

**RAPPORT FINAL
LIVRABLE A
LIVRABLE B
LIVRABLE C
PÉRIODE 1990-2022**

TITRE DE LA MISSION :

**RÉALISER DES CARTES
D'OCCUPATION DES SOLS À
L'AIDE D'IMAGES SATEL-
LITAIRES ET DE TECHNIQUES
SIG POUR GÉNÉRER DES
CHANGEMENTS D'OCCU-
PATION DES SOLS DE 1990-
2022 AFIN DE PASSER AU
NIVEAU 2 DANS LE SECTEUR
AFAT**

NOM DU CLIENT :

**OFFICE BURUNDAIS POUR LA
PROTECTION DE L'ENVIRON-
NEMENT (OBPE)**

**MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT,
DE L'AGRICULTURE ET DE
L'ELEVAGE, REP. DU BURUNDI**

SOUmis PAR :

CONSORTIUM ATMOS-CIDEX

Décembre 2024

PRÉAMBULE

Ce rapport final a été produit dans le cadre de la Mission intitulée « **Réaliser des cartes d'occupation des sols à l'aide d'images satellites et de techniques SIG pour générer des changements d'occupation des sols de 1990-2022 afin de passer au niveau 2 dans le secteur AFAT** ».

Il fait suite au rapport provisoire soumis par le Consortium ATMOST-CIDEX à l'Office Burundais pour la Protection de l'Environnement (OBPE).

Le rapport provisoire a été validé lors de l'atelier tenu à Bujumbura le 23 décembre 2024. Ainsi, le présent rapport final intègre les observations formulées par la Partie Burundaise lors du processus de validation.

Le rapport comprend deux parties, qui couvrent les Livrables A, B et C demandés dans les termes de référence de l'étude.

La **Partie 1** couvre le Livrable A, qui porte sur la Cartographie de l'occupation du sol et des changements survenus pendant la période 1990-2022.

La **Partie 2** couvre les Livrables B et C, portant respectivement sur l'estimation de la biomasse et des facteurs d'émission propres du pays, ainsi que l'analyse de leurs variations durant la même période 1990-2022.

Un autre rapport complémentaire accompagne le présent rapport final sous forme d'un document séparé. Il porte sur les formations réalisées dans le cadre du projet et les guides et matériels utilisés pour ce faire.

PARTIE 1

RAPPORT SUR LE LIVRABLE A : OCCUPATION ET CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES PAR TÉLÉDÉTECTION

TABLE DES MATIÈRES

PRÉAMBULE	i
PARTIE 1: RAPPORT SUR LE LIVRABLE A	
LISTE DES FIGURES.....	3
LISTE DES TABLEAUX.....	3
LISTE DES ACRONYMES	4
1. CONTEXTE.....	5
2. RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA MISSION	5
3. STRUCTURE DE LA MISSION.....	6
4. CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION DU SOL.....	7
4.1 CHOIX DES IMAGES.....	7
4.2 PRODUCTION DES MOSAIQUES D'IMAGES COUVRANT LE TERRITOIRE	8
4.3 RÉALISATION DES CARTOGRAPHIES PRÉLIMINAIRES	10
4.3.1 Typologie préliminaire	10
4.3.2 Classification préliminaire	10
4.4 DONNÉES DE RECONNAISSANCE SUR LE TERRAIN.....	11
4.5 PRODUCTION DES CARTES D'OCCUPATION DU SOL POUR CHAQUE PÉRIODE.....	12
4.5.1 Typologie des classes	12
4.5.2 Classification supervisée	13
4.5.3 Correction des classifications par image-interprétation assistée	14
4.5.4 Validation des classifications	14
4.5.5 Cartographies finales de l'occupation du sol.....	16
4.6 SUPERFICIES DES CLASSES D'AFFECTATION DES TERRES.....	17
4.6.1 Résultats selon la typologie nationale.....	17
4.6.2 Résultats selon les catégorisations du GIEC	19
4.7 CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES SELON LA TYPOLOGIE NATIONALE	20
4.8 CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES SELON LA TYPOLOGIE DU GIEC	23
5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	26
6. BIBLIOGRAPHIE.....	27
7. ANNEXES	28

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Structuration de la mission	7
Figure 2: Aperçu visuel d'exemples de composition fausse couleur (bandes 5-4-2 avec égalisation) pour les périodes 1990 (à gauche) et 2022 (à droite). Les limites du pays sont montrées en couleur noire.....	9
Figure 3: Parcours utilisés pour le pré-inventaire et la reconnaissance de terrain	12
Figure 4 : Trajectoire suivie pour le complètement du pré-inventaire	12
Figure 5: Exemple de changements de classes effectués pour des groupes de pixels.....	14
Figure 6: Aperçu de la carte d'occupation du sol de la Période 2022 : A) selon la typologie nationale, B) selon les catégories du GIEC.	16
Figure 7: Variations des superficies des classes d'occupation du sol selon la typologie nationale. 18	
Figure 8: Variations des superficies des classes d'occupation du sol selon les catégories du GIEC.	19
Figure 9: Superficies inchangées des classes d'affectation des terres entre les différentes périodes.	22
Figure 10: Résumé des superficies inchangées des classes d'affectation des terres entre les différentes périodes, selon les catégories du GIEC.	24
Figure 11: Illustration des changements survenus entre la Période 1990 et la Période 2022 pour chacune des catégories d'affectation des terres du GIEC au Burundi.....	25

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Résumé des livrables attendus	6
Tableau 2: Identification des scènes LANDSAT couvrant le territoire du Burundi	8
Tableau 3: Typologie pour la classification préliminaire temporaire	10
Tableau 4 : Typologie nationale et Typologie du GIEC utilisés (Les numéros des classes contenues dans chaque catégorie du GIEC sont aussi indiqués).	12
Tableau 5: Matrice de confusion pour l'évaluation de la précision de classification 2022.....	15
Tableau 6 : Superficies des classes d'occupation du sol Périodes 2022, 2010, 2000, 1990.	18
Tableau 7: Superficies des classes d'occupation du sol Période 1990-2022 selon les catégories du GIEC.....	19
Tableau 8: Matrice des changements d'affectation des terres entre la période 1990 et la période 2022. Les superficies indiquées sont en hectares.....	21
Tableau 9: Changements d'affectation des terres entre la période 1990 et la période 2022. Les superficies indiquées sont en hectares.	23

LISTE DES ACRONYMES

AFAT	Agriculture, Foresterie et autres Affectations des Terres
FEM	Fonds pour l'environnement mondial
GEE	Google Earth Engine
GEF	Global Environment Facility
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LULC	Land Use Land Cover (Utilisation et Occupation du Sol)
MRV	Mesurage, Rapportage, Vérification
NASA	National Aeronautics And Space Administration
OBPE	Office Burundais pour la Protection de l'Environnement
SIG	Système d'information géographique
UNEP	United Nations Environment Program

1. CONTEXTE

Le Projet « *Building capacities in Burundi to implement the Enhanced Transparency Framework under the Paris Agreement* » a été mis en place par le Gouvernement du Burundi avec les supports du Fonds pour l'environnement mondial (FEM, *Global Environmental Facility – GEF* en anglais)), et du Programme des Nations-Unies pour l'Environnement (UNEP). Il s'inscrit dans le cadre de l'initiative pour le renforcement des capacités du pays pour la transparence dans le suivi et la capitalisation des actions d'adaptation et d'atténuation en matière d'émission et de réduction des émissions des gaz à effet de serre à l'échelle nationale. Concrètement, le projet permettra d'élaborer et d'opérationnaliser un système national de Mesurage, de Rapportage et de Vérification (MRV), qui favorisera la prise en compte et l'intégration des données et des informations relatives au changement climatique, et d'améliorer la transparence dans les efforts du pays concernant les émissions et les réductions de gaz à effet de serre (GES). Le projet offre l'opportunité d'établir un système national d'inventaire des GES, et contribuera à répondre aux besoins importants de renforcement des capacités du pays dans le secteur. La mise en œuvre du projet est assurée par l'Office Burundais pour la Protection de l'Environnement (OBPE), qui relève du ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage.

L'OBPE a lancé la mission de consultation visant à réaliser des cartes d'occupation des sols à l'aide d'images satellitaires et de techniques SIG pour générer des changements d'occupation des sols de 1990-2022 afin de passer au niveau 2 dans le secteur AFAT. Cette mission comprend la mise au point des facteurs d'émissions pertinents pour le secteur de l'agriculture, de la foresterie et des autres affectations des terres (AFAT) sur l'étendue du territoire national. Elle doit permettre d'améliorer la précision d'estimation des émissions dans le secteur d'une part, mais également de renforcer les capacités des parties prenantes sur l'utilisation de l'imagerie satellitaire conformément aux lignes directrices du GIEC2006 pour la réalisation d'inventaires plus complets de GES.

Le Consortium ATMOST-CIDEX a été choisi pour exécuter la mission. Il a débuté les travaux en mars 2023. Ainsi, une pré-campagne de terrain a d'abord été effectuée pour faire la reconnaissance, collecter les informations pertinentes pour guider les classifications d'images, évaluer le nombre de placettes et leur répartition par strate d'occupation du sol. À la suite de la pré-campagne, le Consortium a entrepris l'inventaire proprement dit sur l'ensemble du territoire national.

Le présent rapport final présente les résultats de la cartographie de l'occupation du sol pendant la période 1990-2022. Cette période globale de 32 ans (plus de 3 décennies) a été divisée en quatre périodes spécifiques, soit 1990, 2000, 2010 et 2022. La carte d'occupation du sol a été produite pour chaque période. Les changements d'affectation des terres ont ensuite été analysés entre les différentes périodes, avec un accent particulier sur les 32 ans de changements entre 1990 et 2022.

2. RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA MISSION

Globalement, le projet vise l'élaboration des cartes d'occupation des sols et des différentes affectations des terres pendant la période 1990-2022 à partir d'images satellitaires, la détermination

des facteurs d'émission par classe d'occupation du sol, la détermination des facteurs d'émission propres pour le Burundi dans le secteur AFAT, ainsi que le renforcement des capacités des experts nationaux, conformément aux mécanismes de la convention Cadre des Nations Unies sur les changements Climatiques (en particulier pour le secteur AFAT). Les objectifs spécifiques se résument ainsi :

1. Réaliser à partir des données de télédétection la cartographie de l'occupation du sol et des changements d'affectation des terres depuis 1990 pour les différentes classes de terres du GIEC;
2. Déterminer les facteurs de biomasse des différentes classes et sous-classes de terres du GIEC, ainsi que les facteurs d'émission spécifiques au pays pour le secteur AFAT;
3. Développer la capacité des experts nationaux à utiliser l'imagerie satellitaire conformément aux lignes directrices du GIEC2006 pour réaliser les inventaires de GES.

Les livrables qui étaient attendus de la mission sont résumés dans le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1: Résumé des livrables attendus

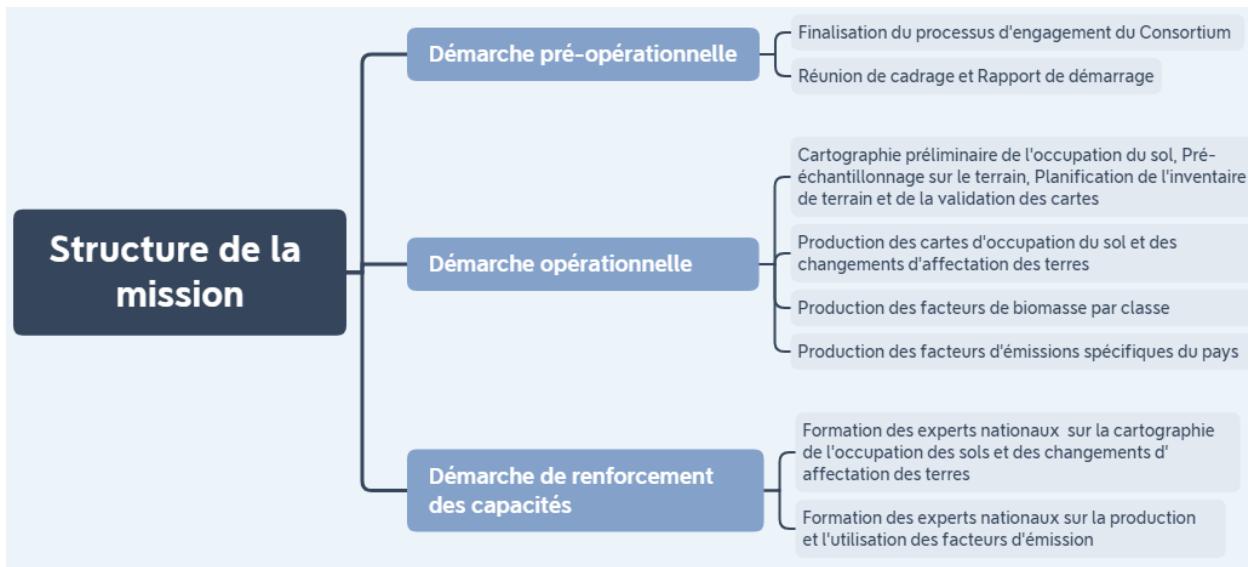
Livrable A	Rapport sur la cartographie d'occupation et les changements d'affectation des terres depuis 1990 pour les différentes classes de terres du GIEC
Livrable B	Rapport sur la détermination des facteurs de biomasse pour les différentes classes de terres
Livrable C	Rapport sur la détermination des facteurs d'émission spécifiques au pays pour le secteur AFAT
Livrable D	Matériel de formation pour les experts locaux sur l'utilisation des outils SIG pour produire des cartes d'occupation des sols
Livrable E	Matériel de formation pour les experts locaux afin de développer et d'utiliser des facteurs d'émission spécifiques au pays pour le sous-secteur des terres

Le présent rapport final présente le résumé des démarches effectuées, et décrit les résultats obtenus pour le livrable A. Il a été produit à la suite de l'approbation du rapport provisoire et des corrections demandées.

3. STRUCTURE DE LA MISSION

La participation des équipes nationales a été essentielle dans le cadre du projet. Ces équipes ont réalisé les campagnes de pré-inventaire et d'inventaire suivant les instructions du Consortium. Le schéma ci-dessous (Figure 1) permet de comprendre globalement la structuration de la mission lors de son exécution. La mise en œuvre de la composante « Démarche opérationnelle » dans la Figure 1 a permis de produire les Livrables A, B, et C. Ce rapport présente le Livrable A.

Figure 1: Structuration de la mission



4. CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION DU SOL

La cartographie de l'occupation des terres concerne l'ensemble du territoire du Burundi. Le pays continental, situé au cœur des grands lacs d'Afrique, couvre une superficie d'environ 27834 km² [Wiki 2024, World Bank 2024]. La densité élevée de la population, la forte dépendance de l'économie à l'agriculture de subsistance, ainsi que les changements climatiques sont, entre autres, des facteurs qui contribuent grandement à la dynamique de l'affectation des terres au fil des années [Kim et al. 2021]. Dans le cadre de la mission, l'analyse de cette dynamique de l'affectation des terres débute en 1990. Compte tenu de la superficie du territoire et du recul temporel à considérer, seule l'utilisation des images satellitaires pouvait être envisagée pour produire efficacement les cartographies temporales de l'occupation des terres.

4.1 CHOIX DES IMAGES

La série d'images satellitaires provenant des missions LANDSAT de la NASA (États-Unis) est la seule mieux indiquée pour couvrir la longue période de la mission de manière cohérente. Les images LANDSAT sont disponibles depuis 1984 et elles sont fournies de manière quasi régulière depuis cette date à une résolution spatiale de 30 m. D'autres données satellitaires, provenant de satellites (ex : SPOT, SENTINEL-2, etc.) existent. Elles ont leurs avantages, mais n'offrent pas une couverture temporelle homogène suffisamment longue, ou peuvent être payantes. Les séries d'images SENTINEL-2 sont particulièrement intéressantes, elles sont gratuites et offrent une meilleure résolution spatiale, mais malheureusement elles commencent seulement en 2015.

Après une analyse minutieuse, et dans le souci d'avoir une série temporelle d'images homogènes sur la trentaine d'années visée par la mission, le Consortium a choisi d'utiliser les images LANDSAT pour la cartographie de l'occupation du sol et l'étude des changements d'affectation des terres au Burundi, conformément aux directives du GIEC (voir les références GIEC 2003, 2006, et 2019).

4.2 PRODUCTION DES MOSAÏQUES D'IMAGES COUVRANT LE TERRITOIRE

Les données acquises par les satellites LANDSAT sont organisées sous forme de scènes couvrant chacune des superficies de l'ordre de 185 km x 185 km, avec des pixels ayant une résolution de 30 m. Compte des trajectoires suivies par les satellites, il est nécessaire d'avoir 4 images pour couvrir le territoire du Burundi. Les rangées et lignes correspondant à ces images dans le système d'acquisition de LANDSAT sont consignées dans le Tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2: Identification des scènes LANDSAT couvrant le territoire du Burundi

Scène	Path (Trajettoire)	Row (Rangée)
1	172	062
2	172	063
3	173	062
4	173	063

Les informations dans le Tableau 2 permettent de chercher facilement les différentes images LANDSAT disponibles sur le Burundi.

La qualité des images est déterminante dans le choix des images. Ainsi, la présence de nuages devient une contrainte. Les parties avec nuage ne sont pas utilisables dans la classification. D'autres bruits (lignages, absence de données, etc.) affectent les choix d'images. Dans le cadre de la mission, il était primordial d'avoir une couverture d'images de qualité pour couvrir l'ensemble du territoire. Malheureusement, il est pratiquement impossible dans le contexte du Burundi d'espérer avoir une couverture complète sans nuage du pays pendant les dates de l'année correspondant aux jours de passage des satellites LANDSAT. Clairement, les chances sont minces pour les satellites LANDSAT de voir un ciel clair sans nuage sur l'étendue du territoire, puisqu'ils passent aux 16 jours seulement.

Dans ces conditions, il est nécessaire de faire une opération de combinaison d'images (processus connu sous le nom de *compositing*) acquises pendant plusieurs dates différentes afin de sélectionner uniquement les pixels sans nuage. Cet exercice a montré qu'il fallait combiner jusqu'à 2 ou 3 années d'images LANDSAT pour prétendre obtenir une couverture complète du pays sans nuage. Cette contrainte majeure a imposé des pas de temps de 10 ans pour la production des cartes d'occupation du sol. Ainsi, les années considérées pour reconstituer les mosaïques d'images des différentes années sont résumées ci-dessous.

- Période 1990 : Images des années 1989, 1990, 1991
- Période 2000 : Images des années 1999, 2000, 2001
- Période 2010 : Images des années 2009, 2010, 2011
- Période 2022 : Images des années 2021, 2022, 2023.

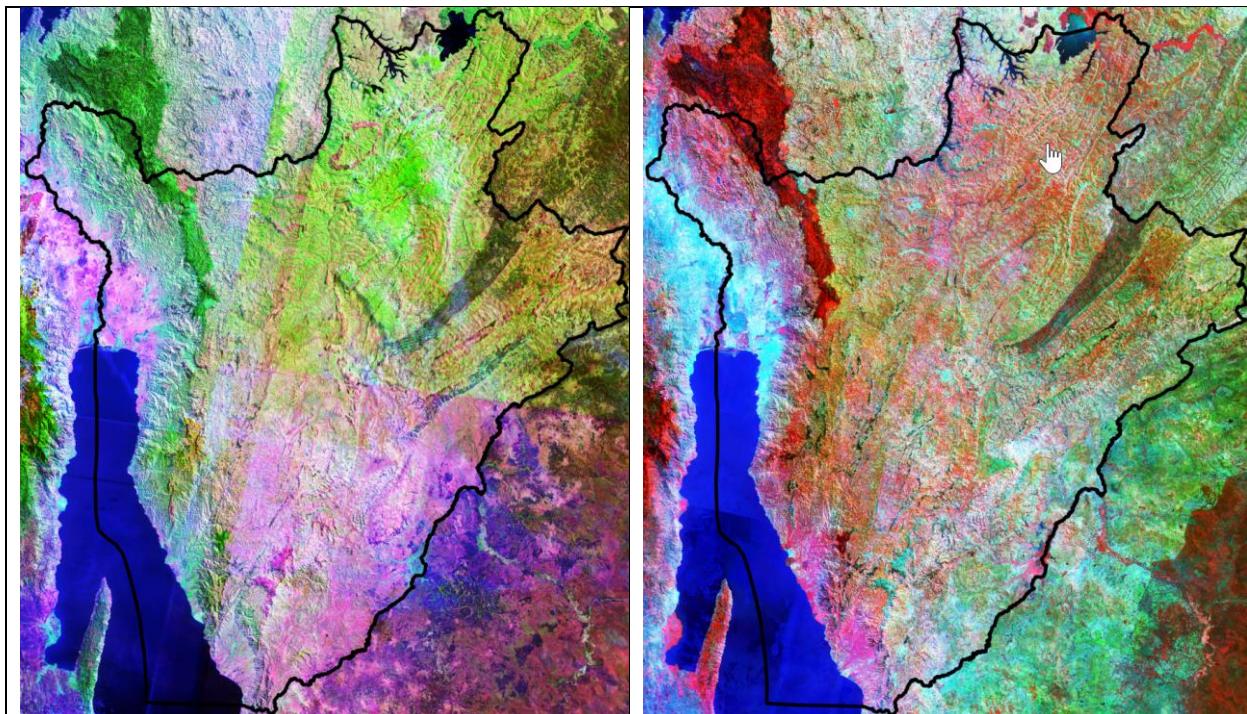
L'obligation de procéder ainsi pour reconstituer les images est uniquement liée à la disponibilité des images sans nuage. Les nuages ne sont pas les seules contraintes. Le satellite LANDSAT-7 en vigueur pendant la période 2010 souffrait d'un défaut de lignage, affectant considérablement la qualité des images et de la mosaïque produite pour cette période.

Toutes les images utilisées dans la cartographie sont parfaitement géoréférencées et corrigées des effets radiométriques et atmosphériques. Les mosaïques produites ont été découpées suivant un rectangle qui englobe l'ensemble du territoire du Burundi.

Pour réaliser les opérations de mosaïquage et de compositing, le Consortium a utilisé la plateforme *Google Earth Engine (GEE)*. C'est une plateforme gratuite, si les opérations ne sont pas effectuées pour des fins commerciales. Son utilisation requiert uniquement la création d'un compte d'usager. GEE est une plateforme puissante qui a accès à l'ensemble des archives d'images comme LANDSAT, SENTINEL, etc. Elle permet de faire les traitements dans l'infonuagique à une vitesse exceptionnelle. Malheureusement, elle demande l'écriture de codes informatiques pour exécuter les traitements désirés. Le Consortium est conscient de la difficulté d'utilisation de GEE par du personnel non initié. La Figure 2 donne l'illustration d'images composites pour les périodes 1990 et 2022.

Même si le Consortium a utilisé GEE pour réaliser ses opérations de compositing d'images et de création de mosaïques, il est important de noter que d'autres logiciels comme QGIS ou ArcGIS permettent de faire les mêmes traitements. Ainsi, le Consortium a mis l'accent sur l'utilisation de QGIS (logiciel gratuit) lors de la formation des experts nationaux (Livrable D) pour reproduire les mêmes résultats.

Figure 2: Aperçu visuel d'exemples de composition fausse couleur (bandes 5-4-2 avec égalisation) pour les périodes 1990 (à gauche) et 2022 (à droite). Les limites du pays sont montrées en couleur noire.



4.3 RÉALISATION DES CARTOGRAPHIES PRÉLIMINAIRES

Le Consortium a réalisé une cartographie préliminaire du territoire national pour faciliter les opérations de pré-inventaire, ainsi que la reconnaissance générale des principales classes d'occupation du sol sur le terrain. Pour ce faire, deux étapes ont été suivies : i) la définition de la typologie des classes (appelée Typologie préliminaire), et ii) la classification préliminaire proprement dite.

4.3.1 Typologie préliminaire

Les discussions internes entre les experts du Consortium et l'équipe locale de pré-inventaire ont permis de définir de manière préliminaire une typologie qui a été utilisée pour faire la classification préliminaire de la Période 2022. Le Tableau 3 donne un aperçu des classes d'affectation des terres. Cette typologie a été définie de sorte qu'elle puisse couvrir l'ensemble des classes potentielles et permettre par la suite les agrégations nécessaires pour reconstituer la typologie utilisée au niveau national, et celle du GIEC.

Tableau 3: Typologie pour la classification préliminaire temporaire

TYPOLOGIE PRÉLIMINAIRE TEMPORAIRE			
# Classe	Nom des classes	# Classe	Nom des classes
1	Forêts denses	11	Espaces de cultures sèches
2	Forêts claires	12	Forêts artificielles
3	Forêts à hyphaene	13	Plantations agricoles
4	Forêts temporairement inondées	14	Zones humides
5	Boisements matures denses*	15	Eaux
6	Boisements intermédiaires*	16	Savanes arborées
7	Boisements dégradés*	17	Savanes arbustives
8	Agrosystèmes sylvicoles	18	Savanes herbeuses
9	Agrosystèmes pérennes		
10	Plaines ou basfonds	*Les 3 classes de boisements = systèmes sylvicoles	

4.3.2 Classification préliminaire

Une méthode de classification basée sur l'apprentissage machine a été utilisée pour classifier l'image de la Période 2022. L'approche considérée est la méthode des arbres aléatoires, mieux connue sous son nom anglais *Random Forests* (RF). Elle a été utilisée de manière supervisée en fournissant des sites d'entraînement pour les différentes classes, basés sur l'interprétation d'images disponibles dans *Google Earth Pro*. En effet, cette plateforme a une excellente couverture de très haute résolution sur le Burundi dans les années récentes. L'interprétation visuelle de ces images permettait d'avoir une idée de l'occupation du sol, même avant les travaux de reconnaissance sur le terrain. La classification préliminaire a permis de classifier l'occupation du sol. Certaines classes étaient évidentes, comme l'eau, les forêts ou les milieux artificiels. En revanche, d'autres portaient à confusion, comme par exemple les savanes sur les sols sombres ou brûlés, les agrosystèmes, ou

mêmes les champs selon les types de sol sous-jacents. Il était donc primordial d'effectuer une reconnaissance sur le terrain.

La classification préliminaire a permis de situer rapidement les contraintes liées à l'utilisation des images satellitaires pour la cartographie de l'occupation du sol au Burundi. En général, le territoire est extrêmement morcelé, donc soumis à une grande variabilité de l'occupation du sol, parfois sur de petites superficies. En dehors de certaines forêts et de l'eau, les classes « pures » n'existent pratiquement pas. Ainsi, les agrosystèmes pérennes et les agrosystèmes sylvicoles, qui couvrent une grande partie du territoire constituent des entités très hétérogènes souvent. La nature des sols change selon qu'on soit à l'est, à l'ouest, ou au sud, ce qui se reflète sur les images et donnent l'impression de classes différentes.

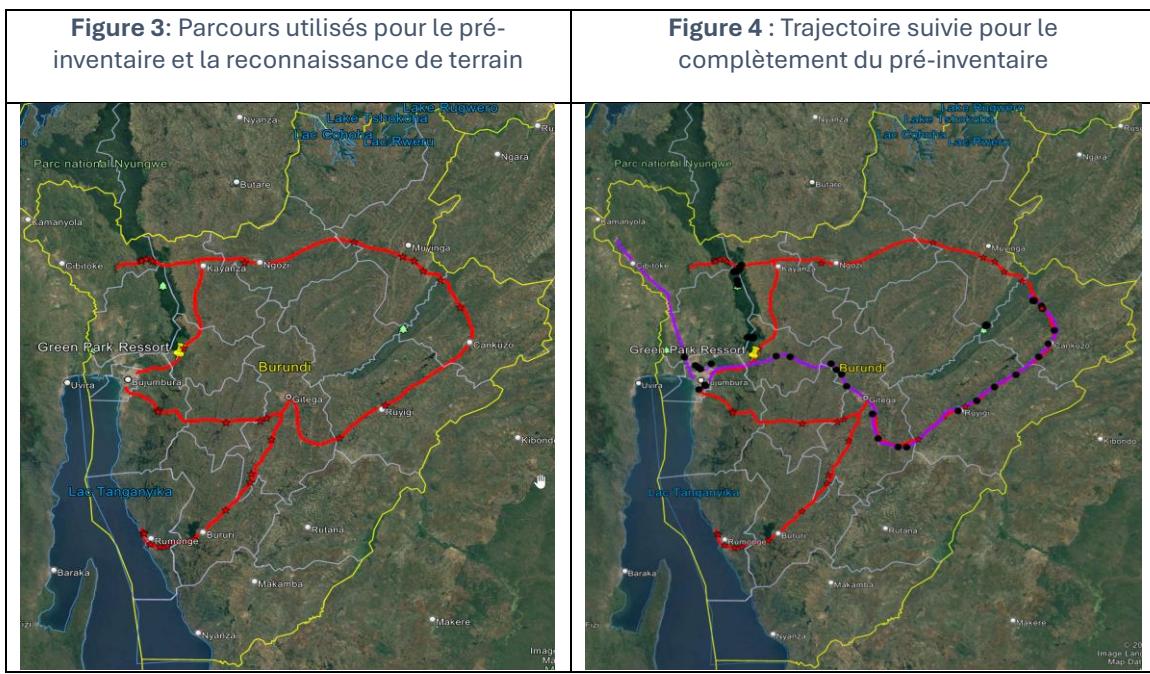
La plus grande contrainte dans le contexte du Burundi demeure la topographie très accidentée. La combinaison de la position du soleil, de celle du capteur satellitaire et de la topographie peut facilement donner des illusions de classes différentes selon que l'on soit au sommet, ou sur l'un ou l'autre des flancs d'une colline. Ainsi, la classification des images dans le contexte du Burundi, sur l'ensemble du territoire, ne peut être réalisée efficacement en utilisant uniquement les méthodes mathématiques ou statistiques. L'interprétation visuelle doit aussi être intégrée pour être plus réaliste.

4.4 DONNÉES DE RECONNAISSANCE SUR LE TERRAIN

La reconnaissance de terrain a été réalisée en deux phases. La première en mars 2024 par l'équipe locale mise en place par le Consortium pour effectuer le pré-inventaire. Les points GPS ont été collectés par cette équipe sur plusieurs parcours préalablement conçus entre les placettes.

Durant la mission, l'affectation des terres liée à chaque point GPS a été dûment déterminée, et les observations sur les différentes occupations étaient notées le long des trajets. La Figure 3 donne une vue d'ensemble des parcours suivis. Ces derniers permettaient de couvrir une grande partie des types d'occupation des terres du pays, et de faciliter ainsi le choix de sites d'entraînement lors de la classification des images satellitaires. Malheureusement, cette première mission n'a pas permis de relever suffisamment d'informations sur les formations savanicoles dans la partie est du pays, qui demeure actuellement les seules zones où ces types de formation persistent.

La deuxième phase de la reconnaissance de terrain a été effectuée par l'équipe locale en présence des experts SIG et AFAT du Consortium en avril 2024. Elle visait à pallier le manque d'informations sur les zones de savanes dans l'est, les savanes à hyphaene, les formations dans la réserve du Rusizi, ainsi que les plaines agricoles et les palmeraies (forêts artificielles) dans la partie nord-ouest. Ainsi, une expédition a été menée en suivant le parcours de Bujumbura jusqu'au Parc national du Ruvubu dans l'Ouest du pays. Au cours de ce déplacement, des relevés étaient faits systématiquement le long du trajet pour caractériser les classes d'occupation du sol. Un trajet a aussi été effectué de Bujumbura à la frontière du Congo RDC pour observer le parc du Rusizi, les savanes à hyphaene et ensuite les plaines cultivées et des palmeraies. La Figure 4 montre les parcours suivis pendant cette deuxième phase.



4.5 PRODUCTION DES CARTES D'OCCUPATION DU SOL POUR CHAQUE PÉRIODE

4.5.1 Typologie des classes

Le Consortium a souhaité que la typologie préliminaire utilisée lors de la phase précédente soit mise en conformité avec la typologie communément utilisée au niveau national. Le coordonnateur de l'équipe d'inventaire a donc fait circuler l'information sur la typologie préliminaire au niveau des instances décisionnelles pour que la typologie finale à adopter soit proposée. Le retour des échanges et des concertations a permis l'adoption de la typologie résumée dans le Tableau 4. Ainsi, les cartographies finales ont été produites en utilisant cette typologie, qui est considérée comme la **typologie nationale**. Par la suite les classes ont été agrégées selon les catégories d'affectation des terres du GIEC, également visibles dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Typologie nationale et Typologie du GIEC utilisés (Les numéros des classes contenues dans chaque catégorie du GIEC sont aussi indiqués).

TYPOLOGIE NATIONALE			
# Classe	Nom des classes	# Classe	Nom des classes
1	Forêts ombrophiles de montagne	8	Cultures de rente
2	Forêts claires	9	Marais cultivées
3	Forêts sclérophyllées à Hyphaene	10	Systèmes agroforestiers
4	Forêts temporairement inondées	11	Pâturages ou savanes herbeuses
5	Boisements	12	Lacs et rivières
6	Autres terres boisées	13	Tourbières
7	Cultures vivrières	14	Milieux artificiels

TYPOLOGIE CATÉGORIES DU GIEC		
# Catégorie	Nom des catégories	Classes de la Typologie nationale contenues dans chaque catégorie
1	Terres forestières	1, 2, 3, 4, 5, 6
2	Terres cultivées	7, 8, 9, 10
3	Prairies	11
4	Zones humides	12, 13
5	Établissements	14

4.5.2 Classification supervisée

Les leçons apprises lors de la classification préliminaire de l'image mosaïque de la Période 2022 ont été exploitées lors des classifications finales pour les Périodes 2022, 2010, 2000 et 1990. La démarche simple repose sur deux étapes :

- Le choix des sites d'entraînement;
- L'utilisation d'une approche de classification supervisée;

Choix des sites d'entraînement :

Les travaux de reconnaissance sur le terrain, combinés à l'utilisation des images de haute résolution disponibles dans Google Earth Pro, ont facilité le choix des sites d'entraînement pour les différentes classes d'occupation du sol. Le maximum de sites a été pris sur chaque classe pour s'assurer d'une bonne représentativité. À ce stade, il est important de mentionner que le Consortium a utilisé la Typologie préliminaire, tel que c'est décrit à la Section 4.3.1. Cette typologie est beaucoup plus détaillée et permet de mieux séparer les classes, comparativement à la Typologie nationale. À titre d'exemple, les espaces de cultures vivrières constituent en réalité une entité très hétérogène sur l'image, à cause de la nature et de la texture des sols (sols argileux rouges, sols sablonneux, etc.), de l'état d'humidité (sec, humide), ou de la présence de culture ou non. Intégrer toutes ces variabilités à l'intérieur de la même classe conduit directement à une mauvaise classification. C'est pour cette raison que plusieurs classes relatives aux cultures vivrières ont été considérées. Toutes ces classes ont ensuite été combinées pour former une seule classe de cultures vivrières, conformément à la Typologie nationale.

Approche de classification supervisée :

L'algorithme *Random Forests* a été utilisé pour la classification des mosaïques des quatre périodes entre 1990 et 2022. Cet algorithme est disponible dans tous les logiciels gratuits ou payants qui font du traitement d'images de télédétection (QGIS, ArcGIS, GEE, etc.). Il a été utilisé ici en mode supervisé (ou dirigé), c'est-à-dire qu'il considère les sites d'entraînement collectés sur l'image pour reconstituer les signatures spectrales des classes, avant de procéder à la classification.

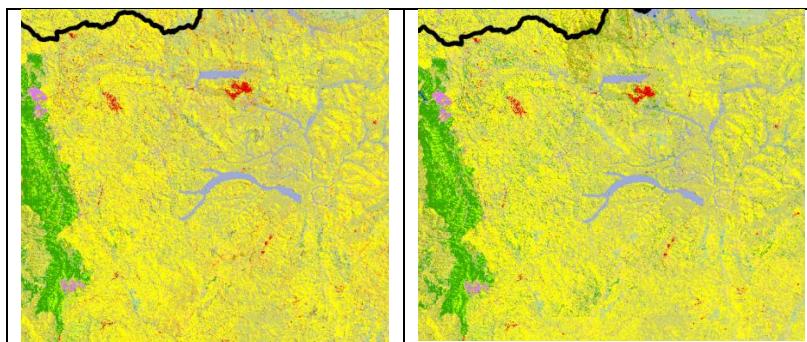
Le Consortium a utilisé le logiciel *ArcGIS Pro* pour réaliser l'ensemble des classifications. Mais les mêmes résultats peuvent être obtenus en utilisant le logiciel QGIS, qui est gratuit.

4.5.3 Correction des classifications par image-interprétation assistée

Cette étape est essentielle dans le contexte du Burundi, l'occupation du sol étant très morcelée et très hétérogène. Comme déjà mentionné, des facteurs, tel que la topographie très accidentée, sont également des sources de confusion très importantes. Dans ces conditions, les approches mathématiques peinent à identifier clairement certaines classes, en l'occurrence les boisements ou les agrosystèmes. La densité de végétation est très variable dans ces classes, constituant ainsi une source de confusion. Les flancs de collines opposés au soleil peuvent apparaître sombres sur l'image et ressembler facilement à des zones humides! Une inspection visuelle de la classification s'impose alors. Les couvertures partielles ou complètes d'images de très haute résolution disponibles dans *Google Earth Pro* deviennent alors très utiles pour les processus de classification.

Pour cette phase de correction, le Consortium a également utilisé le logiciel *ArcGIS Pro*. L'outil d'édition du pixel permet de choisir facilement un pixel ou un groupe de pixels dans un polygone et changer leur classe, si la classification supervisée est erronée. C'est un travail visuel et manuel, un peu long, mais nécessaire. La Figure 5 illustre un extrait de changements de classes effectués par interprétation visuelle à la suite de la classification supervisée.

Figure 5: Exemple de changements de classes effectués pour des groupes de pixels.



4.5.4 Validation des classifications

La validation des classifications a été effectuée pour la période la plus récente, soit 2022. En effet, les données collectées sur le terrain ne sont normalement valables que pour cette période, qui est en réalité une combinaison d'images couvrant la période 2021-2023. Pour compléter les points de terrain, plus de 6000 points ont été choisis sur l'image classifiée par un processus aléatoire stratifié. Ces points ont été projetés sur la couverture d'image à très haute résolution de Google, qui permet par interprétation visuelle d'identifier leur vraie classe. La confrontation entre les classes obtenues par le processus de classification et celles données par l'interprétation visuelle des images de haute résolution a permis de dresser la matrice de confusion et d'évaluer la précision du travail.

Les résultats sont consignés dans le Tableau 5. Le coefficient Kappa obtenu est de **89,5%**. Ce coefficient statistique est communément utilisé en télédétection pour évaluer la fiabilité des classifications par rapport à la réalité du terrain. Il mesure la force de l'accord entre les deux. Un coefficient Kappa compris entre 0,81 et 1 indique une force d'accord considérée comme « presque parfaite ». Ainsi, les résultats obtenus ici peuvent être considérés comme fiables.

Tableau 5: Matrice de confusion pour l'évaluation de la précision de classification 2022.

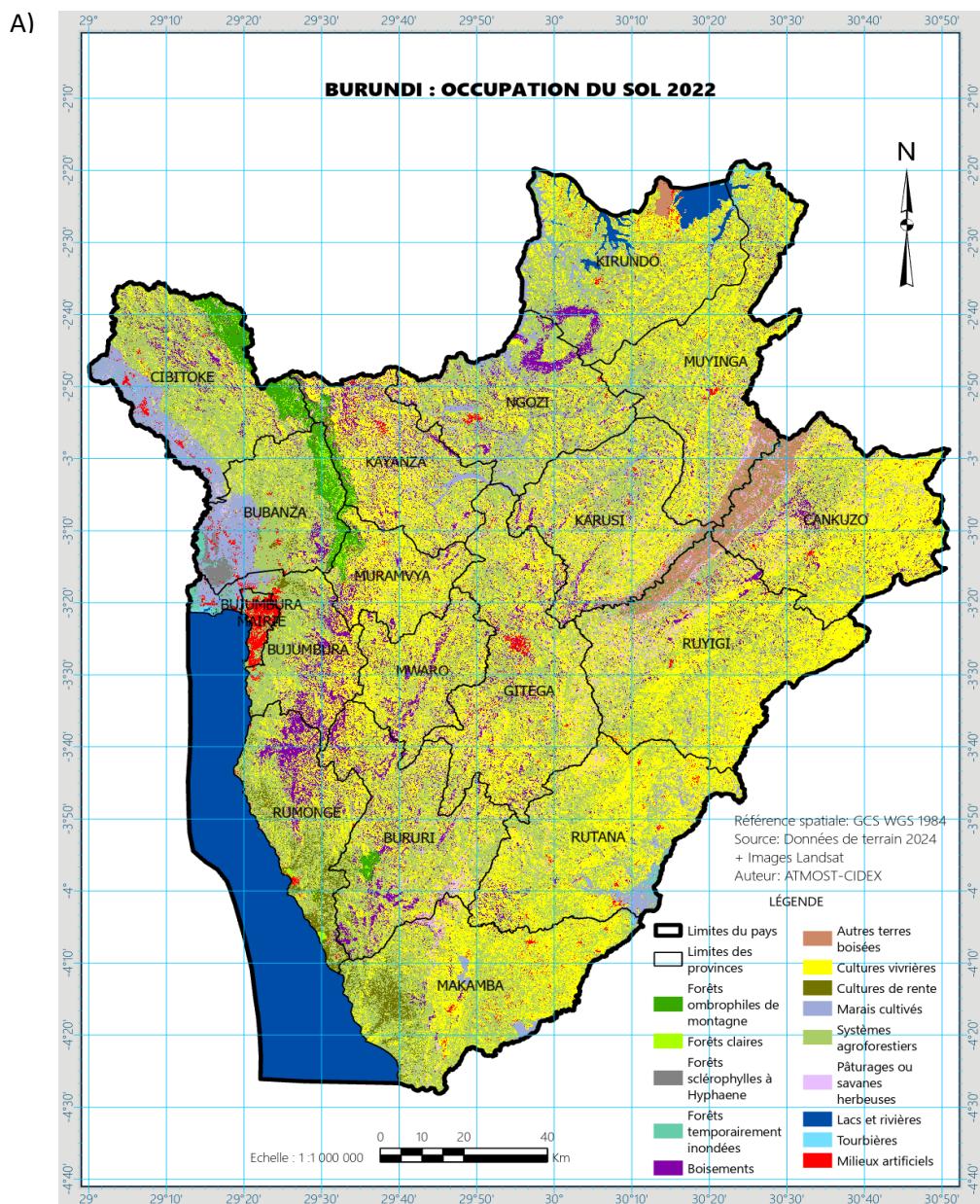
CLASSE	FOM	FC	FSH	FMAR	BOIS	ABOIS	CVIV	CRENT	MCULT	SAGRO	PATUR	LACSR	TOURB	MARTI	TOTAL	PU	Kappa	
FOM	365	32	0	0	20	8	2	1	0	1	0	0	0	0	0	429	0,851	0
FC	2	30	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	0,857	0
FSH	0	0	10	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	11	0,909	0
FMAR	0	0	0	26	10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	37	0,703	0
BOIS	0	0	0	0	352	11	22	1	4	18	4	1	0	1	414	0,850	0	
ABOIS	0	0	0	0	5	109	8	0	0	2	2	0	0	1	127	0,858	0	
CVIVR	0	0	0	0	16	8	1931	3	8	14	31	0	0	6	2017	0,957	0	
CRENT	0	0	0	0	2	0	0	80	2	1	1	0	0	0	86	0,930	0	
MCULT	0	0	0	0	8	1	3	0	251	16	7	3	0	3	292	0,860	0	
SAGRO	0	6	0	1	51	15	9	8	51	1881	15	2	0	14	2053	0,916	0	
PATUR	1	0	0	0	1	2	17	0	8	5	208	0	0	2	244	0,852	0	
LACSR	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	498	0	0	502	0,992	0	
TOURB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	13	0	17	0,765	0	
MARTI	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	67	77	0,870	0	
Total	368	68	10	27	468	154	2002	93	330	1941	269	504	13	94	6341	0	0	
PP	0,992	0,441	1,000	0,963	0,752	0,708	0,965	0,860	0,761	0,969	0,773	0,988	1,000	0,713	0,000	0,918	0,000	
Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,895	

Acronyme	Définition	Acronyme	Définition	Définition des paramètres
FOM	Forêts ombrophiles de montagne	CRENT	Cultures de rente	PP = Précision du producteur
FC	Forêts claires	MCULT	Marais cultivées	PU = Précision de l'utilisateur
FSH	Forêts sclérophyllées à hyphaene	SAGRO	Systèmes agroforestiers	Kappa = Coefficient Kappa
FMAR	Forêts temporairement inondées	PATUR	Pâturages ou savanes herbeuses	Kappa est l'indicateur de précision de la classification
BOIS	Boisements	LACSR	Lacs et rivières	
ABOIS	Autres terres boisées	TOURB	Tourbières	
CVIV	Cultures vivrières	MARTI	Milieux artificiels	

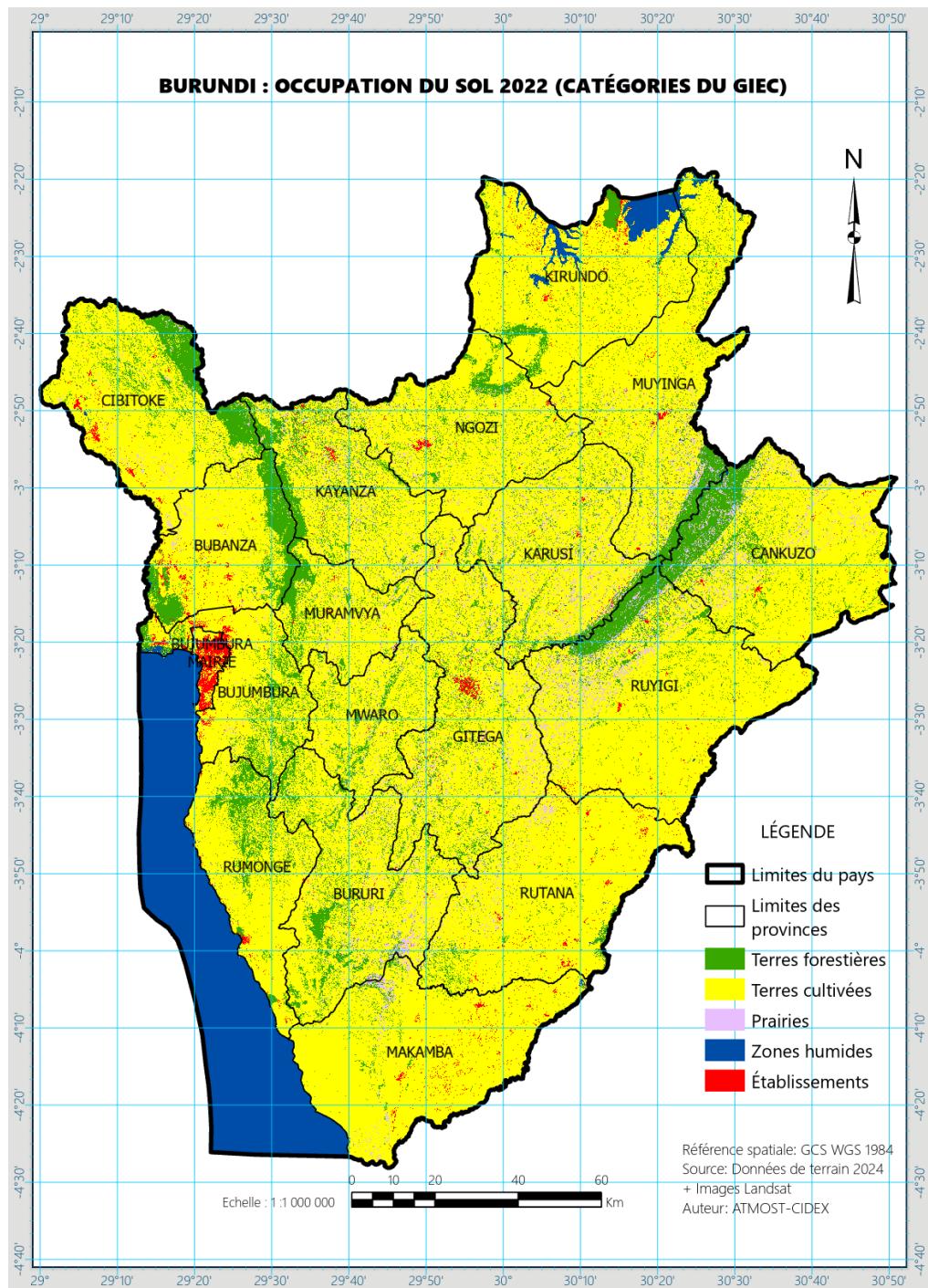
4.5.5 Cartographies finales de l'occupation du sol

Pour chacune des périodes 2022, 2010, 2000 et 1990, deux versions de cartes ont été produites. Dans la première version les classes sont agrégées pour présenter les cartes selon la typologie nationale du Burundi. Dans la deuxième version les regroupements sont faits selon les grandes catégories du GIEC. À titre d'illustration, la Figure 6 présente la cartographie de l'occupation des sols de l'année 2022 selon la typologie nationale d'une part, et selon les catégories du GIEC d'autre part.

Figure 6: Aperçu de la carte d'occupation du sol de la Période 2022 : A) selon la typologie nationale, B) selon les catégories du GIEC.



B)



4.6 SUPERFICIES DES CLASSES D'AFFECTATION DES TERRES

4.6.1 Résultats selon la typologie nationale

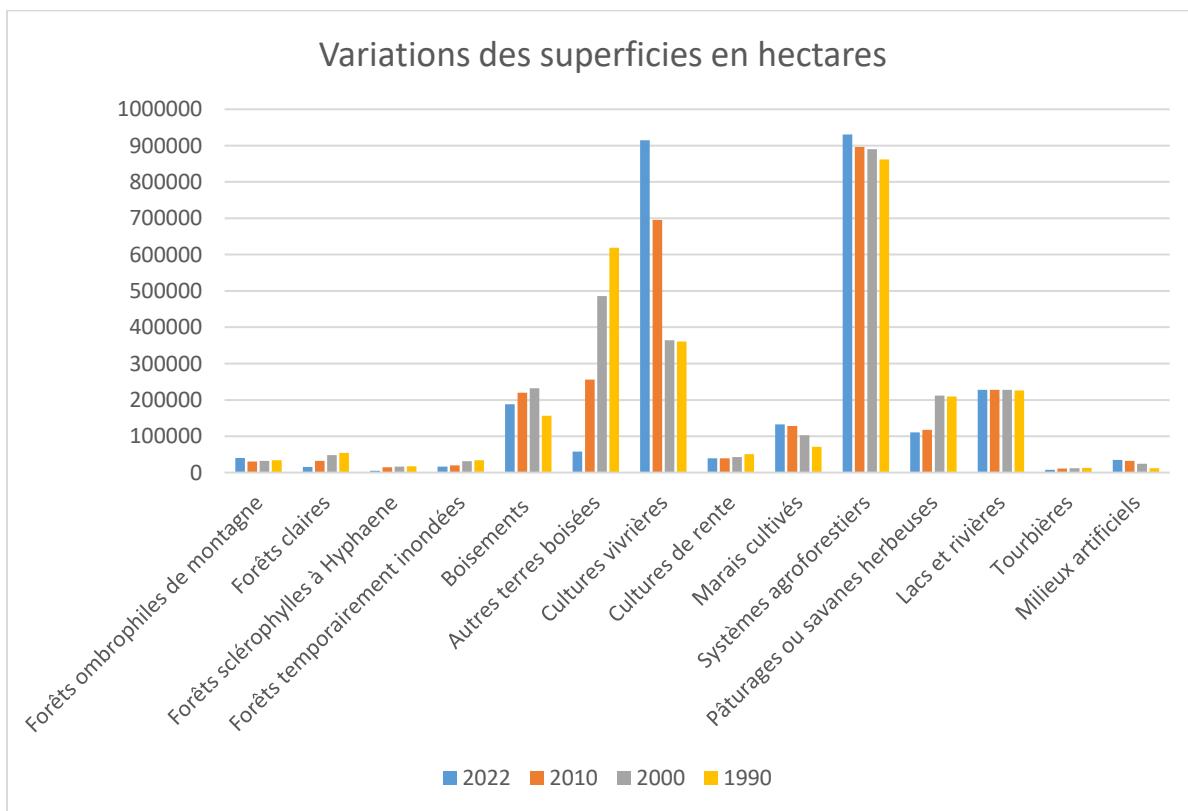
Le Tableau 6 présente les superficies des différentes classes d'affectation des terres à l'échelle du pays. Les résultats sont donnés en hectares et en pourcentages.

Tableau 6 : Superficies des classes d'occupation du sol Périodes 2022, 2010, 2000, 1990.

Classe	Superficies en hectares				Superficies en pourcentages			
	2022	2010	2000	1990	2022	2010	2000	1990
Forêts ombrophiles de montagne	40010	30769	32201	33967	1,47	1,13	1,18	1,25
Forêts claires	15665	31870	47923	54480	0,58	1,17	1,76	2,00
Forêts sclérophylles à Hyphaene	5166	14458	16000	17141	0,19	0,53	0,59	0,63
Forêts temporairement inondées	16675	20104	31007	34208	0,61	0,74	1,14	1,26
Boisements	187740	219829	232394	156692	6,90	8,08	8,54	5,76
Autres terres boisées	57540	255728	486034	619082	2,11	9,40	17,86	22,75
Cultures vivrières	914594	695301	364480	360992	33,61	25,55	13,39	13,27
Cultures de rente	39103	39324	42483	50942	1,44	1,45	1,56	1,87
Marais cultivés	132485	128284	102439	70570	4,87	4,71	3,76	2,59
Systèmes agroforestiers	931099	896249	890032	862326	34,22	32,94	32,71	31,69
Pâturages ou savanes herbeuses	110547	118108	211746	209160	4,06	4,34	7,78	7,69
Lacs et rivières	227877	227966	227603	226336	8,37	8,38	8,36	8,32
Tourbières	7854	10877	12188	13308	0,29	0,40	0,45	0,49
Milieux artificiels	34786	32274	24609	11937	1,28	1,19	0,90	0,44
Total	2721140	2721140	2721140	2721140	100	100	100	100

Les variations de superficies peuvent être observées graphiquement sur la Figure 7.

Figure 7: Variations des superficies des classes d'occupation du sol selon la typologie nationale.



Concrètement, les zones occupées par les classes forestières sont très faibles sur l'ensemble de la période 1990-2022. Aucune des classes ne dépasse 2% du territoire national. Le cumul des superficies des classes forestières donne un peu plus de 5% en 1990, mais chute à environ 3% en 2022. La classe des boisements est une classe relativement disparate. Elle peut contenir à la fois des plantations forestières matures, intermédiaires ou dégradées, mais également des formations forestières naturelles plus ou moins dégradées, c'est-à-dire des forêts secondarisées. Cette classe occupe en moyenne un peu plus de 7% du territoire pendant la période 1990-2022. Des variations importantes s'observent dans la classe « Autres terres boisées », qui regroupe en réalité les savanes arborées ou arbustives. Cette classe décroît au fil des années, passant d'environ 23% en 1990 à un peu plus de 2% en 2022. Les cultures vivrières et les systèmes agroforestiers constituent les deux principales composantes de l'occupation des terres, passant d'un cumul de 45% en 1990 à environ 68% en 2022 (soit plus de 2/3 du territoire national).

4.6.2 Résultats selon les catégorisations du GIEC

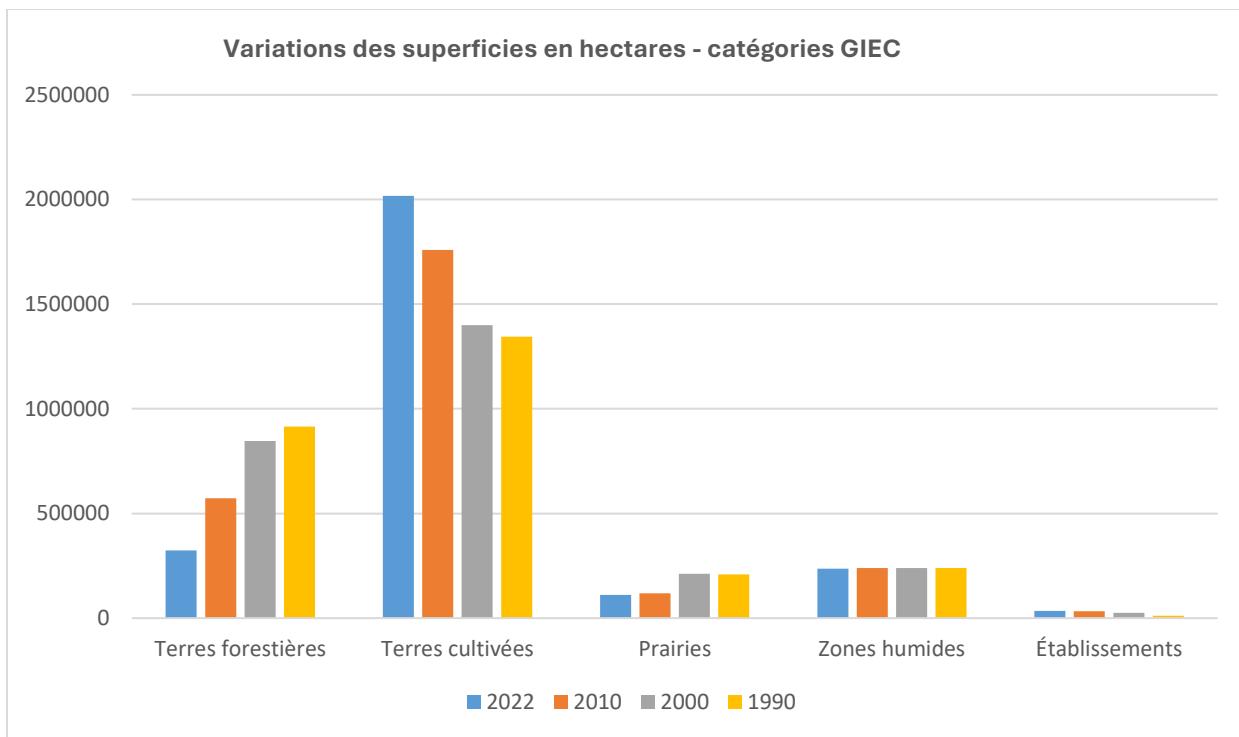
Le Tableau 7 présente les superficies des différentes classes d'occupation des terres suivant les grandes catégories du GIEC. Les résultats sont donnés en hectares et en pourcentages, comme précédemment.

Tableau 7: Superficies des classes d'occupation du sol Période 1990-2022 selon les catégories du GIEC.

Catégorie	Superficies en hectares				Superficies en pourcentages			
	2022	2010	2000	1990	2022	2010	2000	1990
Terres forestières	322796	572757	845559	915571	11,86	21,05	31,07	33,65
Terres cultivées	2017280	1759158	1399435	1344829	74,13	64,65	51,43	49,42
Prairies	110547	118108	211746	209160	4,06	4,34	7,78	7,69
Zones humides	235731	238843	239791	239644	8,66	8,78	8,81	8,81
Établissements	34786	32274	24609	11937	1,28	1,19	0,90	0,44
Total	2721140	2721140	2721140	2721140	100	100	100	100

Les variations de superficies selon les catégories du GIEC peuvent être observées graphiquement sur la Figure 8. À la lumière des résultats obtenus, nous pouvons constater une diminution progressive des terres forestières pendant les trois décennies (1990-2022). Elles couvraient environ un tiers du territoire national pendant la période 1990, mais ne représentent qu'un peu moins de 12% en 2022. En revanche, les terres cultivées croissent depuis 1990. Elles couvraient la moitié du territoire en 1990, mais représentent désormais les ¾. Les zones de prairies diminuent. Elles sont passées d'un peu plus de 7% du territoire pour les périodes 1990 et 2000 à environ 4% actuellement. Comme on pouvait s'y attendre les zones humides sont relativement stables avec le temps. Elles sont essentiellement dominées par les lacs. Les établissements augmentent continuellement, même si leur superficie est relativement négligeable, comparée à d'autres entités de surface.

Figure 8: Variations des superficies des classes d'occupation du sol selon les catégories du GIEC.



4.7 CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES SELON LA TYPOLOGIE NATIONALE

Dans cette section, nous évaluons les mouvements entre les différentes classes d'affectation des terres pendant la période 1990-2022. Les résultats obtenus pendant les quatre périodes cartographiées (1990, 2000, 2010, 2022) permettent d'analyser l'ensemble des changements d'une période à l'autre.

Le Tableau 8 résume les changements entre la Période 1990 et la Période 2022, soit sur une durée de plus de 30 ans. En examinant les résultats, un peu plus de 71% des Forêts ombrophiles de montagne en 1990 a été conservé jusqu'en 2022. En effet, environ 12% de ces forêts se sont classées plutôt comme des boisements, 7% comme des systèmes agroforestiers et 5% comme des forêts claires en 2022. Dans l'ensemble la classe de forêts claires a été fortement modifiée, car seulement 13% sont restés inchangés en 2022. Cette classe s'est éclatée en 2022 entre les forêts ombrophiles (environ 16%), les boisements (7%), les cultures de rente 8%, les cultures vivrières (9%), et en particulier les systèmes agroforestiers (42%). Plus de 62% des zones utilisées pour les cultures vivrières en 1990 sont restées des zones cultivées en 2022. Environ 26% des zones de cultures vivrières en 1990 se retrouvent classées comme des systèmes agroforestiers en 2022. Les marais cultivés de 1990 sont conservés en 2022 à environ 56%. Environ le quart a été converti en agroforestier. Par ailleurs, 50% des systèmes agroforestiers de 1990 n'ont pas changé. Le tiers a été transformé en zones de cultures vivrières. Il y a un mouvement naturel entre ces deux classes. Les surfaces d'eau sont pratiquement restées inchangées à plus de 99%. En revanche les tourbières ont subi des perturbations importantes, et seulement 8% d'entre elles sont restées des tourbières en 2022. Plus de 40% de ces tourbières sont désormais classées dans les marais cultivés. Les autres détails des changements peuvent être examinés dans la matrice du Tableau 8.

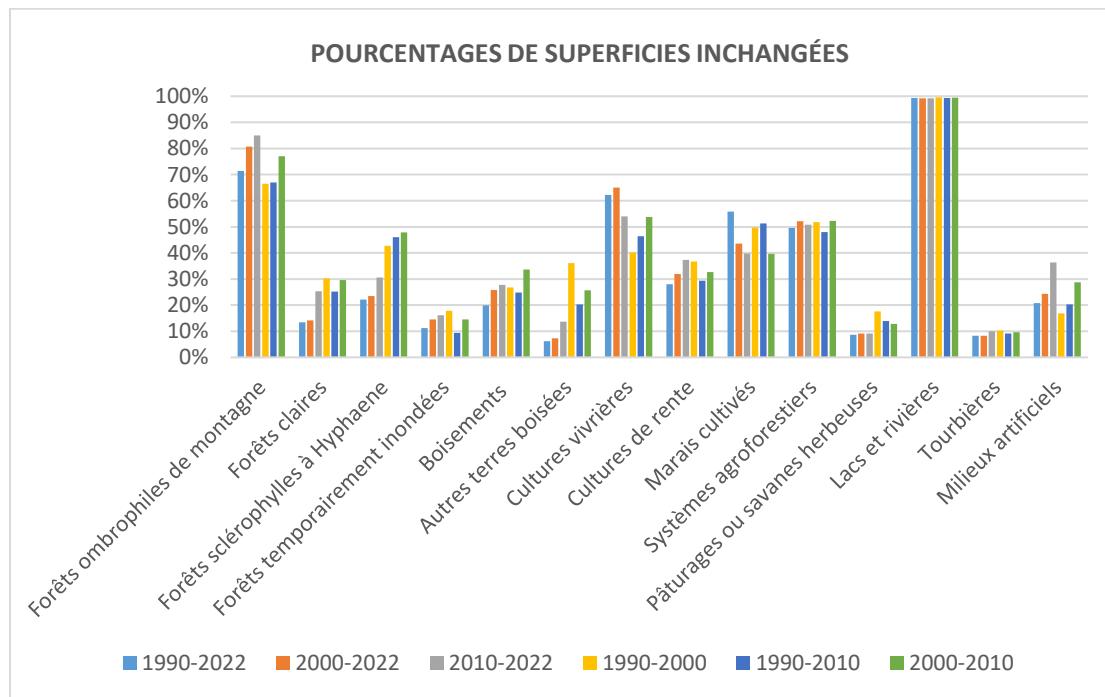
Tableau 8: Matrice des changements d'affectation des terres entre la période 1990 et la période 2022. Les superficies indiquées sont en hectares.

1990→ 2022 ↓	FOM	FC	FSH	FMAR	BOIS	ABOIS	CVIV	CRENT	MCULT	SAGRO	PATUR	LACSR	TOURB	MARTI	TOTAL 1990	% AN 1990
FOM	24257	1684	0	40	3985	230	224	547	43	2478	325	15	134	7	33967	71,41%
FC	8444	7302	0	76	4053	424	5283	4491	213	22645	1421	2	31	95	54480	13,40%
FSH	0	0	3800	707	0	31	88	70	9401	730	32	18	20	2244	17141	22,17%
FMAR	396	181	214	3853	2151	890	3010	662	8817	11060	532	636	1212	594	34208	11,26%
BOIS	1300	649	2	914	31134	1666	41599	2176	4811	63761	6484	474	1053	668	156692	19,87%
ABOIS	4251	1876	0	4452	66459	38408	226765	4426	21185	207460	37001	420	1368	5010	619082	6,20%
CVIV	49	523	1	281	14442	2028	224367	1602	5550	93369	14875	18	112	3775	360992	62,15%
CRENT	113	379	2	34	1215	276	3983	14269	174	29304	642	26	10	514	50941	28,01%
MCULT	279	95	244	1286	1751	323	6589	404	39384	15702	1595	176	304	2439	70570	55,81%
SAGRO	525	2516	13	2824	50587	6179	290271	8743	29425	427682	29144	447	1874	12097	862326	49,60%
PATUR	369	421	1	579	11055	6903	108726	1446	6251	50964	17973	138	165	4171	209160	8,59%
LACSR	6	6	1	105	66	5	12	32	220	575	11	224805	441	51	226336	99,32%
TOURB	11	23	729	1415	362	64	610	197	5536	1876	60	675	1103	646	13308	8,29%
MARTI	9	10	161	108	480	113	3066	37	1477	3494	452	27	27	2476	11937	20,74%

Pour les valeurs de 1990 lire les lignes. Pour les valeurs de 2022 lire les colonnes. Les éléments de la diagonale du Tableau (en couleur orange) indiquent les superficies de 1990 qui ont été conservées en 2022 pour chaque classe. La colonne « **Total 1990** » indique la superficie totale de chaque classe en 1990. La colonne « % AN 1990 » montre le pourcentage de superficie de 1990 conservée pour chaque classe en 2022. Voir le Tableau 5 pour la définition des acronymes des noms de classes.

Pour donner un portrait global des changements d'affectation des terres, nous présentons la Figure 9 dans laquelle on peut observer les superficies restées inchangées entre les différentes périodes (1990-2022, 1990-2010, 1990-2000, etc.). Les changements les plus importants apparaissent dans les tourbières, les forêts temporairement inondées, les pâturages, les forêts claires et les autres terres boisées (savanes arbustives), lesquelles sont souvent transformés en espaces de cultures vivrières, de cultures de rente, de systèmes agroforestiers ou de boisements. Les milieux artificiels, en dehors des grandes agglomérations urbaines apparaissent très changeants. Mais ces résultats doivent être interprétés avec prudence. En effet, la couverture végétale peut-être dominante dans plusieurs de ces milieux, qui peuvent se retrouver classés facilement en systèmes agroforestiers, boisements ou autres. Il est important de noter que plusieurs boisements sont des espaces très dynamiques à cause des opérations sylvicoles. Ils peuvent être récoltés, replantés, en état de régénération, peuvent apparaître très denses ou dégradés. Il n'est donc pas étonnant que des changements importants soient observés dans ces milieux d'une période, avec un taux de conservation faible. Les forêts ombrophiles de montagne se retrouvent principalement dans les réserves protégées du Parc National de la Kibira (PNK) et du Bururi. Ce qui explique le taux de conservation élevé (entre 60 et 85%) comparé à la majorité des autres classes. Les lacs et les rivières ne changent pas vraiment d'une période à l'autre pendant les 3 décennies. Cela s'explique par la présence de l'imposant lac Tangayika et des lacs importants au nord-est, qui masquent complètement les petites variations pouvant être observées dans les cours d'eau intérieurs.

Figure 9: Superficies inchangées des classes d'affectation des terres entre les différentes périodes.



Les matrices complètes des changements d'affectation des terres pour les différentes périodes présentées à la figure 9 sont données en annexe. Elles permettent de voir les conversions entre les différentes classes.

4.8 CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES SELON LA TYPOLOGIE DU GIEC

Dans cette section, nous évaluons les changements entre les différentes classes pendant la période 1990-2022 selon les classifications obtenues en utilisant les catégories du GIEC. Comme précédemment, les résultats obtenus pendant les quatre périodes cartographiées (1990, 2000, 2010, 2022) permettent d'analyser l'ensemble des changements d'une période à l'autre.

Le Tableau 9 résume les changements entre la Période 1990 et la Période 2022. Toutes les classes d'occupation du sol du pays se retrouvent dans cinq catégories du GIEC, soit les terres forestières, les terres cultivées, les prairies, les zones humides et les établissements. En examinant les résultats, seulement 23% des terres forestières de 1990 se reclassent encore comme terres forestières en 2022. On peut donc se demander où sont-elles parties ? Eh bien, elles se retrouvent à 70% dans les terres cultivées (cultures vivrières, systèmes agroforestiers, cultures de rente). Il est important de se rappeler ici que les forêts ombrophiles et les forêts claires ne constituent qu'une petite partie de la classe des terres forestières du GIEC, qui comprennent entre autres les boisements, les savanes arborées, les savanes arbustives, etc. En dehors des zones protégées, ces différentes entités ont été très fortement modifiées au cours des trente dernières années pour satisfaire aux besoins de la population. C'est ce que les résultats reflètent clairement.

Les statistiques montrent que 89% des terres qui étaient identifiées comme des terres cultivées en 1990 sont restées des terres cultivées en 2022. Ce résultat n'est pas très étonnant, puisque la tendance est à l'augmentation des terres cultivées, vu les besoins croissants de la population, et non à leur diminution. Seulement 6% des terres cultivées en 1990 ont été converties en terres forestières (certainement des boisements). La catégorie des prairies a été très fortement modifiée, car seulement 9% des prairies sont restées prairies en 2022, alors que les 80% ont été converties en terres cultivées, et 9% se retrouvent désormais dans les terres forestières. Les zones humides restent pratiquement inchangées à 95% entre 1990 et 2022, à cause des lacs de grandes superficies qu'on retrouve dans le pays. Les établissements restent des établissements à 21% à cause des grandes agglomérations. Dans les milieux ruraux, il y a une confusion entre les champs ou souvent les terres forestières et les établissements. Ces derniers se retrouvent souvent au milieu des champs ou sont entourés d'arbres qui dominent complètement les signaux mesurés par les satellites.

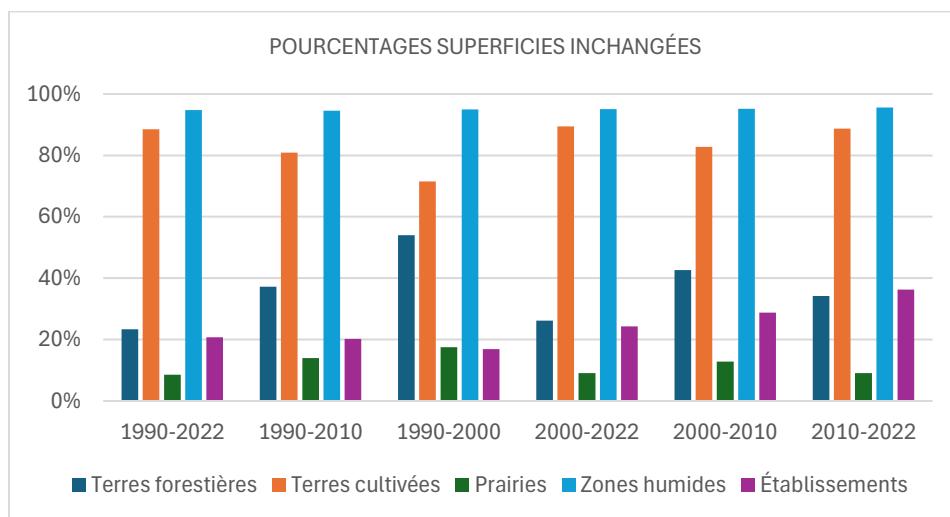
Les autres détails des changements peuvent être examinés dans la matrice du Tableau 9.

Tableau 9: Changements d'affectation des terres entre la période 1990 et la période 2022. Les superficies indiquées sont en hectares.

1990→ 2022 ↓	Terres forestières	Terres cultivées	Prairies	Zones humides	Établissements	Total 1990
Terres forestières	213830	641943	45794	5385	8618	915571
Terres cultivées	85964	1190817	46257	2966	18825	1344829
Prairies	19328	167386	17973	302	4171	209160
Zones humides	2793	9059	71	227023	697	239644
Établissements	882	8074	452	54	2476	11937
<i>Total 2022</i>	<i>322796</i>	<i>2017280</i>	<i>110547</i>	<i>235731</i>	<i>34786</i>	<i>2721140</i>

Le portrait des superficies restées inchangées entre les différentes périodes (1990-2022, 1990-2010, 1990-2000, etc.) est résumé dans la Figure 10, selon les catégories du GIEC. Les zones humides ne varient pratiquement pas d'une période à l'autre. Elles sont conservées au-delà de 95% en général. Les terres qui étaient cultivées avant restent aussi des terres cultivées à plus de 80%, sauf entre 1990 et 2000 où un changement important s'est opéré, avec seulement 71% des terres cultivées de 1990 qui sont restés inchangés. Les terres forestières en 1990 sont restées inchangées en 2000 à plus de 50%. Mais les conversions ont été grandes par la suite, car seulement 23% des terres forestières de 1990 sont restées des terres forestières en 2022. Les zones classées comme les prairies ont été fortement perturbées d'une période à l'autre sans exception. Le niveau de conservation n'a jamais dépassé 20%. Il faut signaler que plusieurs jachères et zones herbacées se retrouvent dans cette catégorie. Ces zones sont souvent des zones de transition qui se transforment par la suite en champs, en plantations, ou en systèmes agroforestiers. Ce qui peut expliquer éventuellement leur caractère très dynamique. La dynamique des établissements a déjà été mentionnée. Seuls les milieux artificiels non perturbés par la présence de couvert végétal apparaissent conservés. La forte présence de végétation dans certaines parties des villes, des villages, ou autour des routes font qu'ils peuvent se retrouver dans d'autres classes.

Figure 10: Résumé des superficies inchangées des classes d'affectation des terres entre les différentes périodes, selon les catégories du GIEC.

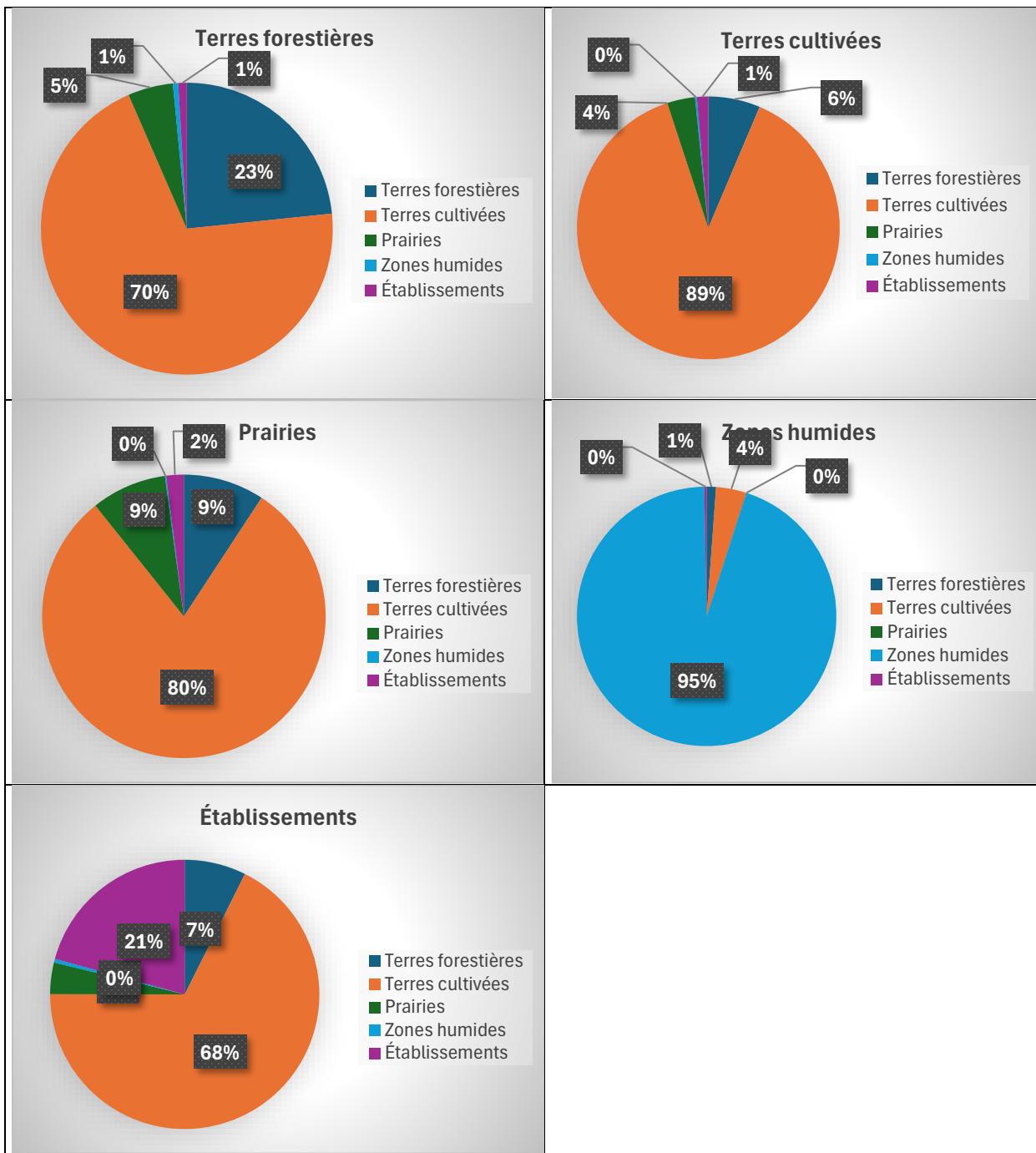


Les matrices complètes des changements d'affectation des terres pour les différentes périodes présentées à la Figure 10 sont données en annexe. Elles permettent de voir les conversions entre les différentes classes.

La Figure 11 ci-dessous montre comment les affectations des terres ont changé vers d'autres catégories entre 1990 et 2022. On peut ainsi répondre à des séries de questions du genre que sont devenues en 2022 les superficies qui étaient des terres forestières en 1990 ? Que sont devenues les terres cultivées, etc. À titre d'exemple, les terres forestières de 1990 sont restées des terres forestières en 2022 à 23%, 70% d'entre elles ont été converties en terres cultivées, 5% en prairies, environ 1% en zones humides et environ 1% en établissements. Les terres qui étaient classées

comme des terres cultivées en 1990 sont demeurées des terres cultivées à 89% en 2022, alors que 6% de ces terres sont devenues des terres forestières, 4% des prairies, et environ 1% des établissements. Les conversions des autres catégories peuvent être interprétées de la même manière en examinant la Figure 11.

Figure 11: Illustration des changements survenus entre la Période 1990 et la Période 2022 pour chacune des catégories d'affectation des terres du GIEC au Burundi.



Les ventilations des changements survenus pendant les autres périodes (1990-2000, 1990-2010, etc.) sont illustrées sous forme de graphiques dans les annexes du rapport.

5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le traitement et l'analyse des images satellitaires de la série LANDSAT, combinés aux travaux de terrain et à l'utilisation d'imageries de très haute résolution spatiale de Google ont permis d'établir les cartographies de l'occupation des terres du Burundi pour les quatre périodes 1990, 2000, 2010 et 2022, soit sur plus de trois décennies. Deux versions des classifications ont été produites, l'une suivant la typologie nationale en vigueur au Burundi et l'autre selon les catégories du GIEC. La typologie nationale est plus détaillée et permet de produire des classes qui sont des sous-catégories des catégories du GIEC. Ces dernières ont été regroupées pour former les catégories du GIEC à l'échelle du pays.

Les classifications selon la typologie nationale montrent que le cumul des superficies des classes forestières naturelles (forêts ombrophiles de montagne, forêts claires, forêts sclérophylles à hyphaene, Forêts temporairement inondées) s'élevait à un peu plus de 5% du territoire en 1990, mais il chute à environ 3% en 2022. Les changements de l'occupation des terres se font en faveur principalement des cultures vivrières et des systèmes agroforestiers. Ces deux classes constituent les deux principales utilisations du territoire national. Elles occupaient 45% des superficies en 1990, mais avoisinent les 68% en 2022 (soit plus de 2/3 du territoire national).

L'examen des catégories d'affectation des terres selon la typologie du GIEC à l'échelle du pays indique une diminution progressive des terres forestières pendant les trois décennies 1990-2022. Tandis qu'elles couvraient le tiers du territoire 1990, leur superficie ne représente plus qu'environ 12% en 2022. Leurs conversions se font en faveur des terres cultivées, qui couvrent désormais les trois quarts du pays, alors qu'elles occupaient la moitié en 1990.

Les images montrent un grand effort de conservation, avec une multiplication des zones de boisements. Mais il s'agit de superficies de tailles relativement petites ou modestes, éparpillées un peu partout sur le territoire national. Plusieurs boisements changent avec le temps, car ils peuvent être récoltés et replantés, leur donnant tantôt l'allure de champs, tantôt l'allure de forêts, ou de formations forestières plus ou moins dégradées. Cette situation peut impacter les calculs de biomasse, et doit être prise en considération dans les interprétations des résultats.

La classification automatique des images de télédétection dans le contexte du Burundi, même en mode dirigé, ne peut pas garantir des résultats probants. Il est important de la compléter et de la corriger sur la base de l'interprétation visuelle. Heureusement, depuis les dernières années, des images de très haute résolution spatiale sont disponibles à travers plusieurs plateformes comme Google, ESRI, etc. Cette disponibilité demeurera, ce qui facilitera les travaux de cartographie par télédétection pour les années à venir, tout en augmentant leur niveau de précision.

6. BIBLIOGRAPHIE

GEF: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiZ8lTvz92EAxUNMlkFHVv0BNAQFnoECBYQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.thegef.org%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2F2021-11%2FEN_GEF.C.61.Inf._15_Progress_Report_CBIT.pdf&usg=AOvVaw31sQbkEshdYRZrGswRU8LO&opi=89978449

WB 2024 <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/burundi>

Kim, J.-B., Habimana, J.deD., K.S.-H., Bae, D.-H., 2021. Assessment of Climate Change Impacts on the Hydroclimatic Response in Burundi Based on CMIP6 ESMs. *Sustainability*, Vol. 13(21), doi:[10.3390/su132112037](https://doi.org/10.3390/su132112037)

IPCC 2019: 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>

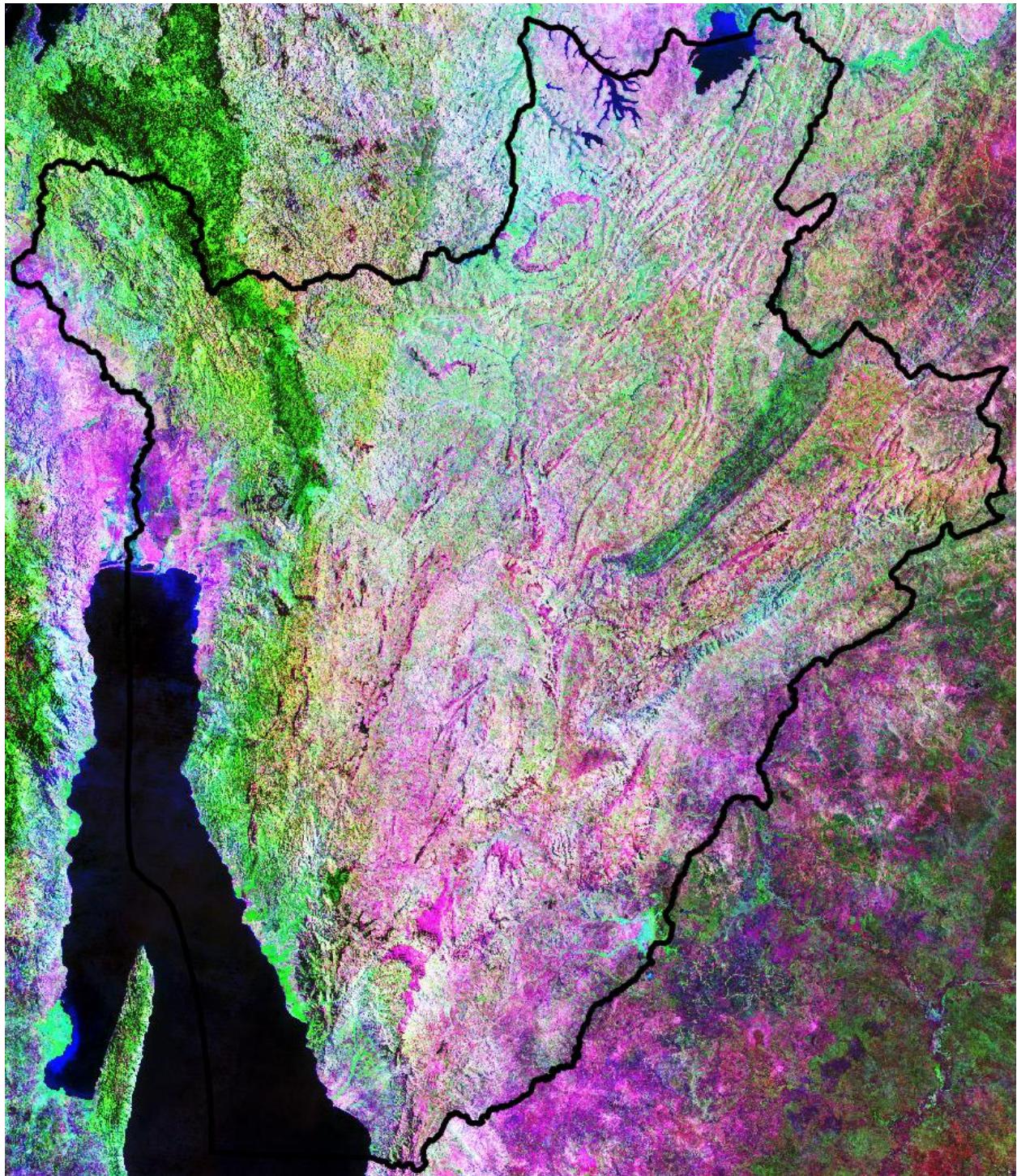
IPCC 2006: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.

IPCC 2003 : Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/GPG_LULUCF_FULLEN.pdf&ved=2ahUKEwin48bWwKqJAxVTmYkEHbr6BYoQFnoECBMOAQ&usg=AOvVaw06GK8EdODea83ZgYkY9Mtu (format pdf, 590 pages).

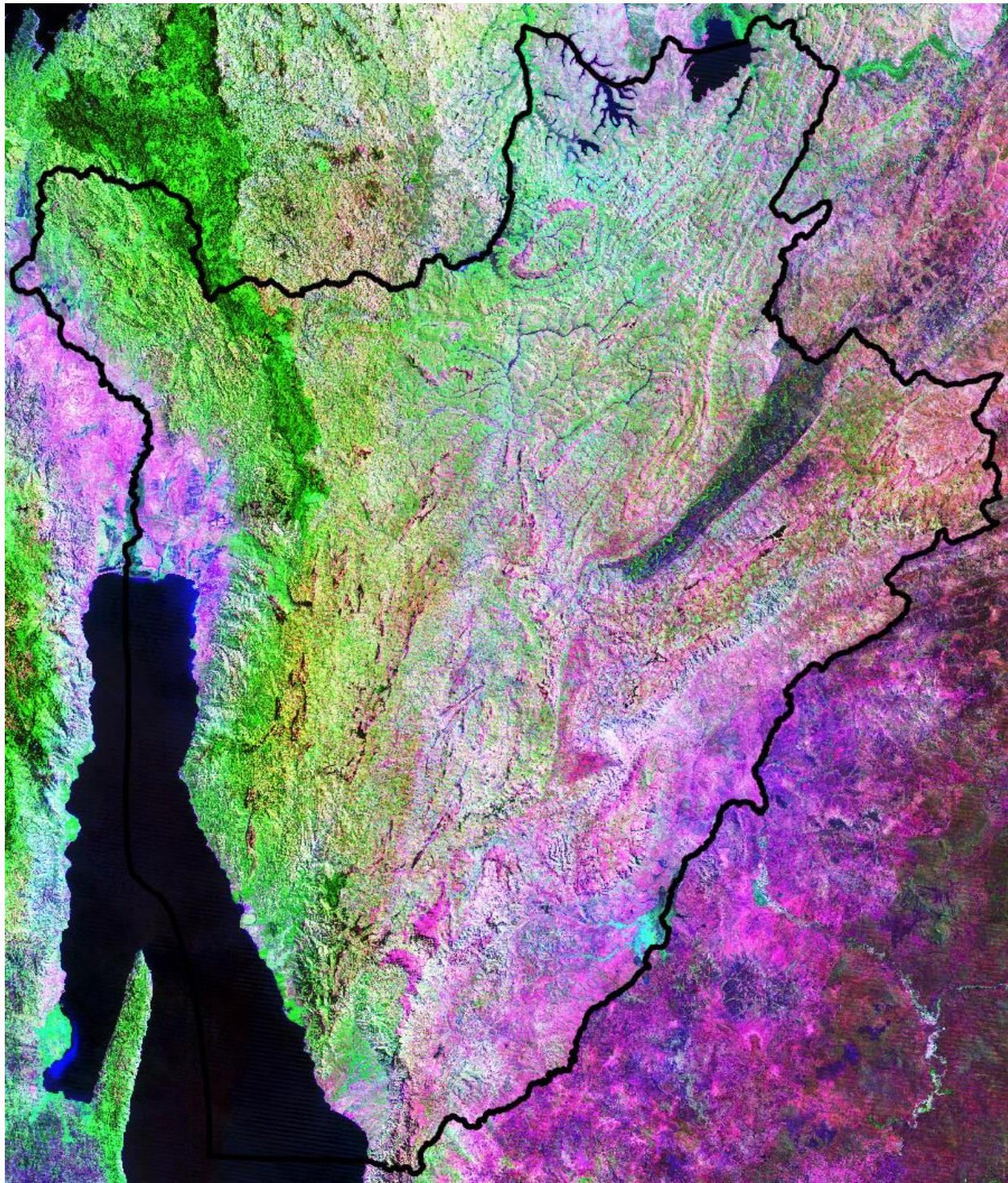
Wiki 2024: <https://en.wikipedia.org/wiki/Burundi>

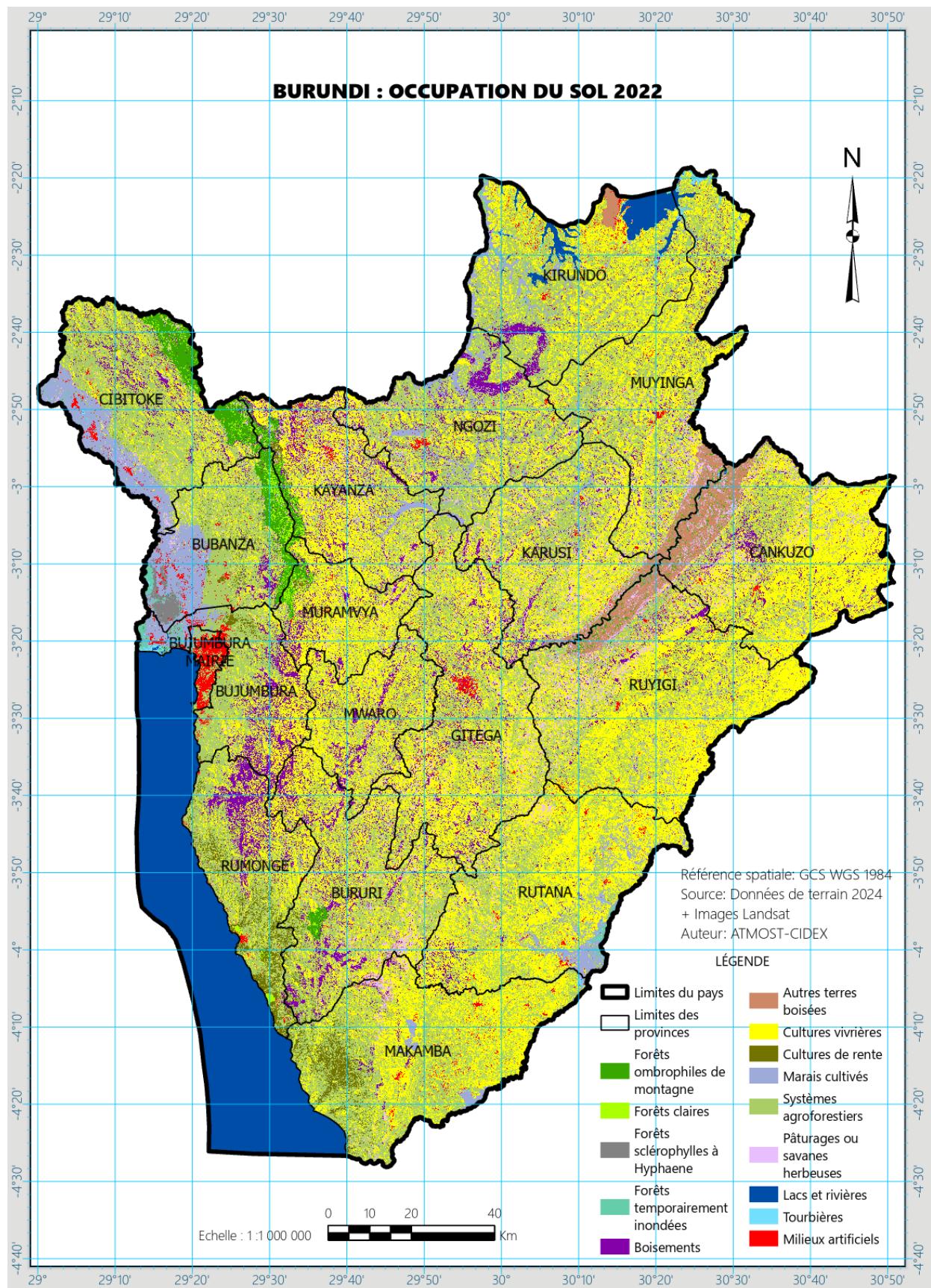
7. ANNEXES

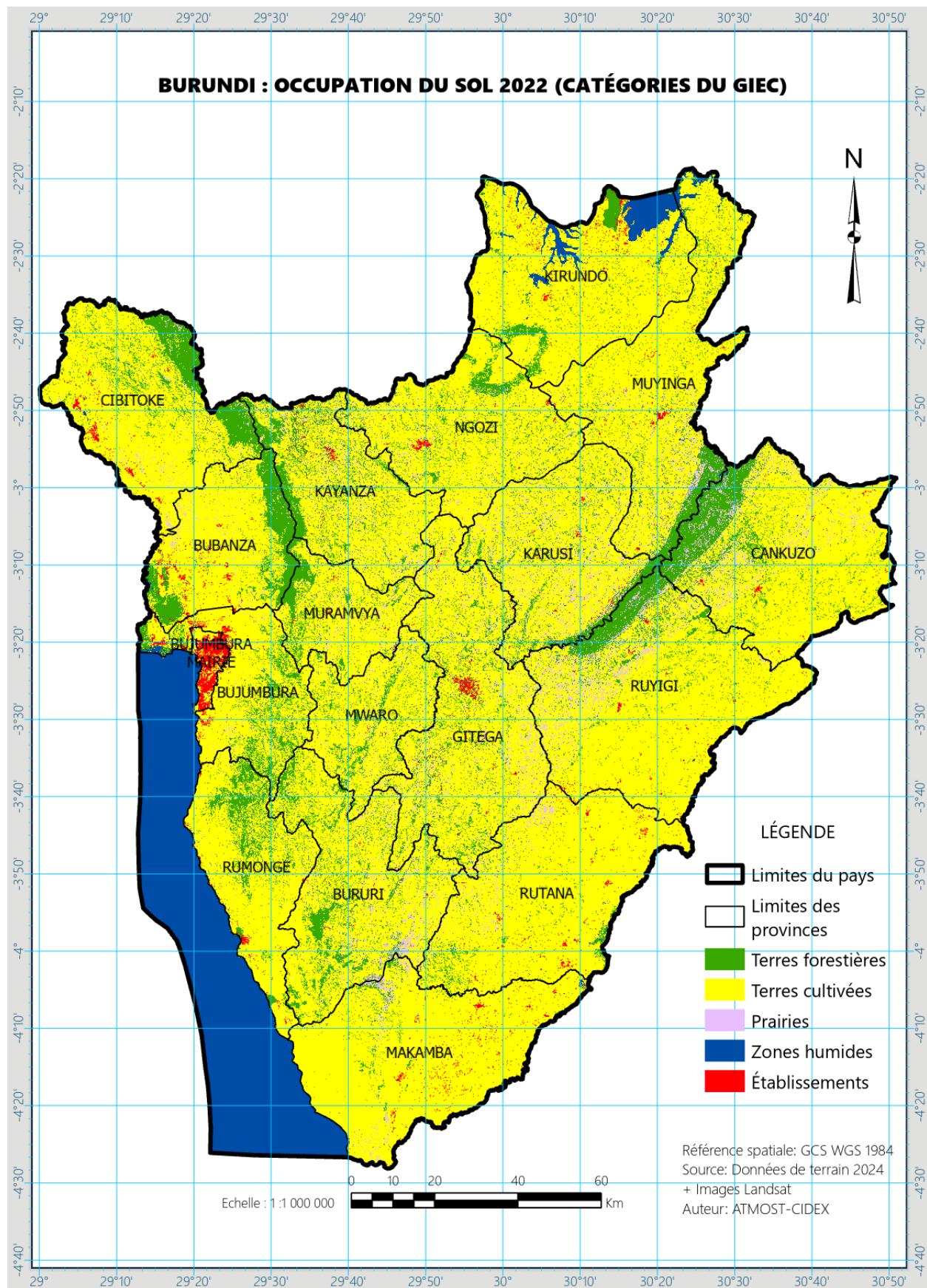
APERÇU – IMAGE COMPOSITE FAUSSE COULEUR BURUNDI 2000 (COMPOSITION 5-4-2)

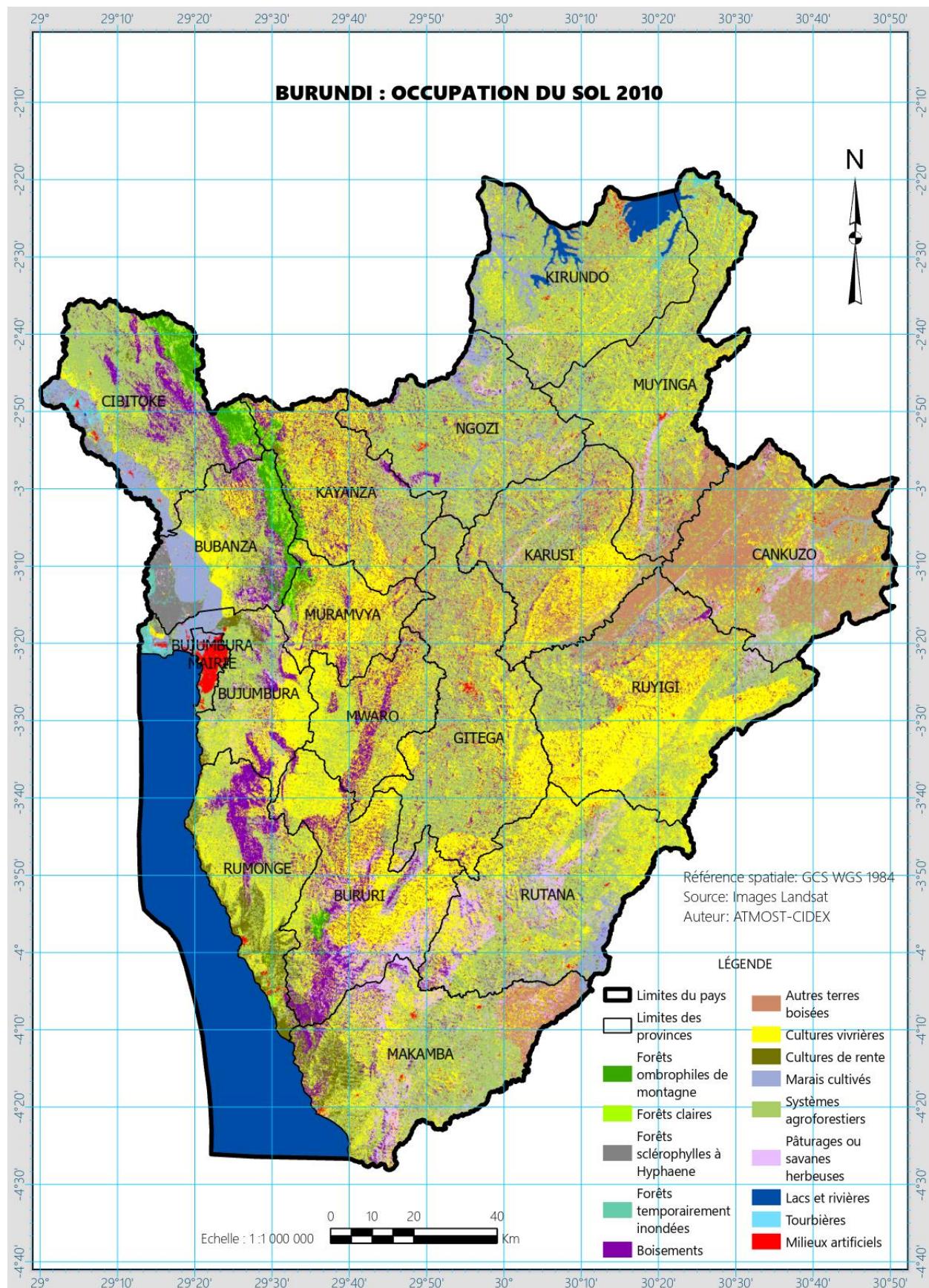


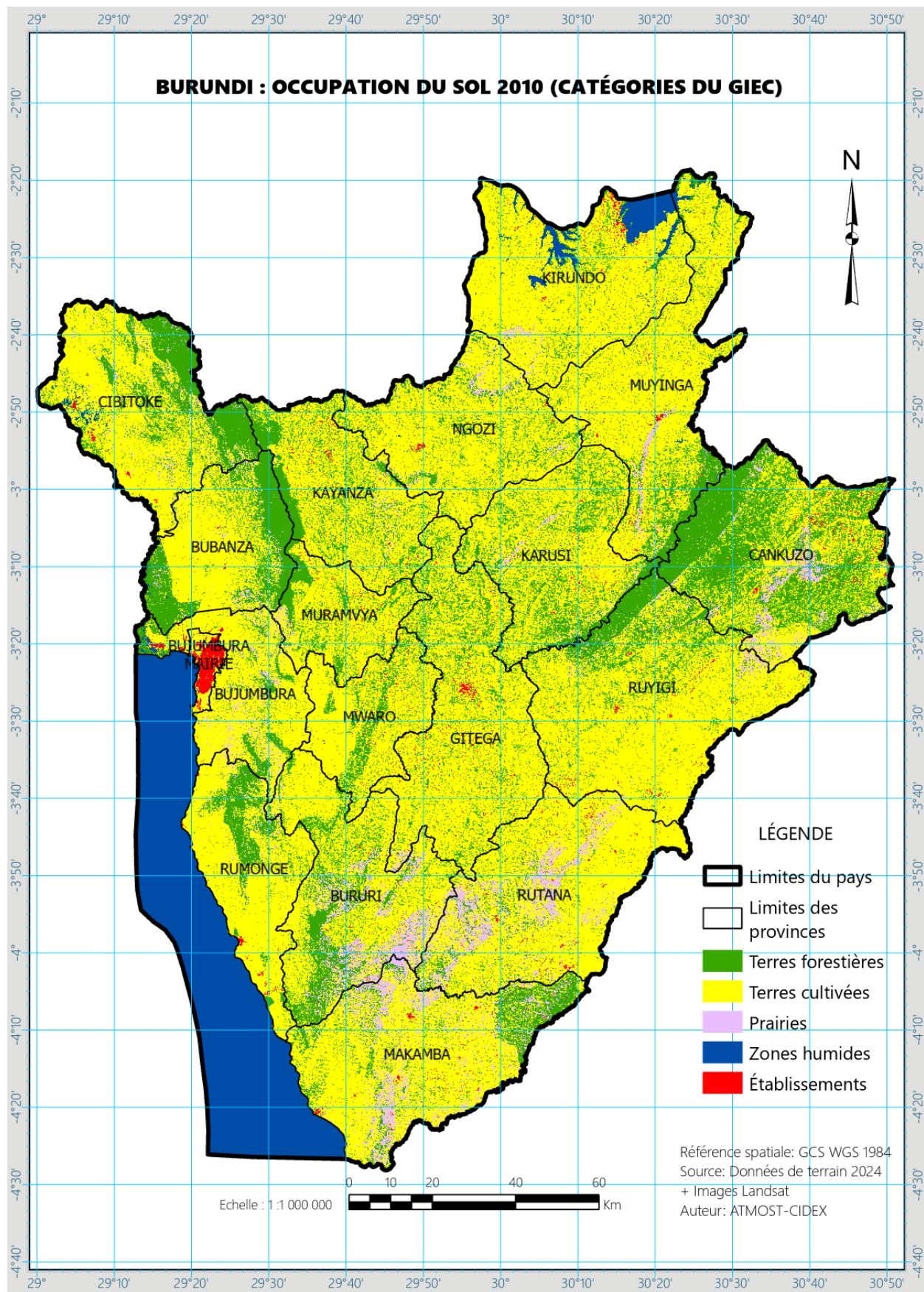
APERÇU – IMAGE COMPOSITE FAUSSE COULEUR BURUNDI 2010

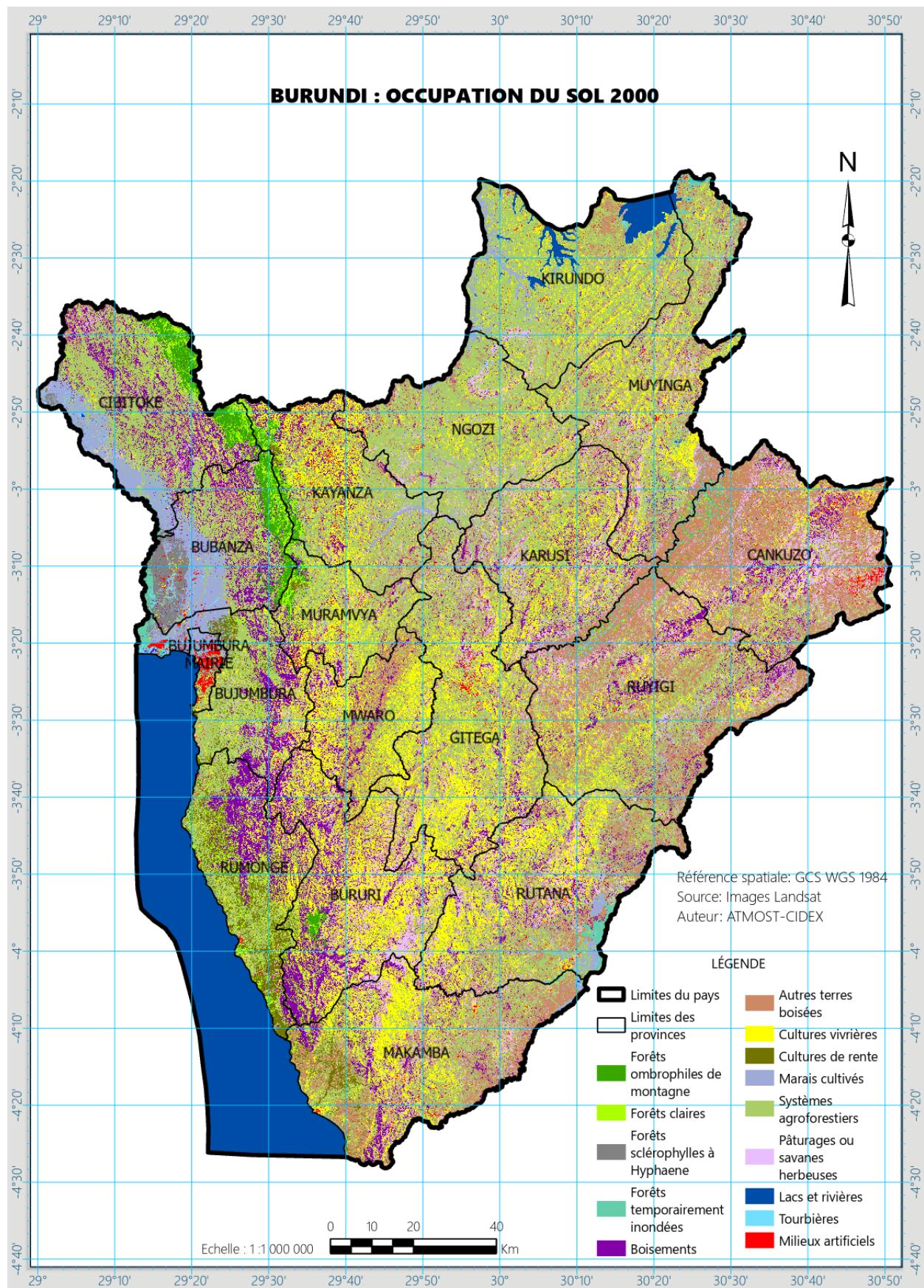


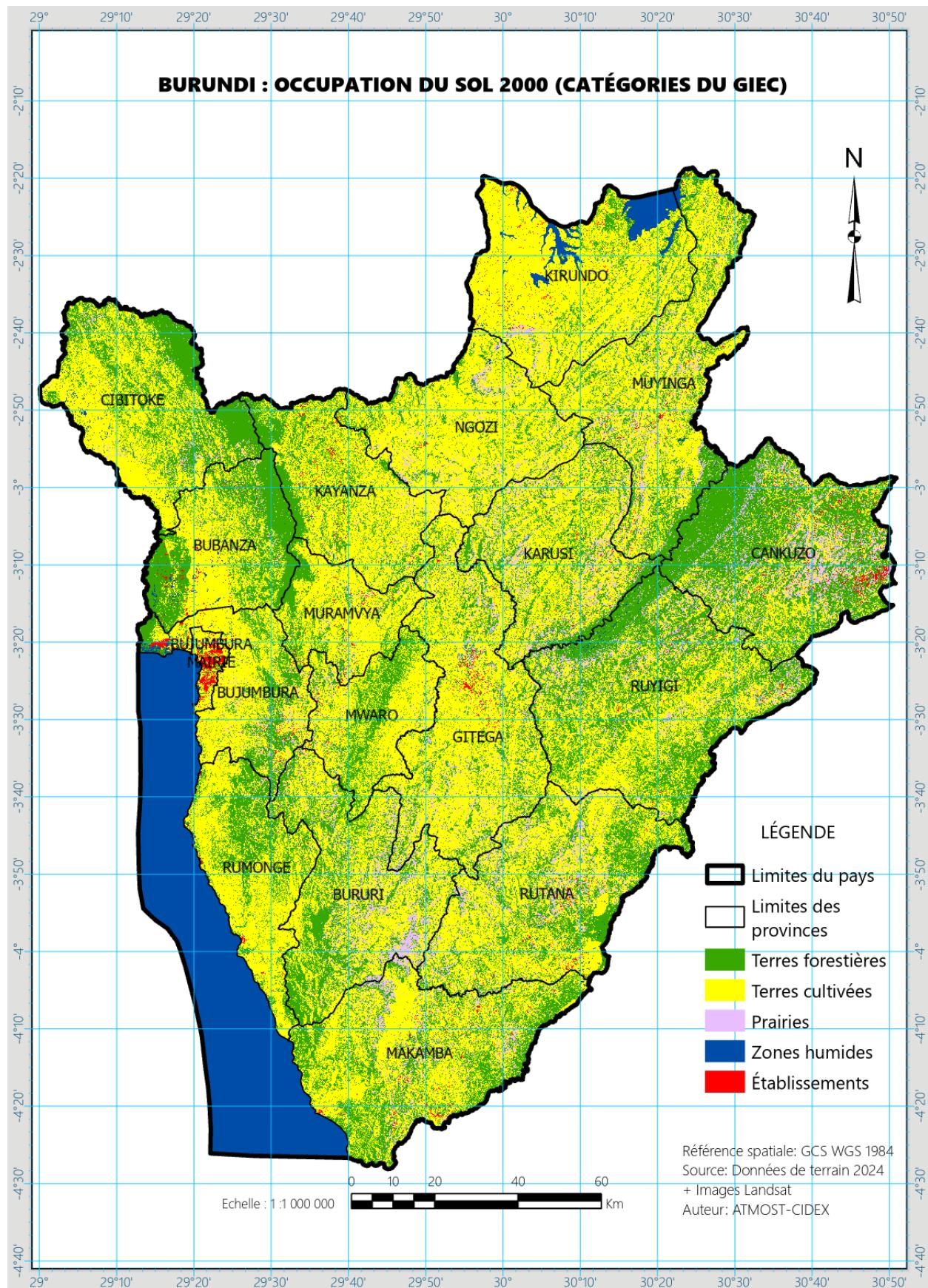


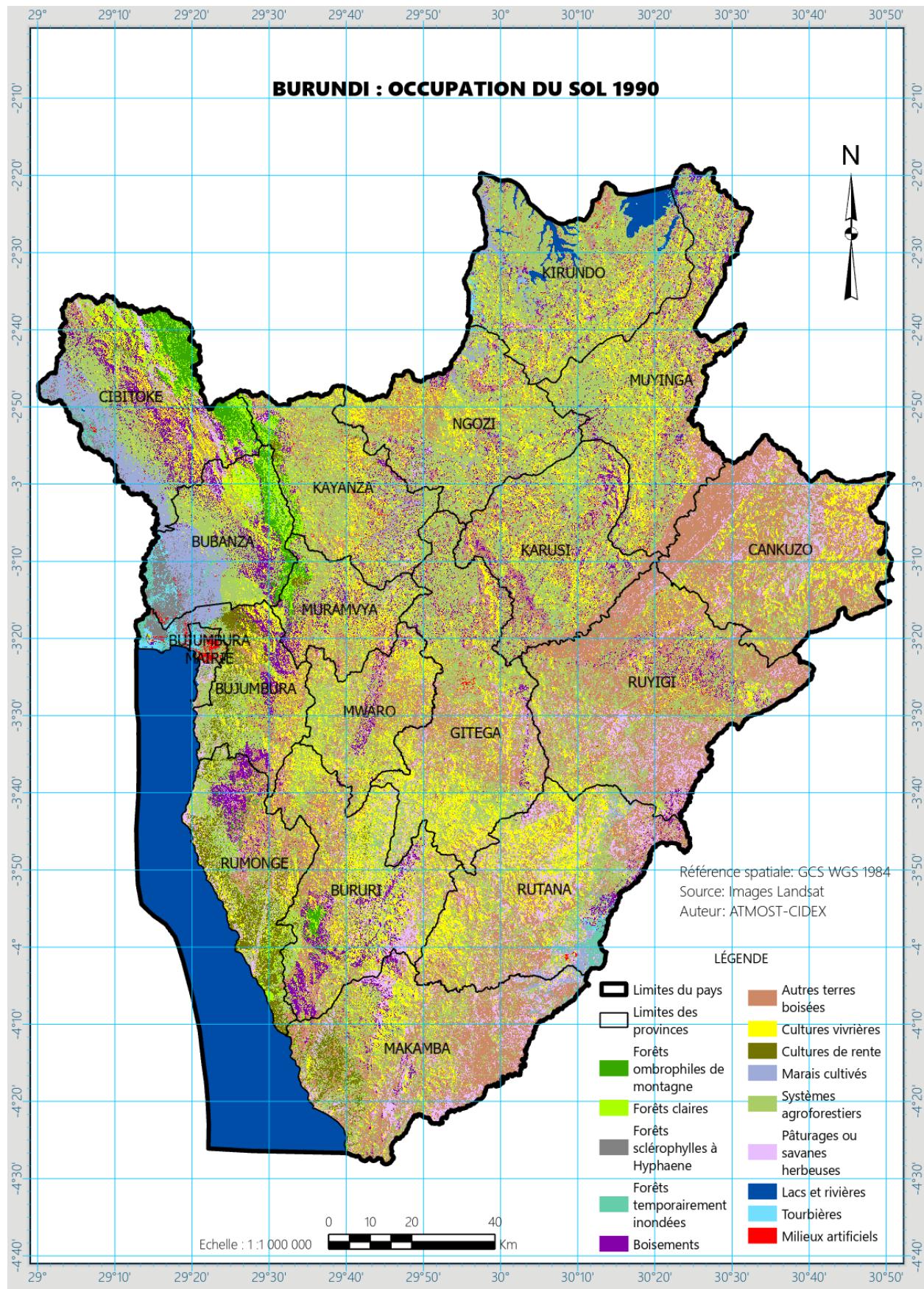


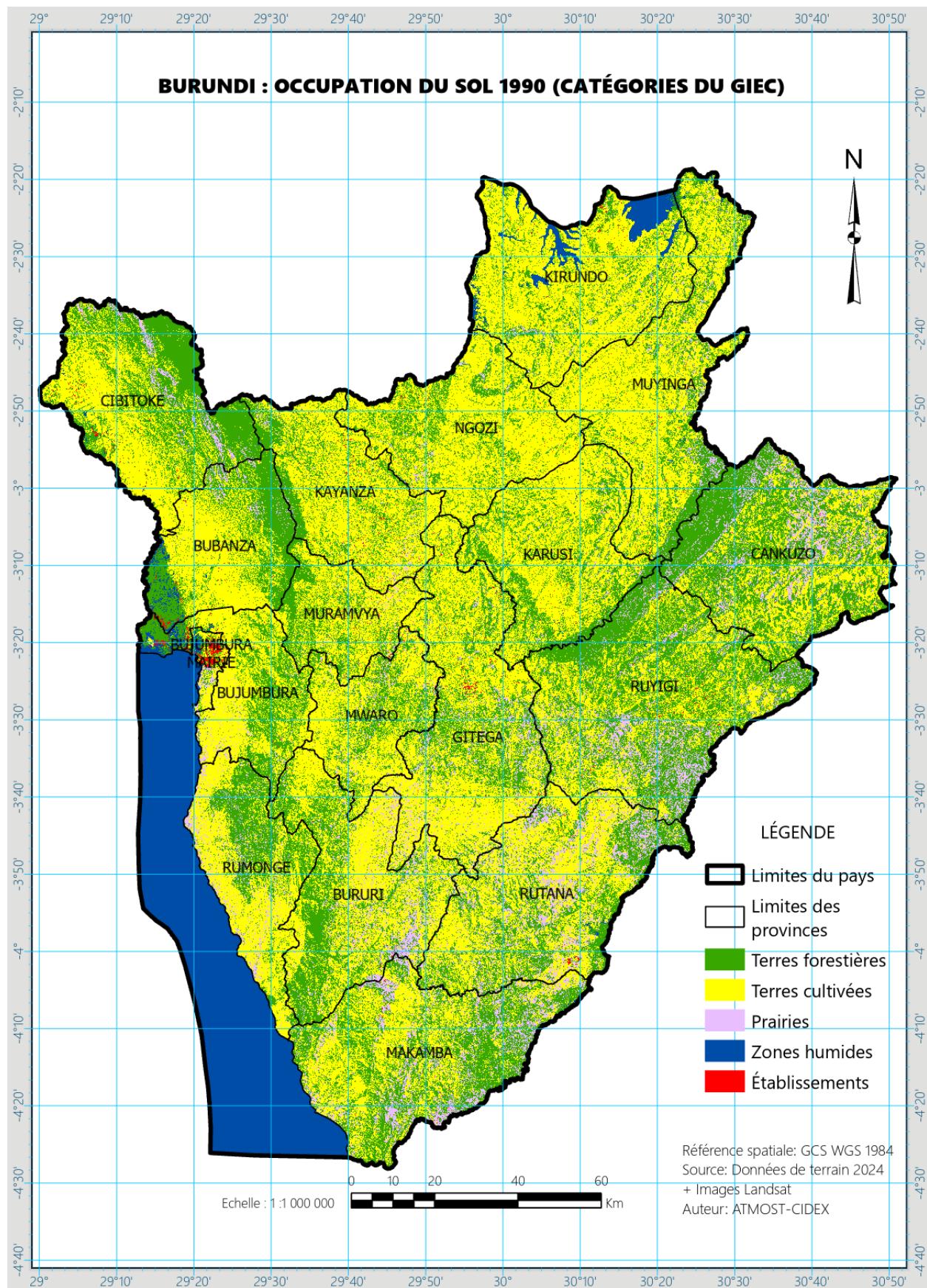












MATRICE CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES ENTRE 1990 ET 2000 (TYPOLOGIE NATIONALE)

1990→ 2000↓	FOM	FC	FSH	FM	BOIS	ABOIS	CVIV	CRENT	MCULT	SAGRO	PATUR	LACSR	TOURB	MARTI	Total 1990	% An 1990
FOM	22600	4508	0	136	4651	683	25	118	91	784	230	85	48	8	33968	66,53%
FC	5776	16485	0	340	7395	3139	832	3682	131	14822	1725	5	79	70	54480	30,26%
FSH	0	1	7313	952	231	6	268	47	6338	398	67	3	460	1056	17141	42,66%
FMAR	151	523	769	6117	4116	4627	867	431	6351	7355	874	510	1318	199	34208	17,88%
BOIS	1303	4071	12	2989	41985	28367	12840	1257	3864	46821	11198	400	977	608	156692	26,79%
ABOIS	1267	7207	36	10007	83803	223367	50427	3222	12017	164195	56826	482	2397	3828	619082	36,08%
CVIV	26	1517	16	339	13817	35136	145044	2180	3590	113682	39999	80	242	5325	360992	40,18%
CRENT	74	3676	16	336	2887	2747	1834	18685	418	19320	740	1	124	83	50941	36,68%
MCULT	168	393	4746	1626	1865	4730	1886	235	35081	16248	1342	44	1524	682	70570	49,71%
SAGRO	570	7825	420	4051	56290	119180	119296	9649	27149	446987	61295	161	2448	7003	862326	51,84%
PATUR	233	1605	138	1652	14517	61764	29885	2824	2708	53228	36701	63	594	3250	209160	17,55%
LACSR	10	6	12	141	27	16	3	6	72	98	1	225347	519	77	226336	99,56%
TOURB	10	77	1985	2193	399	687	180	84	3415	2021	78	412	1358	406	13308	10,21%
MARTI	12	30	537	128	412	1584	1093	62	1215	4072	670	9	100	2013	11937	16,87%
Total 2000	32201	47923	16000	31007	232394	486034	364480	42483	102439	890032	211746	227603	12188	24609	2721141	

Acronyme	Définition	Acronyme	Définition
FOM	Forêts ombrophiles de montagne	CRENT	Cultures de rente
FC	Forêts claires	MCULT	Marais cultivées
FSH	Forêts sclérophyllées à hyphaene	SAGRO	Systèmes agroforestiers
FMAR	Forêts temporairement inondées	PATUR	Pâturages ou savanes herbeuses
BOIS	Boisements	LACSR	Lacs et rivières
ABOIS	Autres terres boisées	TOURB	Tourbières
CVIV	Cultures vivrières	MARTI	Milieux artificiels

MATRICE CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES ENTRE 1990 ET 2010 (TYPOLOGIE NATIONALE)

1990→ 2010↓	FOM	FC	FSH	FMAR	BOIS	ABOIS	CVIV	CRENT	MCULT	SAGRO	PATUR	LACSR	TOURB	MARTI	Total 1990	% An 1990
FOM	22764	4118	0	38	4625	164	602	108	11	956	437	117	24	3	33968	67,02%
FC	5226	13738	0	130	9135	290	6811	3309	145	13719	1887	12	32	44	54480	25,22%
FSH	0	0	7899	310	29	0	789	36	5400	705	350	4	236	1383	17141	46,08%
FMAR	67	465	1133	3192	3340	1659	5239	942	8070	6960	818	577	1418	326	34208	9,33%
BOIS	1262	1795	24	2025	38889	10836	36378	1105	6154	50468	5614	517	830	794	156692	24,82%
ABOIS	554	6933	0	5823	68841	125903	153481	4983	21940	193807	29083	783	1528	5425	619082	20,34%
CVIV	17	645	18	371	15781	23087	167448	1498	6487	118070	21122	36	274	6137	360992	46,39%
CRENT	35	572	23	106	3083	124	10721	14982	216	19722	1079	1	16	261	50941	29,41%
MCULT	129	292	2398	1067	1908	2639	10854	454	36215	11502	1142	139	1219	613	70570	51,32%
SAGRO	476	2666	246	4425	61494	61456	234022	8706	33860	413841	26976	520	3641	9995	862326	47,99%
PATUR	196	606	5	699	11835	28499	65880	2880	4162	60661	29137	47	97	4457	209160	13,93%
LACSR	28	2	5	164	141	10	50	157	391	280	8	224764	275	59	226336	99,31%
TOURB	0	24	2280	1650	259	429	596	118	4222	1626	103	428	1218	356	13308	9,15%
MARTI	16	13	426	104	468	632	2429	46	1009	3932	352	20	68	2421	11937	20,28%
Total 2010	30769	31869	14458	20104	219829	255728	695301	39324	128284	896249	118108	227966	10877	32274	2721141	

MATRICE CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES ENTRE 2000 ET 2010 (TYPOLOGIE NATIONALE)

2000→ 2010↓	FOM	FC	FSH	FMAR	BOIS	ABOIS	CVIV	CRENT	MCULT	SAGRO	PATUR	LACSR	TOURB	MARTI	Total 2000	% An 2000
FOM	24815	4344	1	60	1756	620	127	72	6	199	134	0	66	0	32201	77,06%
FC	3664	14212	1	527	7290	1509	6181	3782	401	9100	1105	13	119	19	47923	29,66%
FSH	0	1	7649	226	22	0	376	21	5928	654	405	7	159	551	16000	47,80%
FMAR	142	1230	981	4494	2467	5508	3430	592	5223	4513	285	258	1795	90	31007	14,49%
BOIS	1452	2807	324	2972	78094	16844	52518	2607	4704	58788	10097	53	468	667	232394	33,60%
ABOIS	418	4111	21	4709	42866	124521	111424	3924	17314	147858	23020	123	1482	4244	486034	25,62%
CVIV	2	159	262	150	12944	16992	196005	810	7329	99302	23966	20	156	6382	364480	53,78%
CRENT	9	471	44	147	1841	96	9436	13855	536	15222	557	1	65	203	42483	32,61%
MCULT	5	111	4040	1318	2860	5919	17546	880	40605	23775	1360	362	1465	2193	102439	39,64%
SAGRO	149	3654	374	4103	58288	49481	220198	11959	35660	465332	28810	235	3454	8336	890032	52,28%
PATUR	66	667	65	308	10068	31424	70468	318	5741	62901	27182	24	187	2328	211746	12,84%
LACSR	24	1	5	47	134	101	61	78	311	190	23	226343	221	64	227603	99,45%
TOURB	24	87	425	977	856	1339	1221	294	3290	1804	138	444	1180	110	12188	9,68%
MARTI	0	15	266	65	344	1374	6310	134	1234	6609	1027	83	61	7088	24609	28,80%
Total 2010	30769	31869	14458	20104	219829	255728	695301	39324	128284	896249	118108	227966	10877	32274	2721141	

MATRICE CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES ENTRE 2000 ET 2022 (TYPOLOGIE NATIONALE)

2000→ 2022↓	FOM	FC	FSH	FMAR	BOIS	ABOIS	CVIV	CRENT	MCULT	SAGRO	PATUR	LACSR	TOURB	MARTI	Total 2000	% An 2000
FOM	25999	2282	0	27	1541	382	124	449	50	1175	163	2	5	1	32201	80,74%
FC	8683	6759	0	148	5889	889	2975	4749	289	16246	1154	19	78	46	47923	14,10%
FSH	0	0	3755	510	0	26	124	32	9446	504	177	32	52	1341	16000	23,47%
FMAR	747	234	298	4503	1852	4339	3699	318	5347	6062	816	535	1951	306	31007	14,52%
BOIS	1874	1154	147	1237	59866	2499	56586	3478	3452	91921	9219	76	141	746	232394	25,76%
ABOIS	1736	1172	0	3494	43969	35422	187165	3658	17393	150685	36727	160	736	3719	486034	7,29%
CVIV	35	382	83	277	12762	2267	236907	1056	5281	84214	16453	25	46	4693	364480	65,00%
CRENT	60	347	4	59	1126	285	3197	13553	315	22476	446	23	22	569	42483	31,90%
MCULT	78	98	584	2201	2657	943	13108	741	44638	29382	2419	174	937	4479	102439	43,58%
SAGRO	490	2832	32	2994	44443	5586	286371	10457	36505	464233	22951	268	1952	10918	890032	52,16%
PATUR	198	351	5	292	12130	3869	112594	408	4453	56287	19322	18	90	1729	211746	9,12%
LACSR	10	8	0	101	107	17	74	17	191	608	19	225730	678	42	227603	99,18%
TOURB	97	34	149	735	858	856	738	150	3563	2808	289	675	1013	223	12188	8,31%
MARTI	3	12	108	98	541	160	10931	36	1561	4498	393	140	152	5975	24609	24,28%
Total 2022	40010	15665	5166	16675	187740	57540	914594	39103	132485	931099	110547	227877	7854	34786	2721140	

MATRICE CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES ENTRE 2010 ET 2022 (TYPOLOGIE NATIONALE)

2010→ 2022↓	FOM	FC	FSH	FMAR	BOIS	ABOIS	CVIV	CRENT	MCULT	SAGRO	PATUR	LACSR	TOURB	MARTI	Total 2010	% An 2010
FOM	26160	1806	0	25	1444	221	27	387	36	584	63	11	6	0	30769	85,02%
FC	9138	8073	0	332	3049	2486	593	984	87	6278	761	7	68	12	31869	25,33%
FSH	0	0	4416	544	0	30	89	31	8214	210	45	16	17	845	14458	30,54%
FMAR	386	221	48	3228	3037	621	830	361	2123	6828	151	243	1962	66	20104	16,06%
BOIS	1741	1405	5	1742	60935	2804	37377	2879	2853	99435	8034	100	212	306	219829	27,72%
ABOIS	1261	389	0	2019	23612	34945	97473	110	7113	60136	26831	124	488	1228	255728	13,66%
CVIV	162	867	24	1137	38085	4994	375605	7362	19402	205173	35839	77	396	6180	695301	54,02%
CRENT	535	478	6	137	713	294	1108	14691	678	19845	348	128	84	280	39324	37,36%
MCULT	14	144	421	4224	5982	800	20642	488	51014	36275	3722	394	1524	2642	128284	39,77%
SAGRO	240	1931	64	1870	42603	6986	306074	11325	34815	455598	23222	238	1190	10093	896249	50,83%
PATUR	172	264	119	204	6441	2561	62124	294	1775	32038	10738	19	66	1293	118108	9,09%
LACSR	22	7	0	112	140	15	54	6	213	567	14	226066	709	39	227966	99,17%
TOURB	178	73	55	1071	928	249	317	110	2843	3439	92	350	1080	94	10877	9,93%
MARTI	0	8	8	30	770	535	12281	77	1319	4691	687	104	53	11710	32274	36,28%
Total 2022	40010	15665	5166	16675	187740	57540	914594	39103	132485	931099	110547	227877	7854	34786	2721141	

MATRICE CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES ENTRE 1990 ET 2000 (TYPOLOGIE CATÉGORIES GIEC)

1990→ 2000↓	Terres forestières	Terres cultivées	Prairies	Zones humides	Établissements	Total 1990	% An 1990
Terres forestières	494934	337185	70919	6764	5769	915571	54,06%
Terres cultivées	262451	961284	103377	4624	13094	1344829	71,48%
Prairies	79908	88645	36701	657	3250	209160	17,55%
Zones humides	5564	5880	79	227637	483	239644	94,99%
Établissements	2703	6442	670	109	2013	11937	16,87%
Total 2000	845559	1399435	211746	239791	24609	2721140	

MATRICE CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES ENTRE 1990 ET 2010 (TYPOLOGIE CATÉGORIES GIEC)

1990→ 2010↓	Terres forestières	Terres cultivées	Prairies	Zones humides	Établissements	Total 1990	% An 1990
Terres forestières	341209	522121	38189	6078	7974	915571	37,27%
Terres cultivées	183057	1088598	50319	5848	17007	1344829	80,95%
Prairies	41840	133582	29137	144	4457	209160	13,93%
Zones humides	4991	7441	111	226685	415	239644	94,59%
Établissements	1659	7415	352	88	2421	11937	20,28%
Total 2010	572757	1759158	118108	238843	32274	2721140	

MATRICE CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES ENTRE 2000 ET 2010 (TYPOLOGIE CATÉGORIES GIEC)

2000→ 2010↓	Terres forestières	Terres cultivées	Prairies	Zones humides	Établissements	Total 2000	% An 2000
Terres forestières	360659	439742	35046	4543	5571	845559	42,65%
Terres cultivées	163418	1158451	54693	5759	17114	1399435	82,78%
Prairies	42598	139428	27182	211	2328	211746	12,84%
Zones humides	4019	7250	161	228187	174	239791	95,16%
Établissements	2064	14287	1027	144	7088	24609	28,80%
Total 2010	572757	1759158	118108	238843	32274	2721140	

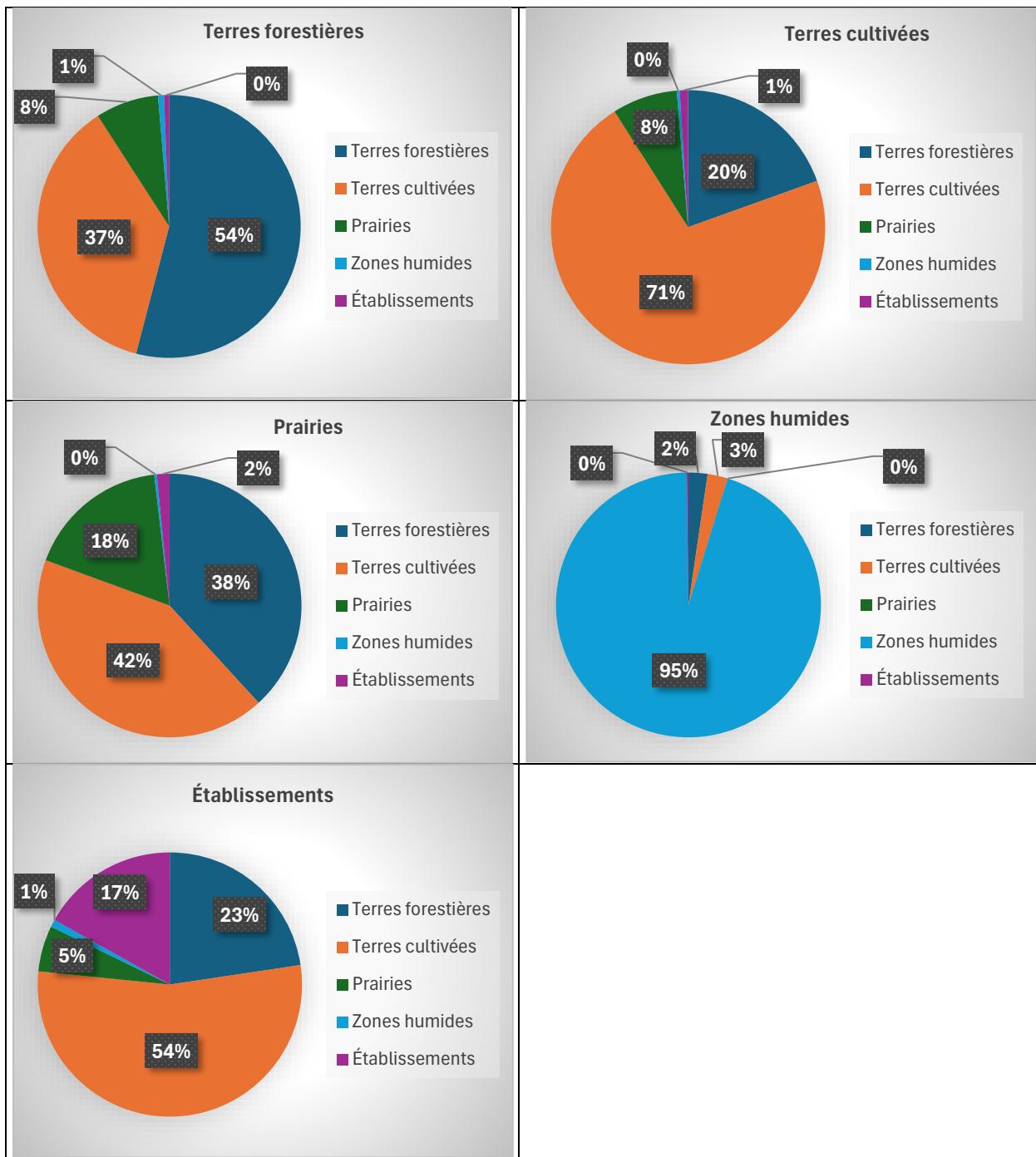
MATRICE CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES ENTRE 2000 ET 2022 (TYPOLOGIE CATÉGORIES GIEC)

2000→ 2022↓	Terres forestières	Terres cultivées	Prairies	Zones humides	Établissements	Total 2000	% An 2000
Terres forestières	221430	565927	48256	3787	6159	845559	26,19%
Terres cultivées	80626	1252434	42268	3448	20659	1399435	89,50%
Prairies	16845	173742	19322	109	1729	211746	9,12%
Zones humides	2972	8150	308	228096	265	239791	95,12%
Établissements	923	17027	393	291	5975	24609	24,28%
Total 2022	322796	2017280	110547	235731	34786	2721140	

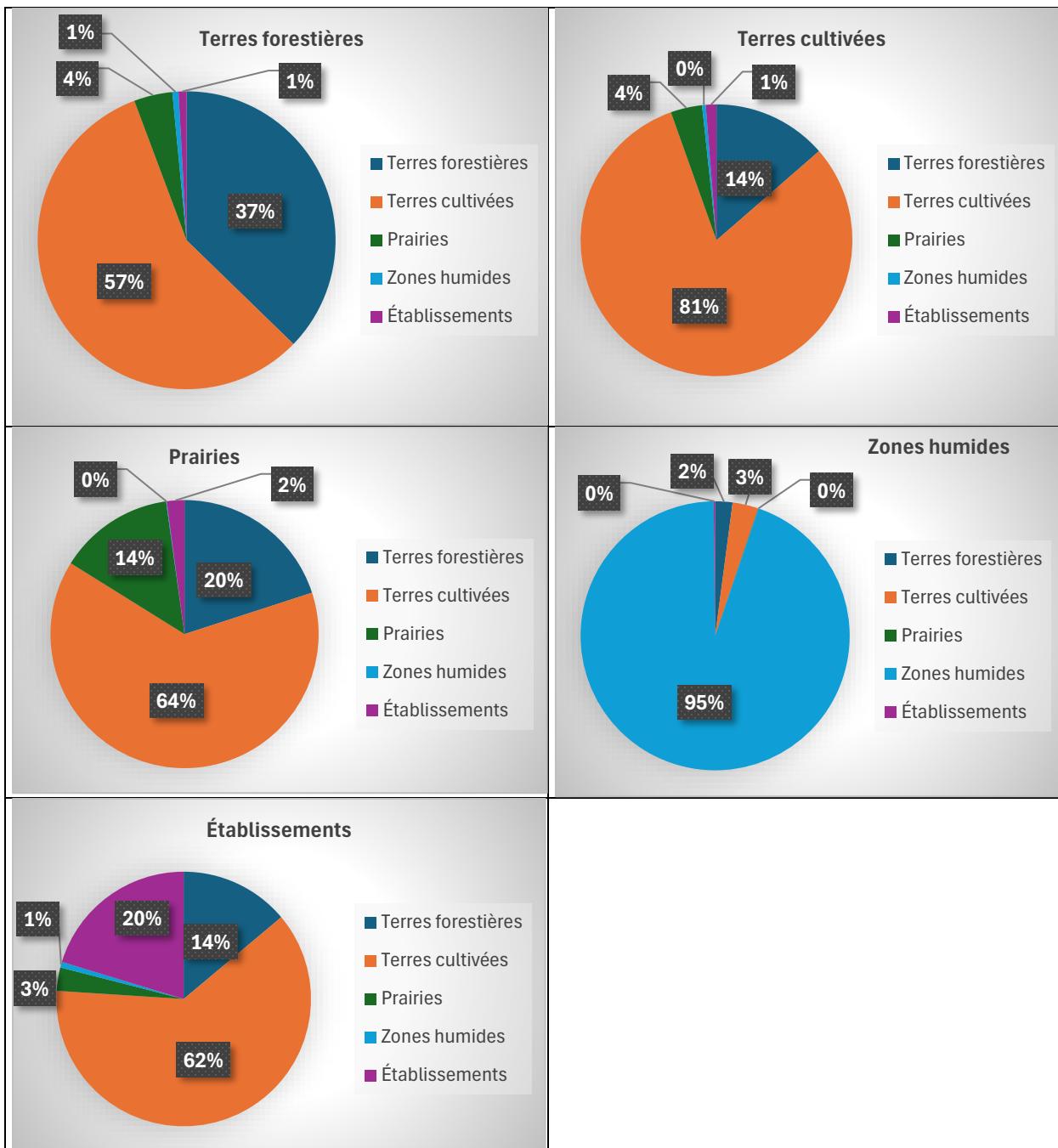
MATRICE CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES ENTRE 2010 ET 2022 (TYPOLOGIE CATÉGORIES GIEC)

2010→ 2022↓	Terres forestières	Terres cultivées	Prairies	Zones humides	Établissements	Total 2010	% An 2010
Terres forestières	196123	335039	35885	3254	2457	572757	34,24%
Terres cultivées	112710	1560093	63130	4031	19194	1759158	88,68%
Prairies	9762	96231	10738	85	1293	118108	9,09%
Zones humides	2851	7548	106	228205	133	238843	95,55%
Établissements	1351	18369	687	157	11710	32274	36,28%
Total 2022	322796	2017280	110547	235731	34786	2721140	

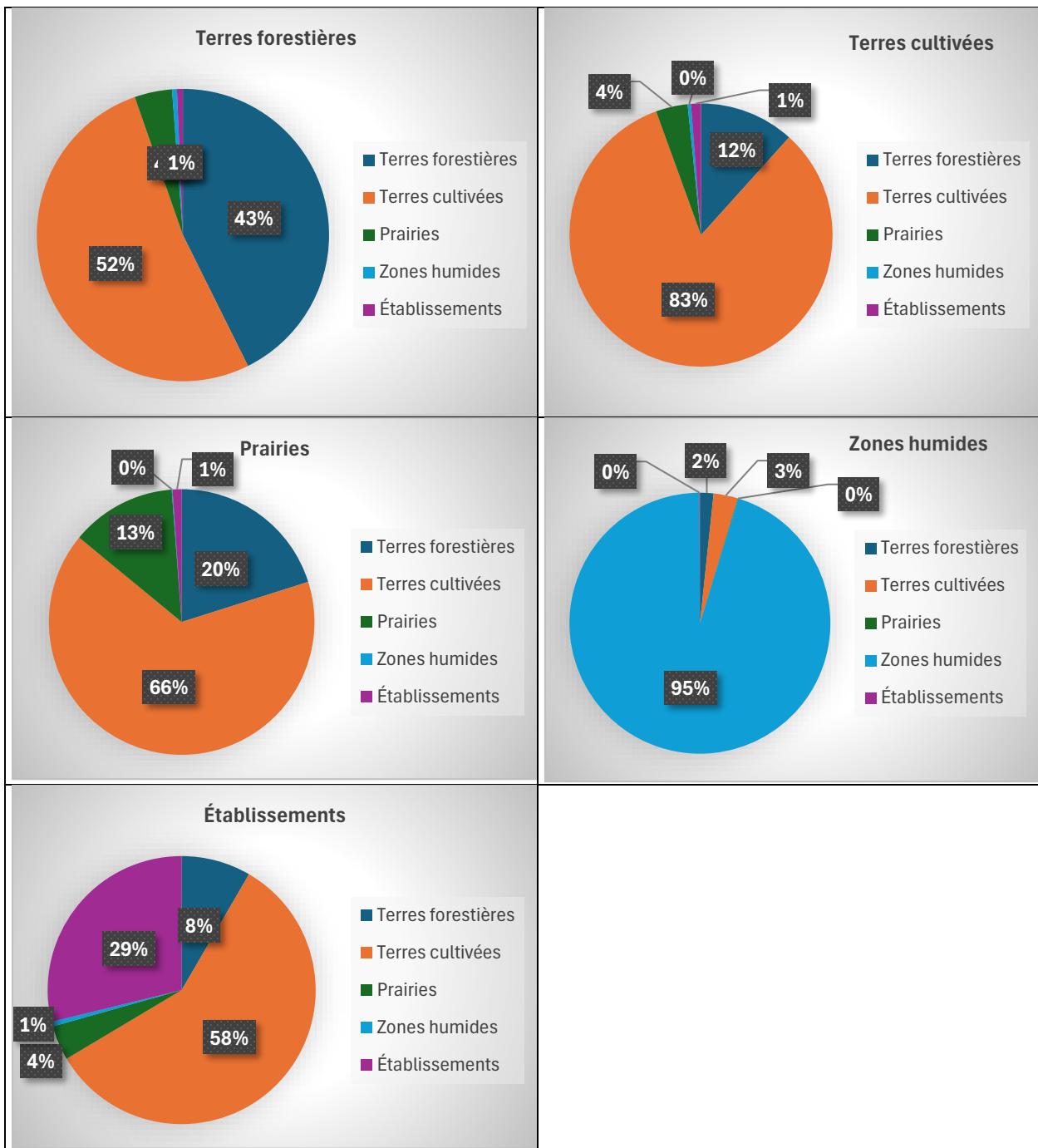
CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES PAR CATÉGORIE DU GIEC ENTRE 1990 ET 2000



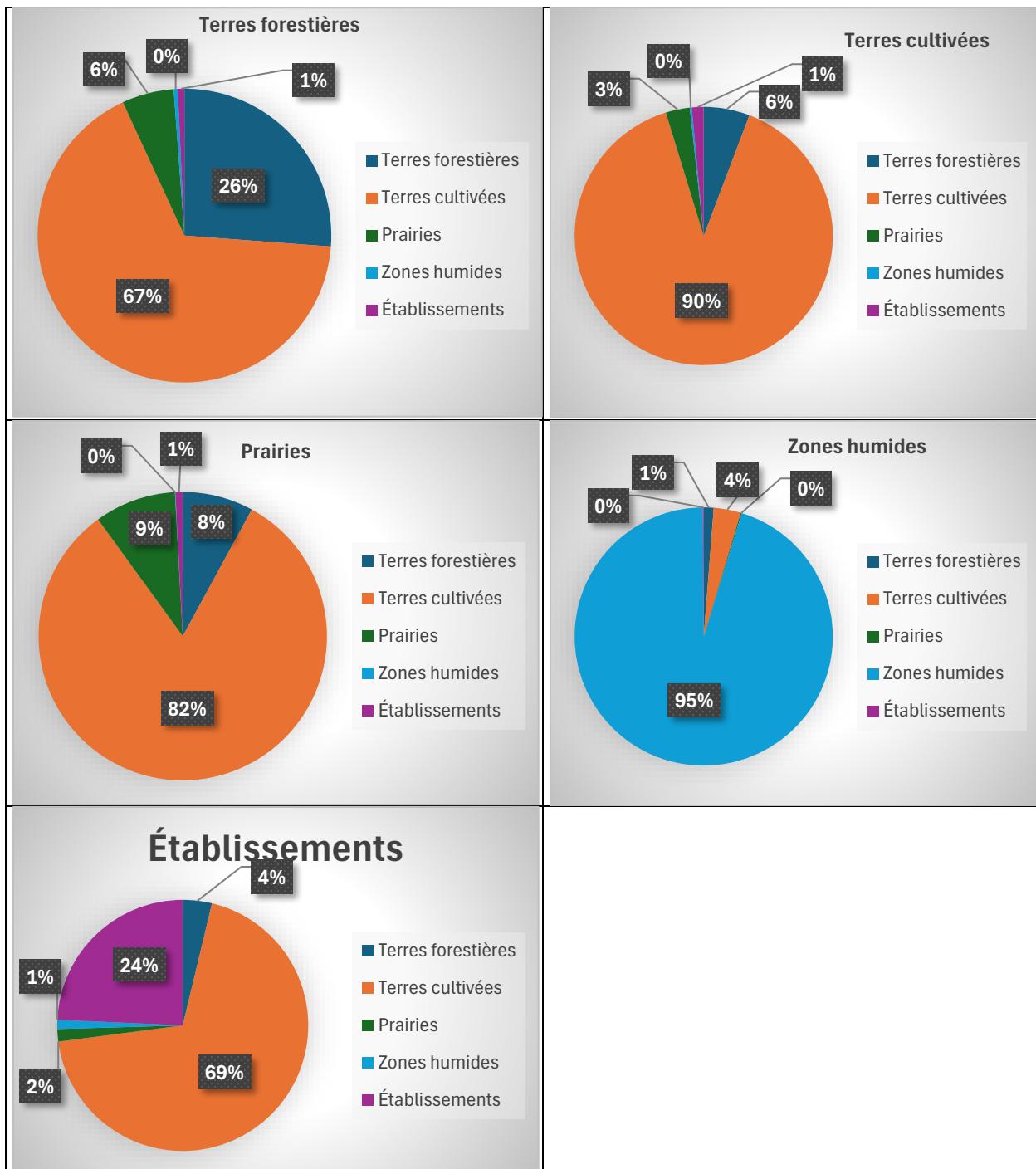
CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES PAR CATÉGORIE DU GIEC ENTRE 1990 ET 2010



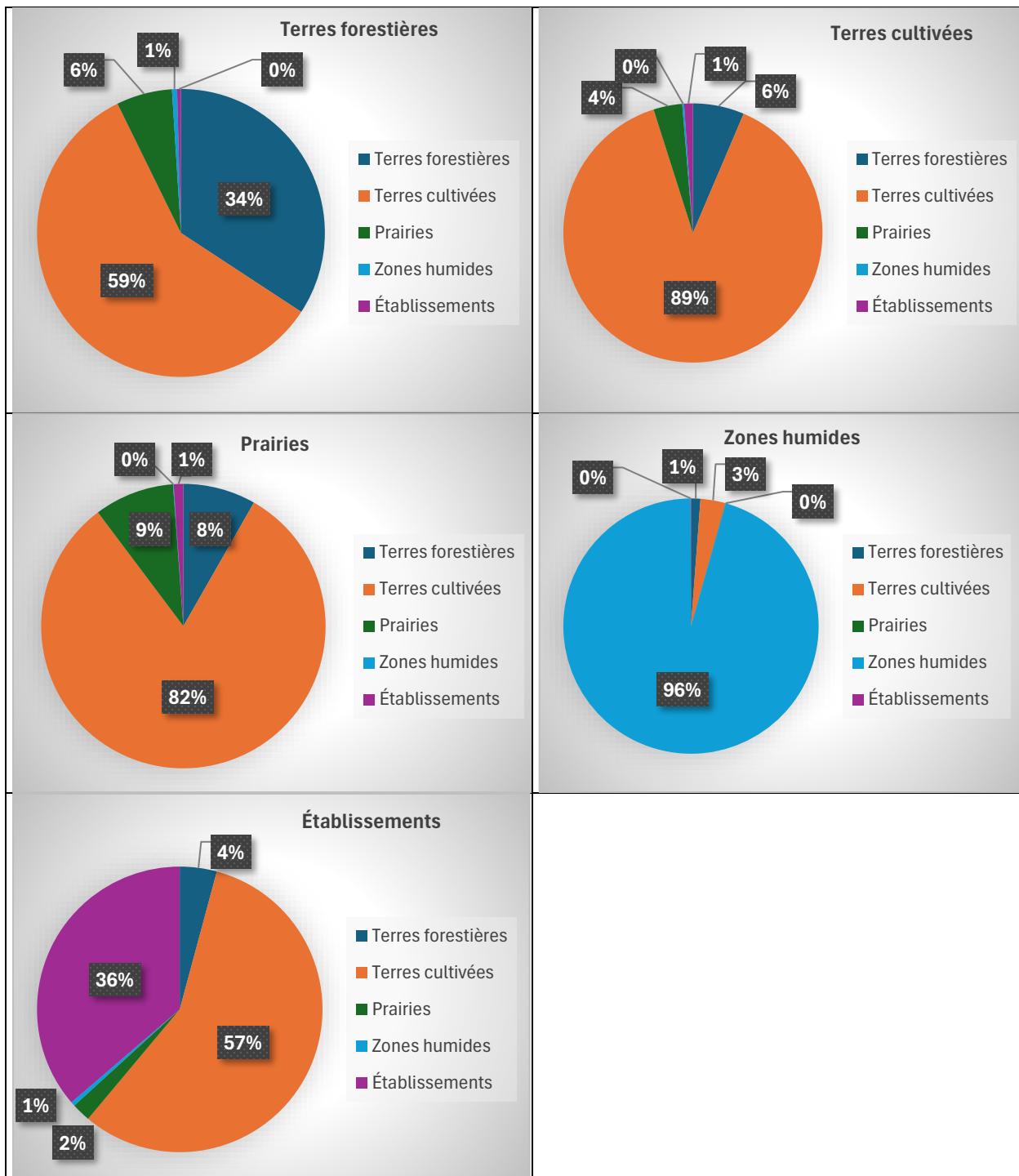
CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES PAR CATÉGORIE DU GIEC ENTRE 2000 ET 2010



CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES PAR CATÉGORIE DU GIEC ENTRE 2000 ET 2022



CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES TERRES PAR CATÉGORIE DU GIEC ENTRE 2010 ET 2022



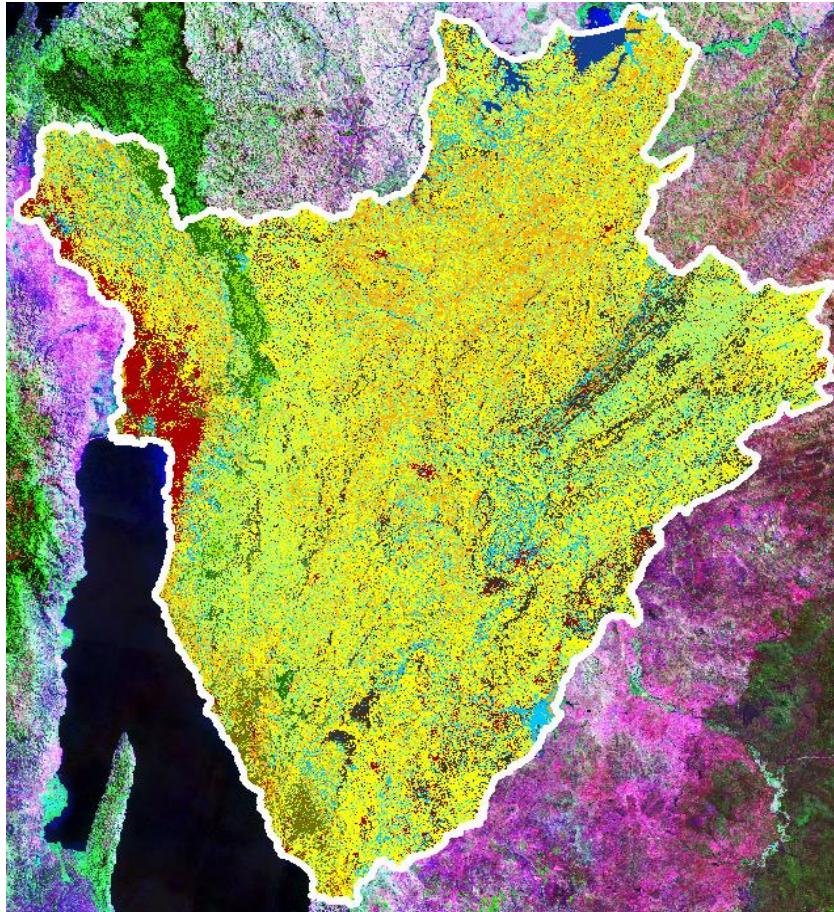
LISTE DES ÉLÉMENTS DU LIVRABLE A ACCOMPAGNANT LE RAPPORT

Note : tous les éléments sont livrés en format électronique. Les images composites et les résultats des classifications sont en format standard *.tif. Le rapport est livré en format *.pdf

Numéro	Désignation
1	Rapport Livrable A en format pdf
2	Images composites LANDSAT utilisées pour les classifications 1990, 2000, 2010, 2022
3	Cartes d'occupation du sol 1990, 2000, 2010, 2022 (Classification Typologie nationale)
4	Cartes d'occupation du sol 1990, 2000, 2010, 2022 (Classification Catégories du GIEC)
5	Fichiers de forme (shapefile) Points de validation 2022

PARTIE 2

RAPPORT SUR LES LIVRABLES B ET C : BIOMASSE ET FACTEURS D'ÉMISSION PROPRES AU BURUNDI



RAPPORT FINAL LIVRABLES B ET C : BIOMASSE ET FACTEURS D'ÉMISSION PÉRIODE 1990-2022

TITRE DE LA MISSION :
RÉALISER DES CARTES
D'OCCUPATION DES SOLS À
L'AIDE D'IMAGES SATEL-
LITAIRES ET DE TECHNIQUES
SIG POUR GÉNÉRER DES
CHANGEMENTS D'OCCU-
PATION DES SOLS DE 1990-
2022 AFIN DE PASSER AU
NIVEAU 2 DANS LE SECTEUR
AFAT

NOM DU CLIENT :
OFFICE BURUNDAIS POUR LA
PROTECTION DE L'ENVIRON-
NEMENT (OBPE)

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT,
DE L'AGRICULTURE ET DE
L'ELEVAGE, REP. DU BURUNDI

SOUmis PAR :
CONSORTIUM ATMOS-CIDEX

Décembre 2024

TABLES DES MATIERES

Table des matières

LISTE DES FIGURES.....	II
LISTE DES TABLEAUX.....	III
LISTE DES PHOTOS.....	IV
SIGLE DES ABREVIATIONS	V
1. INTRODUCTION.....	1
2. OBJECTIFS DE LA MISSION.....	2
3. RÉSULTATS ATTENDUS ET LIVRABLES	2
4. APPROCHE METHODOLOGIQUE	3
4.1. LA CARTOGRAPHIE DES CLASSES D'OCCUPATION DE TERRES.....	3
4.3. L'INVENTAIRE FORESTIER.....	8
4.3.1. <i>Le plan d'échantillonnage</i>	8
4.3.2. <i>Constitution d'une équipe d'inventaire</i>	11
4.3.3. <i>Moyens logistiques et matériels de terrain</i>	12
4.3.4. <i>Le chronogramme des activités</i>	13
4.3.4. <i>La collecte des données</i>	14
4.4. METHODE DE DETERMINATION DES FACTEURS DE BIOMASSE AERIENNE.....	15
4.4. METHODE DE DETERMINATION DES FACTEURS D'EMISSION PROPRE AU PAYS.....	17
5. LES LIVRABLES.....	19
5.1. LIVRABLE B.....	19
5.1.1. <i>Facteurs de biomasse dans le secteur AFAT au Burundi selon l'occupation des terres</i>	19
5.1.2. <i>Variation des facteurs de biomasse par classe d'occupation de terres</i>	22
5.1. 3. <i>Variations du stock de biomasse</i>	23
5.1. 4. <i>Carte de biomasse à l'échelle du Burundi</i>	29
5.2. LIVRABLE C – FACTEURS D'EMISSION PROPRES	31
5.2.1. <i>Facteurs d'émission propres au Burundi dans le secteur AFAT</i>	31
5.2.2. <i>Variation des facteurs d'émission par classe d'occupation de terre</i>	34
5.2.3. <i>Variation du stock de carbone</i>	36
5.2.4. <i>La carte du stock de carbone</i>	53
5.2.5. <i>Cumul de la biomasse, du carbone, et de l'émission négative</i>	56
6. CONCLUSION GÉNÉRALE	57
ANNEXES	62

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des placettes d'inventaire forestier sur la carte administrative du Burundi	10
Figure 2 : Variations des facteurs de biomasse par classe d'occupation des terres au Burundi.....	23
Figure 3: Variation du cumul de stock de biomasse dans les classes d'occupation des terres entre 1990 et 2022 au Burundi.....	26
Figure 4 : Variations du stock de biomasse aerienne des ligneux par categorie de terre du giec entre 1990 et 2022 au Burundi.....	27
Figure 5 : Contribution des terres forestieres et des terres cultivees au stock du carbone dans le temps au Burundi entre 1990 et 2022.....	28
Figure 6 : Carte de biomasse a l'echelle du territoire de Burundi en 2022	30
Figure 7 : Variation des facteurs d'emission par classe d'occupation de terre au Burundi.	35
Figure 8 : Contribution des classes d'occupation des terres au stock de carbone entre 1990 et 2022 au Burundi.....	39
Figure 9 : Tendance du stock cumule de carbone dans les classes d'occupation des terres entre 1990 et 2022 au Burundi.	40
Figure 10 : Evolution du stock de carbone dans les forets ombrophiles de montagnes et les forets semi-naturelle entre 1990 et 2022 au Burundi.	42
Figure 11 : Contribution des forets ombrophiles et des forets semi-naturelle au stock de carbone dans le temps.....	43
Figure 12 : Evolution du stock de carbone dans les terres forestieres entre 1990 et 2022 au Burundi	44
Figure 13 : Contribution de classes d'occupation de terres, au stock de carbone dans les terres forestieres entre 1990 et 2022 au Burundi	45
Figure 14 : Evolution du stock de carbone dans les terres cultivees entre 1990 et 2022 au Burundi.....	47
Figure 15 : Contribution des classes d'occupation des terres au stock de carbone dans les terres cultivees entre 1990 et 2022 au Burundi.....	48
Figure 16 : Evolution du stock de carbone dans les terres forestieres et dans les terres cultivees entre 1990 et 2022 au Burundi.....	50
Figure 17 : Contribution des forestieres et des terres cultivees au stock de carbone entre 1990 et 2022 au Burundi. .	51
Figure 18 : Evolution du stock de carbone dans le PNK et dans les categories des terres du GIEC entre 1990 et 2022 au Burundi.....	52
Figure 19 : Contribution du PNK et du Bururi au stock de carbone, comparee aux terres forestieres et aux terres cultivees entre 1990 et 2022 dans le secteur afat au Burundi.....	53
Figure 20 : Carte de sequestration de carbone a l'echelle du territoire de Burundi en 2022.....	55
Figure 21 : Tendance cumulée du stock de biomasse aerienne, du gain carbone et son equivalent en absorption de co2 dans les classes d'occupation de terre entre 1990 et 2022 au Burundi.....	56

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Résumé des livrables attendus.....	3
Tableau 2 : Méthode et paramètres utilisés pour déterminer le nombre total de placettes dans l'inventaire forestier.....	7
Tableau 3 : Plan d'échantillonnage d'inventaire forestier pour la détermination des facteurs de biomasse et des facteurs propres au Burundi dans le secteur AFAT	9
Tableau 4 : Facteur de biomasse par classe d'occupation des terres et par catégories du GIEC dans le secteur AFAT au Burundi. Les valeurs sont exprimées en tonnes de matière sèche par hectare.....	21
Tableau 5 : Variation du stock de biomasse dans les classes d'occupation de terres et par catégorie GIEC entre 1990 et 2022 au Burundi.	25
Tableau 6 : Facteurs d'émission propre par classe d'occupation des terres et par catégories du GIEC dans le secteur AFAT au Burundi, exprimée en tonne de carbone par hectare.	33
Tableau 7 : Variation du stock de carbone dans les classes d'occupation de terre entre 1990 et 2022 au Burundi.....	37

ANNEXES

Annexe 1 : Taux de réalisation du plan d'échantillonnage.....	63
Tableau 8 : Taux de réalisation du plan d'échantillonnage pour réaliser l'inventaire forestier afin de déterminer les facteurs de biomasse et les facteurs d'émission propre au Burundi	63
Annexe 2: Facteur de biomasse et Facteurs d'émission dans les boisements.....	64
Tableau 9 : Facteur de biomasse et facteurs d'émission propre des boisements à pinus en fonction de leur âge de plantation.....	64
Tableau 10 : Facteur de biomasse et facteurs d'émission propre des boisements à pinus en fonction de leur âge de plantation.....	64
Annexe 3: Fiche descriptive des placettes d'inventaire forestier.....	65
Annexe 4 : Fiche modèle d'inventaire dendrométrique.....	66
Annexe 5: Extraits Cartes de biomasse et de carbone.....	67

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Image des forêts ombrophiles de montagne.....	4
Photo 2 : Formation de recyclage des équipes d'inventaire dans la cours de l'OBPE.....	12
Photo 3 : Images de boisements matures denses (plantation d'eucalyptus sp) dans la catégorie GIEC des terres forestières	35
Photo 4 : Images de savanes appartenant à la classe d'occupation Autres types de terres forestières.....	45
Photo 5 : Images de forêts Forêt sclérophylle à hyphaene appartenant à la catégorie GIEC des terres forestières	46
Photo 6 : Images de culture de rente (palmeraies) appartenant à la catégorie GIEC des terres cultivées...	48
Photo 7 : Images des agrosystèmes forestiers appartenant à la catégorie GIEC des terres cultivées.....	49

SIGLE DES ABREVIATIONS

AFF	Forum Forestier Africain
AMCC/GCCA	Alliance Mondiale sur le Changement Climatique
BUR	Rapport Biennal Universel
CC	Changement Climatique
CDN	Contribution Déterminée Nationale
CIFOR	Centre de Recherche Forestière Internationale
COMIFAC	Commission des Forêts en Afrique Centrale
FAO	Fonds Mondial pour l'Agriculture et l'Alimentation
FRA	Rapport Annuel sur les Forêts
GIEC	Groupes Intergouvernemental d'Experts sur le Changement Climatique
MEAE	Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage
MEEATU	Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme
PNK	Parc National de Kibira
RCI	République de la Côte d'Ivoire
UICN	Union Internationale pour la Conservation de la Nature

1. INTRODUCTION

Le Projet « *Building capacities in Burundi to implement the Enhanced Transparency Framework under the Paris Agreement* » a été mis en place par le Gouvernement du Burundi avec les supports du Fonds pour l'environnement mondial (FEM, *Global Environmental Facility – GEF* en anglais)), et du Programme des Nations-Unies pour l'Environnement (UNEP). Il s'inscrit dans le cadre de l'initiative pour le renforcement des capacités du pays pour la transparence dans le suivi et la capitalisation des actions d'adaptation et d'atténuation en matière d'émission et de réduction des émissions des gaz à effet de serre à l'échelle nationale. Concrètement, le projet permettra d'élaborer et d'opérationnaliser un système national de Mesurage, de Rapportage et de Vérification (MRV), qui favorisera la prise en compte et l'intégration des données et des informations relatives au changement climatique, et d'améliorer la transparence dans les efforts du pays concernant les émissions et les réductions de gaz à effet de serre (GES). Le projet offre l'opportunité d'établir un système national d'inventaire des GES, et de contribuer à répondre aux besoins importants de renforcement des capacités du pays dans le secteur.

La mise en œuvre du projet est assurée par l'Office Burundais pour la Protection de l'Environnement (OBPE), qui relève du ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage. C'est dans ce contexte que l'OBPE a lancé la mission de consultation visant à réaliser des cartes d'occupation des sols à l'aide d'images satellites et de techniques SIG pour générer des changements d'occupation des sols de 1990- 2022 afin de passer au niveau 2 dans le secteur AFAT. La réalisation de la mission permettra d'identifier des facteurs d'émissions pertinents pour le secteur de l'agriculture, de la foresterie et des autres affectations des terres (AFAT) sur l'étendue du territoire national. L'opération vise à améliorer la précision d'estimation des émissions dans le secteur d'une part, mais également à former les parties prenantes sur l'utilisation de l'imagerie satellitaire conformément aux lignes directrices du GIEC2006 pour réaliser les inventaires de GES plus complets.

Ainsi, en accord avec les procédures de sélection de marché en conformité avec les dispositions du Règlement de Passation des Marchés, l'OBPE a choisi le Consortium ATMOST-CIDEX pour exécuter la prestation. Ce choix a été fait conformément aux procédures de sélection décrites dans les termes de référence, qui stipulent que le contrat sera attribué à la/le firme, cabinet, consortium ou groupe d'experts dont l'offre aura été évaluée et ayant reçu la note la plus élevée sur l'ensemble préétabli des critères pondérés techniques et financiers spécifiques indiqués. La notification du

choix a été faite au Consortium ATMOST-CIDEX en date du 10 janvier 2024. Depuis, différentes séances d'échanges ont eu lieu entre les mois de janvier et février 2024 pour favoriser une compréhension commune des termes de référence. À l'issue de ces échanges, les parties ont convenu de leur commune compréhension des termes de référence de la mission, et marqué leur commun accord pour une mise en œuvre diligente.

2. OBJECTIFS DE LA MISSION

Globalement, le projet vise à l'élaboration des cartes d'occupation des sols et d'affectations des terres pendant la période 1990-2022, la détermination des facteurs d'émission par classe d'occupation du sol, la détermination des facteurs d'émission propres pour le Burundi dans le secteur AFAT, ainsi que le renforcement des capacités des experts nationaux, conformément aux mécanismes de la convention Cadre des Nations Unies sur les changements Climatiques (en particulier pour le secteur AFAT). Les objectifs spécifiques peuvent se résumer ainsi :

1. Réaliser à partir des données de télédétection la cartographie de l'occupation du sol et des changements d'affectation des terres pour les différentes classes de terres du GIEC au Burundi à un pas de temps de dix (10) ans à partir de 1990, c'est-à-dire 1990, 2000, 2010 et 2020 ;
2. Déterminer les facteurs de biomasse des différentes classes et sous-classes de terres du GIEC, ainsi que les facteurs d'émission spécifiques au pays pour le secteur AFAT ;
3. Développer la capacité des experts nationaux à utiliser l'imagerie satellitaire conformément aux lignes directrices du GIEC2006, pour réaliser les inventaires de GES.

3. RÉSULTATS ATTENDUS ET LIVRABLES

À l'issue de la prestation, il est attendu que : 1) les facteurs d'émissions pertinents permettant d'améliorer la précision d'estimation des émissions dans le secteur AFAT du Burundi soient déterminés, et 2) les experts nationaux soient formés sur l'utilisation de l'imagerie satellitaire conformément aux lignes directrices du GIEC2006 pour réaliser les inventaires de GES plus complets. *Ce rapport final présente les résultats des Livrables B et C, à la suite de l'approbation du rapport provisoire et des corrections suggérées, lors de l'atelier de validation tenu à Bujumbura le 23 décembre 2024.* Les livrables attendus sont rappelés dans le tableau 1 :

Tableau 1 : Résumé des livrables attendus

Livrable A	Rapport sur la cartographie d'occupation et les changements d'affectation des terres depuis 1990 pour les différentes classes de terres du GIEC <i>Sera livré sous forme de rapport intérimaire + la base de données SIG incluant l'ensemble des données et résultats cartographiques</i>
Livrable B	Rapport sur la détermination des facteurs de biomasse pour les différentes classes de terres <i>Sera livré sous forme de rapport intérimaire + la base de données SIG incluant l'ensemble des données et résultats relatifs aux facteurs de biomasse par classe d'occupation des terres</i>
Livrable C	Rapport sur la détermination des facteurs d'émission spécifiques au pays pour le secteur AFAT <i>Sera livré sous forme de rapport intérimaire + la base de données SIG incluant l'ensemble des données et résultats relatifs aux facteurs d'émissions spécifiques au Burundi</i>
Livrable D	Matériel de formation pour les experts locaux sur l'utilisation des outils SIG pour produire des cartes d'occupation des sols <i>Sera livré sous forme de Matériel de cours + Ateliers de formation + Rapport intérimaire sur les formations réalisées</i>
Livrable E	Matériel de formation pour les experts locaux afin de développer et d'utiliser des facteurs d'émission spécifiques au pays pour le sous-secteur des terres <i>Sera livré sous forme de 1) Matériel de cours + Ateliers de formation + Rapport intérimaire sur les formations réalisées ; 2) Atelier final de clôture + Rapport final récapitulatif du projet.</i>

4. APPROCHE METHODOLOGIQUE

Pour produire les Livrables B et C, il a été réalisé les activités suivantes : i) la cartographie des classes d'occupation des terres ; ii) le pré inventaire forestier ; iii) l'inventaire forestier proprement ; et iv) l'estimation de biomasse et des facteurs d'émission.

4.1. La cartographie des classes d'occupation de terres

La réalisation de cartes des classes d'occupation des terres est un préalable pour effectuer un inventaire préliminaire afin de déterminer le nombre de placettes pour l'inventaire forestier réel pouvant conduire à l'estimation des biomasses et des facteurs d'émission propres. A cet effet, l'expert en charge de cette étude, a réalisé une cartographie des classes d'occupation de terres à l'aide des images satellitaires de type Landsat. A l'issue de cette activité, il a été défini au départ 16 classes d'occupation de terres, dont 8 dans la catégorie GIEC des terres forestières, 4 dans la catégorie des terres cultivées, suivie des prairies, des zones humides et les Etablissements.

Dans cette mosaïque de classes d'occupation de terres, celles qui ont fait l'objet de pré inventaire

et d'inventaire forestier sont au nombre de 12, dont 8 dans la catégorie GIEC des terres forestières et 2 dans la catégorie des terres cultivées. Les 5 classes dans la catégorie GIEC sont :

- Forêts ombrophiles de montagne ;
- Forêts claires ;
- Forêts sclérophylles à *Hyphaene* ;
- Forêts temporairement inondées ;
- Boisements ou systèmes sylvicoles (présentés en 3 sous-classes : Boisements matures denses, Boisements intermédiaires, et Boisements dégradés) ;
- Autres terres boisées.

Les boisements correspondent aux systèmes sylvicoles, c'est-à-dire des plantations forestières. L'hétérogénéité de cette classe et son caractère dynamique ont motivé sa décomposition en trois sous catégories dans le souci de faire des estimations plus réalistes.

En ce qui concerne les 2 classes d'occupation de terre dans la catégorie des terres cultivées, elles couvrent la culture de rente et les Agrosystèmes forestiers. En fait ce sont les 10 classes d'occupation de terres qui ont servi de support cartographique pour effectuer un échantillonnage stratifié aléatoire que nous avons adopté comme stratégie. Les méthodes utilisées pour réaliser le pré inventaire et l'inventaire forestier font l'objet des sous chapitres suivants.

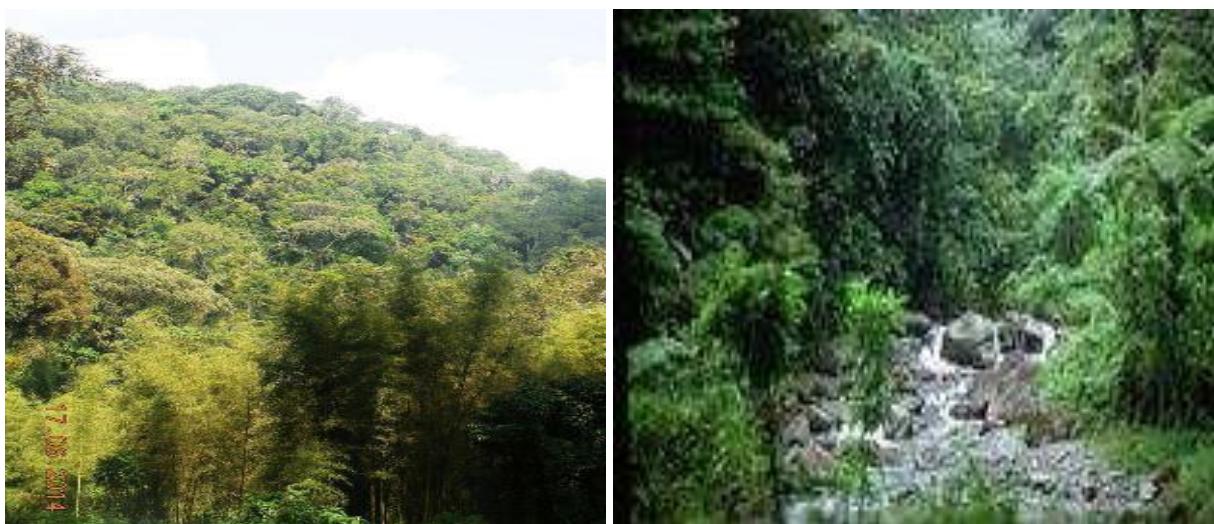


Photo 1 : Image des forêts ombrophiles de montagne.

4.2. Le pré-inventaire forestier

Pour réaliser un inventaire forestier à grande échelle, il faut au préalable faire un inventaire préliminaire dans lequel on effectue le calcul en fixant comme valeurs initiales le taux d'erreur visé et le niveau de confiance. Cette approche est commune dans tous les inventaires forestiers à réaliser sur de vastes superficies composées de plusieurs types de forêt ou de classes d'occupation et d'utilisation de terres.

Dans la présente étude, nous avons fixé comme valeurs initiales le taux d'erreur visé à 0,05 (5%) et le niveau de confiance à 95% en vue de déterminer le nombre total de placettes.

Comme la cartographie des classes d'occupation des terres, le pré inventaire ou inventaire préliminaire est un préalable pour effectuer un inventaire forestier. Il consiste à faire un sondage dans les classes d'occupation de terres retenues pour réaliser un inventaire forestier. A cet effet, 2 à 4 placettes échantillons ont été placées dans chacune des classes d'occupation de terres. Au total 20 placettes ont fait l'objet d'inventaire préliminaire. La surface des placettes échantillons était de 30 m x 30 m, soit 900 m² et cela dans les terres forestières et dans les terres de Culture de rente. Ces dernières sont constituées de plantations de palmier à huile (Palmeraies). En revanche, dans les agrosystèmes forestiers, les placettes étaient de 50 m x 100 m, soit 5 000 m² et cela afin d'éviter une exclusion totale des ligneux dans les placettes d'inventaire.

Pour effectuer l'inventaire préliminaire, il a été constitué une équipe composée de 4 personnes selon la norme recommandée pour les inventaires forestiers. Les éléments qui ont composé l'équipe d'inventaire préliminaire sont tous des Burundais, en majorité des agents de l'OPBE. Pour effectuer la mission sur le terrain, un protocole d'inventaire a été élaboré par la partie Burundaise et l'expert en charge de cette activité dans le consortium ATMOST-CIDEX.

Pour la collecte des données, il a été établi deux fiches. Sur la première fiche sont enregistrés tous les renseignements relatifs à la description de la placette qui doit faire l'objet d'inventaire préliminaire (Cf. Annexe 1).

Quant à la deuxième, elle constitue la fiche d'inventaire proprement dite sur laquelle sont systématiquement enregistrés tous les paramètres dendrométriques à mesurer sur les individus ou tiges ligneuses recensées dans les placettes. A cet effet, dans chaque classe d'occupation de terre et dans chacune des placettes retenues pour l'inventaire préliminaire, il a été mesuré sur toutes les tiges ligneuses de circonférence basale supérieure ou égale à 10 cm (à 15-20 cm du sol) les

paramètres dendrométriques suivants (cf. fiche en annexe 1) :

- Le nom scientifique de l'espèce mesurée ;
- La circonférence à 1,30 m du sol (c1,30 m) à l'aide d'un ruban du couturier ou d'un compas forestier (permet de retrouver le diamètre à hauteur de poitrine ou DBH en cm) ;
- La hauteur totale exprimée en m à l'aide d'un dendromètre de Blum Leisse ou autre dendromètre, clinomètre ou clisimètre (Sunto, télescope de Bitterlich...) ; ainsi que
- L'état physique de la tige à mesurer (mort ou vivant).

Le pré inventaire s'est déroulé entre les mois de février et mars 2024. Après la collecte des données, un plan masque de saisie a été fait à l'aide du logiciel Excel pour le traitement et l'analyse des données afin de déterminer le nombre total de placettes pour l'inventaire forestier.

Sur la base des résultats du pré inventaire, il a été identifié plusieurs méthodes de calcul pour déterminer le nombre total de placettes pour l'inventaire forestier proprement dit.

A cet effet, l'Alliance Mondiale contre le Changement Climatique (AMCC/GCCA) en 2013, a établi une formule pour déterminer le nombre total de placettes dans l'inventaire forestier dans un document intitulé « Guide de Mesure et de Suivi du Carbone dans le système sol-végétation des formations forestières et agro forestières en Afrique de l'Ouest ».

Le consortium « d'Efron » en 2019, constitué par des institutions de recherche et de formation françaises, espagnoles et belges, a établi une formule pour déterminer le nombre total de placettes dans l'inventaire forestier dans un document intitulé « Techniques d'inventaire forestier par échantillonnage systématique ».

La Commission des Forêts d'Afrique Centrale (COMIFAC) a aussi élaboré un Guide sous-régional d'inventaire et de surveillance des forêts dans lequel il est établi une formule pour déterminer le nombre total de placettes à pourvoir pour un inventaire forestier à grande échelle.

Dans le cadre de ce travail, il s'agit de déterminer le facteur d'émission (FE) propre au Burundi pour passer au niveau 2 dans le calcul des émissions des gaz à effet de serre dans le secteur AFAT du GIEC. A cet égard, nous allons utiliser la formule dans le guide d'inventaire de la COMIFAC (dont fait partie le Burundi) pour déterminer le nombre de placettes à prévoir.

La méthode de calcul pour déterminer le nombre de placettes dans le guide d'inventaire de la

COMIFAC est formulée ci-dessous comme suit :

$$n = \left(\frac{t}{E}\right)^2 \left(\frac{\sum w_i s_i}{\bar{x}}\right)^2$$

E = taux d'erreur visé = 0,05 ;

t = valeur calculée du coefficient du niveau de confiance fixé à 95% = 1,96 ;

s_i = Ecart type, dans chaque classe d'occupation, du paramètre déterminé par le biais de l'inventaire préliminaire (biomasse aérienne dans notre cas précis en T. ha⁻¹) ;

w_i = la fréquence relative de la surface de chaque classe d'occupation par rapport à la surface totale de l'ensemble de classes d'occupation de terre couvertes par l'inventaire forestier ;

$w_i * s_i$ = Produit de l'écart type du paramètre mesuré dans chaque classe d'occupation de terre par la fréquence relative de sa surface ;

\bar{x} = Moyenne générale du paramètre mesuré dans l'ensemble de classes d'occupation de terre.

Les valeurs utilisées dans la formule pour déterminer le nombre total de placettes et ainsi que sa répartition par classe d'occupation de terre sont rapportées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Méthode et paramètres utilisés pour déterminer le nombre total de placettes dans l'inventaire forestier.

Taux d'erreur visé	E	0,05
Coefficient du niveau de confiance (t) 95%	T	1,96
Moyenne générale de la biomasse aérienne dans les classes d'occupation de terre en T. ha ⁻¹	\bar{x}	17 468,98
Ecart type, dans chaque classe d'occupation, du paramètre déterminé par le biais de l'inventaire préliminaire (biomasse aérienne dans notre cas précis en T. ha ⁻¹)	s_i	
Fréquence relative de la surface de chaque classe d'occupation sur la surface totale de l'ensemble de classes d'occupation de terre couvertes par l'inventaire forestier	w_i	
Produit de l'écart type du paramètre mesuré dans chaque classe d'occupation de terre par la fréquence relative de sa surface	$w_i * s_i$	
Somme des produits des fréquences par les écarts types	$\sum w_i * s_i$	9658,59
Nombre total de placettes pour réaliser l'inventaire forestier		
Fraction d'échantillonnage	$\varphi = n / \sum w_i s_i$	
Répartition des échantillons par type de forêt	$n_i = \varphi \times w_i s_i$	

Source : COMIFAC 2019 « GUIDE SOUS-REGIONAL D'INVENTAIRE ET DE SURVEILLANCE DES FORÊTS.

A l'issue de ces calculs, il a été déterminé 470 placettes au total pour réaliser notre inventaire forestier afin de déterminer les facteurs de biomasse et les facteurs d'émission (FE) propres au Burundi.

Faut-il le rappeler que le relief très accidenté du Burundi ne facilite guère aux spécialistes de la végétation (forestiers, écologues, botanistes et autres) de mener des investigations sur le terrain.

Ainsi après la détermination des 470 placettes pour réaliser l'inventaire forestier, celles-ci ont été projetées de manière aléatoire sur la carte du Burundi. Cette opération nous a révélé qu'environ 70 placettes étaient d'accès très difficile, elles ont donc été éliminées car l'accessibilité étant une des conditions sine qua non pour réaliser un inventaire forestier. A cet effet, le nombre placettes a été ajusté à 400 reparties entre les classes d'occupation et d'utilisation des terres. Cet ajustement a été fait avec la participation du staff de l'équipe du Burundi en charge de réaliser l'inventaire forestier et cela sur la base de leur expérience et maîtrise avérée du terrain.

Ce sont ces placettes qui ont fait l'objet de notre plan d'échantillonnage pour l'inventaire forestier. La méthode d'approche pour cet inventaire forestier fait l'objet du sous chapitre suivant.

4.3. L'inventaire forestier

Pour l'inventaire forestier, il a été élaboré un protocole comportant :

- Un plan d'échantillonnage ;
- Constitution d'une équipe d'inventaire forestier par les experts nationaux pour la collecte des données ;
- Moyens logistiques et matériels de terrain ;
- Le chronogramme des activités.
- La collecte des données.

4.3.1. Le plan d'échantillonnage

Il a été réalisé sur la base des 400 placettes jugées accessibles et réparties entre les 10 classes d'occupation de terres qui constituent le matériel végétal d'étude pour l'investigation

(cf. tableau 3). La surface des placettes échantillons était de 30 m x 30 m, soit 900 m² dans les terres forestières et dans la culture de rente, en revanche dans les Agrosystèmes forestiers, elle était de 50 m x 100 m, soit 5 000 m² (un demi-hectare). Le choix de 5000 m² dans les Agrosystèmes forestiers est d'éviter une exclusion de beaucoup de ligneux dans les placettes d'inventaire.

Tableau 3 : Plan d'échantillonnage d'inventaire forestier pour la détermination des facteurs de biomasse et des facteurs propres au Burundi dans le secteur AFAT.

Numéro de classe	Typologie des classes	Catégories GIEC	Placettes d'inventaire Prévues
1	Forêts ombrophiles de montagne	Terres forestières	100
2	Forêts claires	Terres forestières	60
3	Forêts sclérophylles à Hyphaene	Terres forestières	8
4	Forêts temporairement inondées	Terres forestières	20
5	Boisements mûtres denses	Terres forestières	25
6	Boisements intermédiaires	Terres forestières	10
7	Boisements dégradés	Terres forestières	35
8	Autres terres boisées	Terres forestières	52
10	Cultures de rente	Terres cultivées	30
12	Systèmes agroforestiers	Terres cultivées	60
Total			400

Pour mieux visualiser la répartition des placettes sur le terrain, elles ont été localisées sur la carte administrative du Burundi (Cf. Figure 1).

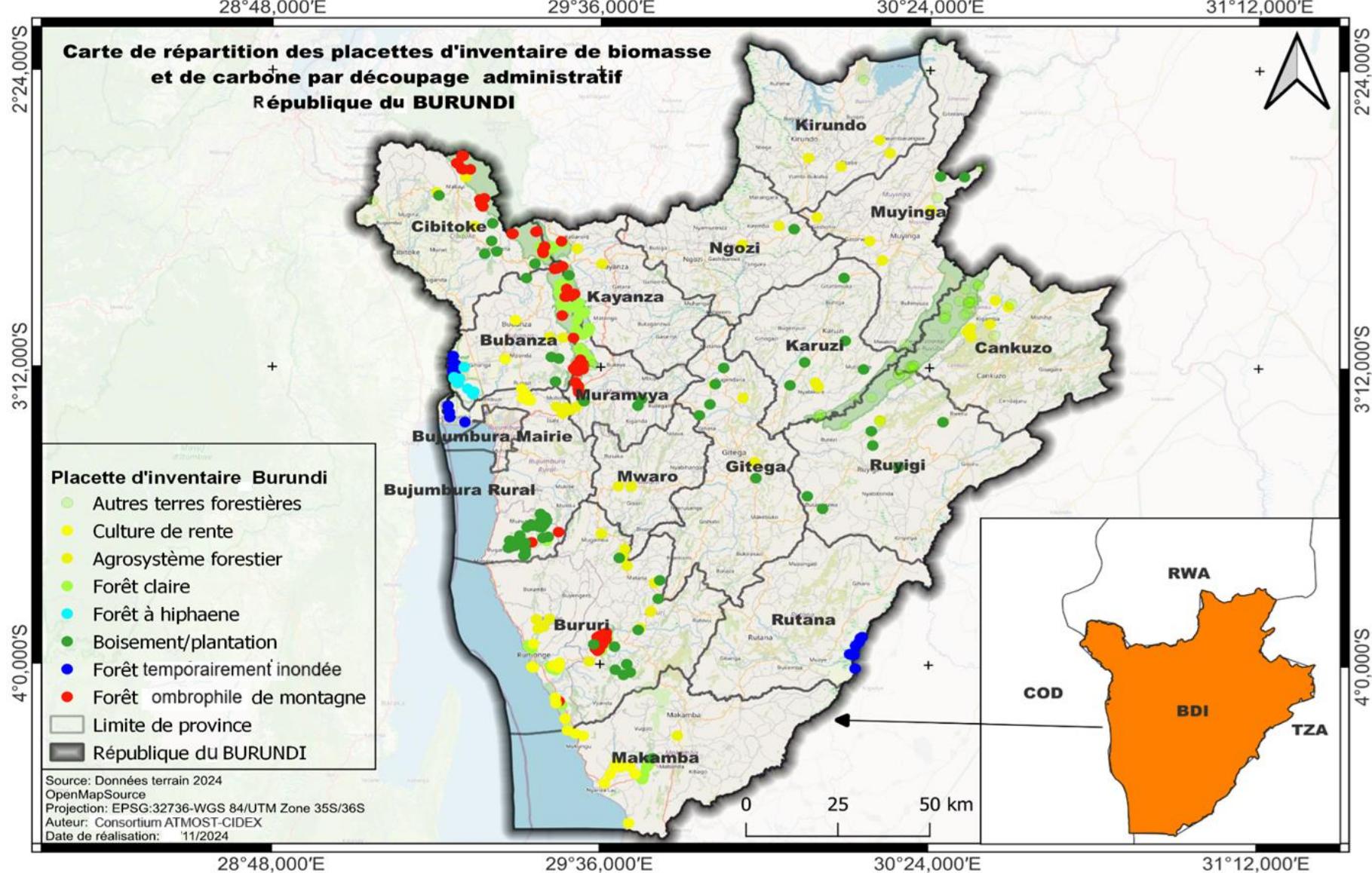


Figure 1 : Localisation des placettes d'inventaire forestier sur la carte administrative du Burundi.

4.3.2. Constitution d'une équipe d'inventaire

Pour effectuer l'inventaire forestier, le Consultant a constitué six (06) équipes de mission pour la collecte des données, avec le concours de l'OBPE. A cet effet, ces équipes ont bénéficié d'un renforcement de capacité sur la méthode d'inventaire sur le terrain. Chaque équipe était composée de 4 membres. Le rôle de chaque personne était spécifié dans l'inventaire comme noté ci-dessous.

1. Le chef d'équipe est responsable de l'organisation de toutes les étapes du travail de terrain, de la phase de préparation à la saisie des données. Il était chargé des contacts et de maintenir de bonnes relations avec la communauté et les informateurs. Il devait avoir une vue d'ensemble des données collectées et des progrès du travail de terrain. En particulier, il avait la responsabilité de :
 - a. Préparer le travail de terrain notamment la recherche bibliographique, la préparation des fiches de terrain et des cartes ;
 - b. Planifier le travail de l'équipe ;
 - c. Contacter les services forestiers locaux, les autorités administratives, la communauté locale ; présenter aux autorités et aux responsables des services forestiers les objectifs de l'inventaire et le programme de travail, et leur demander assistance pour contacter les populations locales, identifier des informateurs, guides et ouvriers ;
 - d. Localiser les unités d'échantillonnage et les placettes (choix de l'itinéraire d'accès) ;
 - e. Logistique : organiser et s'informer sur le logement; recruter les ouvriers locaux ; organiser l'accès à l'unité d'échantillonnage ;
 - f. Interviewer les informateurs extérieurs et la population locale ;
 - g. Prendre note des informations collectées ;
 - h. Vérifier que les fiches sont complètes et s'assurer que les données recueillies sont fiables ;
 - i. Organiser des réunions après le travail de terrain pour faire la synthèse de la journée de travail.

2. L'assistant du chef d'équipe doit :

- a. Aider le chef d'équipe dans ses fonctions y compris dans la prise de notes et l'orientation des layons ;
- b. Effectuer les mesures et observations nécessaires ;
- c. Veiller à ce que le matériel de l'équipe soit toujours complet et fonctionnel ;
- d. Superviser et orienter les ouvriers recrutés localement.

3. Le prospecteur était chargé de :

- a. Identifier les espèces forestières, avec appui de l'adjoint ;
- b. Effectuer les mesures et observations nécessaires.

4. Les manœuvres étaient chargés des tâches suivantes, distribuées en fonction des compétences (connaissance des espèces, de la langue et des pratiques locales) :

- a. Aider à faire les mesures de distances ;
- b. Ouvrir des layons et faciliter la visibilité devant les techniciens ;
- c. Donner le nom local et/ou pilote (commercial) des espèces forestières ;
- d. Informer sur l'accès au site.



Photo 2 : Formation de recyclage des équipes d'inventaire dans la cours de l'OBPE

4.3.3. Moyens logistiques et matériels de terrain

Les moyens logistiques et matériels de terrain nécessaires pour réaliser un inventaire forestier sans être exhaustifs sont listés comme suit :

- Véhicule
- Boussole (mesure des azimuts)
- GPS

- Rubans métriques de 100 m ou topo fil (appareil de mesure des distances)
- Instrument de mesure du diamètre des arbres : ruban du couturier ou compas forestier
- Instrument de mesure des hauteurs des arbres et de la pente du terrain : dendromètre de Blum Leisse ou autre dendromètre, clinomètre ou clisimètre (Sunto, télescope de Bitterlich...)
- Plaques dendrométriques
- Ruban de couleur vive pour le marquage
- Baguettes de 60 cm en acier galvanisé pour le marquage des placettes
- Sacs imperméables pour les instruments de mesure et les fiches
- Jumelles (souhaité)
- Piles alcalines AA (pour le GPS)
- Appareil photographique (souhaité)
- Machettes
- Bottes et tenues imperméables
- Trousse de secours
- Radio
- Cartes topographiques
- Chemises plastifiées
- Sous-main (planche) pour la prise de note
- Fiches de collecte de données
- Manuel de terrain
- Feutres permanents et crayons
- Flore et liste des espèces (noms vernaculaires et scientifiques) •
- Panneau papier.

Il est important de noter que l'équipe sur le terrain doit avoir au moins 2 à 3 bons GPS pour éviter tout risque d'anomalie de fonctionnement. En plus dans chacune de ces GPS il faut enregistrer les coordonnées d'un ou de deux points repères pour éviter de se perdre dans la Forêt.

4.3.4. Le chronogramme des activités

Pour ne pas accuser de retard dans l'exécution des tâches sur le terrain les membres de l'OPBE et ATMOST-CIDEX ont convenu de réaliser l'inventaire forestier dans un délai raisonnable de 3 à 4 mois compte tenu des aléas climatiques et des conditions difficiles d'accès du terrain. A cet effet,

les inventaires ont débuté vers la fin du mois d'avril et pour se terminer à mi-août 2024, soit environ 5 mois. Le retard accusé est dû en partie à la pénurie régulière et souvent prolongée de carburant dans les stations de vente.

4.3.4. La collecte des données

Pour la collecte des données, il a été établi deux fiches. Sur la première sont enregistrés tous les renseignements sur la description de la placette. Ces renseignements ont porté entre autres sur la date de l'inventaire, la localisation des placettes et les caractéristiques physiques et biophysiques du milieu. Plus spécifiquement, les informations suivantes sont enregistrées :

- Le nom du chef d'équipe de l'inventaire
- Les coordonnées GPS de la placette (Longitude, Latitude) ;
- L'altitude ;
- Le numéro de la placette (Numérique) ;
- Le code de la classe d'occupation de terre ;
- La forme et la superficie de la placette ;
- L'âge de la plantation pour les boisements ;
- Le type de formation végétale ;
- Les caractéristiques du sol (type de sol, la géomorphologie, la topographie) ;
- Les recouvrements de la végétation exprimés en % (Recouvrement global de la strate ligneuse, le recouvrement de la strate arborée, le recouvrement de la strate arbustive) ;
- La fréquence du sol nu.

Tous ces paramètres sont enregistrés sur une fiche modèle descriptive de la placette en (voir le modèle en Annexe).

La deuxième fiche constitue la fiche d'inventaire proprement dite. Les mesures sur les paramètres dendrométriques des individus ou tiges ligneuses des espèces recensées dans les placettes y sont systématiquement enregistrées. Pour ce faire, dans chaque classe d'occupation de terre et dans chacune des placettes retenues pour l'inventaire préliminaire, il a été mesuré sur toutes les tiges ligneuses des espèces recensées et dont la circonférence basale est supérieure ou égale à 10 cm et à 15-20 cm du sol, les paramètres dendrométriques suivants :

- Le nom scientifique de l'espèce mesurée ;
- La circonférence à 1,30 m du sol (c1,30 m) à l'aide d'un ruban du couturier ou d'un

compas forestier ;

- La hauteur totale exprimée en m à l'aide d'un dendromètre de Blum Leisse ou autre dendromètre, clinomètre ou clisimètre (Sunto, télescope de Bitterlich...)
- L'état physique de la tige mesurée (mort ou vivant) ;

Les différents paramètres dendrométriques mesurés sur le terrain sont enregistrés sur une fiche modèle d'inventaire forestier annexée au rapport.

Il est important de noter que sur 400 placettes prévues pour réaliser l'inventaire forestier, 394 ont été réalisées, soit un taux d'exécution de 99% (Cf. Tableau en Annexe).

4.4. Méthode de détermination des facteurs de biomasse aérienne

Faut-il le rappeler que la détermination des facteurs de biomasse est forcément liée à la collecte des données sur le terrain à travers un inventaire forestier. Après notre inventaire forestier, toutes les données collectées sur le terrain ont été saisies placette par placette, pour le traitement afin de déterminer les facteurs de biomasse et les facteurs d'émission propre au pays. Pour ce faire il a été créé un masque de saisie dans le logiciel Excel. A cet effet, chaque paramètre enregistré sur la fiche descriptive aussi bien que sur la fiche de collecte des données (paramètres dendrométriques) a été enregistré dans une colonne spécifique. Autrement dit une colonne de la feuille Excel a été réservée pour chaque paramètre enregistré sur le terrain.

En matière d'inventaire forestier notamment dans le cadre du changement climatique pour calculer les émissions des gaz à Effet de Serre (GES), plusieurs formules ou équations allométriques ont été développées pour déterminer les facteurs de biomasse exprimés en tonnes de matière sèche (M S) par hectare. D'une manière générale, pour déterminer la biomasse sèche dans le volume du bois obtenu, il est couramment utilisé la formule du GIEC selon laquelle chaque mètre cube de bois contient 0,5 tonnes de matière sèche. Autrement dit la fraction de matière sèche dans le volume du bois est de 0,5 tonne par m^3 . Cette fraction de carbone dans le m^3 du bois est une valeur par défaut.

Le bassin du Congo, à cause de la valeur mondiale de son patrimoine forestier, fut un laboratoire pour les forestiers et biométriciens dans le secteur de développer des équations allométriques permettant de déterminer avec plus de précision les facteurs de biomasse et de carbone dans la végétation aérienne. Ces équations allométriques sont variables en fonction des zones géographiques, climatiques et écologiques et selon le type des forêts et des plantations artificielles.

Dans la zone COMIFAC, dont relève le Burundi, plusieurs travaux ont été réalisés par le CIRAD FORET.

Dans la zone COMIFAC à cause de la multiplicité des équations allométriques dans le secteur forestier, il a été réalisé une étude comparative de ces méthodes afin de déterminer celles qui donnent plus de précision dans l'estimation des paramètres (volume, biomasses sèches, stock de carbone) dans les forêts. A l'issue de cette étude, le Secrétariat Exécutif de la COMIFAC a édité en juillet 2019 un document dont le titre est : « GUIDE SOUS-REGIONAL D'INVENTAIRE ET DE SURVEILLANCE DES FORETS »

Dans ce Guide, l'équation allométrique recommandée dans la zone COMIFAC est celle qui a été développée par un groupe d'experts dirigé par Adeline Fayolle, composé de 30 membres relevant de plusieurs Universités et Institutions de recherche et développement d'Afrique centrale, d'Europe et d'Asie. L'équation allométrique développée a été publiée en 2018 dans la revue « *Forest Ecology and Management* ». Dans le cadre de notre étude c'est cette équation qui a été utilisée. La formule se présente comme suit :

$$\text{AGBest} = 0.0673 \times (\text{WSG} \times \text{D}^2 \times \text{H})^{0.976}$$

AGB = Aboveground biomass of trees (biomasse aérienne de l'arbre en kg) ;

0,0673 = constante k ;

WSG = Wood Specific Gravity (in g/cm³) (densité volumique du bois de l'espèce) ;

D = DBH (diamètre à hauteur de poitrine ou à 1,30 m du sol en cm) ;

H = hauteur de l'arbre en m

0,976= coefficient de forme.

La précision de la biomasse aérienne des arbres mesurés ainsi que le carbone séquestré résultent de l'intégration du paramètre WSG dans cette équation allométrique. Ainsi, dans le masque de saisie des paramètres mesurés sur le terrain, nous avons ajouté une colonne pour ce nouveau paramètre. Il est important de rappeler que la densité volumique du bois (WSG) n'est pas un paramètre mesuré sur le terrain, mais plutôt déterminer dans les laboratoires spécialisés sur la physique des bois. A cet effet, ce paramètre a fait l'objet de beaucoup recherche bibliographique sur le net pendant tout le processus de la saisie de données.

Pour le traitement de données nous avons introduit dans le masque de saisie une nouvelle colonne qui a été réservée à cette équation allométrique. De ce fait, dans chaque placette et pour chaque tige ou pieds mesuré il a été calculée la biomasse aérienne exprimée en kg de M.S.

Un cumul de la biomasse aérienne de l'ensemble de tiges mesurées dans chaque placette a été fait pour obtenir la production totale exprimée en kg. En ce qui concerne la production de la biomasse sèche par hectare, les valeurs parcellaires ont été divisées par la surface de placette puis multipliée par 10 000 m². Autrement dit dans toutes les placettes de 900 m², la biomasse a été divisée par 900, puis multipliée par 10 000 m². En ce qui concerne les placettes de 5 000 m², la biomasse a été divisée par 5 000, puis multipliée par 10 000 m². La valeur des facteurs de biomasse dans les placettes exprimée en kg a été divisée par 1000 pour l'obtenir en tonne par hectare.

Pour déterminer les facteurs de biomasse par classe d'occupation exprimés en tonne par hectare, nous avons procédé à un classement des placettes par type d'occupation. De ce fait, toutes les placettes ont été classées par ordre alphabétique en fonction des classes d'occupation de terre. Ainsi pour chaque classe d'occupation des terres, nous avons procédé au classement des placettes par ordre décroissant de la production de biomasse, c'est-à-dire de la plus grande valeur à la plus petite. Pour enfin déterminer le facteur de biomasse réel dans classe d'occupation de terres, une moyenne de production de biomasse de l'ensemble des placettes a été calculée ainsi que son écart type et les deux valeurs extrêmes c'est à dire la valeur maximum (Maxi) et minimum (mini).

En plus du facteur de biomasse pour chaque classe d'occupation de terre, il a été estimé le stock de biomasse. Pour cela, le facteur de biomasse a été multiplié par la superficie totale. En fonction des dates de réalisation des cartes d'occupation des terres qui vont de 1990 à 2022, nous avons déterminé la tendance du stock de biomasse par classe d'occupation ainsi que le cumul. L'ensemble de ces résultats constitue le **Livrable B** présenté dans le chapitre réservé à cette rubrique.

4.4. Méthode de détermination des facteurs d'émission propre au pays

Ce sous chapitre de notre approche présente la méthode de détermination des Facteurs d'Emission (FE) propre au Burundi. Les FE propres au pays, notamment dans le secteur AFAT, ne sont autres choses que la quantité moyenne de carbone séquestrée par hectare sur une ou des terres forestières. A cet effet, elles sont fonction des facteurs de biomasse.

Selon la formule du GIEC, une tonne de matière sèche contient 500 kg de carbone, soit 0,5 tonne. La formule du GIEC pour déterminer les FE propres est suffisamment détaillée dans le document « GUIDE SOUS-REGIONAL D'INVENTAIRE ET DE SURVEILLANCE DES FORETS » de la COMIFAC, mais aussi dans les lignes Directrice du GIEC. La formulation de l'équation se présente comme suit :

$$Ct = DA \times FE = DA \times BA \times FC$$

$$\text{Donc } FE = BA \times FC = AGB \times FC$$

DA= donnée d'activité ;

FE = Facteur d'émission propre au pays ;

BA = AGB = biomasse aérienne ;

FC = fraction de carbone = 0,5

Dans notre processus de traitement de données, nous avons introduit dans le masque de saisie une nouvelle colonne qui a été réservée à cette formule de détermination de FE propre au pays. Ainsi comme dans le processus de détermination des facteurs de biomasse, dans chaque placette et pour chaque tige ou pieds mesuré il a été calculée la quantité de carbone séquestrée. En outre dans chaque placette, il a été estimé pour chaque pieds d'arbre ou tige inventorié, la biomasse aérienne en kg et le carbone séquestré en kg.

Après la phase de saisie et traitement des données, comme dans le chapitre précédent il a été adopté le même processus de calcul pour déterminer dans chaque classe d'occupation de terre les facteurs d'émission propre au pays correspondant à la quantité moyenne de carbone séquestrée en tonnes par hectare. Aussi pour chaque classe d'occupation de terre, les valeurs Maxi et mini de carbone séquestré ont été définies. En fonction des superficies par classe d'occupation de terre, il a été estimé le stock total de carbone dans la biomasse aérienne et la variation de la tendance dans le temps. L'ensemble de ces résultats constitue le **Livrable C** présenté dans le chapitre réservé à cette rubrique.

5. LES LIVRABLES

Au terme de l'inventaire forestier réalisé et des estimations des biomasses et des facteurs d'émission propres, les résultats obtenus sont présentés sous formes de deux livrables, conformément aux termes de référence. Il s'agit de :

- Livrable B : Détermination des facteurs de biomasse pour les différentes classes d'occupation de terre ;
- Livrable C : Détermination des facteurs d'émission spécifique au pays dans le secteur AFAT.

5.1. Livrable B

Par rapport au livrable B il sera présenté :

- Les facteurs de biomasse pour les différentes classes d'occupation de terre ;
- La variation des facteurs de biomasse par classe d'occupation de terres ;
- La variation du stock de biomasse ;
 - *Variation du stock de biomasse par classe d'occupation de terres et par catégorie du GIEC entre 1990 et en 2022* ;
 - *Tendance globale du cumul de stock de biomasse* ;
 - *Tendance du stock de biomasse par catégorie de terre du GIEC* ;
 - *Contribution des catégories de terres du GIEC au stock de biomasse*.

5.1.1. Facteurs de biomasse dans le secteur AFAT au Burundi selon l'occupation des terres

A l'issue de l'inventaire forestier, il a été déterminé la biomasse pour chaque classe d'occupation de terres (Cf. 4). Le facteur de biomasse le plus élevé est observé dans la classe d'occupation de terre de Boisements matures denses, avec une production moyenne de 435,77 tonnes par hectare. La production de biomasse moyenne dans cette classe d'occupation est nettement supérieure à celle préconisée par le GIEC qui est estimée à 300 tonnes par hectare. Dans ces Boisements matures denses, les facteurs de biomasse sont compris entre 318,65 et 494,78 tonnes par hectare, avec un écart-type relativement faible de 45,62 tonnes par hectare. Ceci pourrait s'expliquer par la nature de

ces Boisements qui sont des grandes plantations âgées de 40 ans et plus. En outre, ces Boisements mûtres denses sont des peuplements équiens ayant pris l'allure des vraies forêts denses humides, dont la production peut atteindre plus de 500 tonnes de biomasse par hectare (GIEC, 2006).

Les boisements matures sont suivis par les forêts ombrophiles de montagne, les cultures de rente (Palmeraies) et les Boisements intermédiaires. Dans ces classes d'occupation, le facteur de biomasse est de 313,58 tonnes par hectare pour les forêts ombrophiles de montagne, 223,69 tonnes par hectare pour les cultures de rente (palmeraies) et 140,75 tonnes par hectare pour les Boisements intermédiaires.

Les Forêts claires et les Forêts sclérophylles à *Hyphaene* présentent des facteurs de biomasse relativement moyens, avec dans l'ordre 107,47 tonnes et 60,27 tonnes par hectare. En outre l'écart très élevé entre les valeurs Maxi et mini des facteurs de biomasse dans les forêts ombrophiles de montagne et dans les forêts claires est un indicateur de forte pression anthropique sur les ressources forestières.

Les autres classes d'occupation de terres présentent un niveau de facteur de biomasse faible. C'est le cas des Agrosystèmes forestiers, avec une moyenne de 7,02 tonnes par hectare. Les agrosystèmes occupent une très grande superficie sur le territoire national, mais ils comprennent différentes cultures comme les bananeraies qui ne contribuent pas à la biomasse ligneuse. La classe des forêts temporairement inondées contient les plus faibles valeurs de biomasse, avec une moyenne de 2,15 tonnes par hectare. Cette classe a été assimilée à des savanes arbustives. En effet, elle contient principalement des herbacées géantes et des arbustes. Cette classe occupe une superficie très faible sur le terrain.

La synthèse des résultats de biomasse est donnée dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Facteur de biomasse par classe d'occupation des terres et par catégories du GIEC dans le secteur AFAT au Burundi. Les valeurs sont exprimées en tonnes de matière sèche par hectare.

Catégories du GIEC	Typologie des classes	Facteurs de Biomasse	Ecart type	Valeur Maxi	Valeur mini	Valeur de référence GIEC
Terres forestières	Forêts ombrophiles de montagne	313,58	117,25	498,91	106,70	310-(130-510)
	Forêts claires	107,47	110,24	415,44	7,05	260-(160-430)
	Forêt sclérophylle à Hyphaene	60,27	45,43	153,14	9,08	40-190
	Forêts temporairement inondées	2,15	1,73	7,74	0,27	
	Boisements	219,95	198,46	494,78	1,54	300
	<i>Boisements matures denses</i>	435,77	45,62	494,78	318,65	
	<i>Boisements intermédiaires</i>	140,75	57,91	261,38	82,02	
	<i>Boisements dégradés</i>	23,99	22,23	73,12	1,54	
	Autres terres boisées (savane arborée, savane arbustive)	16,97	28,64	160,82	0,27	40-170
Terres cultivées	Cultures vivrières					
	Cultures de rente (palmier)	223,69	110,58	437,93	44,53	
	Marais cultivés					
	Système agroforestier	7,02	13,31	85,22	0,36	
Prairies	Pâturages ou savanes herbeuses					
Zones humides	Lacs et rivières					
	Tourbières					
Etablissements	Milieu artificiel					

5.1.2. Variation des facteurs de biomasse par classe d'occupation de terres

La variation des facteurs de biomasse par classe d'occupation de terres est illustrée par la Figure 2. Après observation et analyse, ces facteurs sont repartis en quatre (04) classes selon le niveau de production de biomasse aérienne par hectare.

La première classe de facteur de biomasse est représentée les Boisements mûtres denses, avec un niveau de production estimé à 435,77 tonnes par hectare. Les Boisements mûtres denses sont constitués par les vieilles plantations forestières, à majorité les Eucalyptus. Dans ces boisements à Eucalyptus, le potentiel de séquestration de carbone peut atteint 226,95 tonnes par hectare en moyenne.

Quant à la deuxième classe, elle est constituée par les Forêts ombrophiles de montagne, les Cultures de rente et les Boisements intermédiaires. Les facteurs de biomasse dans ces trois (03) classes d'occupation de terres sont respectivement 313,58 tonnes, 223,69 tonnes et 140,75 tonnes par hectare.

Pour la troisième classe de biomasse, elle comporte les Forêts claires, les Forêts sclérophylles à Hyphaene et les Boisements dégradés. Dans ces trois (03) classes ou catégories d'occupation de terres, le niveau du facteur de biomasse est compris entre 107, 47 tonnes et 23, 99 tonnes par hectare.

S'agissant de la quatrième classe de facteurs de biomasse, elle comporte les Autres terres boisées, les Systèmes Agroforestiers et les Forêts temporairement inondées. Dans cette classe, le niveau des facteurs de biomasse varie de 16,97 tonnes à 2,15 tonnes par hectare.

Les variations observées dans les biomasses des différentes classes sont représentées dans la Figure 2. Compte tenu du caractère très hétérogène de la classe des Boisements, nous présentons les variations dans ses trois sous-catégories, c'est-à-dire les boisements matures denses, les boisements intermédiaires et les boisements dégradés. La sous-catégorie des boisements dégradés peut comprendre à la fois des plantations jeunes, des boisements partiellement récoltés, ou même des peuplements naturels dégradés.

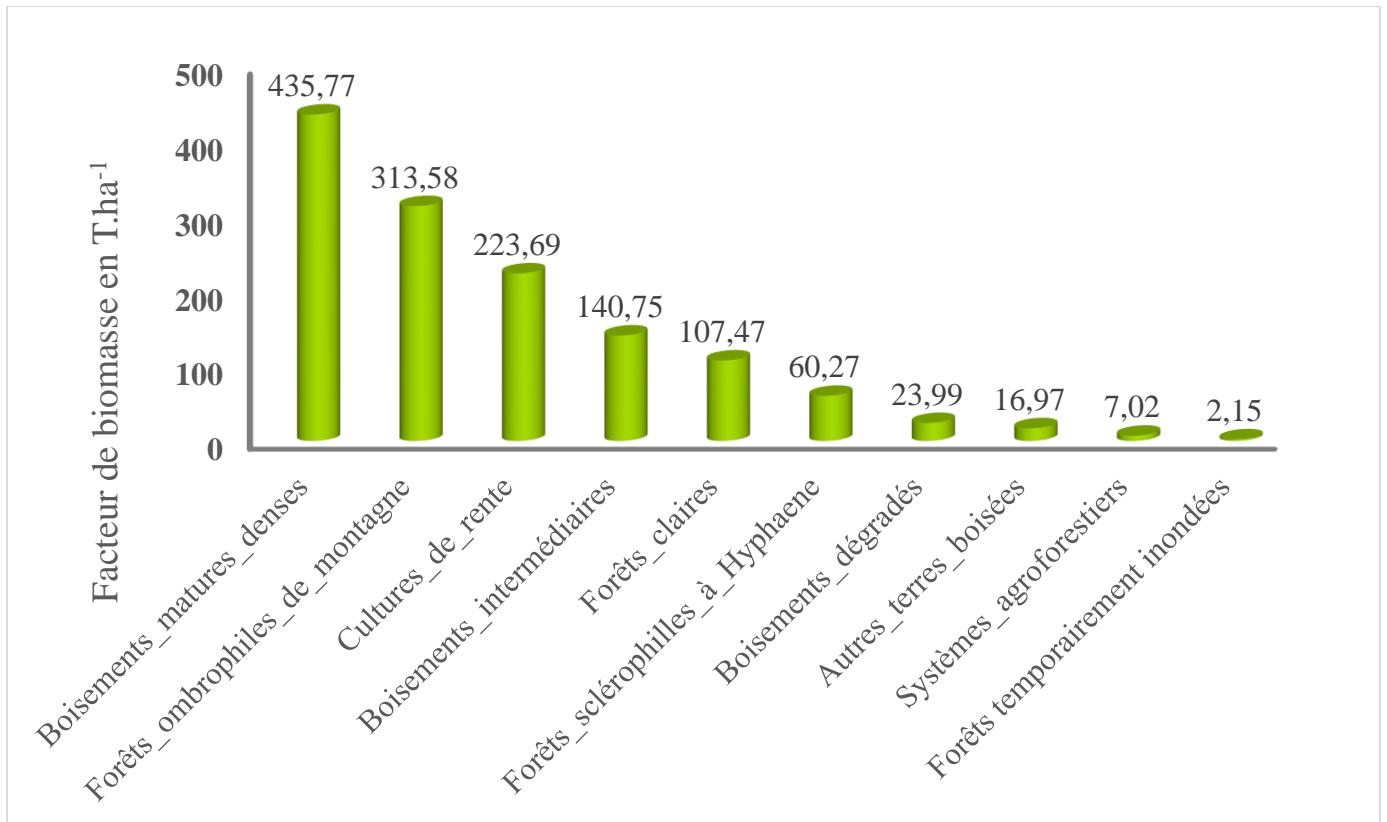


Figure 2 : Variations des facteurs de biomasse par classe d'occupation des terres au Burundi

5.1. 3. Variations du stock de biomasse

5.1.3.1. Variations du stock de biomasse par classe d'occupation de terres et par catégorie GIEC entre 1990 et en 2022.

La variation du stock de biomasse par classe d'occupation de terres et par catégorie du GIEC est rapportée dans le tableau 5. Au Burundi, le stock de biomasse, aussi bien dans les terres forestières que dans les terres cultivées, est marqué par une variation dans le temps. Les classes d'occupation de terres qui montrent une évolution positive du stock de biomasse dans l'ensemble entre 1990 et 2022 sont les Forêts ombrophiles de montagne, les Boisements mûtres denses, les boisements intermédiaires et Systèmes agroforestiers.

Dans les Forêts ombrophiles de montagne, le stock de biomasse est passé de 10 651 510 tonnes en 1990 à 12 546 235 tonnes en 2022. Cependant entre 2000 et 2010, on observe une baisse du stock de biomasse. En outre, cette classe d'occupation de terres reste la seule dans les catégories de forêts semi-naturelles où la biomasse connaît une dynamique positive dans le temps. La tendance positive du stock de biomasse dans les forêts ombrophiles est un bon indicateur de réponse forte, de l'Etat

Burundais, par le biais d'une bonne politique nationale de protection de l'environnement mais aussi des actions efficaces en matière d'aménagements forestiers.

Dans les Boisements mûtres denses, la tendance du stock de biomasse suit une dynamique positive. Elle a évolué de 705 870 tonnes en 1990 à 4 618 073 tonnes en 2022.

En ce qui concerne les Boisements intermédiaires, la tendance du stock de biomasse est comparable à celle des forêts ombrophiles. Elle régresse entre 1990 et 2000 à partir de laquelle on observe un accroissement significatif de la biomasse jusqu'en 2022. Le stock de biomasse a évolué de 4 092 426 tonnes à 5 933 128 tonnes entre 1990 et 2022. Cette catégorie des terres forestières pourrait abriter des plantations ou boisements étatiques et privées qui de temps en temps font l'objet d'exploitation.

En revanche, dans les autres classes d'occupation de terre, il est observé une nette régression du stock de biomasse entre 1990 et 2022. Ceci pourrait s'expliquer par l'exploitation excessive de ressources ligneuses.

Il est important de noter qu'au Burundi, les plantations forestières ont été faites en majorité à base d'espèces d'Eucalyptus spp, de Pinus, de Callitriches, et de Cyprès. Dans la littérature, plusieurs travaux ont été réalisés sur la croissance et la production de biomasse de même que la séquestration de carbone dans ces plantations en lien avec leur âge (Vincent O.Oeba et al., 2016 ; Daniel Verhaegen et al., 2014). Ces travaux pour la plupart ont été réalisés en Afrique, en Asie, en Australie, au Canada et en Amérique latine. De même, plusieurs études ont été faites sur la production de bois, de biomasse sèche et de facteurs d'émissions dans les forêts denses humides, les forêts sèches et les savanes.

Tableau 5 : Variation du stock de biomasse dans les classes d'occupation de terres et par catégorie GIEC entre 1990 et 2022 au Burundi.

Catégories du GIEC	Typologie des classes	1990	2000	2010	2022
Terres forestières	Forêts ombrophiles de montagne	10 651 509,84	10 097 536,27	9 648 605,74	12 546 235,45
	Forêts claires	5 854 962,38	5 150 238,60	3 425 000,12	1 683 531,52
	Forêt sclérophylle à Hyphaene	1 033 101,33	964 321,21	871 381,25	311 338,55
	Forêts temporairement inondées	73 547,03	66 665,59	43 222,87	35 851,87
	Boisements matures denses	705 868,96	1 499 824,47	2 887 246,43	4 618 072,58
	Boisements intermédiaires	4 092 425,89	3 187 117,67	4 532 608,85	5 933 127,65
	Boisements dégradés	3 022 662,27	4 949 348,11	4 342 196,24	3 238 386,59
	Autres terres boisées (savane arborée, savane arbustive)	10 505 818,66	8 248 003,43	4 339 706,88	976 454,82
Terres cultivées	Cultures vivrières				
	Cultures de rente (palmier)	11 395 010,19	9 503 075,96	8 796 419,11	8 746 894,15
	Marais cultivés				
	Système agroforestier	6 053 525,99	6 248 026,89	6 291 667,21	6 536 314,70
Prairies	Pâturages ou savanes herbeuses				
Zones humides	Lacs et rivières				
	Tourbières				
Etablissements	Milieu artificiel				

5.1.3.2. Tendance globale du cumul de stock de biomasse

La tendance du stock de biomasse totale aérienne des ligneux, résultant du cumul de l'ensemble des classes d'occupation des terres, est illustrée par la Figure 3. Cette tendance est marquée par une régression nette de la biomasse entre 1990 et 2010, passant de 53,39 mégatonnes à 44,63 mégatonnes. La perte totale de biomasse entre 1990 et 2022 s'élève à 8,76 mégatonnes. La perte de biomasse par période est de 3,47 mégatonnes entre 1990 et 2000, 4,74 mégatonnes entre 2000 et 2010 et 0,55 mégatonnes entre 2010 et 2022. La réduction significative de la perte de biomasse entre 2010 et 2022 pourrait être attribuée, aux résultats positifs des initiatives et des actions menées pour la protection, la conservation, voire la régénération du couvert forestier au Burundi. Il est facile pour un étranger visitant le Burundi d'observer la présence de plantations d'Eucalyptus partout dans le pays.

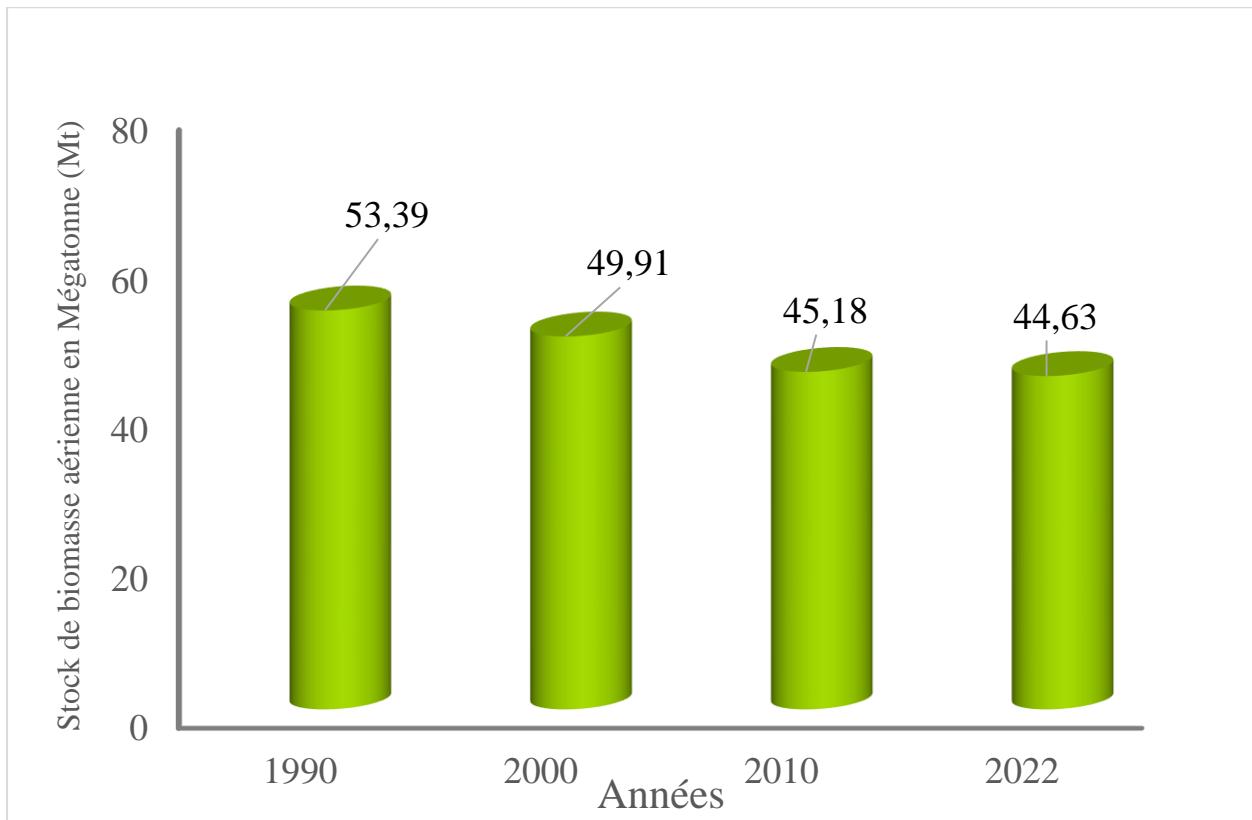


Figure 3: variation du cumul de stock de biomasse dans les classes d'occupation des terres entre 1990 et 2022 au Burundi.

5.1.3.3. La tendance du stock de biomasse par catégorie de terre du GIEC

La Figure 4 montre l'évolution du stock de biomasse ligneuse dans les catégories de terres du GIEC entre 1990 et 2022 au Burundi. Dans les terres forestières, la tendance du stock de biomasse aérienne des ligneux est marquée par une baisse dans le temps entre 1990 et 2022. Dans cette catégorie de terres, la biomasse a évolué de 35,94 mégatonnes en 1990 à 29,34 mégatonnes en 2022, soit une baisse de 6,60 mégatonnes.

Quant aux terres cultivées, la tendance est aussi à la baisse comme celle observée dans les terres forestières. Dans cette catégorie de terres, la biomasse a évolué de 17,45 mégatonnes en 1990 à 15,28 mégatonnes en 2022, soit une baisse de 2,17 mégatonnes.

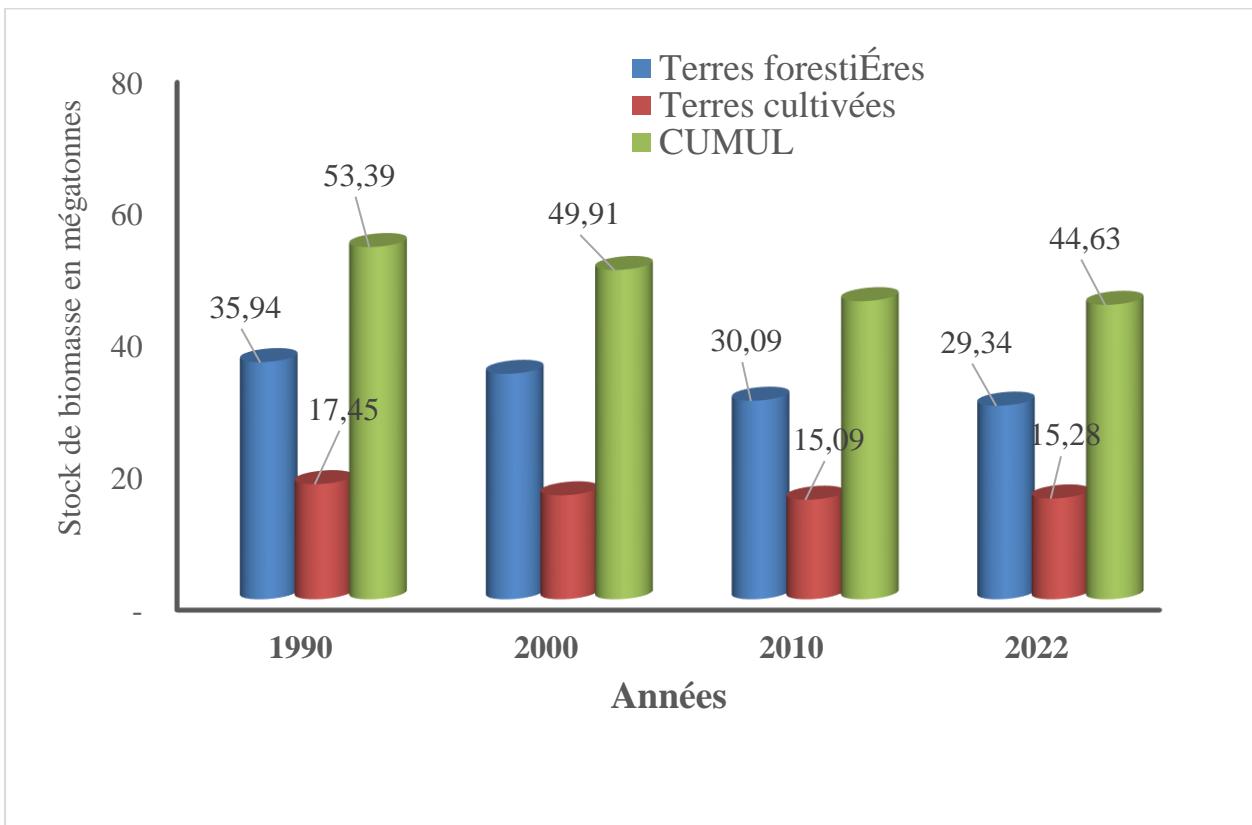


Figure 4 : Variations du stock de biomasse aérienne des ligneux par catégorie de terre du GIEC entre 1990 et 2022 au Burundi.

5.1.3.4. Contribution des catégories de terres au stock de biomasse dans le temps

La contribution au stock de biomasse aérienne des ligneux dans les catégories de terres au Burundi entre 1990 et 2022 est illustrée par la Figure 5.

Les terres forestières présentent la contribution la plus élevée au stock de biomasse aérienne des ligneux et cela quelle que soit la période. La valeur de la contribution des terres forestières varie entre 66% et 68% au maximum. Cependant, il est observé une légère baisse de leur contribution au stock de biomasse entre 1990 et 2022 au profit des terres agricoles.

En ce qui concerne les terres cultivées, leur contribution au stock de biomasse varie entre 32% et 34 % au maximum. La légère augmentation de la contribution des terres cultivées au stock de biomasse aérienne est observée en 2022 au détriment des terres forestières. Il est important de rappeler que les terres cultivées qui contribuent à la biomasse ligneuse dans le contexte du Burundi sont les agrosystèmes forestiers et les cultures de rente (palmeraies).

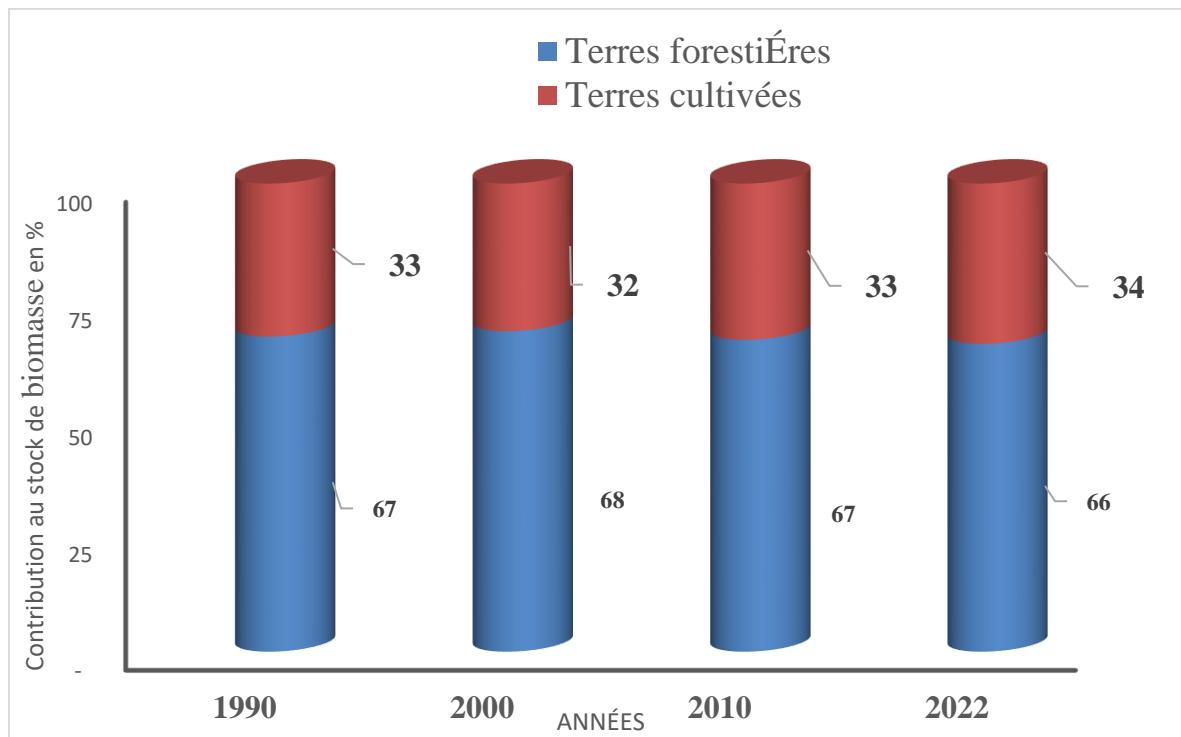


Figure 5 : Contribution des terres forestières et des terres cultivées au stock du carbone dans le temps au Burundi entre 1990 et 2022.

5.1. 4. Carte de biomasse à l'échelle du Burundi

Pour une meilleure représentation visuelle des facteurs de biomasse dans l'espace, il a été réalisé une carte de biomasse superposée au découpage administratif (Figure 6).

Au Burundi, le niveau des facteurs de biomasse est très variable et cela d'une province à l'autre. Les provinces dans lesquelles le potentiel de biomasse aérienne est relativement important sont en majorité celles qui sont localisées dans les parties nord-ouest, l'ouest, le sud, le centre et l'est du pays.

Parmi les provinces de la partie nord-ouest du pays, à couverture forestière élevée par la présence du Parc National de la Kibira (PNK) il faut citer les provinces suivantes :

- Cibitoke ;
- Kayanza ;
- Bubanza ; et
- Muranvya ;

A L'ouest, les provinces à haut potentiel de biomasse aérienne ligneuse sont : Bujumbura Mairie et Bujumbura Rural.

Quant aux provinces du centre, il y a MWaro et Gitega.

S'agissant des provinces du sud, il y a Rumonge, Bururi et Makamba

La province de Ruyigi figure parmi celles à haut potentiel de biomasse aérienne à laquelle peut s'ajouter la province de Cankuzo dans sa partie orientale à la frontière avec la province de Muvinga, dans le Parc national de Ruvubu dans les savanes.

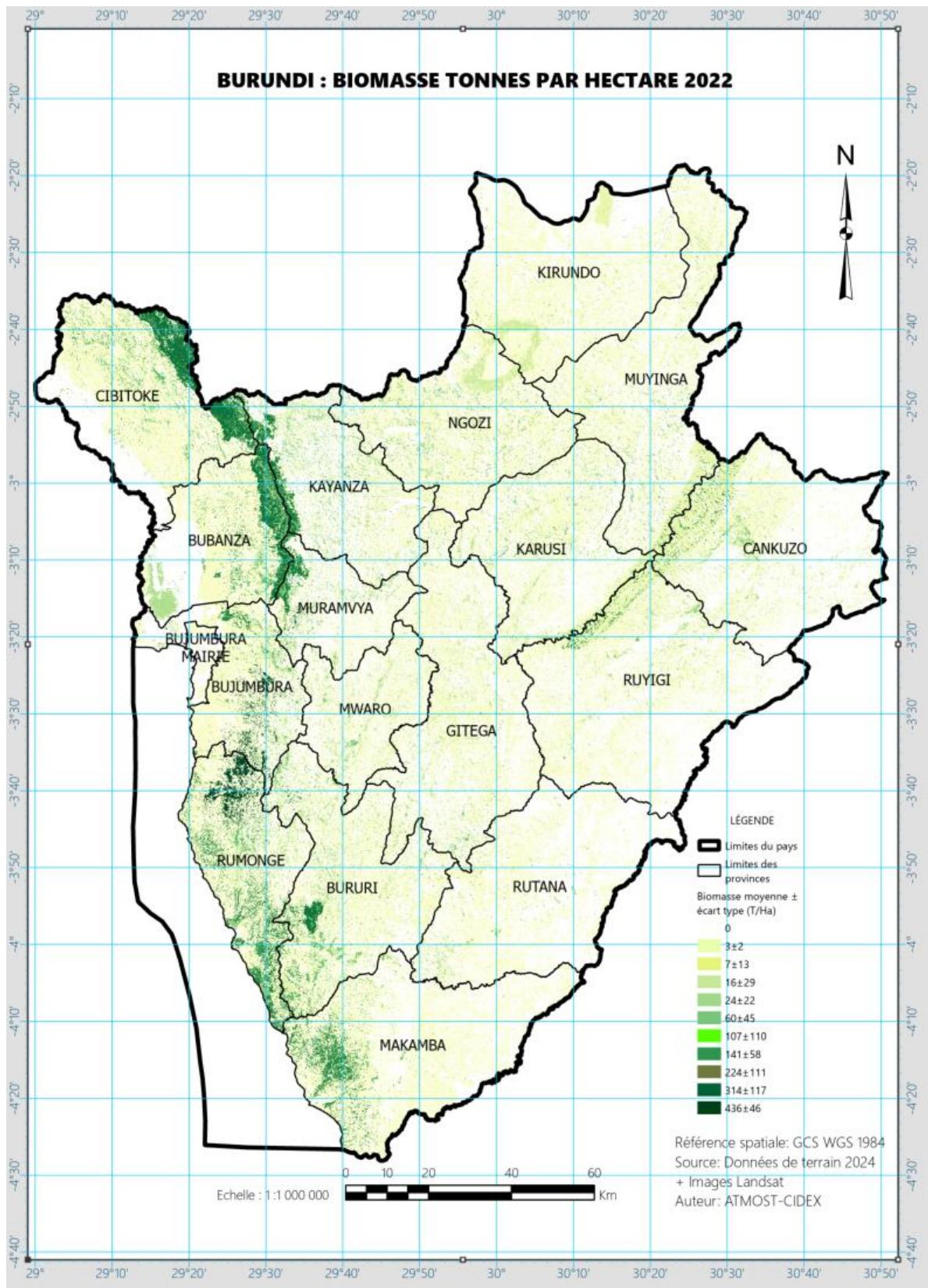


Figure 6 : Carte de biomasse à l'échelle du territoire de Burundi en 2022.

5.2. Livrable C – Facteurs d'émission propres

Par rapport au livrable C il sera présenté :

- Les facteurs d'émission propre au Burundi dans le secteur AFAT ;
- La variation des facteurs d'émission par classe d'occupation des terres ;
- La variation du stock de carbone, comprenant :
 - Variation du stock de carbone dans les Forêts ombrophiles de montagne et dans les Forêts semi-naturelles
 - Variation du stock de carbone dans les Forêts ombrophiles de montagne, les Forêts semi-naturelles et dans les Boisements
 - Variation du stock de carbone dans les terres cultivées
 - Variation du stock de carbone dans les terres forestières et dans terres cultivées
 - Variation du stock de carbone dans les classes d'occupation de terres et par catégorie du GIEC, dans le secteur AFAT au Burundi.
- La tendance du stock cumulé de la biomasse, du stock de carbone et son équivalent en émission négative ou absorption, exprimé en T-eq-CO₂.

5.2.1. Facteurs d'émission propres au Burundi dans le secteur AFAT

A l'issue du résultat de l'inventaire forestier, il a été déterminé un facteur d'émission propre pour chaque classe d'occupation de terres au Burundi. Les valeurs sont rapportées dans le tableau 6.

Le niveau de facteur d'émission le plus élevé est observé dans la classe d'occupation de terre des Boisements mûtres denses. Le facteur d'émission, dans cette classe est estimé en moyenne à **217,89** tonnes de carbone séquestré par hectare. Les valeurs Maxi et mini dans cette catégorie de classe d'occupation de terre sont respectivement **247,39** tonnes et **159,32** tonnes par hectare. L'écart type par rapport à la moyenne générale est relativement faible avec **22,81** tonnes à l'hectare environ. Ceci dénote une homogénéité relative des peuplements dans cette classe d'occupation de terres. Ceci pourrait s'expliquer par la nature de ces Boisements qui sont de plantations âgées de 40 ans et plus. A cet effet, les Boisements denses mûtres sont des vieilles plantations équennes qui ont l'allure des vraies forêts denses humides où la séquestration de carbone peut atteindre un niveau maximal de 215 tonnes par hectare (GIEC,2006). La pluviométrie annuelle élevée, voire

très élevée par endroit, au Burundi et la durée de la saison de pluie (8 à 10 mois), sont des facteurs climatiques favorables aux essences forestières utilisées dans les boisements.

Les boisements denses sont suivis par les Forêts ombrophiles de montagne, les Cultures de rente (les palmeraies) et les Boisements intermédiaires avec respectivement **156,79** tonnes, **111,84** tonnes et **70,38** tonnes de carbone séquestrés en moyenne par hectare. Dans ces trois classes d'occupation de terres, on observe un écart important entre la valeur Maxi et la valeur mini. Pour les Forêts ombrophiles de montagne, le niveau minimal de séquestration de carbone est de **53,35** tonnes par hectare contre une valeur Maxi de **249,46** tonnes. L'écart par rapport à la moyenne générale est estimé à **58,63** tonnes par hectare. En ce qui concerne les Boisements intermédiaires les valeurs mini et Maxi sont respectivement **41,01** et **130,69** tonnes par hectare, avec un écart type de **28,95** tonnes. Pour la Culture de rente, la valeur minimale de séquestration de carbone est de **22,27** tonnes contre une valeur Maximale de **218,97** tonnes par hectare.

S'agissant des Forêts claires et les Forêts sclérophyllées à Hyphaene, les facteurs d'émission propres, sont dans l'ordre de **53,73** tonnes et **30,14** tonnes de carbone séquestré par hectare.

Quant aux autres classes d'occupation de terres, elles présentent un niveau de facteurs d'émission propre faible, allant de **1,07** tonnes dans les Forêts temporairement inondées à **11,99** tonnes par hectare dans les Boisements dégradés en passant par les systèmes agroforestiers et Autres terres boisées. Dans ces classes d'occupation de terres à faible potentiel de facteurs d'émission, les Agrosystèmes forestiers et les Forêts temporairement inondées attirent une attention particulière. Leur niveau de facteur d'émission propre très faible pourrait s'expliquer par la présence des cultures dans les Agrosystèmes forestiers, et la présence d'eau en permanence dans les Forêts temporairement inondées.

Il est important de noter que l'écart très élevé entre les valeurs Maxi et mini des facteurs d'émission propre, dans les Forêts ombrophiles de montagne, les Forêts claires, les Boisements intermédiaires et les Cultures de rente, est un indicateur de forte pression anthropique sur les ressources forestières. En fait, la forte densité de la population burundaise, avec environ 300 habitants au km², n'est pas de nature à faciliter l'exploitation rationnelle et le contrôle des ressources forestières. Quant aux Boisements intermédiaires et la Culture de rente, ils sont généralement des propriétés privées, donc destinés à l'exploitation selon un rythme défini par le producteur.

Tableau 6 : Facteurs d'émission propre par classe d'occupation des terres et par catégories du GIEC dans le secteur AFAT au Burundi, exprimée en tonne de carbone par hectare.

Catégories du GIEC	Typologie des classes	Facteurs d'émission (T.m.s.ha ⁻¹)	Ecart type	Valeur Maxi	Valeur mini	Valeur GIEC (T.m.s. ha ⁻¹)
Terres forestières	Forêts ombrophiles de montagne	156,79	58,63	249,46	53,35	155-(65-215)
	Forêts claires	53,73	55,12	207,72	3,52	130-(80-430)
	Forêt sclérophylle à Hyphaene	30,14	22,71	76,57	4,54	20-95
	Forêts temporairement inondées	1,07	0,87	3,87	0,14	
	Boisements	109,98	99,23	247,39	0,77	150
	<i>Boisements matures denses</i>	217,89	22,81	247,39	159,32	150
	<i>Boisements intermédiaires</i>	70,38	28,95	130,69	41,01	150
	<i>Boisements dégradés</i>	11,99	11,11	36,56	0,77	40
	Autres terres boisées (savane arborée, savane arbustive)	8,48	14,32	80,41	0,14	20-85
Terres cultivées	Cultures vivrières					
	Cultures de rente (palmier)	111,84	55,29	218,97	22,27	
	Marais cultivés					
	Système agroforestier	3,51	6,66	42,61	0,18	3,51
Prairies	Pâturages ou savanes herbeuses					
Zones humides	Lacs et rivières Tourbières					
Etablissements	Milieu artificiel					

5.2.2. Variation des facteurs d'émission par classe d'occupation de terre

La variation des facteurs d'émissions propre au pays par classe d'occupation est illustrée par la Figure 7. Après observation et analyse, les facteurs d'émission (FE) peuvent être subdivisés en quatre (04) classes selon leur niveau et cela comme pour les facteurs de biomasse.

La première classe de FE est représentée aussi par la classe d'occupation des Boisements mûtres denses qui a le niveau de facteur d'émission le plus élevé. Les Boisements mûtres denses, étant constitués par les vieilles plantations forestières, a un potentiel de séquestration de carbone qui atteint 217,89 tonnes par hectare en moyenne.

La deuxième classe, est constituée par les Forêts ombrophiles de montagne, les Boisements intermédiaires et les Cultures de rente. Les facteurs d'émission dans ces trois (03) classes d'occupation sont respectivement 156,79 tonnes, 111,84 tonnes et 70,38 tonnes par hectare.

Pour la troisième classe, elle est représentée par les Forêts claires, les Forêts sclérophylles à Hyphaene et les Boisements dégradés. Dans ces trois (03) classes le niveau du facteur d'émission est compris 53,73 tonnes et 11,99 tonnes par hectare.

En ce qui concerne la quatrième classe de FE, elle est composée des Autres terres boisées, les Systèmes Agroforestiers et les Forêts temporairement inondées. Dans cette classe, le niveau des facteurs d'émission varie de 8,48 à 1,07 tonnes par hectare.

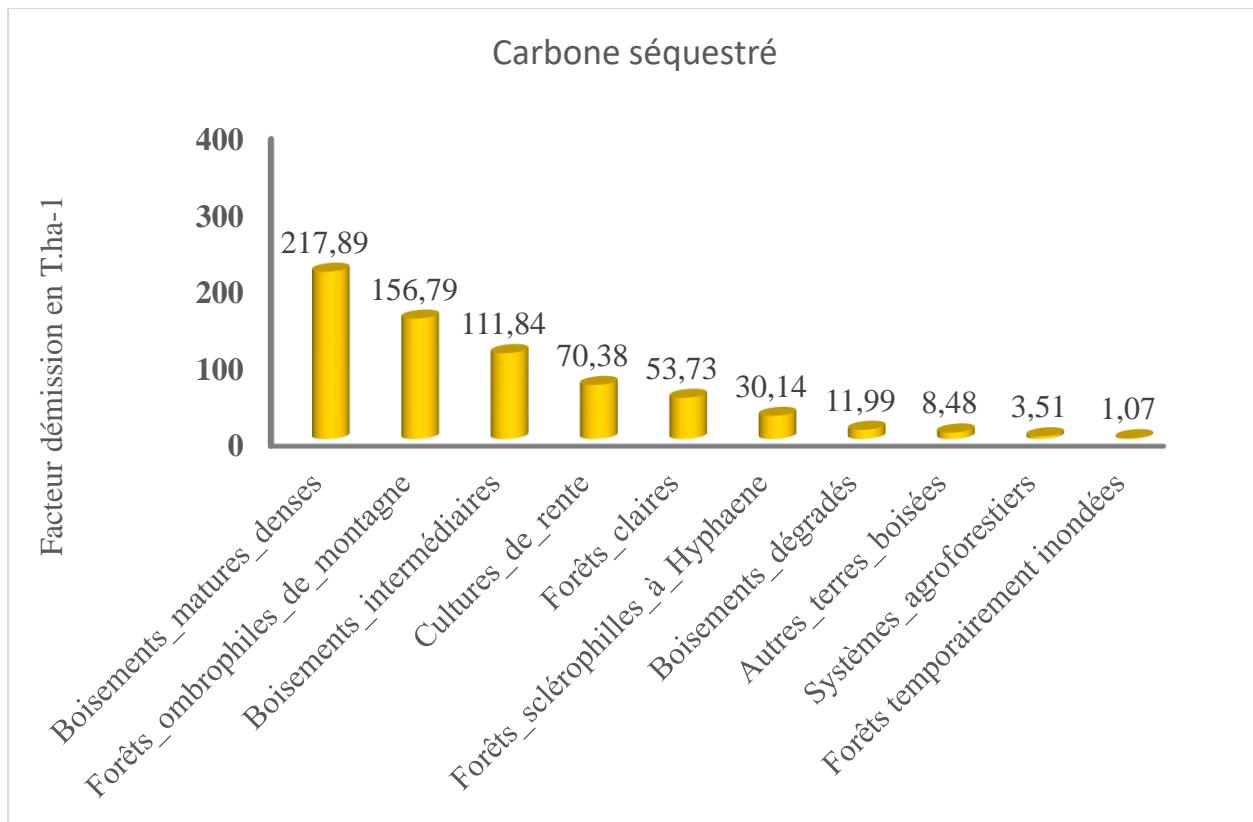


Figure 7 : variation des facteurs d'émission par classe d'occupation de terre au Burundi.



Photo 3 : Images de Boisements matures denses (plantation d'Eucalyptus sp) dans la catégorie GIEC des terres forestières

5.2.3. Variation du stock de carbone

5.2.3.1. Variation du stock de carbone par classes d'occupation de terres et par catégorie GIEC entre 1990 et 2022 au Burundi

Le tableau 7 rapporte le stock de carbone, par classe d'occupation de terres et par catégorie du GIEC, au Burundi et sa variation dans le temps.

Le stock de carbone par classes d'occupation de terres est caractérisé par une augmentation importante et continue dans deux (02) classes, en l'occurrence les Boisements matures denses et les Systèmes Agroforestiers.

Dans les Boisements matures denses, le stock de carbone a évolué de 352 943 tonnes en 1990 à 2 309 089 tonnes en 2022. Dans le système agroforestier, la biomasse a évolué de 3 026 763 tonnes en 1990 à 3 268 157 tonnes en 2022.

En outre, dans les Forêts ombrophiles de montagne, dans les Boisements intermédiaires et dans les Boisement dégradés, la tendance du stock de carbone est marquée par une baisse au début et une augmentation vers la fin en 2022 comparativement à l'état initial (1990).

Dans les Forêts claires, les Forêts sclérophyllées à Hyphaene, les Forêts temporairement inondées, les Autres terres boisées et dans les Cultures de rente (palmier), la tendance du stock de carbone est à la baisse dans le temps et cela de manière continue. Ceci est un indicateur de pression sur les ressources ligneuses dans ces classes d'occupation de terres.

L'accroissement du stock de carbone séquestré dans les classes d'occupation ci-dessus citées, pourrait s'expliquer par la volonté manifeste, les efforts consolidés et renforcés du gouvernement Burundais. Avec l'appui de ses Partenaires Techniques et Financiers (PTF), le gouvernement Burundais présente un bilan positif dans la mise en œuvre des programmes de reboisement, d'aménagement forestier et l'innovation des techniques et technologies agroforestières.

En revanche, le recul du stock de carbone, dans la majorité des classes d'occupation de terres, pourrait sans nul doute s'expliquer par la forte pression humaine sur les forêts pour leur conversion. Il est important de noter que la conversion des terres est l'une causes principales d'aggravation du changement climatique au monde (FAO, 2022, FARA, 2020).

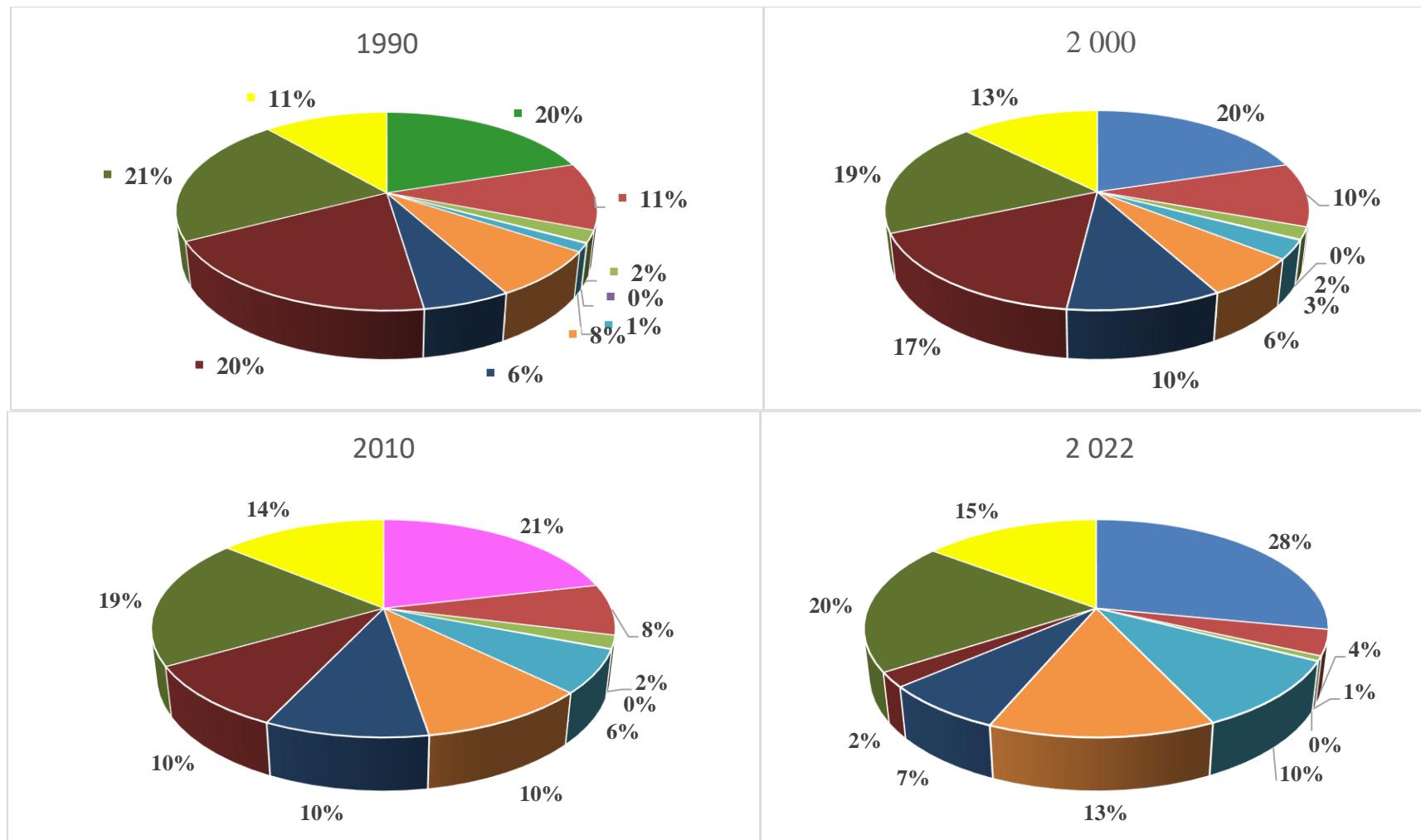
Faut-il le rappeler, la plupart des plantations forestières ont été créées à proximité des aires protégées et des zones urbaines telles que Bujumbura comme une stratégie non seulement pour réduire la pression sur les forêts naturelles restantes d'une part et assurer l'approvisionnement en produits forestiers ligneux/non ligneux d'autre part.

Tableau 7 : variation du stock de carbone dans les classes d'occupation de terre entre 1990 et 2022 au Burundi

Catégories du GIEC	Typologie des classes	1990	2000	2010	2022
Terres forestières	Forêts ombrophiles de montagne	5 325 754,92	5 048 768,14	4 824 302,87	6 273 117,73
	Forêts claires	2 927 208,79	2 574 879,69	1 712 340,71	841 687,43
	Forêt sclérophylle à Hyphaene	516 636,37	482 240,60	435 762,91	155 695,10
	Forêts temporairement inondées	36 602,47	33 177,76	21 510,92	17 842,56
	Boisements matures denses	352 942,58	749 929,44	1 443 656,34	2 309 089,28
	Boisements intermédiaires	2 046 358,32	1 593 672,05	2 266 465,44	2 966 774,59
	Boisements dégradés	1 510 701,15	2 473 642,51	2 170 193,12	1 618 518,35
	Autres terres boisées (savane arborée, savane arbustive)	5 251 671,16	4 123 029,65	2 169 341,98	488 112,33
Terres cultivées	Cultures vivrières				
	Cultures de rente (palmier)	5 697 250,39	4 751 325,56	4 398 012,94	4 373 251,56
	Marais cultivés				
	Système agroforestier	3 026 763,00	3 124 013,44	3 145 833,60	3 268 157,35
Prairies	Pâturages ou savanes herbeuses				
Zones humides	Lacs et rivières Tourbières				
Etablissements	Milieu artificiel				

5.2.3.2 Contribution des classes d'occupation de terres au stock de carbone entre 1990 et 2022

La Figure 8 montre la contribution des classes d'occupation de terres au stock de carbone entre 1990 et 2022 au Burundi. Les classes d'occupation de terres dans lesquelles on observe une tendance positive de la contribution au stock de carbone sont : les Boisements matures denses, les Boisements intermédiaires et les Forêts ombrophiles de montagne. Ceci pourrait s'expliquer par un accroissement continu de la biomasse aérienne et la séquestration de carbone dans ces classes. Par ailleurs, les Agrosystèmes forestiers montrent une contribution au stock de carbone en hausse entre 1990 et 2010 et se stabilise jusqu'en 2022, ce qui pourrait s'expliquer par une stagnation de la conversion des terres dans cette classe. Quant aux Boisements dégradés, leur contribution au stock diminue d'année en année à cause de son exploitation intense. Il est important de noter que cette classe est difficile à cartographier de manière précise, car les travaux sylvicoles qui y sont pratiqués varient régulièrement.



- Forêts_ombrophiles_de_montagne
- Forêts_sclérophiles_à_Hyphaene
- Boisements_matures_denses
- Boisements_dégradés
- Cultures_de_renté
- Forêts_claires
- Forêts_temporairement_inondées
- Boisements_intermédiaires
- Autres_terres_boisées
- Systèmes_agroforestiers

Figure 8 : Contributions des classes d’occupation des terres au stock de carbone entre 1990 et 2022 au Burundi

5.2.3.3. Tendance du cumul de stock de carbone entre 1990 et 2022.

La Figure 9 montre la tendance du stock cumulé de carbone dans les classes d'occupation des terres entre 1990 et 2022. La tendance est marquée par une régression continue du stock de carbone cumulé et ce, dans toutes les classes d'occupation de terre confondues. Le stock de carbone est passé de 26,69 mégatonnes en 1990 à 24,95 mégatonnes en 2000, soit une perte de 1,74 Mégatonnes. La plus forte baisse de stock de carbone est observée entre 2000 et 2010 où est passé de 24,95 mégatonnes à 22,59 mégatonnes, soit 2,37 mégatonnes de carbone perdues.

En outre, malgré la baisse continue du cumul de stock de carbones des classes d'occupation des terres, le stock a évolué de 22,59 tonnes en 2010 à 22,31 tonnes en 2022, soit une perte de 0,28 mégatonnes, un niveau moins faible que précédemment.

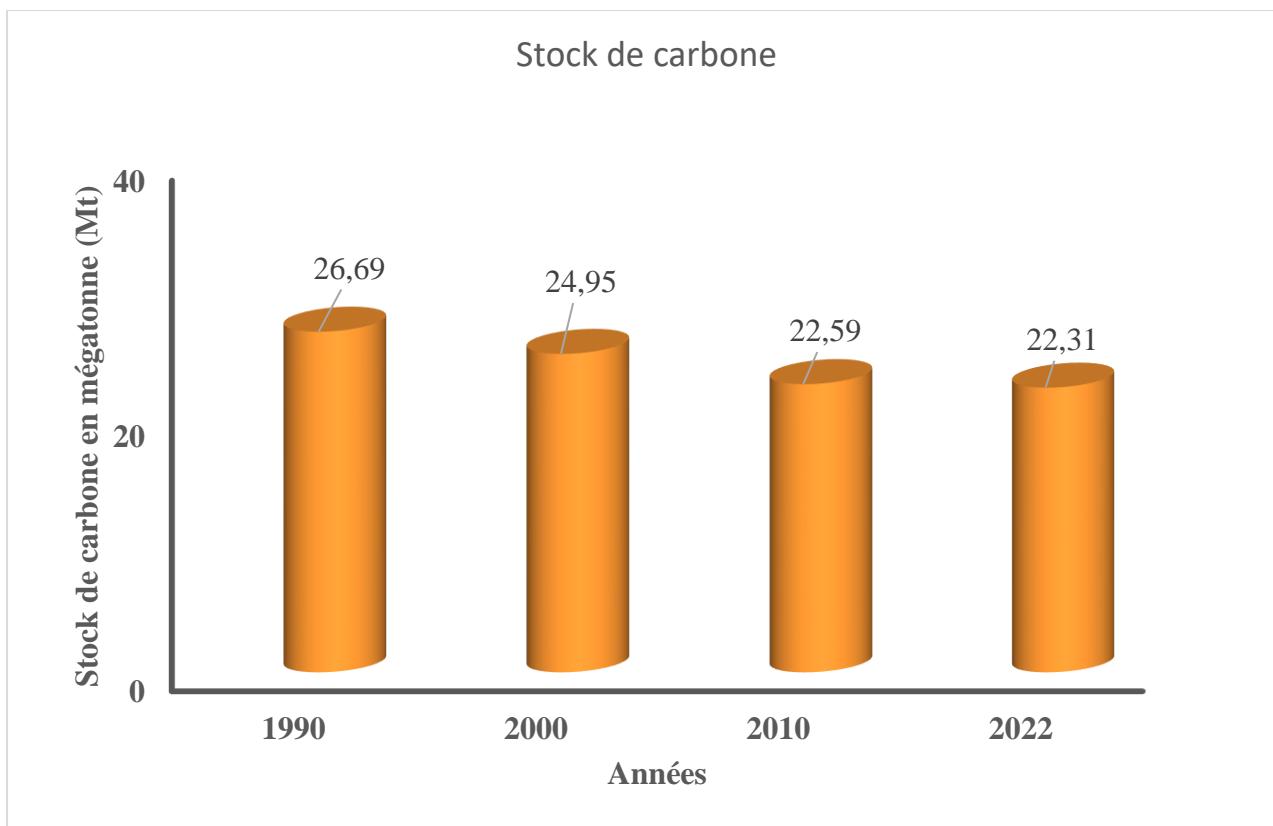


Figure 9 : Tendance du stock cumulé de carbone dans les classes d'occupation des terres entre 1990 et 2022 au Burundi.

5.2.3.4. Variation du stock de carbone dans les Forêts ombrophiles de montagne et dans les Forêts semi-naturelles

En matière de science, une donnée n'a de valeur que comparative. Dans ce chapitre, il est important de mieux cerner l'évolution du stock de carbone dans le Parc National de la Kibira (PNK) et le Bururi à travers les Forêts ombrophiles de montagne, comparativement aux autres types de forêts, appelés forêts semi-naturelles (Forêts claires, Forêts sclérophylles à *Hyphaene*, Forêts temporairement inondées, Autres terres boisées). De même, il sera déterminé la contribution du stock de carbone dans le PNK au stock total généré par les forêts semi-naturelles.

L'évolution du stock de carbone dans la biomasse aérienne des forêts ombrophiles et des forêts semi-naturelles est caractérisée par une tendance à la hausse uniquement dans les forêts ombrophiles et une baisse continue dans les autres types de forêts (Figure 10).

Dans les forêts ombrophiles de montagne, le stock de carbone a augmenté de 0,95 mégatonne entre 1990 et 2022. Parmi les forêts semi-naturelles, ce sont les savanes qui ont été les plus affectées. Le stock de carbone dans cette classe d'occupation est passé de 5,25 mégatonnes en 1990 à seulement 0,49 mégatonne en 2022, soit une baisse de 4,76 mégatonnes.

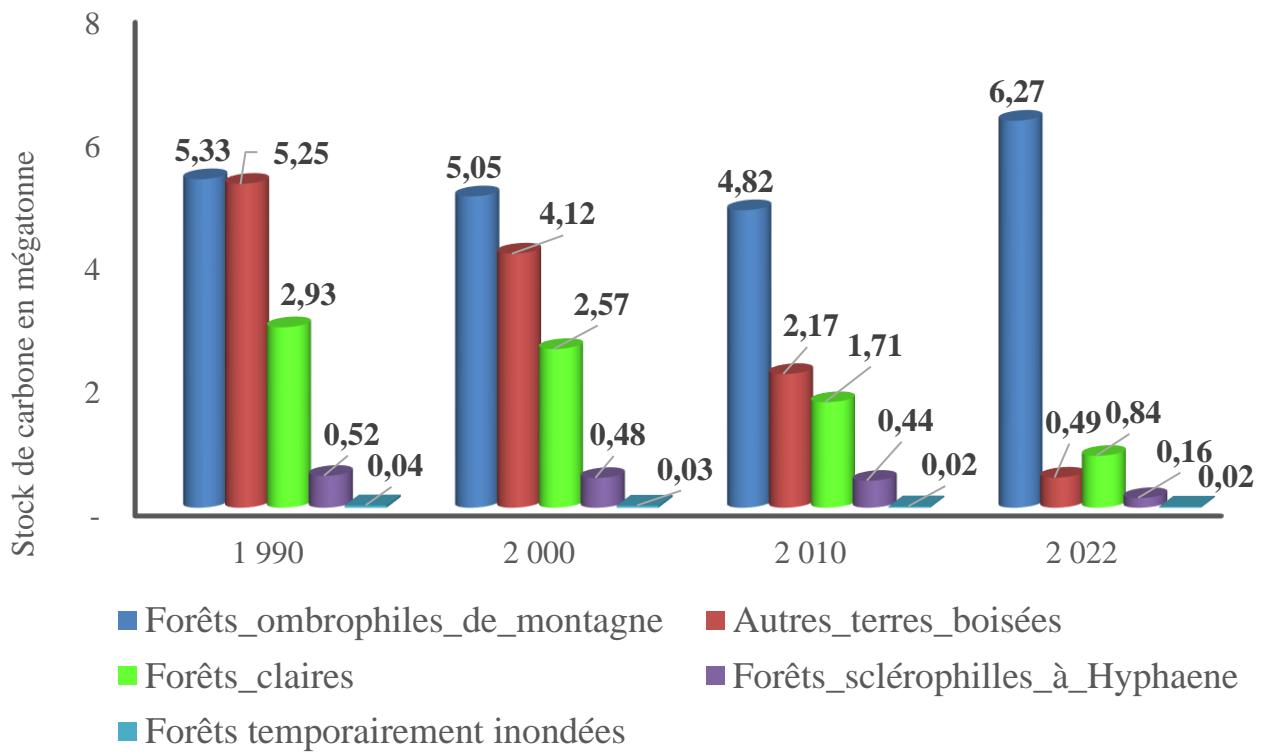


Figure 10 : Evolution du stock de carbone dans les Forêts ombrophiles de montagnes et les forêts semi-naturelle entre 1990 et 2022 au Burundi.

- *Contribution des forêts ombrophiles et forêts semi-naturelles au stock de carbone dans le temps.*

Parallèlement à l'évolution du stock de carbone, seules les forêts ombrophiles présentent une contribution dynamique et positive dans le temps. Quelle que soit la période, ce sont les forêts ombrophiles qui présentent la plus forte contribution au stock de carbone. A cet effet, leur contribution est passée de 37,9% en 1990 à 80,7% en 2022 (Figure 11).

En ce qui concerne les forêts claires, leur contribution a régressé de 20,8% en 1990 à 10,8% en 2022. Quant aux autres terres boisées (les savanes arborées et arbustives), leur contribution est passée de 37,4% en 1990 à seulement 6,3% en 2022.

La forte baisse du stock de carbone et la contribution à ce dernier dans les forêts semi-naturelles montre une fois de plus leur vulnérabilité aux perturbations anthropiques aggravées par les effets néfastes du changement climatique.

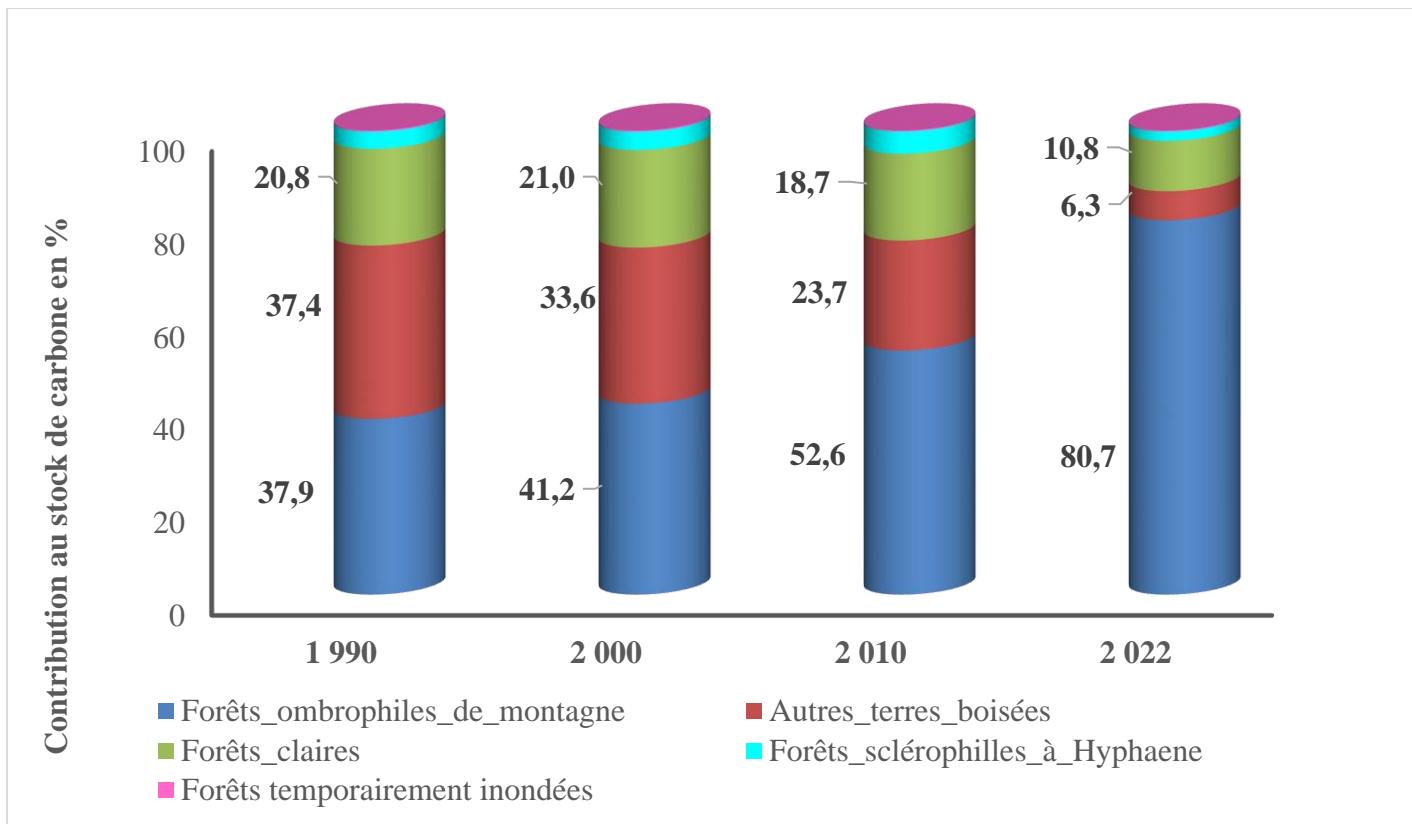


Figure 11 : Contribution des forêts ombrophiles et des forêts semi-naturelle au stock de carbone dans le temps.

5.2.3.5. Variation du stock de carbone dans les terres forestières

L'évolution du stock de carbone dans les terres forestières au Burundi entre 1990 et 2022 est marquée par une tendance positive à la hausse dans les Forêts ombrophiles de montagnes (Parc national de la Kibira, Réserve du Bururi) et dans les Boisements. Dans ces classes d'occupation, l'augmentation du stock de carbone est de 0,95 mégatonnes pour les Forêts ombrophiles de montagne et 2,98 mégatonnes pour les Boisements ou plantations forestières.

En revanche, dans les forêts semi-naturelles, la tendance du stock de carbone est régressive et cela de façon continue entre 1990 et 2022 avec une perte estimée à 7,23 mégatonnes. Cette baisse remarquable et considérable du stock de carbone dans les forêts semi-naturelles met en évidence, la forte pression anthropique sur le milieu et mérite d'être intégrée dans les actions prioritaires de conservation et de protection de l'environnement.

Le cumul de gain carbone dans les Forêts ombrophiles de montagne et dans les Autres terres boisées entre 1990 et 2022 s'élève à 3,93 mégatonnes (Figure 12). En revanche, la perte en carbone

pour la même période dans les terres forestières s'élève à 7,23 mégatonnes, soit une perte de 3,3 mégatonnes. Ce chiffre est très parlant dans le contexte du changement climatique. Il montre que les efforts dans les actions de boisements et dans l'aménagement des Forêts notamment ombrophiles, ne sont pas pour l'instant à mesure de compenser les pertes de carbone dues à la pression de l'homme sur les ressources forestières.

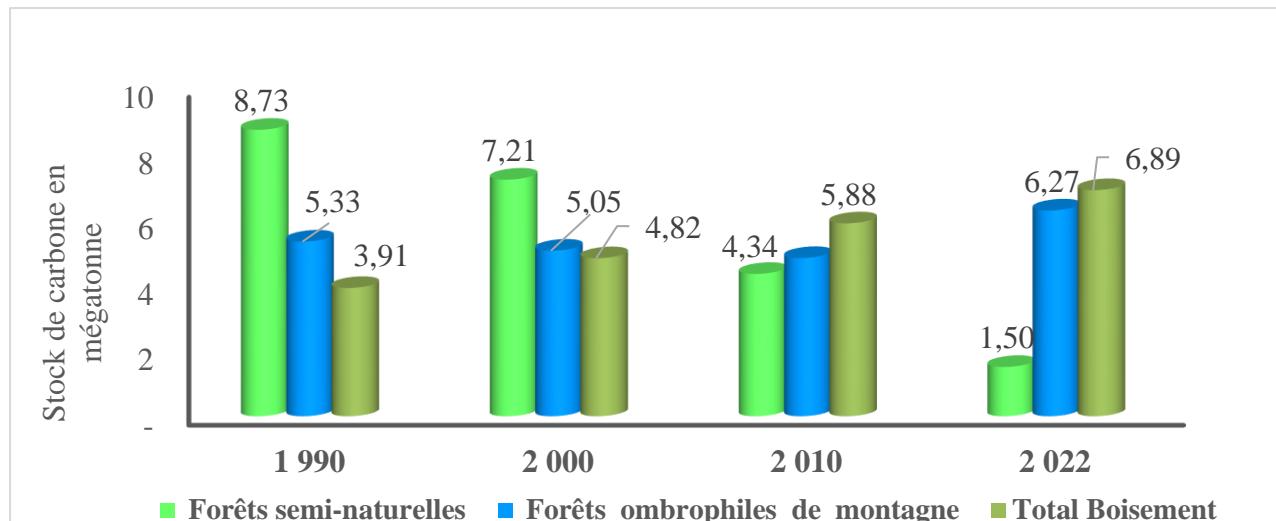


Figure 12 : Evolution du stock de carbone dans les terres forestières entre 1990 et 2022 au Burundi

- Contribution des classes d'occupation de terres au stock de carbone dans les terres forestières.***

La Figure 13 montre la contribution des classes d'occupation de terres au stock de carbone dans les terres forestières au Burundi entre 1990 et 2022. Les forêts ombrophiles et les Boisements montrent une contribution positive et dynamique au stock de carbone dans les terres forestières.

La contribution des Forêts ombrophiles est passée de 29,64 % en 1990 à 42,76% en 2022. En ce qui concerne les Boisements, leur contribution est passée de 21,76% à 46,99% entre 1990 et 2022. Ceci montre un avantage relativement important des Boisements par rapport aux Forêts ombrophiles en termes de contribution au stock de carbone pour la période d'étude.

Pour les forêts semi-naturelles, leur contribution au stock de carbone dans les terres forestières est en baisse significative en passant de 48,60 % en 1990 à 10,25 % seulement en 2022.

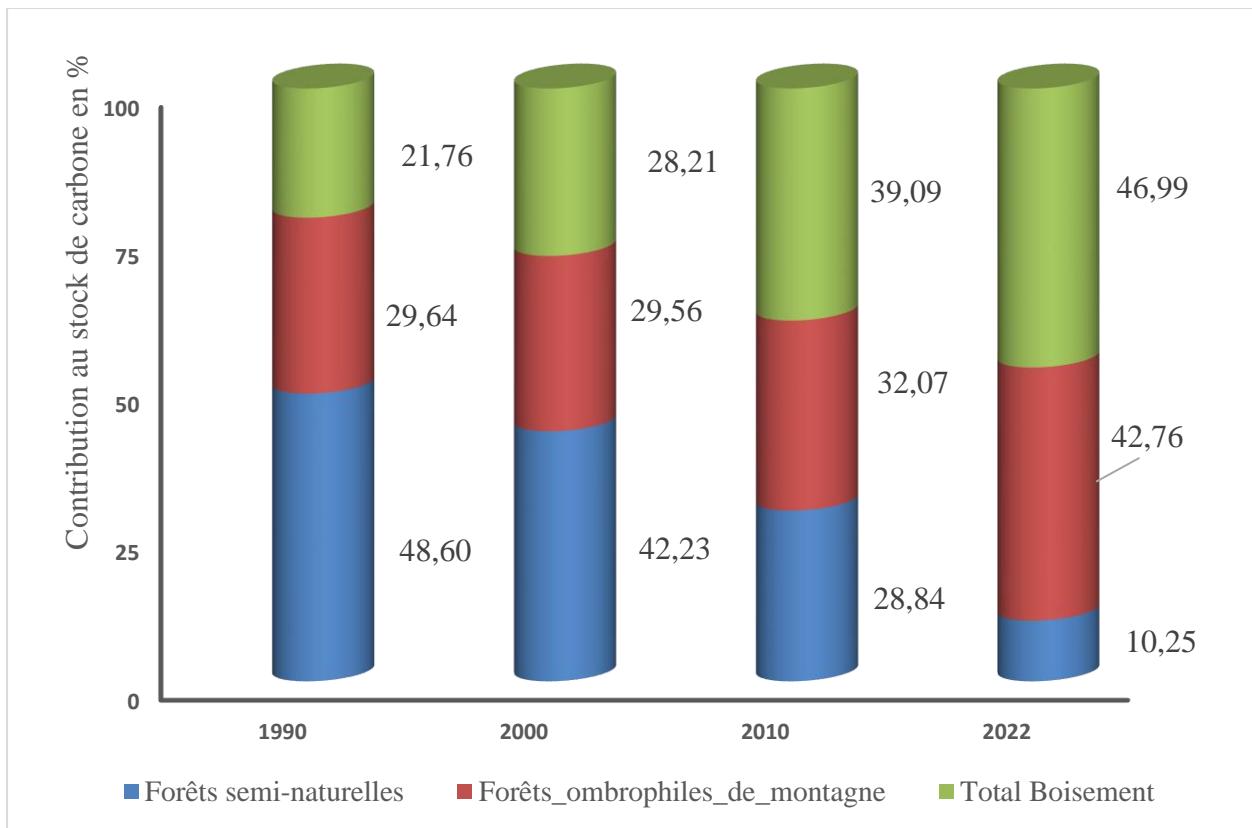


Figure 13 : Contribution de classes d'occupation de terres, au stock de carbone dans les terres forestières entre 1990 et 2022 au Burundi.



Photo 4 : Images de savanes appartenant à la classe d'occupation Autres types de terres forestières.



Photo 5 : Images de forêts Forêt sclérophylle à *Hyphaene* appartenant à la catégorie GIEC des terres forestières.

5.2.3.6. Variation du stock de carbone dans les terres cultivées

L'évolution du stock de carbone dans les terres cultivées est caractérisée par une tendance à la baisse du cumul entre 1990 et 2010, suivie d'une légère hausse en 2022 (Figure 14). Dans les cultures de rente, le stock de carbone suit une tendance à la baisse continue depuis 1990 jusqu'en 2022. Quant aux Systèmes agroforestiers, la tendance du stock de carbone est progressive et continue dans le temps.

La baisse continue du stock de carbone dans les cultures de rente (palmeraies) pourrait s'expliquer, soit par une exploitation des palmeraies pour la production de l'huile, soit par leur conversion pour d'autres affectations, où par le remplacement des espèces endogènes par de nouvelles variétés. En revanche, l'augmentation continue du stock de carbone dans les Systèmes agroforestiers pourrait s'expliquer par une augmentation de surfaces dans le temps conjuguée au développement des bonnes pratiques agroforestières dans le pays.

La tendance dynamique et positive du stock de carbone dans les Systèmes agroforestiers est très importante car elle permet de combler le déficit dans les Cultures de rente et infléchir la tendance globale du Stock de carbone dans les terres cultivées en 2022.

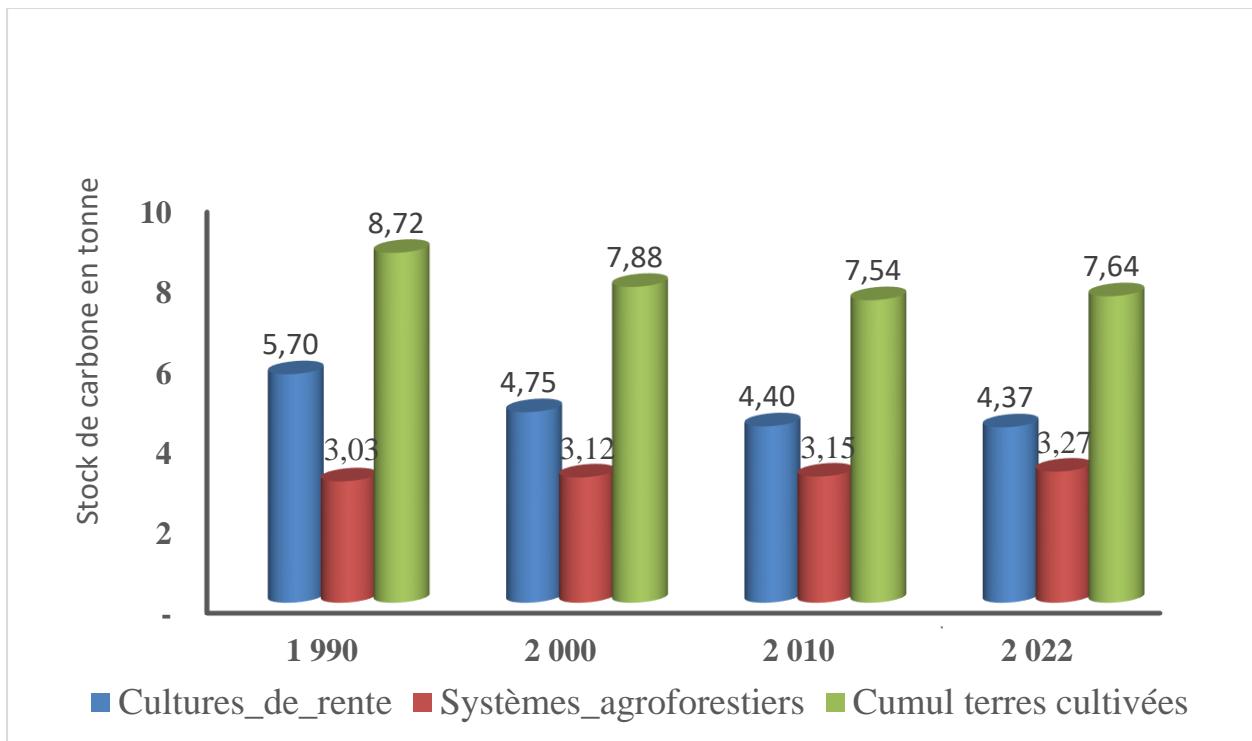


Figure 14 : Evolution du stock de carbone dans les terres cultivées entre 1990 et 2022 au Burundi

- ***Contribution des classes d'occupation de terres au stock de carbone dans les terres cultivées.***

La Figure 15 montre la contribution exprimée en % des classes d’occupation de terres au stock de carbone dans les terres cultivées au Burundi, entre 1990 et 2022. Les cultures de rente (Palmeraies) présentent la plus forte contribution au stock de carbone dans les terres cultivées au détriment des Systèmes agroforestiers. Malgré une tendance à la baisse, la contribution des cultures de rente est passée de 65,3% à 57,2 % entre 1990 et 2022. En revanche, les Systèmes agroforestiers ont vu leur contribution progressée de 34,7 % en 1990 à 42,8 % en 2022. Il est important de mentionner encore une fois que seules les palmeraies sont considérées dans la classe cultures de rente. Les cultures de thé, qui sont aussi très importantes au Burundi, ne peuvent pas être intégrées car les plants ne satisfont pas aux exigences de hauteurs et de diamètres minimums à considérer.

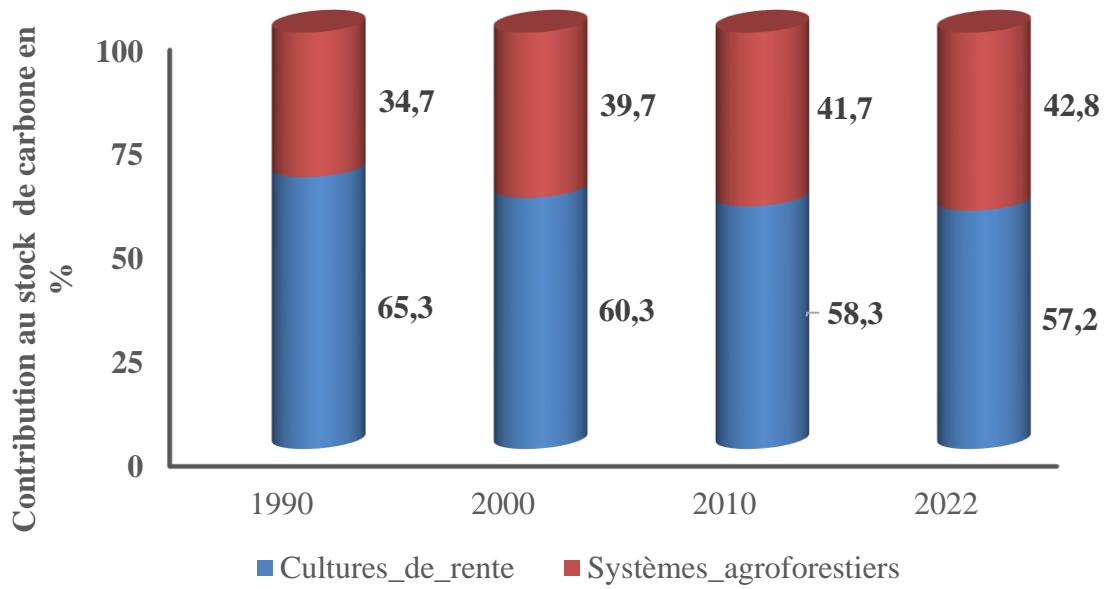


Figure 15 : Contribution des classes d'occupation des terres au stock de carbone dans les terres cultivées entre 1990 et 2022 au Burundi.



Photo 6 : Images de culture de rente (palmeraies) appartenant à la catégorie GIEC des Terres cultivées.



Photo 7 : Images des Agrosystèmes forestiers appartenant à la catégorie GIEC des Terres cultivées.

5.2.3.6. Variation du stock de carbone dans les terres forestières et dans terres cultivées

La Figure 16 montre l'évolution du stock de carbone des ligneux dans les catégories de terres du GIEC entre 1990 et 2022 au Burundi. La tendance générale du stock de carbone dans la végétation ligneuse est marquée par une baisse dans le temps entre 1990 et 2010 dans les deux catégories de terres. Entre 1990 et 2022, la perte du cumul global de stock de carbone, dans les deux catégories de terres du GIEC dans le secteur AFAT, est estimé à 4,38 mégatonnes. La perte dans les terres forestières et dans les terres Cultivées est respectivement de 3,30 et 1,08 mégatonnes entre 1990 et 2022.

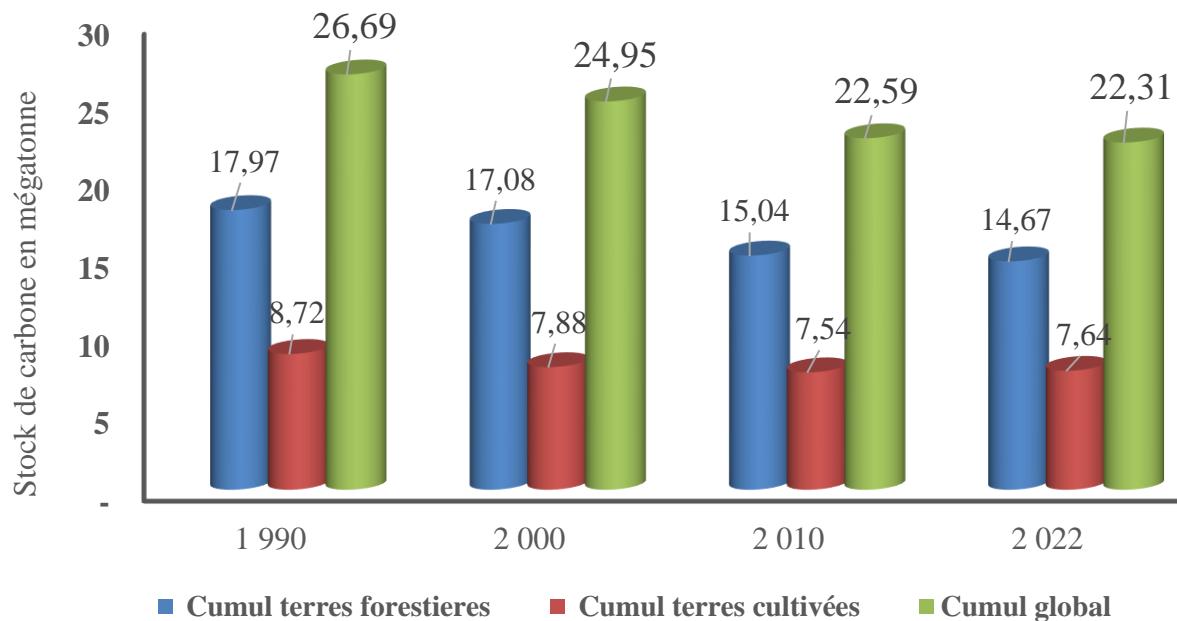


Figure 16 : Evolution du stock de carbone dans les terres forestières et dans les terres cultivées entre 1990 et 2022 au Burundi.

- Contribution des terres forestières et des terres cultivées au stock de carbone***

La contribution des catégories de terres du GIEC au stock de carbone, exprimée en %, de la période 1990 à 2022, est illustrée par la Figure 17. Les terres forestières ont une contribution au stock de carbone plus élevée que celles cultivées et cela quelle que soit la période. La contribution des terres forestières est passée de 67,32 % à 65,75 % entre 1990 et 2022. Dans les terres cultivées, la contribution au stock de carbone, dans les deux catégories de terres du GIEC, est passée de 32,68 % en 1990 à 34,25 % en 2022.

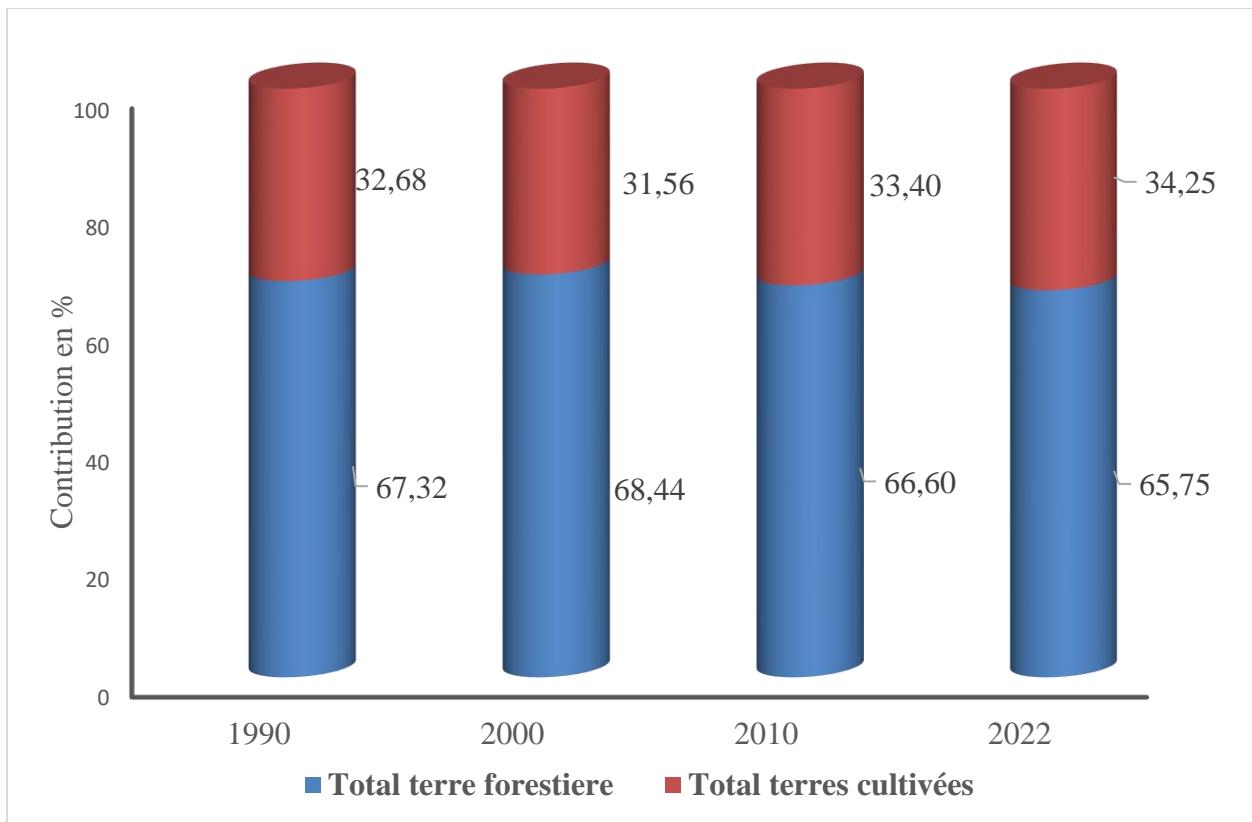


Figure 17 : Contribution des terres forestières et des terres cultivées au stock de carbone entre 1990 et 2022 au Burundi.

5.2.3.7. Focus sur les forêts protégées, un puits carbone au Burundi

La Figure 18 montre la tendance du stock de carbone dans les forêts protégées (PNK et Bururi) à travers les forêts ombrophiles et les catégories de terres du GIEC dans le secteur AFAT au Burundi. Le potentiel de carbone dans les terres forestières diminue progressivement au cours du temps avec une perte estimée à 4,24 mégatonnes dans les trois décennies. Dans les terres cultivées, la tendance du stock de carbone est la baisse entre 1990 et 2010 où le niveau du stock est passé de 8,72 mégatonnes en 1990 à 7,54 mégatonnes en 2010, soit une perte de 1,18 mégatonnes.

En revanche dans le PNK et le Bururi, par le biais des forêts ombrophiles et les aménagements forestiers, le potentiel de carbone séquestré augmente dans le temps malgré une baisse observée en 2010. Cette tendance à la hausse du niveau de séquestration de carbone dans le PNK et le Bururi est un indicateur de puits carbone avec 6,27 mégatonnes en 2022 contre 4,82 mégatonnes en 2010, soit un gain de 1,45 mégatonnes. La contribution du PNK et du Bururi au stock de carbone au cours du temps fait l'objet du chapitre suivant.

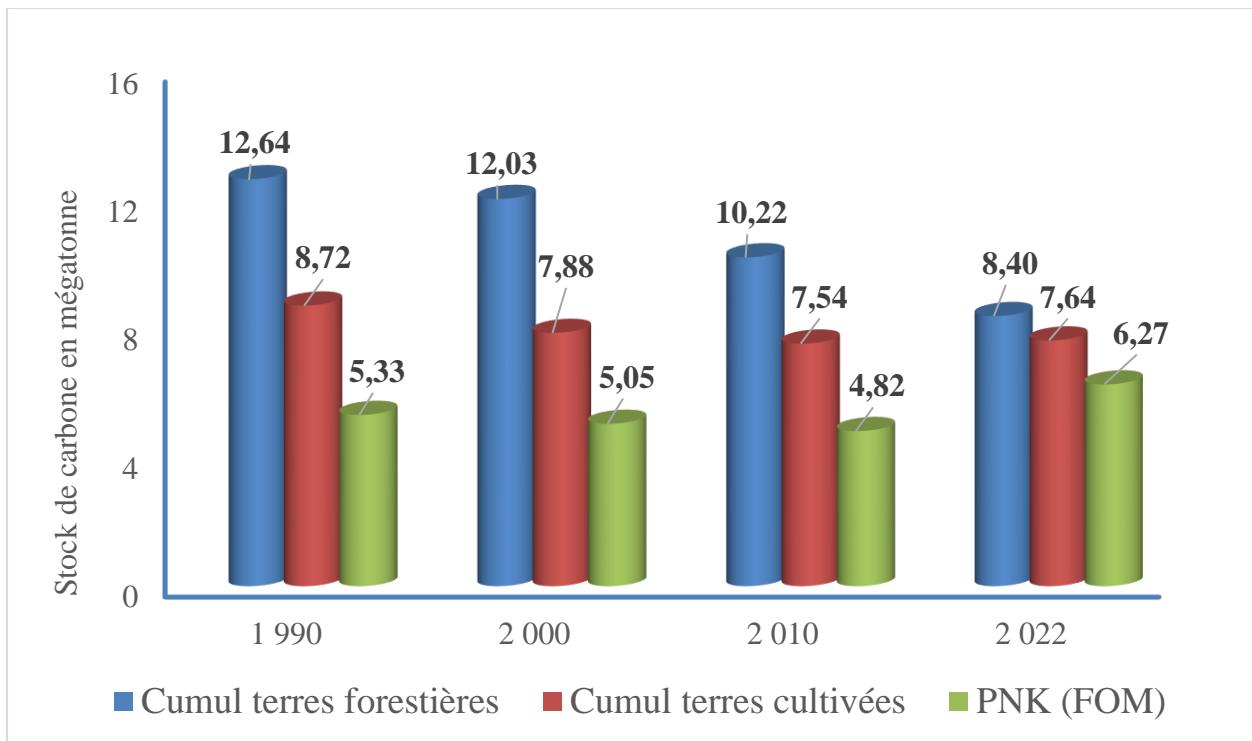


Figure 18 : Evolution du stock de carbone dans le PNK et dans les catégories des terres du GIEC entre 1990 et 2022 au Burundi.

- Contribution du PNK et du Bururi au stock de carbone entre 1990 et 2022 au Burundi***

La tendance de la contribution au stock de carbone du PNK, du Bururi et des autres catégories de terres du GIEC montre une allure dynamique positive dans forêts protégées et dans les terres cultivées. En revanche dans les terres forestières, excepté les forêts ombrophiles, la tendance est à la baisse (Figure 19).

La contribution du PNK et du Bururi à la séquestration du carbone est passée de 19,95% à 28,12% entre 1990 et 2022. En ce qui concerne les terres cultivées, la contribution à la séquestration de carbone est passée de 32,68 % en 1990 à 34,25 % en 2022. Dans les terres forestières, le niveau de contribution à la séquestration est passé de 47,36 % en 1990 à 37,64 % en 2022.

A l'issue de la détermination des facteurs d'émission, une carte du potentiel de séquestration a été réalisée et fait l'objet du chapitre suivant.

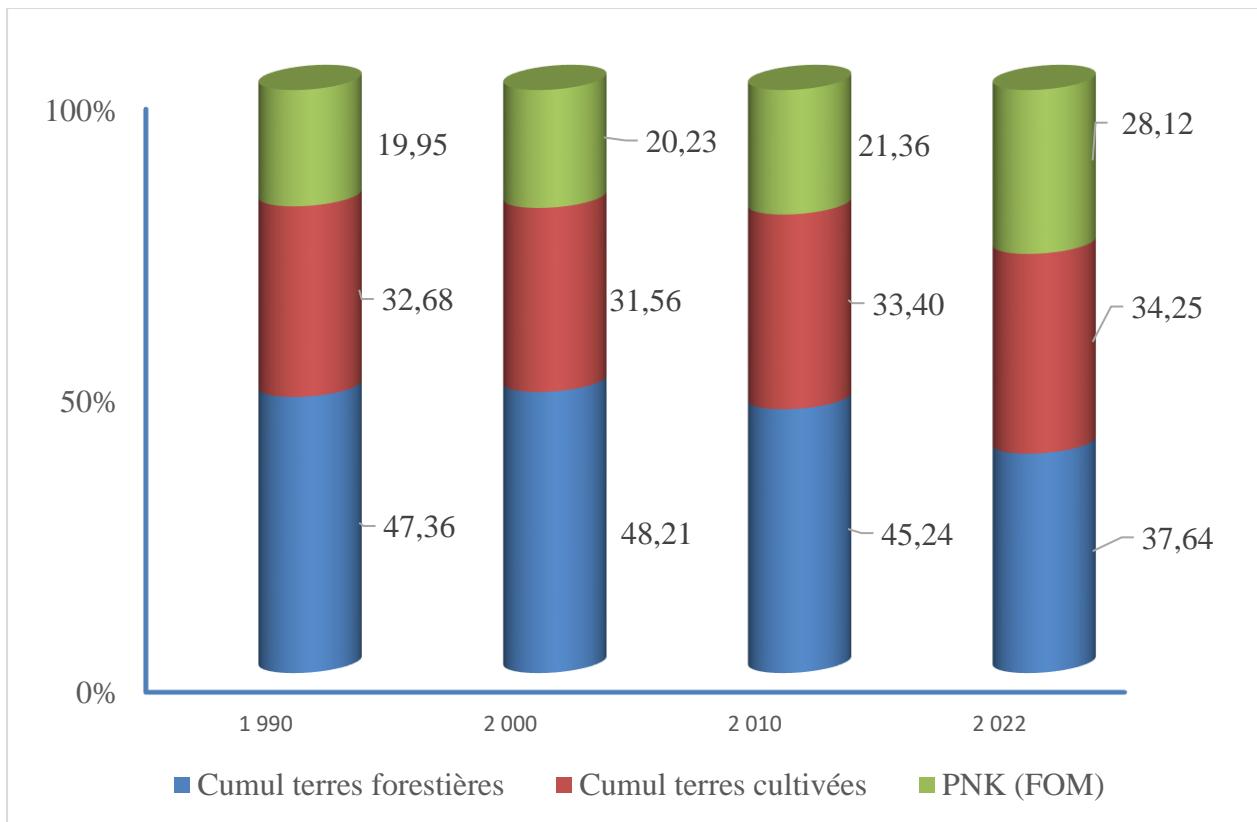


Figure 19 : Contribution du PNK et du Bururi au stock de carbone, comparée aux terres forestières et aux terres cultivées entre 1990 et 2022 dans le secteur AFAT au Burundi.

5.2.4. La carte du stock de carbone

La Figure 20 montre le potentiel de carbone séquestré exprimé en tonnes par hectare à l'échelle du territoire de Burundi.

Le niveau du potentiel de carbone séquestré est très variable d'une province à l'autre. Les provinces dans lesquelles le potentiel de carbone est relativement important sont localisées dans les parties nord-ouest, l'ouest, sud, le centre et l'est du pays. Ces provinces qui abritent les puits carbonés au Burundi (cf. carte) sont :

- La province de Cibitoke ;
- La province de Kayanza ;
- La province de Bubanza et
- La province de Muranvya ;

La province de Bujumbura Mairie

La province de Bujumbura Rural.

la province de MWaro

la province de Gitega.

La province du Bururi

La province de Makamba.

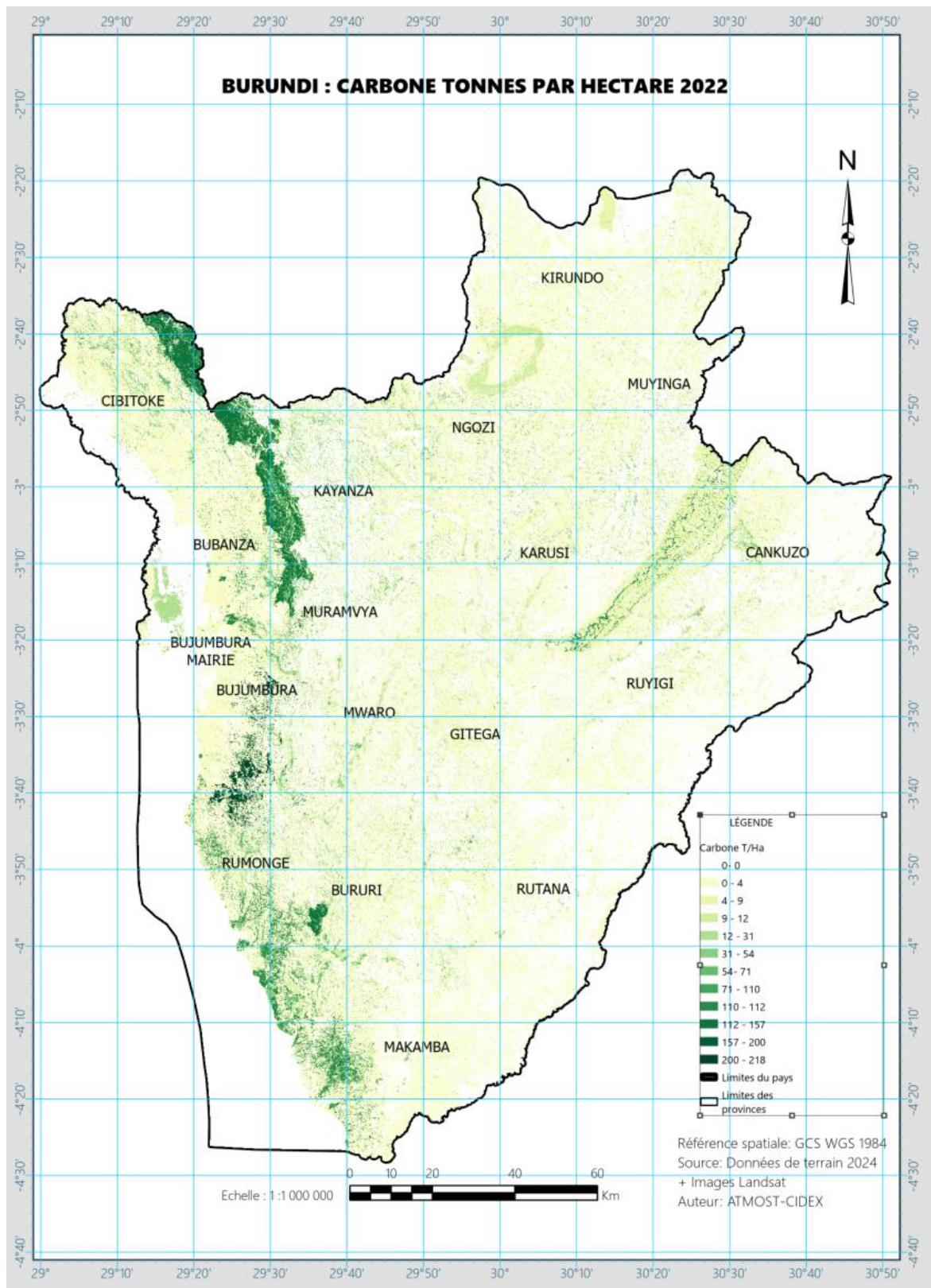


Figure 20 : Carte de séquestration de carbone à l'échelle du territoire de Burundi en 2022.

5.2.5. Cumul de la biomasse, du carbone, et de l'émission négative

Au terme de la détermination des facteurs de biomasse, des facteurs d'émission, du stock de biomasse et de carbone, nous avons estimé l'absorption du CO₂ exprimée en mégatonnes entre 1990 et 2022, dans les différentes classes d'occupation de terres cartographiées (cf. Figure 21).

Les classes d'occupation des terres, à travers leur végétation ligneuse, constituent des puits de carbone par excellence au Burundi. Cependant, il est observé une tendance cumulée de l'absorption du dioxyde de carbone à la baisse dans ces classes d'occupation de terres entre 1990 et 2022. L'absorption CO₂ est passée de -97,88 Mt-eq-CO₂ en 1990 à -81,82 Mt-eq-CO₂ en 2022, soit une baisse de 16,06 Mt-eq-CO₂.

La tendance à la baisse du niveau de l'absorption est similaire à celle du carbone séquestré qui est aussi déterminée par la biomasse aérienne en baisse de 1990 à 2022.

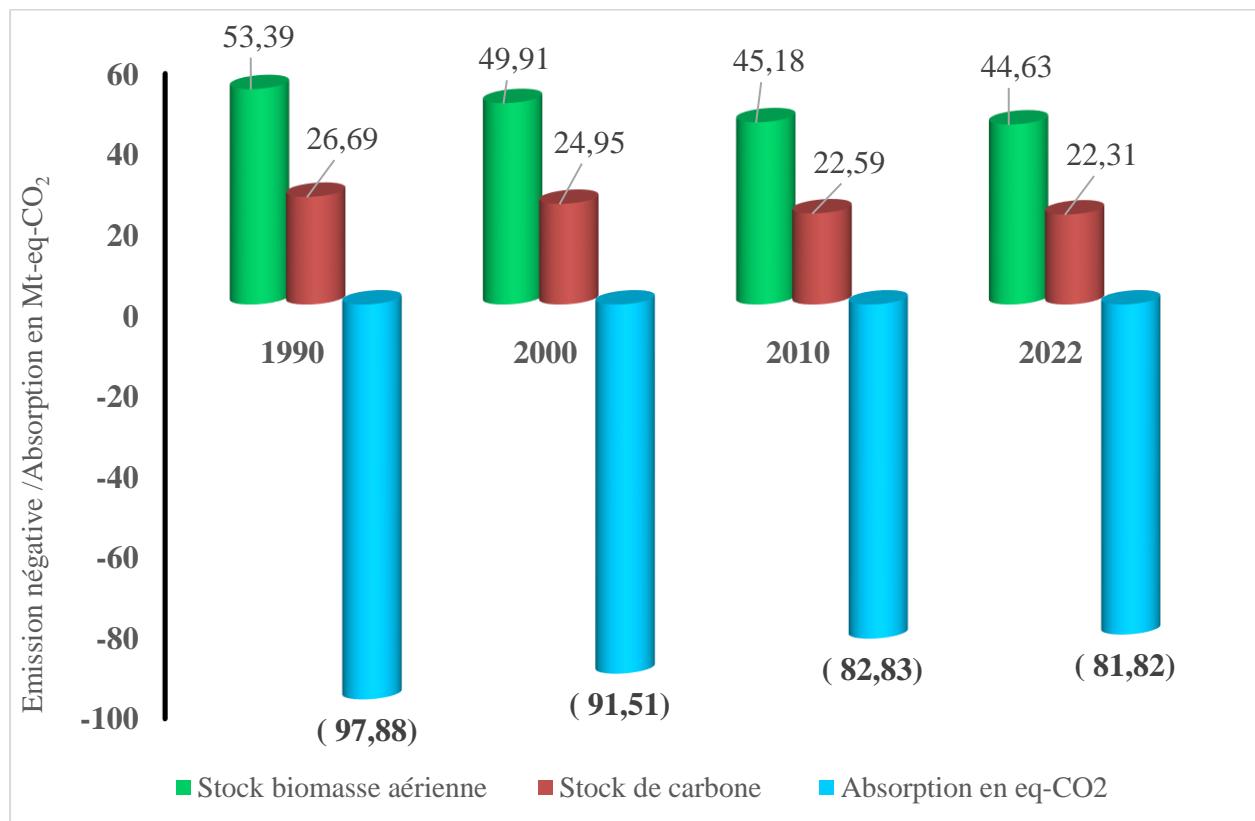


Figure 21 : Tendance cumulée du stock de biomasse aérienne, du gain carbone et son équivalent en absorption de CO₂ dans les classes d'occupation de terre entre 1990 et 2022 au Burundi.

6. CONCLUSION GÉNÉRALE

Faut-il le rappeler que l'un des objectifs de cette étude est de « Déterminer les facteurs de biomasse des différentes classes et sous-classes de terres du GIEC, ainsi que les facteurs d'émission spécifiques au pays pour le secteur AFAT ». Au terme de l'étude réalisée par le Consortium ATMOST-CIDEX, il a été déterminé les facteurs de biomasse ainsi et les facteurs d'émission propre au Burundi pour chaque classe d'occupation de terres dans le secteur AFAT. Ainsi, les différents résultats attendus pour les Livrables A (Cartographie de l'occupation du sol), B (Biomasse) et C (facteurs d'émission propres) demandés par l'OPBE ont été produits. Ils ont été validés lors de l'atelier tenu le 23 décembre 2024 à Bujumbura.

Les facteurs de biomasse varient considérablement d'une classe d'occupation des terres à l'autre. Ils varient de 435,77 tonnes par hectare pour les Boisements matures denses à 2,15 tonnes par hectare pour les Forêts temporairement inondées.

En ce qui concerne les facteurs d'émission, ils varient aussi de 217,89 tonnes de carbone par hectare dans les Boisements matures denses à 1,07 tonne de carbone par hectare dans les Forêts temporairement inondées.

Globalement, la tendance est à la baisse aussi bien pour le stock de biomasse que pour le stock de carbone.

Les réserves protégées (Parc National de la Kibira, Bururi), à travers leurs forêts ombrophiles et les Boisements sont des puits carbones par excellence dans les terres forestières avec un potentiel de stock de carbone respectif de 6,27 et 6,89 mégatonnes.

Dans la catégorie des terres, cultivées, les Systèmes Agroforestiers promettent un avenir meilleur dans l'atténuation du changement climatique au Burundi avec une tendance dynamique positive dans la séquestration de carbone. Le potentiel du stock de carbone a évolué de 3,03 à 3,27 mégatonnes entre 1990 et 2022.

Pour l'absorption ou les émissions évitées (négative), la tendance est en régression avec 97,88 mégatonnes eq-CO₂ en 1990 et 81,82 mégatonnes eq-CO₂ en 2022.

Les résultats obtenus sont relativement satisfaisants, car ils pourront désormais servir de données pour passer du niveau 1 au niveau 2 afin de calculer les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur AFAT au Burundi.

Au bout de tout travail qui nécessite des investigations sur le terrain, comme les inventaires forestiers, forcément il faut s'attendre à des difficultés. Dans ce cas précis, nous avons rencontré des difficultés majeures dont le manque de carburant dans le marché Burundais au démarrage des travaux d'inventaires et la pluie. Ces contraintes ont été à l'origine de retards accusés dans la réalisation de l'inventaire forestier, dans la saisie et le traitement des données de même que pour la production des livrables. A cet effet, notre inventaire théoriquement prévu pour 3 mois s'est poursuivi sur 5 mois. Malgré ces difficultés, le Consortium ATMOST-CEDEX et l'OPBE ont pu les gérer de façon satisfaisante. L'inventaire a pu être réalisé avec succès. Sur 400 placettes prévues, 394 ont été réalisées, soit un taux d'exécution de 99%.

L'analyse de la dynamique de variations de la biomasse et des facteurs d'émission au cours du temps n'est pas sans difficulté. Les derniers inventaires forestiers au Burundi datent des années soixante-dix. Ainsi, les estimations de biomasse et de facteurs d'émission sont basées sur l'hypothèse que les facteurs calculés à partir des inventaires réalisés en 2024, dans le cadre de cette étude, sont applicables aux différentes classes d'occupation concernées des années antérieures. Malgré cette limitation, qui oblige à interpréter les résultats avec une certaine prudence, cette étude réalisée par le Consortium ATMOST-CIDEX sous l'égide de l'OBPE, établit pour la première fois une cartographie et une analyse des changements d'occupation du sol, de la biomasse et des facteurs d'émission de carbone à l'échelle de l'ensemble du Burundi.

BIBLIOGRAPHIE

- Adeline Fayollea,*, Alfred Ngomandab, Michel Mbasic, Nicolas Barbier, 2018.- A regional allometry for the Congo basin forests based on the largest ever destructive sampling, in, Forest Ecology and Management 430 (2018) 228–240
- AFF, 2011.- Plantations Forestières et Îlots boisés au Burundi. Dans Document de travail pour le Forum Forestier Africain, vol1, no 11, 2011. 76 p. (Forum Africain sur les Forêts)
- Agboola, O. O. and OVIEA., 2023.- Specific gravity and carbon content of woody species in lowland moist forest and savanna vegetations of parts of osun state, nigeria. *NJB, Volume 35 (2), Dec, 2022.*
- AMCC / GCCA, 2013.- Guide de mesure et de suivi de carbone dans le système sol-végétation des formations forestières et Agroforestières en Afrique de l'ouest, 51 p. (Alliance Globale pour CC)
- Benard S. Guedes a, *, Bengt A. Olsson b, Gustaf Egnell c, Almeida A. Siteo a, Erik Karlton, 2018.- Plantations of Pinus and Eucalyptus replacing degraded, mountain miombo woodlands in Mozambique significantly increase carbon sequestration. *In Global Ecology and Conservation 14 (2018) e00401.*
- Bengwela Mongolu Thierry, Boyemba Bosela Faustin, 2019.- Estimation de la biomasse aérienne des forêts de transition de la réserve forestière de Yoko, RD Congo : importance de l'allométrie hauteur-diamètre. *Dans Urdo - Journal of Agriculture and Research, Volume-5 / Issue-6 / June, 2019.*
- CIFOR, ICRAF, 2015.- Global Wood Density data base (Centre de Recherche Forestière Internationale) ;
- COMIFAC, 2019 : Guide sous- régional d'inventaire et de surveillance des forêts, Une dimension régionale pour la conservation et la gestion durable des écosystèmes forestiers, 50 p.
- Daniel Verhaegen^{1, 6}, Honoré Randrianjafy, Hery Rakotondraoelina Andriatsitohaina, Marie-Christine Trendelenburg Rakotonirina, Nicolas Andriamampianina, Pierre Montagne, Alain Rasamindisa, Gilles Chaix, Jean-Pierre Bouillet et Jean-Marc Bouvet, 2014.- *Eucalyptus robusta* pour une production durable de bois

énergie à Madagascar : bilan des connaissances et perspectives. *Dans bois et forêts des tropiques, 2014, n° 320 (2).*

Dengsheng Lu, Qi Chen, Guangxing Wang, Lijuan Liu, Guiying Li & Emilio Moran, 2018. - A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems, International Journal of Digital Earth, Vol. 9, No. 1, 63–105, <http://dx.doi.org/10.1080/17538947.2014.990526> *International Journal of Digital Earth.*

FAO, 1999,- Collecte et analyse de données pour l'aménagement durable des forêts - joindre les efforts nationaux et internationaux. Dans Ressources forestières et produits forestiers au Burundi, Programme de partenariat CE-FAO (1998-2002), PROJET GCP/INT/679/EC, éditeur Astère Bararwandika, 18 p.

FRA, 2022.- Evaluation des ressources forestières mondiales et enquête par télédétection. Dans Comité des forêts, vingt-sixième session, 3-7 octobre 2022.

GIEC, 2006.- Les terres Forestières, Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Volume 4 : Agriculture, foresterie et autres affectations des terres. Auteurs : Harald Aalde (Norvège), Patrick Gonzalez (États-Unis), Michael Gytarsky (Fédération de Russie), Thelma Krug (Brésil), Werner A. Kurz (Canada), Stephen Ogle (États-Unis), John Raison (Australie), Dieter Schoene (FAO), et N.H. Ravindranath (Inde) Nagmeldin G. Elhassan (Soudan), Linda S. Heath (États-Unis), Niro Higuchi (Brésil), Samuel Kainja (Malawi), Mitsuo atsumoto (Japon), María José Sanz Sánchez (Espagne), et Zoltan Somogyi (Commission européenne/Hongrie).

Gisel Reyes, Sandra Brown, Jonathan Chapman, and Ariel E. Lugo, 1992. – Wood densities of tropical Tree species. United States Department of Agriculture, General Technical Report SO-88 February 1992.

Jean THIEL, Kouassi EDI, Assandé AHOBA et Dominique LOUPPE, 1993.- Caractéristiques physiques des bois de 34 espèces ligneuses de forêt sèche, Instituts des Forêts, Département Foresterie, 53 p.

MEAE-Burundi, 2019- Troisième Communication Nationale sur les Changements Climatiques (TCNCC), 165 p. + Annexes

MEAE-Burundi, 2021.- Contribution Déterminée au Niveau National (CDN), 2020. Annexe, 96p.

MEAE-Burundi, 2022.- Premier Rapport Biennal actualisé sur les changements climatiques au Burundi, juin 2022, 260 p.

MEEATU-Burindi, 1997.- Stratégie nationale pour l'environnement au Burundi (SNEB), Femme et Environnement, Rapport définitif, édité par Anne BARIYUNTURA, Bujumbura, octobre 1997, 53 p.

RCI, 2024.- niveau de référence des forêts (nrf) et niveau d'émissions de référence des forêts de la côte d'ivoire. *Soumission à la Convention Cadre des Nations Unies pour le Changement Climatique*, 40 p. République du Congo, 2020. - Inventaire forestier national multiressource de la République du Congo 2009-2014. Estimation des facteurs d'émission pour le niveau d'émissions de référence pour les forêts, 29 p. plus annexes.

Suspense Averti Ifo, Stoffenne Binsangou, 2019.- Variabilité spatiale du stock de carbone de la biomasse aérienne de la zone urbaine vers la forêt tropicale dense dans cinq localités de la république du Congo. Dans Hall Open science.

Tsoumou B. R.1, Lumandé K. J.2, Kampé J. P.1, Nzila J. D.1, 2016.- Estimation de la quantité de Carbone séquestré par la Forêt Modèle de Dimonika (Sud-ouest de la République du Congo). *Revue Scientifique et Technique Forêt et Environnement du Bassin du Congo Volume 6. P. 39-45, Avril (2016)*.

UICN, 2011.- Parcs et réserves du Burundi : Evaluation de l'efficacité de la gestion des aires protégées, *UICN – Union internationale pour la conservation de la nature 2011, 107p.*

Vincent O.Oeba, Larwanou Mahamane, Samuel C.J.Otor, James B. Kung'u, 2016.- Estimation Of Aboveground And Belowground Carbon Sequestration Of *Cupressus Lusitanica*, *Pinus Patula*, And *Eucalyptus Saligna*, Plantation Species In Kenya

Wendsom Osée OUEDRAOGO1*, Alain P. K. GOMGNIMBOU2, Saïdou SANTI3, Daniel ILBOUDO4 et Aboubacar TOGUYENI3, 2019.- Quantification de la Biomasse et stockage du carbone du massif forestier de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts de Dindéresso province du Houet au Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 13(7): 3276-3288, December 2019.

ANNEXES

Annexe 6 : Taux de réalisation du plan d'échantillonnage

Tableau 8 : Taux de réalisation du plan d'échantillonnage pour réaliser l'inventaire forestier afin de déterminer les facteurs de biomasse et les Facteurs d'émission propre au Burundi

No	Catégories GIEC	Typologie des classes	Placettes d'inventaire Prévues	Placettes réalisées	Taux de réalisatio n (%)
1	Terres Forestières	Forêts ombrophiles de montagne	100	98	98
2		Forêts claires	60	62	103
3		Forêt sclérophylle à Hyphaene	8	8	100
4		Forêts temporairement inondées	20	12	60
5		Boisements matures denses	25	25	100
6		Boisements intermédiaires	10	10	100
7		Boisements dégradés	35	35	100
8		Autres terres boisées	52	51	98
9	Terres cultivées	Cultures vivrières			
10		Cultures de rente	30	30	100
11		Marais cultivés			
12		Système agroforestier	60	63	105
13	Prairies	Pâturage ou savane herbeuse			
14	Zones humides	Lacs et rivières			
15	Zones humides	Tourbières			
16	Établissements	Milieu artificiel			
			400	394	99

Annexe 7: Facteur de biomasse et Facteurs d'émission dans les boisements

Tableau 9 : Facteur de biomasse et Facteurs d'émission propre des boisements à Pinus en fonction de leur âge de plantation

Placette	Boisement	Age plantation	Facteur de Biomasse	Facteur d'émission (FE)
1	Pinus patula	48	130,90	65,45
2	Pinus patula	40	73,12	36,56
3	Pinus patula	41	71,80	35,90
4	Pinus elliottii	37	70,62	35,31
5	Pinus patula	40	55,66	27,83
6	Pinus patula	39	49,88	24,94
7	Pinus patula	10	44,33	22,17

Tableau 10 : Facteur de biomasse et Facteurs d'émission propre des boisements à Pinus en fonction de leur âge de plantation.

Placette	Boisement	Age plantation	Facteur de Biomasse	Facteur d'émission (FE)
1	Callitris calcarata	38	86,29	43,15
2	Callitris calcarata	16	14,28	7,14
3	Callitris caracarata	16	11,77	5,88

Annexe 8 : fiche descriptive des placettes d'inventaire forestier

Date d'inventaire :-----

Localité----- N° Placette-----

Superficie Placette (m²)----- Forme-----

Longitude : ----- Latitude : ----- Altitude : -----

Auteur : -----

Type de Forêts

Plantation----- Age de la plantation :-----

Type de forêt/Formation Naturelle----- Code LUC : -----

Description du milieu physique

Type de Sol :-----

Géomorphologie (Montagne, Colline, Flanc de colline, Plaine, Plateau) -----

Topographie :-----

Description de la Forêt/Plantation

- Niveau dégradation de la Forêt/Plantation (Non dégradée, très faible, Faible, modérée, importante, Exagéré)-----
- Densité du peuplement (Très forte, Moyenne, Faible)-----

Description des recouvrements

- Recouvrement Globale de la végétation (RGV en %) -----
- Recouvrement de la Strate arborée (RSA en %) ; -----
- Recouvrement de la Strate arbustive (RSa en %) -----
- Recouvrement de la State basse ligneuse (Rsbl en %) -----
- Le sol nu (en %) -----

Annexe 9 : Fiche modèle d'inventaire dendrométrique

Annexe 10: Extraits Cartes de biomasse et de carbone

