



REPUBLIQUE DU CONGO

NIVEAU D'EMISSIONS DE REFERENCE POUR LES FORETS (NERF) DE LA REPUBLIQUE DU CONGO

Juin 2024



Organisation des Nations Unies
pour l'alimentation
et l'agriculture

Table des matières

Liste des Figures	ii
Liste des Tableaux.....	ii
Liste des Equations.....	iii
Acronymes et abréviations	iv
Résumé.....	ix
Introduction.....	1
I. Rappel du contexte national dans lequel se met en place le NERF.....	3
II. Structuration du NERF de la République du Congo.....	6
II.1. Définition nationale de la forêt en République du Congo.....	6
II.2. Définition nationale de la déforestation	6
II.3. Définition nationale de la dégradation	6
II.4. Période de référence du NERF	7
II.5. Échelle du NERF	7
II.6. Portée du NERF	7
II.6.1. Activités à prendre en compte	7
II.6.2. Réservoirs à prendre en compte	8
II.6.3. Gaz à prendre en compte	8
III. Approche méthodologique appliquée pour estimer les émissions et absorptions	9
III.1. Méthodologie de production des données d'activités	9
III.2. Facteurs d'émission et autres paramètres	14
III.2.1. Facteurs d'émission de la déforestation et dégradation forestière	14
III.3. Incertitudes des facteurs d'émission de l'IFN	16
III.4. Incertitudes des données d'Activités	18
III.5. Equations.....	19
III.5.1 Émissions de CO ₂ dues à la déforestation et à la dégradation forestière	19
III.5.2 Émissions des gaz non-CO ₂ dues à la déforestation et à la dégradation forestière	20
III.6. Évaluation des incertitudes	21
III.7. Méthodologie de calcul de l'Ajustement des émissions liées à la déforestation et la dégradation forestière	22
IV. Présentation des résultats	23

IV.1. Présentation des résultats des Données d'Activités.....	23
IV.1.1. Données d'Activités de la Déforestation	23
IV.1.2. Données d'Activités de la Dégradation	24
IV.2 Présentation des résultats des émissions.....	24
IV.2.1 Émissions de gaz CO ₂ et non-CO ₂ dues à la déforestation, par réservoir	24
IV.2.2 Émissions de gaz CO ₂ et non-CO ₂ dues à la dégradation forestière, par réservoir	25
IV.2.3. Émissions totales de gaz CO ₂ et non-CO ₂ dues à la déforestation et à la dégradation forestière.....	26
IV.3. Résultat de l'ajustement des émissions liées à la déforestation et la dégradation forestière pour la période 2022-2026.....	27
V- Le NERF REVISE	28
VI. Améliorations à partir du premier NERF	29
VII. Domaines d'améliorations futures.....	30
Conclusion.....	31
Références Bibliographiques	32
Annexes	36
Annexe 1 : Classes d'Occupation des sols du GIEC	37
Annexe 2 : Déroulement des étapes de travail pour la production des données d'activités via l'approche eSBAE.	i
Annexe 3 : Harmonisation de la classification nationale avec les classes du GIEC....	viii

Liste des Figures

Figure 1: Carte d'occupation du sol	4
Figure 2: Carte de la Répartition géographique de 5716 échantillons	11
Figure 3: Formulaire et différentes images intégrées dans le système de réponse de Collect Earth on Line (CEO)	13

Liste des Tableaux

Tableau I: Synthèse de la portée du NERF en termes d'activités, gaz et réservoirs.	8
Tableau II: Stratification des classes nationales	12
Tableau III: Facteurs d'émission pour déforestation et dégradation [tCO ₂ /ha]	14
Tableau IV: Facteurs d'émission et autres paramètres utilisés dans l'estimation du changement du stock de carbone dans les sols minéraux due à la déforestation.	15

Tableau V: Facteurs d'émission et autres paramètres utilisés dans l'estimation des émissions des gaz non-CO ₂ due aux feux de forêts associés à la déforestation.	16
Tableau VI: Superficies de déforestation par type de forêt en 2016 et occupation du sol finale en 2022.....	23
Tableau VII: Superficies de dégradation forestière par type de forêt en 2016 et type de forêt en 2022.	24
Tableau VIII: Émissions de gaz CO ₂ et non-CO ₂ due à la déforestation, par réservoir.	25
Tableau IX: Émissions de gaz CO ₂ et non-CO ₂ dues à la dégradation forestière, par réservoir.	26
Tableau X: Émissions de gaz CO ₂ et non-CO ₂ due à la déforestation et à la dégradation forestière, par réservoir	27
Tableau XI: Stocks de carbone forestier disponible en 2022.....	27
Tableau XII: Synthèse des résultats des émissions historiques 2016 - 2021	29
Tableau XIII: Synthèse des résultats des émissions historiques et ajustées.....	29

Liste des Equations

Équation 1: Changement du stock de carbone par en tant que la somme des changements par réservoir.....	19
Équation 2 : Émissions de CO ₂ dues aux variations des stocks de carbone dans la biomasse et matière organique morte dues à la déforestation et à la dégradation forestière.	19
Équation 3: Variation annuelle des stocks de carbone dans les sols minéraux due à la déforestation.....	20
Équation 4: Émissions de gaz à effet de serre dues aux feux associés à la déforestation.....	21
Équation 5: Combinaison des incertitudes dans le cas d'une multiplication (Équation 3.2B, GIEC, 2019).	21
Équation 6: Combinaison des incertitudes dans le cas d'une addition ou soustraction (Équation 3.2, GIEC, 2019).	21

Acronymes et abréviations

AFAT	: Agriculture Forêt et Autres Utilisations de Terres
CAFI	: Initiative des Forêts d'Afrique Centrale
CDN	: Contribution Déterminée Nationale
CCNUCC	: Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CNIAF	: Centre national d'inventaire et d'aménagement des ressources forestières et fauniques
CNSE	: Centre National de la Statistique et des Études Économiques
CN-REDD	: Coordination Nationale REDD
COP/CP	: Conférence Of Parties (Conférence des Parties)
CPDN	: Contribution Prévues Déterminées au niveau National
eSBAE	: Ensemble Sample-Based Area Estimation
ERPD	: Document de Programme de Réduction des Emissions (Fonds Carbone)
ER-PIN	: Emission Reduction Programme Idea Note
FCPF	: Fonds de Partenariat pour le Carbone Forestier
FRA	: Évaluation des ressources forestières mondiales
FVC	: Fond Vert Climat
FSC	: Forest Stewardship Council
GES	: Gaz à Effet de Serre
GIEC	: Groupe Inter-gouvernemental sur l'Evolution du Climat
GFC	: Global Forest Change
GFOI	: Global Forest Observations Initiative
Ha	: Hectare
HFLD	: High Forest Cover Low Deforestation (Couverture forestière élevée et faible taux de déforestation)
IFN	: Inventaire Forestier National
MNV	: Mesure, Notification et Vérification
NERF	: Niveau des Emissions de Référence des Forêts
NRF	: Niveau de Référence des Forêts
PIB	: Produit intérieur brut
PND	: Plan national de développement
RDC	: République Démocratique du Congo
PNUE	: Programme des Nations Unies pour l'Environnement
RGPH	: Recensement Général de la Population et de l'Habitation du Congo
REDD +	: Réduction des Emissions liées à la Déforestation et à la Dégénération des forêts avec Inclusion de la gestion durable des forêts, de la conservation de la biodiversité et de l'accroissement des stocks de carbone forestier.
R-PP	: Plan de Préparation à la REDD+

SPC	: Sous-placette circulaire
SPR	: Sous-placette rectangulaire
SYNA-MNV	: Système National de Mesure, de Notification et Vérification
SNSF	: Système National de Surveillance des Forêts
SUT	: Sections d'utilisation des terres
UE	: Unité d'échantillonnage
UFA	: Unité Forestière d'Aménagement
UTCAF	: Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres et Foresterie
UFE	: Unité Forestière d'Exploitation
UMC	: Unité Minimale de Cartographie
WELD	: World Enabled Landsat Dataset

Personnes de contact au niveau national

Nom et prénoms	Fonctions	Email
Rosalie MATONDO	Ministre de l'Economie Forestière	rosalie_mat@yahoo.fr
Pierre TATY	Directeur de Cabinet MEF	Pierretaty2020@gmail.com
Jean de Dieu NZILA	Secrétariat permanent de la Coordination pour la mise en œuvre de la lettre d'Intention valant accord de partenariat entre la République du Congo et CAFI	jeandedieu.nzila@umng.cg
Carine Saturnine MILANDOU	Directrice du CNIAF	carinesat@yahoo.fr
Dabney MATOKO KOUEDIATOUKA	Coordonnateur National du Projet SYNA-MNV	matokodabney@gmail.com
Amelie ARQUERO	Conseillère technique Principale du Projet SYNA-MNV	amelie.arquero@fao.org
Arnaud KIESSE KIBINZA	Responsable programme RE - Sangha Likouala	arnaudkiesse@gmail.com
Florantine Mapeine	Point Focal CCNUCC	florantinf2bc@gmail.com

Equipe de rédaction

Nom et prénoms	Fonctions	Email
Equipe Nationale		
Carine Saturnine MILANDOU	Directrice du CNIAF	carinesat@yahoo.fr
Dabney MATOKO KOUEDIATOUKA	Coordonnateur National du Projet SYNA-MNV	matokodabney@gmail.com
Jean Blaise Samuel MPONGUI	Chef de Service Cartographie et Photo-Interprétation du CNIAF	Jeanblaise.hugo@gmail.com
Daglish Questron KOMBO	Collaborateur à la Cellule MNV du CNIAF	daglish.kombo2022@gmail.com
Lisa Francine LOUVOUANDOU	Collaboratrice à la Cellule MNV du CNIAF	francinelouv@gmail.com
Tiriel LOKOKA NGOMA	Collaboratrice à la Cellule MNV du CNIAF	lytinalo94@gmail.com
Ersilia BATSA LAHOU	Collaboratrice à la Cellule MNV du CNIAF	ersibat@gmail.com
Jacquie GAKOSSO-GALA	Collaboratrice à la Cellule MNV du CNIAF	jacquiegala@gmail.com
Larissa NDANDOU	Collaboratrice à la Cellule MNV du CNIAF	ndandoularissa7@gmail.com
NGASSAKI OKA	Collaborateur à la Cellule Recherche et Développement au CNIAF	oka.ngassaki@gmail.com
Georges Claver BOUNDZANGA	Conseiller de Direction Générale de la société forestière IFO (secteur privé)	Bouzgegereddd@gmail.com

Nom et prénoms	Fonctions	Email
Suspense Averti IFO	Enseignant chercheur, Université Marien- Ngoubi	averti.ifosuspens@umng.cg
Equipe de la FAO		
Rémi D'ANNUNZIO	Officier Forestier - FAO	remi.dannunzio@fao.org
Amélie ARQUERO	Conseillère Technique Principale (CTA) SYNA – MNV	amelie.arquero@fao.org
Flora MARTINS	Consultante MRV SYNA-MNV	flora.martins@fao.org
Karel MENGUE ZOLA	Consultant Télédétection SYNA- MNV	rodann.menguezola@fao.org

Résumé

Le processus REDD+ de la République du Congo, lancé officiellement par le Gouvernement en Janvier 2010, a permis au pays d'élaborer ses outils techniques et stratégiques de la REDD+, et de soumettre en 2016 le premier niveau d'Emissions de Référence des Forêts (NERF), Ceci a placé le Congo comme le premier pays africain à soumettre son NERF à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC).

Cette soumission a permis au pays de bénéficier de financement pour la mise en œuvre de certains projets de réduction des émissions et d'accroissement de stock de carbone, par la Banque Mondiale, le Fond Vert Climat (FVC) et l'Initiative des Forêts d'Afrique Centrale (CAFI).

Ce document présente le Niveau d'Émissions de Référence pour les Forêts (NERF) révisé de la République du Congo pour la REDD+, pour la période de 2016 et 2021, avec une convention de date au 31 décembre.

Ce NERF national comprend les activités de la REDD+ qui occasionnent la déforestation, la dégradation forestière.

Les réservoirs inclus sont la biomasse aérienne, la biomasse souterraine et la biomasse du bois mort, la litière et le carbone organique du sol.

Les gaz inclus sont le **CO₂**, le **CH₄** et le **N₂O**. Les deux derniers, non-CO₂, sont ceux associés aux feux identifiés dans le processus de déforestation et dégradation forestière.

Le NERF révisé, construit sur la base des données historiques et ajustées suivant les circonstances nationales du pays, est estimé à **31 656 549 t CO₂ eq/an ± 9 655 247 (soit 30,5%)**, réparti comme suit :

- Emissions Historiques (57%) : **17 894 446 ± 6 406 211 (soit 35,8%) tCO₂ eq/an**
- Ajustement (43%) : **13 762 103 ± 7 238 866 (soit 52,6%) tCO₂ eq/an**

Le NERF initial de la République du Congo, approuvé par la CCNUCC en 2017 était estimé à **35 475 652 t CO₂ eq/an** réparti comme suit :

- Emissions Historiques : **19.208.572 t CO₂ eq/an soit 54,15%**
- Ajustement : **16.267.080 t CO₂ eq/an soit 45,85%**

La superficie forêt suivant les données de stratification est estimée à **23 419 764** hectares (± 1 123 446 ha, soit ± 4,8%).

Introduction

La République du Congo qui poursuit sans relâche son engagement à faire valoir ses performances dans le cadre du processus REDD+, avait décidé, sur une base volontaire, de présenter son premier Niveau d'Émission de Référence pour les Forêts (NERF) en 2016. Ce qui a fait de la République du Congo, le premier pays africain à soumettre auprès de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) le NERF. Le pays avait ainsi répondu à l'invitation exprimée dans la décision 12/CP.17, paragraphe 13.

Le pays a été à l'avant-garde du plaidoyer pour un programme de réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts dans les pays en développement (REDD+). Ces cinq dernières années, le pays a continué de marquer son engagement dans la préservation des forêts et dans la lutte contre le changement climatique. À cet effet, depuis 2017, le pays dispose d'une stratégie nationale REDD+, et les forêts sont un élément clé de sa première Contribution Déterminée Nationale (CDN de 2017) avec la vision que « le potentiel de séquestration de la forêt est maintenu et renforcé à la fois par une meilleure gestion et le reboisement ». Cet engagement s'est poursuivi en 2018 avec la déclaration de Brazzaville et l'importance reconnue des tourbières dans la lutte contre le changement climatique.

En 2019, la République du Congo et le CAFI ont signé une Lettre d'intention dans laquelle le pays s'engage notamment à maintenir la conversion des forêts en dessous de 20 000 hectares par an. L'accord prévoit notamment, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, en particulier celles du secteur « utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (UTCATF) » sur la base d'une soumission révisée du niveau d'émission de référence des forêts.

Cette lettre d'intention a permis le financement, puis le développement de projets au niveau national, dont le projet d'Opérationnalisation du Système National de Mesure, de Notification et de Vérification (SYNA-MNV) mis en œuvre par le Centre National D'inventaire et d'aménagement des Ressources Forestières et Fauniques (CNI AF), structure sous tutelle du Ministère de l'Economie Forestière en partenariat avec la FAO et la collaboration du Ministère de l'Environnement, du Développement Durable et du Bassin du Congo.

Le SYNA-MNV a pour ambition de permettre à la République du Congo de mettre à jour l'ensemble de données d'activités qui permettront de quantifier les émissions des Gaz

à Effet de Serre (GES) dans le secteur Agriculture, Forêt et Autres Utilisations de Terres (AFAT) et ainsi d'appuyer la mise en œuvre de la Communication Nationale (CN), de la CDN et la publication du rapport biennal, afin de rendre le pays éligible aux paiements basés sur résultats, dans le cadre des différents mécanismes de finance climatique auxquels il peut prétendre.

En mars 2021, le Fond Vert Climat (FVC) a approuvé un projet de mise en œuvre REDD + (29 MUSD), axé sur l'agroforesterie pour l'approvisionnement en bois-énergie dans le sud du pays. En avril de la même année, le Congo a signé avec le Fonds carbone FCPF de la Banque mondiale un accord de paiement pour la réduction des émissions (ERPA) pour une période de 5 ans (2020-2024) : le programme de réduction des émissions Sangha Likouala.

Par conséquent, la soumission révisée du NERF témoigne d'une volonté nationale solide de poursuivre les engagements du pays en faveur du processus REDD+ initié depuis 2008 dont les avancées significatives des outils stratégiques et techniques ont été notifiées dans la Lettre d'Intention. Cette soumission révisée s'inscrit également dans un contexte d'investissement stimulants en faveur de la gestion durable des écosystèmes forestiers et du rôle de la République du Congo dans la lutte contre le changement climatique.

Dans la construction de son ancien NERF et du nouveau NERF révisé, la République du Congo a suivi les lignes directrices fournies par la CCNUCC à travers les décisions prises lors des Conférences des Parties (COP). Il s'agit, notamment des Modalités d'établissement des niveaux d'émission de référence pour les forêts et des niveaux de référence pour les forêts dans la décision 12/CP.17, les directives sur les niveaux d'émission dans l'annexe de la décision 12/CP.17, les « Recommandations en matière de bonnes pratiques pour l'utilisation des terres, les changements d'affectation des terres et la foresterie (GPG-LULUCF) » (GIEC 2003) et « les lignes directrices pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre » (GIEC 2006) et « les lignes directrices pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre » (GIEC 2019). De plus, la République du Congo a suivi les principes directeurs de l'Initiative Globale pour l'Observation des Forêts (GFOI 2013).

I. Rappel du contexte national dans lequel se met en place le NERF

La République du Congo, à cheval sur l'équateur et au cœur du deuxième massif forestier mondial, s'étend sur 342.000 km².

C'est un pays à forte couverture forestière (**23 419 764** millions d'hectares de forêts, représentant 69% du territoire national) et faible taux de déforestation avec seulement 0,10% par an, soit **24 189 ± 3 677 hectares/an** selon les résultats du présent NERF. La situation du couvert forestier, qui n'est pas uniforme sur l'ensemble du pays, varie en fonction de la densité de la population, de la qualité des infrastructures de transport, de la richesse des forêts, de l'historique de leur exploitation et de l'existence de zones urbaines.

Le pays jouit d'un climat tropical humide et d'un relief généralement peu accidenté. Il est limité :

- Au Nord par la République centrafricaine avec 467 km de frontière ;
- Au Nord-Ouest par le Cameroun, avec 523 km de frontière ;
- A l'Ouest par le Gabon, avec 1903 km de frontière ;
- Au Sud par l'Angola et l'enclave du Cabinda, avec 201 km de frontière ;
- Au Sud-Ouest par l'Océan Atlantique, avec 170 km de frontière ;
- A l'Est par la RDC, avec 2410 km de frontière).

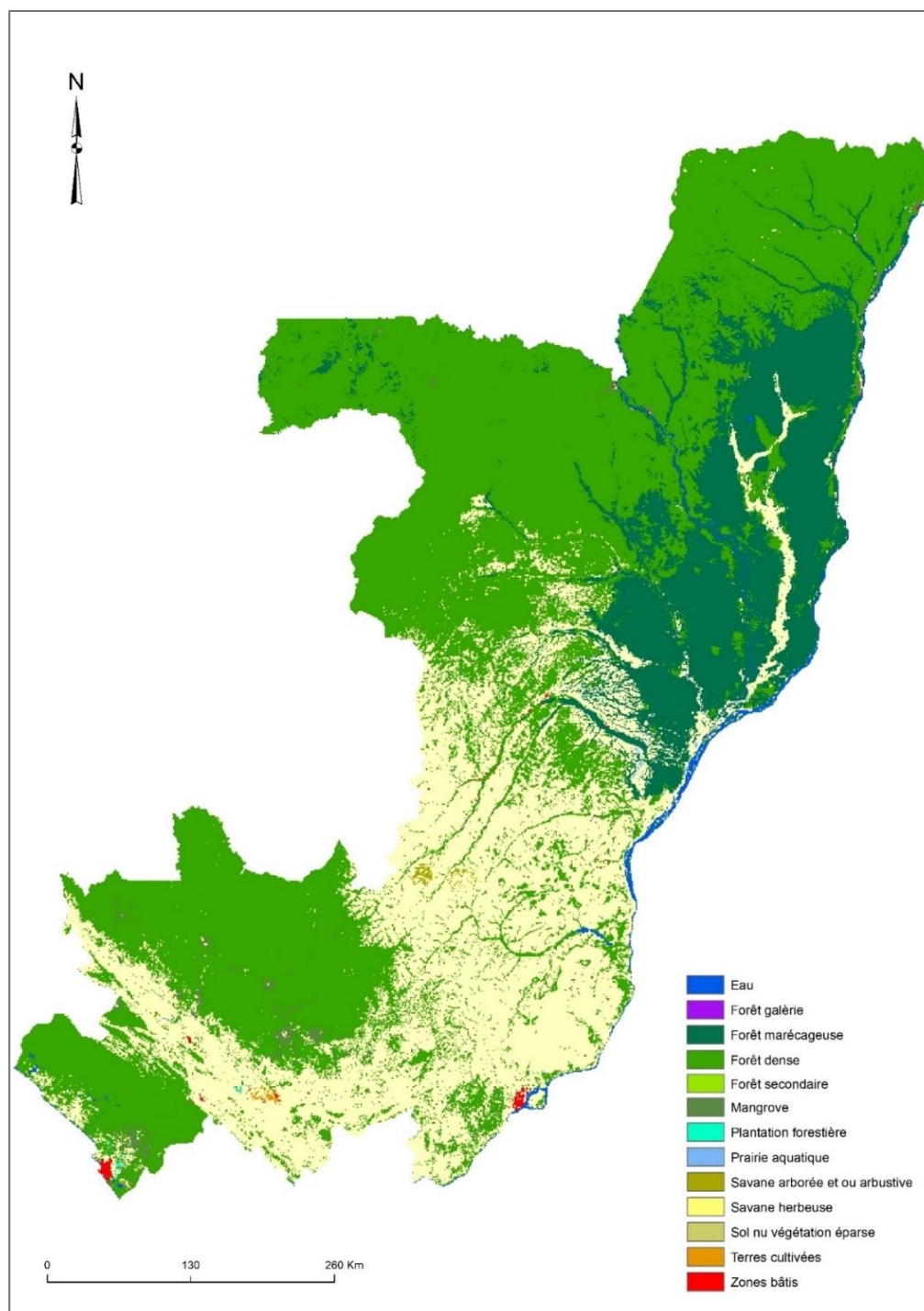


Figure 1: Carte d'occupation du sol

Selon le dernier recensement général de la population et habitat (RGPH) de 2023, la population congolaise est de 6 142 180 millions d'habitants. (RGPH, 2023).

Plus de 60% de la population habitent dans les cinq principales villes (Brazzaville, Pointe-Noire, Dolisie, Nkayi et Ouessou). La plus grande partie de la population dépend toujours des forêts pour ses besoins vitaux (alimentation, énergie, pharmacopée, etc.).

L'économie congolaise est principalement basée sur l'exploitation des ressources naturelles, notamment le pétrole et le bois, qui contribuent à près de 70% du PIB. L'agriculture, qui occupe 40% de la population active, ne contribue encore que pour 5 % au PIB.

Les principales causes directes de la déforestation et de la dégradation des ressources forestières congolaises par ordre d'importance décroissant sont : (i) la pratique non durable de l'agriculture itinérante sur brûlis, (ii) la production et la consommation non durables de bois énergie, (iii) l'exploitation forestière et minière non durable et/ou illégale et (iv) le développement urbain. Ces causes directes sont aggravées par de nombreux facteurs sous-jacents dont, parmi d'autres, l'absence d'une vision commune de l'aménagement du territoire discutée et validée par toutes les parties prenantes, la pauvreté des populations rurales, l'augmentation démographique, l'absence de sources d'énergies alternatives adaptées aux faibles revenus des populations, la production et l'utilisation inefficaces du charbon de bois, les faiblesses de la gouvernance forestière exercée par l'Etat.

Pour pallier à cette déforestation et dégradation des forêts, le Congo s'est investi dans l'aménagement et la certification de ses forêts de telle sorte qu'il est devenu un modèle en la matière. Actuellement, seize (16) concessions forestières¹ couvrant 3 467 379 hectares, sont en cours d'aménagement et vingt-deux (22) d'entre elles, d'une superficie d'environ 8 565 850 millions d'hectares, soit 58% de la superficie totale attribuée à la forêt de production, disposent déjà d'un plan d'aménagement.

L'engagement du pays à la gestion forestière durable, se consolide par un ambitieux programme de certification forestière, avec à ce jour neuf (9), dont 5 concessions forestières certifiées Forest Stewardship Council (FSC), 3 concessions OLB et une concession Legal Source.

¹ Superficie affectée à un concessionnaire pour l'exploitation industrielle du bois

II. Structuration du NERF de la République du Congo

Le Niveau des Emissions de Référence pour les Forêts (NERF), est organisé autour de l'estimation des émissions de la période de référence 2016 - 2021. Il comprend :

- la définition de la forêt ;
- la définition de la déforestation ;
- la définition de la dégradation ;
- la période de référence ;
- l'échelle ;
- la portée (activités REDD+, les réservoirs de carbone et les gaz inclus)

II.1. Définition nationale de la forêt en République du Congo

Dans le cadre du NERF de la République du Congo, la définition à prendre en compte est :

« La forêt est un espace couvrant sur une superficie minimale de 0,5 hectare (0,50 ha), avec des arbres ayant une hauteur minimale de 3 mètres (3 m) et un taux minimal de couverture de houppier de 30% ».

Cette définition a été utilisée dans le NERF précédent et est toujours en vigueur, elle prend en compte les plantations forestières commerciales de type cacao, café ; les vieilles palmeraies et exclut les activités agricoles, notamment les palmeraies en production.

II.2. Définition nationale de la déforestation

La déforestation est un processus de changement d'occupation du sol, qui conduit du passage de forêt à non forêt ; la forêt qui est définie comme toute formation végétale naturelle ou artificielle d'une superficie minimale de 0.5 ha, avec les arbres d'une hauteur supérieure à 3 m et un couvert arboré de plus de 30%.

II.3. Définition nationale de la dégradation

La dégradation forestière est un processus dans lequel la forêt définie comme toute formation végétale naturelle ou artificielle d'une superficie minimale de 0.5 ha, avec les arbres d'une hauteur supérieure à 3 m et un couvert arboré de plus de 30%, subit une

modification de sa structure par une diminution de la couverture forestière comprise entre 75 à 30% sur une période de 2 ans. ²

II.4. Période de référence du NERF

La période de référence pour l'analyse et la prise en compte des informations pour la détermination du Niveau de Référence va de 2016 à 2021, avec une convention de date au 31 décembre.

La période historique de référence s'étend donc du 31 décembre **2016 au 31 décembre 2021**, l'année 2016 étant l'année de base. Cela signifie que le niveau de référence est établi en considérant les émissions estimées au cours des cinq années consécutives : **2017, 2018, 2019, 2020, 2021**. Cependant, afin de garantir la disponibilité de données fiables et récentes, les informations sur le changement d'occupation ont été collectées jusqu'en 2022 ; une approche qui permet d'assurer une cohérence avec la période de suivi future, où les données de 2022 pourront être ajoutées pour évaluer les résultats par rapport au niveau de référence soumis.

L'échantillonnage n'ayant pas été calculé pour être annualisé, l'estimation des émissions annuelles moyennes s'est faite à partir de la simple division des totaux par les six années considérées dans la collecte des données d'activités. Ensuite, le NERF a été calculé à partir de la moyenne de la période réduite à cinq ans (2016-2021, en respectant la convention des dates mentionnée ci-dessus) et sans inclure l'année supplémentaire (2022) qui servira pour des analyses futures.

II.5. Échelle du NERF

L'échelle du NERF est **nationale**, tout comme la Stratégie REDD+ du pays. C'est à ce titre que les données collectées pour sa construction couvrent l'ensemble du pays.

II.6. Portée du NERF

II.6.1. Activités à prendre en compte

Ce présent NERF prend en compte les activités **de la déforestation et de la dégradation forestière**.

² Il est à noter que cette définition n'est applicable que dans les études de la cartographie de la dégradation forestière par télédétection en République du Congo. Elle n'implique en rien les aspects écologiques associées de la dégradation forestière.

II.6.2. Réservoirs à prendre en compte

Les réservoirs pris en compte dans ce NERF sont :

- **la biomasse aérienne** constituée par le fût et le houppier ;
- **la biomasse souterraine** constituée par les racines des arbres ;
- **la biomasse du bois mort** constituée par le bois mort tombé, le bois mort sur pied et les souches.
- **la litière** ;
- **le carbone organique du sol** (seulement pour la déforestation).

II.6.3. Gaz à prendre en compte

Les gaz pris en compte dans le NERF sont : le **CO₂**, le **CH₄** et le **N₂O**. Les gaz non-CO₂ sont ceux associés aux feux identifiés dans le processus de déforestation et dégradation. (Tableau I).

Tableau I: Synthèse de la portée du NERF en termes d'activités, gaz et réservoirs.

Activités	Gaz	Réservoirs	Emissions brutes ou nettes
Déforestation	CO ₂	Biomasse aérienne, biomasse souterraine, bois mort, litière et sols	Nettes
	CH ₄ et N ₂ O	Biomasse aérienne, bois mort et litière	
Dégradation forestière	CO ₂	Biomasse aérienne, biomasse souterraine, bois mort et litière	Brutes
	CH ₄ et N ₂ O	Biomasse aérienne, bois mort et litière	

III. Approche méthodologique appliquée pour estimer les émissions et absorptions

Le NERF est constitué des émissions dues à la déforestation et à la dégradation forestière.

III.1. Méthodologie de production des données d'activités

Les données d'activités ont été estimées dans la continuité de l'approche méthodologique utilisée dans le précédent Niveau de Référence : c'est-à-dire à partir d'une classification supervisée à l'échelle nationale, d'un échantillonnage systématique stratifié et d'une interprétation visuelle des points. Toutefois cette approche a été significativement optimisée. Les améliorations comprennent : (1) un échantillonnage plus dense et (2) l'intégration de produits additionnels (séries chronologiques, algorithmes de détection de changements) en vue d'optimiser la stratification finale et les données à interpréter. Ces nouvelles modifications renforcent la précision et l'efficacité de la méthode, tout en restant fidèle à l'approche méthodologique de base. Cette approche améliorée également intitulée 'eSBAE' (Ensemble Sample-Based Area Estimation), a été produite dans la plateforme SEPAL développé par la FAO, à partir de scripts python au sein de l'environnement Jupyter, le détail de chaque étape de travail est donné en annexe 05.

La taille minimale de l'échantillonnage est définie sur la base de la formule de Cochran (1963) à partir d'une marge d'erreur tolérée de 10%, et d'un niveau de confiance souhaité à 90% sur la base de statistiques forestières extraites d'un produit global en procédant à plusieurs itérations. In fine, une grille a été créée à partir d'un échantillonnage systématique sur la base des paramètres définis afin de capter un maximum de changements. Le maillage de la grille est de 1 km, ce qui a donné pour le Congo, un total de 291 595 échantillons.

La classification supervisée a été produite par l'algorithme « Random Forest » (Breiman, 2001) en vue de produire un modèle de probabilité de changements réels à partir de la combinaison de données d'entraînements issues de l'étude régionale CAFI³, d'informations statistiques provenant de séries chronologiques denses et d'algorithmes de détection des changements (CCDC, BFAST, CUSUM, etc.) tirés sur la grille d'échantillonnage.

³ « Estimation de la déforestation et de la dégradation des forêts et des facteurs directs actuels et historiques associés à ces processus à l'aide de SEPAL »

Le modèle de probabilité des changements est ensuite stratifié en 3 classes distinctes : « pas de changements », « changements potentiels », « haute probabilité de changements ». La stratification est réalisée à partir de l'algorithme K-Means, un puissant algorithme de clustering (regroupement) non supervisé, qui utilise un ensemble d'attributs pour diviser un jeu de données en plusieurs groupes distincts.

Des échantillons sont ensuite extraits à partir de cette stratification, en vue d'être interprétés et validés visuellement au sein de la plateforme Collect Earth Online

III.1.2. Collecte de données et résultats

Le système de réponse régit le protocole d'encodage et d'interprétation des données de référence. Il permet l'évaluation de la précision des modèles de changements, le calcul des estimations de superficie ainsi que les niveaux d'erreurs associés.

L'interprétation visuelle des échantillons de référence est réalisée dans le logiciel Collect Earth Online⁴ qui permet d'accéder à des images à haute (≤ 10 m) et très haute (≤ 1 m) résolution spatiale des bases de données Google Earth, Bing, Google Earth Engine, Planet. Au total, 5 716 points ont été interprétés visuellement par dix interprètes.

⁴ Collect Earth Online a été développé par SERVIR dans la continuité de l'application Collect Earth Desktop initiée par la FAO. SERVIR est une entreprise commune de l'Agence nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA) et de l'Agence américaine pour le développement international (USAID) - CEO est aujourd'hui soutenu par une large base de partenaires.



Figure 2: Carte de la Répartition géographique de 5716 échantillons

Cette interprétation visuelle des échantillons, s'est basée sur une stratification des classes nationales pour collecter les données d'activités. Le tableau II ci-dessous, montre la stratification et les définitions des classes utilisées pour la collecte des données. Elle est le fruit d'une harmonisation au niveau national de la classification régionale de l'étude de CAFE précédemment citée.

Tableau II: Stratification des classes nationales

Forêt	Forêt Primaire	Forêt dense humide primaire sur terre ferme, >60% arborée
	Forêt Secondaire	Forêt ouverte 30-60% couverture arborée, dégradée ou secondaire
	Forêt claire	Forêt claire 30-60% couverture arborée
	Forêt de Mangrove	Forêt >30% de couverture arborée, sol hydromorphe
	Forêt Marécageuse	Forêt marécageuse mixte >30% couverture arborée, sol inondée >9 mois
	Forêt Galerie	Forêt ripicole en fond de vallée ou en bordure de rivière
	Plantation Forestière Mature	Couverture arborée >15% végétation cultivée/gérée
Non Forêt	Savane Arborée / Arbustive	Savane boisée 15-30% arbore et arbustive > définition nationale
		Savane >15% arbustive < définition nationale
	Savane Herbacée	Savane herbacée <15% arbustive ou arborée
	Prairie Aquatique	Couverture herbacée aquatique ou régulièrement inondée
	Sols Nus - Végétation éparse	<15% végétation
	Terres Cultivées annuelles	Couverture arbustive cultivée >15% arbustif/herbacée/arborée
	Terres cultivées permanentes	Couverture arborée cultivée > 40% arborée
	Zones Bâties	Présence humaine
	Eau	Eau > 50%

La collecte de données a été effectuée à partir d'une enquête sur l'occupation du sol entre l'année 2016 et l'année 2022 au sein de l'interface CEO. Les changements en déforestation ont été validés à partir d'une observation de la classe forêt vers la classe non – forêt au sein d'une fenêtre d'interprétation de 0.5 ha. Les changements dû à la dégradation ont été confirmés après l'observation d'une perte arborée au sein d'un échantillon restant forêt entre l'année 2016 et l'année 2022.

Les interprètes ont également saisi des informations sur les moteurs de changements et sur la biomasse brûlée en vue d'estimer les gaz non-CO2.

Les interprétations se sont appuyées sur différentes sources satellitaires : des mosaïques Landsat 8, Sentinel 2 et Planet pour les années entre 2016 et 2022, ainsi que des mosaïques Planet semestrielles entre 2015 et 2020, puis des mosaïques

mensuelles de 2020 à 2023. Enfin les options d'imagerie additionnelles ont permis d'accéder à des images Maxar visible depuis l'interface de CEO (figure 3) et de Google Earth, ainsi qu'à des images radar avec les images Sentinel 1.

< 1 2 3 4 5 6 > - forêt ou non-forêt en 2016? forêt non-forêt - Type de forêt en 2016 1 - forêt dense 3 - forêt secondaire 7 - forêt mangrove 8 - forêt marécageuse 9 - forêt galerie 10 - plantation fore... je ne sais pas 4 - forêt claire		
Formulaire de collecte (CEO)	Image Mapbox - Plot id 545244	Image Planet – 04/2023 Plot id 545244

Figure 3: Formulaire et différentes images intégrées dans le système de réponse de Collect Earth on Line (CEO)

Un contrôle qualité par deux interprètes indépendants, a été effectué sur 539 points, soit près de 10% de l'échantillonnage. A l'issue de ce contrôle, 4% des échantillons ont subi une modification majeure de classe (ex. passage d'une strate stable à une strate de changements) et 14% ont subi une modification de strates au sein d'une même classe (forêt ou non-forêt), soit un total de 18% d'échantillons modifiés.

Les échantillons n'ayant pas satisfait le contrôle qualité, ont été revus et réanalysés par l'ensemble de l'équipe d'interprétation en vue d'harmoniser le niveau global d'interprétation des opérateurs.

Les informations extraites des séries chronologiques et les données d'entraînement issues de l'interprétation visuelle via Collect Earth Online sont ensuite combinées pour générer un nouveau modèle de probabilités de changements sur la base d'une classification supervisée produite avec l'algorithme « **Balanced Random Forest** ». Un seuil de confiance est ensuite appliqué sur le modèle de probabilités de changements pour transformer ces estimations en une classification binaire (changements et non changements).

L'estimation des superficies par strate est calculée en multipliant la proportion de chaque catégorie de changements au sein de chaque strate par la superficie totale de la strate : c'est l'estimation de la superficie de la catégorie de changements au sein d'une strate (ex. changements de forêt vers non-forêt). L'estimation finale de la strate (ex. forêt) est faite par la somme des superficies de toutes les catégories de changements au sein de la strate concernée⁵.

La mesure de l'incertitude sur l'estimation des superficies de changement considère une marge d'erreur fixée à 10% et un niveau de confiance de 90%.

III.2. Facteurs d'émission et autres paramètres

Les facteurs d'émissions utilisés ont deux origines : (i) l'inventaire forestier national réalisé entre 2009-2014 et (ii) les facteurs d'émission par défaut du GIEC (2006, 2019).

III.2.1. Facteurs d'émission de la déforestation et dégradation forestière

⁵ Section 3A.3.5 Estimation de la superficie au moyen des proportions (IPCC, 2006)

Tableau III: Facteurs d'émission pour déforestation et dégradation [tCO₂/ha]

Facteurs d'émission														
Zone Ecologique	Type forêt	Biomasse aérienne		Biomasse souterraine		Litière			Bois mort		FE déforestation		FE dégradation	
		tCO2/ha		tCO2/ha		tCO2/ha			tCO2/ha		tCO2/ha		tCO2/ha	
		Tier 2	U [%]	Tier 2	U [%]	Tier 1	Tier 2	U [%]	Tier 2	U [%]	Tier 1+2	U [%]	Tier 2	U [%]
Tropical rainforest	Forêt dense	399.6	76.8	212.6	140.1	17.6		241.7	1.5	96.6	631.3	68.1		
Tropical rainforest	Forêt galerie	88.6	144.4	73.1	185.9	17.6		241.7	0.3	150.0	179.7	106.6		
Tropical rainforest	Forêt dense secondaire	357.8	77.2	190.4	140.3		15.8	281.6	0.5	84.0	564.4	68.5	66.9	96.6
Tropical rainforest	Plantation	275.9	192.8	146.8	225.6	17.6		241.7	0.2	283.2	440.4	142.6		
Tropical rainforest	Forêt marécageuse	307.6	79.5	163.7	141.6	17.6		241.7	2.0	115.0	490.9	69.2		
Tropical rainforest	Forêt galérie secondaire	56.8	148.6	46.9	189.2		11.3	432.6	0.5	220.4	115.5	114.2	64.1	156.2
Tropical rainforest	Forêt marécageuse secondaire jeune	185.6	107.7	153.1	159.1		10.6	466.4			349.3	91.3	141.6	114.6
Tropical rainforest	Forêt dense secondaire jeune	270.9	88.9	144.1	147.1		13.3	351.3	0.3	92.6	428.6	75.6	135.8	102.0
Tropical rainforest	Forêt mangrove	346.1	75.3	184.1	139.3						530.2	69.0		
Tropical rainforest	Forêt claire	210.7	98.7	112.1	153.2	17.6		241.7	2.7	127.9	343.0	79.6		
Occupation du sol 2022														
Tropical rainforest	Terres graminéennes										27.8	75.0		
Tropical rainforest	Terres cultivées (annual crops)										17.2	75.0		
Tropical rainforest	Terres cultivées (perennial crops)										147.0	15.0		
Tropical rainforest	Autres terres et Terres inondées										0.0			

III.2.2 Facteurs d'émission de la Déforestation des Sols minéraux

Les facteurs d'émission et autres paramètres utilisés dans l'estimation du changement du stock de carbone dans les sols minéraux due à la déforestation sont présentés dans le tableau IV.

Tableau IV: Facteurs d'émission et autres paramètres utilisés dans l'estimation du changement du stock de carbone dans les sols minéraux due à la déforestation.

Paramètre	Unité	Sous-catégorie	Valeur	Source et description
SOC_{REF}	tC/ha	Terres forestières	47,0	Table 2.3 (GIEC, 2006) en considérant que la déforestation a eu lieu uniquement sur les sols du type LAC
F_{LU}	-	Terres forestières	1	Supposé = 1, Tier 1 (GIEC, 2006)
F_{MG}	-	Terres forestières	1	Supposé = 1, Tier 1 (GIEC, 2006)
F_I	-	Terres forestières	1	Supposé = 1, Tier 1 (GIEC, 2006)
F_{LU}	-	Terres cultivées – agriculture pérenne	1,01	Table 5.5 updated (GIEC, 2019 – perennial crop – tropical – dry/moist/wet)
F_{MG}	-	Terres cultivées – agriculture pérenne	1,04	Table 5.5 updated (GIEC, 2019 – reduced tillage – tropical – moist/wet)
F_I	-	Terres cultivées – agriculture pérenne	0,92	Table 5.5 updated (GIEC, 2019 – low input – tropical – moist/wet)
F_{LU}	-	Terres cultivées – agriculture annuelle	0,83	Table 5.5 updated (GIEC, 2019 – long term cultivated – tropical – moist/wet)
F_{MG}	-	Terres cultivées – agriculture annuelle	1,04	Table 5.5 updated (GIEC, 2019 – reduced tillage – tropical – moist/wet)
F_I	-	Terres cultivées – agriculture annuelle	0,92	Table 5.5 updated (GIEC, 2019 – low input – tropical – moist/wet)
F_{LU}	-	Terres graminéennes	1	Table 6.2 updated (GIEC, 2019)
F_{MG}	-	Terres graminéennes	1	Table 6.2 updated (GIEC, 2019 – non degraded)
F_I	-	Terres graminéennes	1	Table 6.2 updated (GIEC, 2019 – medium)
F_{LU}	-	Autres terres	0	SOC Supposé = 0, Tier 1 (GIEC, 2006)
F_{MG}	-	Autres terres	0	SOC Supposé = 0, Tier 1 (GIEC, 2006)
F_I	-	Autres terres	0	SOC Supposé = 0, Tier 1 (GIEC, 2006)
p	yr	Terres forestières converties en terres non-forestières	1 à 6	Nombre d'années après conversion.

III.2.3 Facteurs d'émission de la déforestation et dégradation forestière - Non-CO₂

Les facteurs d'émission et autres paramètres utilisés dans l'estimation des émissions des gaz non-CO₂ due aux feux de forêts associés à la déforestation sont présentés dans le tableau V.

Tableau V: Facteurs d'émission et autres paramètres utilisés dans l'estimation des émissions des gaz non-CO₂ due aux feux de forêts associés à la déforestation.

Paramètre	Unité	Sous-catégorie	Valeur	Source et description
M_B	tms/ha	Forêt dense	252.9	MB = biomasse aérienne + litière + bois mort. La proportion de la biomasse brûlée sur place a été considérée à 50% de la valeur totale indiquée ici.
		Forêt galerie	66.2	
		Forêt dense secondaire	225.9	
		Plantation	178.1	
		Forêt marécageuse	198.2	
		Forêt galerie secondaire	42.6	
		Forêt marécageuse secondaire jeune	118.8	
		Forêt dense secondaire jeune	172.0	
		Forêt mangrove	207.0	
		Forêt claire	140.6	
C_f	tC /t ms	Toutes	0,32	Table 2.6 (GIEC, 2006)
G_{ef}	g GHG/kg ms brûlée		6,8	Table 2.5 (GIEC, 2006)
G_{ef}	g GHG/kg ms brûlée		0,2	Table 2.5 (GIEC, 2006)
GWP CH ₄			28	GIEC/AR5 (2013)
GWP N ₂ O			265	GIEC/AR5 (2013)

III.3. Incertitudes des facteurs d'émission de l'IFN

Afin de réduire autant que possible les incertitudes sur les facteurs d'émissions, une grande attention a été portée sur les traitements des données de l'inventaire forestier national, et en particulier sur la recherche des erreurs suivantes :

1. La collecte des données (erreurs de mesure, mauvaise interprétation des variables et des options, disparités entre les équipes de terrain) ;

2. La codification des données (transcription des mesures et des observations sur les fiches de terrain, erreurs d'orthographe, noms d'espèces) ;
3. La lecture des fiches de terrain pendant la saisie ;
4. La saisie des données (touche non appropriée du clavier).

Pour mener à bien ces analyses, différentes étapes de vérification ont été mises en place. Elles portaient sur : la recherche exhaustive des doublons dans la base de données, une revue systématique de l'ensemble des unités d'échantillonnages saisies (UE), le nettoyage minutieux des variables prioritaires qui permettent de calculer les superficies inventoriées, les effectifs sur pied, la biomasse et le carbone à l'hectare... En outre de ce travail préparatoire de nettoyage des données, un listing des erreurs potentielles a été réalisé grâce à des requêtes de sélection sous Ms-Acess. Les erreurs potentielles ont été regroupées en 3 classes :

- les erreurs sur les SUT (superficies et classes d'utilisation des terres)
- les erreurs sur les arbres
- les erreurs sur les variables environnementales et socio-économiques

L'analyse de ces erreurs a donné lieu à plusieurs exercices de vérification tels que le contrôle des superficies des UE, placettes et sous-placettes, la cohérence des variables dendrométriques et la distribution spatiale des arbres inventoriés. Afin de retracer ce processus, de nombreuses copies de la base de données, jusqu'à la base finale, ont été réalisées et conservées.

En outre, certaines UE du plan d'échantillonnage n'ayant pas pu être inventoriées à cause des difficultés d'accès, se sont vu être analysées visuellement par l'outil Collect Earth Online.

Enfin l'analyse statistique des données s'est faite à partir de requêtes de calcul sur Microsoft Access ; les produits de ces requêtes ont été exportés sur une feuille de calcul statistique Excel préprogrammée par la FAO, et qui calcule automatiquement les moyennes par ha ou pourcentage, le total, l'erreur type relative et la variance de la moyenne.

Pour plus de transparence, les erreurs type relatives des estimations sont présentées sur les mêmes tableaux que ces grandeurs. L'utilisateur peut ainsi savoir le niveau de précision de l'estimation qui lui est livrée⁶

¹¹ République du Congo, 2020. *Inventaire forestier national multiressource de la République du Congo 2009-2014*. Tome 3: Estimation des facteurs d'émission pour le niveau d'émissions de référence pour les forêts

III.4. Incertitudes des données d'Activités

La représentation des terres en vue de produire les des données d'activités du Congo relève de l'approche n°3 des lignes directrices du GIEC (2006,2019) c'est-à-dire que les superficies estimées des catégories de changements et de non-changements sont issus d'un échantillonnage de points géographiques spatialement explicites qui s'appuie sur des données issues de la télédétection. Cette approche permet de suivre dans le temps les dynamiques d'occupation du sol et d'observer l'évolution des changements de catégories et favorise la correspondance avec la stratification utilisée pour l'inventaire des stocks de carbone et la production des facteurs d'émission.

Cette approche suppose que les données s'exposent notamment au type d'incertitudes suivantes : (1) les erreurs d'échantillonnage, (2) les différences de définitions, (3) les erreurs d'interprétation des données issues de la télédétection, (4) les erreurs liées à la comptabilisation des émissions brutes et nettes.

Afin de réduire autant que possible ces incertitudes et de produire des données fiables et robuste, la méthodologie du Congo s'est appuyée sur les mesures suivantes :

- (1) Une grille d'échantillonnage systématique extrêmement dense en vue de réduire les erreurs liées à la surreprésentation de certaines strates et de capturer les changements autant que possible
- (2) Depuis les premières étapes de mise en œuvre de la REDD en 2009, le Congo a beaucoup travaillé à la diffusion et à l'intégration dans ses méthodes de travail, des définitions officielles de la forêt et de la déforestation. Un travail sur la définition de la dégradation à l'échelle nationale est également en cours, mais une définition opérationnelle validée à l'échelle de la sous-région Afrique Centrale est présentement utilisée. Cette définition est une adaptation de la définition officielle théorique de la FAO (2010).
- (3) Les erreurs liées à l'interprétation ont été réduites autant que possible, avec la revue par deux évaluateurs indépendants de 10% du jeux de données et par l'intégration d'une marge d'erreur de 10% sur les résultats estimés et d'une confiance à 90%.
- (4) Avec la prise en compte de l'accroissement des stocks de carbone, les émissions dues à la déforestation sont désormais considérées comme nettes tandis que les émissions des activités de dégradation, sont brutes.

III.5. Equations

La construction du NERF s'est basée sur les lignes directrices du GIEC (GIEC, 2006 ; GIEC, 2019). Les équations utilisées proviennent des lignes directrices de 2006 (GIEC, 2006). En accord avec les Equations 2.1, 2.2 et 2.3 du GIEC (2006), les changements du stock de carbone, pour une strate d'une catégorie d'utilisation des terres, représentent la somme des changements dans chacun des réservoirs de carbone :

Équation 1: Changement du stock de carbone par en tant que la somme des changements par réservoir

$$\Delta C = \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{DW} + \Delta C_{LI} + \Delta C_{SO} + \Delta C_{HWP}$$

Où :

ΔC = changement du stock de carbone associé à une activité incluse dans la portée du NERF

AB = changement dans les stocks de carbone de la biomasse vivante aérienne

BB = changement dans les stocks de carbone de la biomasse vivante souterraine

DW = changement dans les stocks de carbone du bois mort

LI = changement dans les stocks de carbone de la litière

SO = changement dans les stocks de carbone des sols

HWP = changement dans les stocks de carbone des produits en bois récolté

La méthodologie adoptée pour l'évaluation des changements des stocks de carbone dues à la déforestation et à la dégradation forestière est celle de la **différence des stocks**. Les équations utilisées pour réaliser ces estimations sont présentées ci-après.

III.5.1 Émissions de CO₂ dues à la déforestation et à la dégradation forestière

Les émissions de CO₂ issues des variations des stocks de carbone dans la biomasse aérienne, biomasse souterraine, litière et bois mort ont été estimées à l'aide de l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** :

Équation 2 : Émissions de CO₂ dues aux variations des stocks de carbone dans la biomasse et matière organique morte dues à la déforestation et à la dégradation forestière.

$$E_a = \sum_{i,j,k,l} DA_{i,j,k,l} * FE_{i,j,k,l}$$

Où :

E_a = Émissions de CO₂ pour une activité a dans la période d'intérêt en tonnes de CO₂ ;

DA = Données d'activités liées à la source d'émissions, par zone phytogéographique i , par région j (NERP, ERP), par classe d'occupation du sol en 2015 k et par classe d'occupation du sol en 2020 l dans la période d'intérêt ;

FE = Facteur d'émissions pour une catégorie de source spécifiques, tonnes de CO₂ par unité de A, par zone phytogéographique *i*, par région *j* (NERP, ERP), par classe d'occupation du sol en 2015 *k* et par classe d'occupation du sol en 2020 *l*.

Pour la déforestation, les émissions de CO₂ issues des variations des stocks de carbone dans les sols minéraux ont été estimées selon l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, en accord avec l'équation 2.25 du GIEC (2006) :

Équation 3: Variation annuelle des stocks de carbone dans les sols minéraux due à la déforestation

$$\Delta C_{SO-\text{Minéraux}} = \frac{(SOC_0 - SOC_{(0-T)})}{D}$$

$$SOC = \sum_{c,s,i} (SOC_{REF} * F_{LU\ c,s,i} * F_{MG\ c,s,i} * F_{I\ c,s,i} * A_{c,s,i})$$

Où :

$\Delta C_{SO-\text{Minéraux}}$ = variation annuelle des stocks de carbone dans les sols minéraux, en tonnes C an-1

SOC_0 = stock de carbone organique du sol au cours de la dernière année d'une période d'inventaire, en tonnes C/ha

$SOC_{(0-T)}$ = stock de carbone organique du sol au début de la période d'inventaire, en tonnes C/ha

T = nombre d'années sur une période d'inventaire unique, an

D = dépendance temporelle des facteurs de variation des stocks, qui est la période par défaut pour la transition entre les valeurs SOC d'équilibre, en années. Généralement, $D=20$ ans, mais cela dépend des hypothèses formulées lors du calcul des facteurs FLU, FMG et SOC.

c représente les zones climatiques, s les types de sol et i l'ensemble des systèmes de gestion présents dans un pays.

SOC_{REF} = le stock de carbone de référence, en tonnes C ha-1

FLU = facteur de variation des stocks pour les systèmes d'utilisation des terres ou les sous-systèmes pour une utilisation particulière des terres, sans dimension.

Note : FND est substitué à FLU dans le calcul du carbone du sol forestier afin d'estimer l'influence des régimes de perturbations naturelles.

FMG = facteur de variation des stocks pour le régime de gestion, sans dimension

FI = facteur de variation du stock pour l'apport de matière organique, sans dimension

A = superficie de la strate faisant l'objet de l'estimation, en hectares. Toutes les terres de la strate doivent présenter des conditions biophysiques (c'est-à-dire le climat et le type de sol) et un historique de gestion communs au cours de la période d'inventaire, afin d'être traitées ensemble à des fins d'analyse.

Ajustement technique : les résultats de l'équation ci-dessus ont été multipliés par le facteur p pour prendre en compte du fait que la période d'intérêt est de 5 ans (cf feuille de calcul).

III.5.2 Émissions des gaz non-CO₂ dues à la déforestation et à la dégradation forestière

D'après l'équation 2.27 du GIEC (2006), pour les estimations d'émissions de gaz non-CO₂ associés aux feux :

Équation 4: Émissions de gaz à effet de serre dues aux feux associés à la déforestation

$$L_{fire} = A * M_B * C_f * G_{ef} * 10^{-3}$$

Où :

L_{fire} = Émissions de gaz à effet de serre dues au feu, en tonnes de chaque GES (CH_4 , N_2O).

A = superficie brûlée, ha

M_B = masse de combustible disponible pour la combustion, tonnes ha-1. Cela comprend la biomasse aérienne, la litière et le bois mort.

C_f = facteur de combustion, sans dimension

G_{ef} = facteur d'émission, g kg-1 de matière sèche brûlée

III.6. Évaluation des incertitudes

La méthodologie de « propagation d'erreur simple » a été adoptée pour l'analyse des incertitudes dans le cadre du présent NERF, en accord avec les lignes directrices du GIEC (2006, 2019). Dans ce cadre, les équations 3.2, 3.2B et 3.0B (GIEC, 2019) ont été employées :

Équation 5: Combinaison des incertitudes dans le cas d'une multiplication (Équation 3.2B, GIEC, 2019).

$$U = \sqrt{U_a^2 + \dots + U_n^2}$$

Où :

U = l'incertitude en pourcentage

U_i = l'incertitude en pourcentage associée à chaque paramètre

Équation 6: Combinaison des incertitudes dans le cas d'une addition ou soustraction (Équation 3.2, GIEC, 2019).

$$U_{total} = \frac{\sqrt{(U_1 * x_1)^2 + \dots + (U_n * x_n)^2}}{|x_1 + \dots + x_n|}$$

Où :

U_{total} = l'incertitude en pourcentage pour la somme des quantités

X = quantités à combiner, pouvant être des valeurs positives ou négatives

U_i = l'incertitude en pourcentage associée à chaque quantité

Équation 7: Conversion d'un intervalle en incertitude (Équation 3.0B, GIEC, 2019).

$$U_{upper\ bound\ Uub} = (\max FE - FE) / FE * 100 \%$$

Où :

U = l'incertitude en pourcentage

maxFE : limite supérieur de l'intervalle au tour de la valeur du paramètre

FE : paramètre utilisé

III.7. Méthodologie de calcul de l'Ajustement des émissions liées à la déforestation et la dégradation forestière

L'ajustement du NERF a porté sur une augmentation des émissions calibrées sur la base de 0,1% par an des émissions évitées par l'utilisation des valeurs moyennes du stock de carbone des forêts du domaine forestier national. (Stocks de carbone*44/12*0,1%).

Cette approche est conforme à celle utilisée dans le calcul du NERF révisé du Programme Juridictionnel de Réduction des Emissions de Sangha Likouala en République du Congo (FCPF).

Le facteur d'ajustement du NERF est de 0,1% du stock de carbone total et le facteur de conversion du Carbone en équivalent CO₂ est de 44/12.

IV. Présentation des résultats

Cette partie porte sur la présentation des résultats de l'analyse des échantillons et des estimations des émissions des activités du NERF.

IV.1. Présentation des résultats des Données d'Activités

IV.1.1. Données d'Activités de la Déforestation

Tableau VI: Superficies de déforestation par type de forêt en 2016 et occupation du sol finale en 2022.

Activité	Occupation du sol en 2016	Occupation du sol en 2022	Superficie [ha]	Intervalle de confiance 90% [%]	Intervalle de confiance 90% [ha]	Participation [%]
Déforestation	Forêt dense	Savane arbustive/arborée	1 188	164	1 954	0,8
	Forêt dense	Savane herbacée	1 188	164	1 954	0,8
	Forêt dense	Sol nu/végétation épars	4 752	82	3 905	3,3
	Forêt dense	Terres cultivées annuelles	10 693	55	5 850	7,4
	Forêt de galerie	Savane arbustive/arborée	1 188	164	1 954	0,8
	Forêt de galerie	Savane herbacée	1 188	164	1 954	0,8
	Forêt de galerie	Sol nu/végétation épars	1 188	164	1 954	0,8
	Forêt secondaire	Savane arbustive/arborée	8 364	71	5 912	5,8
	Forêt secondaire	Savane herbacée	5 940	73	4 365	4,1
	Forêt secondaire	Sol nu/végétation épars	36 831	29	10 800	25,4
	Forêt secondaire	Terres cultivées annuelles	64 252	23	14 769	44,3
	Forêt secondaire	Terres cultivées permanentes	1 188	164	1 954	0,8
	Forêt secondaire	Zones bâties	3 564	95	3 383	2,5

	Plantation forestière	Sol nu/végétation éparse	2 424	164	3 987	1,7
	Plantation forestière	Terres cultivées annuelles	1 188	164	1 954	0,8
		Total	145 138	15,3	22 188	100

La superficie de déforestation totale estimée entre 2016-2022 est de **145 138 ha ± 22 188 ha** (soit ± 15,3 %, en considérant un intervalle de confiance à 90%), qui se traduit par un taux de déforestation de **24 189 ha/an⁷ ± 3 698 ha/an**.

IV.1.2. Données d'Activités de la Dégradation

Tableau VII: Superficies de dégradation forestière par type de forêt en 2016 et type de forêt en 2022.

Activité	Occupation du sol en 2016	Occupation du sol en 2022	Superficie [ha]	Intervalle de confiance 90% [%]	Intervalle de confiance 90% [ha]	Participation [%]
Dégradation forestière	Forêt dense	Forêt dense dégradée/secondaire	109 877	19	21 061	44,5
	Forêt de galerie	Forêt de galerie dégradée/secondaire	4 752	82	3 907	1,9
	Forêt marécageuse	Forêt marécageuse secondaire	2 424	164,5	3 987	1,0
	Forêt secondaire	Forêt secondaire dégradée d'avantage	129 738	60,2	78 081	52,6
		Total	246 791	32,8	81 064	100

La superficie de dégradation totale estimée entre 2016-2022 est de **246 791 ha ± 81 064 ha** (soit ± 32,8 %, en considérant un intervalle de confiance à 90%). Cela se traduit par une superficie annuelle dégradée de **41 131 ± 13 511 ha/an**.

IV.2 Présentation des résultats des émissions

IV.2.1 Émissions de gaz CO₂ et non-CO₂ dues à la déforestation, par réservoir

La valeur totale des émissions liées à la déforestation 2016 - 2022 est de **81 309 120,9 tCO₂ eq ± 38,7%** (IC 90%). Le tableau 8 présente les valeurs annuelles d'émissions de

⁷ Il convient de mentionner que le Congo, avec ces résultats, respecte les critères ART-TREES de définition des pays HFLD.

gaz CO₂ et non-CO₂ due à la déforestation dans la période allant de 2016 à 2022 par réservoir.

Il en ressort que la contribution de la biomasse et de la matière organique morte aux émissions de la période est évaluée en **79 275 507,4 tCO₂** (97,5%). Les autres sources présentent respectivement :

- **70 091,7 tCO₂ eq** (0,09%) provenant de l'émission de CH₄ liée à la combustion de la biomasse et matière organique morte ;
- **19 510,8 tCO₂ eq** (0,02%) provenant de l'émission de N₂O liée à la combustion de la biomasse et matière organique morte.
- **1 944 010,9 tCO₂** (2,39%) pour le carbone organique des sols minéraux.

Tableau VIII: Émissions de gaz CO₂ et non-CO₂ due à la déforestation, par réservoir.

Déforestation					
Année	Biomasse et DOM (tCO ₂)	Combustion de la biomasse et DOM - CH ₄ (tCO ₂ eq)	Combustion de la biomasse et DOM - N ₂ O (tCO ₂ eq.)	Sols minéraux (tCO ₂)	Émissions déforestation (tCO ₂ eq.)
2017	13 212 584,6	11 682,0	3 251,8	555 532,0	13 783 050,4
2018	13 212 584,6	11 682,0	3 251,8	462 943,4	13 690 461,7
2019	13 212 584,6	11 682,0	3 251,8	370 354,7	13 597 873,0
2020	13 212 584,6	11 682,0	3 251,8	277 766,0	13 505 284,4
2021	13 212 584,6	11 682,0	3 251,8	185 177,3	13 412 695,7
2022	13 212 584,6	11 682,0	3 251,8	92 237,4	13 319 755,8
Total	79 275 507,4	70 091,7	19 510,8	1 944 010,9	81 309 120,9
	97,5%	0,09%	0,02%	2,39%	100%

IV.2.2 Émissions de gaz CO₂ et non-CO₂ dues à la dégradation forestière, par réservoir

La valeur totale des émissions liées à la dégradation pour la période 2016 – 2022 est de **25 779 438 ± 84,8 % t CO₂ eq**. Le tableau 9 présente la valeur annuelle des émissions de gaz CO₂ et non-CO₂ due à la dégradation dans la période allant de 2016 à 2022 par réservoir. Il en ressort que la contribution de la biomasse et de la matière organique morte est évaluée en **25 615 268 t CO₂** (99,4 %). Les autres réservoirs présentent respectivement :

- **128 421,9 tCO₂ eq (0,5%)** provenant de l'émission de CH₄ liée à la combustion de la biomasse et matière organique morte ;
- **35 747,7 tCO₂ eq (0,1%)** provenant de l'émission de N₂O liée à la combustion de la biomasse et matière organique morte.

Tableau IX: Émissions de gaz CO₂ et non-CO₂ dues à la dégradation forestière, par réservoir.

Dégradation forestière					
Année	Biomasse et DOM (tCO ₂)	Combustion de la biomasse et DOM - CH ₄ (tCO ₂ eq)	Combustion de la biomasse et DOM - N ₂ O (tCO ₂ eq.)	Sols minéraux (tCO ₂)	Émissions Dégradation (tCO ₂ eq.)
2017	4 269 211,5	21 403,6	5 957,9	0,0	4 296 573,1
2018	4 269 211,5	21 403,6	5 957,9	0,0	4 296 573,1
2019	4 269 211,5	21 403,6	5 957,9	0,0	4 296 573,1
2020	4 269 211,5	21 403,6	5 957,9	0,0	4 296 573,1
2021	4 269 211,5	21 403,6	5 957,9	0,0	4 296 573,1
2022	4 269 211,5	21 403,6	5 957,9	0,0	4 296 573,1
Total	25 615 268,8	128 421,9	35 747,7	0,0	25 779 438,3
	99,4%	0,5%	0,1%	0,0%	100%

*Émissions considérées comme nulles selon Tier 1 (GIEC, 2006).

IV.2.3. Émissions totales de gaz CO₂ et non-CO₂ dues à la déforestation et à la dégradation forestière

La perte du stock de carbone de la biomasse (aérienne et souterraine et de et matière organique morte) représente 97,9 % des émissions considérées dans le NERF (tableau 10). Les gaz non-CO₂ issus de la combustion de la biomasse aérienne, bois mort et litière, lors de l'utilisation du feu dans le processus de déforestation et dégradation, ont contribué à 0,24 % du NERF (42 294 tCO₂ eq/an).

Sur la période 2016 à 2022, le total des émissions déforestation/dégradation est estimé à **107 088 559,2 tCO₂ eq.**

Tableau X: Émissions de gaz CO₂ et non-CO₂ due à la déforestation et à la dégradation forestière, par réservoir

Déforestation + Dégradation					
Année	Biomasse et DOM (tCO ₂)	Combustion de la biomasse et DOM - CH ₄ (tCO ₂ eq.)	Combustion de la biomasse et DOM - N ₂ O (tCO ₂ eq.)	Sols minéraux (tCO ₂)	Total (tCO ₂ eq.)
2017	17 481 796,0	33 085,6	9 209,8	555 532,0	18 079 623,4
2018	17 481 796,0	33 085,6	9 209,8	462 943,4	17 987 034,8
2019	17 481 796,0	33 085,6	9 209,8	370 354,7	17 894 446,1
2020	17 481 796,0	33 085,6	9 209,8	277 766,0	17 801 857,4
2021	17 481 796,0	33 085,6	9 209,8	185 177,3	17 709 268,7
2022	17 481 796,0	33 085,6	9 209,8	92 237,4	17 616 328,8
Total	104 890 776,2	198 513,6	55 258,5	1 944 010,9	107 088 559,2
	97,9%	0,19%	0,05%	1,82%	100%

IV.3. Résultat de l'ajustement des émissions liées à la déforestation et la dégradation forestière pour la période 2022-2026

Le tableau 11 présente le stock de carbone disponible dans les forêts du domaine forestier national en 2022.

Tableau XI: Stocks de carbone forestier disponible en 2022.

Catégories de collecte des données d'activités	Superficie par type de forêt en 2022	Incertitudes	Stock C	Incertitudes	Stock C total en 2022	Incertitudes
	[ha]	%	[tC/ha]	%	[tC]	%
Forêt claire	654279	40,0	93,6	79,6	61209215	89
Forêt dense	16428411	5,2	172,2	68,1	2828543415	68
Forêt galerie	605789	31,4	49,0	106,6	29682350	111
Forêt mangrove	4848	116,3	144,6	69,0	701040	135
Forêt marécageuse	2031422	21,8	133,9	69,2	271983341	73
Forêt secondaire	3389577	14,0	153,9	68,5	521769168	70
Plantation forestière	29989	40,1	120,1	142,6	3602039	148
Gain forestier	28657	37,6	116,9	68,5	3349952	78
Dégradation Forêt dense	109877	19,1	153,9	68,5	16913754	71

Dégradation Forêt galerie	4752	82,2	31,5	114,2	149751	141
Dégradation Forêt marécageuse	2424	164,5	95,3	91,3	230927	188
Dégradation Forêt secondaire	129738	60,2	116,9	75,6	15165943	97
TOTAL	23 419 764				3 753 300 896	53
Cap relatif à l'ajustement à 0,10%	Ajustement [tCO2/an] :			13 762 103		± 52.6

Sur la base de ces circonstances nationales d'émissions potentielles, l'ajustement calculé est estimé à **13 762 103 tCO₂.eq/an**.

L'ajustement du NERF historique a été fait sur la base des circonstances nationales, conformément à la Décision 4/CP.15 sur les principes méthodologiques concernant les activités liées à la réduction des émissions résultant du déboisement et de la dégradation des forêts et le rôle de la conservation, de la gestion durable des forêts et de l'accroissement des stocks de carbone forestiers dans les pays en développement. Cette Décision stipule ce qui suit en son paragraphe 7 « La Conférence des Parties, Reconnaît que, lorsqu'ils établissent pour les forêts des niveaux de référence des émissions (NERF) et autres niveaux de référence (NRF), les pays en développement parties devraient le faire en toute transparence, **en tenant compte des données chronologiques, et effectuer des ajustements en fonction des situations nationales**, conformément aux décisions pertinentes de la Conférence des Parties ».

V- Le NERF REVISE

Les émissions de CO₂ équivalent pour la période historique de 2016 à 2022 ont été estimés à 107 088 559,2 tCO₂ eq ± 35,8%, dont 76 % (81 309 120,9 tCO₂ eq/an) résultants de la déforestation et 24% (25 779 438,3 tCO₂ eq/an) résultants de la dégradation forestière. Ces résultats ont permis l'estimation des émissions annuelles moyennes à partir de la simple division des totaux par les six années considérées dans la collecte des données d'activités. Ensuite, le NERF a été calculé à partir de la moyenne de la période réduite à cinq ans (2016-2021, en respectant la convention des dates mentionnée ci-dessus).

Le tableau XII ci-dessous, présente la synthèse des résultats des émissions liées à la déforestation et à la dégradation forestière.

Tableau XII: Synthèse des résultats des émissions historiques 2016 - 2021

Activités	Valeur	Unité	% par activité du total NERF
Émissions (moyenne 2016-2021)			
Déforestation	13 597 873	tCO ₂ eq. /an	76 %
Dégradation forestière	4 296 573	tCO ₂ eq. /an	24 %
Total des Emissions	17 894 446	tCO ₂ eq./an	100%

Le tableau XIII ci-dessous, présente la synthèse des résultats des émissions historiques ajustées sur la base des circonstances nationales

Tableau XIII: Synthèse des résultats des émissions historiques et ajustées

Activités		Valeur	Unité	TOTAL avec IC 90%	% par activité du total NERF
Émissions Historiques	Déforestation	13 597 873	t CO ₂ eq/an	17 894 446 ± 6 406 211 (± 35.8%)	57%
	Dégradation forestière	4 296 573	tCO ₂ eq/an		
Ajustement		13 762 103	tCO₂.eq/an	13 762 103 ± 7 238 866 (± 52.6%)	43%
NERF historique et ajusté		31 656 549 tCO₂.eq/an ± 9 655 247 (± 30.5 %)			100%

VI. Améliorations à partir du premier NERF

Lors de la précédente soumission du Niveau de Référence, certains axes d'améliorations avaient été identifiés lors de l'évaluation technique⁸.

La présente version révisée du NERF a réussi à incorporer les suggestions faites par l'évaluation technique citée ci-haut. Les principales améliorations apportées dans le NERF révisé sont les suivantes :

⁸ <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/2016/tar/cog.pdf>

- La prise en compte des stocks de carbone à la suite du déboisement : la collecte des données d'activités via la plateforme CEO ; ce qui a permis de mieux documenter l'occupation du sol avant et après les changements ;
- L'amélioration de l'équation du ratio entre la biomasse souterraine et aérienne en utilisant dans cette version révisée la valeur par défaut disponible dans l'étude de Mokany *et al.* (IPCC, 2019) ;
- L'amélioration de la prise en compte de la dégradation forestière en ayant notamment évolué de l'approche initiale de suivi par proxys vers une approche spatialement explicite issue des données de télédétection ;
- L'inclusion de nouvelles émissions avec la quantification de la biomasse brûlée et donc la considération des gaz suivants : méthane et protoxyde d'azote ;
- L'inclusion de réservoirs supplémentaires que sont la litière et le bois mort, pour les émissions dues à la déforestation et à la dégradation forestière ;
- La prise en compte des définitions nationales de la déforestation et de la dégradation forestière.

VII. Domaines d'améliorations futures

Certaines améliorations ont été apportées à la suite de l'évaluation technique de la première version du document et parmi elles :

- L'augmentation de l'échantillonnage en vue de désagréger la classe forêt en différentes strates forestières
- Le détail des trajectoires de changements
- La correction de certains facteurs d'émissions avec des choix plus récents conformément aux lignes directrices du GIEC de 2019

Enfin, une soumission ultérieure pourrait également intégrer les éléments futurs :

- Des facteurs d'émissions actualisés et spécifiques pour la déforestation et la dégradation forestière à partir de relevés de données in situ ;
- Des procédures de contrôle qualité plus denses et plus robustes ;
- La consolidation des mesures de carbone du sol dans la forêt marécageuse, les tourbes représentent un important réservoir de carbone, même si ce réservoir n'est pas encore affecté par les activités anthropiques dans le passé, il pourrait être affecté dans le futur.

Conclusion

La soumission révisée du NERF reflète clairement les progrès réalisés de la République du Congo depuis l'évaluation technique en 2017 de son précédent NERF.

Plusieurs aspects cruciaux ont été améliorés, notamment :

- l'utilisation optimisée des données de l'Inventaire Forestier National ;
- les avancées notables réalisées dans la prise en compte des activités, avec une intégration réussie de la détection directe de la dégradation forestière par télédétection ;
- les estimations des émissions plus élaborées sur la base des données d'activités plus précises et les outils modernes d'analyse des échantillons ;
- la comptabilisation des nouveaux gaz (CH₄ et N₂O) et réservoirs (Carbone organique du sol et litière) non pris en compte dans la première soumission du NERF.

Le NERF révisé, construit sur la base des données historiques et ajustées suivant les circonstances nationales du pays, est estimé à **31 656 549 ± 9 655 247 t CO₂ eq/an** réparti comme suit :

- Emissions Historiques (57%) : **17 894 446 ± 6 406 211 tCO₂ eq/an**
- Ajustement (43%) : **13 762 103 ± 7 238 866 tCO₂ eq/an**

Le NERF initial de la République du Congo, approuvé par la CCNUCC en 2017 était estimé à **35 475 652 t CO₂ eq/an** réparti comme suit :

- Emissions Historiques : **19 208 572 t CO₂ eq/an soit 54,15%**
- Ajustement : **16 267 080 t CO₂ eq/an soit 45,85%**

La République du Congo signataire de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, du Protocole de Kyoto et de l'Accord de Paris sur le Climat poursuit sans relâche son engagement aux efforts de gestion durable des forêts, de conservation de la biodiversité et d'accroissement de stocks de Carbone via l'Afforestation, le Reboisement et l'Agroforesterie. C'est en cela, qu'elle met à contribution les multi-acteurs nationaux et internationaux pour affiner son document portant sur le NERF basé sur les émissions historiques et les absorptions.

Conformément à la décision 12/CP 17, paragraphe 10, le NERF révisé et ajusté aux perspectives de développement du pays, permet à la République du Congo de poursuivre une démarche progressive et consensuelle, confirmant son statut de pays à fort couvert forestier et à faible taux de déforestation/dégradation.

Références Bibliographiques

- Baccini, A, et al, 2012. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps, *Nature Climate Change*, Vol 2, 10.1038/NCLIMATE1354, 2012.
- Bastin, J.-F., Barbier, N., Couteron, P., Adams, B., Shapiro, A., Bogaert, J. and De Cannière, C. (2014), Aboveground biomass mapping of African forest mosaics using canopy texture analysis: toward a regional approach. *Ecological Applications*, 24: 1984–2001.
- Billand A., Gourlet-Fleury, S., Sarrailh J-M. 2008. Variation des paramètres carbone selon différents contextes d'exploitation. Atelier COMIFAC, Paris.
- Blanc, L., Echard, M., Herault, B., Bonal, D., Marcon, E., Chave, J., Baraloto, C., 2009. Dynamics of aboveground carbon stocks in a selectively logged tropical forest. *Ecol. Appl.* 19, 1397–1404.
- BRLI/ CN-REDD, 2014. Etude de la spatialisation et de la pondération des causes de la déforestation et de la dégradation forestières et analyse des options stratégiques, proposées par le R-PP de la République du Congo. Brazzaville, 265 p.
- CAFI/FAO 2022. Etude sur la déforestation et la dégradation des forêts et les facteurs directs à l'aide de SEPAL
- Chave J, Rejou-Mechain M, Burquez A, Chidumayo E, Colgan MS, Delitti WBC, Duque A, Eid T, Fearnside PM, Goodman RC, Henry M, Martinez-Yrizar A, Mugasha WA, Muller-Landau HC, Mencuccini M, Nelson BW, Ngomanda A, Nogueira EM, Ortiz-Malavassi E, Pelissier R, Ploton P, Ryan CM, Saldarriaga JG, Vieilledent G. Improved allometric models to estimate the above ground biomass of tropical trees. 2014. *Global Change Biology*. DOI: 10.1111/gcb.12629
- CNIAF-FAO, 2010 Inventaire forestier national du Congo. Manuel de terrain version 8, Brazzaville 2010
- CNIAF/MEFDD, 2005. Directives nationales d'aménagement durable des forêts naturelles su Congo
- CNIAF/MEFDD, 2015. Résultats des calculs pour déterminer la biomasse, le carbone et les facteurs d'émission de l'Inventaire Forestier National (IFN) en République du Congo. Brazzaville. 40p.
- CN-REDD/ Congo, 2011. Proposition pour la préparation à la REDD+ (RPP) République du Congo. Version finale. Brazzaville, 214 p.
- CN-REDD/ Congo, 2014b. Rapport général de l'atelier national sur la définition « forêt » dans le contexte de la REDD+ en République du Congo dans le cadre du processus REDD+. Brazzaville, 27 p.

- Crezee, B., Dargie, G. C., Ewango, C. E. N. et al. Mapping peat thickness and carbon stocks of the central Congo Basin using field data. *Geosci.* 15, 639-644 (2022)
- DSRP, 2007. Document de stratégie de réduction de la pauvreté de la République du Congo, ministère du Plan, 126p.
- E. S. (1954) Continuous inspection schemes. *Biometrika*, 42, 100–115.
- FAO, 2003. Code régional d'exploitation forestière à faible impact dans les forêts denses tropicales humides d'Afrique centrale et de l'Ouest. Food and Agriculture Organization of the United Nations 2003
- Feldpausch, T. R., Rondon, M. A., Fernandes, E. C. M., Riha, S. J., and Wandelli, E.. 2004. Carbon and nutrient accumulation in secondary forests regenerating on pastures in central Amazonia, *Ecol. Appl.*, 14, S164–S176, doi:10.1890/01-6015.
- Fittkau, E. J. and Klinge, H.. 1973. On biomass and trophic structure of the central Amazonian rain forest ecosystem, *Biotropica*, 5, 2– 14.
- FAO. 2005. Global Forest Resources Assessment 2005- Country Report - Congo, Rome.
- FAO. 2010. Global Forest Resources Assessment 2010- Country Report - Congo, Rome. 72pp/
- GAF. 2013. SGDE Suivi Forestier Extension des Services REDD. S – Rapport des opérations de service pour la République du Congo – phase 3.
- GFOI. 2013. Integrating remote-sensing and ground-based observations for estimation of emissions and removals of greenhouse gases in forests: Methods and Guidance from the Global Forest Observations Initiative: Pub: Group on Earth Observations, Geneva, Switzerland, 2014
- GIEC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Penman J., Gytarsky M., Hiraishi T., Krug, T., Kruger D., Pipatti R., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K., Wagner F. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/IGES, Hayama, Japan.
- GIEC. 2006. Lignes directrices 2006 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Volume 4: Agriculture, foresterie et autres affectations des terres. Chapitre 3 : représentation cohérente des terres. GIEC, 47p. www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/pdf/4_Volume4/V4_03_Ch3_Representation.pdf
- Gourlet-Fleury, S., F. Mortier, A. Fayolle, F. Baya, D. Ouédraogo, F. Bénédet et N. Picard. 2013. Tropical forest recovery from logging: a 24 year silvicultural experiment from Central Africa. *Phil. Trans. R. Soc. B* 2013 368, 20120302

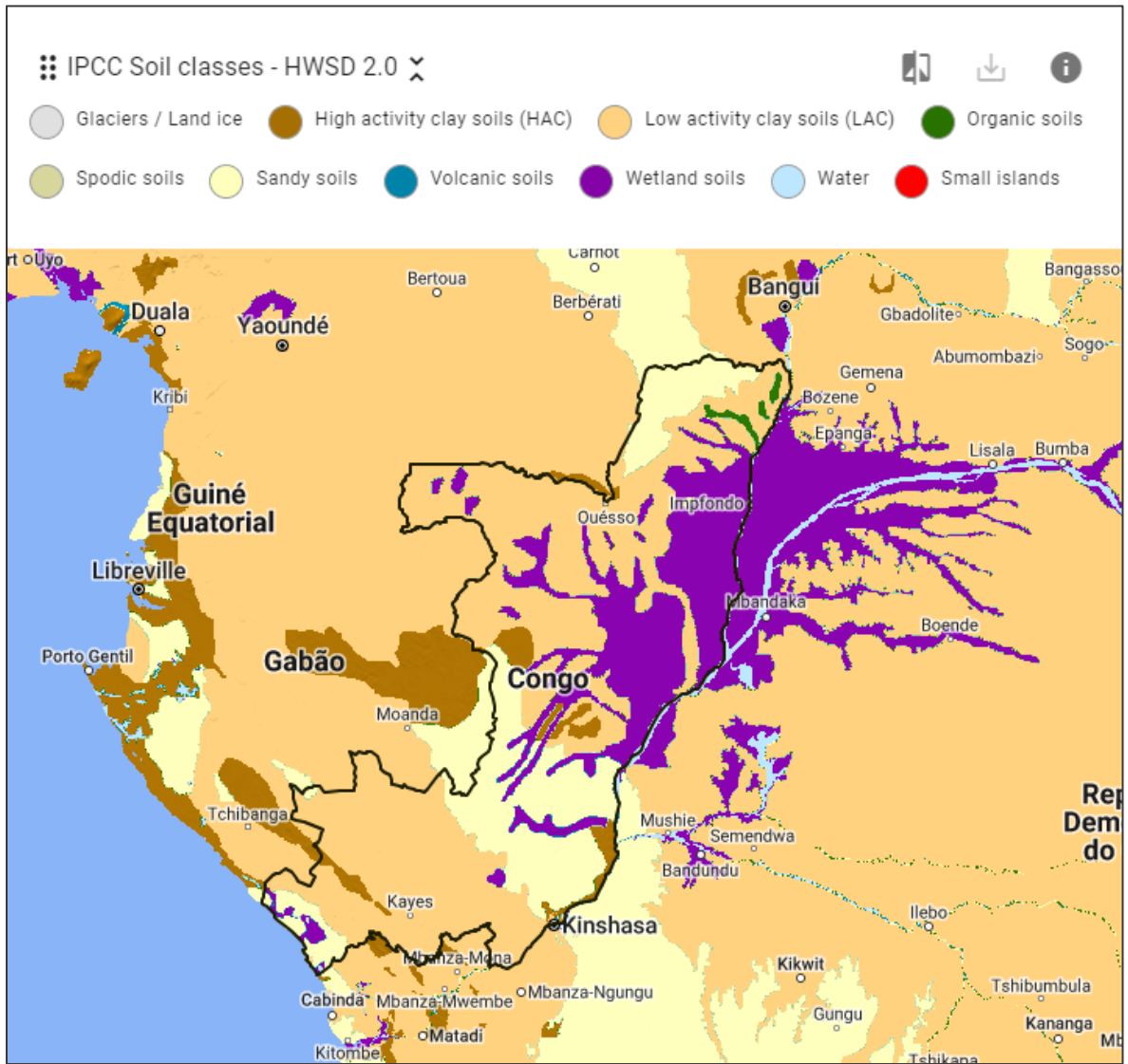
- Hansen, M. C., P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, and J. R. G. Townshend. 2013. "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change." *Science* 342 (15 November): 850–53. Data available on-line from: <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>.
- Henry M., Besnard A. , Asante W. A. et al.. 2010. "Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa," *Forest Ecology and Management*, vol. 260, no. 8, pp. 1375–1388, 2010
- L. urso et al "Use of random forest algorithm for predictive modelling of transfer factor soil-plant for radiocaesium: a feasibility study " - *journal of environmental radioactivity* 270 (2023) 107309.
- MEPAI, 2012. Ministère de l'Economie, du Plan, de l'Aménagement du territoire et de l'Intégration. Plan National De Développement - Document de Stratégie pour la croissance, l'emploi et la réduction de la pauvreté (DSCERP) 2012-2016. Brazzaville, 2012, 398pp.
- Ministère du Plan, de la Statistique et de l'Intégration Régionale. 2023. Résultat préliminaire du 5^e Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH) de 2007.
- Ngomanda A, Engone Obiang NL, Lebamba J, Moundounga Mavouroulou Q, Gomat H, Mankou GS, Loumeto J, Midoko Iponga D, Kossi Ditsouga F, Zinga Koumba R, Botsika Bobé KH, Mikala Okouyi C, Nyangadouma R, Lépengué N, Mbatchi B, Picard N. 2014 Site-specific versus pantropical allometric equations: which option to estimate the biomass of a moist central African forest? *For Ecol Manage* 312:1–9. doi:10.1016/j.foreco. 2013.10.029
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C.E., Wulder, M. A. 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148:42–57.
- Olson, D., Dinerstein,, E., Wikramanayake,, Eric D., Burgess, N., Powell. G, Underwood, E., D'amico, J., Itoua, I., Strand, H., Morrison, J., Loucks, G., Allnutt, T., Ricketts, T., Kura, Y., Lamoreux, J., Wettengel, W, Hedao, P. and Kassem, K., 2001. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience*, 2001, Volume 51, Issue 11. Pp. 933-938
- République du Congo 2017, Niveau d'Emissions de Référence pour les Forêts (NERF), 92p.
- République du Congo, 2020. Inventaire forestier national multiressource de la République du Congo 2009-2014. Tome1: Estimation des facteurs d'émission pour le niveau d'émissions de référence pour les forêts

- République du Congo, 2020. Inventaire forestier national multiressource de la République du Congo 2009-2014. Tome 2: Étendue et potentialités des ressources forestières ligneuses..
- République du Congo, 2020. Inventaire forestier national multiressource de la République du Congo 2009-2014. Tome 3 : Méthodologie et mise en oeuvre, Brazzaville.
- République du Congo 2020, Loi n°33 – 2020 du 08 Juillet 2020, Portant code Forestier 92p
- Rutishauser, E., Wagner, F., Herault, B., Nicolini, E.A., Blanc, L. 2010. Contrasting above-ground biomass balance in a Neotropical rain forest. *Jour. Vege. Science* 21, 672–682.
- Sassan Saatchi et al. 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents.” *PNAS* June 3, 2011.
- Sayre, R., J. Dangermond, C. Frye, R. Vaughan, P. Aniello, S. Breyer, D. Cribbs, D. Hopkins, R. Nauman, W. Derrenbacher, D. Wright, C. Brown, C. Convis, J. Smith, L. Benson, D. Paco VanSistine, H. Warner, J. Cress, J. Danielson, S. Hamann, T. Cecere, A. Reddy, D. Burton, A. Grosse, D. True, M. Metzger, J. Hartmann, N. Moosdorf, H. Dürr, M. Paganini, P. DeFourny, O. Arino, S. Maynard, M. Anderson, and P. Comer. 2014. A New Map of Global Ecological Land Units — An Ecophysiographic Stratification Approach. Washington, DC: Association of American Geographers. 46 pages.
- Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., & Culvenor, D. (2010). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 114, 106-115.
- Zanne AE, Lopez-Gonzalez G, Coomes DA, Ilic J, Jansen S, Lewis SL, Miller RB, Swenson NG, Wiemann MC, Chave J. 2009. Global Wood Density Database. <http://datadryad.org/resource/doi:10.5061/dryad.234>
- Zapfack, L., Noumi, N., & Zemagho, L. 2013. Deforestation and carbon stocks in the surroundings of Lobéké National Park (Cameroon) in the Congo Basin. *Environ Nat Resour Res.*, 3(2), p78.

- <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/2016/tar/cog.pdf>
- <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/2016/tar/cog.pdf>
- <https://www.fao.org/3/x0596e/x0596e00.htm>
- <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/tool-reference/image-analyst/analyze-changes-using-ccdc.htm>
- https://www.openmrv.org/fr/w/modules/mrv/modules_2/landtrendr
- www.sepal.iohttps://github.com/cniaf/syna_mnv

Annexes

Annexe 1 : Classes d'Occupation des sols du GIEC



Annexe 2 : Déroulement des étapes de travail pour la production des données d'activités via l'approche eSBAE.

Les méthodes reconnues utilisées dans le cadre du suivi des changements forestiers ces dernières années (Olofsson 2013, 2014) basées sur l'estimation des superficies par échantillonnage (Sample-Based Area Estimation - SBAE), soit une combinaison de carte et d'interprétation visuelle d'échantillons, ont révélé plusieurs difficultés, notamment en termes de précision. En effet, l'approche par échantillonnage stratifié en vue de garantir la représentativité de toutes les strates, a pu conduire dans certains exercices, à l'introduction d'importants biais notamment en raison de la grande différence de superficies entre ces strates et de leurs sensibilités aux erreurs d'omissions d'échantillons de changements (Olofsson, 2020).

Pour répondre à ces défis, la FAO a complété l'approche initiale SBAE, par la méthode eSBAE (Ensemble Sample-Based Area Estimation) qui combine l'apprentissage automatique à l'interprétation visuelle des changements.

eSBAE permet d'évaluer la dynamique des forêts et mobilise des solutions de cloud-computing et des outils open-source pour cartographier les perturbations et quantifier les facteurs directs de la déforestation et de la dégradation des forêts et répond aux besoins des pays en termes de standardisation et d'automatisation des chaînes de traitement en vue d'améliorer la vitesse de production et la fiabilité des données grâce à de puissants outils de calculs.

- eSBAE “Ensemble Sample-Based Area Estimation” Ou “Approche ensembliste pour l'estimation par échantillonnage des superficies”

Cette approche repose sur l'intégration au sein d'une même interface de l'ensemble des étapes qui concourent à la production des données pour la mesure, la notification et la vérification des activités REDD+ et d'autres normes de carbone. La méthode s'appuie, à partir d'une large grille d'échantillonnage qui capture les changements avec un niveau de confiance suffisant, sur une combinaison d'algorithmes de détection de changements, d'analyse dense de séries chronologiques et d'interprétation visuelle humaine en vue d'entraîner un modèle de probabilités de changements. In fine, le traitement de ces données subit plusieurs itérations qui vont permettre d'améliorer le modèle et de produire une classification finale.

eSBAE s'appuie sur un ensemble de carnets de notes de code produits via l'application Jupyter Notebook, l'ensemble étant directement intégré au sein de la plateforme SEPAL⁹ (Système pour l'accès, le traitement et l'analyse des données pour la surveillance des terres). eSBAE est principalement basé sur la bibliothèque python « sampling-handler » qui fournit toutes les fonctionnalités sous-jacentes nécessaires aux différents traitements réalisés. Les carnets de note éliminent le lourd fardeau du

⁹ www.sepal.io

codage de chaque élément et l'utilisateur n'a plus qu'à renseigner certaines variables d'entrée spécifiques qui définiront ses besoins personnalisés.

Les carnets de note sont similaires tout au long du processus, seuls les paramètres spécifiques au travail en cours, changent ; l'exécution successive des différents carnets assure le bon fonctionnement de l'ensemble du process. Deux éléments relient les résultats de chaque carnet : le nom du projet et un fichier de configuration sous-jacent.

Le flux de travail repose sur les étapes suivantes :

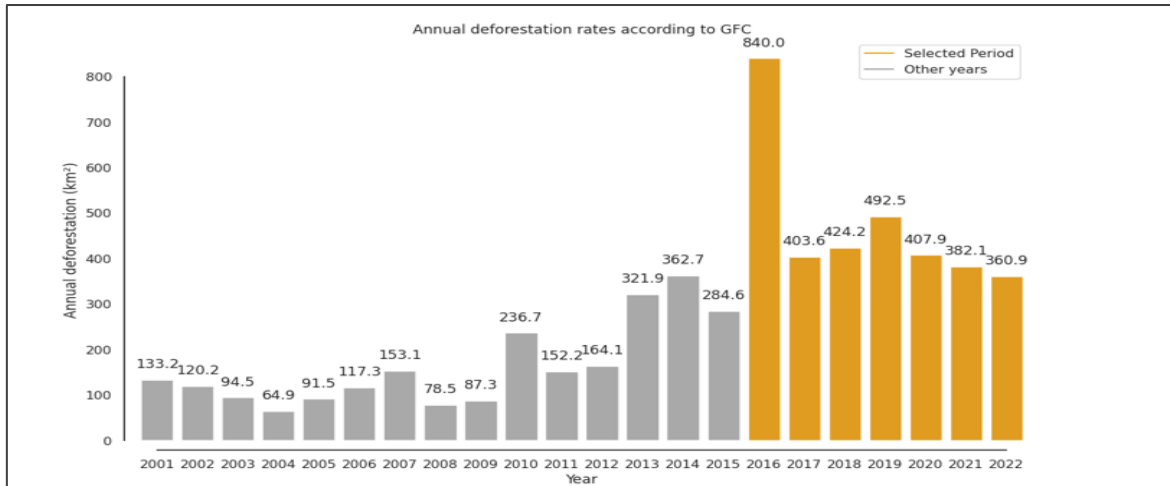
- (a) Production de la grille d'échantillonnage ;
- (b) Extraction des séries temporelles ;
- (c) Détection automatique des changements ;
- (d) Stratification de la grille ;
- (e) Extraction et interprétation des échantillons ;
- (f) Contrôle qualité des échantillons ;
- (g) Stratification et résultat.

L'ensemble du matériel relatif à la méthode eSBAE pour le Congo est disponible sur le dépôt GitHub de l'institution CNIAF : https://github.com/cniat/syna_mnv¹⁰.

- Production de la grille d'échantillonnage

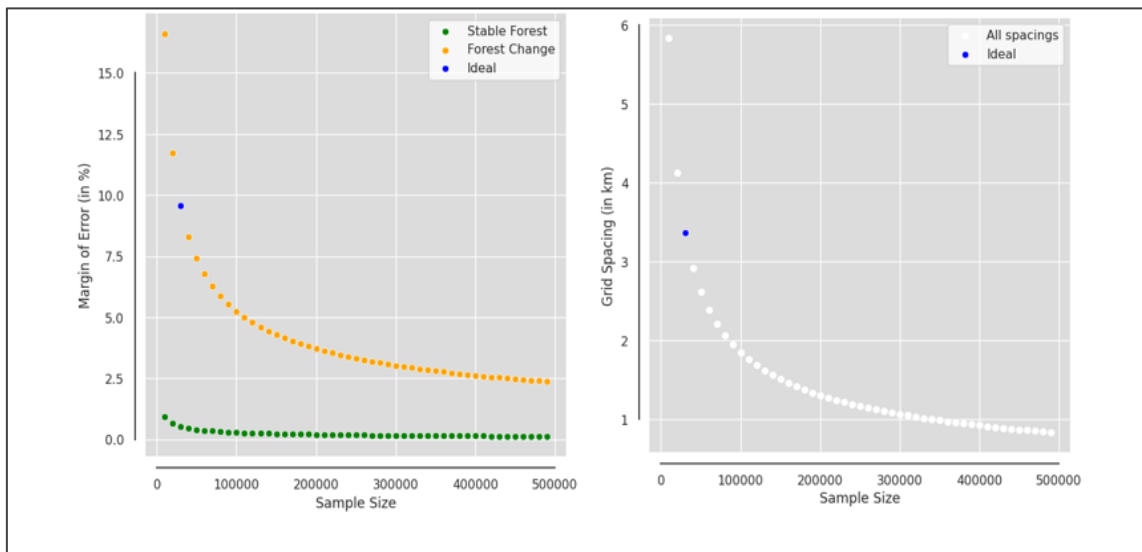
L'intensité de l'échantillonnage a été calculée à partir de plusieurs simulations faites sur les pertes du couvert forestier du produit Global Forest Change (GFC). Au préalable, l'étendue temporelle, soit la période de suivi, 2016-2022, et les seuils de définition de la forêt, soit une couverture arborée minimale de 30% et l'unité minimale de cartographie de 0.5 ha, ont été définis afin de considérer un ensemble de pixel définis comme forêt, dans le contexte congolais.

¹⁰ Le dépôt GitHub est en cours d'actualisation



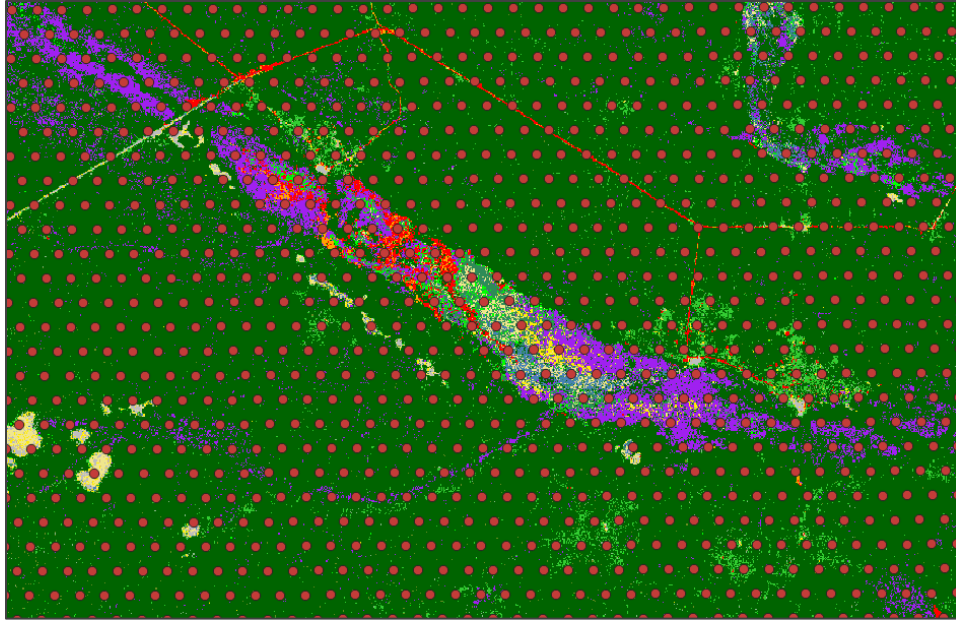
Estimation des pertes du couvert forestier - GFC 2016-2022

La taille minimale de l'échantillonnage est définie sur la base de la formule de Cochran (1963) à partir d'une marge d'erreur tolérée, 10%, d'un niveau de confiance souhaité, 90% et sur la base des statistiques forestières précédemment extraites en procédant à plusieurs itérations.



Marge d'erreur et espacement de grille pour le calcul de l'intensité de l'échantillonnage

Une grille a été créée à partir d'un échantillonnage systématique sur la base des paramètres définis afin de capter un maximum de changements. La grille a été quadrillée à 1 km, ce qui a donné pour le Congo, un total de 291 595 échantillons.



Grille d'échantillonnage dense - 1km

- **Extraction des séries temporelles**

En faisant appel aux ressources de Google Earth Engine, la deuxième étape consiste à observer une grande quantité de séries chronologiques d'images Landsat sur une période légèrement plus étendue que la période de suivi, soit 2015 – 2023 afin d'en extraire les informations suivantes :

- Réflectance des bandes spectrales appropriées, ici deux bandes du spectre visible (rouge/vert), le proche infra-rouge (NIR) et le moyen infra-rouge (SWIR 1 et 2)
- Indices de télédétection : le NDFI ou « Normalized Difference Forest Index » qui à partir d'un ratio entre bandes spectrales permet de distinguer les zones avec une densité de canopée forestière et une quantité de biomasse verte (photosynthétiquement active) différentes. Cet indice est particulièrement utile pour le suivi des changements dans les régions où les forêts sont mélangées avec d'autres types d'occupation du sol
- La luminosité, l'humidité et la couverture végétale à partir de la fonction « Tasseled Cap » (Kauth-Thomas), une méthode d'analyse des données multispectrales qui permet de mettre en évidence des composantes contenues dans les données de télédétection.

Ces informations sont extraites et associées à chacun des points de la grille d'échantillonnage.

- **Détection automatique des changements**

Cette étape consiste à exécuter différents algorithmes de détection automatique des changements pour chacun des points de la grille d'échantillonnage. Ces informations viennent compléter les données des séries chronologiques extraites au cours de l'étape précédente. Les algorithmes utilisés sont les suivants :

Explication des algorithmes de changement intégré dans eSBAE

Algorithme	Informations
Cumulative Sum Control Chart (CuSum)	CuSum est utilisé pour détecter les changements au sein d'une série chronologique en surveillant l'accumulation des écarts par rapport à une moyenne de référence ⁴
Breaks For Additive Season and Trend (BFAST)	A partir d'un modèle historique défini comme stable, l'algorithme BFAST identifie les points de changements qui s'éloigne de la tendance, au sein d'une série chronologique ¹¹
Continuous Change Detection and Classification (CCDC)	CCDC détecte et suit en continu des changements de l'occupation du sol en identifiant les variations des valeurs des pixels au sein d'une série chronologique ¹²
Landscape Treatment Restoration Energy Detection and Reduction (LandTrend)	LandTrend identifie et caractérise les changements à long terme de la couverture terrestre ; son fonctionnement consiste « à distiller une trajectoire spectrale pluriannuelle en segments linéaires séquentiels qui saisissent de manière adéquate le caractère de ces changements progressifs, puis à exploiter cette restitution simplifiée des séries chronologiques pour en extraire des informations utiles ¹³ ».

Cette étape permet également l'extraction des métriques des séries chronologiques, ce sont des indicateurs statistiques utilisés pour caractériser les propriétés des séries temporelles tels que la moyenne, la variance, l'écart-type.

Enfin, sont aussi extraites les informations des classes de différents produits globaux tels que les produits de la couverture du sol de l'ESA, de l'ESRI, du GFC et du JRC (TMF).

- **Intersection des données eSBAE et stratification de la grille d'échantillonnage**

Afin de disposer d'une base de données solide et consolidée, la grille d'échantillonnage contenant l'ensemble des informations des séries chronologiques précédemment

¹¹ Page, E.S. (1954) Continuous inspection schemes. *Biometrika*, 42, 100–115.

⁵ Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., & Culvenor, D. (2010). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 114, 106-115.

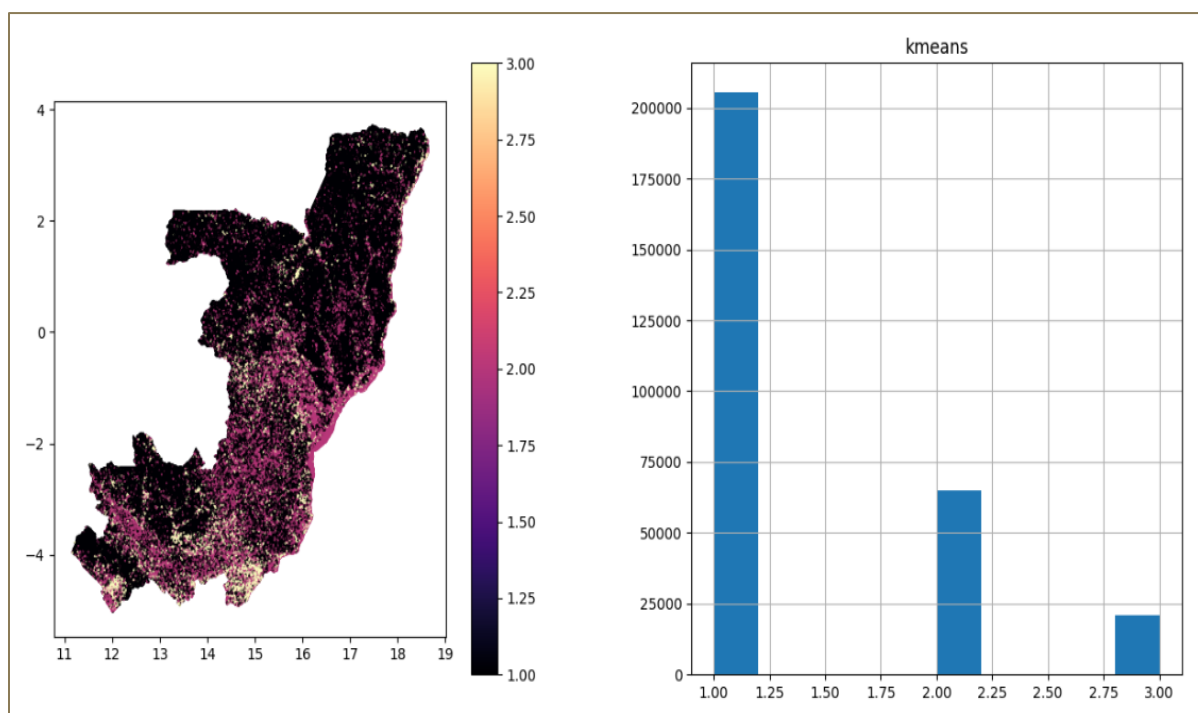
⁶ <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/tool-reference/image-analyst/analyze-changes-using-ccdc.htm>

⁷ https://www.openmrv.org/fr/w/modules/mrv/modules_2/landtrendr

extraites, est combinée avec la base de données de l'étude régionale¹⁴. Cette base de données contient 13,115 échantillons collectés à l'échelle de la sous-région sur la période 2015-2020 ; les informations de classification sont issues d'une interprétation visuelle humaine ; et afin de minimiser autant que possible l'introduction de biais, chaque point de cette base de données a été revu 3 fois par des interprètes différents ; ces données sont une base fiable et robuste qui guideront la classification supervisée.

En effet, à partir des données d'entraînements issues de l'étude régionale CAFI et des informations statistiques des séries chronologiques tirées sur la grille d'échantillonnage, une classification supervisée appuyée par l'algorithme « Random Forest » (Breiman, 2001) en vue de produire un modèle de probabilité de changements réels a été effectuée. Random Forest (*Random Forest*, Breiman, 2001) est un algorithme solide et reconnu dans le domaine de la modélisation prédictive ¹⁵qui combine les résultats de plusieurs arbres de décision pour obtenir un résultat unique (Breiman 2001).

Le modèle de probabilité des changements est ensuite stratifié en 3 classes distinctes : « pas de changements », « changements potentiels », « haute probabilité de changements ». La stratification est réalisée à partir de l'algorithme K-Means, un puissant algorithme de clustering (regroupement) non supervisé, qui utilise un ensemble d'attributs pour diviser un jeu de données en plusieurs groupes distincts.



⁸ Étude CAFI/FAO sur la déforestation et la dégradation des forêts et les facteurs directs à l'aide de SEPAL

⁹ L. urso et al "Use of random forest algorithm for predictive modelling of transfer factor soil-plant for radiocaesium: a feasibility study " - journal of environmental radioactivity 270 (2023) 107309

Stratification des points par probabilité de changements

Des échantillons sont ensuite extraits à partir de cette stratification, en vue d'être interprétés et validés visuellement au sein de la plateforme Collect Earth Online.

- **Système d'échantillonnage et Interprétation des échantillons**

Au total, 3000 échantillons ont été extraits, mais 2817 ont finalement pu être interprétés visuellement par dix interprètes. Le détail de la collecte et du contrôle qualité est donné dans la section sur la production des données d'activités.

Les informations extraites des séries chronologiques et les données d'entraînement issues de l'interprétation visuelle via Collect Earth Online sont ensuite combinées pour générer un nouveau modèle de probabilités de changements sur la base d'une classification supervisée produite avec l'algorithme « Balanced Random Forest ». Un seuil de confiance est ensuite appliqué sur le modèle de probabilités de changements pour transformer ces estimations en une classification binaire (changements et non changements).

Annexe 3 : Harmonisation de la classification nationale avec les classes du GIEC

En 2021, le Congo a participé avec cinq autres pays d'Afrique Centrale, à une étude spécifique sur « l'estimation de la déforestation et de la dégradation des forêts et des facteurs directs actuels et historiques associés à ces processus à l'aide de SEPAL » . Pour ce faire, cette étude a capitalisé l'approche du travail de Verhegghen et al 2012 au cours duquel un système de classification régionale de 20 classes, traduit en langage LCML¹⁶, avait été développé pour la création d'une carte régionale à une résolution de 300 m.

L'UCL a poursuivi cette initiative en créant une classification régionale pour la cartographie des forêts pour la COMIFAC, composée de 29 classes, dont 16 sont des forêts. Le projet sur l'estimation de la déforestation et de la dégradation des forêts et des facteurs directs en Afrique centrale, s'est appuyé sur une agrégation de ces classes également traduite en LCML au sein du LCCS-v3 .

La stratification des classes nationales pour collecter les données d'activités, est le fruit d'une harmonisation au niveau national de la classification de l'étude régionale CAFI précédemment citée. Après avoir définis la stratification nationale, cette dernière a été harmonisée en fonction des classes du GIEC

Harmonisation de la classification nationale avec les classes du GIEC

Proposition des classes en fonction des classes du GIEC			
GIEC	Niveau1	Niveau 2	Classe propose
Terres forestières	Forêt naturelle	Forêt naturelle sur terre ferme	Forêt dense sur terre ferme
			Forêt galerie
			Forêt secondaire sur terre ferme
			Forêt claire
			Forêt claire secondaire
			Mangrove
		Forêt naturelle marécageuse	Forêt dense marécageuse
			Forêt secondaire marécageuse
	Forêt plantée		
Terres cultivées			Terres cultivées permanentes
			Terres cultivées annuelles
Prairies/Savanes			Savane arborée/arbustive
			Savane herbeuse
Terres humides			Prairie aquatique
Etablissements	Route		Zone bâtis
	espace batis		

¹⁰ Land Cover Classification System <https://www.fao.org/3/x0596e/x0596e00.htm>

Proposition des classes en fonction des classes du GIEC			
GIEC	Niveau1	Niveau 2	Classe propose
Autres terres	Autres terres		Sol nu végétation éparse
			Eau