

République du Cameroun
Paix – Travail – Patrie

**Ministère des Mines, des Industries
et du Développement Technologique**

Projet de Renforcement des Capacités dans le Secteur Minier
(PRECASEM)

**Diagnostic par Télédétection, des Impacts Environnementaux des
Exploitations Artisanales et Artisanales semi Mécanisées et
l'Etablissement des Recommandations pour la Réhabilitation des
Sites**

N° de Référence : WB-P448559-12/19
CM-PRECASEM-101347-CS-CQS

L2 - RAPPORT D'AVANCEMENT 1 : ANALYSE DES DONNEES DE TELEDETECTION



Beak Consultants GmbH
Am St. Niclas Schacht 13
09599 Freiberg / Allemagne
Tél +49 (0) 3731 781350
Fax +49 (0) 3731 781352
www.beak.de
postmaster@beak.de

N° de projet Beak: 2020_0014

Freiberg, le 19/04/2021



Données du projet

Général

Type de document:	Rapport d'avancement				
Titre :	Diagnostic par Télédétection, des Impacts Environnementaux des Exploitations Artisanales et Artisanales semi mécanisées et l'Etablissement des Recommandations pour la Réhabilitation des Sites				
Période d'élaboration	Mars - avril 2021				
Texte:	71	pages	Appendices:	1	Cartes: 0
Client / Destinataire :	S/C MINISTERE DE L'INDUSTRIE, DES MINES ET DU DEVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE Coordination du PRECASEM M. le Coordonnateur du PRECASEM, Guillaume Sosthene Mananga B.P. 35491 Yaoundé (Cameroun) TEL: (237) 22 2 2172 05 / +237 679 70 13 92 gsmananga@yahoo.fr; cardexo@yahoo.fr				
N° de projet Beak:	2020_0014	N° de projet Client:	WB-P448559-12/19 ; P122153		

Auteurs

Nom	Qualification	Chapitre	Date	Signature
BARTH, Andreas	PhD géochimie	tous	16/04/2021	
BOCK, Peter	MSc géologie	tous	16/04/2021	
HANELLI, Delira	MSc géoinformatique	tous	16/04/2021	
ZYLBERMAN, William	PhD géophysique	tous	16/04/2021	

Assurance de qualité

Nom	Qualification	Chapitre	Date	Signature
KNOBLOCH, Andreas	MSc géologie	tous	16/04/2021	

Transmis à

Entreprise / Autorité	Copie	Copie électronique
MINMIDT	0	1
Beak Consultants GmbH	0	1

Versions

Version	Date	Etat	Nom du fichier	Auteurs
0.1	01/03/2021	brouillon	2020_0014_Rapp_Demarrage.v_0.1.docx	Hanelli Bock,
1.0	19/04/2021	autorisé	2020_0014_Rapp_Demarrage.v_1.0.docx	Barth, Bock, Zylberman

Etat	Brouillon	Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 2
	Autorisé	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc					



Table des matières

1	LISTE DES ACRONYMES ET ABBRÉVIATIONS	8
2	OBJECTIF DU RAPPORT / ZONE DE TÉLÉDÉTECTION ADAPTÉE	10
3	RAPPEL DES ACTIVITÉS À RÉALISER	11
4	DONNÉES UTILISÉES	13
4.1	DONNÉES DEMANDÉES AU PRECASEM	13
4.2	DONNÉES RECHERCHÉES ET ORGANISÉES PAR LE CONSULTANT	13
5	RAPPEL DE LA MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE DE TÉLÉDÉTECTION	13
5.1	IMAGERIE SENTINEL-2.....	15
5.2	IMAGERIE LANDSAT-7.....	16
5.3	COUVERTURE NUAGEUSE	17
5.4	TÉLÉCHARGEMENT DES DONNÉES.....	17
5.4.1	Imagerie acquise en décembre 2019	17
5.4.2	Imagerie acquise en décembre 2015	18
5.4.3	Imagerie acquise entre décembre 2000 et 2010	18
5.4.4	Traitements	21
5.4.4.1	Correction atmosphérique	21
5.4.4.2	Mosaïquage	22
6	CRÉATION DES CARTES FACTUELLES.....	23
6.1	CARTOGRAPHIE SEMI-AUTOMATIQUE DES SITES MINIERS	23
6.1.1	Méthodologie basée sur les données Sentinel-2.....	23
6.1.2	Basemaps <i>Planet</i> pour la validation du modèle	30
6.1.3	Cartes finales des sites miniers	32
6.2	CRÉATION DES CARTES ENVIRONNEMENTALES	33
6.2.1	Pré-traitement de l'imagerie satellite	33
6.2.2	Création des cartes environnementales	35
6.2.2.1	Identification des masses d'eau de surface.....	35

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 3
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



6.2.2.2	Qualité des eaux de surface	37
6.2.2.2.1	Introduction	37
6.2.2.2.2	Turbidité	40
6.2.2.2.3	Total des Solides en Suspension (TSS).....	47
6.2.2.2.4	Chlorophylle-A (Chl-A).....	48
6.2.2.2.5	pH	50
6.2.2.2.6	Oxygène Dissous (OD).....	53
6.2.3	Occupation et classification des terres	54
6.2.3.1	Cartographie de l'occupation des terres basée sur les Basemaps Sentinel-2.....	55
6.2.3.2	Cartographie de la couverture végétale basée sur les basemaps Landsat-7	57
6.2.3.3	Collecte des données d'apprentissage	57
6.2.3.4	Résultat de la classification et importance des variables.....	59
7	BIBLIOGRAPHIE	70

Table des illustrations

Figure 1	Zone choisie pour l'étude de télédétection et sélection de sites miniers artisanaux (ASM) et semi-mécanisés.	11
Figure 2	Identification des carrés de grille Sentinel-2 couvrant entièrement la zone d'étude Est-Adamaoua.....	16
Figure 3	Identification des carreaux de grille Landsat-7 couvrant entièrement la zone d'étude.....	17
Figure 4	Jeux de données en mosaïque d'images satellitaires Sentinel-2 acquises en décembre 2002, 2015 et 2019.	22
Figure 5	Collecte des données contrôlant les caractéristiques à modéliser.....	24
Figure 6	Aperçu schématique de la technique mise en oeuvre pour la cartographie prédictive semi-automatique des sites miniers	25
Figure 7	i) Évaluation de l'erreur quadratique moyenne, ii) Histogramme des données d'entraînement, et iii) Analyse de la pondération des paramètres de contrôle.	27
Figure 8	Carte de distribution advangeo® pour le scénario d'apprentissage	28

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 4
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



Figure 9	Extrait de la carte des sites miniers prédits sur toute la zone d'étude issue du RNA entraîné avec Advangeo®.....	29
Figure 10	Affinement du résultat de la cartographie Advangeo®.	30
Figure 11	Jeux de données mosaïque de Planet Basemap pour la saison sèche en 2015 et 2019	31
Figure 12	Cartes finales des sites miniers identifiés pour 2015 et 2019.	32
Figure 13	La surface d'eau extraite à proximité du réservoir de Lom - Pangar pour chaque basemap.	36
Figure 14	La superficie des eaux de surface extraite d'une section de la rivière Kadeï pour chaque basemap.....	36
Figure 15	Superficie des eaux de surface extraites d'une section de la rivière Lom pour chaque basemap.....	37
Figure 16	Indice de turbidité à proximité de Betare Oya pour chaque basemap. Les couleurs rouge-vert représentent des valeurs de turbidité forte à faible, respectivement.....	42
Figure 17	Indice de turbidité dans les rivières Doume et Kadeï pour les années 2002, 2015 et 2019.	43
Figure 18	Analyse des changements de l'indice de turbidité. Les couleurs bleu-jaune représentent des valeurs de turbidité hautes à basses respectivement.....	44
Figure 19	Indice de turbidité de la rivière Lom en 2019; a) Image RVB, b) Indice de turbidité des eaux de surface.....	45
Figure 20	Indice de turbidité de la rivière du Lom en 2019; a) Image RVB, b) Indice de turbidité des eaux de surface.....	46
Figure 21	Relation entre la turbidité et le total des solides en suspension - TSS.....	47
Figure 22	TSS dans trois zones différentes (2019).	48
Figure 23	Indice de chlorophylle-A dans la rivière du Lom en 2019; a) Image RVB, b) Indice de chlorophylle-A des eaux de surface.	50
Figure 24	Interprétation du pH dans trois zones différentes pour la Basemap 2019.....	52
Figure 25	Aperçu schématique de l'OD dans trois zones différentes pour la Basemap 2019.	54
Figure 26	Pondération des variables pour la classification de l'occupation des terres pour la Basemap 2002, en utilisant l'imagerie Landsat-7	62
Figure 27	Pondération des variables pour la classification de l'occupation des terres pour la Basemap 2015, en utilisant l'imagerie Sentinel-2	62

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 5
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



Figure 28	Pondération des variables pour la classification de l'occupation des terres pour la Basemap 2019, en utilisant l'imagerie Sentinel-2	63
Figure 29	Couverture terrestre pour chaque Basemap. Une symbologie unique a été appliquée.....	64
Figure 30	Représentation graphique des tendances évolutives des classes d'occupation/d'utilisation des terres par rapport à l'époque de référence (2002).....	65
Figure 31	Occupation/utilisation des terres pour une section sélectionnée près de Bétaré Oya pour chaque basemap. Une symbologie unique a été appliquée.	66
Figure 32	Occupation/utilisation des terres pour chaque basemap pour une section sélectionnée près de Colomines. Une symbologie unique a été appliquée.	67
Figure 33	Exemple de croissance forestière passant de la végétation basse à la forêt.	68
Figure 34	Exemple de variations phénologiques et de changements dans l'occupation des terres, de la savane à la basse végétation.	69

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 6
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



Table des tableaux

Tableau 1	Liste des images satellites Sentinel-2 téléchargées couvrant la zone d'étude Est-Adamaoua.	19
Tableau 2	Liste des images satellites Landsat-7 téléchargées couvrant la zone d'étude Est-Adamaoua	21
Tableau 3	Comparaison des imageries satellite Landsat 7 et Sentinel-2 (pour les acronymes détaillés voir : http://www.gisagmaps.com/landsat-8-sentinel-2-bands/ et https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview).	34
Tableau 4	Surface d'eau extraite pour chaque Basemap.	35
Tableau 5	Paramètres de qualité de l'eau modélisés par des méthodes de télédétection, classés en paramètres physiques, chimiques et biologiques. TSS = Total des Solides en Suspension.	37
Tableau 6	Paramètres de qualité de l'eau classés en paramètres optiquement actifs et non actifs.	39
Tableau 7	Classes d'occupation et d'utilisation des terres utilisées pour la cartographie	55
Tableau 8	Indices spectraux, description et formule.	56
Tableau 9	Nombre et surface des objets d'apprentissage représentatifs de chaque classe d'occupation des terres	58
Tableau 10	Matrice de confusion pour la cartographie de l'occupation des terres pour la Basemap 2002.	60
Tableau 11	Matrice de confusion pour la cartographie de l'occupation des terres pour la Basemap 2015.	60
Tableau 12	Matrice de confusion pour la cartographie de l'occupation des terres pour la Basemap 2019.	61
Tableau 13	Distribution des classes de l'occupation des terres pour chaque Basemap. Les surfaces sont en hectares.	64

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 7
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



1 Liste des acronymes et abréviations

ANN	Artificial Neural Networks – Réseaux Neuronaux Artificiels (RNA)
BI	Bare Soil Index – <i>Indice de sol dénudé</i>
BOA	Bottom-of-Atmosphere – <i>Bas de l’atmosphère</i>
CCCI	Canopy Chlorophyll Content Index – <i>Indice de contenu en chlorophylle de la canopée, (strate supérieure de la forêt)</i>
Chl-A	Chlorophylle-A
DO	Dissolved Oxygen - <i>Oxygène dissous</i>
EPSG	European Petroleum Survey Group – <i>une organisation qui maintient une base de données de paramètres géodésiques avec des codes standard, les codes EPSG, pour les systèmes de coordonnées, les datums, les sphéroïdes, les unités, etc.</i>
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus - <i>L'instrument Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) est un radiomètre fixe à balayage multispectral à huit bandes, capable de fournir des informations d'imagerie à haute résolution de la surface de la Terre.</i>
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index - <i>Indice de végétation verte par différence normalisée</i>
MDNWI	Modified Normalized Difference Water Index – <i>Indice modifié de l’eau par différence normalisée</i>
MSE	Mean Square Error – <i>Erreur quadratique moyenne</i>
MSI	Multispectral Imagery – <i>Imagerie multispectrale</i>
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index – <i>Indice normalisé des différences de végétation (“Indice de verdure”)</i>
NDTI	Normalized Difference Turbidity Index – <i>Indice normalisé des différences de turbidité</i>
NICFI	Norway's International Climate and Forests Initiative – <i>Initiative internationale de la Norvège sur le climat et les forêts</i>
NIR	Near Infra-Red – <i>Proche infrarouge</i>
OLI	Operational Land Imagery – <i>Imagerie terrestre opérationnelle</i>
OSM	Open Street Map – <i>OpenStreetMap (OSM) est un projet collaboratif de cartographie en ligne qui vise à constituer une base de données géographiques libre du monde (permettant par exemple de créer des cartes sous licence libre), en utilisant le système GPS et d'autres données libres. Sous SIG, OSM est disponible en tant que Basemap.</i>

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 8
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



Pan	Panchromatic Band – <i>Bande panchromatique</i>
RVI	Ratio Vegetation Index – <i>Indice de ratio de la végétation</i>
SLC	Scan-Line Correction – <i>Correction des lignes de balayage</i>
SWIR	Short-Wavelength Infra-Red – <i>Infrarouge (IR) à courte longueur d'onde</i>
TIR (L/H)	Thermal Infra-Red (Low gain / High gain) – <i>Infrarouge thermique (faible gain / fort gain)</i>
TOA	Top-of-Atmosphere – <i>Haut de l'atmosphère</i>
TSS	Total Suspended Solids – <i>Total des solides en suspension</i>
UTM	Universal Transverse Mercator – <i>Projection Transverse universelle de Mercator</i>
VRE	Vegetation Red-Edge - <i>Le red-edge ou red edge (terme d'origine anglaise, littéralement « bord (ou marge) rouge »), est une portion du spectre électromagnétique dans le proche infrarouge. Il est utilisé en télédétection pour suivre l'activité végétale.</i>
WGS 1984	World Geodetic System 1984 – <i>WGS 84 (World Geodetic System 1984) est un système géodésique mondial. Il est composé d'un système de coordonnées, d'un ellipsoïde de référence (l'ellipsoïde de révolution IAG GRS 80), un géoïde (EGM96).</i>
WV	Water Vapour – <i>vapeur d'eau</i>

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 9
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



2 Objectif du rapport / zone de télédétection adaptée

Le présent rapport est le Premier rapport d'avancement, soumis après l'achèvement de la deuxième étape de la mission, incluant la création des ébauches des cartes SIG factuelles (cartes minières, forestières, cours d'eau, dans différents intervalles (années 2000-2010 / 2015 / 2019-20).

Les activités du secteur minier artisanal et artisanal semi-mécanisé ont été caractérisées dans le Rapport de Démarrage pour plusieurs substances telles que l'or et des diamants, l'étain, le tantalite, les pierres précieuses telles que le saphir, les matériaux de construction comme le sable et le pouzzolane.

L'échange avec PRECASEM sur l'importance des différentes substances exploitées et la zone d'étude pour la télédétection à mené à la délimitation des zones suivantes :

- La zone principale à l'Est de 27.500 km² qui s'étend sur une partie des régions de l'Est (Batouri / Kambele, Ngoura, Colomines, Woumbou – Bétaré Oya) et de l'Adamaoua (rivières Fel et Mama proche des villages Kombo Laka et Gbatoua, quelques 50 km à l'est de Meiganga) où sont localisées la plupart des activités artisanales et semi-mécanisées de l'or (et épisodiquement de diamant) connues
- Une zone d'environ 88 km² à Tignère où le saphir est exploité.

La Figure 1 montre la zone d'étude, composée de la zone Est-Adamaoua initialement proposée, et la petite zone Tignère plus au nord-ouest.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 10
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						

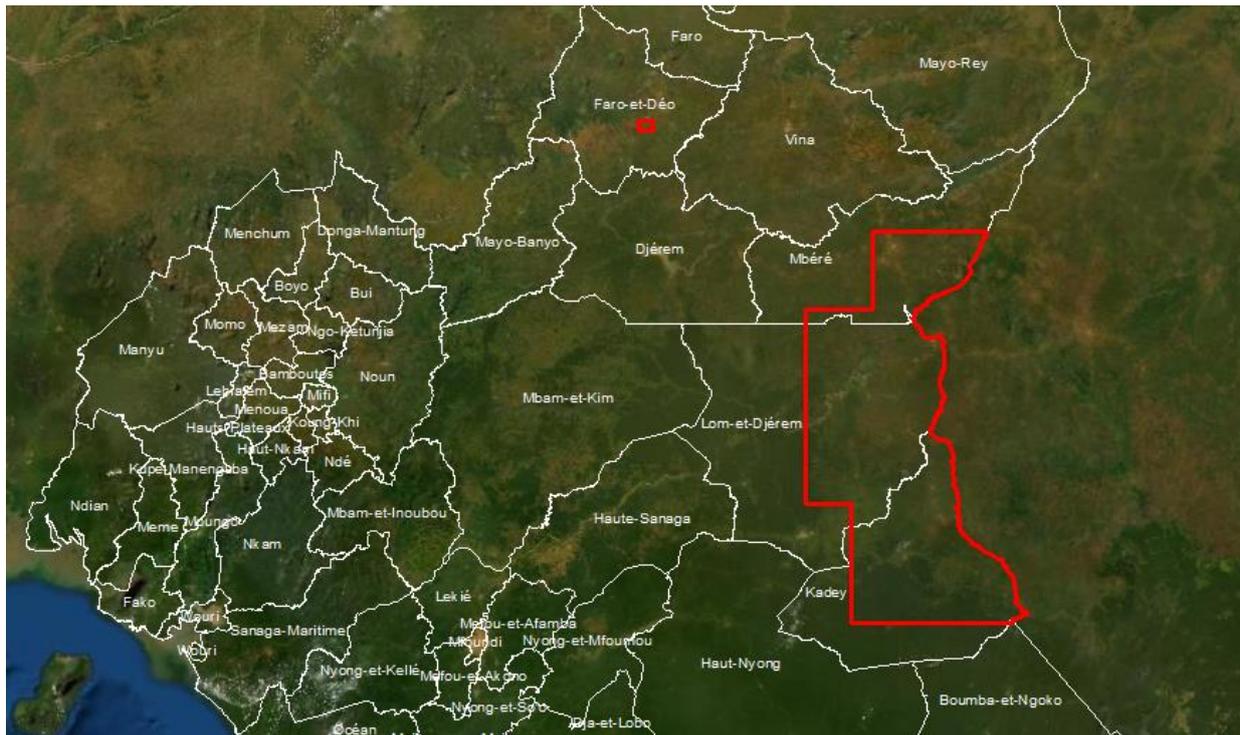


Figure 1 Zone choisie pour l'étude de télédétection et sélection de sites miniers artisanaux (ASM) et semi-mécanisés.

3 Rappel des activités à réaliser

À date, les activités suivantes ont été réalisées par le consultant :

A1 Délimitation finale de la zone d'étude

A2 / A3 / A4 Finalisation de la méthodologie et adaptation du programme de travail et élaboration du rapport de démarrage

Des amendements à la méthodologie et au chronogramme des activités, des livrables et réunions ont été fait dans le Rapport de démarrage final, suite aux observations du Client.

La première étape de la mission a été conclue par le **rapport de démarrage** et par la **Réunion de Cadrage (M1)**.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 11
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



A5 Configuration de la base de données SIG et téléchargement des données

Le consultant a configuré une base de données SIG et a téléchargé des images satellites LANDSAT-7 et Sentinel – 2 pour la zone d'étude à l'Est et Adamaoua. Il met à disposition du Client, ensemble avec le présent rapport d'avancement, les données produites et utilisées.

A6 Création des ébauches des cartes SIG factuelles : cartes minières, forestières, des cours d'eau, dans différents intervalles

Les cartes factuelles SIG – décrivant la situation par l'ensemble des données existantes sous forme de différentes cartes thématiques – incluront l'analyse des données existantes (images multispectrales Landsat et Sentinel 2, couverture végétale, réseau hydrographique, modèles numériques d'élévation...) aux intervalles accordés (2002, 2015, 2019/2020), les résultats existants des sédiments de ruisseaux (*stream sediments*), le cadastre minier, des données historiques et actuelles de terrain. Les données retenues sur ces cartes factuelles fourniront la base pour l'élaboration des cartes dérivées.

A7 Soumission des données 1, rapport d'avancement 1

Les données collectées et produites pendant cette activité sont rendues au Client avec le présent Rapport d'avancement **L2**. Elles feront l'objet de la **réunion de coordination de projet (M2)**.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 12
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



4 Données utilisées

4.1 Données demandées au PRECASEM

Dans le Rapport de démarrage, les données suivantes ont été sollicitées du PRECASEM :

- cartes géologiques,
- cartes géochimiques,
- résultats des prélèvements de la géochimie des sédiments de ruisseau,
- cadastre minier,
- toutes autres données liées à l'utilisation des terres, aux conditions de vie de la population concernée par l'activité minière, etc..

A date, ces données n'ont pas encore été fournies. Le consultant prie le PRECASEM de mettre à disposition les données disponibles, notamment celles qui ont le potentiel de fournir des informations sur l'impact environnemental et / ou social de l'activité minière artisanale et semi-mécanisée, telles que les cartes géochimiques / résultats des prélèvements de la géochimie des sédiments de ruisseau, etc.

4.2 Données recherchées et organisées par le Consultant

Le Consultant effectue un travail de bibliographie consistant à rechercher toutes les sources utiles au projet pouvant compléter les données fournies par PRECASEM.

Les données de la télédétection que le consultant a téléchargé et organisé proviennent des bases de données Landsat 7 (pour la période de référence 2002) et Sentinel-2 (pour 2015 et 2019/20).

5 Rappel de la méthodologie générale de télédétection

L'imagerie optique de télédétection fournit une source de données unique et efficace pour surveiller les changements du paysage dus aux activités minières et d'exploitation.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 13
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



Conformement aux Termes de Référence, l'analyse de la télédétection sera effectuée à l'aide d'images satellites acquises au cours de trois époques :

- 2002 → définie comme une époque de référence pour l'état initial de la couverture terrestre,
- 2015,
- 2019/20.

Nous appliquons l'approche générale suivante:

- Utilisation des données de télédétection gratuites :
 - images *Landsat 7* pour le temps d'avant 2015 : résolution 30 m, 7 bandes spectrales,
 - données *Sentinel-2* pour le temps d'après 2015 : résolution 10 m, 13 bandes spectrales,
 - complétées par des données haute résolution :
 - imagerie satellite mensuelle (~5 m résolution) « *Planet* » destinée à la surveillance des forêts tropicales, financé par le programme « *International Climate and Forests Initiative (NICFI)* » du gouvernement Norvégien,
 - GoogleEarth,
 - ESRI,
 - Bing maps.
- Détection et traçage des sites miniers à l'aide des approches semi-automatiques soutenues par l'interprétation des données de télédétection avec ANN (réseaux neuronaux artificiels),

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 14
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



- Détection et traçage des problèmes environnementaux (par exemple, turbidité de l'eau, déforestation) en utilisant des approches semi-automatiques bien reconnues, comme des indices et réseaux neuronaux artificiels également.

5.1 Imagerie Sentinel-2

Pour les années 2015 et 2019/2020, l'imagerie satellite Sentinel-2 est mise en œuvre. L'utilisation de l'imagerie satellitaire Sentinel-2 dans cette étude présente quatre caractéristiques principales :

1. source de données disponible gratuitement,
2. une résolution spatiale faible à moyenne (4 bandes de 10 m, 6 bandes de 20 m, 3 bandes de 60 m),
3. les données multispectrales du visible (VNIR) et du proche infrarouge (NIR) à l'infrarouge à ondes courtes (SWIR) et,
4. une résolution temporelle de 5 jours à l'équateur depuis 2015, permettant de suivre l'évolution des paysages au cours des dernières années.

Les carreaux de grille Sentinel-2 spécifiques couvrant la zone d'étude ont été identifiés et sont illustrés à la Figure 2. La figure ne présente pas encore la nouvelle zone de Tignère, localisée au nord-ouest de la zone Est-Adamaoua. Au total, neuf carrés de grille Sentinel-2 couvrent la zone d'étude. La totalité de la zone d'étude se trouve dans la zone Mercator UTM33N. Par conséquent, toutes les images sont projetées dans le système de coordonnées WGS84/UTM33N.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 15
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						

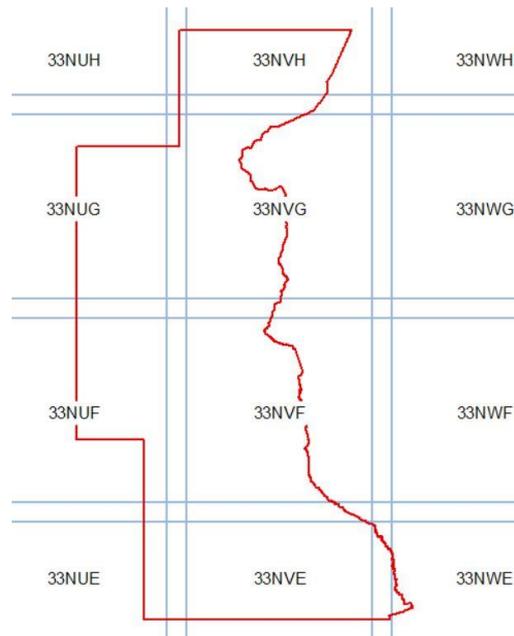


Figure 2 Identification des carrés de grille Sentinel-2 couvrant entièrement la zone d'étude Est-Adamaoua.

Des spécifications supplémentaires pour l'imagerie Sentinel-2 sont données à l'Annexe 1.

5.2 Imagerie Landsat-7

Nous utiliserons l'imagerie optique Landsat-7 datant de la période entre 2000 et 2010. Ces données d'imagerie sont également gratuites et ont une résolution spatiale moyenne de 30 m. Les carreaux de grille Landsat-7 spécifiques couvrant la zone d'étude ont été identifiés et sont illustrés sur la Figure 3. Au total, cinq carreaux de la grille Landsat-7 couvrent la zone d'étude. Toutes les images sont projetées dans le système de coordonnées WGS84/UTM33N.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 16
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						

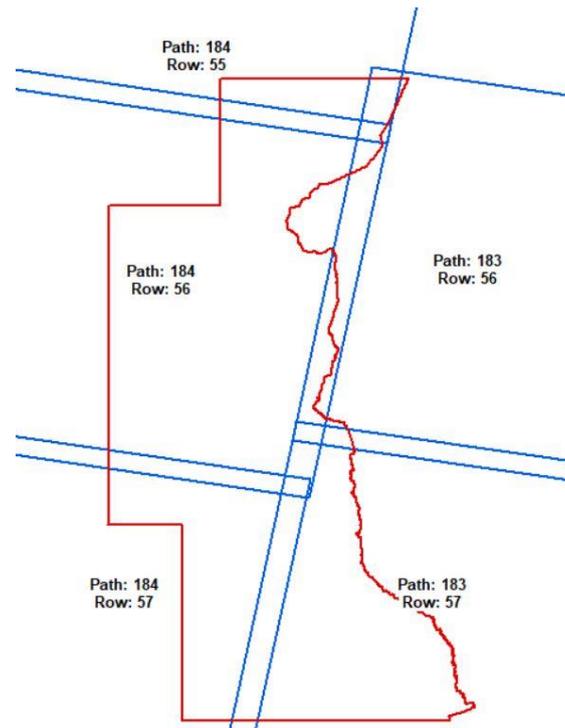


Figure 3 Identification des carreaux de grille Landsat-7 couvrant entièrement la zone d'étude.

5.3 Couverture nuageuse

Les analyses optiques nécessitent des images satellites avec moins de 10 % de couverture nuageuse acquises généralement après la saison des pluies. L'imagerie disponible indique que les images avec ou sans nuages après la saison des pluies sont généralement acquises en décembre ou début janvier. Par conséquent, cette période est considérée comme appropriée pour l'analyse optique dans cette zone d'étude. Une inspection détaillée des images disponibles sur la zone d'étude pendant la période d'analyse a révélé que les images répondant aux critères de couverture nuageuse sont disponibles sur l'ensemble de la zone d'étude.

5.4 Téléchargement des données

5.4.1 Imagerie acquise en décembre 2019

Les produits Sentinel-2 sont téléchargés de la plateforme Copernicus de l'ESA (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/>). Ce téléchargement est gratuit. La plateforme permet

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 17
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



d'accéder aux archives en ligne de données corrigées de l'atmosphère (niveau de traitement 2A).

5.4.2 Imagerie acquise en décembre 2015

Les images acquises en décembre 2015 font partie des données d'archives de longue durée (*LTA*) et ne sont disponibles que sous forme d'images hors ligne. L'accès au téléchargement gratuit des images satellite Sentinel-2 (*LTA*) hors-ligne est fourni par la plateforme de l'USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). L'imagerie satellite acquise en décembre 2015 pour les besoins de cette étude n'est disponible qu'au niveau 1C et doit être corrigée sur le plan atmosphérique et convertie en produit de niveau 2A. Dans ce cas, la conversion est effectuée dans QGIS à l'aide du plugin open-source de classification semi-automatique.

5.4.3 Imagerie acquise entre décembre 2000 et 2010

L'imagerie optique de Landsat-7 acquise en 2002 (avant l'échec des instruments de correction des lignes de balayage (*SLC*) – voir Annexe 1) sera mise en œuvre. L'accès au téléchargement gratuit de l'imagerie Landsat-7 par réflectance de surface est possible sur la plateforme de l'USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Les données corrigées de l'atmosphère comprennent des informations multispectrales allant du visible (*VNIR*) et du proche infrarouge (*NIR*) à l'infrarouge à ondes courtes (*SWIR*) et sont prêtes à être utilisées pour l'analyse.

Une liste des images téléchargées est donnée dans Tableau 1 et Tableau 2 :

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 18
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



Tableau 1 Liste des images satellites Sentinel-2 téléchargées couvrant la zone d'étude Est-Adamaoua.

Carré	Produit de données	Résolution Spatiale	Source de données	Système de coordonnées	Jour d'acquisition
T33NUE	2A	10m, 20m, 60m	ESA	UTM33N / WGS84	20191205
T33NUF	2A	10m, 20m, 60m	ESA	UTM33N / WGS84	20191205
T33NUG	2A	10m, 20m, 60m	ESA	UTM33N / WGS84	20191205
T33NUH	2A	10m, 20m, 60m	ESA	UTM33N / WGS84	20191205
T33NVE	2A	10m, 20m, 60m	ESA	UTM33N / WGS84	20191205 20191217
T33NVF	2A	10m, 20m, 60m	ESA	UTM33N / WGS84	20191205 20191217
T33NVG	2A	10m, 20m, 60m	ESA	UTM33N / WGS84	20191205
T33NVH	2A	10m, 20m, 60m	ESA	UTM33N / WGS84	20191205
T33NWE	2A	10m, 20m, 60m	ESA	UTM33N / WGS84	20191205
T33NUE	1C	10m, 20m, 60m	USGS	UTM33N / WGS84	20151226



T33NUF	1C	10m, 20m, 60m	USGS	UTM33N / WGS84	20151226
T33NUG	1C	10m, 20m, 60m	USGS	UTM33N / WGS84	20151226
T33NUH	1C	10m, 20m, 60m	USGS	UTM33N / WGS84	20151226
T33NVE	1C	10m, 20m, 60m	USGS	UTM33N / WGS84	20160102
T33NVF	1C	10m, 20m, 60m	USGS	UTM33N / WGS84	20160102
T33NVG	1C	10m, 20m, 60m	USGS	UTM33N / WGS84	20151226
T33NVH	1C	10m, 20m, 60m	USGS	UTM33N / WGS84	20151226
T33NWE	1C	10m, 20m, 60m	USGS	UTM33N / WGS84	20160102

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 20
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



Tableau 2 Liste des images satellites Landsat-7 téléchargées couvrant la zone d'étude Est-Adamaoua

Carré	Produit de données	Résolution Spatiale	Source de données	Système de coordonnées	Jour d'acquisition
183 / 56	2	30m	USGS	UTM33N / WGS84	20021204
183 / 57	2	30m	USGS	UTM33N / WGS84	20021204
184 / 55	2	30m	USGS	UTM33N / WGS84	20021125
184 / 56	2	30m	USGS	UTM33N / WGS84	20021125
184 / 57	2	30m	USGS	UTM33N / WGS84	20021227

5.4.4 Traitements

5.4.4.1 Correction atmosphérique

L'analyse sur de grandes zones et de longues périodes de temps nécessite l'utilisation de données corrigées de l'atmosphère. La correction atmosphérique est une étape préalable essentielle pour renforcer et améliorer l'identification des signatures spectrales de différents objets ou matériaux à la surface du sol. Les commentaires suivants s'appliquent à l'imagerie mise en œuvre dans cette étude :

- Landsat-7 : les données corrigées de l'atmosphère peuvent être commandées et téléchargées gratuitement en tant qu'imagerie de réflectance de surface (niveau 2).

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 21
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



- Sentinel-2 : les données corrigées de l'atmosphère (les produits dits "*Bottom-of-Atmosphere Level-2A*") ne sont disponibles que pour les images satellite acquises après la fin de 2018. Les images antérieures doivent être converties individuellement du niveau 1C en produits de niveau 2A à correction atmosphérique.

5.4.4.2 Mosaïquage

Enfin, les images satellite sont mosaïquées en mosaïques à couleurs équilibrées (pour éviter toute incohérence spectrale due à des variations phénologiques dans les zones de chevauchement) et découpées à la zone d'étude. Une vue d'ensemble des mosaïques créées est donnée à la Figure 4. Par conséquent, les bandes de la mosaïque sont prêtes à être utilisées pour l'analyse optique.

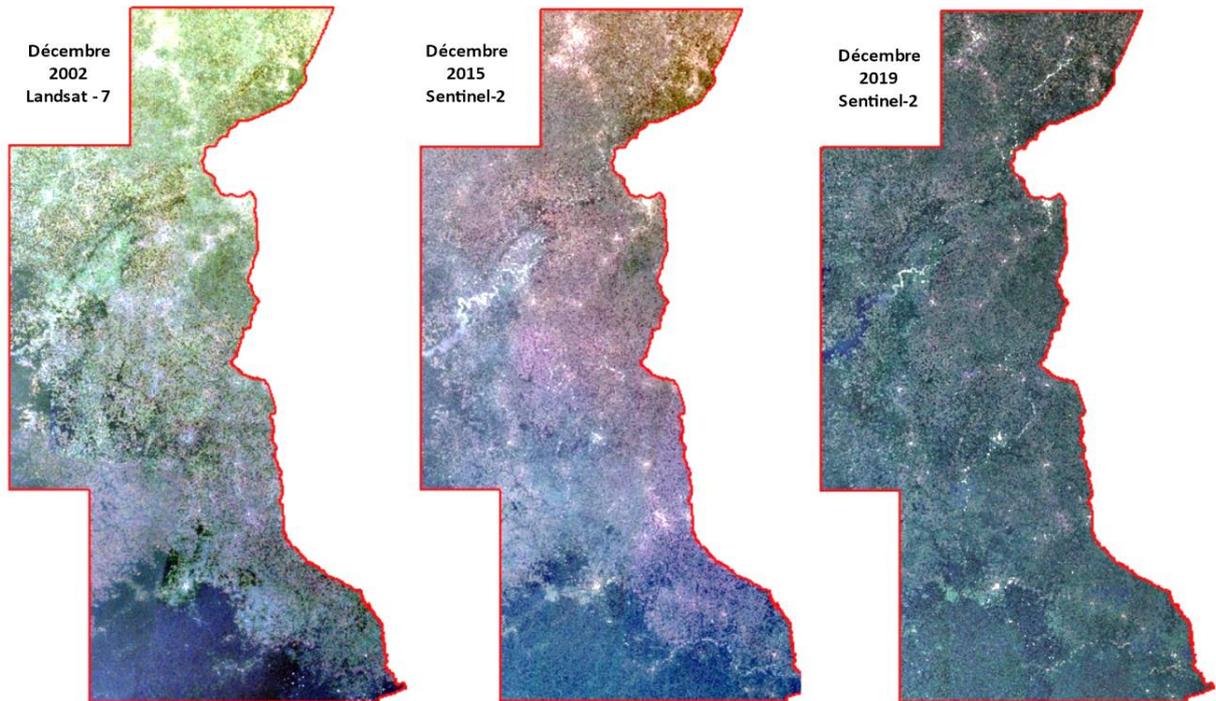


Figure 4 Jeux de données en mosaïque d'images satellitaires Sentinel-2 acquises en décembre 2002, 2015 et 2019.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 22
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



6 Création des cartes factuelles

6.1 Cartographie semi-automatique des sites miniers

6.1.1 Méthodologie basée sur les données Sentinel-2

Les activités minières artisanales semi-mécanisées de petite à moyenne échelle sont détectées à l'aide des réseaux neuronaux artificiels (RNA), des algorithmes d'apprentissage automatique supervisé. Les algorithmes de RNA sont mis en œuvre dans le logiciel de Beak Consultants GmbH, advangeo® Prediction software.

Advangeo® est un logiciel de modélisation et de prédiction, développé pour modéliser les données spatiales et analyser les relations complexes entre une grande variété de paramètres d'influence spatiale et un événement ou une occurrence pronostique donné, en utilisant des méthodes d'intelligence artificielle dans l'environnement SIG. Le principe de base est la capacité des réseaux neuronaux artificiels à généraliser et à apprendre à partir de relations non linéaires, et à modéliser des processus et des événements naturels complexes, qui sont difficiles ou impossibles à décrire avec des mathématiques analytiques. Advangeo® est disponible en tant qu'application autonome avec une interface conviviale, qui permet à l'utilisateur de créer et de construire des modèles paramétrés de manière flexible.

Un flux de travail en sept étapes est mis en place :

- a) Collecte des paramètres de contrôle (Figure 5), c'est-à-dire des données qui contrôlent les caractéristiques modélisées (ici les sites miniers) :
 - Imagerie satellitaire Sentinel-2 prétraitée sans nuage ou avec peu de nuages ;
 - Données topographiques *Open Street-Map* (OSM) telles que agglomérations, infrastructures, etc.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 23
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						

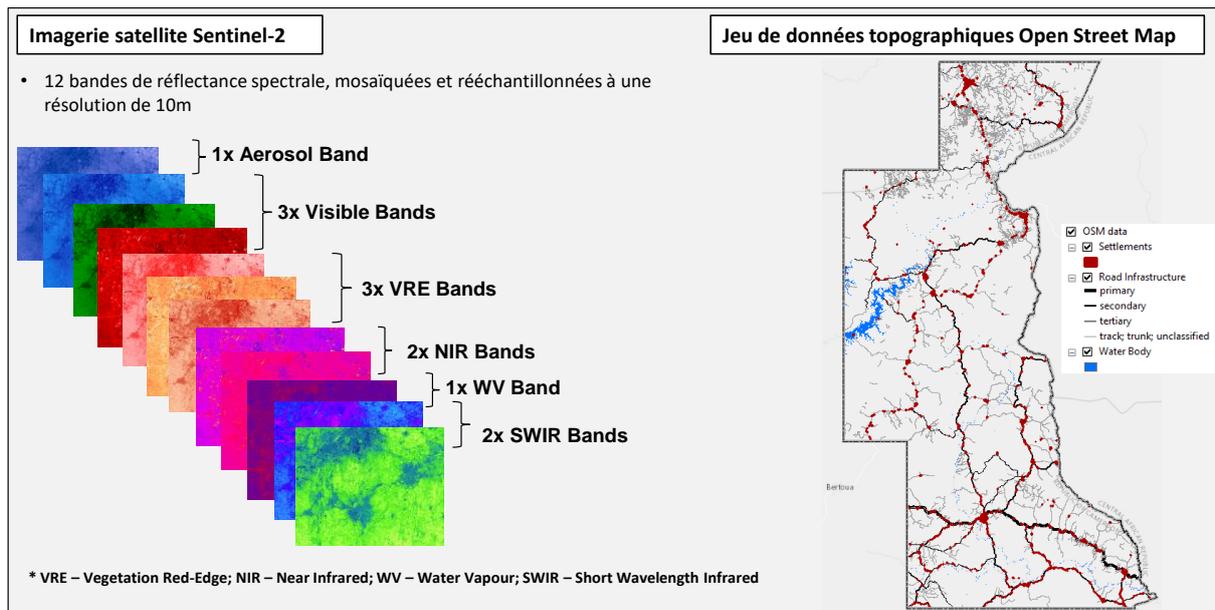


Figure 5 Collecte des données contrôlant les caractéristiques à modéliser.

b) Traitement pour la création des données d'entrée du modèle, incluant les étapes suivantes :

- projection des données d'entrée dans le système de coordonnées du projet (WGS 1984 / UTM 33N, EPSG : 32633) ;
- rééchantillonnage à la résolution spatiale spécifiée selon les exigences du projet (résolution spatiale de 10 m) ;
- découpage des ensembles de données d'entrée à l'échelle de la zone du projet ;
- création des jeux de données personnalisés tels qu'un raster de proximité carrée inverse pour des ensembles de données ponctuelles ou linéaires (par exemple, pour exclure les infrastructures de transport, les établissements humains, etc.)
- mise à l'échelle linéaire de valeurs de données matricielles continues entre 0 et 1 ; conversion de données vectorielles discrètes en données matricielles binaires avec des valeurs de 0 et 1 comme données d'entrée du modèle.

c) Conception du scénario d'apprentissage du réseau neuronal artificiel : les modèles d'entraînement (données d'apprentissage) sont idéalement des sites miniers présentant un contraste spectral évident avec le milieu environnant et des caractéristiques de réflectance spectrale distinctes (voir les données d'étalonnage à la Figure 6). Le scénario

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 24
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



d'entraînement comprend ainsi les données de calibrage (sites miniers connus utilisés pour l'entraînement du réseau neuronal), les paramètres de contrôle et les paramètres du réseau. La Figure 6 présente un aperçu schématique de la technique mise en œuvre.

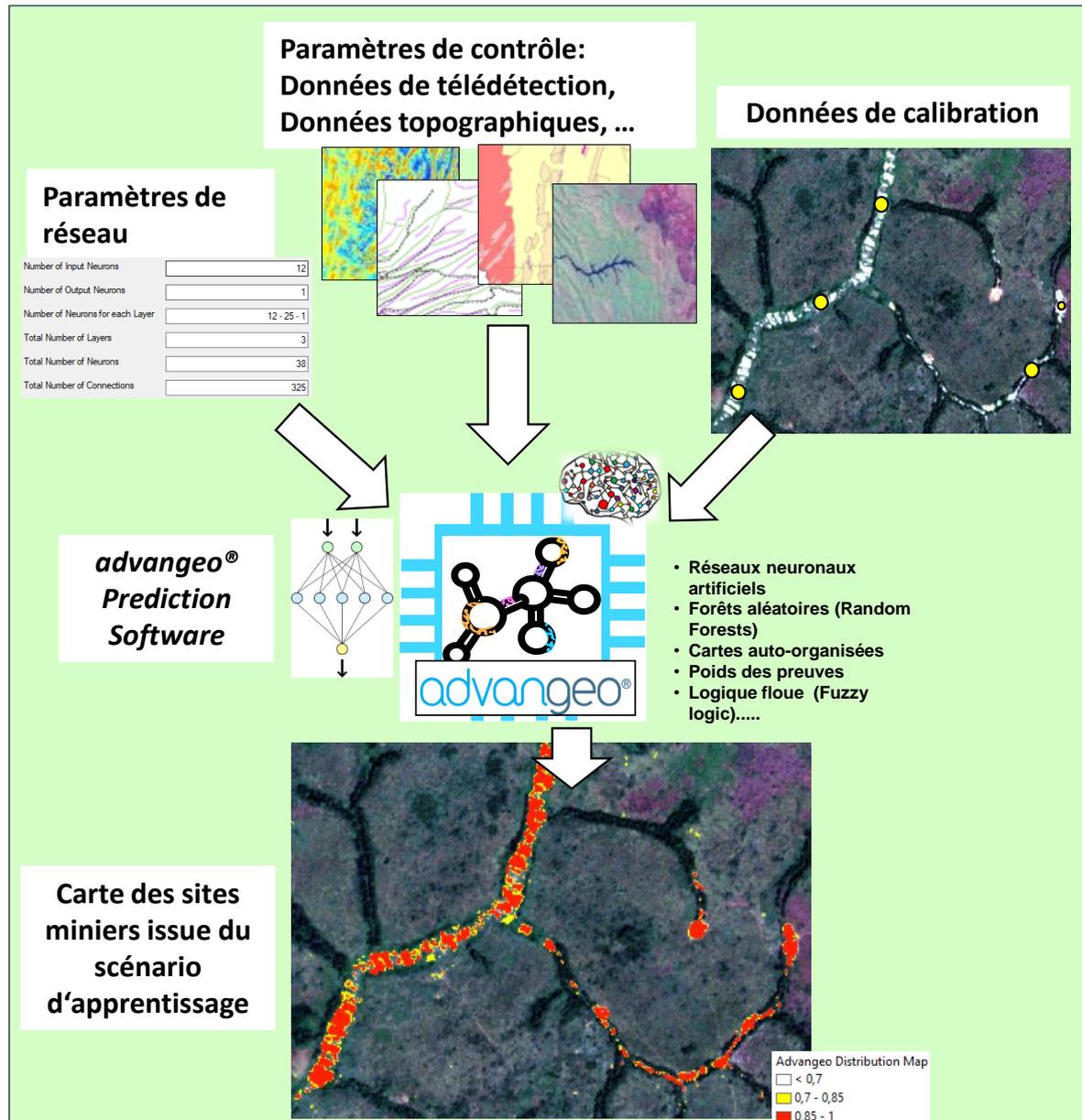


Figure 6 *Aperçu schématique de la technique mise en oeuvre pour la cartographie prédictive semi-automatique des sites miniers*

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 25
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						

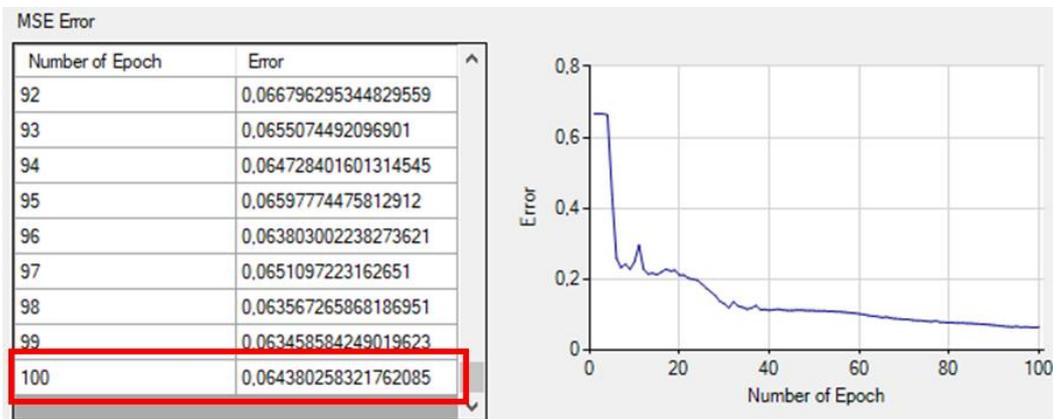


- d) Validation du RNA entraîné. La précision et la fiabilité du RNA entraîné sont ensuite évaluées à l'aide des approches suivantes :
- i. l'erreur du réseau (erreur quadratique moyenne - EQM),
 - ii. évaluation des statistiques (tous les pixels vs. Pixels Vrais Positifs),
 - iii. analyse des poids des paramètres du modèle,
 - iv. carte de distribution avancée sur la zone d'entraînement; identification automatique des emplacements connus, qui n'ont pas été utilisés pour l'entraînement du réseau neuronal.

Les figures correspondant à l'évaluation qualité de l'entraînement du RNA final sont présentées ci-dessous (Figure 7 et Figure 8).

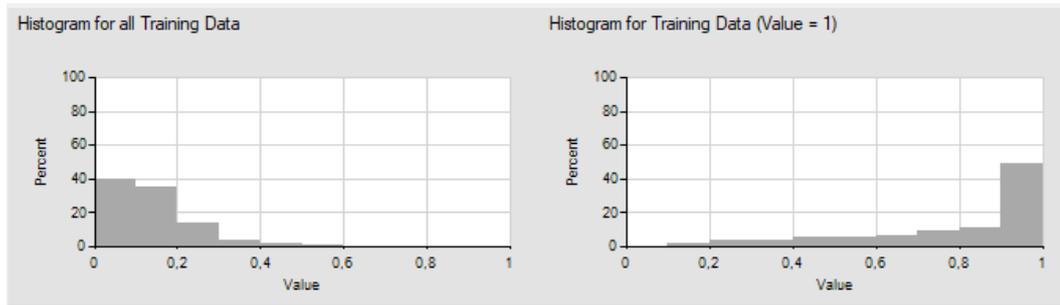
En général, des erreurs MSE inférieures à 0,2, des poids de paramètres équilibrés et une probabilité élevée de modélisation de pixels vrais positifs sont des indicateurs de la qualité d'un réseau neuronal stable et fiablement entraîné.

i.





ii.



iii.

Weights		Analysis	
Name	Connection Weights	Garson Algorithm	
Sentinel2-2019\B02	-459,91	0,06	
Sentinel2-2019\B03	-791,86	0,07	
Sentinel2-2019\B04	-674,68	0,1	
Sentinel2-2019\B05	-2370,07	0,04	
Sentinel2-2019\B06	249,61	0,01	
Sentinel2-2019\B07	407,62	0,01	
Sentinel2-2019\B08	421,46	0,01	
Sentinel2-2019\B11	941,68	0,06	
Sentinel2-2019\B12	78,1	0,03	
Sentinel2-2019\B8A	530,44	0,01	
OSM\Urban Area	-156731,23	12,3	
OSM\Infrastructure	-156731,23	12,3	

Figure 7 i) Évaluation de l'erreur quadratique moyenne, ii) Histogramme des données d'entraînement, et iii) Analyse de la pondération des paramètres de contrôle.

La Figure 8 montre une zone d'apprentissage avec les rivières de Moul et Woumbou et les villages de Woumbou et Tikondi à la route Ndokayo – Ngoura, région de l'Est.

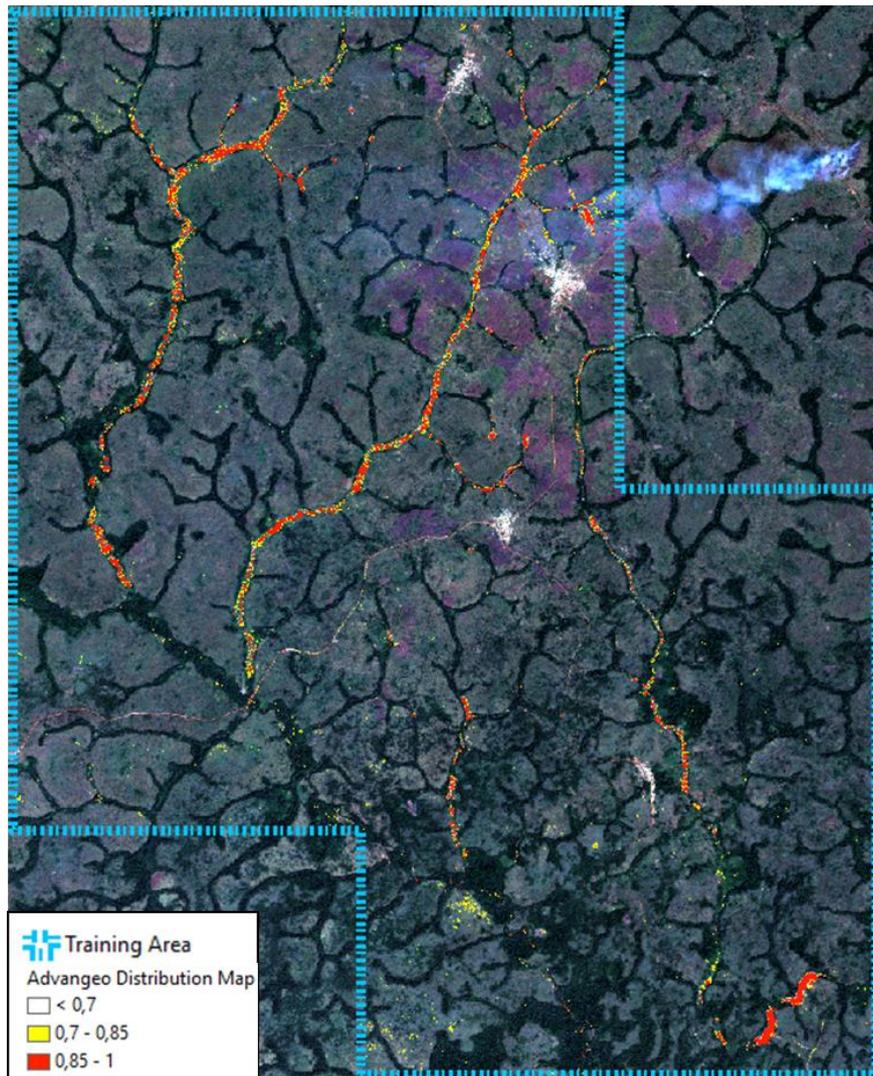


Figure 8 Carte de distribution advangeo® pour le scénario d'apprentissage

Afin d'optimiser les paramètres de qualité, les données de calibration ont été enrichies et améliorées de manière itérative, jusqu'à ce que le réseau RNA entraîné soit performant et donne des résultats fiables.

e) Application du modèle. Après validation réussie, le RNA entraîné est utilisé dans d'autres localités non étudiées afin d'identifier des événements similaires. Le résultat est une carte de distribution de probabilité sur l'ensemble de la zone d'étude. La Figure 9 présente une petite partie de la carte des sites miniers ainsi créée.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 28
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						

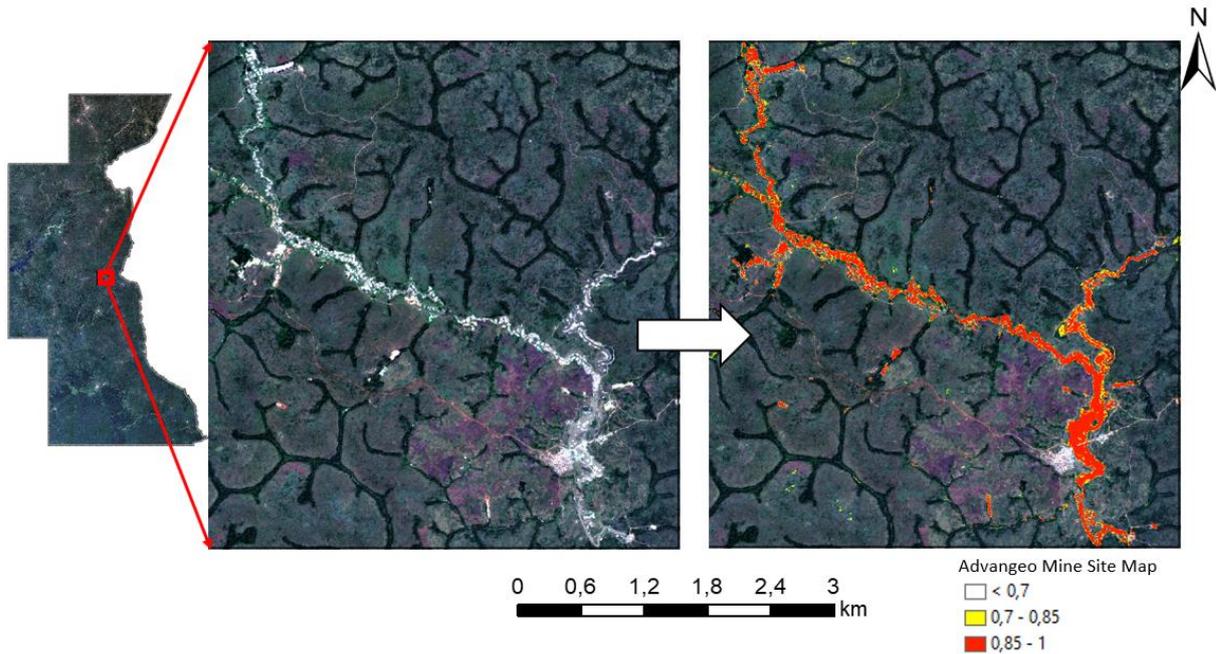


Figure 9 Extrait de la carte des sites miniers prédits sur toute la zone d'étude issue du RNA entraîné avec Advangeo®

- f) Raffinement et présentation. Les résultats de la classification RNA sont des données matricielles irrégulières basées sur des pixels. Les résultats de la classification ont été affinés et traités automatiquement, afin d'améliorer la représentation cartographique de la carte finale. Le résultat est une carte vectorielle des sites miniers identifiés. La Figure 10 montre un exemple d'exploitation de placer aurifère situé au nord de la rivière Kadeï.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 29
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						

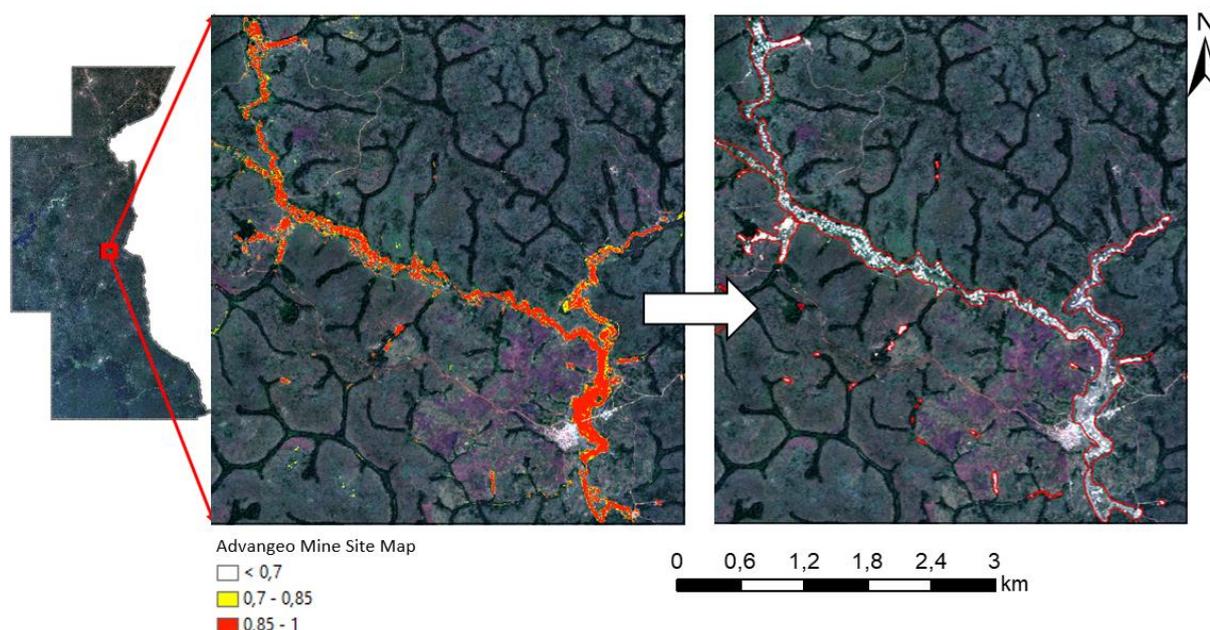


Figure 10 Affinement du résultat de la cartographie Advangeo®.

g) Validation. La carte vectorielle raffinée de sites miniers est ensuite validée en utilisant principalement les images à haute résolution de *Planet Basemaps* (voir 6.1.2), en combinaison avec une série d'images historiques : Landsat-7, Sentinel-2, ESRI Basemaps, etc. Les images historiques sont utilisées pour mieux identifier les modifications du paysage. Parfois, la résolution de l'imagerie disponible n'est pas suffisante pour distinguer les zones nues / roches exposées des sites miniers. Ces sites sont documentés séparément des sites miniers validés et devront potentiellement faire l'objet d'une vérification sur le terrain.

6.1.2 Basemaps *Planet* pour la validation du modèle

Les cartes de base (*basemaps*) de *Planet.com* sont des mosaïques à haute résolution, prêtes à être analysées, rendues accessibles par le programme de données satellitaires de l'Initiative internationale sur le climat et les forêts de Norvège (IIFC). Ce programme offre un accès gratuit aux données annuelles de mosaïques tropicales pour la période allant de décembre 2015 à août 2020 (cinq tranches de temps).

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 30
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



Les données *Planet* ont été téléchargées (<https://www.planet.com/basemaps/#/mosaic/>) en carrés de 20 x 20 km à 4,7 m de résolution spatiale, pour 2015 et 2019. Le réseau de satellites *PlanetScope* est composé d'un imageur à quatre bandes (bleu, rouge, vert et proche infrarouge) et a un temps de revisite d'une journée. Les mosaïques tropicales de l'archive bi-annuelle ont été créées en assemblant des images avec peu de nuages et sans nuage acquises pendant la saison sèche (de décembre à mars).

La zone d'étude est couverte par 115 tuiles quadruples, qui ont été mosaïquées par équilibrage des couleurs et découpées en fonction de la zone d'étude, comme l'illustre la Figure 11.

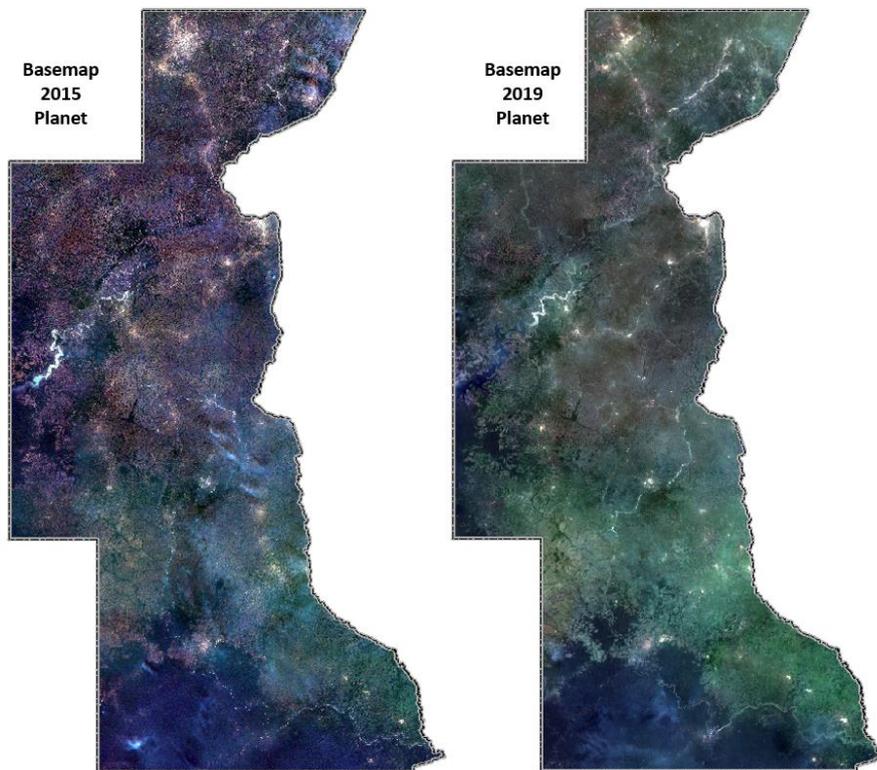


Figure 11 Jeux de données mosaïque de Planet Basemap pour la saison sèche en 2015 et 2019

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 31
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



6.1.3 Cartes finales des sites miniers

Le réseau neuronal de 2019 a été utilisé pour identifier des sites miniers similaires dans des zones inconnues pour l'imagerie acquise en 2015. Le flux de travail général et les méthodes de validation sont similaires à ceux décrits pour l'application du modèle en 2019.

Enfin, une carte des sites miniers pour chaque époque (2015 et 2019) a été créée et vérifiée manuellement avec les *basemaps* Planet, les données Landsat, les données Google Earth, les *basemaps* ESRI, les données Sentinel-2 et les observations historiques au sol disponibles. Les cartes finales des sites miniers sont présentées à la Figure 12.

Ces cartes sont ensuite utilisées pour évaluer les impacts environnementaux des activités minières.

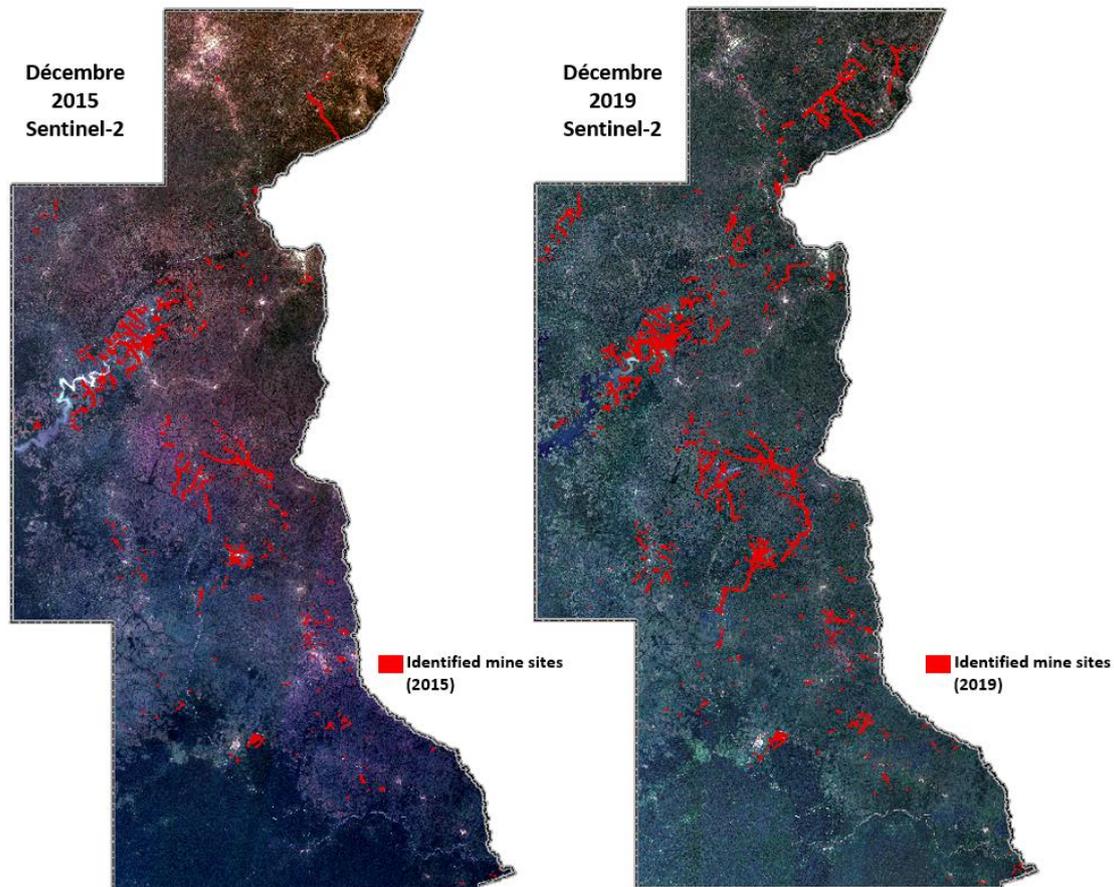


Figure 12 Cartes finales des sites miniers identifiés pour 2015 et 2019.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 32
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



6.2 Création des cartes environnementales

6.2.1 Pré-traitement de l'imagerie satellite

Afin d'effectuer une analyse spectrale pour différentes tranches de temps, des basemaps satellites sans nuages ont été composées en empilant et en mosaïquant des images individuelles comme suit :

- Dans cette étude, la tranche de temps de référence est définie pour la période 2000-2003. En raison du long temps de revisite du satellite Landsat-7 (cycle de répétition de 16 jours), l'intervalle de temps d'acquisition approprié a été étendu à trois ans, afin d'obtenir une basemap sans nuages de la zone d'étude. La basemap finale a été créée par empilage et mosaïquage de 29 images satellites. Elle sera désignée sous le nom de *Basemap 2002*.
- La première tranche de temps pour l'évaluation environnementale est fixée entre le 15 décembre 2015 et le 15 janvier 2016. Pendant cette période, la mission Sentinel-2 Copernicus n'a fonctionné qu'avec le satellite Sentinel-2A et avait un temps de revisite de 10 jours à l'équateur, permettant une imagerie plus fréquente de la zone d'étude qu'avec Landsat-7. La Basemap finale a été créée par empilage et mosaïquage de 32 images satellites individuelles. Elle sera désignée sous le nom de *Basemap 2015*.
- La seconde tranche de temps pour l'évaluation environnementale est fixée entre le 15 novembre 2019 et le 31 janvier 2020. Pendant cette période, la mission Sentinel-2 Copernicus a fonctionné avec les deux satellites Sentinel-2 (A et B) et avait un temps de revisite de 5 jours à l'équateur, permettant une imagerie plus fréquente de la zone d'étude. La Basemap finale a été créée par empilage et mosaïquage de 175 images satellites individuelles. Elle sera désignée sous le nom de *Basemap 2019*.

Cette technologie d'empilage et de mosaïquage présente les avantages suivants :

- réduit le bruit aléatoire des acquisitions individuelles,
- évite les artefacts provenant principalement de la luminosité et des conditions atmosphériques locales,
- masque les parties nuageuses des images individuelles et les remplace par d'autres images acquises dans un intervalle de temps court.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 33
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



- permet de concevoir des basemaps satellitaires sans nuages dans toute la zone d'étude.

Le Tableau 3 donne un aperçu des bandes multispectrales des images Sentinel-2 et Landsat-7, ainsi que leur comparaison. Les données d'imagerie ont été rééchantillonnées à une résolution spatiale de 10 m et découpées en un polygone "tampon" de 20 m autour de la zone d'étude.

Tableau 3 Comparaison des imageries satellite Landsat 7 et Sentinel-2 (pour les acronymes détaillés voir : <http://www.gisagmaps.com/landsat-8-sentinel-2-bands/> et <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview/>).

Bandes Landsat-7 ETM+				Bandes Sentinel-2 MSI			
Bande		Long. d'onde (µm)	Rés.(m)	Bande		Long. d'onde (µm)	Rés.(m)
				1	C/A	0.421 – 0.457	60
1	Bleue	0.441 – 0.514	30	2	Bleue	0.439 – 0.535	10
2	Verte	0.519 – 0.601	30	3	Verte	0.537 – 0.582	10
3	Rouge	0.631 – 0.692	30	4	Rouge	0.646 – 0.685	10
				5	VRE	0.694 – 0.714	20
				6	VRE	0.731 – 0.749	20
				7	VRE	0.768 – 0.796	20
				8	NIR	0.767 – 0.908	10
4	NIR	0.772 – 0.898	30	8a	NIR	0.848 – 0.881	20
				9	WV	0.931 – 0.958	60
				10	Cirrus	1.338 – 1.414	60
5	SWIR-1	1.547 – 1.749	30	11	SWIR-1	1.539 – 1.681	20
7	SWIR-2	2.064 – 2.345	30	12	SWIR-2	2.072 – 2.312	20



6	TIR (L/H)	10.31 – 12.36	60	
8	Pan	0.515 – 0.896	15	

6.2.2 Création des cartes environnementales

6.2.2.1 Identification des masses d'eau de surface

Les méthodes de télédétection sont utiles pour détecter l'emplacement des masses d'eau de surface et leur histoire. Les masses d'eau de surface ont été extraites pour chaque tranche de temps à l'aide de l'indice de différence d'eau normalisé modifié (MDNWI), comme décrit par (Duet al., 2016) . L'algorithme a donné de très bons résultats. Très peu de valeurs aberrantes ont été supprimées manuellement après inspection visuelle de la zone extraite.

La comparaison des trois tranches de temps montre que la superficie des eaux de surface a augmenté au fil des années (voir Tableau 4), passant de 46,75 km² à 279,65 km². Ceci est dû principalement au barrage de Lom Pangar qui s'étend aujourd'hui en amont jusqu'à Bétaré Oya (voir Figure 13). L'autre facteur d'augmentation des masses d'eau de surface est l'activité minière : en raison de l'exploitation minière alluvionnaire et des nombreux bassins d'eau restants, la surface de l'eau a également augmenté (voir Figure 14). Ces dépendances seront étudiées plus tard au cours du projet.

Tableau 4 Surface d'eau extraite pour chaque Basemap.

	Basemap 2002	Basemap 2015	Basemap 2019
Surface d'eau (km ²)	46.75	167.70	279.65

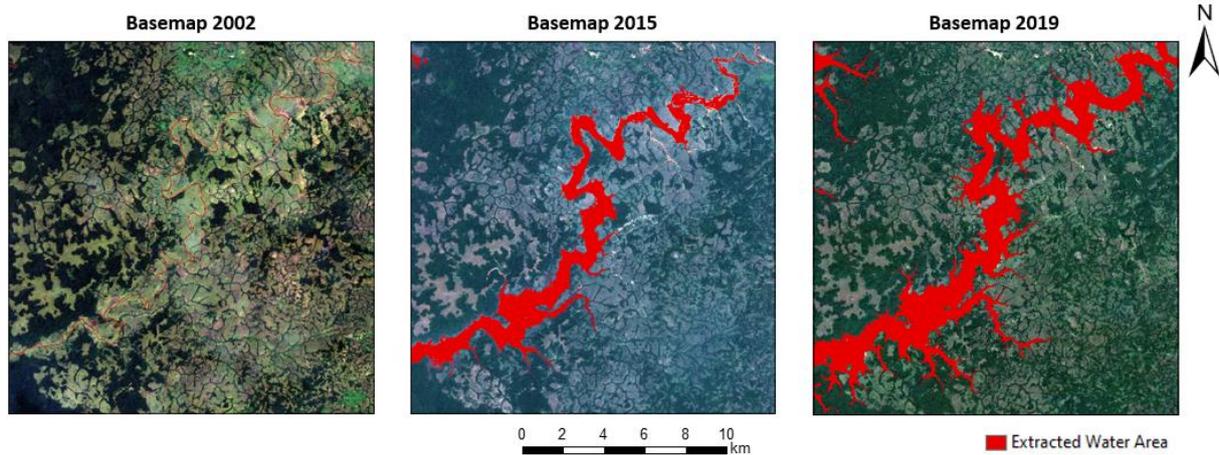


Figure 13 La surface d'eau extraite à proximité du réservoir de Lom - Pangar pour chaque basemap.

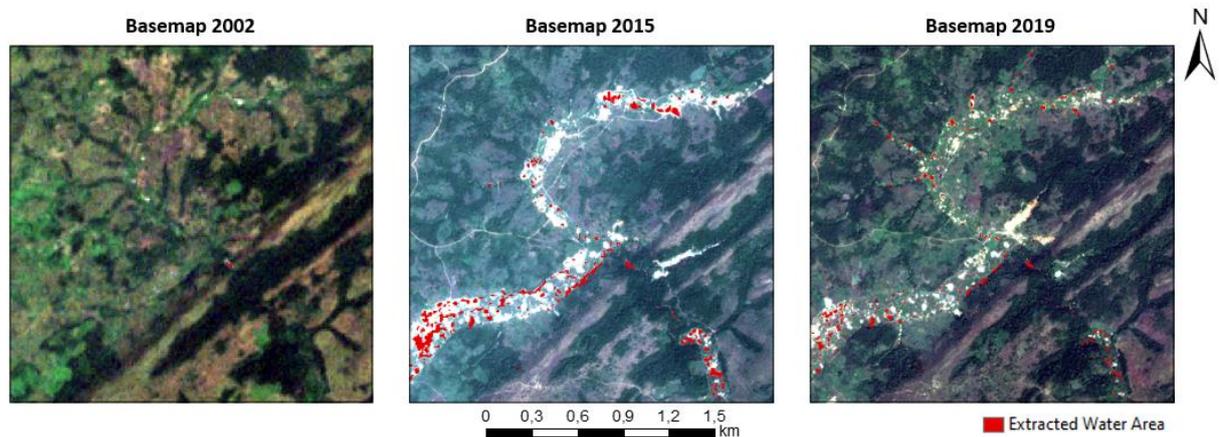


Figure 14 La superficie des eaux de surface extraite d'une section de la rivière Kadei pour chaque basemap.

Un autre aspect à considérer est la résolution spatiale de 30 m de l'imagerie Landsat-7 (2002), comparée à la résolution de 10-20 m fournie par l'imagerie Sentinel-2 (2015 et 2019). Il s'agit d'un facteur limitant pour l'identification d'éléments dont le diamètre est inférieur à 30 m. Un exemple est illustré à la Figure 15. Des mesures sporadiques ont révélé que la rivière Lom dans la section sélectionnée a une largeur moyenne de 20 m. Cette largeur est insuffisante pour être détectée par l'imagerie Landsat-7. Par conséquent, la zone d'eau n'a été que partiellement extraite de la Basemap 2002. Pour 2015 et 2019, en utilisant les

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 36
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



produits basés sur Sentinel-2 (Basemap 2015), les masses d'eau de surface ont été complètement extraites jusqu'à un diamètre de 10 - 15 m (taille des pixels de l'image : 10 m).

Sur la Basemap 2019, l'interruption des cours d'eau due à l'exploitation minière est clairement visible.

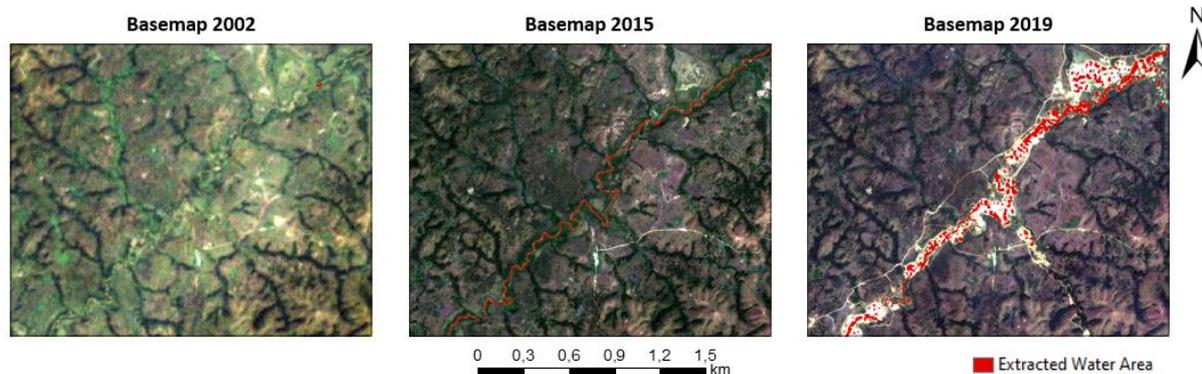


Figure 15 Superficie des eaux de surface extraites d'une section de la rivière Lom pour chaque basemap.

6.2.2.2 Qualité des eaux de surface

6.2.2.2.1 Introduction

Les données de l'imagerie multispectrale (MSI) de Sentinel-2 et de Landsat-7 *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) peuvent être utilisées pour la cartographie qualitative et le suivi de plusieurs paramètres de qualité de l'eau (voir Tableau 5). Ces paramètres sont utilisés pour définir l'état trophique et la qualité des eaux intérieures de surface (rivière, lac, réservoir, etc.).

Tableau 5 Paramètres de qualité de l'eau modélisés par des méthodes de télédétection, classés en paramètres physiques, chimiques et biologiques. TSS = Total des Solides en Suspension.

	Paramètres de la qualité de l'eau		
	Physiques	Chimiques	Biologiques
1	Turbidité	pH	Chlorophylle-A
2	TSS	Oxygène Dissous	



3	Couleur		
---	---------	--	--

Les corrélations entre les paramètres de qualité de l'eau et les données d'imagerie multispectrale sont définies à l'aide:

- a) des algorithmes de rapport de bande bien établis, ou
- b) des modèles empiriques issus de la littérature disponible. Ces modèles résultent de l'ajustement de données in situ et de combinaisons spécifiques de bandes spectrales Sentinel-2.

Dans la présente étude, nous nous référons aux meilleures pratiques disponibles dans la littérature scientifique. Les algorithmes utilisent des bandes de réflectance partiellement TOA (*Top of Atmosphere* – Haut de l'atmosphère) et partiellement BOA (*Bottom of Atmosphere* – Bas de l'atmosphère). Dans certains cas, l'imagerie du haut de l'atmosphère donne de meilleurs résultats que l'imagerie corrigée de l'atmosphère. Cela s'explique par le fait que, bien souvent, les procédures de corrections atmosphériques, qui donnent de bons résultats dans le cas d'eaux océaniques claires, surcorrigent les données dans les eaux côtières et intérieures, produisant des réflectances négatives dans la partie bleue du spectre (Tomington al., 2016) . Afin d'appliquer correctement les algorithmes, des mosaïques de bandes de réflectance ont été calculées séparément pour les produits TOA et BOA disponibles.

(Pizani et al., 2020) a suggéré la classification des paramètres de qualité de l'eau en deux groupes principaux : les paramètres optiquement actifs et les paramètres non optiquement actifs. (voir Tableau 6).

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 38
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



Tableau 6 Paramètres de qualité de l'eau classés en paramètres optiquement actifs et non actifs

paramètres optiquement actifs	paramètres non optiquement actifs
Turbidité	pH
Total des solides en suspension (TSS)	Oxygène dissous
Chlorophylle-A	
Couleur	

Les paramètres optiquement actifs peuvent être modélisés correctement en utilisant des algorithmes bien établis dans la littérature.

L'établissement d'équations de corrélation entre les données de télédétection et les paramètres optiquement non actifs est toujours un sujet de recherche actuel. Certaines recherches expliquent les corrélations obtenues pour les paramètres optiquement non actifs par des relations indirectes avec les paramètres optiquement actifs (Pizani et al., 2020) .

Pour cette étude, nous avons appliqué des algorithmes tels que suggérés dans la littérature la plus récente pour tous les paramètres optiquement non actifs du Tableau 6.

Les paramètres de qualité de l'eau estimés à partir de différentes cartes de base au cours de différentes années ne peuvent pas être comparés directement sur une base quantitative. Cette affirmation repose sur les principes suivants :

- Les algorithmes conçus ne fournissent que des informations qualitatives, mais pas quantitatives,
- La qualité de l'eau peut être facilement influencée par des facteurs temporaires tels que des précipitations locales, etc.,
- La plupart des algorithmes diffèrent pour les différents capteurs (Sentinel-2, Landsat-7). De nombreux algorithmes conçus pour les bandes Sentinel-2 ne peuvent pas être utilisés directement pour les bandes Landsat-7 et vice versa. L'adaptation des algorithmes nécessiterait une calibration par des données de terrain collectées pendant le temps d'acquisition de l'imagerie.



(Pizaniet al., 2020) et (Yadav, 2019) ont suggéré que le capteur Sentinel-2 MSI présenterait de nombreux avantages par rapport au capteur Landsat-7 ETM :

- a) le MSI possède plus de bandes, notamment dans le visible et le proche infrarouge (trois bandes à 700-800 μm).
- b) certaines des bandes MSI ont une résolution spectrale plus fine, comme les bandes verte, rouge et proche infrarouge.
- c) les résolutions spatiales du MSI sont de 10 m (4 bandes), 20 m (6 bandes) et 60 m (3 bandes) alors que toutes les bandes OLI (Operational Land Imager, un instrument de télédétection à bord de Landsat), ont une résolution spatiale unique de 30 m.

La plupart des cartes paramétriques sont dérivées pour la Basemap 2019, afin de représenter l'état réel de la qualité de l'eau dans la zone d'étude. Cependant, des paramètres typiques (tels que la turbidité) sont également estimés pour les Basemap 2002 et 2015 à des fins de comparaison qualitative.

Dans la section suivante, les paramètres de qualité de l'eau sont décrits et les algorithmes utilisés sont mis en évidence.

6.2.2.2 Turbidité

La turbidité, décrite comme l'opacité de l'eau (APHA, 2005) , est une mesure de la capacité de la lumière à traverser l'eau. Elle est causée par des matières en suspension telles que l'argile, le limon, les matières organiques, etc.. Il existe d'importants impacts environnementaux en lien avec la turbidité (Omer, 2019) , notamment :

- Les matières en suspension peuvent obstruer ou endommager les branchies des poissons, diminuant ainsi leur résistance aux maladies, réduisant leur taux de croissance, affectant la maturation des œufs et des larves, et affectant l'efficacité des méthodes de capture ;
- Les particules en suspension constituent un milieu d'adsorption pour les métaux lourds tels que mercure, chrome, plomb, cadmium et de nombreux polluants organiques dangereux tels que les polychlorobiphényles (PCB), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et de nombreux pesticides ;

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 40
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



- En raison de l'élévation de la température de l'eau (les particules en suspension absorbent davantage la chaleur du soleil), la concentration d'oxygène dissous diminue et, par conséquent, la croissance des organismes aquatiques est plus lente et la nourriture disponible moindre.

Il existe plusieurs algorithmes permettant d'estimer la turbidité des eaux de surface à l'aide de méthodes de télédétection. Dans cette étude, la turbidité des eaux de surface est calculée en utilisant l'algorithme bien établi de l'indice de turbidité par différence normalisée (NDTI) tel que décrit par l'Équation 1 ci-dessous :

$$NDTI = \frac{ROUGE - VERT}{ROUGE + VERT} \quad (Eq.1)$$

Cet algorithme standard a été appliqué pour les trois basemaps. L'indice NDTI est sans unité et a des valeurs comprises entre -1 et 1, où -1 indique la valeur de turbidité la plus faible et 1 la plus élevée.

L'indice NDTI à proximité de Bétaré Oya (zone connue pour ses importantes activités minières) est illustré pour chaque basemap à la Figure 17. Les images indiquent :

- En 2002 : faibles valeurs de turbidité et contraste des eaux de surface. Pas d'activité minière.
- En 2015 : valeurs de turbidité élevées des eaux de surface. Activités minières intensives.
- En 2019 : amélioration des valeurs de turbidité en direction du sud-ouest. Forte activités minières en amont du barrage de Lom - Pangar. Lors du passage à travers le barrage , le limon se dépose et la qualité de l'eau s'améliore.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 41
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						

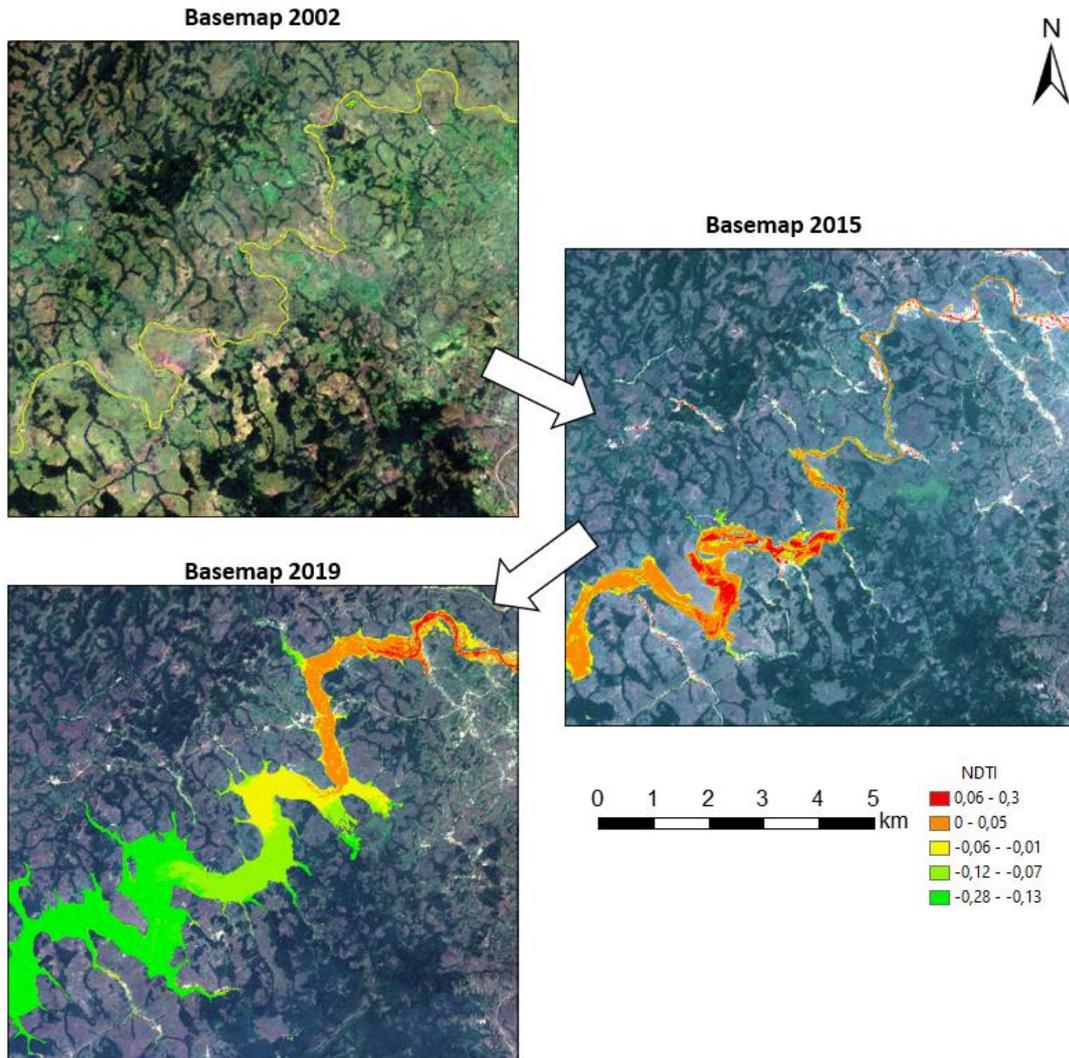


Figure 16 Indice de turbidité à proximité de Betare Oya pour chaque basemap. Les couleurs rouge-vert représentent des valeurs de turbidité forte à faible, respectivement.

Un autre exemple est présenté à la Figure 19 pour les rivières Doumé et Kadeï :

- En 2002, la qualité de l'eau est bonne, aucune opération minière ;
- En 2015, en raison des opérations minières en amont, la qualité de l'eau diminue dans la rivière de la Kadeï ;
- En 2019, le processus se poursuit, et la qualité de l'eau continue de diminuer ;
- La qualité de l'eau de la Doumé reste bonne dans toutes les tranches de temps.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 42
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						

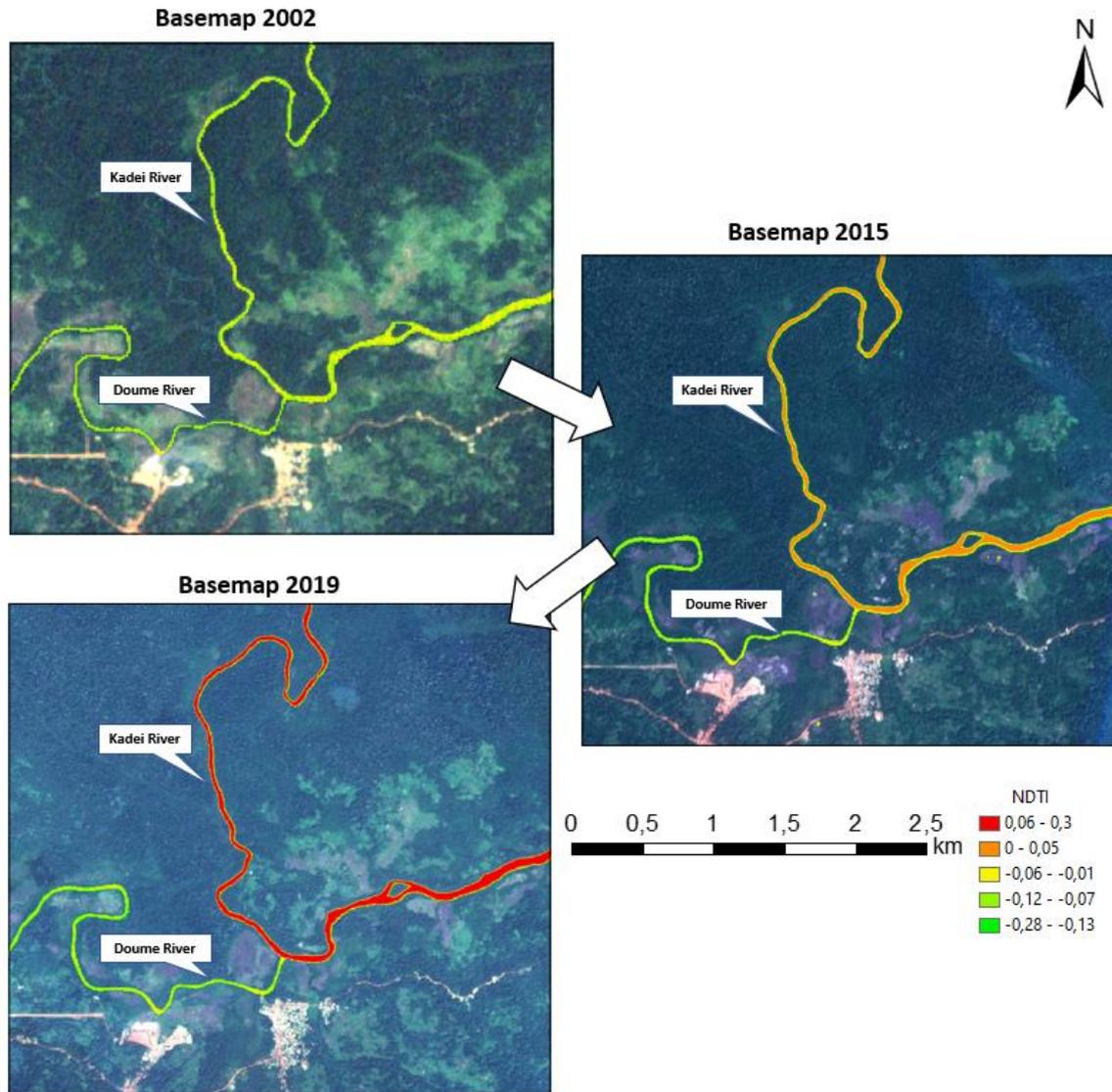


Figure 17 Indice de turbidité dans les rivières Doume et Kadeï pour les années 2002, 2015 et 2019.

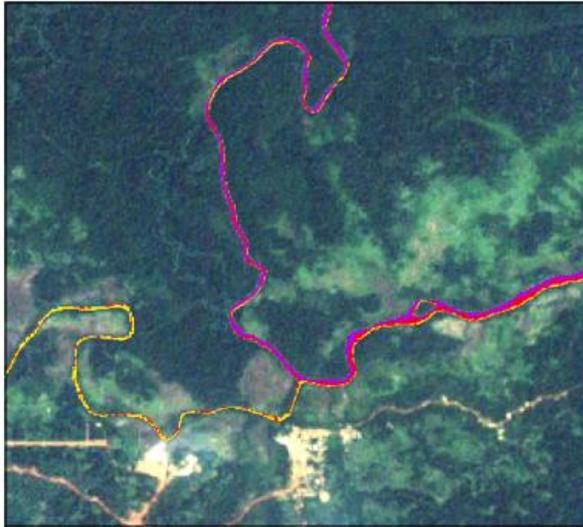
L'analyse de détection des changements de turbidité de l'eau présentée à la Figure 18 confirme ces conclusions. Cette évolution est en corrélation avec l'intensité des activités minières le long de la rivière Kadeï (voir Figure 17). La qualité de l'eau de la rivière Doume reste inchangée tout au long de la période d'étude.

Certains artefacts au niveau de la rivière Doume sont dus à la faible résolution spatiale des images Landsat.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 43
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



Water Turbidity Change 2002 – 2015



Water Turbidity Change 2002 – 2019

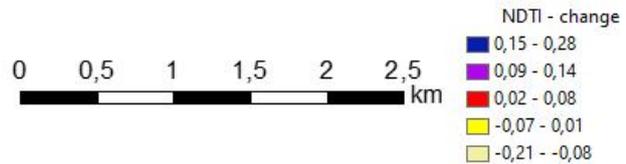
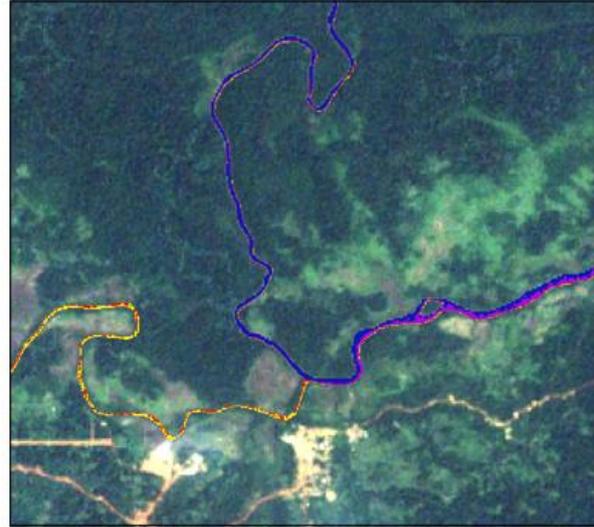


Figure 18 Analyse des changements de l'indice de turbidité. Les couleurs bleu-jaune représentent des valeurs de turbidité hautes à basses respectivement.

Les Figure 19 et Figure 20 montrent des sites miniers le long de la rivière du Lom. Ici, de nombreux bassins avec différentes qualités d'eau peuvent être observés dans un paysage syn- à post-minier. L'image RVB (Figure 19a) représente les eaux de surface avec différentes intensités de couleurs. L'indice de turbidité (Figure 19b) permet de séparer clairement l'eau douce de l'eau polluée et, ainsi, d'indiquer les zones d'exploitation minière actives et arrêtées.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 44
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						

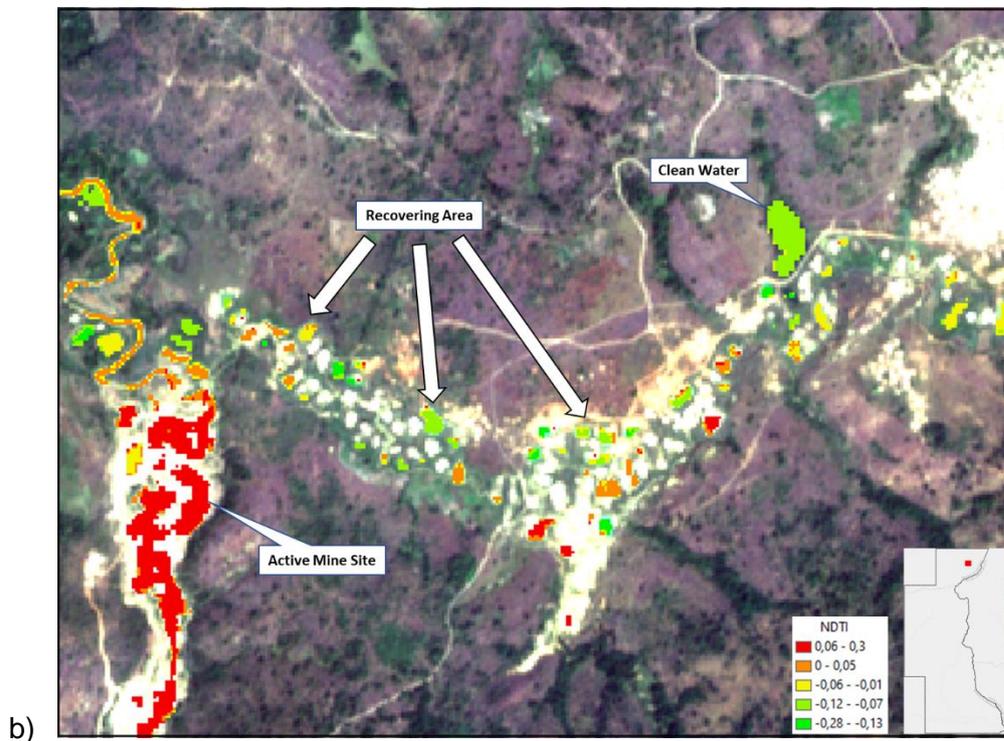
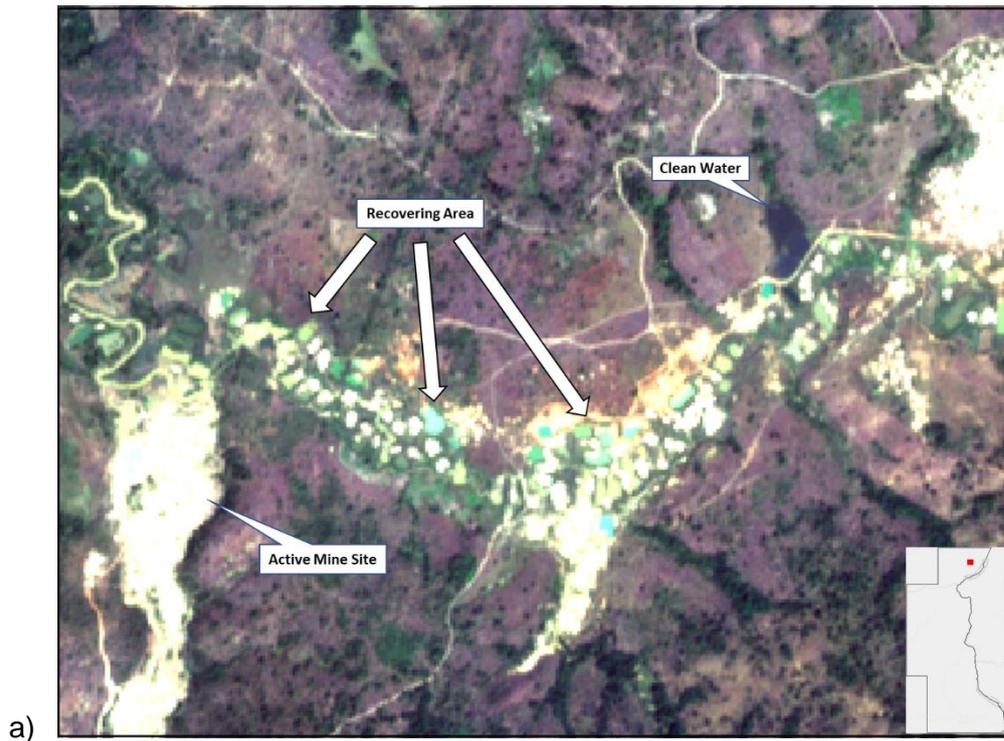


Figure 19 Indice de turbidité de la rivière Lom en 2019; a) Image RVB, b) Indice de turbidité des eaux de surface.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 45
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						

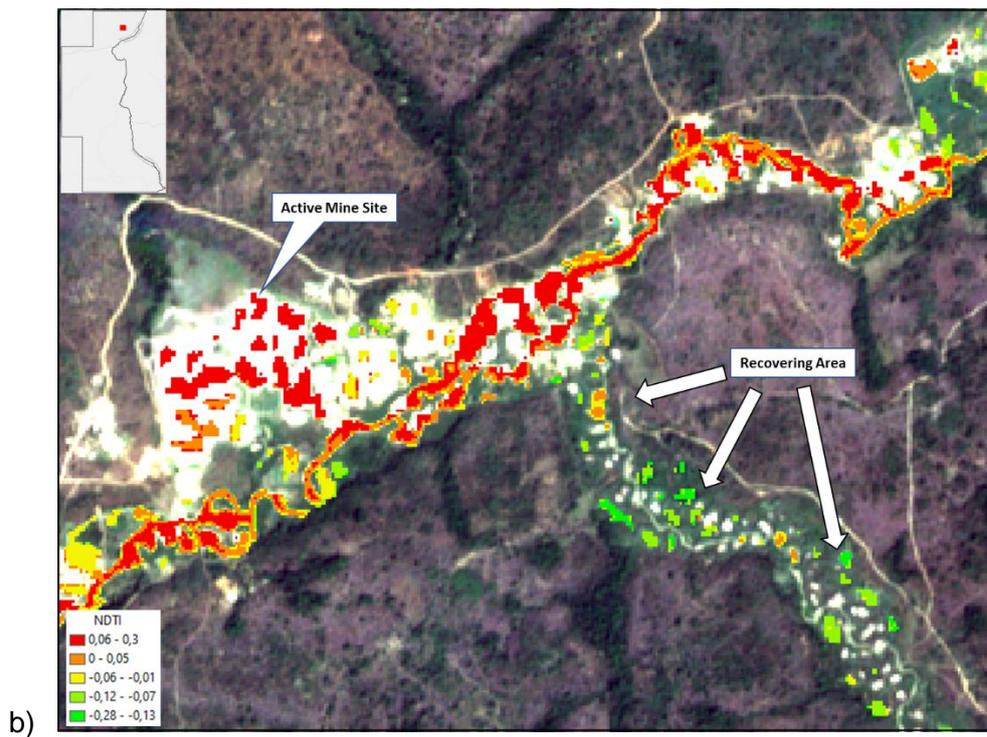


Figure 20 Indice de turbidité de la rivière du Lom en 2019; a) Image RVB, b) Indice de turbidité des eaux de surface.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 46
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



6.2.2.2.3 Total des Solides en Suspension (TSS)

Le paramètre TSS est lié à la turbidité, comme le montre la Figure 21. Les tailles respectives des particules se chevauchent partiellement : le TSS inclut les plus grosses particules mais aussi les solides décantables, tandis que la turbidité inclut les plus petites particules, les bactéries, mais également les grosses molécules organiques (par exemple les acides humiques et les colorants).

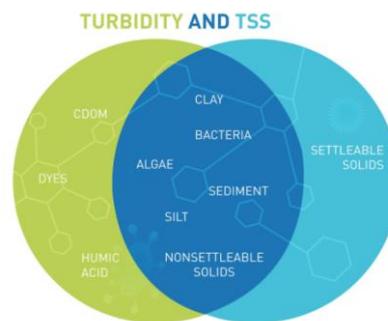


Figure 21 Relation entre la turbidité et le total des solides en suspension - TSS.

Par conséquent, l'aspect des masses d'eau est généralement similaire, sauf dans certains cas où l'on peut avoir par exemple des acides humiques sans aucun solide en suspension (e.g., eau trouble des marais).

L'imagerie Sentinel-2 (produit de niveau 2A) permet l'estimation qualitative des TSS dans les eaux de surface en utilisant l'algorithme proposé par (Loboet al., 2018) :

$$TSS = 2.272 + (ROUGE / 2.468) * 2.154. \quad (Eq.2)$$

Dans la zone d'étude, les paramètres TSS et turbidité sont similaires : ils indiquent les activités minières.

La Figure 22 montre trois exemples de TSS pour l'année 2019. Les faibles valeurs de TSS indiquent des zones d'eau propre en lien avec des paysages non modifiés. Les valeurs de TSS élevées indiquent des activités minières.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 47
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



Basemap 2019

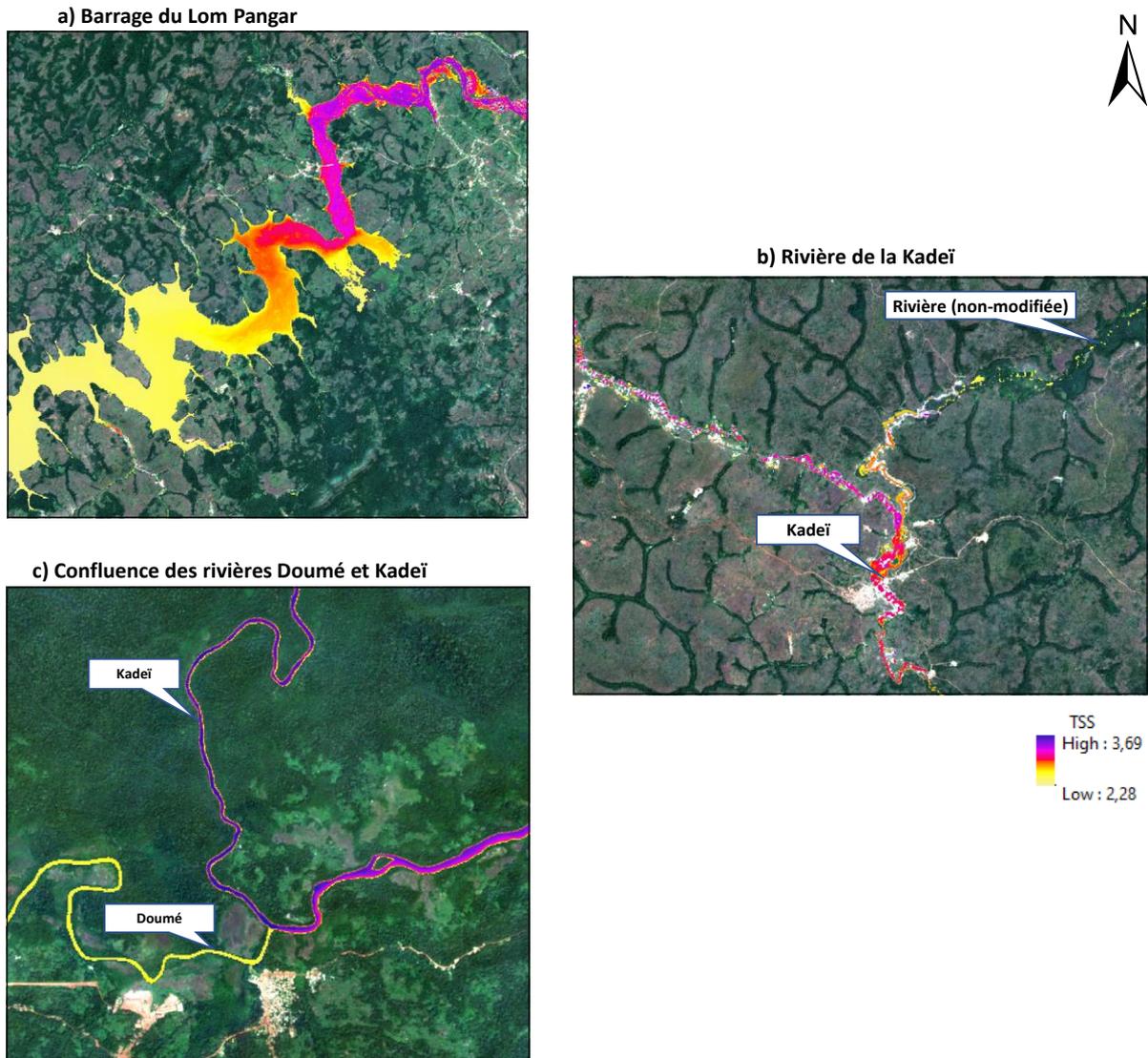


Figure 22 TSS dans trois zones différentes (2019).

6.2.2.2.4 Chlorophylle-A (Chl-A)

Le pigment photosynthétique Chl-A est un indicateur clé de la présence ou de l'absence de biomasse phytoplanctonique dans les masses d'eau. L'estimation du Chl-A est essentielle pour la surveillance de la qualité de l'eau (Tominget al., 2016). Certaines espèces de phytoplancton peuvent en effet causer de graves problèmes environnementaux et de santé publique (Omer, 2019).

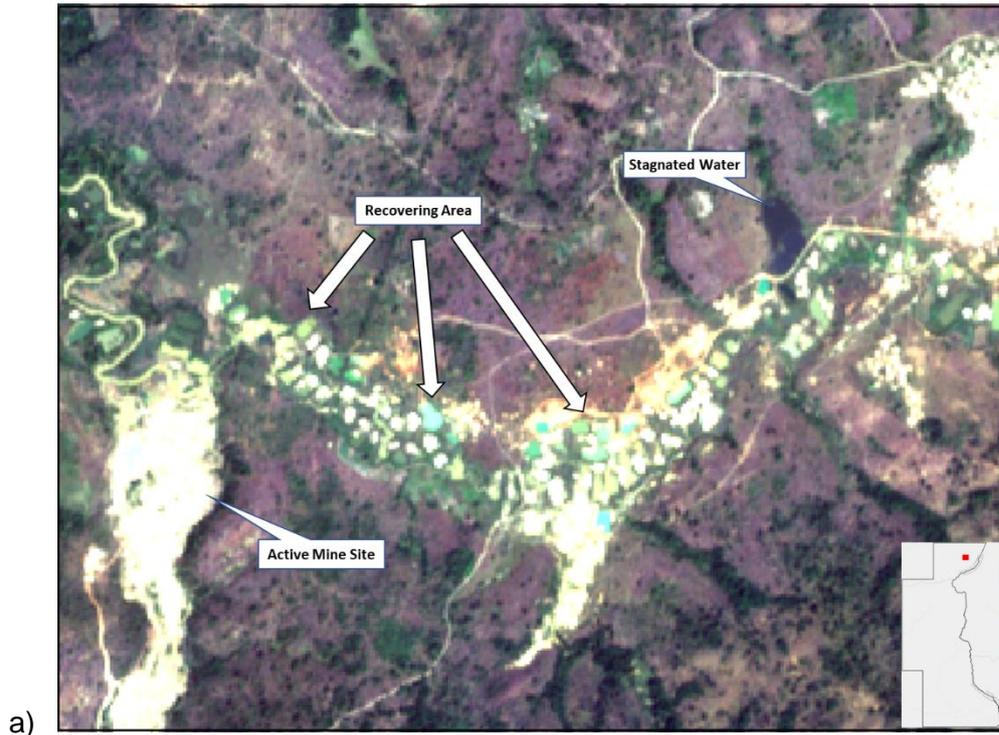
Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 48
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



Plusieurs études ont étudié la chlorophylle-A dans les masses d'eau de surface comme indicateur de la pollution de l'eau liée à l'exploitation minière (Aliet al., 2018) . Dans cette étude, l'algorithme proposé par (Tominget al., 2016) a été utilisé :

$$Chla = 169 * (b05 - (b04 + b06) / 2) + 19.5 \quad (\text{Eq.4})$$

La Figure 23 montre une carte de Chl-A pour 2019.



Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 49
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						

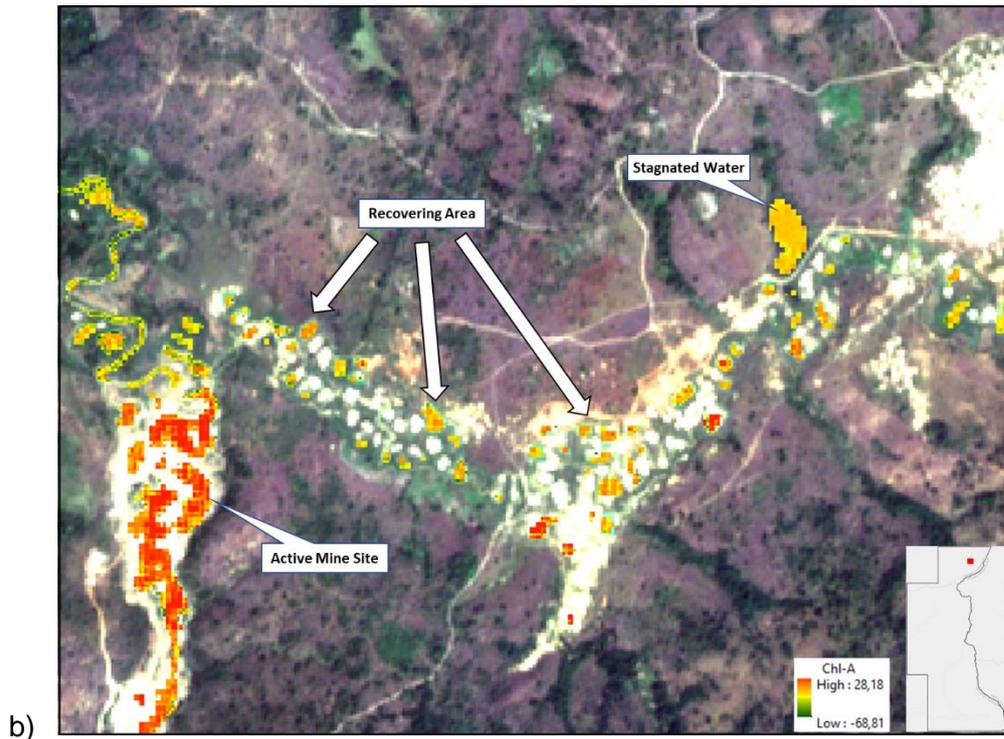


Figure 23 Indice de chlorophylle-A dans la rivière du Lom en 2019; a) Image RVB, b) Indice de chlorophylle-A des eaux de surface.

Les eaux courantes avec de faibles valeurs de Chl-A peuvent être clairement distinguées des eaux stagnantes dans les petits étangs d'eau avec des valeurs de Chl-A plus élevées.

Les sites d'exploitation minière actifs sont indiqués par des valeurs de Chl-A élevées. Cela peut être lié à des modèles spectraux similaires à ceux des TSS et/ou de la turbidité.

6.2.2.2.5 pH

Le pH est l'un des paramètres les plus importants de la qualité de l'eau. Il est sans dimension et indique l'acidité de l'eau. Le pH varie de 0 à 14, les valeurs < 7 indiquant un pH acide tandis que les valeurs > 7 indiquent un pH basique. Les valeurs de pH sûres pour l'eau potable se situent entre 6,5 et 8,5 (WHO, 2011) .

De nombreuses études différentes tentent d'établir des relations entre le pH et les données de télédétection multispectrales. Certaines études suggèrent qu'il n'y a pas de corrélation entre le pH et les modèles spectraux et que, par conséquent, les données de télédétection

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 50
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



ne sont pas adaptées à la cartographie du pH. (Yigit Avdanet al., 2019) . D'autres études suggèrent que l'estimation du pH avec des données de télédétection nécessite la bande thermique (Khattabet al., 2014) .

Une autre étude a analysé différents composants optiquement non actifs (comme le pH, l'oxygène-dissous, la conductivité, etc.) et suggère des corrélations entre les bandes spectrales du capteur MSI Sentinel-2 et le pH (Pizaniet al., 2020) . L'équation de corrélation correspondante est :

$$pH = 12.2621 + (-246.4698 * B1) + (29.4987 * B3) + (300.0727 * B6) + (-140.2648 * B8) \quad (Eq.7)$$

Cette équation a été appliquée pour les besoins de l'étude. Comme elle prend en compte la bande B1 (avec une résolution spatiale originale de 60 m), des artefacts sont attendus au niveau des petits plans d'eau, ainsi qu'au niveau des rives.

La Figure 25 montre trois exemples de cartes d'interprétation du pH des eaux de surface extraites de la Basemap 2019. Les résultats semblent être corrélés à un certain degré avec les paramètres TSS et turbidité, et sont généralement difficiles à comprendre et à interpréter. En raison de la petite taille des plans d'eau, la résolution optique de 60 m de la bande B1 utilisée conduit à un mélange des motifs spectraux sur les rives également.

En raison de ces incertitudes, nous n'utilisons pas les valeurs de pH cartographiées dans cette étude.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 51
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



Basemap 2019

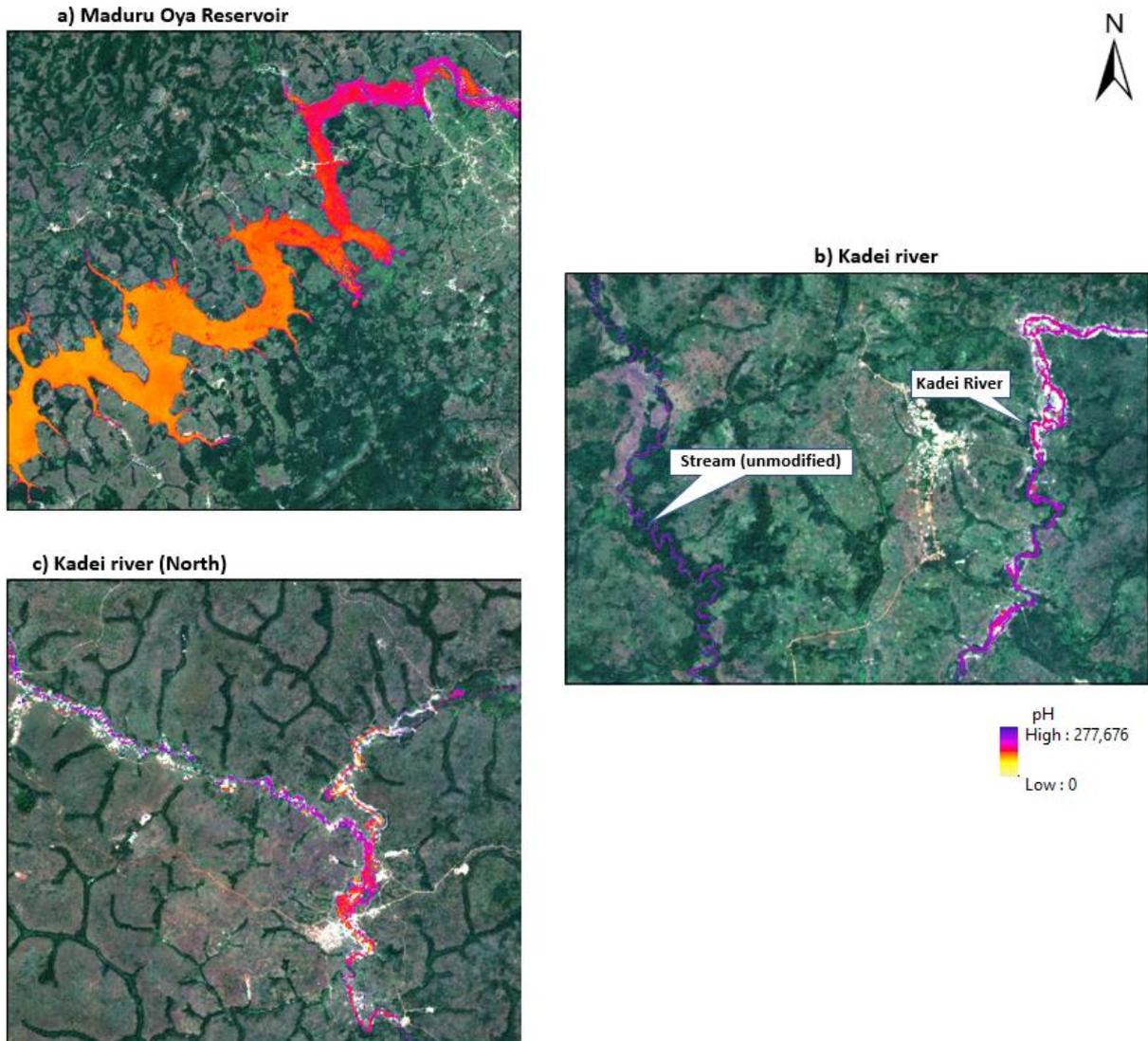


Figure 24 Interprétation du pH dans trois zones différentes pour la Basemap 2019.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 52
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



6.2.2.2.6 Oxygène Dissous (OD)

L'OD est considéré comme un paramètre clé de la qualité de l'eau : plus la concentration en oxygène dissous est élevée, meilleure est la qualité de l'eau. Comme les autres paramètres optiquement non actifs, il est difficile de le calculer en utilisant uniquement des données de télédétection sans aucune étude de terrain. Il existe quelques données dans la littérature pour le calcul de l'OD.

Dans cette étude, nous utilisons l'algorithme développé par (Pizaniet al., 2020) :

$$9.2505 + (-171.0251 * B2) + (236.9708 * B4) + (76.8288 * B6) + (-150.7815 * B11) \quad (\text{Eq.6})$$

La Figure 25 montre trois exemples de cartes d'OD dans les eaux de surface extraites à partir de la Basemap 2019. On trouve généralement des teneurs élevées en OD dans les eaux vives : rivières, ruisseaux, etc. Les lacs, les réservoirs et les eaux stagnantes se caractérisent principalement par une teneur en oxygène dissous plus faible. La teneur élevée en OD dans les étangs de certains sites miniers actifs pourrait indiquer des activités d'éclusement.

Mais l'interprétation de ce paramètre reste floue sans données d'apprentissage sur le terrain.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 53
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						

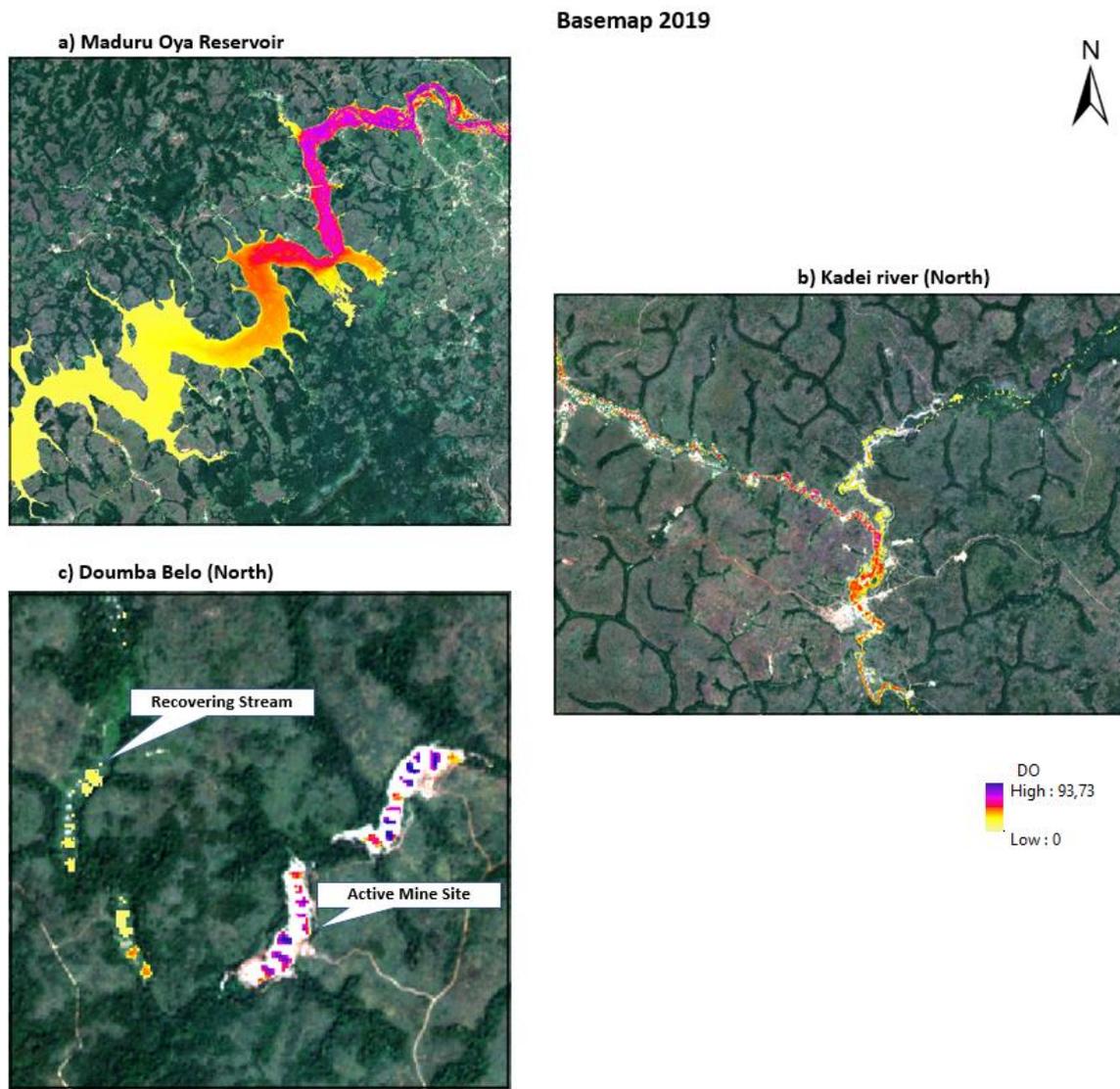


Figure 25 Aperçu schématique de l'OD dans trois zones différentes pour la Basemap 2019.

6.2.3 Occupation et classification des terres

Les cartes de l'occupation des terres fournissent une source d'information unique sur la couverture terrestre / l'utilisation des terres actuelle et sont importantes pour en déduire des informations sur le développement historique des différents types de couverture des terres. Les cartes de l'occupation des terres sont analysées séparément pour chaque basemap pour 2002, 2015 et 2017.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 54
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



Dans cette étude, huit classes de couverture/utilisation des terres ont été analysées (voir Tableau 7).

La classification de l'occupation des terres est réalisée à l'aide de l'algorithme des forêts aléatoires (*Random Forests*), une approche de classification supervisée. Le classificateur *Random Forest* s'est avéré garantir une grande précision de classification et de très bonnes performances par rapport à d'autres algorithmes (e.g., arbres décisionnels, etc.) (*Random forests for land cover classification, 2003*) . En outre, la méthode est efficace sur le plan informatique sur de grands jeux de données et présente les avantages d'une précision de classification élevée sans sur-ajustement et avec la possibilité de mesurer la variation des poids attribués (Jinet al., 2018) .

Tableau 7 Classes d'occupation et d'utilisation des terres utilisées pour la cartographie

Occupation des terres	<ul style="list-style-type: none"> - Eau (rivières, réservoirs, lacs...) - Zones dénudées / Habitations ou bâtiments isolés / Roches affleurantes - Forêts - Végétation Basse / Agriculture - Savanne - Zones Brûlées
Utilisation des terres	<ul style="list-style-type: none"> - Zone Urbaine - Zone Minière

Dans cette étude, l'algorithme de classification pour la cartographie de l'occupation des terres a été appliqué. Cet algorithme a été implémenté en JavaScript dans la plateforme de calcul cloud du moteur Google Earth.

Cependant, les classes d'utilisation du sol (zones urbaines et minières) sont classifiées à l'aide d'une interprétation visuelle, car elles ont des signatures de réflectance spectrale très similaires et ne peuvent donc pas être détectées automatiquement.

6.2.3.1 Cartographie de l'occupation des terres basée sur les Basemaps Sentinel-2

La cartographie de l'occupation des terres pour 2015 et 2019 est basée sur les basemaps Sentinel-2 sans nuage (voir section 6.2.1). Les images multispectrales Sentinel-2

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 55
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



comprennent 10 canaux bruts (bandes 10 m et 20 m). De plus, des indices spectraux ont été dérivés des bandes de réflectance brutes pour augmenter la probabilité de séparation des classes et améliorer le résultat de la classification. Ils sont résumés dans le Tableau 8.

Ces indices ont été téléchargés à partir du site *Indexdatabase* (<https://www.indexdatabase.de/>) et adaptés pour être utilisés avec les bandes spectrales de Sentinel-2.

Tableau 8 Indices spectraux, description et formule.

Indice	Description	Formule
NDVI	Indice de végétation par différence normalisée - IVDN (Normalized Difference Vegetation Index)	$(b8-b4) / (b8+b4)$
MNDWI	Indice modifié de l'eau par différence normalisée (Modified Normalized Difference Water Index)	$(b3-b11) / (b3+b11)$
CCCI	Indice de concentration en chlorophylle dans le couvert (Canopy Chlorophyll Content Index)	$(b8a-b5) / (b8a+b5)$
RVI	Indice de rapport de végétation (Ratio Vegetation Index)	$b8 / b4$
GNDVI	Indice de la végétation verte par différence normalisée (Green Normalized Difference Vegetation Index)	$(b8-b3) / (b8+b3)$
BI	Indice du sol dénudé (Bare Soil Index)	$(b8 + b3 + b4) / (b8 + b3 - b4)$

L'algorithme de forêt aléatoire pour les basemap Sentinel-2 a été conçu à l'aide de :

- 6 classes d'occupation des terres : Eau, Zone Dénudée / Habitations ou bâtiments isolés / Roches affleurantes, Forêt, Végétation Basse / Agriculture, Savane, Zone Brûlée (Tableau 7),
- 16 paramètres de contrôle : 10 canaux bruts (bandes 10 m et 20 m (Tableau 3) et 6 indices spectraux (Tableau 8),
- 10 arbres de classification.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 56
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



6.2.3.2 Cartographie de la couverture végétale basée sur les basemaps Landsat-7

La cartographie de la couverture terrestre / occupation des terres est basée sur les basemaps Landsat-7 sans nuage créées comme décrit à la section 6.2.1. Les images multispectrales de Landsat-7 comprennent 6 canaux bruts (les canaux thermiques TIR (Thermal Infra-red) L/H sont exclus). De plus, les indices spectraux décrits au Tableau 8, à l'exception du CCCI, ont été adaptés pour être utilisés avec les bandes spectrales de Landsat-7 en fonction des canaux disponibles et de leur applicabilité. En raison du manque de bandes spectrales dans la gamme VRE (Vegetation Red Edge – correspondant aux bandes B05, B06 et B07 du Sentinel-2), le CCCI n'est pas applicable.

L'algorithme de forêt aléatoire (Random Forest) pour le basemap Landsat-7 été conçu en utilisant :

- 6 classes de couverture terrestre / occupation des terres: Eau, Zone dénudée / Établissements ou bâtiments isolés / Roches exposées, Forêt, Végétation basse / Agriculture, Savane, Zone brûlée (Tableau 7),
- 11 paramètres de contrôle : 6 bandes brutes (Tableau 3) et 5 indices spectraux (Tableau 8),
- 10 arbres de classification (classification trees).

6.2.3.3 Collecte des données d'apprentissage

Pour chaque Basemap, des objets d'apprentissage représentatifs pour chaque classe d'occupation des terres ont été collectés et enrichis de manière itérative. Les statistiques du Tableau 9 indiquent le nombre et la surface des objets d'apprentissage collectés pour chaque classe d'occupation des terres et chaque basemap.

Le nombre d'objets d'apprentissage pour les classes d'occupation des terres "Forêt" et "Végétation basse / Agriculture" est significativement plus élevé que pour les autres classes. La séparation de ces classes est particulièrement difficile, lorsqu'elle est basée uniquement sur les caractéristiques spectrales et qu'aucun modèle de surface / terrain n'est disponible.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 57
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



Tableau 9 Nombre et surface des objets d'apprentissage représentatifs de chaque classe d'occupation des terres

	Basemap 2002		Basemap 2015		Basemap 2019	
	Nombre	Surface (ha)	Nombre	Surface (ha)	Nombre	Surface (ha)
Eau	15	26,76	19	102,4	9	490,97
Surface dénudée / habitations ou bâtiments isolés / roches exposées	9	63,81	7	66,24	9	104,00
Forêt	176	1435,45	109	2378,14	103	1234,5
Végétation basse / agriculture	109	449,63	50	146,91	111	297,45
Savanne	99	1896,62	73	970,37	65	595,09
Surfaces brûlées	10	111,8	21	105,41	18	76,3

Les classifications basées uniquement sur les données de réflectance spectrale sont affectées par les variations phénologiques de la végétation. Par conséquent, la classification reflète surtout l'état réel de l'occupation des terres pendant la période d'acquisition de l'imagerie satellitaire. Par exemple, dans certains intervalles de temps, il peut arriver que la savane soit couverte d'une végétation basse naturelle. Cela peut induire en erreur l'algorithme pendant la décision pour la classe correcte d'occupation des terres. Afin de minimiser l'effet des variations phénologiques :

- Plusieurs objets d'apprentissage ont été collectés pour les classes de l'occupation des terres concernées : "Savane", "Forêt" et "Végétation basse / Agriculture". Ceci se reflète dans le nombre et la surface des objets d'apprentissage correspondants, qui sont significativement plus élevés que ceux collectés pour les autres classes ;



- L'imagerie satellite sélectionnée est acquise pendant des saisons et des périodes de végétation similaires.

6.2.3.4 Résultat de la classification et importance des variables

La précision de classification est améliorée de manière itérative en enrichissant le jeu de données d'apprentissage après validation de chaque classification. Les cartes de classification ont été affinées et régularisées à l'aide de l'outil "*Classification Map Regularization*" d'Orfeo Toolbox. L'outil permet de supprimer les pixels isolés et de structurer les caractéristiques dans un rayon donné (dans ce cas, un rayon de 5 pixels a été appliqué, ce qui correspond à des caractéristiques d'une superficie de 500 m²).

Afin de valider les résultats finaux, des matrices de confusion sont réalisées. Les matrices de confusion permettent de mesurer la qualité de classification des systèmes d'apprentissages automatiques supervisés.

Ainsi dans la présente étude, les résultats sont validés grâce à une matrice de confusion de la carte de classification par rapport à un jeu de données de vérification de terrain (*ground truthing dataset*). Ce jeu de données a été initialement compilé à des fins d'apprentissage et est validé avec des basemaps *Planet* à haute résolution (voir section 6.1.2).

La matrice de confusion est organisée comme suit : lignes = classes de référence (*reference tables*), colonnes = classes modélisées (*modelled tables*). Les chiffres font référence au nombre de pixels classés (1 pixel = 100 m²). Les matrices de confusion résultantes pour les basemaps sont illustrées au Tableau 10, Tableau 11 et Tableau 12. La diagonale indique le nombre de pixels classés positifs (vrais). Globalement, le pourcentage de pixels classés positifs/vrais montre une très bonne précision de classification et une bonne séparabilité des classes. Nous constatons dans les trois classifications la similarité entre les classes "Forêt" et "Végétation basse / Agriculture". Les tableaux reflètent comment les variations phénologiques locales influencent la différenciation entre les classes "Basse végétation / Agriculture" et "Savane".

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 59
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



Tableau 10 Matrice de confusion pour la cartographie de l'occupation des terres pour la Basemap 2002.

	Eau	Surfaces dénudées / zones habitées	Forêt	Basse végétation, agriculture	Savane	Surface brûlée	Total	% des pixels vrais positifs
Eau	2651	0	0	0	0	0	2651	100,00
Surfaces dénudées / zones habitées	0	6386	0	0	0	0	6386	100,00
Forêt	0	0	142568	38	941	0	143547	99,32
Basse végétation, agriculture	0	0	37	44839	79	0	44955	99,74
Savane	0	0	0	0	189692	0	189692	100,00
Surface brûlée	0	0	0	0	0	11178	11178	100,00

Tableau 11 Matrice de confusion pour la cartographie de l'occupation des terres pour la Basemap 2015.

	Eau	Surfaces dénudées / zones habitées	Forêt	Basse végétation, agriculture	Savane	Surface brûlée	Total	% des pixels vrais positifs
Eau	10179	0	55	0	0	0	10234	99,46
Surfaces dénudées / zones habitées	0	6626	0	0	0	0	6626	100,00
Forêt	0	0	237856	1	32	0	237889	99,99
Basse végétation, agriculture	0	0	256	14090	328	0	14674	96,02
Savane	0	0	0	144	96884	0	97028	99,85
Surface brûlée	0	0	0	0	193	10354	10547	98,17



Tableau 12 Matrice de confusion pour la cartographie de l'occupation des terres pour la Basemap 2019.

	Eau	Surfaces dénudées / zones habitées	Forêt	Basse végétation, agriculture	Savane	Surface brûlée	Total	% des pixels vrais positifs
Eau	49094	0	3	0	0	0	49097	99,99
Surfaces dénudées / zones habitées	0	10403	0	0	0	0	10403	100,00
Forêt	0	0	123374	0	37	0	123411	99,97
Basse végétation, agriculture	0	0	5198	23551	974	0	29723	79,23
Savane	0	0	0	40	59419	84	59543	99,79
Surface brûlée	0	0	0	0	5	7632	7637	99,93

L'approche de classification *Random Forest* a la capacité de mesurer les poids variables des paramètres de contrôle. Les graphiques correspondants pour les basemaps sont illustrés dans les Figure 26, Figure 27 et Figure 28. Ces graphiques décrivent des tendances de poids similaires des paramètres de contrôle, ce qui confirme la stabilité de l'algorithme d'apprentissage. Par exemple, le canal de la bande bleue, suivi des canaux SWIR, présente des pondérations manifestement plus élevées par rapport aux autres canaux bruts. Parmi les indices, le MNDWI montre le poids le plus élevé, tandis que NDVI semble avoir la contribution la plus faible pour la séparabilité des classes.

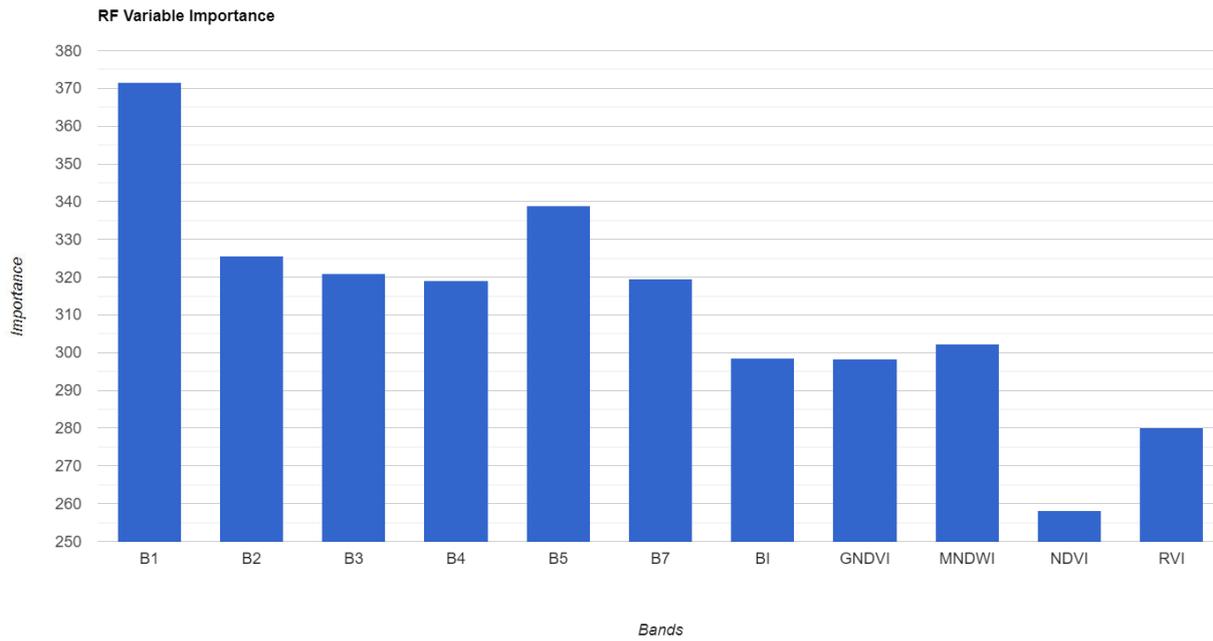


Figure 26 Pondération des variables pour la classification de l'occupation des terres pour la Basemap 2002, en utilisant l'imagerie Landsat-7

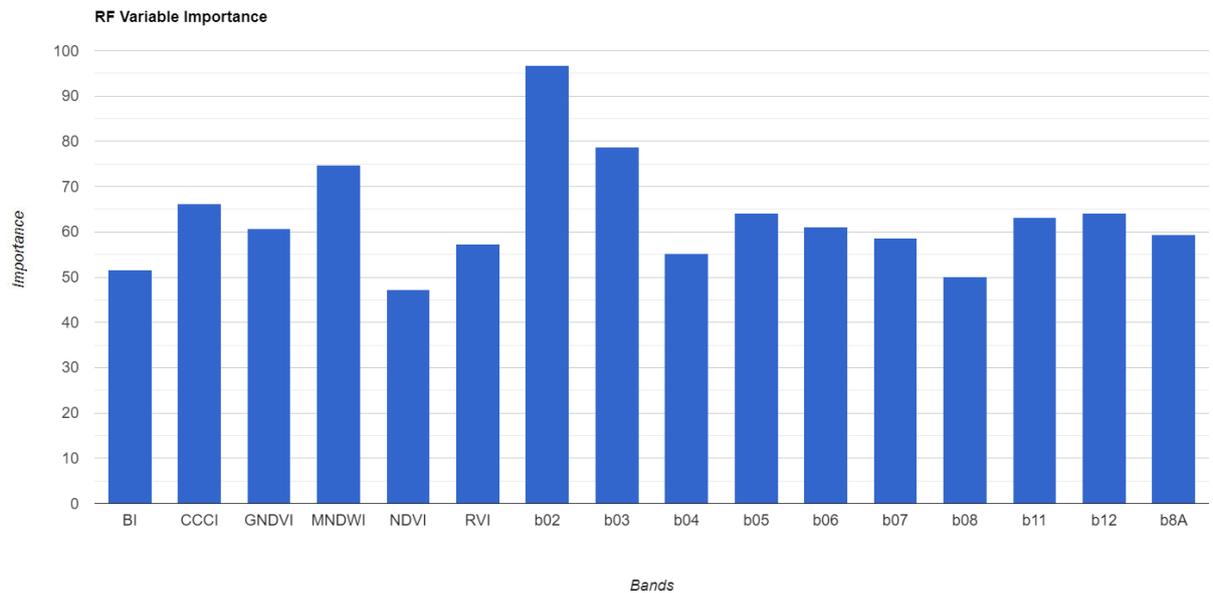


Figure 27 Pondération des variables pour la classification de l'occupation des terres pour la Basemap 2015, en utilisant l'imagerie Sentinel-2

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 62
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						

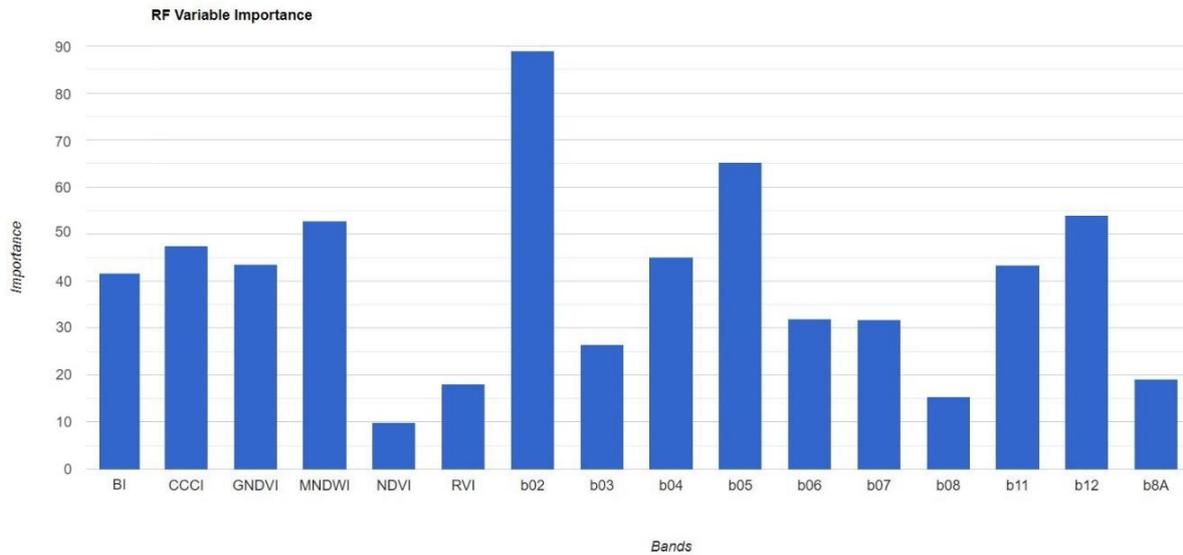


Figure 28 Pondération des variables pour la classification de l'occupation des terres pour la Basemap 2019, en utilisant l'imagerie Sentinel-2

Les informations sur les zones urbaines ont été ajoutées à la carte d'occupation des terres par interprétation visuelle de l'imagerie satellite.

Les informations sur les sites miniers ont été ajoutées manuellement à la carte d'occupation des terres, après validation complète de la carte des sites miniers selon la section 6.

La carte finale de l'occupation des terres pour chaque Basemap est illustrée à la Figure 29.

La distribution des classes d'occupation des terres pour chaque basemap est illustrée au Tableau 13.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 63
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						

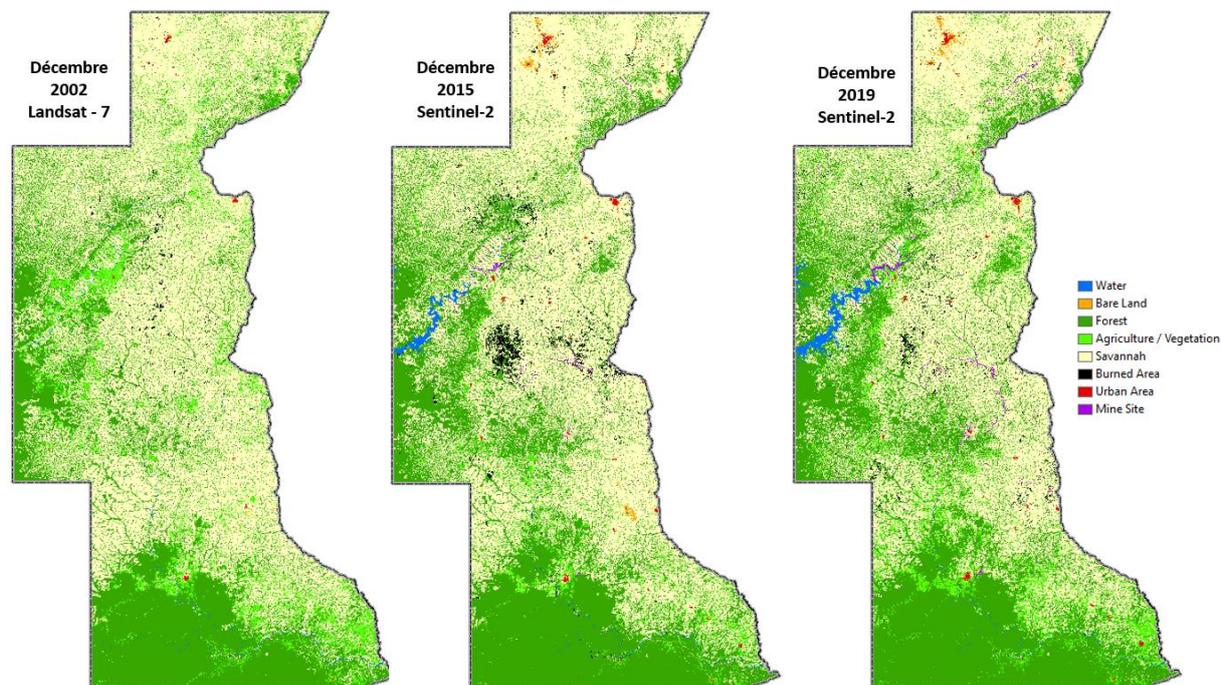


Figure 29 Couverture terrestre pour chaque Basemap. Une symbologie unique a été appliquée.

Tableau 13 Distribution des classes de l'occupation des terres pour chaque Basemap. Les surfaces sont en hectares.

	Basemap 2002	Basemap 2015	Basemap 2019
Eau	6869,79	15071,77	24371,25
Surfaces dénudées	3059,24	7942,98	8055,29
Forêt	933290,63	1058212	1093822,92
Végétation basse	250878,55	119363,51	229263,39
Savane	1546401,15	1498325,37	1350394,75
Surfaces brûlées	8358,17	39301,98	23507,29
Zones urbaines	3563,88	6707,62	8423,51
Sites miniers	0	7496,18	14583,01
Total	2752421,41	2752421,41	2752421,41



La Figure 30 montre les tendances d'évolution des classes d'occupation des terres des années 2015 et 2019 par rapport à 2002 (période de référence). Le graphique révèle une diminution importante des zones de végétation basse entre 2002 et 2015, qui est quelque peu compensée par l'augmentation de la couverture forestière de 2002 à 2015. La principale raison de cette tendance au développement est la diminution de la végétation basse (buissons, forêt peu profonde) entre 2002 et 2015. La diminution de la couverture de la "savane" de 2002 à 2015 est principalement due à l'augmentation de la classe "zone brûlée".

En 2019, l'évolution la plus radicale peut être observée pour les classes de "végétation basse" et de "savane". Cette évolution est principalement liée aux conditions phénologiques pendant la période d'acquisition des images et à la faible croissance de la végétation dans la savane.

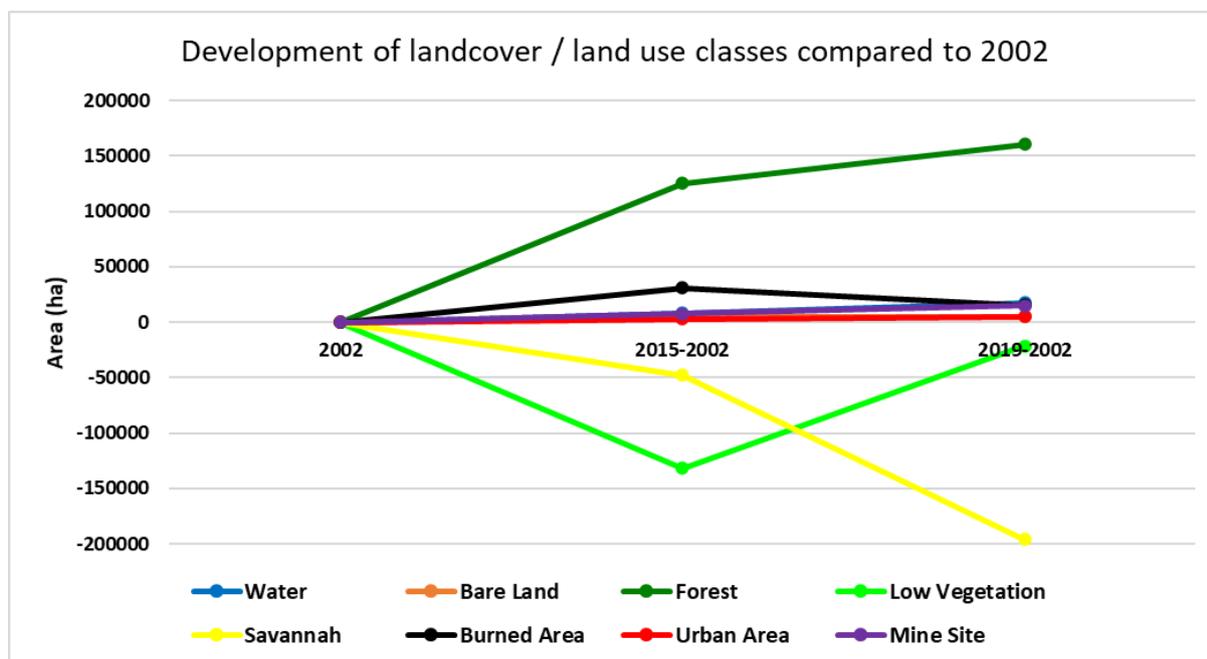


Figure 30 Représentation graphique des tendances évolutives des classes d'occupation/d'utilisation des terres par rapport à l'époque de référence (2002).



Pour mieux illustrer la transformation de la couverture terrestre due aux activités minières entre 2002 et 2019, une section proche des villes de Bétaré Oya et Colomines est présentée à plus grande échelle (voir Figure 31 et Figure 32). Le développement rapide des zones minières a entraîné des transformations radicales dans l'occupation des terres. Une grande partie de la forêt et de la végétation basse a disparu, laissant place à des terres dénudées. Les zones urbaines se sont également étendues. De nouvelles forêts ont poussé dans des paysages non modifiés.

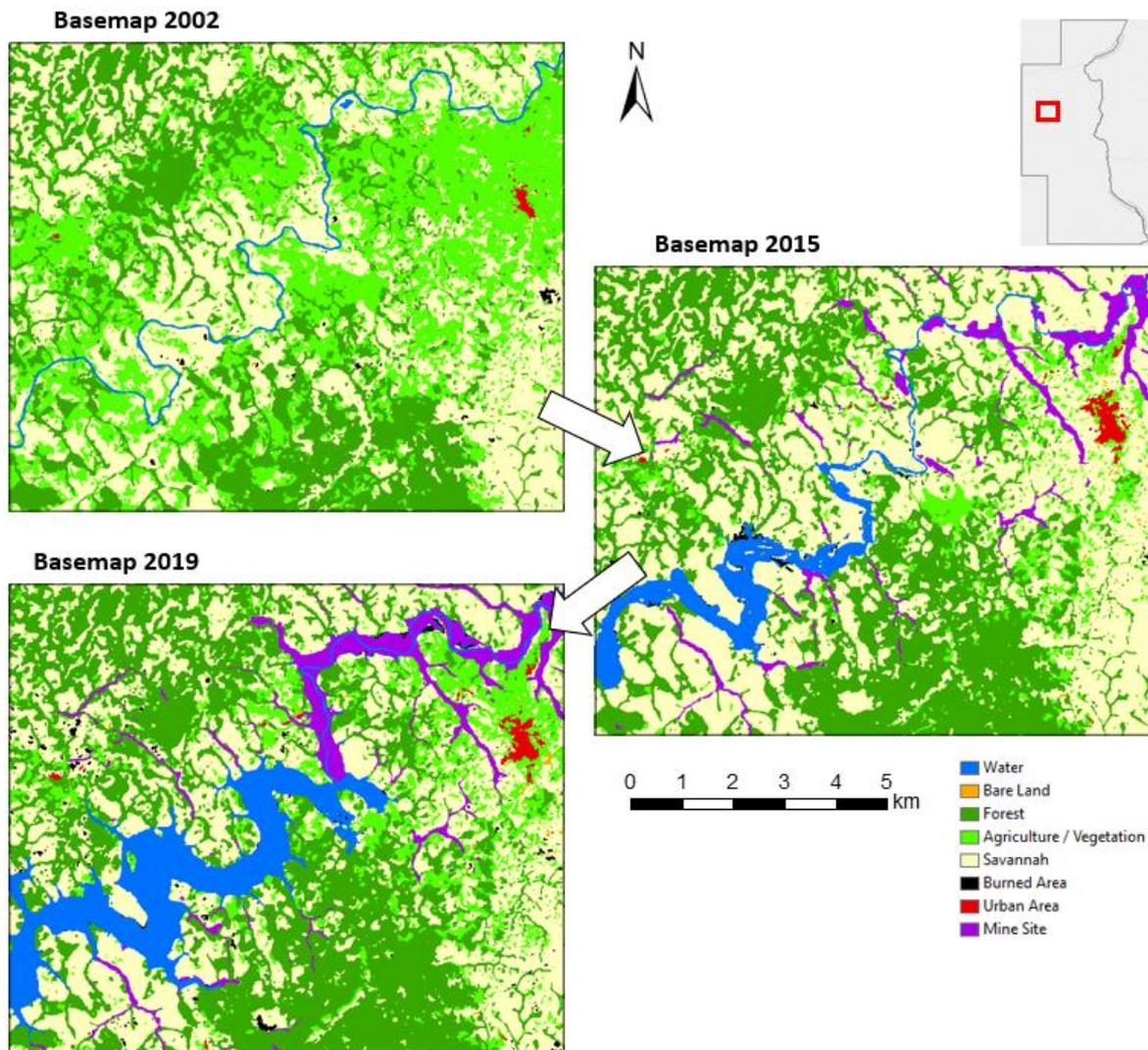


Figure 31 Occupation/utilisation des terres pour une section sélectionnée près de Bétaré Oya pour chaque basemap. Une symbologie unique a été appliquée.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 66
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						

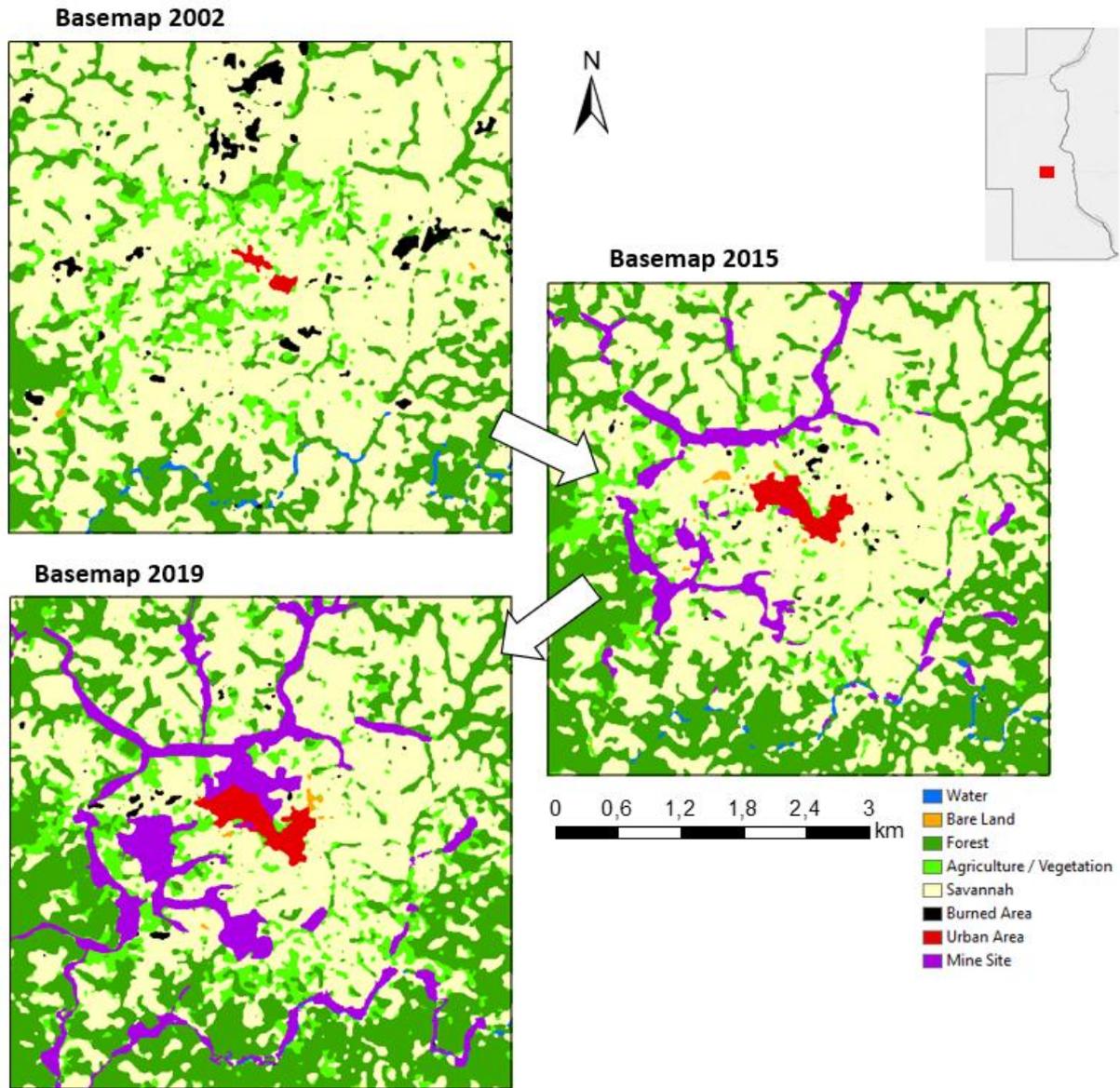


Figure 32 Occupation/utilisation des terres pour chaque basemap pour une section sélectionnée près de Colomines. Une symbologie unique a été appliquée.

La Figure 33 montre la transformation de la végétation basse en nouvelles zones forestières. Ce phénomène décrit un autre changement important dans l'occupation des terres entre 2002 et 2015, passant d'une végétation basse à des zones forestières.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 67
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						

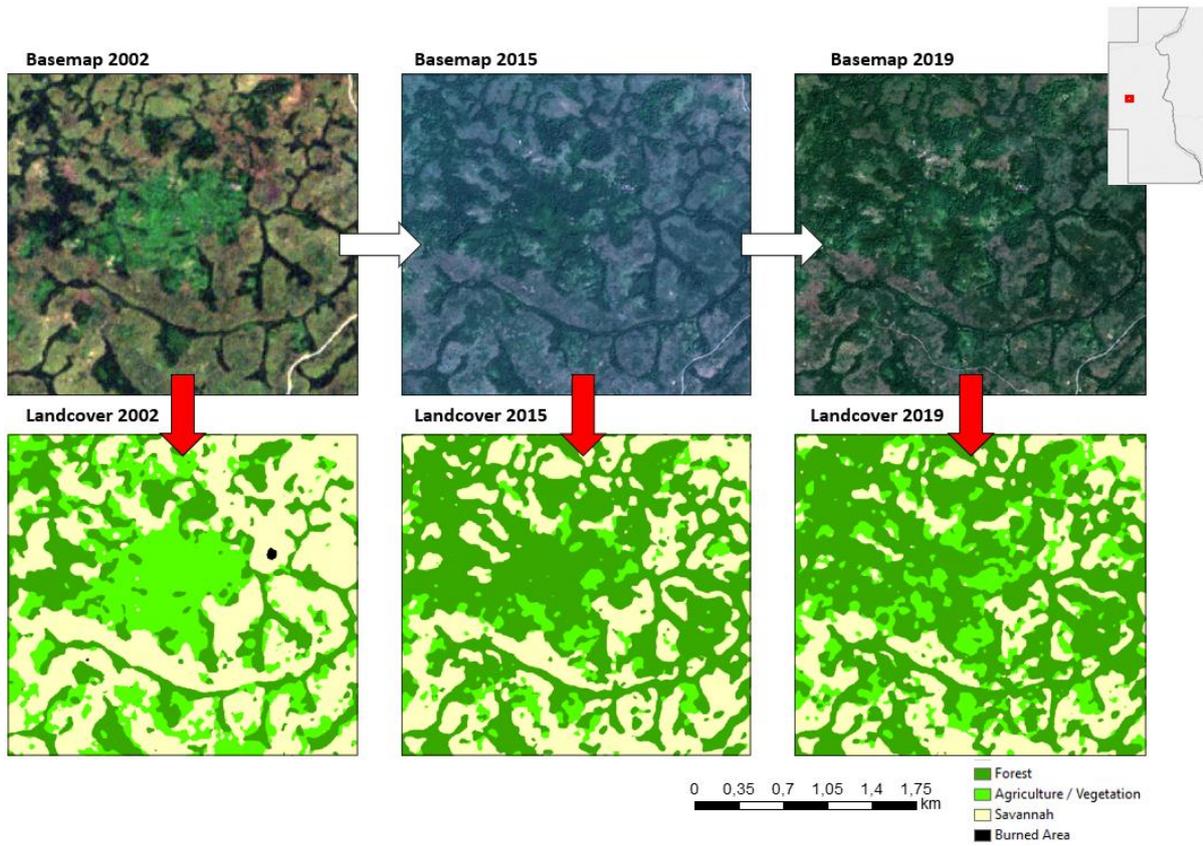


Figure 33 Exemple de croissance forestière passant de la végétation basse à la forêt.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 68
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



Un exemple de variations phénologiques de la végétation, et de l'effet qui en découle sur les classes "Savane" et "Végétation" est donné à la Figure 34. Ce phénomène décrit les changements de la végétation et de la savane entre 2015 et 2019.

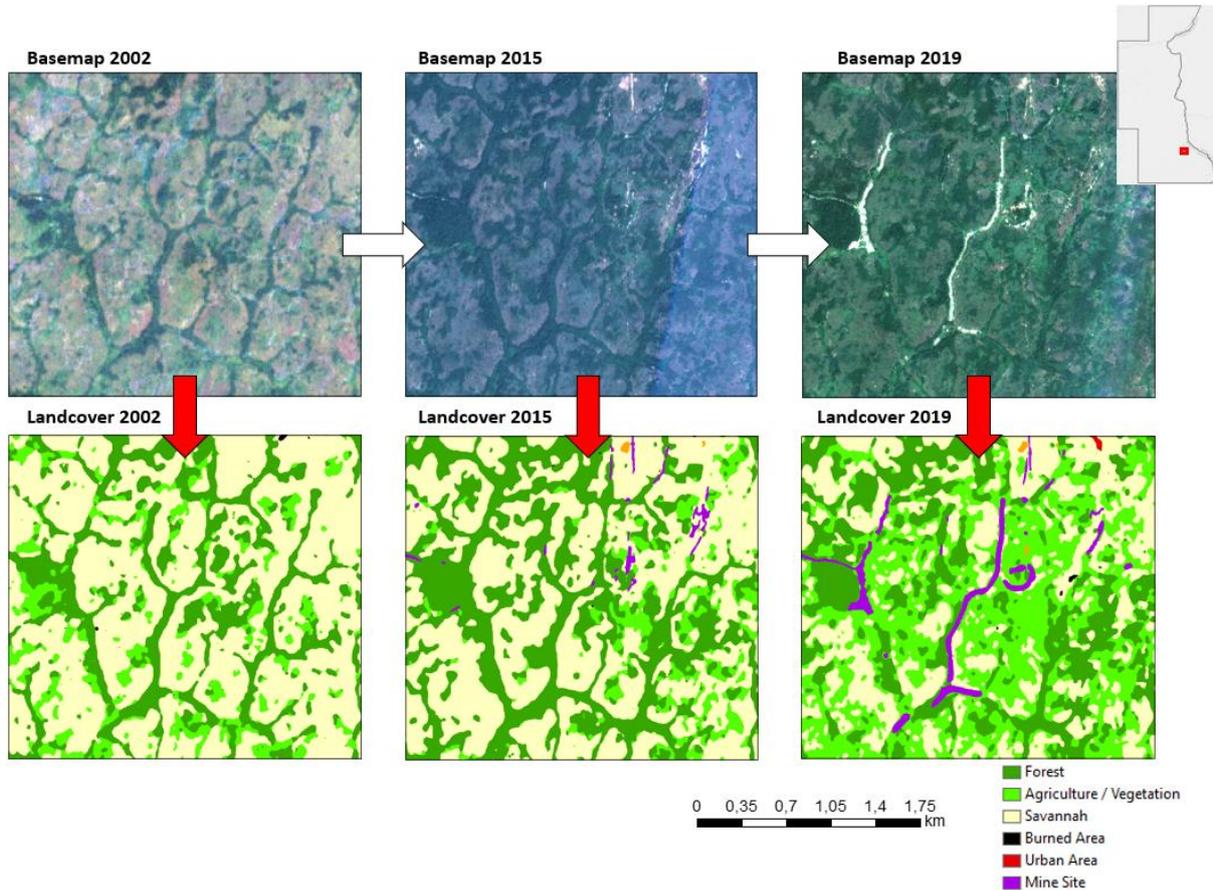


Figure 34 Exemple de variations phénologiques et de changements dans l'occupation des terres, de la savane à la basse végétation.

Ces cartes sont les données d'entrée primaires pour des analyses spatiales ultérieures du développement et de la modification des terres, ainsi que pour l'analyse de la déforestation.

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 69
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	16/04/2021	16/04/2021	
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						



7 Bibliographie

1. Ali A., Sloane D. R., Strezov V. (2018) Assessment of Impacts of Coal Mining in the Region of Sydney, Australia on the Aquatic Environment Using Macroinvertebrates and Chlorophyll as Indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, no. 7, S.1556.
2. APHA (2005) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington DC, 21st ed. Washington DC: *American Public Health Association*,
3. Du Y. et al. (2016) Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. *Remote Sensing*, vol. 8, no. 4, S.354.
4. Funoh, K. N. (2014) The impacts of artisanal gold mining on local livelihoods and the environment in the forested areas of Cameroon. working paper n° 150, *Center for International Forestry Research (CIFOR)*,
5. Jin Y. et al. (2018) Land-cover mapping using Random Forest classification and incorporating NDVI time-series and texture: a case study of central Shandong, . *International Journal of Remote Sensing*, S.8703-8723.
6. Khattab M. F. O., Merkel B. J. (2014) Application of Landsat 5 and Landsat 7 images data for water quality mapping in Mosul Dam Lake, Northern Iraq. *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 7, S.3557–3573.
7. Lobo F. d. L. et al. (2018) Monitoring Water Siltation Caused by Small-Scale Gold Mining in Amazonian Rivers Using Multi-Satellite Images. *Limnology - Some New Aspects of Inland Water Ecology*. 5- 11
8. Omer Nayla Hassan (2021) Site Web “Water Quality Parameters.” Water Quality - Science, Assessments and Policy. Consulté le 05/04/2021 www.intechopen.com/online-first/water-quality-parameters, 10.5772/intechopen.89657.
9. Pizani F.M. C. et al. Estimation of Water Quality in a Reservoir from SENTINEL-2 MSI and LANDSAT-8 Oli Sensors. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume V-3-2020. 08 2020, S.401-408.
10. Random forests for land cover classification. PaIM.Toulouse, France, Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477), 2003. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. S.3510-3512, vol.6.
11. TomingKaireet al.First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery. *Remote Sensing*, vol. 8, no. 8. 01 08 2016, S.640.
12. Using the Random Forest Classification for Land Cover Interpretation of Landsat Images in the Prykarpattia Region of Ukraine. HavryliukSerhiet al.Lviv, Ukraine, s.n. , 2018. 2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT).
13. WHO WorldHealth Organization Guidelines for drinking-water quality. 4th ed.Geneva , World Health Organization, 2011.

Etat	Brouillon	Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 70
	Autorisé	x	1.0	01/03/2021	01/04/2021	01/04/2021

Fichier: 2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc



14. YadavS., Yamashiki, Y., Susaki, J., Yamashita, Y., Ishikawa, K. Chlorophyll estimation of lake water and coastal water using Landsat-8 and Sentinel-2A Satellite. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(3/W7). 2019.
15. Yigit Avdan Z. et al. Monitoring the Water Quality of Small Water Bodies Using High-Resolution Remote Sensing Data. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2019, 8. 2019, S.553 Global Forest Watch (2021) Base de données de *Global Forest Watch* pour le Cameroun. Site web consulté le 04/01/2021 : <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/CMR>
16. Koppert, G., Loke, M. M., Bilong, M., Fouda, G., Ndongo, G (2005) Etude environnementale du Barrage de Lom Pangar - theme 23 : socio-economie. Rapport après consultation lors de la restitution des Etudes de l'Impact sur l'Environnement.
17. MINFOF (2021) Atlas forestier du Cameroun – Portail de Données Publiques. Site web consulté le 04/01/2021 : <http://cmr-data.forest-atlas.org/>
18. MINMIDT (2021) Site Web du MINMIDT, consulté le 05/01/2021. <https://www.minmidt.cm/precasem-2/>
19. Observations des images satellites (Sentinel 2, Esri, Google Earth, Bing maps)
20. Suh, C.E., Lehmann, B., Mafany, G.T (2006) Geology and geochemical aspects of lode gold mineralization at Dimako- Mboscorro, SE Cameroon. *Exploration, Environment, Analysis*, v.6; p295-309.
21. Ekengoue, C. M. (2018) Influence De L'exploitation Artisanale Du Sable Sur La Santé Et La Sécurité Des Artisans Et L'environnement: Cas De La Carrière De Nkol'Ossananga, Région Du Centre Cameroun; in: *European Scientific Journal* 14(15), Mai 2018 ; DOI: 10.19044/esj.2018.v14n15p246
22. Boaka à Koul, M.L., Yongue-Fouateu, R., Ndjigui, P.-D., (2010). The alluvial sapphire profiles of Mayo Kewol placer in the Adamawa (North-Cameroon): Granulometric and mineralogical features. *Journal of African Earth Sciences* 56 (Feb. 2010), 121-126. DOI: [10.1016/j.jafrearsci.2009.05.010](https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.05.010)
23. TdR de la mission

Etat	Brouillon		Version	Date de création	Dernier changement	Imprimé le	Page 71
	Autorisé	x					
Fichier:	2020_0014_Rapp_Avancement_1_v_1.0.doc						