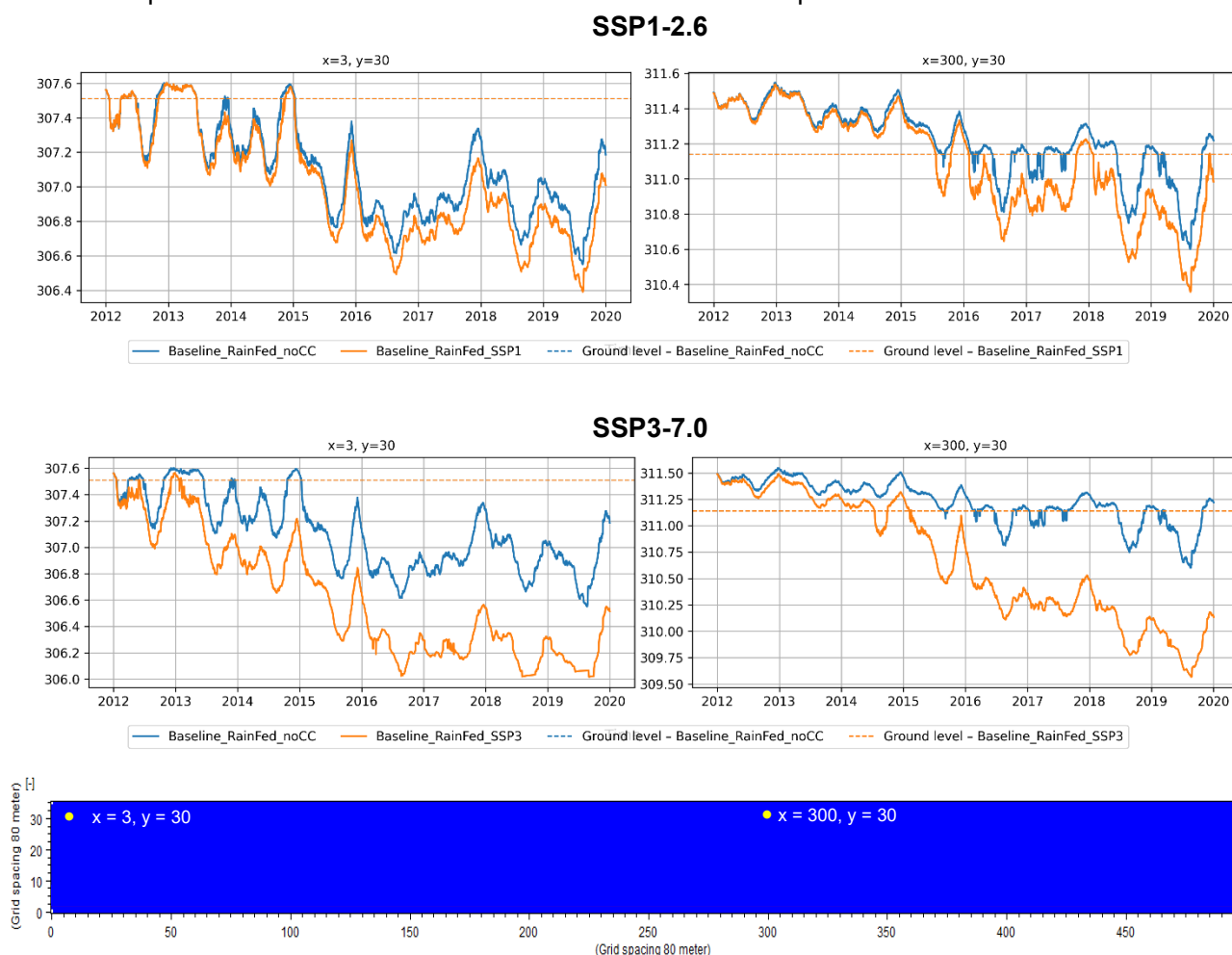


Figure 8-1 Niveaux d'eau au centre de la tourbière et près de la limite ouest
 Scénario A.2.1 (en haut, Baseline_RainFed_SSP1) et A.3.1 (en bas, Baseline_RainFed_SSP3)

La baisse des nappes phréatiques dans les deux SSP s'explique par une augmentation plus importante de l'évapotranspiration que des précipitations. En effet, l'évapotranspiration réelle augmente de 2,4 % par an dans le scénario SSP1-2.6 et de 3,7 % dans le scénario SSP3-7.0, tandis que les précipitations annuelles augmentent de 1,5 % dans le scénario SSP1-2.6 et diminuent de 0,1 % dans SSP3-7.0. Le niveau de la nappe est beaucoup plus bas dans le scénario SSP3-7.0 que dans le SSP1-2.6.

Les valeurs des indicateurs sont présentées dans le tableau ci-dessous. Dans les deux scénarios de changement climatique, la décomposition de la tourbe est plus importante que dans les conditions climatiques actuelles (A.1.1) en raison de la baisse du niveau des eaux et de l'exposition accrue de la tourbe à des conditions aérobies.

Nom abrégé de l'indicateur	Valeur de l'indicateur A.1.1 Précipitations sous le climat actuel	Valeur de l'indicateur A.2.1 Précipitations SSP1-2.6	Valeur de l'indicateur A.3.1 Précipitations SSP3-7.0	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur/ en dehors	0,20	0,31	0,74	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur/ en dehors	0,15	0,27	0,71	m
Flux de carbone à l'intérieur/en dehors	-4,72	-7,66	-16,11	kg/m/an

Une représentation spatiale de la variation annuelle moyenne du stock de carbone dans la tourbe selon les scénarios SSP1-2.6 et SSP3-7.0 (voir Figure 8-2) montre que les pertes de carbone sont plus importantes que dans les conditions climatiques actuelles dans toute la zone modélisée.

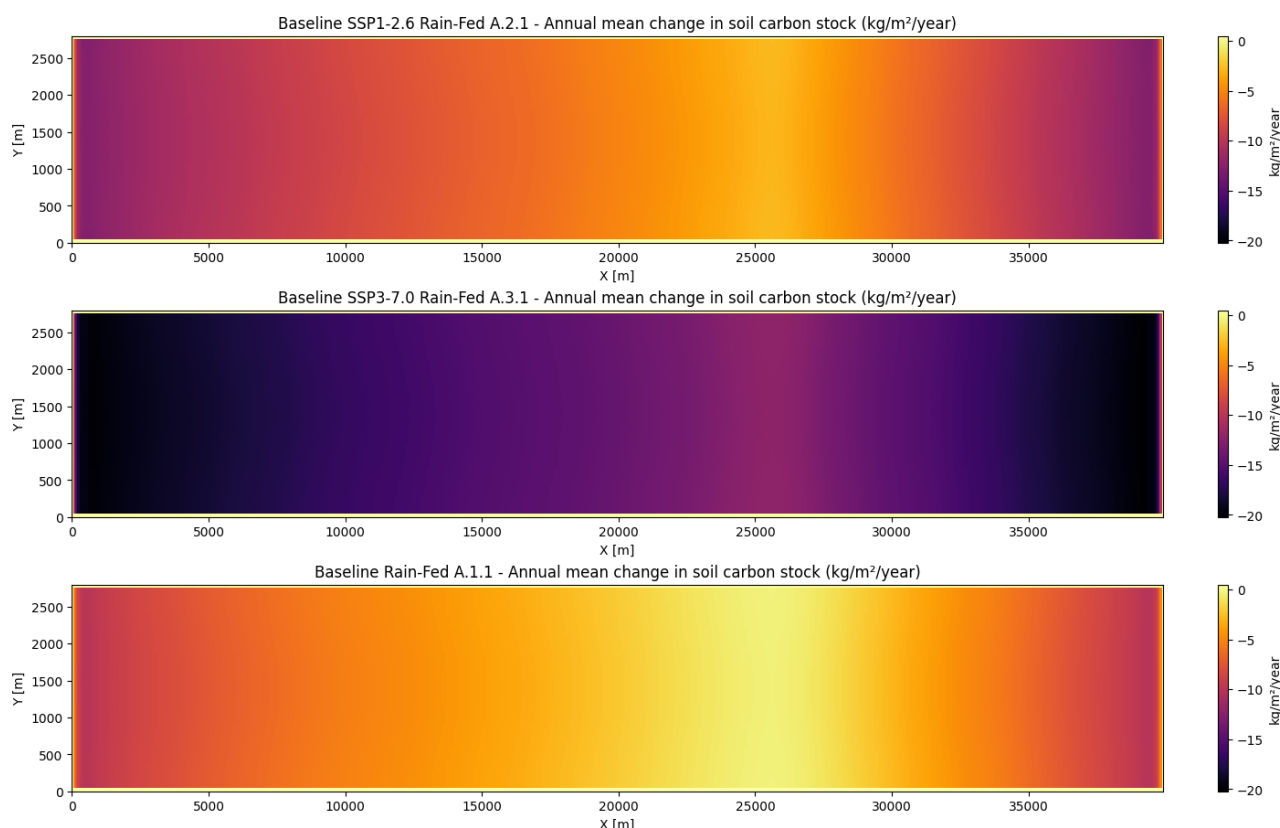


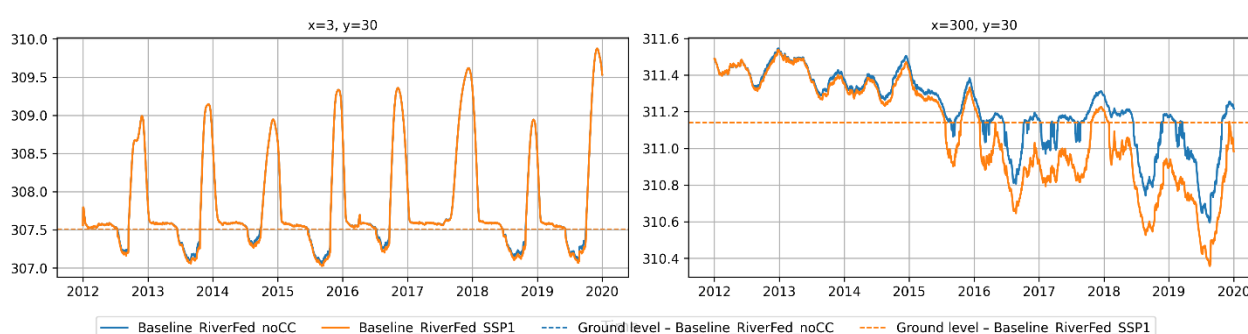
Figure 8-2 Variation nette moyenne annuelle du stock de carbone dans le sol – Scénario de référence SSP1-2.6 à dominance pluviale (A.2.1) - Scénario de référence SSP3-7.0 à dominance pluviale (A.3.1) - Scénario de référence à dominance pluviale (A.1.1)

8.1.2 Cas alimenté par les cours d'eau

Les niveaux d'eau au centre de la tourbière et près de la limite ouest sont indiqués dans la Figure 8-3 pour les scénarios SSP1-2.6 (A.2.2) et SSP3-7.0 (A.3.2). Comme dans le cas des précipitations, le centre du dôme n'est pas affecté par les crues fluviales (graphiques de droite). Les différences entre les scénarios A.2.2/A.3.2 et A.1.2 sont donc les mêmes que dans les simulations basées sur les précipitations (voir les résultats dans la section 8.1.1).

Les résultats près des limites ouest et est sont similaires entre les deux SSP, mais différent de la référence. Pendant les saisons sèches, le niveau de la nappe est plus profond pour les deux SSP que dans les conditions climatiques actuelles. Les niveaux d'eau sont similaires à ceux du scénario A.1.2 pendant les saisons humides, car les effets des changements de température et de précipitations sur les niveaux des rivières n'ont pas été pris en compte dans cette étude (voir justification dans la section 7.1).

SSP1-2.6



SSP3-7.0

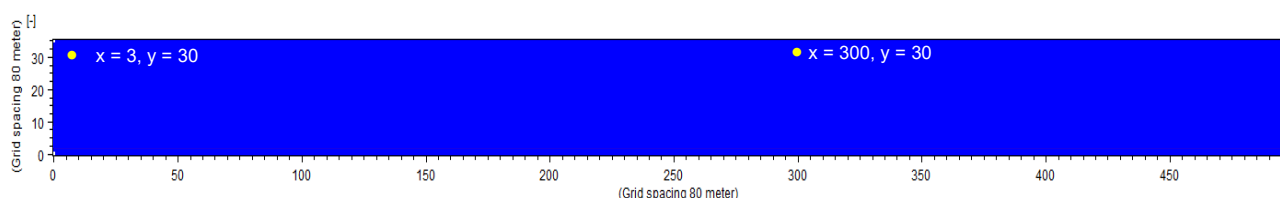
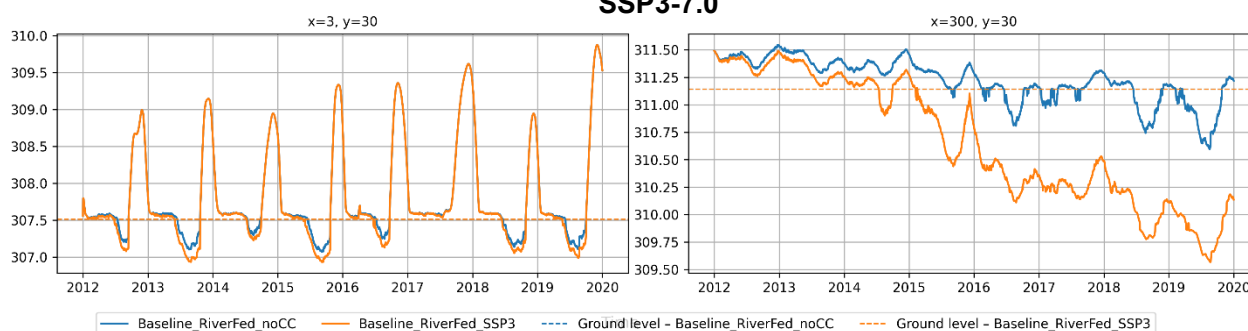


Figure 8-3 Niveaux d'eau au centre de la tourbière et près de la limite ouest
Scénario A.2.2 (en haut, Baseline_RiverFed_SSP1) et A.3.2 (en bas, Baseline_RiverFed_SSP3)

Les valeurs des indicateurs sont présentées dans le tableau ci-dessous. Dans le scénario SSP1-2.6, la zone oxygène est en moyenne 10 cm plus profonde que dans le scénario de référence A.1.2, et les pertes de carbone sont près de deux fois plus élevées. Dans le scénario SSP3-7.0, la profondeur oxygène et les pertes de carbone sont 4/5 fois plus élevées que dans le scénario de référence A.1.2.

Nom abrégé de l'indicateur	Valeur de l'indicateur A.1.2 <i>Climat actuel des cours d'eau</i>	Valeur de l'indicateur A.2.2 Tourbière fluviale SSP1-2.6	Valeur de l'indicateur A.3.2 Tourbière fluviale SSP3-7.0	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur/ en dehors	0,12	0,21	0,55	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur/ en dehors	0,03	0,12	0,48	m
Flux de carbone à l'intérieur/en dehors	-2,82	-5,16	-12,28	kg/m ² /an

Une représentation spatiale de la variation moyenne annuelle du stock de carbone dans le sol pour les trois scénarios climatiques (voir Figure 8-4) montre que les pertes de carbone dans le sol en dehors de la plaine inondable sont plus importantes dans le scénario SSP3-7.0 que dans le scénario SSP1-2.6, qui sont eux-mêmes plus élevés que ceux du scénario de référence A.1.2. La zone touchée par les crues fluviales dans les scénarios SSP1-2.6 et SSP3-7.0 est plus étroite que dans le scénario de référence.

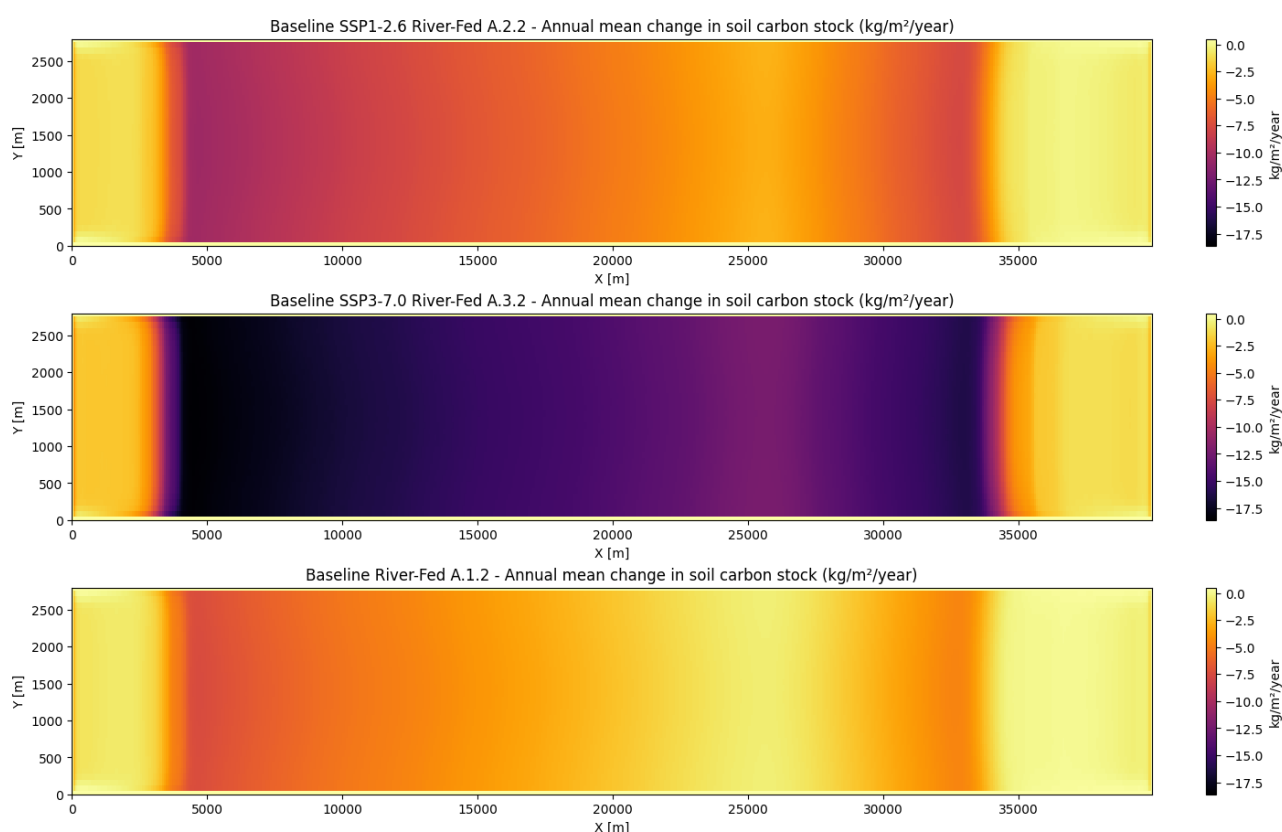


Figure 8-4 Émissions nettes moyennes annuelles de CO₂ – Scénario de référence SSP1-2.6 à dominance fluviale (A.2.2) - Scénario de référence SSP3-7.0 à dominance fluviale (A.3.2) - Scénario de référence à dominance fluviale (A.1.2)

8.2 Intervention B – Route construite et opérationnelle

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. À l'intérieur de l'empreinte de la route, le flux de carbone reste nul car le niveau de la nappe reste au-dessus de la base du remblai routier.

8.2.1 Cas lié aux précipitations

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur B.1.1 Scénario actuel lié aux précipitations	Valeur de l'indicateur B.2.1 Précipitations SSP1-2.6	Valeur de l'indicateur B.3.1 Précipitations SSP3-7.0	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,92	0,95	1,13	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	1,06	1,10	1,26	m
Flux de carbone à l'intérieur	0,00	0,00	0,00	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,13	0,21	0,61	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,05	0,16	0,58	m
Flux de carbone en dehors	-2,90	-5,27	-13,75	kg/m ² /an

8.2.2 Cas alimenté par un cours d'eau

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur B.1.2 Climat actuel des zones alimentées par les cours d'eau	Valeur de l'indicateur B.2.2 Tourbière fluviale SSP1-2.6	Valeur de l'indicateur B.3.2 Tourbière fluviale SSP3-7.0	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,89	0,92	1,07	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	1,03	1,06	1,20	m
Flux de carbone à l'intérieur	0,00	0,00	0,00	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,07	0,13	0,44	m

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur B.1.2 Climat actuel des zones alimentées par les cours d'eau	Valeur de l'indicateur B.2.2 Tourbière fluviale SSP1-2.6	Valeur de l'indicateur B.3.2 Tourbière fluviale SSP3-7.0	Unité
Profondeur des eaux souterraines en dehors	-0,05	0,03	0,37	m
Flux de carbone en dehors	-1,40	-3,23	-10,29	kg/m ² /an

8.3 Intervention C – Route pendant la construction

À mesure que le niveau des eaux baisse en raison du changement climatique, la décomposition de la tourbe augmente à proximité de l'empreinte de la route drainée, tout en restant beaucoup plus élevée que dans le scénario de référence. Cependant, la baisse du niveau des eaux due au drainage est si importante que l'impact du changement climatique sur le niveau des eaux est réduit par rapport à l'intervention de référence. À l'intérieur de l'empreinte de la route, le flux de carbone reste nul car la nappe phréatique reste au-dessus de la base du remblai routier.

8.3.1 Cas lié aux précipitations

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur C.1.1 Cas lié aux précipitations Climat actuel	Valeur de l'indicateur C.2.1 Cas lié aux précipitations SSP1-2.6	Valeur de l'indicateur C.3.1 Précipitations SSP3-7.0	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	2,12	2,12	2,12	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	2,01	2,02	2,06	m
Flux de carbone à l'intérieur	0,00	0,00	0,00	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,68	0,77	1,08	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,68	0,78	1,06	m
Flux de carbone en dehors	-14,26	-16,42	-20,64	kg/m ² /an

8.3.2 Cas alimenté par une rivière

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur C.1.2 Tourbière fluviale Climat actuel	Valeur de l'indicateur C.2.2 Tourbière fluviale SSP1-2,6	Valeur de l'indicateur C.3.2 Tourbière fluviale SSP3-7.0	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	2,12	2,12	2,12	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	2,01	2,02	2,06	m
Flux de carbone à l'intérieur	0,00	0,00	0,00	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,61	0,69	0,96	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,60	0,67	0,92	m
Flux de carbone en dehors	-12,88	-14,81	-18,63	kg/m ² /an

8.4 Intervention D – Développement des zones d'habitation

À mesure que les niveaux d'eau baissent en raison du changement climatique, la décomposition de la tourbe augmente à l'intérieur et à l'extérieur de l'empreinte de l'établissement, tout en restant inférieure à celle observée dans les conditions climatiques actuelles à l'extérieur de l'empreinte. Dans le cas où les précipitations sont déterminantes, comme l'évapotranspiration réelle à l'extérieur de l'empreinte est très élevée dans le scénario SSP3-7.0, les niveaux d'eau sous l'empreinte sont moins profonds qu'à l'extérieur - et donc les pertes de carbone sont moindres -, contrairement aux conditions climatiques actuelles et au scénario SSP1-2.6. Dans le cas alimenté par les cours d'eau sous SSP3-7.0, bien que les pertes de carbone à l'extérieur de l'empreinte restent inférieures à celles à l'intérieur, elles sont également inférieures à celles du scénario de référence en raison de l'évapotranspiration réelle très élevée à l'extérieur de l'empreinte. En dehors de l'empreinte de l'intervention, les pertes de carbone sont similaires à celles du scénario de référence.

8.4.1 Scénario basé sur les précipitations

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur D.1.1 Scénario basé sur les précipitations Conditions climatiques actuelles	Valeur de l'indicateur D.2.1 Précipitations SSP1-2.6	Valeur de l'indicateur D.3.1 Tourbière pluviale SSP3-7.0	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,37	0,40	0,52	m

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur D.1.1 Scénario basé sur les précipitations Conditions climatiques actuelles	Valeur de l'indicateur D.2.1 Précipitations SSP1-2.6	Valeur de l'indicateur D.3.1 Tourbière pluviale SSP3-7.0	Unité
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	0,40	0,43	0,55	m
Flux de carbone à l'intérieur	-8,77	-9,93	-12,56	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,16	0,26	0,67	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,10	0,21	0,64	m
Flux de carbone en dehors	-3,80	-6,46	-14,80	kg/m ² /an

8.4.2 Cas alimenté par une rivière

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur D.1.2 Tourbière fluviale Climat actuel	Valeur de l'indicateur D.2.2 SSP1-2.6 tourbière fluviale	Valeur de l'indicateur D.3.2 Tourbière fluviale SSP3-7.0	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,34	0,37	0,48	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	0,35	0,38	0,49	m
Flux de carbone à l'intérieur	-8,10	-9,18	-11,56	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,09	0,17	0,49	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	-0,01	0,08	0,42	m
Flux de carbone en dehors	-2,08	-4,18	-11,77	kg/m ² /an

8.5 Intervention E – Incendies de forêt / Déforestation

À mesure que les niveaux d'eau baissent 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. Dans la zone

d'intervention, les pertes de carbone dans les scénarios SSP1-2.6 et SSP3-7.0 sont inférieures à celles du scénario de référence. L'évapotranspiration de la zone brûlée est en effet réduite lorsque le niveau de la nappe descend profondément sous terre, ce qui entraîne une augmentation du niveau de la nappe. Les flux de carbone à l'extérieur de la zone touchée par l'incendie sont similaires à ceux du scénario de référence.

8.5.1 Cas lié aux précipitations

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur E.1.1 <i>Climat actuel déterminé par les précipitations</i>	Valeur de l'indicateur E.2.1 Tourbière pluviale SSP1-2.6	Valeur de l'indicateur E.3.1 Tourbière pluviale SSP3-7.0	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,18	0,25	0,43	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	0,14	0,22	0,43	m
Flux de carbone à l'intérieur	-4,67	-6,64	-10,83	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,20	0,31	0,73	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,16	0,27	0,70	m
Flux de carbone en dehors	-4,78	-7,65	-15,88	kg/m ² /an

8.5.2 Cas alimenté par une rivière

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur E.1.2 <i>Tourbière fluviale Climat actuel</i>	Valeur de l'indicateur E.2.2 Tourbière fluviale SSP1-2.6	Valeur de l'indicateur E.3.2 Tourbière fluviale SSP3-7.0	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,12	0,18	0,34	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	0,03	0,11	0,29	m
Flux de carbone à l'intérieur	-3,17	-4,91	-8,72	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,12	0,21	0,54	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,03	0,12	0,47	m

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur E.1.2 Tourbière fluviale Climat actuel	Valeur de l'indicateur E.2.2 Tourbière fluviale SSP1-2.6	Valeur de l'indicateur E.3.2 Tourbière fluviale SSP3-7.0	Unité
Flux de carbone en dehors	-2,85	-5,16	-12,09	kg/m ² /an

8.6 Intervention F – Forêt remplacée par des plantations de palmiers à huile

Le changement climatique dans le scénario SSP1-2.6 augmente l'évapotranspiration, ce qui abaisse encore davantage le niveau des nappes phréatiques dans le dôme de tourbe. Cependant, la baisse du niveau de l'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 (A.2.1), tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'empreinte de la plantation.

8.6.1 Cas lié aux précipitations

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur F.1.1 Scénario basé sur les précipitations Climat actuel	Valeur de l'indicateur F.2.1 Précipitations SSP1-2.6	Valeur de l'indicateur F.3.1 Précipitations SSP3-7.0	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,77	0,82	1,05	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	0,79	0,84	1,04	m
Flux de carbone à l'intérieur	-15,64	-17,13	-20,37	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,73	0,83	1,13	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,73	0,83	1,12	m
Flux de carbone en dehors	-15,01	-17,17	-21,25	kg/m ² /an

8.6.2 Cas alimenté par une rivière

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur F.1.2 Tourbière fluviale Climat actuel	Valeur de l'indicateur F.2.2 Tourbière fluviale SSP1-2.6	Valeur de l'indicateur F.3.2 Tourbière fluviale SSP3-7.0	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,71	0,75	0,94	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	0,69	0,74	0,91	m
Flux de carbone à l'intérieur	-14,55	-15,87	-18,70	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,65	0,74	1,00	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,64	0,72	0,97	m
Flux de carbone en dehors	-13,53	-15,45	-19,17	kg/m ² /an

8.7 Intervention G – Forêt remplacée par des rizières

À mesure que le niveau des eaux baisse en raison du changement climatique, la décomposition de la tourbe s'accélère tant à l'intérieur qu'à l'extérieur des rizières. Dans l'empreinte de l'intervention, comme dans le climat actuel, les pertes de carbone dans les scénarios SSP1-2.6 et SSP3-7.0 sont inférieures à celles du scénario de référence. L'évapotranspiration des rizières est en effet réduite lorsque le niveau de la nappe baisse profondément sous terre, ce qui atténue la baisse du niveau des eaux. Les flux de carbone en dehors de l'empreinte des rizières sont similaires à ceux du scénario de référence.

8.7.1 Cas lié aux précipitations

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur G.1.1 Cas lié aux précipitations Climat actuel	Valeur de l'indicateur G.2.1 Tourbière pluviale SSP1-2.6	Valeur de l'indicateur G.3.1 Précipitations SSP3-7.0	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,14	0,22	0,50	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	0,10	0,19	0,49	m
Flux de carbone à l'intérieur	-3,77	-5,97	-12,34	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,20	0,31	0,73	m

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur G.1.1 Cas lié aux précipitations Climat actuel	Valeur de l'indicateur G.2.1 Tourbière pluviale SSP1-2.6	Valeur de l'indicateur G.3.1 Précipitations SSP3-7.0	Unité
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,15	0,27	0,70	m
Flux de carbone en dehors	-4,70	-7,57	-15,91	kg/m ² /an

8.7.2 Cas alimenté par une rivière

Indicateur Nom abrégé	Valeur de l'indicateur G.1.2 Tourbière fluviale Climat actuel	Valeur de l'indicateur G.2.2 Fluvial SSP1-2.6	Valeur de l'indicateur G.3.2 Tourbière fluviale SSP3-7.0	Unité
Profondeur d'oxydation à l'intérieur	0,09	0,15	0,39	m
Profondeur des eaux souterraines à l'intérieur	0,00	0,08	0,34	m
Flux de carbone à l'intérieur	-2,46	-4,27	-9,91	kg/m ² /an
Profondeur d'oxydation en dehors	0,12	0,20	0,54	m
Profondeur des eaux souterraines en dehors	0,03	0,12	0,47	m
Flux de carbone en dehors	-2,79	-5,10	-12,14	kg/m ² /an

8.8 Résumé des résultats

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 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 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 d'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 l'intervention 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 du scénario de référence dans les scénarios SSP1-2.6 et SSP3-7.0, contrairement aux conditions climatiques actuelles. Dans les tourbières alimentées par les rivières, les pertes de carbone dans la zone brûlée sont supérieures à celles du scénario de référence dans les conditions climatiques actuelles, 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 du scénario 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.

9 Applicabilité et limites de la méthodologie

La méthode présentée ici reconnaît que la compréhension de l'hydrologie des tourbières est essentielle pour estimer les changements dans les stocks de carbone du sol et s'appuie donc sur une approche combinant un modèle hydrologique et une approche des flux de carbone. Bien que l'outil développé permette d'évaluer les impacts des interventions sur les niveaux d'eau et les flux de carbone, cette méthodologie présente certaines limites.

9.1 Configuration hydrologique et validation du modèle

En raison de la disponibilité limitée de données exhaustives, 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. Cette approche « expérimentale » est adaptée aux contraintes liées aux données de la région et permet une analyse de scénarios robuste malgré les incertitudes inhérentes. Afin de refléter la diversité hydrologique de la Cuvette Centrale, le modèle 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. 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. Son étendue spatiale a été définie par des tests itératifs d'interventions locales, garantissant ainsi sa pertinence par rapport aux scénarios évalués.

Les niveaux d'eau simulés ont été comparés aux mesures effectuées le long de plusieurs transects dans la Cuvette Centrale en 2013-2014 et 2018-2019 (Dargie et al., 2017 ; Crezee et al., 2022). Le modèle étant conceptuel, les procédures d'étalonnage standard utilisant des mesures d'évaluation des performances établies pour valider sa précision n'ont pas pu être mises en œuvre. L'accent a donc été mis sur des contrôles de plausibilité qualitative des plages de niveaux d'eau et des modèles de fluctuation.

La comparaison des niveaux d'eau simulés avec les observations montre qu'ils se situent dans la même fourchette et présentent des fluctuations saisonnières similaires (voir la section 3.3). Les mesures indiquent une élévation rapide des eaux souterraines après les précipitations, suivie d'une baisse progressive ; cependant, ce modèle n'est pas bien reproduit dans le modèle MIKE SHE. Le modèle sépare également clairement l'écoulement rapide en surface de la dynamique plus lente des eaux souterraines, qui devrait être moins prononcée.

Les mesures de la profondeur et de l'élévation de la tourbe dans la région (voir Dargie et al., 2017 ; Crezee et al., 2022) ont été utilisées pour concevoir le modèle de dôme de tourbe en pente douce. Les résultats du modèle montrent que le niveau de la nappe est plus profond dans les zones escarpées près des limites ouest et est que dans le centre plat du dôme. Cependant, les mesures disponibles ne fournissent aucune preuve que le niveau de la nappe est effectivement plus profond aux marges escarpées du dôme de tourbe (voir section 3.3). Des travaux supplémentaires sur le terrain dans la Cuvette Centrale seraient donc nécessaires pour mieux comprendre la **variabilité spatiale des niveaux d'eau à travers les dômes de tourbe**. Il est essentiel de cartographier avec précision les zones où le niveau de la nappe est profond, car ces zones sont responsables de la plupart des émissions de carbone. Si les niveaux d'eau simulés le long des bords du dôme sont trop bas, la baisse des pertes de carbone simulée pour les tourbières alimentées par les rivières par rapport aux tourbières alimentées par les pluies serait surestimée.

9.2 Processus hydrologiques

Il est essentiel d'estimer avec précision **l'évapotranspiration** pour décrire le bilan hydrique de la Cuvette Centrale. La transpiration est modélisée dans MIKE SHE sur la base de l'évapotranspiration de référence et de paramètres spécifiques aux plantes qui varient en fonction de l'intervention simulée. Elle est simulée à l'aide d'une distribution logarithmique de la densité racinaire dans la colonne de sol, avec une extraction plus importante dans la couche superficielle. Cette distribution dépend de la profondeur maximale des racines, qui est un paramètre d'entrée du modèle. Sciumbata et al. (2023) ont mesuré la production de racines fines jusqu'à une profondeur de 1 m dans les tourbières de la Cuvette Centrale et ont trouvé des traces de racines fines dans toute la colonne de sol. La profondeur maximale des racines est donc fixée à 1 m dans cette étude.

Sciumbata et al. ont également observé que la production de racines fines diminue fortement avec la profondeur dans les tourbières de la Cuvette Centrale. En revanche, la distribution par défaut des racines dans le modèle MIKE SHE diminue plus progressivement avec la profondeur, ce qui permet des racines relativement plus profondes. Par conséquent, la transpiration et donc la profondeur de la nappe phréatique peuvent être surestimées dans le modèle pendant les périodes sèches.

Les propriétés hydrauliques de la tourbe, telles que la conductivité hydraulique et le rendement spécifique, déterminent la manière dont l'eau s'infiltre et s'écoule à travers la tourbe. Comme aucune mesure des paramètres hydrauliques du sol n'est disponible pour la Cuvette Centrale, les valeurs des paramètres sont dérivées de la littérature sur les tourbières tropicales d'Asie du Sud-Est. On ignore également comment ces propriétés varient avec la profondeur dans la région étudiée. Afin de mieux représenter la dynamique des eaux souterraines dans les tourbières de la Cuvette Centrale, il convient de mesurer les propriétés hydrauliques.

Le bilan hydrique du scénario A.1.1 montre un écoulement très faible vers les limites ouest et est (voir section 3.3.3), bien que certaines études démontrent que le débit sortant vers les rivières est élevé dans les tourbières congolaises. Les simulations alimentées par les rivières montrent que les faibles niveaux des rivières ne semblent pas affecter la nappe phréatique au-delà de deux cellules éloignées de la limite. L'écoulement des eaux souterraines depuis et vers les rivières et, plus généralement, **l'écoulement latéral des eaux souterraines** pourraient être sous-estimés dans la configuration actuelle du modèle. Des mesures sur le terrain devraient être effectuées afin de quantifier l'écoulement latéral des eaux souterraines dans les tourbières de la Cuvette Centrale.

9.3 Scénarios

Les simulations alimentées par les cours d'eau indiquent que la zone inondée par les cours d'eau s'étend progressivement d'année en année, à mesure que les apports fluviaux reconstituent la zone non saturée. Cela suggère que l'équilibre hydrologique n'est pas atteint pendant la simulation. Il serait donc préférable d'exécuter le modèle alimenté par les cours d'eau sur une période plus longue afin de saisir pleinement les impacts des crues fluviales sur l'ensemble de la zone modélisée.

Les **interventions** modélisées pourraient être améliorées grâce aux connaissances et aux données locales. Les données géotechniques aideraient à affiner la configuration du modèle pour les interventions route et urbanisation. Pour les plantations de palmiers à huile et de riz, davantage d'informations sur les schémas de drainage dans la Cuvette Centrale seraient utiles pour améliorer les paramètres du modèle. Des mesures locales du sol devraient également être effectuées dans les zones dégradées de la tourbière. Afin de mieux comprendre les impacts hydrologiques des différentes interventions, les propriétés hydrauliques de la tourbe soumise à la compression, à la combustion ou au drainage devraient être surveillées.

Les modèles climatiques inclus dans l'ensemble multimodèle CMIP6 montrent des résultats contradictoires concernant les tendances des précipitations dans la zone d'étude (voir la section 5.2.2). Les incertitudes importantes associées aux prévisions de précipitations dans la région signifient que les résultats des scénarios de changement climatique doivent être interprétés avec prudence. Alors que la

médiane de l'ensemble suggère une légère augmentation des précipitations sous le scénario SSP1-2.6 et une diminution sous le scénario SSP3-7.0, certains modèles prévoient des augmentations ou des diminutions beaucoup plus importantes. Si l'un des scénarios de précipitations plus abondantes se concrétisait, l'impact du changement climatique sur les niveaux d'eau serait probablement moins grave. Toutefois, pour plus de précision, les projections de précipitations p10 et p90 devraient également être prises en compte afin de donner un aperçu de l'ensemble des scénarios climatiques possibles. En outre, des études scientifiques supplémentaires sont nécessaires pour évaluer les effets du changement climatique sur le débit des cours d'eau dans la région, qui joue un rôle crucial dans l'hydrologie des tourbières alimentées par les cours d'eau.

9.4 Modèle d'accumulation et de perte de carbone

Dans le modèle actuel, le stockage du carbone est supposé rester constant tout au long de la période de simulation. En réalité, la quantité totale de carbone stockée par la photosynthèse des plantes, appelée **productivité primaire brute (GPP)**, **dépend à la fois des conditions météorologiques et hydrologiques**. La photosynthèse, par exemple, ralentit les jours nuageux. Hirano et al. (2012) ont observé que la PPG diminuait dans les forêts de tourbières brûlées en Indonésie en raison de la fumée dense générée par les feux de tourbe. L'intégration de cet effet dans le scénario d'incendie améliorerait la précision des estimations du flux de carbone. Le stockage du carbone est également influencé par l'hydrologie, car les plantes subissent un stress lorsque le niveau de la nappe phréatique est trop bas ou trop élevé. Pour mieux rendre compte de cet effet, un facteur de réduction du stockage du carbone pourrait être introduit lorsque le niveau de la nappe phréatique se situe en dehors d'une plage optimale.

Des périodes prolongées de **décomposition de la tourbe entraînent un affaissement du sol**. Dans le modèle hydrologique du palmier à huile, cet effet est représenté par un abaissement de la surface du sol de 50 cm. Une approche plus précise consisterait à coupler explicitement les modèles de flux de carbone et les modèles hydrologiques, en ajustant dynamiquement l'élévation du sol en fonction de la dynamique du carbone. Cependant, cela augmenterait considérablement la complexité du processus de modélisation.

Plusieurs études ont montré que **les propriétés hydrauliques de la tourbe influencent les taux de décomposition**. Par exemple, Hirano et al. (2012) ont démontré qu'une baisse similaire du niveau moyen annuel de la nappe phréatique entraîne des émissions de CO₂ plus importantes dans les tourbières intactes que dans les tourbières drainées. Les taux de décomposition pourraient donc être estimés avec plus de précision si les propriétés du sol étaient intégrées dans le modèle de flux de carbone. Cependant, les données publiées sur les effets des propriétés de la tourbe sur les taux de décomposition restent limitées, c'est pourquoi la méthode présentée ici ne tient pas compte des propriétés hydrauliques du sol.

La présente étude **se concentre sur le bilan carbone plutôt que sur les émissions de gaz à effet de serre**, ce qui empêche de tirer des conclusions définitives sur les effets des différentes interventions sur les tourbières sur le réchauffement climatique. Dans des conditions oxiques, la majeure partie du carbone de la tourbe est convertie en CO₂, tandis que dans des conditions anaérobies, des quantités importantes de méthane et de carbone organique dissous peuvent être produites. La contribution relative de chaque voie d'écoulement du carbone dépend des propriétés physiques et chimiques de la tourbe. Étant donné que, dans tous les scénarios du modèle, la plupart de la décomposition de la tourbe se produit dans des conditions oxiques, les émissions de CO₂ peuvent être estimées à partir de la perte de carbone de la tourbe. Cependant, une évaluation plus complète des écoulements de carbone dans des conditions oxiques et anaérobies nécessiterait des mesures supplémentaires sur le terrain.

9.5 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 émissions de dioxyde de carbone dans diverses conditions hydrologiques et climatiques. La précision du modèle est limitée par la connaissance insuffisante de l'hydrologie des tourbières de la Cuvette Centrale, en particulier des échanges entre les rivières 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.

10 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 flux 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) alimentée uniquement par les précipitations, et (2) alimentée par les précipitations et les 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.

Les flux de carbone sont estimés en conditions oxiqes et anoxiques grâce au modèle d'accumulation et de dégradation de la. 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 pertes 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 réduction 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 pertes 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. L'évapotranspiration devrait 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.

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. Pour l'avenir, les orientations clés suivantes peuvent être envisagées : Engagement des parties prenantes et 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.

Les efforts futurs devraient se concentrer sur l'amélioration de la collecte de données in situ, le raffinement des paramètres hydrauliques du sol et l'amélioration de la résolution spatiale du modèle. En conclusion, le HDSS représente une étape importante vers l'intégration de l'hydrologie, de la dynamique du carbone et des projections climatiques dans un cadre décisionnel unifié pour la gestion durable et la conservation des tourbières du bassin du Congo.

11 Liste des figures et tableaux

Figures

Figure 1-1	Aperçu du paysage du projet Lac Télé Lac Tumba	11
Figure 3-1	MIKE SHE modélise l'ensemble du cycle de l'eau	14
Figure 3-2	Aperçu des méthodes numériques utilisées pour simuler les processus du cycle de l'eau dans MIKE SHE	16
Figure 3-3	Zone du modèle conceptuel	18
Figure 3-4	Représentation du dôme vu de côté. La hauteur du dôme est constante dans la direction y.	18
Figure 3-5	Indice de surface foliaire (LAI) mensuel moyen en janvier entre 2020 et 2024	19
Figure 3-6	Variations annuelles de l'indice de surface foliaire (LAI) utilisé dans le modèle	20
Figure 3-7	Sous-bassin versant représentatif (en rouge) situé dans les tourbières du Congo. ...	20
Figure 3-8	Fluctuations mensuelles des précipitations quotidiennes et de l'évapotranspiration de référence pour la période 1981-2024	21
Figure 3-9	Tendances à long terme des précipitations quotidiennes et de l'évapotranspiration de référence pour la période 1981-2024	22
Figure 3-10	Précipitations annuelles (orange) et évapotranspiration de référence (bleu) avec courbes de tendance linéaires	22
Figure 3-11	Emplacement des stations altimétriques sélectionnées et périodes de couverture des données pendant la période de simulation 2012-2019	26
Figure 3-12	Niveaux d'eau fluctuants utilisés comme limites du modèle	27
Figure 3-13	Comparaison entre les niveaux d'eau obtenus par observation de la Terre et les mesures sur le terrain à Epena	28
Figure 3-14	Séries chronologiques des niveaux de la nappe phréatique le long des transects interfluviaux A) Bondoki, B) Bondzale, C) Ekolongouma et D) Itanga. Les distances par rapport au fleuve situé au début de chaque transect sont indiquées. La série chronologique en noir dans le transect A ne se trouve pas dans une tourbière, mais dans une forêt inondée de façon saisonnière.	29
Figure 3-15	Série chronologique des niveaux de la nappe phréatique le long des transects Lokolama et Ikelemba. Les distances par rapport au fleuve situé au début de chaque transect sont indiquées.	30
Figure 3-16	Profondeur simulée de la nappe phréatique le long d'un transect dans la direction x. Les distances par rapport à la rivière située au début du transect sont indiquées.	30
Figure 3-17	Profondeur et niveau moyens de la nappe phréatique sur toute la longueur de la tranche du dôme.	31
Figure 3-18	Niveaux d'eau à trois endroits donnés dans la zone modélisée, scénario A.1.2 (Baseline_RiverFed_noCC)	33
Figure 3-19	Profondeurs des eaux de surface dans les zones limites du modèle au pic de deux crues fluviales	34
Figure 3-20	Bilan hydrique	35
Figure 4-1	Illustration de la décomposition d'un profil de sol intégré verticalement en matière labile (M1) et récalcitrante (M2) et dégradation oxydique et anoxique en fonction de la profondeur du sol.	39
Figure 4-2	Saturation du sol en fonction de la profondeur dans une cellule centrale du dôme de tourbe pour le modèle de référence alimenté par les précipitations	42
Figure 4-3	Simulation de la dégradation de la tourbe et de la masse de tourbe divisée en 4 catégories, comme indiqué dans la Figure 4-1, masse labile et récalcitrante, puis décomposition oxydique et anoxique. La ligne bleue correspond à la profondeur oxydique.	43
Figure 4-4	Profondeur moyenne de la nappe phréatique et variation du stock de carbone dans le sol sur l'ensemble du domaine modélisé pour le modèle de référence basé sur les	

	précipitations (A.1.1). Une profondeur négative de la nappe phréatique indique que le niveau moyen de l'eau est au-dessus du sol.....	44
Figure 4-5	Profondeur moyenne de la nappe phréatique et variation du stock de carbone dans le sol dans l'ensemble du domaine modélisé pour le modèle de référence basé sur les précipitations (A.1.2). Une profondeur négative de la nappe phréatique indique que le niveau moyen de l'eau est supérieur au niveau du sol.....	44
Figure 5-1	Zone d'intervention (en rouge) et zone environnante (en bleu).....	46
Figure 5-2	Structure du profil du sol pour l'intervention route	47
Figure 5-3	Courbes de rétention de la tourbe normale et de la tourbe comprimée par un lotissement	50
Figure 5-4	Courbes de rétention de la tourbe normale et de la tourbe brûlée par le feu.....	51
Figure 5-5	Variations annuelles de l'indice de surface foliaire (LAI) utilisé dans le modèle – Référence vs palmier à huile.....	52
Figure 5-6	Courbes de rétention de la tourbe normale et de la tourbe drainée.....	53
Figure 5-7	Variations annuelles de l'indice de surface foliaire (LAI) et de la profondeur d'enracinement utilisées dans le modèle – Référence vs Riz	54
Figure 5-8	Variations annuelles du coefficient de rugosité de Manning-Strickler utilisé dans le modèle – Référence vs Riz	54
Figure 5-9	Résumé des cinq scénarios d'émissions qui alimentent le dernier rapport du GIEC AR6.....	55
Figure 5-10	Période de projection et de référence CMIP6 et période de référence du modèle (période de simulation). L'année centrale est indiquée par une ligne pointillée.....	56
Figure 5-11	Facteurs d'échelle du changement climatique pour les précipitations, la température et l'évapotranspiration de référence.....	58
Figure 5-12	Changements prévus en matière de température (en haut) et de précipitations (en bas) et incertitudes associées (Source : Portail de connaissances sur le changement climatique, Banque mondiale).....	59
Figure 5-13	Effets du changement climatique sur les débits dans le bassin du Congo, tirés de Karam, et al., 2023.....	61
Figure 6-1	Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée : scénario B.1.1 (RoadParallel_RainFed_noCC)	66
Figure 6-2	Profil du niveau d'eau dans la direction Y	67
Figure 6-3	Flux annuels moyens de carbone dans le sol – Route (B.1.1) vs scénario de référence (A.1.1).....	68
Figure 6-4	Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée, scénario C.1.1 (RoadParallelDrainage_RainFed_noCC).....	70
Figure 6-5	Variation annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Route drainée (C.1.1) par rapport au scénario de référence (A.1.1).....	70
Figure 6-6	Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée, scénario D.1.1 (Urbanisation_RainFed_noCC).....	72
Figure 6-7	Variation annuelle moyenne du stock de carbone de la tourbe – Lotissement (D.1.1) par rapport au scénario de référence (A.1.1).....	73
Figure 6-8	Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée, scénario E.1.1 (Fire_RainFed_noCC).....	75
Figure 6-9	Variation annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Incendie (E.1.1) vs scénario de référence (A.1.1).....	76
Figure 6-10	Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée, scénario F.1.1 (OilPalm_RainFed_noCC)	78
Figure 6-11	Variation annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Plantation de palmiers à huile (F.1.1) par rapport au scénario de référence (A.1.1)	79
Figure 6-12	Relation empirique entre les émissions de CO ₂ et la profondeur de la nappe phréatique.....	80
Figure 6-13	Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée, scénario G.1.1 (Rice_RainFed_noCC).....	82

Figure 6-14	Variation nette annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Rice (G.1.1) par rapport au scénario de référence (A.1.1).....	83
Figure 7-1	Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée ; scénario B.1.2 (RoadParallel_RiverFed_noCC)	88
Figure 7-2	Variation annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Route alimentée par les rivières (B.1.2) par rapport à la référence alimentée par les rivières (A.1.2).....	89
Figure 7-3	Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée ; scénario C.1.2 (RoadParallelDrainage_RiverFed_noCC)	91
Figure 7-4	Variation annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Route drainée alimenté par des rivières (C.1.2) par rapport au scénario de référence alimenté par des rivières (A.1.2).....	92
Figure 7-5	Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée ; scénario D.1.2 (Urbanisation_RiverFed_noCC).....	94
Figure 7-6	Variation annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Lotissement (D.1.2) par rapport au scénario de référence (A.1.2).....	95
Figure 7-7	Niveaux d'eau à six endroits donnés près de la limite ouest ; scénario E.1.2 (Fire_RiverFed_noCC).....	97
Figure 7-8	Variation annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Incendie (E.1.2) par rapport au scénario de référence (A.1.2).....	98
Figure 7-9	Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée ; scénario F.1.2 (OilPalm_RiverFed_noCC)	100
Figure 7-10	Variation nette annuelle moyenne du carbone dans le sol – Plantation de palmiers à huile (F.1.2) par rapport au scénario de référence (A.1.2)	101
Figure 7-11	Niveaux d'eau à six endroits donnés dans la zone modélisée ; scénario G.1.2 (Rice_RiverFed_noCC).....	103
Figure 7-12	Variation nette annuelle moyenne du stock de carbone dans le sol – Riz (G.1.2) par rapport au scénario de référence (A.1.2).....	104
Figure 8-1	Niveaux d'eau au centre de la tourbière et près de la limite ouest.....	107
Figure 8-2	Variation nette moyenne annuelle du stock de carbone dans le sol – Scénario de référence SSP1-2.6 à dominance pluviale (A.2.1) - Scénario de référence SSP3-7.0 à dominance pluviale (A.3.1) - Scénario de référence à dominance pluviale (A.1.1) ...	108
Figure 8-3	Niveaux d'eau au centre de la tourbière et près de la limite ouest.....	109
Figure 8-4	Émissions nettes moyennes annuelles de CO ₂ – Scénario de référence SSP1-2.6 à dominance fluviale (A.2.2) - Scénario de référence SSP3-7.0 à dominance fluviale (A.3.2) - Scénario de référence à dominance fluviale (A.1.2)	110

Tableaux

Tableau 0-1	Interventions de développement généralisées	3
Tableau 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
Tableau 0-6	Résultats des scénarios de développement dans le climat actuel des tourbières alimentées par des cours d'eau fluviales	6
Tableau 3-1	Paramètres décrivant les propriétés du sol utilisés dans la configuration du modèle.	23
Tableau 3-2	Propriétés physiques de la zone saturée.....	24
Tableau 3-3	Paramètres calibrés	36
Tableau 4-1	Paramètres d'entrée pour le modèle de biodégradation.	40
Table 5-1	Propriétés hydrauliques des horizons du sol dans les zones non saturées et saturées.	47

Table 5-2	Propriétés hydrauliques de la tourbe compressée dans les zones non saturées et saturées.....	49
Table 5-3	Propriétés hydrauliques de la tourbe brûlée dans les zones non saturées et saturées.....	51
Table 5-4	Propriétés hydrauliques de la tourbe drainée dans les zones non saturées et saturées.....	52

12 Abréviations

AWD :	Alternance humidification-dessiccation
BRF :	Cadre de règles métier
CORDEX :	Expérience coordonnée de réduction d'échelle régionale
DAHITI :	Base de données pour les séries chronologiques hydrologiques des eaux intérieures
RDC :	République démocratique du Congo
ECMWF :	Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme
ET :	Évapotranspiration
MCG :	Modèle climatique global
SIG :	Système d'information géographique
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
MAE :	Erreur absolue moyenne
MODIS :	Spectroradiomètre imageur à résolution modérée
OCIV :	Observatoire congolais des inondations et de la vulnérabilité
OL :	Écoulement de surface
PDF :	Fonction de densité de probabilité
PSEAU :	Programme Solidarité Eau
RCP :	Trajectoire de concentration représentative
SSP :	Trajectoire socio-économique partagée
PNUE :	Programme des Nations Unies pour l'environnement

13 Références

- /1/ Aloysius, N., & Saiers, J. (2017). Réponse hydrologique simulée aux changements prévus en matière de précipitations et de température dans le bassin du fleuve Congo. *Hydrologie et sciences du système terrestre*, 21(8), 4115-4130.
- /2/ Apers, M. E., Crezee, B., Dargie, G. C., Sjögersten, S., Bocko, Y. E., Ewango, C. E. N., ... & Lawson, I. T. (2022). Hydrologie des tourbières du centre du Congo : dynamique saisonnière et influence sur le cycle du carbone. *Environmental Research Letters*, 17(6), 064028. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6e57>
- /3/ Awal, M. A., & Wan Ishak, W. I. (2008). *Mesure de l'indice de surface foliaire (LAI) du palmier à huile par la méthode manuelle et la méthode LAI-2000*. Asian Journal of Scientific Research, 1(1), 49–56. <https://doi.org/10.3923/ajsr.2008.49.56> scialert.net
- /4/ Cook, K. H., Liu, Y., & Vizzy, E. K. (2020). Assèchement du bassin du Congo associé au déplacement vers les pôles des dépressions thermiques africaines. *Climate Dynamics*, 54(1–2), 863–883. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05033-3>
- /5/ Crezee, B., Dargie, G. C., Ewango, C. E. N., Mitchard, E. T. A., Emba B., O., Kanyama T., J., Bola, P., Ndjango, J.-B. N., Girkin, N. T., Bocko, Y. E., Ifo, S. A., Hubau, W., Seidensticker, D., Batumike, R., Imani, G., Cuní-Sanchez, A., Kiahtipes, C. A., Lebamba, J., Wotzka, H.-P., Bean, H., Baker, T. R., Baird, A. J., Boom, A., Morris, P. J., Page, S. E., Lawson, I. T., Lewis, S. L., 2022. *Cartographie de l'épaisseur de la tourbe et des stocks de carbone du bassin central du Congo à l'aide de données de terrain*. Nature Geoscience 15, 639-644. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00966-7>.
- /6/ Dargie, G. C. (2015). *Quantification et compréhension des tourbières tropicales du bassin central du Congo* (thèse de doctorat, Université de Leeds).
- /7/ Dargie, G. C., Lewis, S. L., Lawson, I. T., Mitchard, E. T., Page, S. E., Bocko, Y. E., & Ifo, S. A. (2017). Âge, étendue et stockage de carbone du complexe de tourbières du bassin central du Congo. *Nature*, 542(7639), 86-90.
- /8/ Evans, C. D., Williamson, J. M., Kacaribu, F., Irawan, D., Suardiwerianto, Y., Hidayat, M. F., ... & Page, S. E. (2019). Taux et variabilité spatiale de l'affaissement des tourbières dans les plantations d'acacias et les paysages forestiers de Sumatra, en Indonésie. *Geoderma*, 338, 410-421.
- /9/ Cluster Sécurité alimentaire. (2 mai 2024). *Annexes – Lignes directrices du Cluster Sécurité alimentaire* [fichier PDF]. Cluster Sécurité alimentaire, République démocratique du Congo. FSCluster.org. Extrait de FSCluster.org
- /10/ Ginting, E. N., Darlan, N. H., & Winarna. (2016). Gestion efficace de l'eau pour les palmiers à huile dans les tourbières : pour la conservation des tourbières et l'optimisation des rendements. Dans *15e Congrès international sur les tourbières* (Vol. 2016, pp. 497-501).
- /11/ Gorham, E. (1991). Tourbières nordiques : rôle dans le cycle du carbone et réponses probables au réchauffement climatique. *Applications écologiques*, 1(2), 182–195. <https://doi.org/10.2307/1941811>
- /12/ Hirano, T., Sundari, S., & Yamada, H. (2012). Bilan CO₂ des écosystèmes tourbeux tropicaux. Dans *Écosystèmes tourbeux tropicaux* (pp. 329-337). Springer. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55681-7_21 link.springer.com
- /13/ Hooijer, A., Silvius, M., Wösten, H., & Page, S. (2006). PEAT-CO₂. Évaluation des émissions de CO₂ provenant des tourbières drainées en Asie du Sud-Est.
- /14/ Hooijer, A., Page, S., Canadell, J. G., Silvius, M., Kwadijk, J., Wösten, H., & Jauhiainen, J. (2010). Émissions actuelles et futures de CO₂ provenant des tourbières drainées en Asie du Sud-Est. *Biogeosciences*, 7(5), 1505–1514. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1505-2010>

- /15/Hooijer, A., Page, S., Jauhiainen, J., Lee, W. A., Lu, X. X., Idris, A., & Anshari, G. (2012). Affaissement et perte de carbone dans les tourbières tropicales drainées. *Biogeosciences*, 9(3), 1053-1071.
- /16/Jelusic, N. (2005). Propriétés géotechniques de la tourbe stabilisée. Dans *Actes de la 16e Conférence internationale sur la mécanique des sols et le génie géotechnique* (pp. 1203-1206). IOS Press.
- /17/Karam, S., Zango, B. S., Seidou, O., Perera, D., Nagabhatla, N., & Tshimanga, R. M. (2023). Impacts du changement climatique sur les régimes hydrologiques dans le bassin du fleuve Congo. *Sustainability*, 15(7), 6066.
- /18/Kurnianto, S., Warren, M., Talbot, J., Kauffman, B., Murdiyarso, D., & Frolking, S. (2015). Accumulation de carbone dans les tourbières tropicales au cours des millénaires : une approche de modélisation. *Global change biology*, 21(1), 431-444.
- /19/Lampela, M., Jauhiainen, J., Kämäri, I., Koskinen, M., Tanhuanpää, T., Valkeapää, A., & Vasander, H. (2016). Microtopographie de la surface du sol et modèles de végétation dans une forêt tropicale marécageuse tourbeuse. *Catena*, 139, 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.12.016>
- /20/Lampela, M., Jauhiainen, J., Sarkkola, S., & Vasander, H. (2017). Espèces d'arbres indigènes prometteuses pour le reboisement des tourbières tropicales dégradées. *Forest Ecology and Management*, 394, 52-63.
- /21/Li, W., O'Kelly, B. C., Yang, M., & Fang, K. (2020). Compressibility behaviour and properties of peaty soils from Dian-Chi Lake area, China. *Engineering Geology*, 277, 105778.
- /22/Liu, H., Price, J., Rezanezhad, F., & Lennartz, B. (2020). Changements à l'échelle centenaire des propriétés hydrophysiques de la tourbe induits par le drainage. *Water Resources Research*, 56(10), e2020WR027538.
- /23/Mahajan, G., Timsina, J., Jhanji, S., Sekhon, N. K., & Kuldeep-Singh. (2012). Réponse des cultivars, répartition de la matière sèche et efficacité de l'utilisation de l'azote dans le riz semé directement à sec dans le nord-ouest de l'Inde. *Journal of Crop Improvement*, 26(6), 767-790.
- /24/Mander, Ü., Pärn, J., Espenberg, M., Soosaar, K., Ndolo Ebika, S., Bouka Dipelet, G., Kuusemets, L., Mander, S., Khanongnuch, R., Kanger, K., Brugière, D., & Loumeto, J. (27 avril-2 mai 2025). *Flux de gaz à effet de serre et microbiome dans une forêt tourbeuse et une savane tourbeuse à Epena, République du Congo* [Résumé EGU25-7308, Assemblée générale de l'EGU]. Réunions Copernicus. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-7308>
- /25/Mayengo, A., Macaire, J., & van Assche, A. (2005). *Guide pratique pour une exploitation agricole située à Kinshasa et sa périphérie*. OCIV–Entreprendre Cedita. Extrait du site web du PSEAU
- /26/McCalmont, J., Kho, L. K., Teh, Y. A., Lewis, K., Chocholek, M., Rumpang, E., & Hill, T. (2021). Émissions de carbone à court et à long terme provenant des plantations de palmiers à huile converties à partir de forêts tropicales marécageuses exploitées. *Global Change Biology*, 27(11), 2361-2376.
- /27/Moore, S., Adu-Bredu, S., Duah-Gyamfi, A., Addo-Danso, S. D., Ibrahim, F., Mbou, A. T., ... & Malhi, Y. (2018). Biomasse forestière, productivité et cycle du carbone le long d'un gradient de précipitations en Afrique de l'Ouest. *Global change biology*, 24(2), e496-e510.
- /28/Page, S. E., Rieley, J. O., & Banks, C. J. (2011). Importance mondiale et régionale du réservoir de carbone des tourbières tropicales. *Global Change Biology*, 17(2), 798–818. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02279.x>
- /29/Prabhakar, M., Gopinath, K. A., Ravi Kumar, N., Thirupathi, M., Sai Sravan, U., Srasvan Kumar, G., ... & Singh, V. K. (2024). Cartographie de l'indice de surface foliaire à différents stades de

croissance du riz dans le sud de l'Inde à l'aide de la télédétection hyperspectrale aéroportée. *Télédétection*, 16(6), 954.

- /30/Ribeiro, K., Pacheco, F. S., Ferreira, J. W., de Sousa-Neto, E. R., Hastie, A., Krieger Filho, G. C., ... & Ometto, J. P. (2021). Les tourbières tropicales et leur contribution au cycle mondial du carbone et au changement climatique. *Biologie du changement global*, 27(3), 489-505.
- /31/Rieley, J. O., Wüst, R. A. J., Jauhiainen, J., Page, S. E., Wösten, H., Hooijer, A., ... & Stahlhut, M. (2008). Tourbières tropicales : stocks de carbone, émissions de gaz carbonique et contribution aux processus de changement climatique. *Tourbières et changement climatique. Calgary : Peat Society*, 44-70.
- /32/Rusli, N., & Majid, M. R. (février 2014). Surveillance et cartographie de l'indice de surface foliaire du caoutchouc et du palmier à huile dans un petit bassin versant. Dans *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 18, n° 1, p. 012036). IOP Publishing.
- /33/Samejima, H., & Tsunematsu, H. (2016). Variation génotypique des variétés de riz sélectionnées pour leur enracinement profond dans des conditions de terrain en Afrique de l'Ouest. *Plant Production Science*, 19(1), 181-192.
- /34/Safitri, L., Suryanti, S., Kautsar, V., Kurniawan, A., & Santiabudi, F. (mars 2018). Étude de l'architecture racinaire du palmier à huile en fonction du stade de croissance et du type de sol vulnérable à la sécheresse. Dans *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 141, p. 012031). IOP Publishing.
- /35/Schwatke, C., Dettmering, D., Bosch, W., & Seitz, F. (2015). DAHITI – une approche innovante pour estimer les séries chronologiques du niveau d'eau des eaux intérieures à l'aide de l'altimétrie satellitaire multi-missions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10), 4345-4364.
- /36/Sinclair, A. L., Graham, L. L., Putra, E. I., Saharjo, B. H., Applegate, G., Grover, S. P., & Cochrane, M. A. (2020). Effets de la distance par rapport au canal et de l'historique de dégradation sur la densité apparente de la tourbe dans une tourbière tropicale dégradée. *Science of the Total Environment*, 699, 134199.
- /37/Sonwa, D. J., Oumarou Farikou, M., Martial, G., & Félix, F. L. (2020). Vivre sous un climat fluctuant et dans un bassin du Congo en voie d'assèchement. *Sustainability*, 12(7), 2936. <https://doi.org/10.3390/su12072936>
- /38/Surahman, A., Soni, P., & Shivakoti, G. P. (2018). Les systèmes agricoles des tourbières sont-ils durables ? Étude de cas sur l'évaluation des systèmes agricoles existants dans les tourbières du Kalimantan central, en Indonésie. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 15(1), 1-19.
- /39/Tshimanga, R. M., & Hughes, D. A. (2012). Changement climatique et impacts sur l'hydrologie du bassin du Congo : le cas des sous-bassins nord des fleuves Oubangui et Sangha. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 50, 72-83.