

**ETUDE DES POSSIBILITES D'UTILISATION DES
MODELES NUMERIQUES DE SURFACE EN VUE DE
LA GESTION DURABLE DES RESSOURCES
FORESTIERES**

APPLICATION DANS UNE CONCESSION FORESTIERE AU GABON

DAPHNE HANDEREK

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORETS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNEE ACADEMIQUE 2009-2010

(CO)-PROMOTEUR(S) : P. LEJEUNE & J. PHILIPPART

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et du doyen de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur

**ETUDE DES POSSIBILITES D'UTILISATION DES
MODELES NUMERIQUES DE SURFACE EN VUE DE
LA GESTION DURABLE DES RESSOURCES
FORESTIERES**

APPLICATION DANS UNE CONCESSION FORESTIERE AU GABON.

DAPHNE HANDEREK

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORETS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2009-2010

(CO)-PROMOTEUR(S) : P. LEJEUNE ET J. PHILIPPART

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes promoteurs : Philippe Lejeune, pour le précieux temps qu'il a consacré à répondre à mes questions, pour ses conseils avisés ainsi que pour ses relectures d'une rapidité surprenante ; Julien Philippart, pour ses recommandations vis-à-vis de l'Afrique, pour ses relectures et pour son aide.

J'adresse un tout grand merci à Stéphanie Bonnet et Thibault Gheysen pour leur aide, le temps qu'ils m'ont octroyé, leur patience et surtout pour leur incroyable disponibilité.

Je n'oublie pas Monsieur Jean-Louis Doucet, qui malgré le nombre d'étudiants dont il a la charge, a trouvé le temps de relire ce travail. J'ajouterai également que ce professeur passionné et passionnant (et ce sans sarcasme) m'a conforté dans l'idée de choisir un TFE en Afrique Centrale.

Merci, également à tous les professeurs de foresterie qui m'ont transmis leurs connaissances durant ces trois années.

Enfin, j'adresse ma gratitude à tous les membres de l'Unité de Gestion des Ressources Forestières et des Milieux Naturels qui de près ou de loin m'ont apporté leur aide durant ce travail. Je pense plus particulièrement à Marie Fombona, Cédric Geerts et Alain Monseur qui m'ont « acceptée » dans leur bureau et pour la chaleureuse ambiance de travail qu'ils savent si bien créer.

Je remercie l'ASBL Nature + grâce à laquelle ce voyage à été possible. Merci tout particulièrement à Michèle Federspiel pour l'aide incontestable qu'elle m'a apporté dans l'organisation de mon voyage. Je remercie également Jean-Yves Devleeshouwer pour le visa.

Pour l'encadrement statistique, je remercie Yves Brostaux pour ses conseils avisés et pour ses qualités de pédagogue et Andrea Aufiero pour le suivi.

En outre, l'Agence Universitaire de la Francophonie m'a octroyé une bourse qui m'a permis de partir.

Du côté gabonais, je remercie la Compagnie Equatoriale des Bois du groupe Precious Woods pour m'avoir accueillie, logée, encadrée et conseillée ainsi que pour m'avoir permis de réaliser mon rêve de venir en Afrique. J'adresse toute ma gratitude à Xavier Jaffret pour toutes les facilités logistiques accordées.

Ce travail n'aurait certainement pas vu le jour sans l'existence d'une convention de collaboration entre Nature +, CEB et Millet. Je remercie donc ce groupe de menuiserie engagé dans la gestion durable.

Un tout grand merci à Philippe Jeanmart et Jean-Marie Pasquier pour tout ce qu'ils m'ont permis de découvrir et pour le partage de leurs expériences. Je remercie également Bernard, Gérard, Nicolas, Patrick, Khammal, Gérôme, Jan, Olivier et Jean-François. Je garde d'excellents souvenirs de cette première expérience en Afrique grâce à vous.

Je remercie également Jean-Félicien Makolany dit « Mayos » qui m'a accompagné sur le terrain durant un mois et demi. Merci pour le partage de ses connaissances botaniques, pour ses histoires et aussi pour ne pas m'avoir perdue en brousse. Merci également à Etienne Zombangia.

Enfin, je remercie avec une pensée particulière...

- ∞ Mes amis gembloutois sans qui ces années d'études n'auraient pas été les mêmes. Plus particulièrement à Mathilde ma « minipouf », Laura, Thierry, Edouard, Henri (Tulutulu), Porco et Sam pour les bons moments passés ensemble et pour ceux qui restent à venir.
- ∞ Mes anciens cokotteurs, les bourgeois et la bande de l'AG et plus spécialement à Franco, Gillet, Daise, Popotte, Benja, Gummy et Tom Tom.
- ∞ Morgane, François et Jessica mes amis de toujours.
- ∞ Toute la famille Burton pour leur intérêt et leur bienveillance.
- ∞ Mes parents qui m'ont permis de faire ces études et qui malgré tout m'ont soutenue durant ma formation.
- ∞ Ma sœur Sara, qui m'a permis d'arriver là où je suis.
- ∞ Christophe pour sa confiance, son soutien, sa patience (surtout), ses relectures et puis pour tout le reste.

D'ici ou de là-bas, merci encore à tout ceux qui de près ou de loin m'ont permis de mener à bien ce travail.

Résumé

La planification du tracé du réseau routier est une étape importante en exploitation forestière tropicale mais de nombreuses contraintes y sont associées en vue d'une gestion durable des ressources forestières. La FAO a notamment édité un code d'Exploitation à Faible Impact (EFI) reprenant un ensemble de normes dont l'une des principales est la limitation des pentes maximales des routes principales (12 %) et secondaires (30 %). Cependant, à l'heure actuelle, la mise en place des routes est un travail long et fastidieux résultant de la combinaison d'une reconnaissance de terrain et d'un tracé manuel sur des cartes topographiques souvent imprécises et présentant de nombreuses erreurs. Comme alternative à la réalisation de cette opération, nous avons testé les possibilités d'utilisation des Modèles Numériques de Surface (MNS) tels qu'ASTER et SRTM. Malgré leur résolution relativement grossière (respectivement 30 et 90 m). Ces MNS offrent des informations sur le relief pour la quasi-totalité des terres émergées. Nous avons montré qu'une approche de calcul de pente directionnel permettait une relativement bonne approximation de ces dernières. De plus, les différentes analyses réalisées montrent que SRTM surpasse ASTER à tous les niveaux. L'optimisation du réseau routier à l'aide de MNS est donc une opération potentiellement intéressante.

Mots clés : MNS, ASTER, SRTM, pente, planification routière, Exploitation à Faible Impact, exploitation forestière.

Abstract

Road network planning is an important operation in tropical forest logging activities and numerous constraints are associated to it in the purpose of sustainability. The main constraint is the limitation of maximum slope for roads network. This maximum slope is 12 % for main roads and 30 % for secondary roads according to the FAO Reduced Impact Logging (RIL) code. For the moment roads planning is a long and fastidious work resulting from the combination of field recognition and manual plan based on topographic maps. Instead of carrying out this operation, we have tested the potentialities of using Digital Surfaces Models (DSM) like ASTER and SRTM. Despite their relatively rough resolution (respectively 30 m and 90 m) they offer information about elevation for the main part of emerged land area. We found that a slope directional calculation allowed a relatively good approximation of them. More, various analyses that we have realised showed that SRTM is better than ASTER. Optimization of roads network with DSM help is a potentially interesting operation.

Keywords: DSM, ASTER, SRTM, slope, Road planning, Reduced Impact Logging, logging.

Table des matières

1. INTRODUCTION.....	1
2. CONTEXTE DE L'ETUDE	2
2.1. LE GABON.....	2
2.1.1. <i>Présentation générale.....</i>	2
2.1.2. <i>Caractéristiques physiques.....</i>	3
2.1.3. <i>Caractéristiques générales de la forêt.....</i>	5
2.1.4. <i>Le secteur forestier.....</i>	8
2.1.5. <i>Le réseau routier</i>	11
2.2. LA COMPAGNIE EQUATORIALE DES BOIS : UNE SOCIETE ENGAGEE DANS LA GESTION DURABLE	13
2.2.1. <i>Bref historique et présentation générale</i>	13
2.2.2. <i>Le plan d'aménagement</i>	14
2.2.3. <i>Les règles d'exploitation</i>	15
2.3. LA PROBLEMATIQUE DU RELIEF EN EXPLOITATION FORESTIERE.....	17
2.3.1. <i>Caractérisation du relief au départ des cartes topographiques.....</i>	17
2.3.2. <i>Caractérisation du relief au départ de MNS (ASTER, SRTM)</i>	17
3. OBJECTIFS DE L'ETUDE	26
4. METHODOLOGIE	27
4.1. AVANT-PROPOS.....	27
4.2. LOGICIELS UTILISES	27
4.3. METHODOLOGIE GENERALE	27
4.3.1. <i>Acquisition et prétraitement des MNS.....</i>	28
4.3.2. <i>Acquisition des données de terrain.....</i>	28
4.3.3. <i>Phase d'analyses</i>	28
4.4. DESCRIPTION DES ZONES D'ETUDES	29
4.4.1. <i>Méthode de détermination des zones d'études</i>	29
4.4.2. <i>Milolé</i>	29
4.4.3. <i>Okondja.....</i>	29
4.5. PREPARATION DES CARTES DERIVEES DES MNS	31
4.5.1. <i>Cartes des classes de pentes dérivées des MNS SRTM et ASTER GDEM.....</i>	31
4.5.2. <i>Choix des points d'origine.....</i>	31
4.5.3. <i>Prétraitements des MNS.....</i>	32
4.6. ACQUISITION DES DONNEES DE TERRAIN.....	33
4.6.1. <i>Repérage des points d'origine.....</i>	33
4.6.2. <i>Réalisation des transects.....</i>	33
4.6.3. <i>Mesures des pentes et correction de la longueur</i>	33
4.6.4. <i>Fiche de terrain et données récoltées.....</i>	34
4.6.5. <i>Encodage.....</i>	36
4.6.6. <i>Calculs préliminaires</i>	36

4.7.	ANALYSE DE LA QUALITE DES CARTES DE PENTES	39
4.7.1.	<i>Echantillonnage des points pour l'analyse</i>	39
4.7.2.	<i>Analyse visuelle</i>	40
4.7.3.	<i>Analyses statistiques</i>	40
5.	RESULTATS ET DISCUSSIONS	43
5.1.	RESULTATS PRELIMINAIRES	43
5.2.	DESCRIPTION DE LA BASE DE DONNEES ET DES CODES	43
5.3.	ANALYSES VISUELLES	43
5.3.1.	<i>Graphiques des altitudes</i>	43
5.3.2.	<i>Graphiques des pentes</i>	44
5.4.	ANALYSE DE LA QUALITE DES MNS ASTER	48
5.5.	ANALYSES STATISTIQUES.....	49
5.5.1.	<i>Test t d'égalité de deux moyennes</i>	49
5.5.2.	<i>La Root Mean Square Error (RMSE)</i>	52
5.5.3.	<i>Matrice de confusion</i>	53
6.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	55
7.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	57

Liste des figures

Figure 1: Carte administrative du Gabon [Nations Online Project, 2009].	2
Figure 2: Carte phytogéographique du Gabon. D'après Caballe [1978].	6
Figure 3: Limites de la CFAD de la CEB.	13
Figure 4: Schéma d'un modèle numérique de terrain (en bleu) et d'un modèle numérique de surface	18
Figure 5: Configuration de la mission SRTM [NASA, ?].	19
Figure 6: Diagramme simplifié du fonctionnement du capteur ASTER [Hirano <i>et al.</i> , 2003].	24
Figure 7: Ordinoigramme de la méthodologie générale.	28
Figure 8: Localisation des zones d'étude au sein de la concession forestière de la CEB.	30
Figure 9: Schéma du cheminement parcouru lors de la réalisation des transects.	33
Figure 10: Schéma des données nécessaires au calcul de la distance horizontale.	34
Figure 11: Fiche de terrain.	35
Figure 12: Carte de distribution des points d'origine selon les classes de pente déduites des MNS ASTER. Zone de Milolé.	37
Figure 13: Carte de distribution des points d'origine selon les classes de pentes déduites des MNS ASTER. Zone d'Okondja.	38
Figure 14: Schéma d'un pixel central (e) et de ses 8 voisins.	39
Figure 15: Schéma des pixels pris en compte dans le calcul de la pente "directionnelle".	40
Figure 16: Schéma explicatif d'une matrice de confusion.	42
Figure 17: Illustration de la présence d'artefacts dans les MNS ASTER.	45
Figure 18: Illustration de l'effet de pixellisation des MNS SRTM (courbe bleue) et du lissage obtenu par le rééchantillonnage en SRTM 30 m (courbe jaune).	46
Figure 19: Illustration du lissage du relief par SRTM, SRTM30 et ASTER.	46
Figure 20: Illustration des différences de valeurs de pente entre les données de terrain et les MNS. Utilisation de l'outil « slope ».	47
Figure 21: Illustration des différences de valeurs de pente entre les données de terrain et les MNS. Méthode d'interpolation « directionnelle ».	47

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques générales d'une coupe transversale dans une route [FAO, 2003].....	11
Tableau 2: Formations végétales mises en évidence au sein de la CFAD suite à l'inventaire d'aménagement [Demarquez & Jeanmart, 2004].....	14
Tableau 3: Caractéristiques des capteurs de la bande C et de la bande X de la mission SRTM	20
Tableau 4: Caractéristiques des capteurs du SRTM [USGS, 2006].	20
Tableau 5: Précisions des données SRTM [Rabus <i>et al.</i> , 2003; Kellndorfer <i>et al.</i> , 2004; Miliareisis & Paraschou, 2005; Hancock <i>et al.</i> , 2006].....	21
Tableau 6: Caractéristiques des sous-systèmes du capteur ASTER [Yamaguchi <i>et al.</i> , 2001].	23
Tableau 7: Données de références utilisées pour remplacer les anomalies [LINES, 2009].	25
Tableau 8: Pourcentage des relevés par catégorie de qualité des MNS ASTER.	48
Tableau 9: Estimation de la précision pour les pentes en fonction des catégories de qualité des MNS ASTER. .	48
Tableau 10: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les altitudes de terrain et SRTM.....	49
Tableau 11: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les altitudes de terrain et ASTER.	49
Tableau 12: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les altitudes de terrain et SRTM 30 m.....	49
Tableau 13: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les pentes de terrain et SRTM.	50
Tableau 14: Résultats du test d'égalité de deux moyennes pour les pentes de terrain et ASTER.	50
Tableau 15: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les pentes de terrain et SRTM30.	50
Tableau 16: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les pentes de terrain et ASTERcorr.	50
Tableau 17: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les pentes de terrain et les pentes directionnelles du MNS SRTM.	51
Tableau 18: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les pentes de terrain et les pentes directionnelles du MNS ASTER.....	51
Tableau 19: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les pentes de terrain et les pentes directionnelles du MNS SRTM30.	51
Tableau 20: Valeurs des RMSE pour les différents MNS. Données pour les altitudes.....	52
Tableau 21: Valeurs des RMSE pour les différents MNS. Données pour les pentes.	52
Tableau 22: Tableau des précisions relatives à la qualité des classifications des différents MNS obtenues suite à la réalisation de matrices de confusion. PP % : précision du producteur en pourcent, PC % précision du consommateur en pourcent, Ptot % : précision totale en pourcent.	53

Liste des acronymes

AAC	Assiette Annuelle de Coupe
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CARPE	Central African Regional Program for the Environment
CCT	Centre Canadien de Télédétection
CDED	Canadian Digital Elevation Data
CEB	Compagnie Equatoriale de Bois
CFAD	Concession Forestière sous Aménagement Durable
CRAIG	Centre Régional Auvergnat de l'Information Géographique
DEM	Digital Elevation Model
DLR	Deutsches zentrum für Luft und Raumfahrt
DSM	Digital Surface Model
EC	Exploitation Conventionnelle
EFI	Exploitation à Faible Impact
EGM96	Earth Gravitational Model 1996
EOEdu	Earth Observation Education
EOS	Earth Observing System
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nation
FAOK	Forêt Agée à bois divers et Okoumé
FAssOK	Forêt Agée à bois divers sans Okoumé
FJOK	Forêt Jeune à Okoumé
FTJOK	Forêt Très Jeune à Okoumé
GDEM	Global Digital Elevation Model
GPS	Global Positioning System
IGN	Institut Géographique National
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
JPL	Jet Propulsion Laboratory
MNE	Modèle Numérique d'Elévation
MNS	Modèle Numérique de Surface
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NASA	National Aeronautics and Space Administration

NED	National Elevation Data
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
OIBT	Organisation International des Bois Tropicaux
OSGeo	Open Source Geospatial
PFA	Permis Forestier Associé
PGG	Permis de Gré à Gré
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
RMSE	Root Mean Square Error
RSO	Radar interférométrique à Synthèse d'Ouverture
SCE	Somme des Carrés des Ecart
SIG	Système d'Information Géographique
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWIR	Shortwave Infrared
TIR	Thermal Infrared
UFA	Unité Forestière d'Aménagement
UFG	Unité Forestière de Gestion
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
VBA	Visual Basic for Application
VNIR	Visible and Near-Infrared
WGS84	World Geodesic System 1984
WRS-2	Worldwide Reference System-2
PP	Précision du Producteur
PC	Précision du Consommateur

1. Introduction

En exploitation forestière tropicale, la détermination du tracé du réseau routier est une phase importante. Elle résulte généralement de la combinaison d'une reconnaissance de terrain et d'un tracé manuel se basant sur des documents cartographiques reprenant la topographie et l'hydrographie. Cependant, ce travail long et fastidieux n'assure en rien un tracé idéal et aucun système n'est mis en place à ce jour afin de rendre l'opération systématique.

En outre, l'ouverture et la construction des routes en exploitation forestière représentent une des opérations les plus dommageables à l'ensemble de l'écosystème forestier [SIST, 2000]. Leur mise en place est néanmoins nécessaire afin d'accéder à la ressource ligneuse. C'est pourquoi de nombreux critères sont instaurés en vue de la réalisation d'un tracé optimal.

La FAO [2003], a notamment édité un code régional d'exploitation forestière à faible impact dans les forêts denses tropicales humides d'Afrique Centrale et de l'Ouest. Une des principales contraintes décrites dans ce document, en ce qui concerne le tracé routier est la limitation de la pente maximale admise, à savoir : 12 % pour le réseau principal et 30 % pour les routes secondaires.

Dans ce contexte, de nombreuses sociétés forestières montrent un intérêt grandissant pour l'amélioration de la gestion des ressources naturelles et, plus particulièrement, pour la certification forestière. Dans cette optique, l'optimisation du tracé du réseau routier est une opération particulièrement intéressante pour ces entreprises.

Parallèlement, on assiste depuis quelques années à l'avènement des bases de données à vocation « topographique » produites au départ de données satellitales de type radar ou optique. Les deux réalisations principales dans ce domaine sont respectivement SRTM et ASTER GDEM. Elles couvrent la quasi-totalité des terres émergées sous la forme de Modèles Numériques de Surfaces (MNS). Malgré leurs résolutions relativement grossières (30 m pour ASTER et 90 m pour SRTM), elles présentent un intérêt potentiel pour la production de cartes de pentes.

Ce mémoire a pour objectif d'étudier les possibilités d'utilisation des MNS SRTM et ASTER en vue de la gestion durable des ressources forestières et plus particulièrement, en vue de la planification du tracé du réseau routier en exploitation forestière à la CEB (Gabon).

La première partie de ce travail s'attèle à décrire le contexte gabonais et la zone d'intérêt. Elle présente, également au travers d'études et de travaux de recherche, les différentes utilisations des MNS à ce jour. Les deuxième et troisième parties abordent ensuite, les objectifs inhérents à cette étude ainsi que la méthodologie mise en place pour atteindre ces objectifs. La quatrième partie concerne la gestion et le traitement des informations recueillies ainsi que les résultats obtenus. Finalement, une discussion et des perspectives relatives à l'utilisation des MNS dans le contexte de la gestion durable des ressources forestières sont exposées dans la dernière partie.

2. Contexte de l'étude

2.1. Le Gabon

2.1.1. Présentation générale

Le Gabon couvre une superficie de 267.667 km² [REITSMA, 1988] et s'étend de 2°12'N à 3°55'S et de 8°20'E à 14°40'E. Etat d'Afrique centrale (Figure 1), situé de part et d'autre de l'Equateur, il est baigné à l'Ouest par l'océan Atlantique. Les pays limitrophes sont au Sud et à l'Est la République du Congo, au Nord le Cameroun et enfin au Nord-Ouest la Guinée équatoriale [BARRET, 1983].

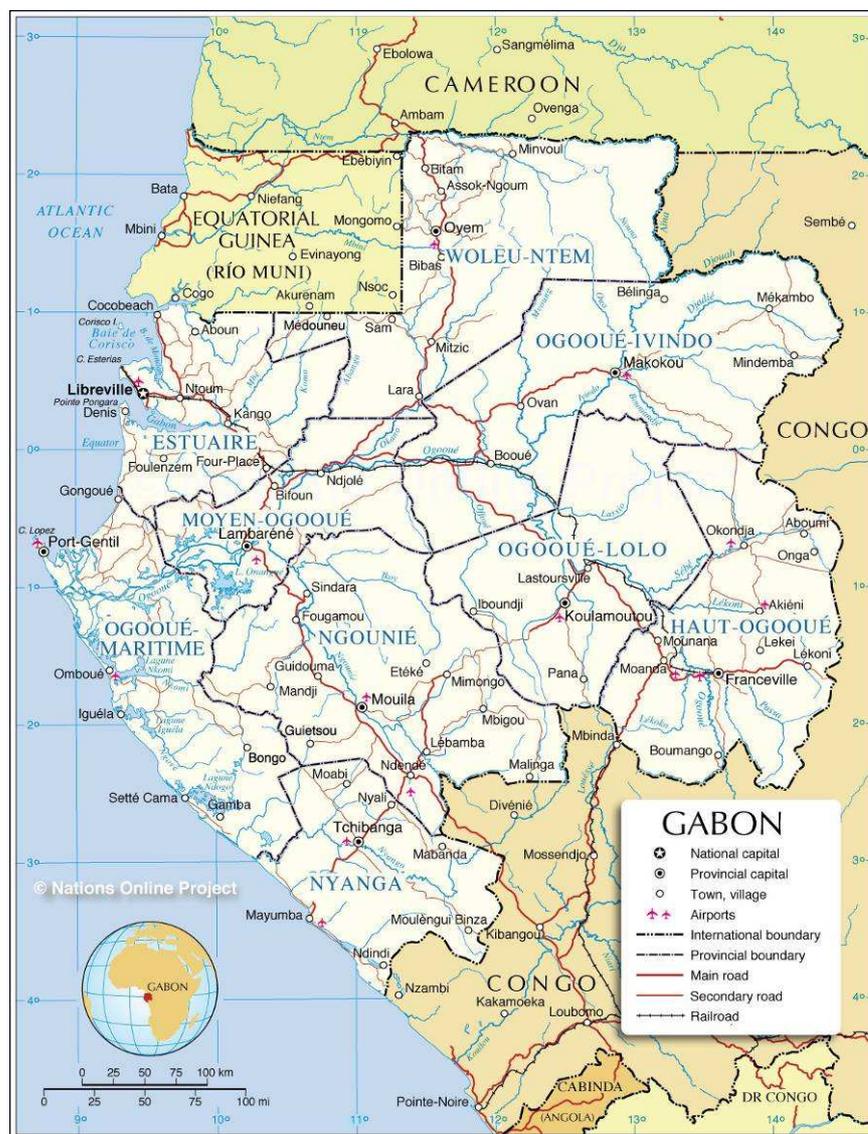


Figure 1: Carte administrative du Gabon [NATIONS ONLINE PROJECT, 2009].

Considéré comme l'un des pays les moins peuplés d'Afrique Centrale [COLLOMB *et al.*, 2000], le Gabon compte environ 1,5 millions d'habitants et présente une densité de

population de 5,7 habitants/km² [CIA, 2010 ; STATISTIQUES MONDIALES, 2010]. La répartition spatiale de la population est inégale et principalement gouvernée par l'attrait des grands centres urbains. En effet, plus de la moitié des habitants vivent à Libreville, Port-Gentil ou Franceville. [CHEHIDI in DOUCET, 2003].

Le Gabon fait partie des cinq pays africains les plus boisés, représentant à eux seuls 85 % des forêts denses africaines. Ces pays sont : la République Démocratique du Congo (110 millions ha), le Congo (21 millions ha), le Gabon (21 millions ha), le Cameroun (20 millions ha) et enfin, la République Centrafricaine (5,6 millions ha) [MAYAUX *et al.*, 2003]. Au vu de la répartition et de la densité de la population, il est admis, que la forêt ne subit pas de réelle pression provenant de la population rurale et que le taux de déforestation est quasiment nul [RUIZ PEREZ *et al.*, 2005].

Enfin, outre le bois, le Gabon possède de nombreuses ressources naturelles dont les principales sont le pétrole, le manganèse, le fer et le diamant [PNUD, 2006].

2.1.2. Caractéristiques physiques

2.1.2.1. *Le climat*

Le Gabon possède un climat chaud et humide. La température moyenne annuelle à Libreville est de 25,9°C avec une amplitude thermique de 2,8°C [DROUINEAU & NASI, 1999]. Selon la classification de Köppen, le Gabon possède un climat de type Am c'est-à-dire un climat de forêt dense sempervirente sub-humide [REITSMA, 1988 ; PEEL *et al.*, 2007]. Ce dernier se caractérise par des précipitations moyennes annuelles supérieures à 1.500 mm. Elles atteignent d'ailleurs régulièrement, dans certaines régions, les 2.000 à 3.800 mm tandis que les précipitations du mois le plus sec restent inférieures à 60 mm. L'hygrométrie est élevée en permanence et est comprise entre 80 et 88% [REITSMA, 1988 ; MEBIAME, 1999]. Le climat se divise en quatre saisons : une petite saison sèche de janvier à février qui est souvent marquée par une diminution de la pluviométrie, une grande saison des pluies de mars à mai, une grande saison sèche de juin à septembre et enfin une petite saison des pluies d'octobre à décembre [FAO, 2009].

2.1.2.2. *Hydrologie*

Le Gabon possède un réseau hydrographique extrêmement dense alimentant principalement deux fleuves : l'Ogooué et la Nyanga. Le plus important, l'Ogooué, traverse le pays selon une trajectoire concave allant du Sud-Est à l'Ouest. Long de plus de 1000 km, il draine avec ses affluents 193 000 km² soit 72 % du territoire gabonais. Ses deux affluents principaux sont l'Ivindo et la Ngounié qu'il rencontre respectivement non loin des villes de Booué (Centre) et Lambaréné (Ouest). La Nyanga se situe dans la pointe Sud du pays et draine 18 000 km², soit une portion de territoire dix fois moins importante que celle drainée par l'Ogooué [BARRET, 1983].

2.1.2.3. *Relief, géologie et pédologie*

Le Gabon présente un socle cristallin et métamorphique qui affleure dans le centre et l'Est du pays. Il est recouvert à l'Ouest par des formations secondaires. Au Sud et à l'Est, la tectonique a dessiné deux golfes comblés par des sédiments anciens [DROUINEAU & NASI, 1999].

Le Gabon se divise en trois ensembles géomorphologiques majeurs :

- Le bassin sédimentaire côtier s'étend sur 600 km du Nord au Sud du Gabon. Il correspond au recouvrement du socle des sédiments côtiers. Son relief est celui d'une plaine légèrement ondulée dont l'altitude ne dépasse pas les 350 m [VANDE WEGHE, 2005].
- L'intérieur du pays, sur le socle ancien et cristallin du précambrien, est un cordon montagneux séparant le bassin sédimentaire des plateaux. Il est composé de deux massifs d'allure parfois montagneuse. Le premier, les Monts de Cristal, se situe au Nord-Ouest. Il est relativement accidenté mais atteint difficilement 900 m d'altitude. Le second est le massif du Chaillu au Sud, il présente une altitude un peu plus élevée [REITSMA, 1988].
- L'arrière pays à l'Est est formé de plateaux d'altitudes moyennes (600 m). Ceux-ci sont parfois fortement entaillés par les cours d'eau qui y creusent des vallées relativement profondes. La maille et la densité du réseau hydrographique donnent à ce type de relief l'aspect d'un moutonnement collinéen. Le plus grand ensemble de plateaux couvre le Nord-Est du pays. [BARRET, 1983 ; MEBIAME, 1999 ; DROUINEAU & NASI, 1999 ; NGUIMBI *et al.*, 2006 et FAO, 2009].

Bien que présentant tous les types de reliefs cités ci-dessus, le pays est essentiellement formé de plateaux et de collines. Il est caractérisé par une absence d'altitudes élevées (point culminant, le Mont Milondo, 1020 m), ce qui n'empêche pas la présence locale de fortes pentes [MEBIAME, 1999 et NGUIMBI *et al.*, 2006].

D'un point de vue pédologique, nous retiendrons que les sols ferrallitiques sont les plus représentatifs des conditions climatiques du Gabon. En effet, la chaleur et l'humidité favorisent l'altération des roches [MEBIAME, 1999 et DROUINEAU & NASI, 1999].

2.1.3. Caractéristiques générales de la forêt

2.1.3.1. Généralités

Selon CHEVALIER [2009], la forêt dense couvre 85 % de la superficie du territoire, soit un peu moins de 21,1 millions d'hectares. Au vu de la faible densité de population et de la couverture boisée, le Gabon est le pays africain occupant la « pole position » en terme de surface de forêt par habitant [NYAR OLLAME, 2001].

2.1.3.2. Description de la forêt

La description de la forêt gabonaise peut être réalisée à différents niveaux. Ainsi nous pouvons caractériser le massif forestier à l'échelle ...

... **continentale**. Le Gabon s'intègre dans le sous-centre d'endémisme guinéen inférieur. Ce dernier faisant lui-même partie du centre régional d'endémisme guinéo-congolais [WHITE, 1986].

... **nationale**. La forêt gabonaise est considérée comme une forêt dense humide sempervirente de basse et moyenne altitude. Celle-ci se caractérise par la présence de nombreux arbres à contreforts ainsi que d'une canopée haute et épaisse. On y retrouve également un grand nombre de lianes et d'épiphytes. Ce type de forêt présente une grande homogénéité floristique car peu de familles et sous-familles regroupe la majorité des individus [VANDE WEGHE, 2004].

... **régionale**. L'homogénéité du massif gabonais n'est que globale et ce dernier se décline en différentes formations forestières. La description de ces formations passe par l'utilisation simultanée de cinq gradients.

- Le *gradient climatique* distingue la forêt sempervirente de la forêt semi sempervirente.
- Le *gradient édaphique* différencie la forêt de terre ferme, la forêt ripicole colonisatrice, la forêt riveraine et la forêt marécageuse.
- Le *gradient altitudinal* marque la différence entre la forêt de plaine, la forêt de colline et la forêt submontagnarde.
- Le *gradient évolutif* classe la forêt selon son stade d'évolution : de la savane à la vieille forêt à *Caesalpinaceae*.
- Le *gradient anthropique* détermine le degré d'action de l'homme sur la forêt en distinguant les différentes successions végétales de la jeune forêt secondaire à la vieille forêt secondaire [LAPORTE, 2005].

CABALLE [1978], distingue trois types forestiers majeurs divisés en sous-types floristiques selon un axe allant d'Ouest en Est. Cette classification est principalement basée sur les essences dominantes présentes dans ces milieux. La Figure 2 est la carte de végétation du Gabon tirée de l'ouvrage de cet auteur et digitalisée par LAPORTE & HEINICKE du département de géographie à l'Université du Maryland¹.

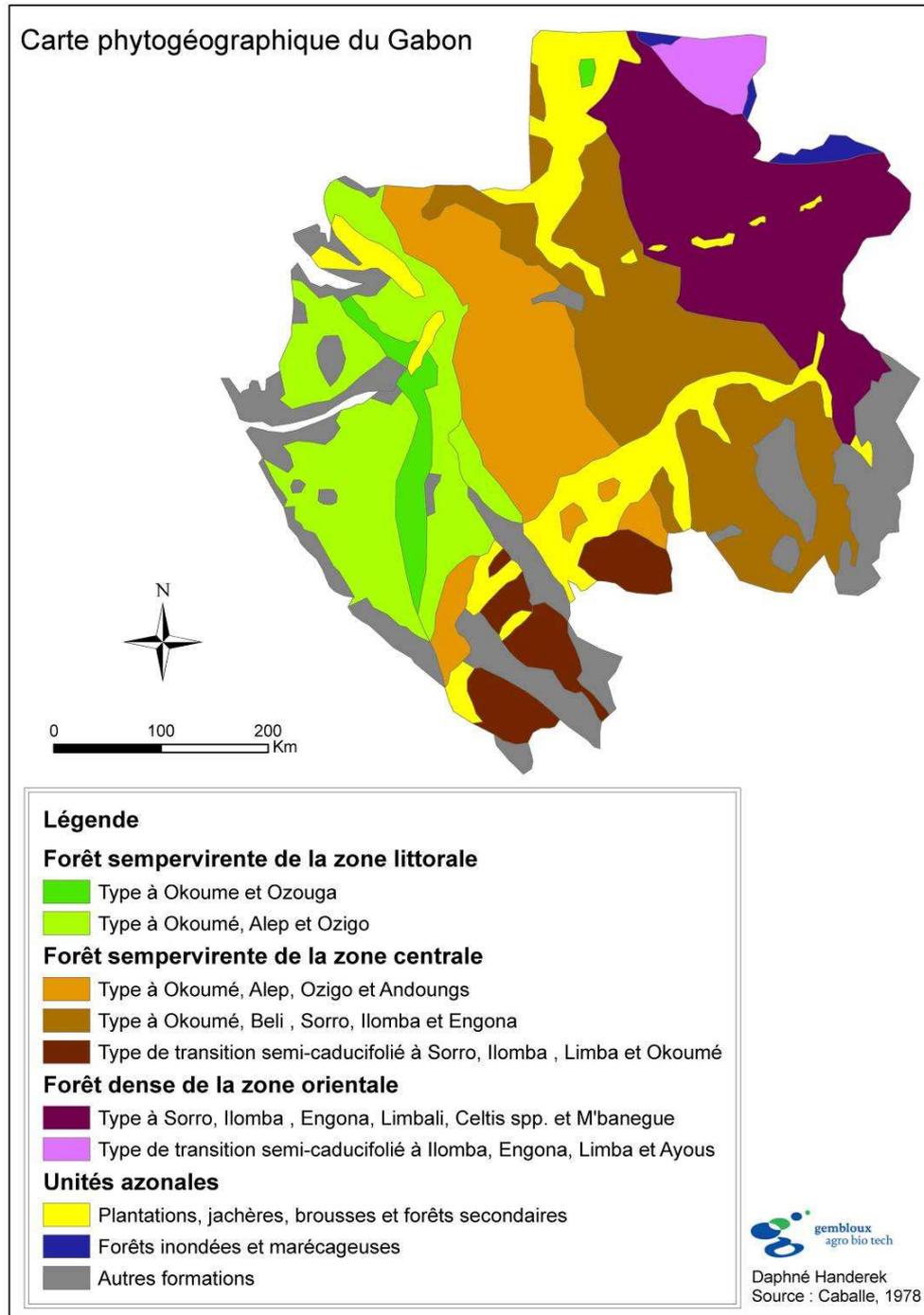


Figure 2: Carte phytogéographique du Gabon. D'après CABALLE [1978].

¹ Les couches de références peuvent être téléchargées sur le site internet de CARPE à l'adresse suivante : <http://www.geog.umd.edu/carpe/gisthemes.html> (dernière consultation le 08 Juillet 2010).

Les trois types forestiers majeurs sont décrits ci-dessous :

- La forêt sempervirente de la zone littorale comprenant le type à okoumé (*Aucoumea klaineana*) et ozouga (*Sacoglottis gabonensis*) et le type à okoumé, alep (*Desbordesia glaucescens*) et ozigo (*Dacryodes buettneri*). Cette zone littorale peut également être subdivisée selon un gradient de pluviométrie. Nous distinguerons alors :
 - Les forêts hyperhumides, au Nord-Ouest, soumises à des précipitations annuelles moyennes d'au moins 3000 mm sont principalement peuplées d'okoumé (*Aucoumea klaineana*), ozouga et angoa (*Erismadelphus exsul*).
 - La forêt humide de l'arrière pays littoral au sein de laquelle les familles communément rencontrées sont les *Caesalpiniaceae*, les *Burseraceae*, les *Myristicaceae*, les *Iringiaceae* et les *Scytopetalaceae*. Les essences dominantes sont l'okoumé, l'alep (*Desbordesia glaucescens*) et l'ozigo (*Dacryodes buettneri*) [LOUIS & FONTES, 1996 ; VANDE WEGHE, 2004].
- La forêt sempervirente des reliefs et plateaux du centre du pays qui intègre :
 - La forêt à okoumé, alep, ozigo, andoungs, *Bikinia* et *Aphanocalys spp.*
 - La forêt à okoumé, beli (*Julbernardia pelligriniana*), sorro (*Scyphocephalum ochocoa*), ilomba (*Pycnanthus angolensis*) et engona (*Pentaclethra eetveldeana*).
 - La forêt de transition semi-caducifoliée à okoumé, sorro, ilomba et limba (*Terminalia superba*). Selon VANDE WEGHE [2004], cette forêt du Sud du Gabon se caractérise par sa richesse en *Meliaceae* des genres *Entandrophragma* et *Khaya*. Parmi les essences caractéristiques citons, l'aningre (*Aningeria robusta*), *Antrocaryon klaineinum*, *Newtonia leucocarpa*, et parmi les *Caesalpiniaceae*, l'agba (*Prioria balsamifera*), l'anzem (*Copaifera religiosa*) et le tchitola (*Priora oxyphylla*). Ces forêts semi-décidues sont souvent très hautes, avec une canopée qui se situe entre 30 et 40 m et des émergents de 60 m. Les lianes et épiphytes sont moins abondants que dans les forêts sempervirentes.
- Les forêts denses de la zone orientale parmi lesquelles se distinguent :
 - La forêt à sorro, ilomba, engona, limbali (*Gilbertiodendron dewevrei*), *Celtis spp.* et M'banegue (*Gilletiodendron pierreanum*).
 - La forêt de transition semi-caducifoliée à ilomba, engona, limba et ayous (*Triplochiton scleroxylon*). Cette zone, du Nord-Est du Gabon, comporte également une forêt monospécifique à limbali. Cet arbre de la famille des *Caesalpiniaceae* forme des associations quasiment pures qui couvrent des surfaces relativement étendues. Les formations monospécifiques se caractérisent par des strates inférieures de la canopée peu développées et un sous bois généralement clair ainsi qu'une diminution du nombre d'espèces accompagnatrices, des lianes ainsi que des épiphytes [DROUINEAU & NASI, 1999 ; DOUCET, 2003 ; VANDE WEGHE, 2004].

Enfin, outre ces formations, que l'on peut qualifier de zonales, il existe plusieurs formations azonales. CABALLE [1978] les groupe grossièrement selon trois catégories (Figure 2). Sans entrer dans les détails, nous citerons les plantations, jachères, brousses et forêts secondaires; les forêts de sols hydromorphes avec les forêts inondées, marécageuses, mangroves, et enfin les autres formations. Ces dernières reprennent des formations très

variées telles que les formations submontagnardes, les forêts sclérophylles littorales, les savanes, etc. Le lecteur avide de plus amples informations se référera aux ouvrages de DOUCET [2003] ou de VANDE WEGHE [2004].

2.1.4. Le secteur forestier

2.1.4.1. *Cadre réglementaire : alliance de la gestion durable et de la contribution à l'économie nationale.*

Depuis quelques années, l'intérêt pour une gestion responsable des forêts augmente au Gabon [COLLOMB *et al.*, 2000]. Le nouveau code forestier, entré en application le 31 décembre 2001, en est une preuve puisqu'il s'articule principalement autour de trois axes stratégiques : l'aménagement durable des ressources forestière, l'industrialisation de la filière bois et la conservation et la protection des écosystèmes [MERTENS & MAKAK, 2007]. Cependant, parmi les nombreux textes d'application prévus pour cette loi, une part importante n'a pas encore fait l'objet de décret d'application [CHEVALIER, 2009].

En 2007, le Gabon comptait parmi les cinq plus grands exportateurs mondiaux de grumes, faisant de la forêt un atout économique majeur pour le pays [OIBT, 2007]. Cependant depuis le 15 mai 2010, un décret interdisant l'exportation de grumes non transformées est entré en vigueur. Cette mesure vise à favoriser l'installation d'une industrie locale du bois et à permettre au Gabon d'exporter des produits transformés à plus haute valeur ajoutée. Cette action fait partie des innovations majeures découlant de la loi [MERTENS & MAKAK, 2007]. Toutefois, de nombreuses questions se posent quant à la faisabilité de cette action et il est certain que de nombreux changements s'opéreront dans le secteur forestier gabonais dans les années à venir.

2.1.4.2. *L'exploitation forestière*

Désormais, le domaine forestier se subdivise en deux sous-ensembles. Le premier, le domaine forestier permanent de l'Etat, est constitué des forêts domaniales classées (qui présentent un intérêt de préservation) et des forêts domaniales productives enregistrées. Ces forêts sont affectées à la production, à la protection et constituent l'habitat de la faune sauvage. Le second est le domaine forestier rural et est constitué des terres et forêts dont la jouissance revient aux communautés villageoises [RÉPUBLIQUE GABONAISE, Loi de 2001].

De plus, le nouveau code forestier distingue dorénavant les trois permis suivants :

- Le *Permis de Gré à Gré* (PGG), est délivré aux nationaux à des fins de transformations locales. Il concerne l'attribution de 50 pieds maximum se situant dans les forêts du domaine forestier rural.
- Le *Permis Forestier Associé* (PFA) est réservé aux nationaux et sa superficie doit être inférieure à 15.000 ha lorsqu'il est intégré dans une CFAD (voir ci-dessous) et 50.000 ha lorsqu'il fait l'objet d'un aménagement par le titulaire. Les titulaires de plusieurs PFA peuvent se regrouper pour former une CFAD.
- La *Concession Forestière sous Aménagement Durable* (CFAD), est un permis dont la superficie varie généralement entre 50.000 et 600.000 ha. La durée

d'attribution de la concession est égale à la rotation fixée par le plan d'aménagement. Elle n'est jamais inférieure à 20 ans et est renouvelable [REPUBLIQUE GABONAISE, Loi de 2001; MERTENS & MAKAK, 2007 ; CHEVALIER, 2009].

Dans le souci d'une exploitation forestière compatible avec le maintien et le renouvellement de la ressource, toute forêt domaniale doit faire l'objet d'un plan d'aménagement. Celui-ci doit intégrer les objectifs de protection, d'inventaire permanent, d'aménagement et de valorisation des ressources naturelles, de régularité de la production ainsi que de l'implication de la population dans les activités du secteur forestier.

Les travaux d'aménagement sont à la charge du titulaire du titre d'exploitation alors que le suivi et le contrôle de la mise en place de ces plans relèvent du ressort de l'Administration des Eaux et Forêts [RÉPUBLIQUE GABONAISE, Loi de 2001].

Enfin, la planification de l'exploitation nécessite deux types d'inventaires à savoir :

- Les inventaires d'aménagement, réalisés au niveau de l'Unité Forestière d'Aménagement (UFA) qui est une subdivision de la CFAD. dont la taille doit être supérieure à 50.000 ha. Ils consistent à compter toutes les tiges dont le diamètre est supérieur ou égal à 20 cm.
- Les inventaires d'exploitation, effectués dans les assiettes annuelles de coupe (AAC). L'objectif de ces inventaires est la quantification et la localisation précise des tiges exploitables et des tiges d'avenir, ceci en vue d'optimiser le tracé des pistes de débardage et l'implantation des parcs à grumes ainsi que de limiter les dégâts causés à l'environnement.

2.1.4.3. *L'exploitation à faible impact (EFI)*

Les dégâts occasionnés par l'exploitation mécanisée en forêt tropicale furent longtemps considérés comme négligeables et bien souvent jugés comparables à ceux engendrés par le phénomène à l'origine de la régénération naturelle de la forêt : le chablis. Cependant, nous savons actuellement, qu'une exploitation non contrôlée engendre des dégâts non négligeable sur le peuplement forestier proprement dit, mais aussi sur l'environnement en général (rivière, sol et faune) et perturbe la reconstitution du couvert forestier [SIST, 2000].

En forêt tropicale, la mise en place de techniques d'exploitation capables d'optimiser l'utilisation de la ressource en bois d'œuvre tout en limitant les dégâts sur le peuplement forestier est apparue assez rapidement comme une priorité pour les forestiers dès le milieu du XX^{ème} siècle. Cependant, il faudra attendre les années 90 pour que ces techniques soient expérimentées et associées à des programmes de recherche et pour que l'Exploitation à Faible Impact (EFI) fasse son apparition [VAN DER HOUT & VAN LEERSUM, 1998 ; SIST, 2000].

Celle-ci est définie selon BULL *et al.* [2001] comme « l'exécution intensivement planifiée et attentivement contrôlée des opérations de récolte en vue de réduire au minimum l'impact sur les peuplements et les sols forestiers, habituellement lors de la coupe sélective d'arbres individuels ».

2.1.4.4. *Impact de l'exploitation forestière sur le milieu et objectifs de l'EFI*

L'abattage, la création d'infrastructures ainsi que la pénétration d'engins ont un impact plus ou moins dommageable sur la forêt. Le passage répété des engins d'exploitation a pour conséquence la création d'ornières, le tassement du sol ainsi que le retrait de la couche superficielle du sol contenant la matière organique. Sous l'action de la pluie, les sols sont érodés, lessivés et subissent une stérilisation plus ou moins rapide et complète ralentissant ou empêchant la régénération de la forêt. De plus, la déforestation totale des routes, des parcs à grumes et des campements augmente les risques d'érosion [FAO, 2003 ; WUNDER, 2005 ; LAURANCE *et al.*, 2006].

La principale caractéristique de l'EFI, par rapport à une exploitation conventionnelle (EC), est sans aucun doute la planification et le contrôle strict de toutes les opérations de récolte [SIST, 2000]. Parmi les principaux objectifs de l'EFI, nous pouvons citer :

- La délimitation de forêts protégées dans la concession ;
- La détermination et l'utilisation d'un diamètre minimum d'exploitation des arbres ;
- Le développement d'un plan de gestion et d'un inventaire d'exploitation ;
- La planification de l'installation des routes d'exploitation ainsi que la diminution de la largeur et de la densité de celles-ci ;
- L'optimisation du réseau routier de transport des grumes ;
- La mise en place d'un nombre maximum d'arbres abattus par hectare et l'utilisation d'un abattage directionnel [EZZINE DE BLAS & RUIZ PEREZ, 2008].

Cette liste est non-exhaustive et l'ensemble des objectifs de l'EFI est détaillé dans le « Code régional d'exploitation forestière à faible impact dans les forêts denses tropicales humides d'Afrique Centrale et de l'Ouest » [FAO, 2003].

Si les dégâts d'abattage sont difficiles à limiter, ceux du débardage sont au contraire facilement réduits à un taux très acceptable par une planification des pistes d'exploitation [SIST, 2000]. Ainsi, la planification de l'emplacement des routes et des parcs à grumes diminue les coûts de construction en réduisant les dommages causés au sol. Le coût total des infrastructures pour l'EFI est légèrement supérieur à celui de l'exploitation conventionnelle. Ceci est dû à l'absence de planification des pistes empruntées par les engins d'exploitation [HOLMES *et al.*, 2002]. Bien qu'à court terme l'EFI soit plus onéreux que l'EC, les investissements financiers réalisés sont compensés par les retours environnementaux et, à moyen et long terme, les avantages financiers s'inversent [BLOTZ *et al.*, 2001].

Enfin, l'amélioration de la gestion des ressources naturelles, en plus de permettre un meilleur retour environnemental et ainsi pérenniser une exploitation plus rentable, est un élément essentiel à l'obtention de la certification forestière. C'est pourquoi les sociétés d'exploitation forestière y accordent un intérêt grandissant [PHILIPPART, 2006].

2.1.5. Le réseau routier

2.1.5.1. La classification

Selon le code régional d'exploitation forestière à faible impact dans les forêts denses tropicales humides d'Afrique Centrale et de l'Ouest [FAO, 2003], il existe quatre catégories de routes :

- Les *routes d'accès ou de liaison au chantier* assurent la liaison entre les limites de la concession et le réseau routier public, une voie d'eau ou encore une voie ferrée. Elles drainent annuellement des milliers de m³ et doivent donc être praticables en permanence.
- Les *routes principales internes au chantier* s'articulent autour d'une dorsale traversant l'ensemble de la concession. Les routes desservant toute implantation d'intérêt public devront être permanentes. Elles doivent être praticables et en bon état toute l'année. Les autres routes auront une durée de vie d'un an minimum.
- Les *routes secondaires ou bretelles* permettent l'accès aux zones d'exploitation. Elles ne demandent que peu d'entretien et leur durée de vie est donc limitée au temps d'exploitation (de quelques semaines à quelques mois).
- Les *épis routiers* sont de courts tronçons de route utilisés en terrain facile pour relier certains parcs à des routes secondaires.

2.1.5.2. Caractéristiques des routes

Chaque route est définie par trois éléments : la coupe transversale, la vue aérienne ou le tracé plan et le profil en long de la route. Les caractéristiques principales de la coupe transversale d'une route sont reprises dans le Tableau 1.

Tableau 1: Caractéristiques générales d'une coupe transversale dans une route [FAO, 2003].

Type de travaux	Taille
Emprise	30 à 45 m
Déforestation	15 à 30 m
Terrassement	7 à 12 m
Nivellement	6 à 9 m
Eclaircissement en terrain peu accidenté	10 à 17 m
Eclaircissement à flanc de coteau (*)	5 à 30 m

(*) A flanc de coteau, l'éclaircissement est toujours plus large en amont.

La vue aérienne de la route, ou tracé en plan, est déterminée en fonction du relief. En terrain peu ou moyennement accidenté, les routes sont établies sur les crêtes ou à leur voisinage immédiat pour économiser sur les travaux de terrassement, faciliter le drainage et éviter l'inondation en saison de pluies. Dans les zones sans crêtes continues, les routes passent d'un col à l'autre, en suivant les flancs de coteau entre deux points de passage obligés successifs. Enfin, en terrain fortement accidenté, les routes traversent les vallées en franchissant les petits marais, le plus loin possible de leur embouchure.

Le profil en long est la projection de la route sur un axe vertical. D'une part, il doit permettre d'assurer l'écoulement des eaux tout en empêchant le ravinement. Une pente minimale, de 1 % par exemple, est toujours préférable à un palier. A l'opposé, les dégradations dues au ravinement s'accroissent très vite dès que la pente dépasse 5 % et obligent à recourir à un entretien onéreux. D'autre part, ce profil doit permettre d'éviter les fortes pentes à la montée ou à la descente. Les déclivités maximales dans le sens montant vers la forêt (retour à vide) peuvent être supérieures à celles admises dans le sens descendant de la forêt (aller en charge). En charge et à vide, les pentes maximales admises sur terrains peu accidentés ne peuvent pas dépasser 4 à 8 % et 8 à 12 % en terrains très accidentés. Si cela est inévitable, une pente supérieure peut être admise, mais sur une très courte section, sans oublier que dans les virages, la pente doit être inférieure à ce qu'elle est en ligne droite tandis que dans les lacets, elle doit être nulle [FAO, 2003].

En ce qui concerne, la pente maximale d'une piste de débardage sans terrassement, celle-ci doit se limiter à 30 %. Au-delà de cette valeur, il faut créer un passage à flanc de coteau. En aucun cas, des pentes supérieures à 45 % ne peuvent être ouvertes, en raison de risques d'érosion, d'accidents et des limites de capacités de franchissement des engins.

2.1.5.3. Intérêts de la planification dans la mise en place des routes

Le coût de la mise en place d'une route secondaire de saison des pluies est de 10.000.000 FCFA/km ce qui équivaut plus ou moins à 15.000 €/km [JEANMART, *communication personnelle*]. Etant donné ce coût relativement élevé, la planification du réseau routier devient une étape importante de l'exploitation. Le choix du tracé sera une étape cruciale afin d'une part, de ne pas engendrer de dépenses inutiles et d'autre part, d'éviter l'impact sur le milieu. En effet, le manque de planification peut engendrer la construction de tronçons de route superflus et non adaptés au passage des engins ou encore présentant des structures insuffisantes de drainage [FAO, 2003].

C'est pourquoi l'EFI impose diverses contraintes pour la mise en place des routes lors d'une exploitation forestière. Elles sont détaillées ci-dessous :

- Planifier le réseau routier en respectant les zones protégées et en évitant les zones sensibles et les arbres patrimoniaux ;
- Favoriser l'emplacement de la route sur les crêtes en terrain facile ou moyennement accidenté, afin de faciliter le drainage et le débardage vers le haut ;
- Eviter de pousser la terre dans les cours d'eau ;
- Limiter, autant que possible, la largeur de l'ensoleillement d'une route en fonction de sa catégorie, de son exposition et du type de sol formant la plate-forme ;
- Maintenir des ponts de canopée et ouvrir les andains latéraux de terrassement à intervalles réguliers, afin de permettre le passage de certaines espèces de singes et de gibier ;
- Construire et maintenir des structures de drainage appropriées pour collecter et évacuer l'eau tout en évitant la dégradation des couches constitutives de la chaussée, l'érosion des talus et l'apport de sédiments aux cours d'eau ;
- Eviter les perturbations, lors des travaux de construction, de la végétation des rives des cours d'eau, des zones tampons, des berges et du lit de la rivière.

2.2. La Compagnie Equatoriale des Bois : une société engagée dans la gestion durable

2.2.1. Bref historique et présentation générale

Fondée en 1946, la Compagnie Equatoriale des Bois (CEB) se situe à 30 km de Lastoursville dans le Sud-Est du Gabon. En 1989, elle est intégrée au groupe français Thanry qui détiendra la majorité du capital de la société jusqu'en 2007 où elle est finalement rachetée par le groupe Precious Woods. L'ensemble des permis attribués par le gouvernement gabonais à la CEB couvre 616.700 ha dans les provinces de l'Ogooué-Lolo et du Haut Ogooué. La Figure 3 reprend la carte des limites de la CFAD de la CEB.

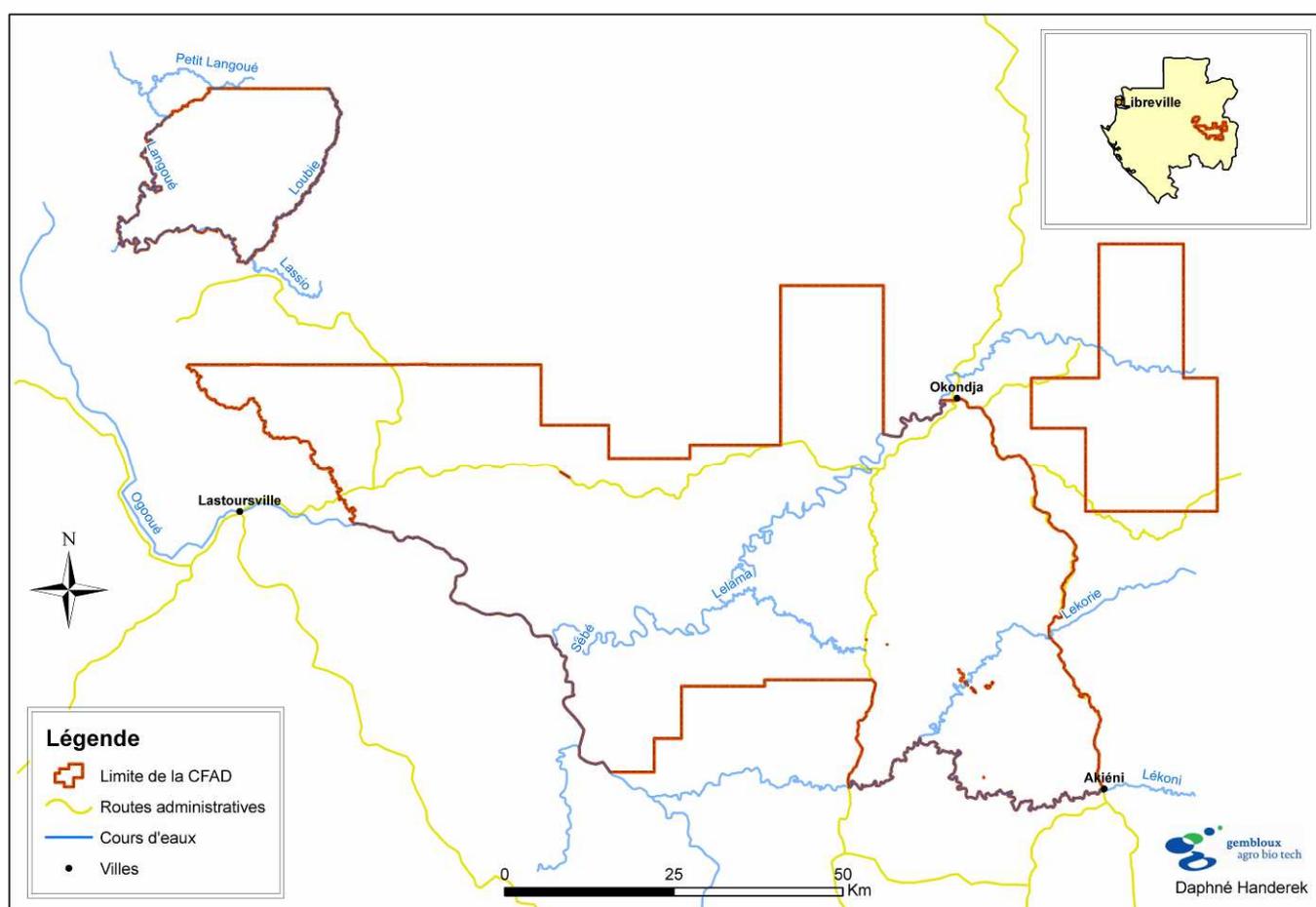


Figure 3: Limites de la CFAD de la CEB.

La base-vie principale est implantée à Bambidie, y sont affectées l'ensemble des opérations de terrain tels que l'exploitation, l'aménagement, le roulage, l'entretien des routes ou encore la scierie, l'atelier et, dans le courant de l'année, la raboterie. Près de 240 personnes y sont employées et logées avec leur famille. Par ailleurs, trois camps secondaires (Milolé, Lélama et Okondja) sont attenants à la base-vie. Chacun d'eux emploie environ 50 personnes qui sont dirigées par un chef de chantier et un chef de garage.

Depuis de nombreuses années, la CEB s'est lancée dans les processus menant à la gestion durable et à la certification. C'est ainsi que dès 1995, ses concessions ont fait l'objet d'inventaires et de pré-études d'aménagement. Après trois ans d'inventaires statistiques, l'élaboration de normes d'aménagement ainsi qu'une politique d'exploitation et d'industrialisation adaptée aux possibilités de la forêt a pu être mise en place. Enfin, en 2001, la CEB devient la première société d'exploitation forestière à avoir présenté un plan d'aménagement à l'Administration des Eaux et Forêts. [COLLOMB *et al.*, 2000 ; O'HEIX *et al.*, 2002 ; DEMARQUEZ & JEANMART, 2004].

2.2.2. Le plan d'aménagement

2.2.2.1. Inventaire d'aménagement de la CFAD

L'inventaire d'aménagement de la CFAD a été réalisé en deux étapes, tout d'abord, en 1997, par la société Africa-Forest ensuite, en 1999, par la société CEB suite à l'acquisition d'un nouveau permis (10/99). Au cours des deux étapes, l'inventaire réalisé était de type systématique avec un taux d'échantillonnage de 1 % pour les pieds de diamètre supérieur ou égal à 60 cm (50 cm pour le permis 10/99) et de 0,25 % pour les pieds de diamètre compris entre 30 et 60 cm (0,33 % pour des diamètres compris entre 20 et 50 cm sur le permis 10/99) [DEMARQUEZ & JEANMART, 2004].

2.2.2.2. Mise en évidence des formations végétales

Les formations végétales mises en évidence par l'inventaire d'aménagement sont reprises dans le Tableau 2.

Tableau 2: Formations végétales mises en évidence au sein de la CFAD suite à l'inventaire d'aménagement [DEMARQUEZ & JEANMART, 2004].

Formations végétales	Essences principales	Caractéristiques
Forêt âgée à bois divers et okoumé (FAOK)	Sorro (<i>Scyphocephalum ochocoa</i>) Okoumé (<i>Aucoumea klaineana</i>) Béli (<i>Julbernardia pellegriniana</i>) Azobé (<i>Lophira alata</i>)	Pieds de très gros diamètre d'essences de bois rouge à croissance lente. Diversité spécifique élevée. Déficit en jeunes okoumés.
Forêt âgée à bois divers sans okoumé (FAssOK)	Béli (<i>Julbernardia pellegriniana</i>), Omvong (<i>Dialium pachyphyllum et D. lopense</i>) Ilomba (<i>Pycnanthus angolensis</i>) Engona (<i>Pentaclethra eetveldeana</i>)	Pieds de très gros diamètre d'essences de bois rouge à croissance lente. Diversité spécifique élevée. Déficit en jeunes okoumés.
Jeune forêt à okoumé (FJOK)	Sorro (<i>Scyphocephalum ochocoa</i>) Okoumé (<i>Aucoumea klaineana</i>)	Nombreuses jeunes tiges d'okoumés. Forêt issue de la recolonisation des savanes.
Forêt très jeune à okoumé (FTJOK)	Okoumé (<i>Aucoumea klaineana</i>)	Peuplements très jeunes et très denses. De nombreuses savanes sont incluses au sein du massif forestier.

2.2.2.3. *Séries d'aménagement*

La CFAD de la CEB est divisée en quatre séries d'aménagement.

La **série de production** a pour objectif principal la production durable de bois d'œuvre pour l'exportation et l'alimentation des usines de transformation. Elle couvre 582.504 ha soit 94,5 % de la CFAD.

La **série agricole** occupe 18.588 ha soit 3 % de la concession. Elle englobe toutes les zones cultivées ou potentiellement cultivables se trouvant à proximité des villages situés au sein de la CFAD.

La **série de protection** est constituée de 15.737 ha (2,6 %) de réserves ayant pour objectif la conservation de zones d'intérêt biologique.

La **série de recherche-développement** vise à améliorer les connaissances en ce qui concerne la dynamique des peuplements et la sylviculture à appliquer aux essences tropicales. Cette série sert également aux essais d'enrichissement de trouées d'abattage et des savanes. La superficie occupée est variable en fonction des recherches scientifiques menées [DEMARQUEZ & JEANMART, 2004].

2.2.2.4. *Les éléments constitutifs de la CFAD*

Afin de simplifier la gestion de la CFAD, celle-ci a été scindée en deux Unités Forestières d'Aménagement (UFA) d'environ 300.000 ha. Chaque UFA est divisée en 5 Unités Forestières de Gestion (UFG), ces dernières étant à leur tour découpées en 5 Assiettes Annuelles de Coupe (AAC). Les UFG peuvent être ouvertes à l'exploitation durant 7 ans. Leur superficie est déterminée sur la base des volumes estimés en fonction des objectifs de production. Enfin, chaque UFG est subdivisée en 5 AAC de superficies plus ou moins équivalentes et dont les contours sont déterminés par les limites naturelles [DEMARQUEZ & JEANMART, 2004].

2.2.3. Les règles d'exploitation

2.2.3.1. *L'inventaire d'exploitation*

L'inventaire d'exploitation est effectué un an avant les opérations d'exploitation. C'est un inventaire en plein qui doit permettre l'élaboration d'une cartographie précise de la ressource potentiellement exploitable, des arbres d'avenir, du réseau hydrographique, etc. Les unités inventoriées sont des rectangles de 3 km sur 200 m. La collecte de ces informations permet, via l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG), la création d'une carte de prospection. Cette dernière doit être établie au moins 9 mois avant le passage en exploitation de l'AAC. Suite à ces opérations de cartographie, la « sortie de pieds » est réalisée. Cette étape consiste à repérer et à marquer, à l'aide d'un numéro unique, les arbres réellement exploitables au sein de chaque crête. La carte de prospection est mise à jour, à

l'aide de ces nouvelles informations, et transformée en carte d'exploitation qui est remise aux responsables de chantier [DEMARQUEZ & JEANMART, 2004].

2.2.3.2. *Le tracé du réseau routier*

L'ouverture des routes est réalisée au moins 6 mois avant l'exploitation afin qu'elles puissent se ressuyer. Le réseau de piste est réduit à son minimum et est organisé selon l'abondance de la ressource. Tout est mis en œuvre afin d'optimiser le tracé de manière à limiter au maximum le réseau des pistes secondaires ainsi que réduire les dimensions des infrastructures routières, tout en veillant à maintenir des conditions de sécurité et d'ensoleillement suffisantes [DEMARQUEZ & JEANMART, 2004].

2.2.3.3. *Abattage et normes de travail*

Les abatteurs sont formés à la technique de l'abattage contrôlé qui permet entre autres de contrôler la direction de chute de l'arbre. Les travailleurs perçoivent diverses primes de qualité en fonction du respect des normes de travail, l'objectif étant de garantir la sécurité du personnel, de diminuer le gaspillage de bois et de maintenir la ressource d'avenir [DEMARQUEZ & JEANMART, 2004].

2.2.3.4. *Traçabilité et contrôle post-exploitation*

Le système de traçabilité mis en place utilise un jeu de trois plaquettes métalliques portant le numéro d'identification de l'arbre et de la crête. Chacune correspond à une étape de l'exploitation : l'abattage, la vidange et le martelage de la souche. Ce système permet d'une part d'éviter les fraudes et d'autre part, de ne pas oublier en forêt des arbres prospectés ou abattus. Enfin, il permet au responsable de suivre à tout moment l'évolution des opérations.

Lors du contrôle post-exploitation, la société vérifie le respect et l'application des normes de travail.

2.3. La problématique du relief en exploitation forestière

2.3.1. Caractérisation du relief au départ des cartes topographiques

En exploitation forestière, la planification du réseau routier résulte généralement de la combinaison d'une reconnaissance de terrain et d'un tracé manuel se basant sur des documents cartographiques reprenant la topographie et l'hydrographie. Cette opération longue et fastidieuse n'assure en rien un tracé idéal et aucun système n'est mis en place actuellement afin de rendre l'opération systématique [PHILIPPART, 2006].

L'ensemble du massif de la CEB est couvert par un fond IGN au 1/200.000^{ème}. Des fonds topographiques à l'échelle du 1/50.000^{ème} couvrent 74 % de la concession. Ces fonds ont été créés à partir d'images Landsat prises par satellite. Elles présentent l'inconvénient majeur de ne pas percevoir la couverture nuageuse, ce qui a eu pour effet de créer des cartes présentant des zones sans information sur le relief. Ce dernier n'est donc que partiellement caractérisé et ce, à relativement, petite échelle [DEMARQUEZ & JEANMART, 2004].

2.3.2. Caractérisation du relief au départ de MNS (ASTER, SRTM)

2.3.2.1. Introduction

Certaines parties du globe manquent de données topographiques, comme c'est le cas pour une grande partie des zones tropicales et équatoriales. Les causes principales de ce manque d'information sont la faible densité de population et l'immensité des zones à couvrir. De plus, il est difficile d'acquérir des données photogrammétriques nécessaires à la création de cartes topographiques de qualité. Ceci essentiellement en raison, de la présence d'une forte couverture nuageuse surplombant les régions tropicales et équatoriales [BOURGINE & BAGHDADI, 2005].

Parallèlement, depuis quelques années, on assiste à l'avènement de couches à vocation « topographiques » produites au départ de données satellitales de type radar ou optique. Les deux réalisations principales sont respectivement, SRTM et ASTER GDEM. Ces deux types de couches couvrent la quasi-totalité des terres émergées sous la forme de Modèle Numérique de Surface (MNS). L'utilisation de ces derniers se présente comme un bon compromis à l'établissement de cartes [KOUAMÉ, 2006].

2.3.2.2. MNT et MNS : quelles différences ?

Un **Modèle Numérique de Terrain (MNT)** ou Digital Elevation Model (DEM) est la représentation numérique du relief d'une zone géographique. Le MNT se rapporte uniquement à l'élévation du terrain et ne prend donc pas en compte la hauteur des objets tels que les arbres ou les bâtiments [CRAIG, 2008].

Un MNT peut également être défini comme étant la description du terrain sous la forme d'un set de coordonnées x, y, z ; x et y étant les coordonnées géographiques, z représentant l'altitude [EOEDU, 2009].

Un **Modèle Numérique de surface (MNS)** ou Digital Surface Model (DSM) est la modélisation de la surface du sol ainsi que des objets qui y sont présents: bâtiments, végétations, infrastructures routières, etc. [CRAIG, 2008].

Au départ de ces MNS, il est possible de produire des MNT en soustrayant la hauteur des objets paysagers [COURDECHET *et al.*, 2002].

Il est à noter que ces définitions ne sont pas normalisées. En effet, les MNS sont parfois nommés MNE ou Modèle Numérique d'Élévation ce qui peut entraîner des confusions avec le MNT nommé DEM en anglais [PUECH, 2000].

Ces modèles numériques peuvent être composés d'entités vectorielles ponctuelles (points cotés), linéaires (courbes de niveau), surfaciques (facettes) ou représentés en mode raster (cellules).

La Figure 4 illustre la différence entre ces deux définitions.

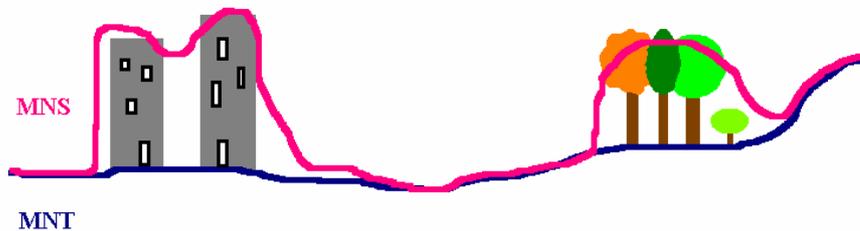


Figure 4: Schéma d'un modèle numérique de terrain (en bleu) et d'un modèle numérique de surface (en rose).

Un **raster** est un mode de représentation des images sous forme matricielle. L'image est divisée en pixels et la distribution de ceux-ci définit le maillage. La dimension de la maille définit la résolution alors que la taille des pixels infère la résolution planimétrique de l'image. Plus la résolution est grande, plus le MNT est riche en détails topographiques. A chaque pixel est associée une valeur qui résulte de la moyenne des valeurs avoisinantes. Le raster est facile d'usage, et se prête bien à certains traitements numériques cependant il manque de précision à grande échelle. Les MNT raster peuvent être produits par différentes méthodes à partir de source de données diverses telles que les images numériques, les courbes de niveau ou encore les photographies aériennes [CRAIG, 2008 ; CCT, 2009].

2.3.2.3. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

La mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) a vu le jour grâce à un projet international associant la National Geospatial-Intelligence Agency (NGA), la National Aeronautics and Space Administration (NASA), l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) et le Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR). SRTM est un système radar modifié qui a été envoyé dans l'espace à bord de la navette spatiale Endeavour durant une mission de onze jours en février 2000. La navette a été lancée à une altitude de 233 km avec une inclinaison de 57° afin d'acquérir des MNS de la Terre compris entre 60°N et 56°S. Au terme de la mission, près de 80 % de la surface terrestre ont été cartographiés permettant de générer la plus complète base de données topographiques digitales à haute résolution de la Terre [VAN ZYL, 2001 ; USGS, 2006].

a. Mécanisme du dispositif de la mission

La mission SRTM était équipée d'un Radar Interférométrique à Synthèse d'Ouverture (RSO) ou Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). Ce système se base sur la différence de phase entre deux images [BOURGINE & BAGHDADI, 2005 ; KARKEE *et al.*, 2008] et son fonctionnement s'apparente à celui d'un montage stéréoscopique puisqu'il utilise deux images de la même région prises selon deux angles différents afin d'en déterminer le relief [VAN ZYL, 2001]. Cependant, contrairement à la stéréoscopie traditionnelle, l'identification de points homologues ainsi que l'utilisation d'images contrastées ne sont pas nécessaires [RABUS *et al.*, 2003]. Habituellement, les images sont acquises par une seule antenne opérant deux passages différés dans le temps (interféromètre à double passage). La différence majeure que présente SRTM par rapport aux précédentes missions de cartographie de la Terre, est l'addition d'une antenne supplémentaire au bout d'un mât de 60 m de long [WALKER *et al.*, 2007]. Cette dernière permet au radar de déterminer l'élévation du terrain en un seul passage (interféromètre à un seul passage) [NIKOLAKOPOULOS *et al.*, 2006]. La Figure 5 montre le schéma du système dans la mission SRTM.

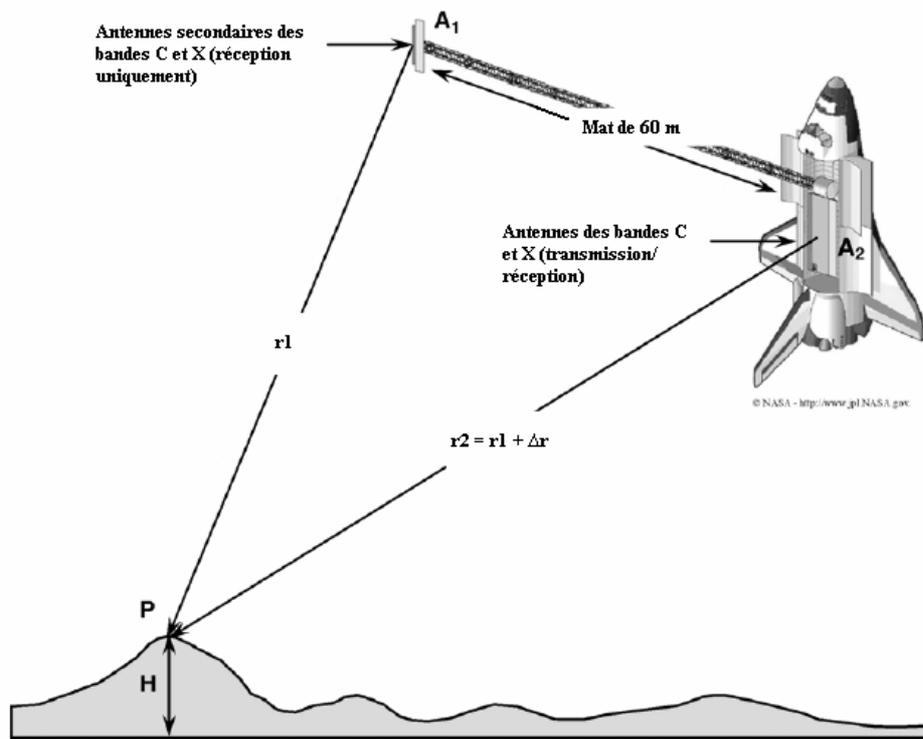


Figure 5: Configuration de la mission SRTM [NASA, 2005].

Deux capteurs ont enregistré simultanément deux images : le capteur bande C et le capteur bande X [GAO, 2007]. Leurs caractéristiques sont reprises dans le Tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3: Caractéristiques des capteurs de la bande C et de la bande X de la mission SRTM [RABUS *et al.*, 2003 ; WALKER *et al.*, 2007].

	Longueur d'onde	Fréquence	Surface cartographiée	Fauchée	Angle de visée
Bande C	5,6 cm	5,3 GHz	119.000.000 km ²	225 km	
Bande X	3,1 cm	9,6 GHz	58.000.000 km ²	50 km	52° bac k-nadir

La bande X a fourni des données discontinues couvrant seulement 40 % de la surface cartographiée entre 60° N et 56° S. La bande X opérait sous un angle de vue fixe arrière nadir de 52° [WALKER *et al.*, 2007].

b. Types de produits SRTM

Trois types de produits sont disponibles : les images à résolutions horizontales de 1 km (30''), de 90 m (3'') et de 30 m (1'') [USGS, 2006 et GROHMANN & STEINER, 2008]. Cependant, les produits SRTM ont principalement été distribués sous deux formes, SRTM 1'' et SRTM 3''. Le premier est uniquement accessible aux USA et le second est distribué gratuitement pour le reste du monde [NIKOLAKOPOULOS *et al.*, 2006]. Les SRTM 1'' sont générés à partir des données collectées par la bande X à 1 seconde d'arc et les SRTM 3'' sont générés à 3 secondes d'arc à partir des données de la bande C [GAO, 2007]. Ces caractéristiques sont reprises dans le Tableau 4.

Tableau 4: Caractéristiques des capteurs du SRTM [USGS, 2006].

Satellite	Capteur	Résolution des pixels	Résolution de capture
Navette spatiale Endeavour	Bande X	30 m	1 seconde d'arc
	Bande C	90 m	3 secondes d'arc
		1 km	30 secondes d'arc

Afin de créer ces produits SRTM, différents processus ont été utilisés. Compte du fait que seul SRTM 3'' soit disponible, nous ne nous attarderons que sur ces images d'une résolution de 90 x 90 m par pixel. Tout d'abord, les données SRTM 3'' sont converties en couches WRS-2 afin d'obtenir des données correspondant au jeu de données Landsat GeoCover. Ensuite, elles sont géoréférencées dans le système de coordonnées UTM-WGS84 avec une résolution de 90 m et subissent un rééchantillonnage par la méthode du plus proche voisin [USGS, 2006]. Les unités sont exprimées en degrés décimales [JARVIS *et al.*, 2008]. Enfin, la dernière version en date (SRTM V 4.1.) présente des corrections qui permettent l'élimination des vides [REUTER *et al.*, 2007].

c. Utilisation et précision des produits SRTM

Il existe deux types de précision :

La **précision relative** qui résulte de l'évaluation des erreurs accidentelles affectant la détermination d'une donnée, comme par exemple, la position relative d'un point par rapport à un système géodésique, ou la position relative de deux points.

La **précision absolue** qui découle de l'évaluation globale de toutes les erreurs affectant la détermination d'une donnée.

Les informations concernant les précisions pour les images SRTM sont reprises dans le Tableau 5. Ces précisions présentent des variations locales en fonction du relief, de la couverture végétale, de la présence de masse d'eau ou encore en fonction de l'exposition. [LUEDELING *et al.*, 2007].

Tableau 5: Précisions des données SRTM [RABUS *et al.*, 2003; KELLNDORFER *et al.*, 2004; MILIARESIS & PARASCHOU, 2005; HANCOCK *et al.*, 2006].

Précision horizontale absolue	< 20m
Précision verticale absolue	< 16m
Précision verticale relative	< 10m

En ce qui concerne l'utilisation, les images SRTM 1'' ne couvrent que les Etats-Unis et sont donc utilisables uniquement pour cette région. Les images possédant une résolution de 90 m couvrent la quasi-totalité du globe. Elles conviennent pour les analyses à petite et moyenne échelles (1/100.000^{ème} ou plus petite), le résultat étant trop grossier pour les études plus détaillées. Si aucune donnée n'est disponible avec plus de détails, une alternative est d'interpoler les données SRTM à une résolution plus fine. Cette opération n'augmentera pas le niveau de détails du MNT original mais elle mènera à une surface avec une plus haute cohérence des propriétés angulaires entre pixels voisins [GROHMANN & STEINER, 2008].

d. Avantages et inconvénients des produits

Le principal avantage des données SRTM est lié à la nature du signal utilisé c'est-à-dire un signal radar. Ce dernier est indépendant de la couverture nuageuse rendant les MNS SRTM vierge d'erreur due à la présence de nuages [NIKOLAKOPOULOS *et al.*, 2006]. Ceci représente un avantage majeur pour les régions tropicales et équatoriales puisque ces dernières sont presque en permanence surplombées d'une couverture nuageuse [GOND *et al.*, 2003]. De plus, les images sont facilement accessibles puisqu'elles sont téléchargeables gratuitement sur différents sites internet [GAO, 2007]. Enfin, SRTM possède une densité d'échantillonnage très élevée et régulière [HENGL & REUTER, 2009] ce qui lui a permis de fournir la meilleure qualité de MNS disponible à travers le monde et couvrant la quasi-totalité de la surface terrestre [NIKOLAKOPOULOS *et al.*, 2006].

Par contre, les produits SRTM présentent un inconvénient majeur qui est leur sensibilité à la structure verticale de la végétation. Celle-ci peut être en grande partie attribuée à la relative petite longueur d'onde des bandes C (5,6 cm) et X (3,1 cm). En effet, les ondes radar sont plus fortement dispersées par les éléments de surface qui ont une grande longueur

d'onde et l'élévation obtenue dans ces lieux est celle du centre de dispersion à l'intérieur de la canopée [SUN *et al.*, 2008]. En conséquence, là où il y a de la végétation, les feuilles et les branches dispersent l'énergie des bandes C et X (Les ondes de la bande C pénètrent plus profondément dans la canopée que celles de la bande X étant donnée la petite mais significative différence de longueur d'onde) [KELLNDORFER *et al.*, 2004]. Il en résulte que dans les zones où le couvert arboré ou arbustif est important, un biais positif significatif est observé dans les données. *A contrario*, dans les régions sans couvert végétal, l'élévation des données SRTM s'apparente plus à un MNT avec une précision allant de 0 à 4,5 m [GAO, 2007 ; WALKER *et al.*, 2007].

A ces problèmes viennent s'ajouter des erreurs dans les images SRTM dont certaines sont corrigées et d'autres sont laissées telles quelles dans le produit fini.

- Les **vides** : ce sont des régions où aucune information n'est enregistrée à cause d'une ombre ou encore en raison d'une anomalie survenue lors de la prise de données. Les petits vides ont été remplis en faisant une interpolation des élévations alentours mais les grands vides ont été laissés dans les données.
- Les **points erronés** tels que les points qui ont une très haute ou une très basse élévation. Ils sont détectés et sont vidés si leur élévation excède de 100 m celle des points alentours.
- Les **erreurs dues à la présence de masse d'eau**. En effet, les étendues d'eau dispersent fortement le signal radar ce qui rend impossible l'enregistrement de données cohérentes. Les corrections apportées aux images sont les suivantes : le niveau des océans est placé à 0 m, les lacs de plus de 600 m de long sont aplanis et placés à une hauteur constante, enfin les îles sont représentées si elles ont un axe principal de plus de 300 m ou si leur altitude est supérieure à 15 m. [MILIARIS & PARASCHOU, 2005 ; LUEDELING, 2007].

Enfin, pour une exposition donnée, la valeur absolue de l'erreur sur l'altitude et son écart type augmente presque linéairement avec la pente. L'exposition de la pente joue un rôle majeur sur l'amplitude de l'erreur et sur son signe : les altitudes sont sous-estimées pour les pentes exposées au Nord-Ouest, c'est-à-dire faisant face au signal radar du satellite, alors qu'à l'inverse elles sont surestimées pour les pentes exposées au Sud-Est. Ce sont également ces deux orientations de pente qui donnent les erreurs maximales. [BOURGINE & BAGHDADI, 2005]. Selon LUEDELING *et al.* [2007], lorsque les pentes sont supérieures à 20° la fréquence de vide augmente suite à l'ombre du radar. Notons également que les pentes provenant des images sont toujours positives, ce qui engendre une relation positive pour la moitié des données et une relation négative pour l'autre [VAN NIEL *et al.*, 2008].

2.3.2.4. *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)*

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) est un radiomètre à haute résolution spatiale ayant été lancé dans l'espace en décembre 1999 sur le satellite Terra dans le cadre du projet d'observation de la Terre de la NASA, EOS (Earth Observing System). Ce capteur est le fruit d'une coopération américano-japonaise et il permet l'obtention de cartes détaillées des températures de surface, des réflectances et des élévations. [JPL, 2004]. Il collecte des données en permanence et permet une couverture complète de la Terre en images calibrées.

a. Fonctionnement et caractéristiques

ASTER couvre quatorze bandes spectrales, allant du visible à l'infrarouge thermique, avec des hautes résolutions spatiales, spectrales et radiométriques. La résolution spatiale varie avec la longueur d'onde et chaque scène couvre une zone d'environ 60 x 60 km. ASTER est divisé en trois sous-systèmes opérant chacun dans une région spectrale déterminée :

- Le visible et proche infrarouge (VNIR, Visible and Near-Infrared) possèdent 3 bandes et ont une résolution spatiale de 15 m. Le sous-système VNIR est utilisé dans la production de MNS. Il est composé de deux télescopes, le premier en position nadir et le second en position arrière (back-nadir) avec une inclinaison de 27,6° par rapport au nadir permettant ainsi les compositions stéréoscopiques
- L'infrarouge moyen (SWIR, Shortwave Infrared) est composé de 6 bandes spectrales à résolution spatiale de 30 m.
- L'infrarouge thermique (TIR, Thermal Infrared) dispose de 5 bandes spectrales à 90 m de résolution spectrale [YAMAGUCHI *et al.*, 1998 ; ABRAMS & HOOK, 2002 ; NIKOLAKOPOULOS *et al.*, 2006 ; GAO, 2007 ; HULLEY & HOOK, 2009].

Les caractéristiques des sous-systèmes sont décrites dans le Tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6: Caractéristiques des sous-systèmes du capteur ASTER [YAMAGUCHI *et al.*, 2001].

Sous-système	N°de Bande	Couverture spectrale (µm)	Précision absolue	Résolution spatiale
VNIR	1	0,52-0,60	< 4 %	15 m
	2	0,63-0,69		
	3N, 3B	0,78-0,86		
SWIR	4	1,600 - 1,700	< 4 %	30 m
	5	2,145 - 2,185		
	6	2,185 - 2,225		
	7	2,235 - 2,285		
	8	2,295 - 2,365		
	9	2,360 - 2,430		
TIR	10	8,125 - 8,475	< 3 K (200 - 240K)	90 m
	11	8,475 - 8,825	< 2 K (240 - 270 K)	
	12	8,925 - 9,275	< 1 K (270 - 340 K)	
	13	10,25 - 10,95	< 2 K (340 - 370 K)	
	14	10,95 - 11,65		

Comme le montre la Figure 6 présentant le schéma de fonctionnement d'ASTER, il existe un intervalle de temps entre le moment où le télescope en position nadir passe au dessus d'un point de la surface terrestre et le moment où le télescope en position nadir arrière passe au dessus de ce même point. Les images enregistrées par ces télescopes sont utilisées pour générer des MNS par stéréoscopie [HIRANO *et al.*, 2003].

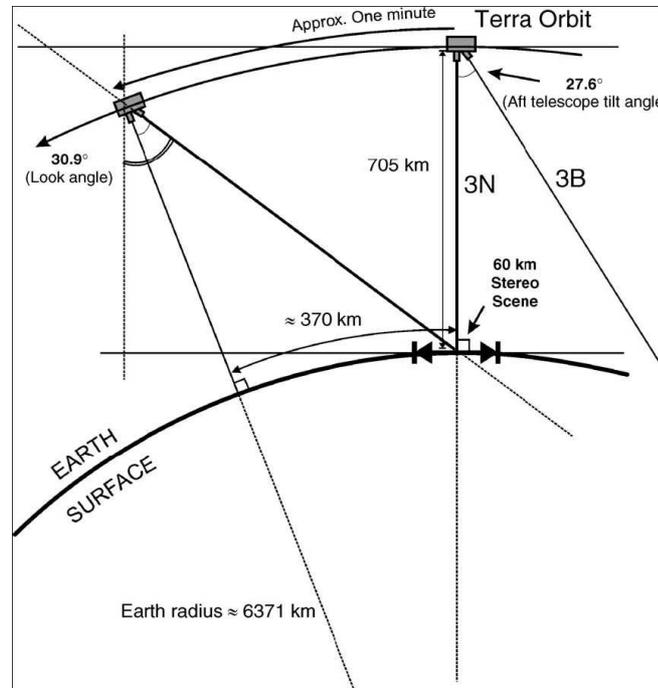


Figure 6: Diagramme simplifié du fonctionnement du capteur ASTER [HIRANO *et al.*, 2003].

b. Les produits ASTER GDEM

ASTER GDEM couvre les terres émergées comprises entre 83°N et 83°S. Il comprend 22.600 tuiles (« images ») de 1° x 1° et inclut également les tuiles possédant moins de 0,01 % de surface terrestre. Il se présente sous un format GeoTIFF et est géoréférencé selon un système latitude/longitude sur le géoïde WGS84/EGM96.

Chaque tuile est caractérisée par deux fichiers, le MNS à proprement parlé et un fichier d'évaluation de la qualité. Ce dernier, fournit deux catégories d'informations, à savoir :

- Le nombre de scènes contribuant à la création du MNS pour chaque pixel de 30 m ;
- La source de données utilisée pour remplacer les valeurs erronées du MNS.

Chaque pixel de ce fichier ne contient qu'une de ces deux informations.

La correction automatique des erreurs dues à la présence des nuages ainsi que l'approche statistique utilisée pour sélectionner les scènes à empiler ne sont pas tout à fait fonctionnelles. Ceci a pour conséquence la prise en compte de valeurs anormales d'élévation, principalement, dans les produits où le nombre de scènes utilisées est inférieur ou égal à trois. Lorsque c'était possible, des MNS existants ont été utilisés pour remplacer les anomalies présentes dans ASTER GDEM. Les données de référence utilisées sont décrites dans le Tableau 7.

Tableau 7: Données de références utilisées pour remplacer les anomalies [LINES, 2009].

MNS	Couverture	Résolution de capture	Code
SRTM V3 (90% de vides remplis)	60°N à 60°S	3 arcs secondes	-1
SRTM V2	60°N à 60°S	3 arcs secondes	-2
NED	USA	1 arc seconde	-5
CDED	Totalité du territoire Canadien	3 arcs secondes pour la latitude; 3, 6 ou 12 arcs secondes pour la longitude	-6
Alaska DEM	Totalité du territoire d'Alaska	2 arcs secondes	-11

Les données du fichier d'évaluation de la qualité sont en grande majorité des nombres positifs et correspondent au nombre de scènes utilisées pour créer le MNS final. Les valeurs négatives quant à elles, correspondent aux données de références utilisées pour remplacer les anomalies [LINES, 2009].

c. Précision, avantages et inconvénients

Selon HIRANO *et al.* [2003], la précision verticale des données ASTER GDEM, calculée grâce à la RMSE, est comprise entre 7 et 15 m. Cependant, d'autres sources indiquent qu'elle est globalement de 20 m [TIGHE & CHAMBERLAIN, 2009] nonobstant la présence locale de certaines tuiles arborant une précision supérieure ou inférieure à cette valeur [IWAO *et al.*, 2008; LINES, 2009]. De plus, une étude ayant comparé plusieurs MNS dont ASTER a montré que la précision de ce dernier était fortement affecté dans les milieux de pentes supérieurs à 10° [HUGGEL *et al.*, 2008 ; TIGHE & CHAMBERLAIN, 2009].

L'avantage principal d'ASTER est la présence des deux télescopes qui permettent l'acquisition des paires stéréoscopiques en quelques secondes. Les images présentent alors les mêmes conditions environnementales et de luminosité augmentant ainsi leur qualité pour la production de MNS [HIRANO *et al.*, 2003].

Les inconvénients principaux sont le manque de précision et le cycle de passage relativement long (16 jours). De plus, la qualité des données est affectée par le relief [GAO, 2007] et par la présence de nuage [KERVYN *et al.*, 2006]. En outre, les produits ASTER présentent de nombreux artefacts dus au manque de scène utilisé pour leur création. Toutefois, ces données présentent l'avantage d'être accessibles au complet à des prix très abordables.

d. Utilisations

Les produits ASTER ont fait l'objet de différentes études afin de déterminer leur possibilité d'utilisation dans différents domaines. Ainsi, GEBRESLASIE *et al.* [2010], qui ont déterminé une formule permettant d'estimer la hauteur de la végétation à partir des images ASTER dans des plantations forestières en Afrique du Sud. FELDSPAUCH *et al.* [2006] se sont intéressés pour leur part à l'estimation de la quantité de biomasse en forêt amazonienne. Cependant, peu d'études ont été réalisées à ce jour concernant l'utilisation des produits ASTER pour la caractérisation du relief.

3. Objectifs de l'étude

Les paragraphes précédents illustrent l'engagement et le rôle avant-gardiste joué par la CEB dans la gestion durable des forêts gabonaises. Toutefois, nous avons pu constater qu'un aspect important dans la réalisation de l'exploitation était susceptible d'être amélioré. Il concerne la détermination du tracé du réseau routier. Celui-ci représente une phase cruciale de l'exploitation forestière.

Cette opération nécessite la connaissance préalable du relief et donc l'utilisation de cartes topographiques. Ceci, en vue de la réalisation d'un tracé optimal en évitant au maximum les zones de relief accidenté ou les fonds de vallée. Or, les cartes utilisées par la société ne remplissent pas les conditions nécessaires de qualité pour garantir la réalisation d'un tel travail de précision : d'une part, elles sont produites à une échelle trop petite (1/200.000^{ème}) et d'autre part, elles comportent de trop nombreuses erreurs, en raison de la présence de nuages lors des prises de vues aériennes qui ont servi à les produire.

Actuellement, de plus en plus de produits issus de la télédétection tels que les MNS sont accessibles au public et offrent des informations concernant le relief pour l'ensemble des terres émergées. Les principales réalisations connues à ce jour sont les MNS ASTER et SRTM. Malgré leurs résolutions relativement grossières (30 m pour ASTER et 90 m pour SRTM), ils présentent un intérêt potentiel pour la production de cartes de pentes et de ce fait pour la planification du réseau routier.

Par ailleurs, les informations récoltées au cours des recherches bibliographiques ont montré que l'utilisation des images satellitaires telles que SRTM et ASTER n'a pas, à ce jour, été envisagée dans des régions équatoriales d'Afrique Centrale telles que le Gabon. Par conséquent, il n'est pas possible de se baser sur les données issues d'articles concernant des régions complètement différentes.

L'objectif principal de ce travail est donc d'étudier les possibilités d'utilisation de MNS produit par télédétection satellitaire en vue de la gestion durable des ressources ligneuses et, plus particulièrement, dans le tracé du réseau routier pour l'exploitation forestière à la CEB (Gabon). Pour ce faire :

Cette étude envisage l'utilisation de deux sources de données distinctes, à savoir : le Modèle Numérique de Surface SRTM (issu d'imagerie radar) et le Modèle Numérique de Surface ASTER GDEM (issu d'imagerie optique).

Les informations issues des MNS seront comparées à un jeu de données provenant de mesures de terrain. La précision des MNS ainsi que le biais existant entre ceux-ci et les données de référence seront estimés grâce à différentes analyses statistiques.

Les erreurs existantes au sein des MNS seront mises en évidence et diverses techniques seront évaluées afin de les éliminer ou de les atténuer. Un rééchantillonnage visant à améliorer la résolution du MNS SRTM sera également réalisé.

4. Méthodologie

4.1. Avant-propos

Préalablement à la réalisation du travail au Gabon, une phase de terrain a été effectuée dans la région de Trois-ponts en Belgique. Cette zone a été sélectionnée car elle présente un relief relativement accentué s'approchant de celui qui pouvait être rencontré au Gabon. Les relevés ont été réalisés sur une période de deux jours et ont permis d'éprouver la méthodologie de collecte des données. Il a ainsi été possible d'améliorer la fiche de terrain afin de la rendre plus efficiente. Cette première phase a également permis de préciser les modalités d'encodage des données brutes et de prétraitements de celles-ci.

4.2. Logiciels utilisés

La CEB utilise le logiciel MapInfo[®] Professional pour le traitement des données géographiques. Cependant, ce format de fichier n'est pas compatible avec le logiciel Arcgis[®] version 9.2 employé dans le cadre de cette étude. La conversion des données a été réalisée à l'aide du logiciel open source Quantum Gis Enceladus version 1.4.0 [OSGEO, 2002].

La préparation des cartes de classes de pentes, le choix des points d'échantillonnage ainsi que l'élaboration des cartes ont été réalisés grâce au logiciel Arcgis[®] version 9.2 de la firme ESRI [ESRI, 2010].

Les données utilisées dans le cadre de ce travail ont été encodées dans une base de données Microsoft Office Access[®]. Leurs traitements ont été effectués, en partie, grâce à l'application Visual Basic for Application (VBA) sous Access[®] et Excel[®] [MICROSOFT CORPORATION, 2010].

Afin de réaliser les analyses statistiques, le logiciel Minitab[®] Statistical Software [MINITAB INC., 2007] ainsi que le tableur Microsoft Office Excel[®] [MICROSOFT CORPORATION, 2010] ont été utilisés.

4.3. Méthodologie générale

La méthodologie générale de ce travail est représentée dans la Figure 7. Outre la détermination des zones d'études (qui représente une étape à elle seule), la méthodologie peut être divisée en trois étapes principales : l'acquisition et le prétraitement des MNS, l'acquisition des données de terrain et enfin, la phase d'analyses.

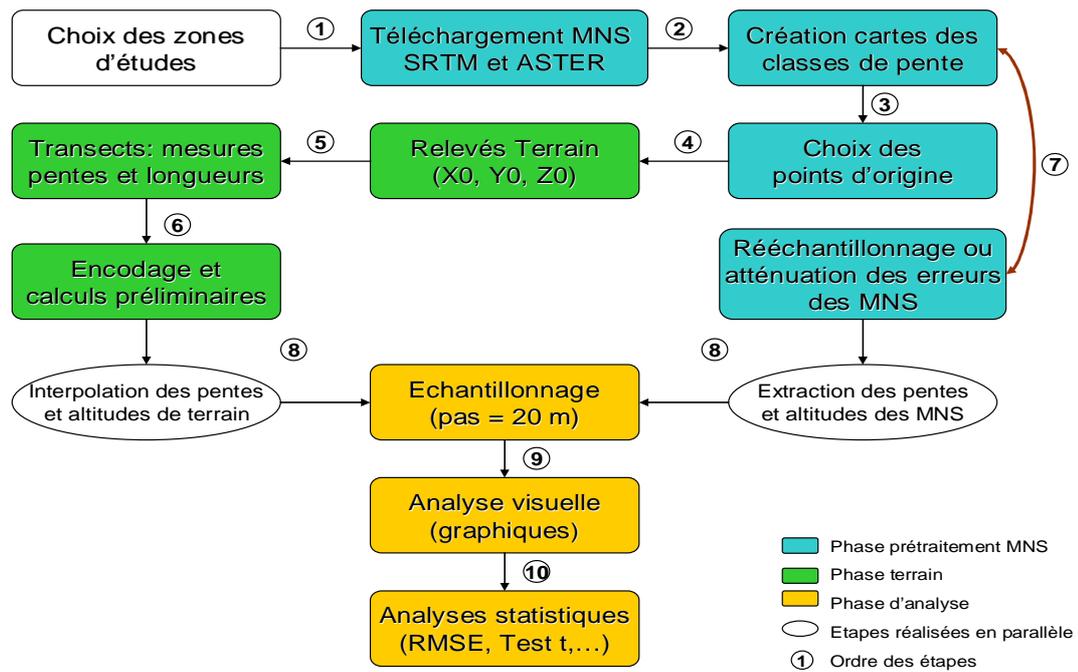


Figure 7: Ordigramme de la méthodologie générale.

4.3.1. Acquisition et prétraitement des MNS

Cette étape est représentée par la couleur bleue sur la Figure 7. Elle reprend le téléchargement des MNS ASTER GDEM et SRTM couvrant les zones d'étude. Au départ de ces derniers, des cartes de classes de pentes sont créées et servent de support au choix des points d'origine. Enfin, cette étape inclut également les essais de rééchantillonnage et d'atténuation des erreurs effectués sur les MNS.

4.3.2. Acquisition des données de terrain

La phase d'acquisition des données de terrain est symbolisée par la couleur verte (Figure 7). Cette phase permet l'acquisition des coordonnées des points d'origine des transects ainsi que des données de pentes et de longueurs sur ces transects. Les données sont ensuite encodées et subissent une série de calculs préliminaires visant à obtenir des informations pour chaque point de relevé.

4.3.3. Phase d'analyses

Préalablement à la phase d'analyses à proprement parler, un échantillonnage est réalisé afin d'homogénéiser le jeu de données. Cet échantillonnage nécessite la réalisation conjointe de deux étapes, d'une part, les relevés de terrain sont interpolés selon un pas moyen et d'autre part, les données issues des MNS sont extraites selon ce même pas. Ensuite, les analyses visuelles et statistiques peuvent être réalisées (couleur orange dans la Figure 7).

4.4. Description des zones d'études

4.4.1. Méthode de détermination des zones d'études

La CEB s'étend sur plus de 600.000 ha. Il était donc impossible de couvrir l'entièreté de cette surface sur le temps imparti à la réalisation de ce travail. C'est pourquoi, deux zones d'études ont été choisies. Elles ont été déterminées selon deux critères principaux : le relief et la logistique.

4.4.1.1. *Le relief*

Les zones d'études ont été déterminées de manière à être caractérisées au maximum par une topographie accidentée. Cependant, afin d'obtenir un jeu de données hétérogène englobant au maximum les différents types de reliefs présents, il a été décidé qu'une proportion des points se trouverait en zone plate.

4.4.1.2. *La logistique*

En raison des contraintes logistiques, le travail a été mené dans des AAC en cours d'exploitation ou n'ayant pas encore été exploitées mais se trouvant à proximité du lieu actuel d'exploitation. En effet, ne disposant pas de véhicule, la meilleure solution pour se rendre sur le terrain était d'accompagner les équipes d'exploitation. De plus, afin d'optimiser le temps de travail, les relevés ont été effectués sur les layons d'inventaires. Il était donc nécessaire que ceux-ci soient visibles. Or, dans les AAC déjà exploitées, ils sont moins praticables et discernables du fait de l'envahissement de la végétation et des arbres abattus les obstruant.

Les deux zones choisies se trouvent respectivement dans les sites d'exploitation de Milolé et d'Okondja. Pour simplifier la compréhension elles porteront ces noms. Leur description est donnée dans les paragraphes suivants.

4.4.2. Milolé

Le site de Milolé se situe au Nord-Ouest de la concession forestière de la CEB. Les mesures ont été réalisées dans les AAC 2008 et 2009 (Figure 8). Elles se caractérisent par un relief relativement accidenté et une forêt de type « forêt âgée à bois divers et okoumé » (FAOK) (voir 2.2.2.2).

4.4.3. Okondja

La zone d'Okondja se situe à l'Est de la concession. Le relief y est moins accidenté qu'à Milolé mais on y observe la présence de fortes pentes locales. Les relevés ont été effectués dans les AAC 2009 et 2010 (Figure 8). La première se trouve dans une « jeune forêt à okoumé » (FJOK) et la seconde se situe en « forêt âgée à bois divers sans okoumé » (FAssOK) (voir 2.2.2.2).

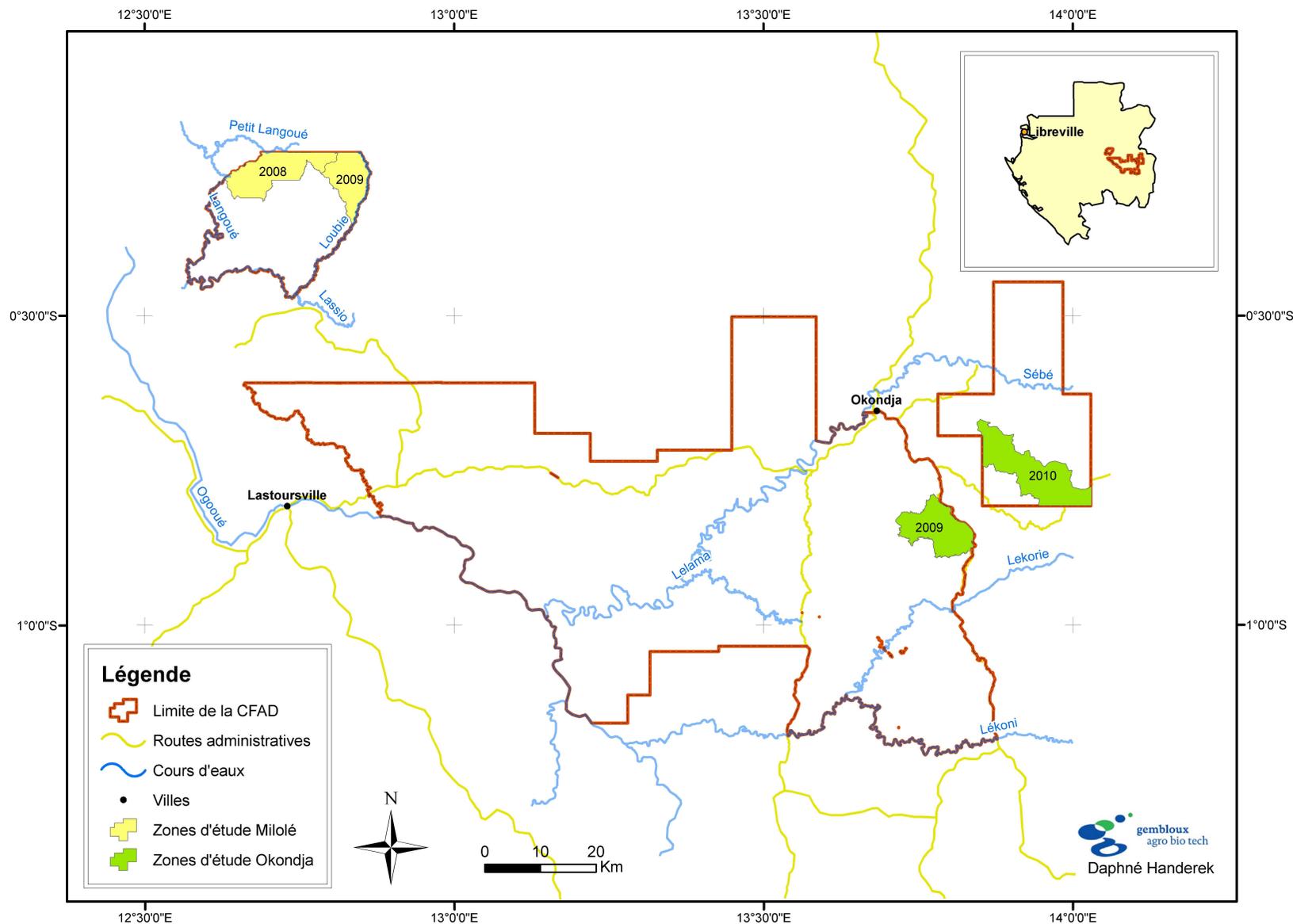


Figure 8: Localisation des zones d'étude au sein de la concession forestière de la CEB.

4.5. Préparation des cartes dérivées des MNS

4.5.1. Cartes des classes de pentes dérivées des MNS SRTM et ASTER GDEM

La production de ces cartes nécessite au préalable le téléchargement des MNS SRTM et ASTER GDEM sur internet². En ce qui concerne les MNS SRTM, une seule tuile (version 4.1.) couvre l'ensemble des zones d'études ; par contre pour ASTER GDEM, deux tuiles sont nécessaires. Les deux types de MNS sont reprojétés dans le système UTM-WGS84 33S correspondant à la zone d'étude.

La production des cartes des pentes est réalisée au moyen de l'outil Slope de l'extension Spatial Analyst (Arcgis®). Ces dernières peuvent, ensuite, être remaniées afin de déterminer des classes de pentes selon un intervalle constant qui est de 5° dans notre cas.

4.5.2. Choix des points d'origine

Le choix des points d'origine pour la réalisation des transects de terrain se base sur trois critères.

Premièrement, ils sont sélectionnés uniquement sur les layons d'inventaires. Ces derniers présentent une maille de 3 km de long sur 200 m de large. Ils s'orientent soit du Nord au Sud soit d'Est en Ouest. Ces layons présentent le double avantage, (i) de permettre un accès relativement aisé aux points d'origine et (ii) d'exister sous forme de couche cartographique.

Le deuxième critère est la proximité des points par rapport à la route. Pour ce faire, une zone tampon de 200 m a été réalisé de part et d'autre des routes, afin d'éviter une perte de temps liée à la distance à parcourir pour atteindre les sites à échantillonner.

Enfin, les points sont choisis afin d'être représentatif des conditions de terrains c'est-à-dire qu'ils couvrent l'ensemble des classes de pentes pouvant être rencontrées. Ces dernières sont déterminées grâce aux cartes des classes de pentes produites à partir des MNS ASTER GDEM puisqu'*a priori* ils possèdent une meilleure résolution que les MNS SRTM.

Lorsque les points sont identifiés, leurs coordonnées géographiques sont chargées dans un GPS.

² Adresses URL pour le téléchargement des MNS SRTM : <http://srtm.csi.cgiar.org> et ASTER GDEM : <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/> (dernière consultation le 08 Juillet 2010).

4.5.3. Prétraitements des MNS

4.5.3.1. Rééchantillonnage des MNS SRTM

Contrairement à ASTER (30 m), le MNS SRTM présente une résolution de 90 m. Il y aura donc un effet de palier marqué lors de la représentation graphique des données issues de ces deux MNS. Le rééchantillonnage par interpolation du MNS SRTM n'apporte pas une meilleure précision mais a pour objectif d'homogénéiser les données et limiter cet effet de palier.

L'interpolation repose sur un principe important en géographie appelé l'autocorrélation spatiale qui considère que des objets rapprochés dans l'espace tendent à posséder des caractéristiques similaires. Le krigeage (en anglais : kriging) est une méthode d'interpolation locale qui utilise cette loi. Les valeurs inconnues sont estimées à partir d'un voisinage de points échantillonnés. Cette méthode a également été testée par GROHMANN & STEINER [2008] en vue de rééchantillonner des MNS SRTM 90 m à 30 m et nous avons utilisés les données provenant de cette article en vue de la réalisation du krigeage dans ce travail.

4.5.3.2. Estimation de la qualité des MNS ASTER GDEM

Comme nous l'avons vu précédemment (voir 2.3.2.4.b), les MNS ASTER sont créés à partir d'un ou de plusieurs couples stéréoscopiques et parfois corrigés en utilisant d'autres MNS. Le « fichier d'évaluation de la qualité » associé à chaque image ASTER rend compte de ces informations en leur attribuant un code numérique (-1, 1, 2, etc.). Ce dernier sera considéré comme une catégorie et sera déterminé pour chaque point de relevé. Ensuite, un pourcentage de points par catégorie sera calculée ce qui permettra d'obtenir une évaluation de la qualité des MNS ASTER GDEM pour les zones étudiées.

4.5.3.3. Correction des artefacts présents dans les MNS ASTER GDEM

Les MNS ASTER GDEM présentent de nombreux artefacts donnant des valeurs d'élévation aberrantes, probablement dues à la présence de nuages lors l'acquisition des données. Afin d'améliorer la qualité de ces images, nous avons tenté d'éliminer ces erreurs en les remplaçant par des valeurs provenant d'images SRTM. Pour ce faire, une application écrite en VBA sous Excel® a été créé. Nous avons constaté que les erreurs n'apparaissaient qu'au-delà de certaines valeurs de pentes s'approchant toutes des 20°. De plus, elles présentent sur la carte des classes de pentes des formes relativement proches de celle du cercle. C'est pourquoi, le repérage des erreurs prend en compte le rapport du périmètre sur la surface que nous avons fixé à 2. Le programme détecte alors les artefacts ayant un rapport périmètre sur surface maximal de 2 et une pente supérieures à 20° et les remplace par les données SRTM correspondantes.

4.6. Acquisition des données de terrain

4.6.1. Repérage des points d'origine

Le repérage des points d'origine sur le terrain a été réalisé au moyen d'un GPS Garmin® 60 Csx. Etant donné que les layons théoriques ne correspondent pas toujours à la réalité de terrain, lorsqu'un point est atteint, ses coordonnées sont réenregistrées à l'aide du GPS.

4.6.2. Réalisation des transects

A partir d'un point d'origine, l'équipe de terrain réalise des transects dans deux directions. Ces directions dépendent de l'orientation des layons d'inventaire. Un transect a une longueur de 500 m afin de couvrir au moins la longueur de 5 pixels de 90 m (SRTM). Le long de ces transects, des relevés de pente sont réalisés. La distance séparant chaque relevé dépend principalement des conditions *in situ* telles que le relief ou encore la visibilité. Elle est mesurée à l'aide d'un topofil. Cette distance est la longueur réelle parcourue et il est important de la corriger en fonction de la pente afin d'obtenir la distance horizontale qui permet de couvrir 500 m sur la carte (voir 4.6.3). Arrivés en fin de transect, les opérateurs parcourent le chemin en sens inverse jusqu'à se retrouver au point d'origine. Ensuite, la même démarche est appliquée à l'orientation opposée. La Figure 9 donne un schéma du cheminement parcouru lors de la réalisation des transects.

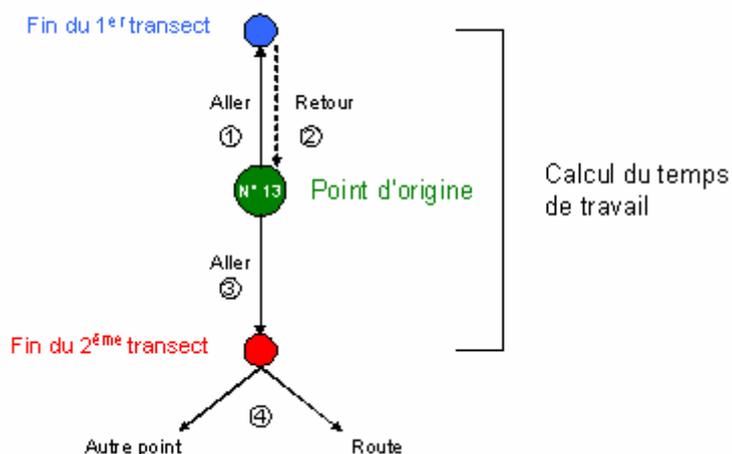


Figure 9: Schéma du cheminement parcouru lors de la réalisation des transects.

4.6.3. Mesures des pentes et correction de la longueur

La mesure des pentes est réalisée au moyen d'un clinomètre Suunto. Le principe du clinomètre est relativement simple puisqu'il nécessite le positionnement de l'opérateur à une distance suffisante d'un repère d'une hauteur atteignant plus ou moins le niveau de ses yeux. Il vise ce repère avec le clinomètre et il lit directement la pente en degrés ou en pourcentage.

En utilisant cette technique, outre l'erreur due à l'utilisateur, aucune erreur supplémentaire n'est introduite lors de la mesure de la pente [SUUNTO, 2006].

Lors de la phase de terrain, l'estimation de la distance horizontale est importante. En effet, cette distance permet de faire le lien entre les données relevées *in situ* et les MNS. Elle se calcule en multipliant la distance parcourue sur le terrain par le cosinus de la pente en degrés. La Figure 10 illustre les données à prendre en compte dans le calcul.

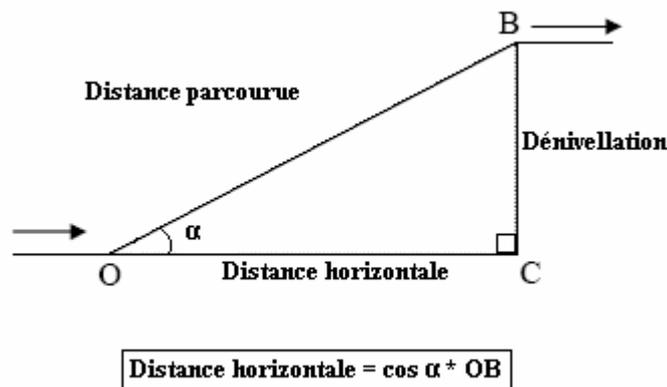


Figure 10: Schéma des données nécessaires au calcul de la distance horizontale.

Où :

α est la pente en degrés

OB est la distance parcourue

Une table de correction des distances a été réalisée. Celle-ci reprend les pentes et les distances parcourues et présente, pour chacune des combinaisons possibles, la longueur à ajouter pour parcourir la distance horizontale nécessaire à la réalisation du transect. Cette phase est systématiquement appliquée entre chaque mesure.

4.6.4. Fiche de terrain et données récoltées

Les différentes données récoltées sont consignées sur une fiche préétablie. Un exemplaire de cette fiche se trouve à la Figure 11.

Le cadre supérieur reprend les informations générales relatives à la caractérisation du point d'origine. Il précise les coordonnées x et y, le lieu, l'assiette annuelle de coupe (AAC) dans laquelle se situe le point, ainsi que l'identifiant du point d'origine. De plus, la date du relevé et les heures de début et de fin du travail sont également annotés. La section « Typologie » identifie également le point selon le lieu où il se situe (forêt, route, rivière, etc.) et la section « Position » caractérise le point selon sa situation topographique (sommet, fond de vallée, versant, etc.). Enfin, les noms des opérateurs réalisant les mesures de pentes et de distances sont notés respectivement aux sections « Clino » et « Topofil ».

Fiche de terrain		Date :
X : _____	Y : _____	
Lieu : _____	AAC : _____	N° pts : _____
Typologie : _____		
Position : _____		
Heure début : _____	Opérateurs : Clinomètre _____	
Heure fin : _____	Topofil _____	

Orientation :			
N°	Pente (°)	L (m)	L corr (m)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			

Orientation :			
N°	Pente (°)	L (m)	L corr (m)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			

Remarques :

--

Figure 11: Fiche de terrain.

La deuxième partie de la fiche contient deux tableaux permettant de consigner les mesures de pentes et de distances pour les deux orientations du transect. Enfin, un encadré « remarques » se trouve en bas de page afin d'y annoter diverses observations.

4.6.5. Encodage

Les données récoltées sont encodées sous Microsoft Access[®] où deux tables sont créées. La première est une table descriptive des points d'origine et est nommée « Dico_point ». Elle reprend les informations figurant dans le cadre supérieur de la fiche de terrain telles que les coordonnées x, y et z, l'identifiant du point, la date et le temps mis à parcourir le transect. La deuxième table (« Points_terrain ») concerne, quant à elle, les informations caractérisant les points de relevés desquelles on peut citer l'orientation, l'identifiant du point d'origine, la pente et la distance réelle parcourue.

4.6.6. Calculs préliminaires

A partir des informations de terrain récoltées, de nouvelles données sont calculées dans Access[®] grâce à une application écrite en VBA. La pente en radians ainsi que la longueur réelle parcourue entre chaque point de relevé (LR) sont calculées. La longueur horizontale (LH), le dénivelé (H) et leur valeur cumulée sont déterminées respectivement dans les colonnes « LH_cum » et « H_cum ». Enfin, grâce à ces données et aux coordonnées des points d'origine, les valeurs x, y et z pour chaque point ont été calculées.

Suite à ces prétraitements, nous avons obtenus les coordonnées x, y et z pour chaque point d'échantillonnage (relevé). La localisation de ces derniers ainsi que celle des points d'origine sont présentées dans les Figure 12 et Figure 13 suivantes. Nous constatons d'ors et déjà que les points se trouvant le long d'un même transect ne sont pas indépendant. En effet, le calcul des coordonnées des points de relevé s'est basé sur les coordonnées du point d'origine. Il est donc important de ne pas négliger cet aspect lors d'une part des analyses visuelles, où un décalage entre les courbes peut être observé en raison de la précision avec laquelle les coordonnées d'origine ont été relevées, et d'autre part, des analyses statistiques, où les tests doivent être adaptés à des points dépendant et où une erreur due à la précision du GPS sera présente.

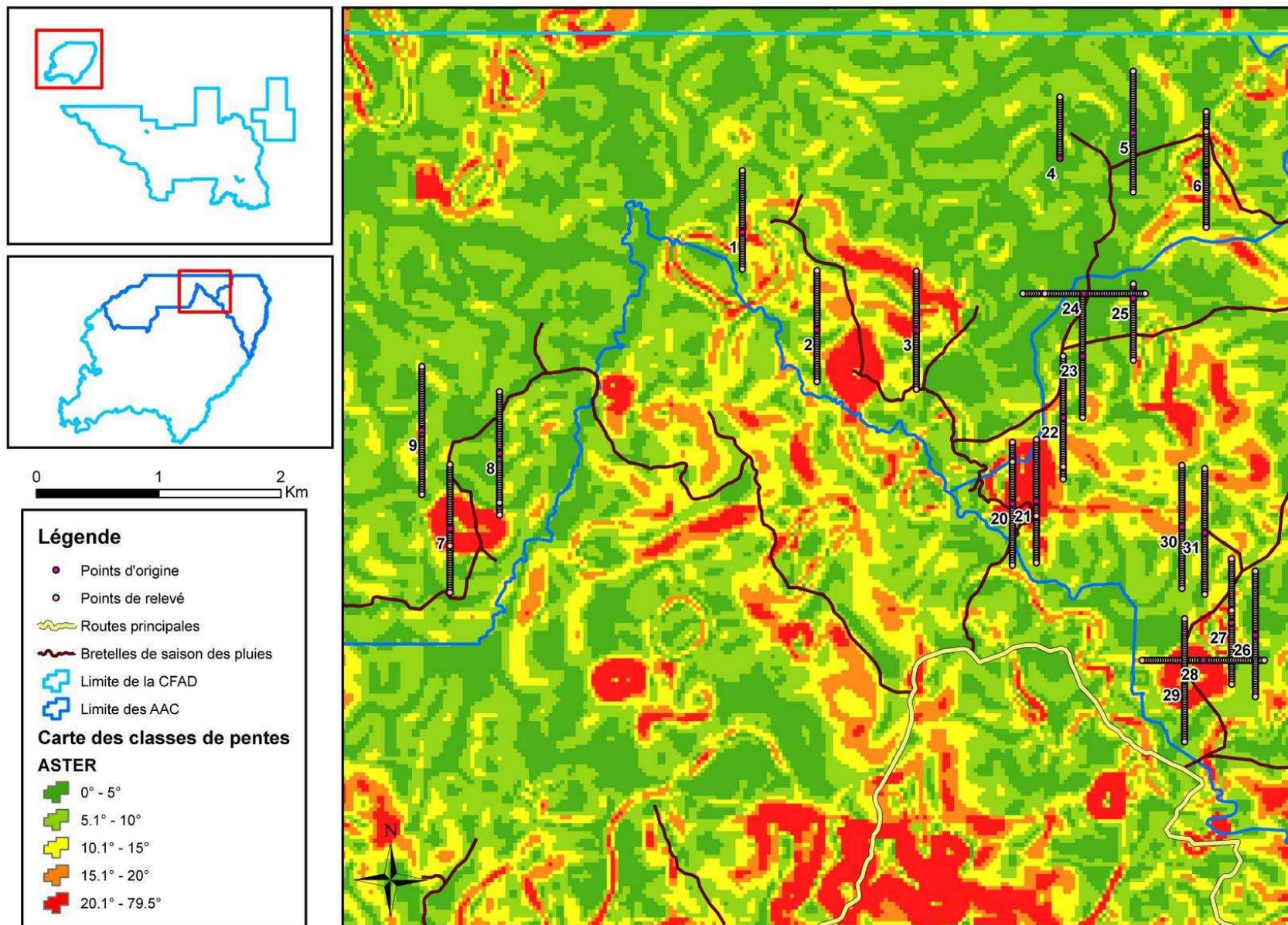


Figure 12: Carte de distribution des points d'origine selon les classes de pente déduites des MNS ASTER. Zone de Milolé.

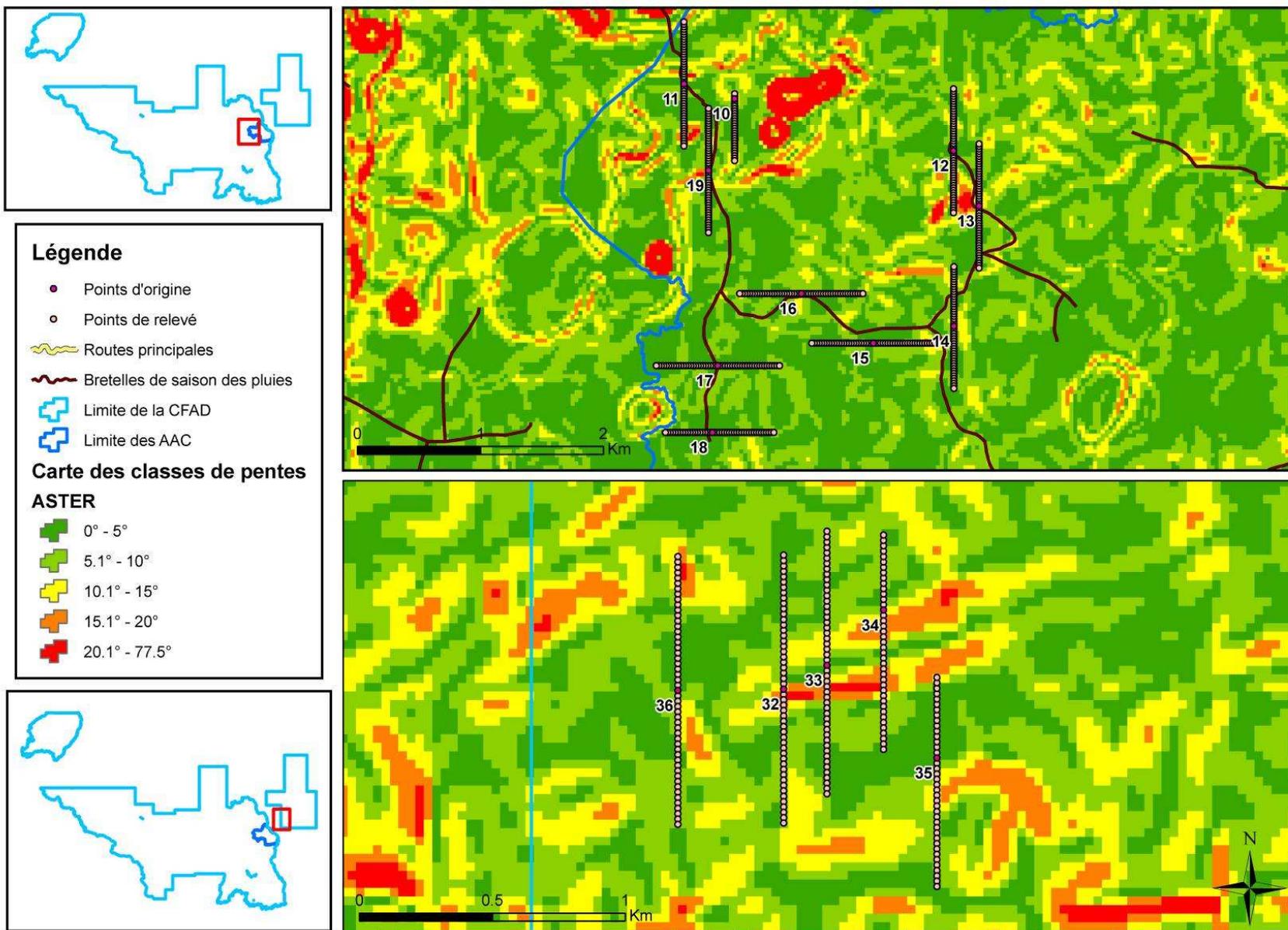


Figure 13: Carte de distribution des points d'origine selon les classes de pentes déduites des MNS ASTER. Zone d'Okondja.

4.7. Analyse de la qualité des cartes de pentes

4.7.1. Echantillonnage des points pour l'analyse

4.7.1.1. Définition d'un pas pour la sélection des points

Afin d'harmoniser le jeu de données utilisé pour l'analyse, il a été décidé de déterminer un pas de référence selon lequel les points utilisés pour les tests statistiques seront sélectionnés le long des transects. Celui-ci a été fixé à 20 m, en considérant que la moyenne de toutes les distances parcourues entre chaque relevé était de 21 m.

4.7.1.2. Interpolation des valeurs de pentes et d'altitudes

Une valeur interpolée des pentes et des altitudes de terrain a été calculée en fonction de ce pas. Pour ce faire nous avons réalisé un code VBA sous Access[®]. Celui-ci permet une automatisation des différents calculs et apporte une facilité de gestion des opérations en cas de changement de la valeur du pas.

4.7.1.3. Valeurs issues des MNS

Les données d'altitudes provenant des MNS ont été obtenues grâce à l'outil « extract values to point » du logiciel Arcgis[®]. Ce dernier permet d'extraire pour chaque point de relevé les valeurs d'altitudes issues des MNS qui y sont associées.

En ce qui concerne les valeurs de pentes, deux méthodes ont été utilisées : l'outil « slope » du logiciel Arcgis et une méthode d'interpolation des pentes à partir des altitudes des MNS.

L'outil « slope » permet, au départ d'un raster d'altitudes, de créer un raster de pentes. Le calcul de la pente pour un pixel est réalisé grâce à un algorithme qui prend en compte le rapport maximal de changement entre le pixel central et ses 8 voisins Figure 14.

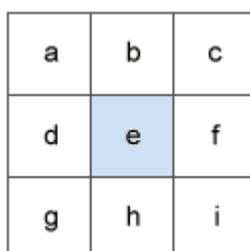


Figure 14: Schéma d'un pixel central (e) et de ses 8 voisins.

La formule utilisée par le programme est donnée ci-dessous.

$$Pente (^{\circ}) = \text{Arctg} (\sqrt{[dz/dx]^2 + [dz/dy]^2}) * 180/\pi$$

Avec :

$$[dz/dx] = ((c + 2f + i) - (a + 2d + g)) / (8 * \text{taille des pixels})$$

$$[dz/dy] = ((g + 2h + i) - (a + 2d + c)) / (8 * \text{taille des pixels})$$

Le résultat de l'utilisation de cette méthode fournit donc la pente maximale selon un pixel central et ses 8 voisins.

La *méthode d'interpolation des pentes* au départ des altitudes des rasters, quant à elle, ne prend en compte que les pixels sur lesquels les points de relevés sont présents. Ces pixels sont représentés en blanc sur la Figure 15, les pixels hachurés en rouge ne sont pas inclus dans les calculs.

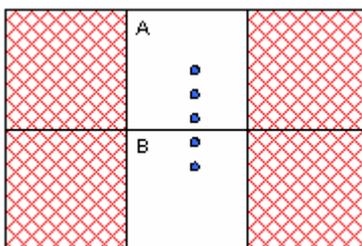


Figure 15: Schéma des pixels pris en compte dans le calcul de la pente "directionnelle".

La pente pour un point de relevé est calculée en fonction de la différence des altitudes entre deux pixels contigus et le résultat obtenu est donc une pente « directionnelle ». Les calculs ont été réalisés sous Access et la formule utilisée est la suivante :

$$Pente (^{\circ}) = \text{Arctg} ((\text{altitude A} - \text{altitude B}) / (\text{taille des pixels})) * 180/\pi$$

4.7.2. Analyse visuelle

A partir des données homogénéisées, un code VBA sous Excel[®] a été créé permettant pour chaque point la création de graphiques des altitudes et des pentes. Ceux-ci permettent une analyse visuelle de la précision des MNS par rapport à la réalité de terrain. De plus, ils offrent la possibilité d'apprécier la qualité des différentes corrections apportées.

4.7.3. Analyses statistiques

4.7.3.1. Test *t* d'égalité de deux moyennes

Le test *t* d'égalité de deux moyennes associées par paires permet de comparer la mise en évidence de l'existence d'un biais moyen entre deux méthodes. Cependant, il n'apporte pas d'informations sur la précision ni sur la présence d'éventuelles différences locales. Enfin, il faut garder

à l'esprit que même si le test montre une différence statistique significative entre les deux méthodes, il peut ne pas y avoir de différence d'un point de vue pratique [BOWER, 2001].

Ce test peut être réalisé en calculant les différences :

$$d_i = x_i - y_i, \dots, x_n - y_n,$$

et la quantité :

$$t_{obs} = |x-y|/\sqrt{[SCE_d/(n(n-1))]},$$

où SCE_d est la somme des carrés des écarts des différences d_i ; x et y sont les valeurs de pentes ou d'altitudes de terrain et provenant d'un des MNS et n est le nombre total de relevés.

En ce qui concerne les conditions d'applications, cette méthode nécessite uniquement que les n couples d'observations constituent un échantillon aléatoire et simple, et que la population des différences soit normale. Toutefois, cette dernière condition est d'importance secondaire lorsque l'effectif est important.

4.7.3.2. RMSE

La RMSE ou Root Mean Square Error permet de déterminer la précision des MNS ainsi que de rendre compte des écarts entre les jeux de données. Elle se calcule grâce à l'expression suivante :

$$\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 / (n - 1)]}$$

avec n , le nombre total de données ; x_i , la $i^{\text{ème}}$ observation de la première méthode (données de terrain) et y_i , la $i^{\text{ème}}$ observation de la deuxième méthode (données ASTER ou SRTM).

Cette statistique représente un écart-type, c'est-à-dire la dispersion moyenne entre deux jeux de données. Elle combine l'estimation du biais et de la dispersion. En effet, plus la valeur obtenue est importante, plus l'adéquation entre les courbes est mauvaise. Le MNS le plus précis sera celui dont les données possèdent la RMSE la plus faible par rapport aux données de terrain.

La RMSE possède les mêmes unités que les données de départ c'est pourquoi, lorsque les altitudes des MNS sont comparées aux altitudes de terrain, elle sera exprimée en mètres. Elle permettra de déterminer la précision verticale d'un MNS. En ce qui concerne les pentes, la RMSE sera exprimée en degrés.

4.7.3.3. Matrice de confusion

La matrice de confusion est un outil servant à mesurer la qualité d'un système de classification. Une telle matrice compare la classification des pixels relative aux données de terrain à celle donnée par la carte (MNS). Trois types de précision peuvent en être déduits :

- La *précision globale* qui est le rapport du nombre de pixels bien classés sur le nombre de pixels testés.
- La *précision du producteur (PP)* est le pourcentage de pixels d'une classe de référence affectés à la même classe par la classification. Elle indique la probabilité qu'un pixel de référence (donnée de terrain) soit correctement classé sur la carte.
- La *précision de l'utilisateur (PC)* est le pourcentage de pixels d'une classe issue de la classification correspondant à la même classe dans les données de référence. Cette statistique est la probabilité qu'un pixel appartenant à une catégorie sur la carte se retrouve inévitablement dans cette même catégorie sur le terrain [LILLESAND *et al.*, 2004].

Les matrices seront réalisées afin de déterminer la précision de la classification des pentes des MNS par rapport à la réalité de terrain.

La Figure 16 donne le schéma d'une matrice de confusion et illustre les éléments à intégrer dans le calcul de la précision du consommateur et du producteur.

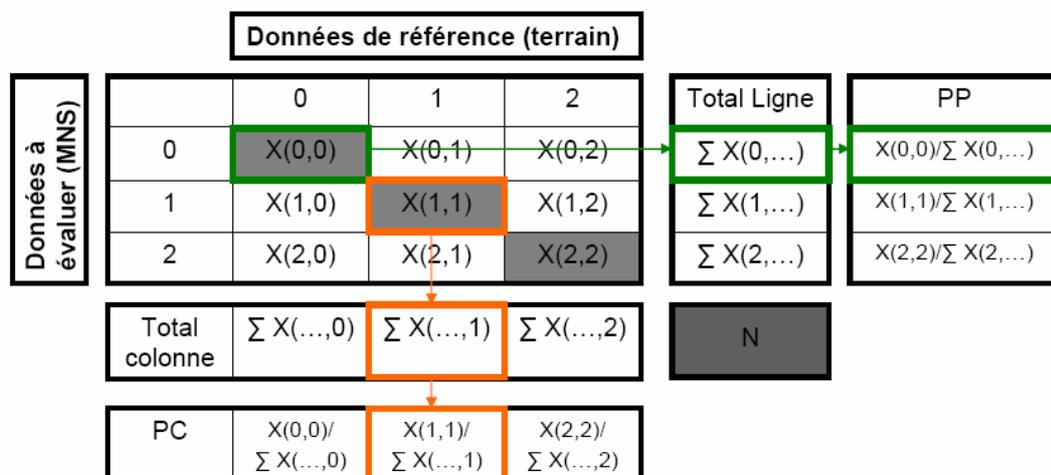


Figure 16: Schéma explicatif d'une matrice de confusion.

5. Résultats et discussions

5.1. Résultats préliminaires

Les recherches bibliographiques ainsi qu'une première ébauche de rédaction ont été effectuées au mois de juillet 2009. La phase de terrain, quant à elle, s'est étendue sur une période de deux mois, entre mars et mai 2010. Durant la campagne de relevés, 36 points d'origine ont été inventoriés.

5.2. Description de la base de données et des codes

La base de données comporte quatre tables : Dico_points, point_terrain, Calcul_pas et NUM_ASTER. Dico_points contient les renseignements relatifs aux points d'origine et point_terrain reprend les relevés de terrain ainsi que les données déduites par calculs qui y sont associées. Ces calculs ont été réalisés à l'aide d'un code VBA stocké dans les modules de la base de données (1Calcul_pt_terrain). La table Calcul_pas englobe l'ensemble des informations nécessaire à la production des résultats. Un deuxième code VBA y est associé (2Calcul_pas). Celui-ci permet d'une part d'effectuer les interpolations en vue d'homogénéiser le jeu de données et d'autre part d'automatiser l'extraction des valeurs provenant des MNS. La dernière table renferme les données relatives à l'évaluation de la qualité des MNS ASTER.

5.3. Analyses visuelles

En vue de permettre une analyse visuelle de la correspondance entre les mesures de terrain et les données issues des MNS, des graphiques ont été construits. Ces derniers présentent en abscisses les distances (en mètres) et en ordonnées les pentes (en degrés) ou les altitudes (en mètres). Le point d'origine est matérialisé par l'abscisse « zéro ». De part et d'autre de celui-ci, les données concernant les directions du transect sont représentées. On retrouve à gauche, les orientations Nord ou Ouest tandis que le coté droit ne concerne que les orientations Sud ou Est. Ces représentations graphiques permettent d'illustrer les différentes situations rencontrées. Afin de permettre l'automatisation de ces graphiques, une application écrite en VBA sous Excel a été réalisée.

5.3.1. Graphiques des altitudes

Le MNS ASTER montre de nombreux artefacts. La Figure 17A illustre ce phénomène. La courbe verte représente les données issues des MNS ASTER et la courbe rouge les relevés de terrain. Selon toute vraisemblance, un nuage présent au moment de la prise de vue par le satellite provoque l'apparition de valeurs d'élévations aberrantes. Les Figure 17B et Figure 17C illustrent le phénomène d'artefact sur les MNS ASTER respectivement des altitudes et des classes de pentes.

Les MNS SRTM sont composés de pixels de 90 x 90 m. La surface couverte par un de ces pixels possède une altitude correspondant à la moyenne de l'ensemble des altitudes présentes sur cette surface. Etant donné que le pas utilisé à la réalisation des graphiques est de 20 m, il est fréquent de voir apparaître des sortes de paliers lors de la construction des courbes SRTM. Nous appelons ce phénomène, l'effet de pixellisation et il est représenté à la Figure 18.

Cet effet est également présent dans les MNS ASTER, où il est cependant beaucoup plus atténué étant donné que la taille des pixels (30 m) est plus proche de la valeur du pas. Afin, entre autres, de réduire cet effet, nous avons rééchantillonné le MNS SRTM 90 m à une résolution de 30 m. Il en résulte un lissage des courbes mais ce dernier n'apporte pas de meilleure concordance avec les mesures de terrain (Figure 18).

Il arrive également que les données issues des MNS ne correspondent pas à la réalité de terrain. Ceci est relativement fréquent lorsque le relief est très variable sur une courte distance comme par exemple dans les vallons encaissés, étroits et relativement profonds. L'existence de l'épaisse canopée relativement uniforme, même si le relief est variable, empêche une bonne représentation du relief dans ces zones. Un tel exemple est montré à la Figure 19. Il est aisé d'observer que la réalité de terrain comporte une suite de vallons relativement proches et que les MNS ne les restituent pas correctement mais opèrent un lissage du relief.

In fine, en dehors des différents types d'erreurs rencontrés, nous avons constaté qu'en général le MNS SRTM, même s'il surestime les altitudes de terrain, suit la même allure que ces dernières.

5.3.2. Graphiques des pentes

En ce qui concerne les graphiques de pentes, deux types de graphes sont obtenus : d'une part, les profils issus de l'extraction des valeurs de pentes maximales calculées par l'outil « slope » d'Arcgis et d'autre part, les graphiques de pentes directionnelles calculées au départ des altitudes des MNS. Nous présentons ces graphiques en parallèle afin de rendre compte des différences entre les deux méthodes.

Avant toutes choses, signalons qu'une erreur systématique est engendrée suite à la détermination de la pente au point d'origine. En effet, celle-ci étant inconnue, nous lui avons attribué la valeur par défaut de 0° (Figure 20). De plus, les pentes provenant des MNS déterminées par l'outil « slope » sont toujours positives, ce qui engendre une relation positive pour la moitié des données et une relation négative pour l'autre.

Les graphiques des Figure 20 et Figure 21 montrent respectivement les profils des pentes obtenus par la méthode « outil slope » et par la méthode de calcul des pentes au départ des altitudes des MNS. La première observation est que cette dernière donne des pentes positives et négatives contrairement à celles obtenues via l'outil slope. Ceci offre une meilleure correspondance entre les données de terrain et les données issues des MNS. De plus, nous pouvons voir que l'écart entre les données est réduit sur ces graphiques et que l'allure des points est plus ou moins concordante. Remarquons que les erreurs dues aux artefacts ainsi que l'effet de pixellisation sont également présents dans les profils de pentes.

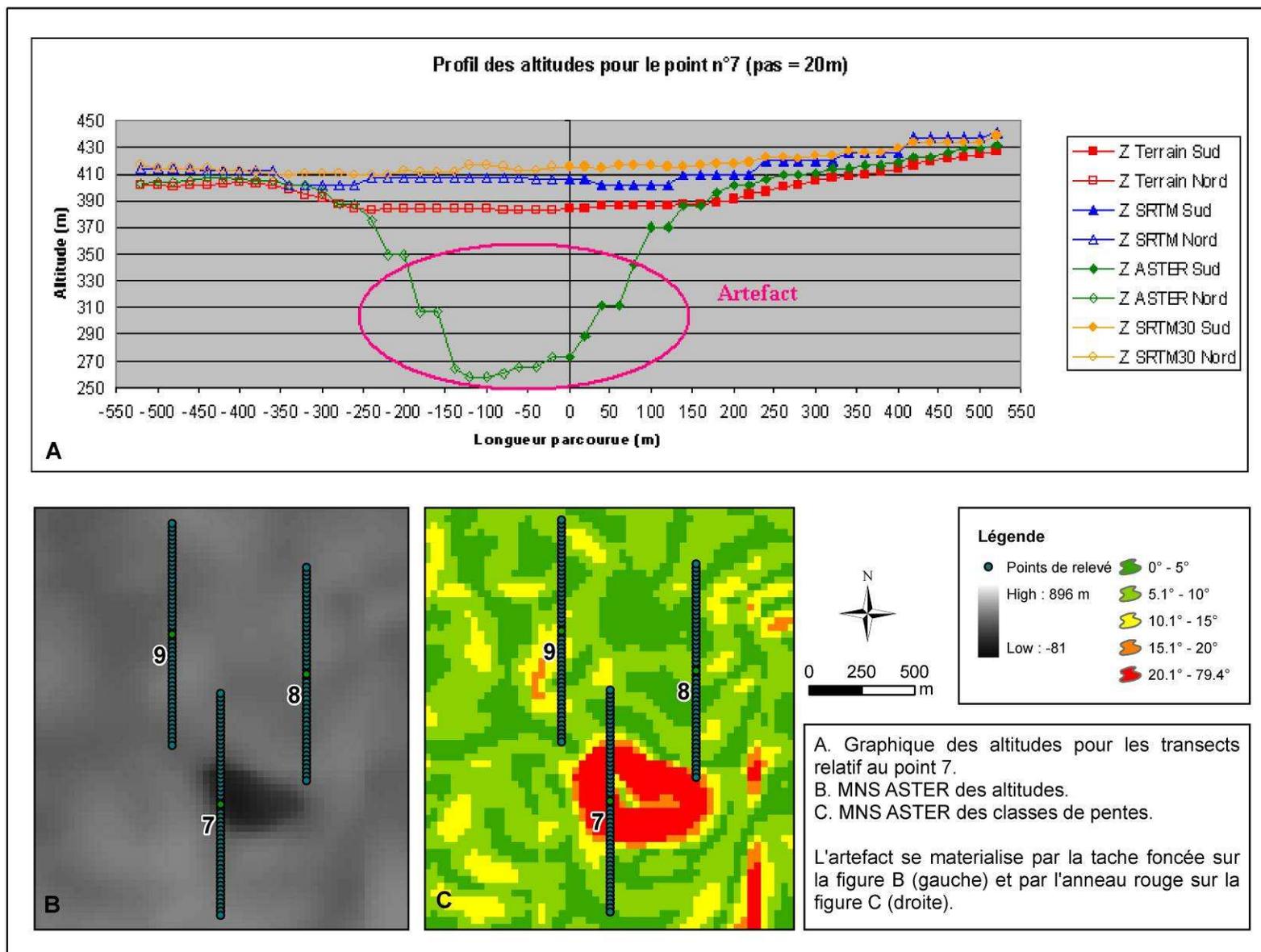


Figure 17: Illustration de la présence d'artefacts dans les MNS ASTER.

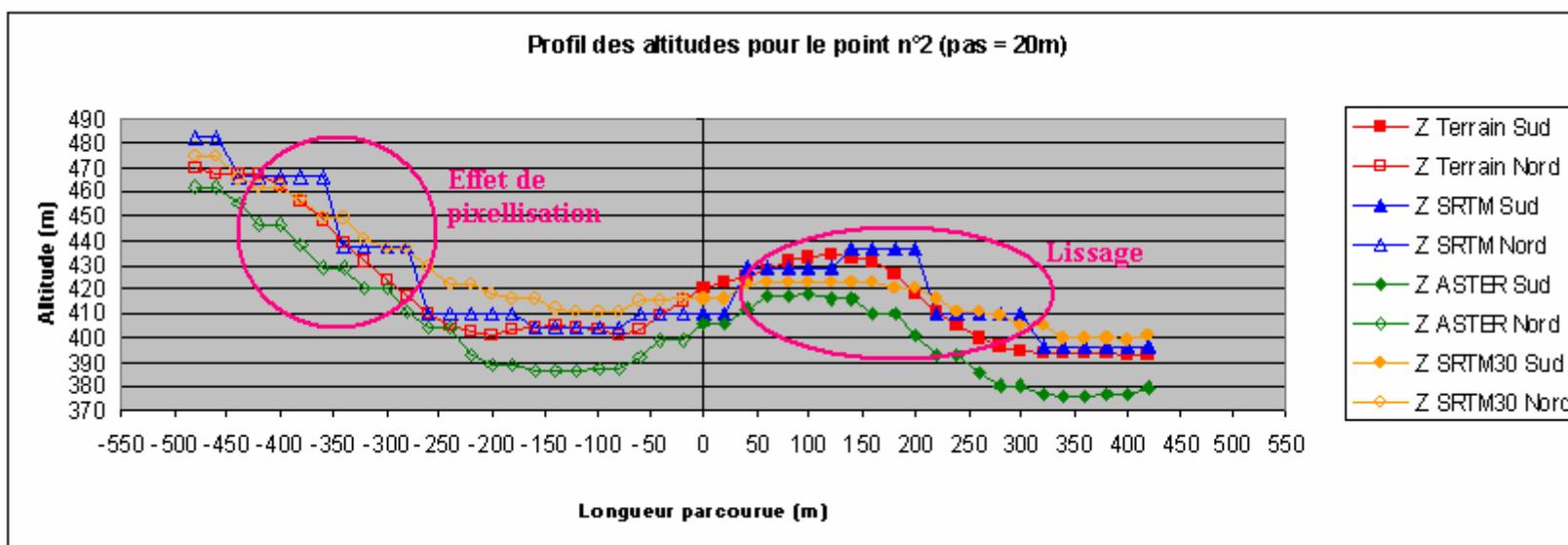


Figure 18: Illustration de l'effet de pixellisation des MNS SRTM (courbe bleue) et du lissage obtenu par le rééchantillonnage en SRTM 30 m (courbe jaune).

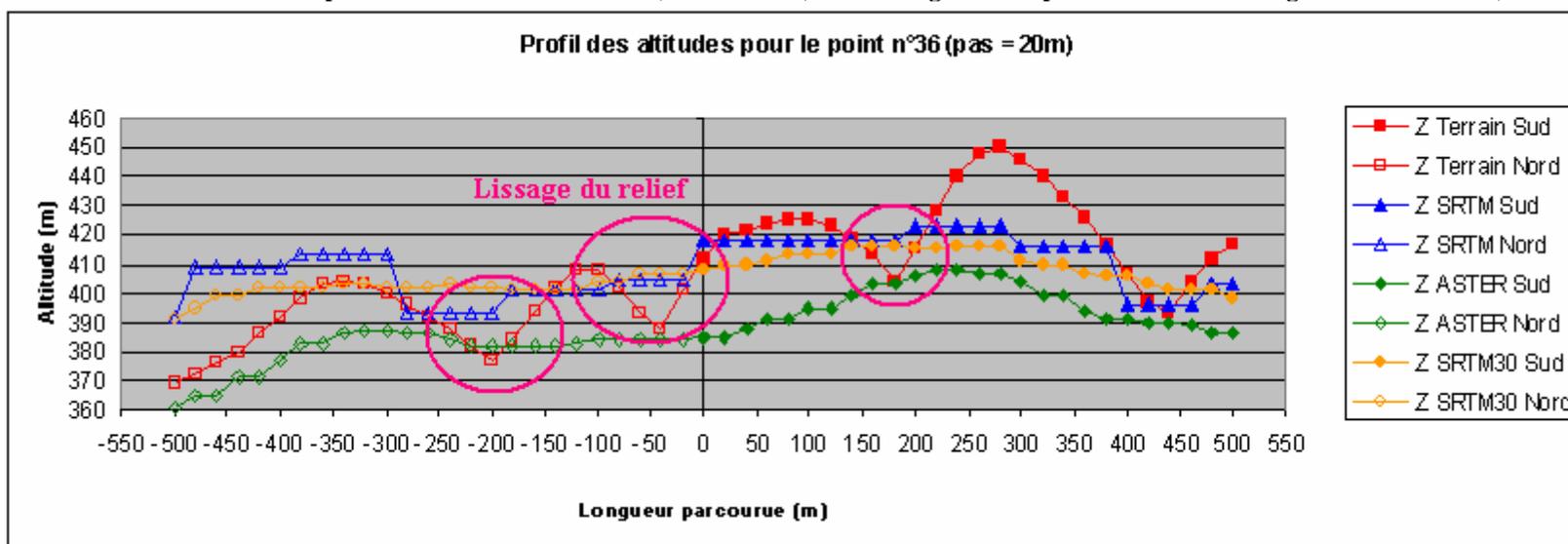


Figure 19: Illustration du lissage du relief par SRTM, SRTM30 et ASTER.

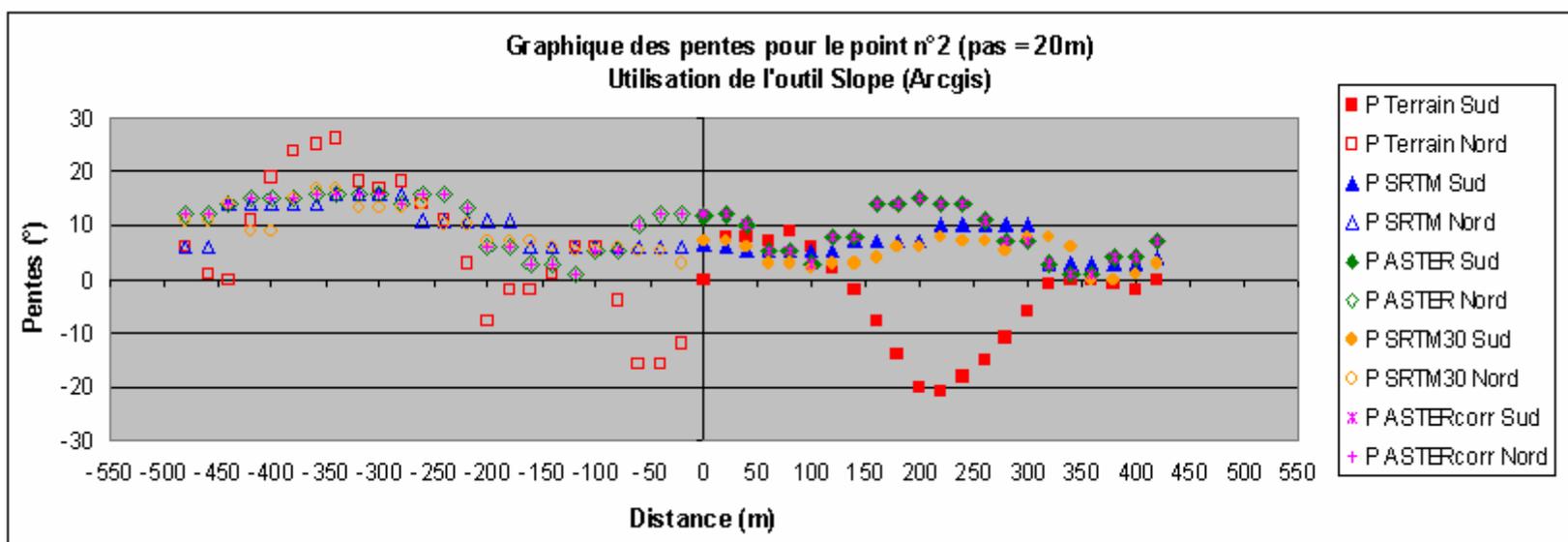


Figure 20: Illustration des différences de valeurs de pente entre les données de terrain et les MNS. Utilisation de l'outil « slope ».

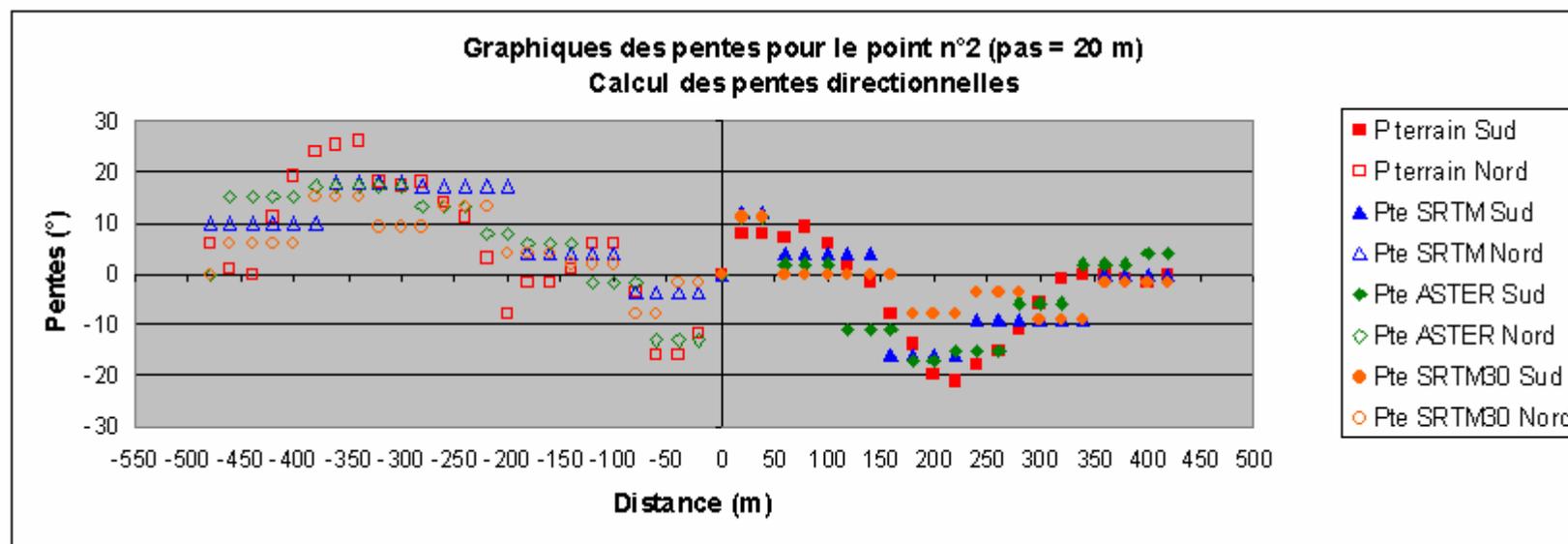


Figure 21: Illustration des différences de valeurs de pente entre les données de terrain et les MNS. Méthode d'interpolation « directionnelle ».

5.4. Analyse de la qualité des MNS ASTER

Les notions relatives à la qualité des MNS ASTER ont été abordées dans les chapitres précédents (voir 2.3.2.4.b et 4.5.3.2). Pour rappel, à chaque MNS ASTER est associé un fichier d'évaluation de la qualité pouvant contenir deux types d'informations différentes. Ces dernières se présentent sous la forme de chiffres positifs ou négatifs. Les chiffres positifs renseignent sur le nombre de couples d'images qui ont servi à la création du MNS. Les chiffres négatifs quant à eux indiquent une correction du MNS ASTER réalisée par l'intermédiaire d'autres types de MNS.

Les 1690 points de relevés terrains se répartissent les 4 classes de qualité allant de 1 à 4, la moitié des points relevant de la catégorie 2 (Tableau 8). Dans la situation présente, aucun point de relevé ne se trouve dans une catégorie ayant subi une correction en utilisant un autre MNS (chiffre négatif). Le nombre de points par catégorie est consigné dans le Tableau 8.

Tableau 8: Pourcentage des relevés par catégorie de qualité des MNS ASTER.

Catégorie	Total	Pourcentage
1	413	24%
2	846	50%
3	367	22%
4	64	4%
Total	1690	100%

Selon LINES [2009], les MNS produits à partir d'un nombre de scènes inférieur ou égal à trois sont de mauvaise qualité puisqu'ils prennent en compte des données anormales d'élévation. Dans le cas présent, 96% des points correspondent à cette situation. La RMSE (voir 4.7.3.2) a été calculée pour les MNS ASTER et SRTM en fonction de ces catégories ceci dans le but de déterminer si le MNS ASTER ayant été créé au départ d'un plus grand nombre de scènes ne serait pas plus précis que le MNS SRTM. Les données sont présentées dans le Tableau 9 suivants.

Tableau 9: Estimation de la précision pour les pentes en fonction des catégories de qualité des MNS ASTER.

Catégorie ASTER	N	RMSE (°)	
		ASTER	SRTM
1	413	16.8	12.9
2	846	16.3	12.5
3	367	15.1	11.6
4	64	14.1	7.5
Total	1690		

Au vu de ces résultats, il faut constater que la précision des MNS ASTER s'améliore effectivement en fonction du nombre de scènes utilisées pour leur création. Cependant, la précision du MNS ASTER reste inférieure à celle du MNS SRTM quelque soit le nombre de scènes.

5.5. Analyses statistiques

5.5.1. Test t d'égalité de deux moyennes

5.5.1.1. Test t pour les altitudes

Les résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les altitudes du MNS SRTM (Tableau 10), du MNS ASTER (Tableau 11) et du MNS SRTM rééchantillonné (SRTM30) (Tableau 12) donnent une P-valeur de 0.000. Cette dernière nous indique qu'il existe une différence hautement significative entre les altitudes de terrain et les altitudes provenant des MNS. Cette observation est normale puisque les MNS donnent une élévation moyenne du sommet de la canopée sur des pixels, de 90 x 90 m pour SRTM et 30 x 30 m pour ASTER et SRTM rééchantillonné, alors que les points de validation de terrain livrent une valeur d'élévation ponctuelle du niveau du sol. C'est pourquoi nous observons un biais (différence moyenne) entre les différents MNS et les données de terrains dû à la hauteur de la canopée.

Ce biais possède une valeur positive pour les MNS ASTER et une valeur négative pour les MNS SRTM et SRTM30. Etant donné que la différence est calculée en soustrayant les valeurs des MNS aux données de terrain, nous pouvons dire que les MNS SRTM surestiment en moyenne les valeurs d'altitudes alors que les MNS ASTER les sous-estiment.

Tableau 10: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les altitudes de terrain et SRTM.

TEST T	N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard de la moyenne
Z terrain (m)	1690	413,251	25,073	0,610
Z SRTM (m)	1690	422,160	22,491	0,547
Différence (m)	1690	-8,909	14,395	0,350

Intervalle de confiance à 95 % de (-9,596; -8,223). P-Valeur = **0,000**

Tableau 11: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les altitudes de terrain et ASTER.

TEST T	N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard de la moyenne
Z terrain (m)	1690	413,251	25,073	0,610
Z ASTER (m)	1690	405,191	30,230	0,735
Différence (m)	1690	8,060	25,127	0,611

Intervalle de confiance à 95 % de (6,862; 9,259). P-Valeur = **0,000**

Tableau 12: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les altitudes de terrain et SRTM 30 m.

TEST T	N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard de la moyenne
Z terrain (m)	1690	413,251	25,073	0,610
Z SRTM30 (m)	1690	421,996	19,796	0,482
Différence (m)	1690	-8,746	14,701	0,358

Intervalle de confiance à 95 % de (-9,447; -8,044) P-Valeur = **0,000**

5.5.1.2. Test t pour les pentes extraites via l'outil slope

En ce qui concerne les pentes, les résultats sont consignés dans les Tableau 13, Tableau 14, Tableau 15 et Tableau 16. Encore une fois, la P-valeur nous indique une différence hautement significative entre les pentes de terrain et celles issues des différents MNS. Nous pouvons également constater que la différence moyenne entre les MNS SRTM est plus faible que celle entre les MNS ASTER. Les quatre types de MNS surestiment en moyenne les pentes par rapport aux données de terrain. A nouveau, les corrections apportées au MNS ASTER sont intéressantes puisque le biais diminue.

Tableau 13: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les pentes de terrain et SRTM.

TEST T	N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard de la moyenne
P terrain (°)	1690	0,211	10,383	0,253
P SRTM (°)	1690	5,426	3,604	0,088
Différence (°)	1690	-5,215	11,102	0,270

Intervalle de confiance à 95 % de (-5,745; -4,686). P-Valeur = **0,000**

Tableau 14: Résultats du test d'égalité de deux moyennes pour les pentes de terrain et ASTER.

TEST T	N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard de la moyenne
P terrain (°)	1690	0,211	10,383	0,253
P ASTER (°)	1690	9,249	8,67	0,211
Différence (°)	1690	-9,038	13,329	0,324

Intervalle de confiance à 95 % de (-9,674; -8,402). P-Valeur = **0,000**

Tableau 15: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les pentes de terrain et SRTM30.

TEST T	N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard de la moyenne
P terrain (°)	1690	0,211	10,383	0,253
P SRTM30 (°)	1690	4,664	3,092	0,075
Différence (°)	1690	-4,453	10,796	0,263

Intervalle de confiance à 95 % de (-4,968; -3,938). P-Valeur = **0,000**

Tableau 16: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les pentes de terrain et ASTERcorr.

TEST T	N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard de la moyenne
P terrain (°)	1690	0,211	10,383	0,253
P ASTERcorr (°)	1690	7,431	4,797	0,117
Différence (°)	1690	-7,220	11,493	0,280

Intervalle de confiance à 95 % de (-7,768; -6,672). P-Valeur = **0,000**

5.5.1.3. Test t pour les pentes directionnelles

Les résultats obtenus pour les pentes directionnelles (calculées uniquement au départ des pixels sur lesquels se trouvent les points de relevés) sont consignés dans les Tableau 17, Tableau 18 et Tableau 19 suivants. Il faut remarquer que l'utilisation de cette méthode offre des résultats nettement plus intéressants puisque la P-valeur obtenue pour chaque MNS est supérieure à 0.05 ce qui nous indique qu'il n'y pas de différence significative entre les données de terrain et les MNS. Ce résultat est normal puisque les pixels avoisinants et hors de l'axe de cheminement n'interfèrent pas dans le calcul de la pente. Pour le MNS ASTER, la différence moyenne est la plus faible et l'intervalle de confiance qui la contient est le plus restreint. C'est donc les pentes issues de ce raster qui sont les plus précises. Cependant, ASTER montre des artefacts et le code permettant la détection de ceux-ci ne s'applique qu'aux rasters de pentes. Dés lors, il est plus intéressant à l'heure actuelle de se baser sur les données issues du MNS SRTM.

Tableau 17: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les pentes de terrain et les pentes directionnelles du MNS SRTM.

TEST T	N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard de la moyenne
P terrain (°)	1690	0,211	10,383	0,253
P SRTM dir (°)	1690	-0,130	4,492	0,109
Différence (°)	1690	0,340	9,577	0,233

Intervalle de confiance à 95 % de (-0,117; 0,797). P-Valeur = **0,144**

Tableau 18: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les pentes de terrain et les pentes directionnelles du MNS ASTER.

TEST T	N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard de la moyenne
P terrain (°)	1690	0,211	10,383	0,253
P ASTER dir (°)	1690	0,203	6,698	0,163
Différence (°)	1690	0,008	10,672	0,260

Intervalle de confiance à 95 % de (-0,501; 0,517). P-Valeur = **0,976**

Tableau 19: Résultats du test t d'égalité de deux moyennes pour les pentes de terrain et les pentes directionnelles du MNS SRTM30.

TEST T	N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard de la moyenne
P terrain (°)	1690	0,211	10,383	0,253
P SRTM30 dir (°)	1690	-0,201	3,609	0,088
Différence (°)	1690	0,411	9,965	0,242

Intervalle de confiance à 95 % de (-0,064; 0,887). P-Valeur = **0,090**

5.5.2. La Root Mean Square Error (RMSE)

La RMSE a été utilisée dans le but de déterminer la précision verticale des MNS par rapport à la réalité de terrain. Nous l'avons calculée pour deux paramètres à savoir : l'altitude et la pente. Les résultats obtenus sont décrits respectivement dans les Tableau 20 et Tableau 21.

Tableau 20: Valeurs des RMSE pour les différents MNS. Données pour les altitudes.

Type de MNS	RMSE (m)
Z SRTM	16,9
Z ASTER	26,4
Z SRTM30	17,1

Tableau 21: Valeurs des RMSE pour les différents MNS. Données pour les pentes.

Type de MNS	RMSE (°)
P SRTM (°)	12,3
P ASTER (°)	16,1
P SRTM30 (°)	11,7
P ASTERcorr (°)	13,6
P SRTM dir (°)	9,1
P ASTER dir (°)	11,5
P SRTM30 dir (°)	9,7

En ce qui concerne l'altitude, nous remarquons directement que le MNS SRTM est plus précis que le MNS ASTER. Pour SRTM, la valeur obtenue est de 16,9 m ce qui se rapproche fortement des données préconisées dans les références bibliographiques (plus ou moins 16 m) (voir 2.3.2.3.c). ASTER GDEM présente quant à lui une RMSE de 26,4 m. Cette valeur est importante en comparaison de celles comprises entre 7 et 15 m proposées par HIRANO *et al.* [2003] mais plus proche de celle de 20 m trouvée dans la littérature (voir 2.3.2.4.c). Cependant, cela confirme l'hypothèse selon laquelle il existe une variabilité entre tuiles. Cette précision verticale de 26,4 m est due, d'une part aux artefacts présents dans les MNS ASTER GDEM et d'autre part, elle peut être due à la qualité des MNS pour cette région (nombre de scènes utilisées) ou encore elle peut montrer une très grande sensibilité quant à la présence d'un couvert forestier constant et au relief relativement accidenté de la région étudiée. Enfin, notons que le rééchantillonnage du MNS SRTM 90 m en SRTM 30 m n'apporte pas gain de précision puisque la valeur obtenue est de 17,1 m.

Nous avons également utilisé la RMSE dans l'estimation de la précision des pentes. Pour les pentes obtenues grâce à l'outil « slope », les MNS SRTM et SRTM30 (RMSE = 12,3 et 11,7) sont plus précis que les MNS ASTER et ASTER corrigé. Cependant, les corrections réalisées sur les MNS ASTER apportent une meilleure précision pour l'estimation des pentes puisque les valeurs passent de 16,1° à 13,6°. Ceci nous amène à croire que le remplacement des artefacts par des données provenant des MNS SRTM est une opération fructueuse. Toutefois, les MNS ASTER corrigés restent moins précis que les MNS SRTM.

Dans le cas des pentes directionnelles, la RMSE est meilleure pour les trois MNS analysés. Les valeurs sont de 9,1° pour SRTM, 9,7° pour SRTM30 et 11,5° pour ASTER. Nous pensons donc que cette technique est plus en adéquation avec le protocole de terrain utilisé que le calcul des pentes réalisé par l'outil « slope » d'Arcgis.

5.5.3. Matrice de confusion

Etant donné les desiderata de l'utilisateur, c'est-à-dire obtenir une estimation de la précision des MNS pour les pentes inférieures ou supérieures à une certaine valeur, et au vu des résultats obtenus pour l'estimation de la précision des pentes via le calcul de la RMSE ($^{\circ}$), il nous a semblé opportun de procéder à une classification des cartes de pentes. Celle-ci se base sur deux classes de pente 0 et 1: la première inférieure à 10° et la seconde supérieure ou égale à cette même valeur. L'évaluation de la qualité d'une telle classification se fait à l'aide d'une matrice de confusion. Les résultats obtenus suite à la réalisation de celle-ci pour chacun des MNS sont présentés dans le Tableau 22.

Tableau 22: Tableau des précisions relatives à la qualité des classifications des différents MNS obtenues suite à la réalisation de matrices de confusion. PP % : précision du producteur en pourcent, PC % : précision du consommateur en pourcent, Ptot % : précision totale en pourcent.

MNS	P tot %	Classe	PP %	PC %
SRTM	72	0	74	94
		1	61	22
ASTER	64	0	75	73
		1	41	44
SRTM30	71	0	73	95
		1	58	17
ASTERcorr	67	0	75	79
		1	45	39
SRTM dir	73	0	73	97
		1	72	18
ASTER dir	72	0	73	94
		1	59	19
SRTM30 dir	71	0	71	99
		1	79	6

Ce tableau reprend la précision totale du MNS (Ptot %), la précision du producteur (PP %) et enfin la précision du consommateur (PC %), toutes ces valeurs étant exprimées en pourcent.

Pour les pentes extraites par l'outil « slope », la précision totale de la qualité de la classification montre que les MNS SRTM sont plus précis que les MNS ASTER avec respectivement 72 et 64 %. La précision des MNS corrigés quant à elle augmente légèrement pour MNS ASTERcorr (67 %) et diminue pour SRTM30 (71%). Ces valeurs peuvent sembler élevées, cependant, nous pensons que, pour un travail de précision comme le tracé d'un réseau routier, ces images ne conviennent pas.

La précision du producteur (PP %) nous indique le pourcentage de pixels de référence correctement classé sur la carte. Dans le cadre de la présente étude, l'utilisation de cette information n'est pas pertinente puisque d'une part l'objectif principal est de déterminer la précision des MNS (cartes) et d'autre part les données de terrain sont la seule source de référence disponible il n'est donc pas possible de confirmer les résultats obtenus via une autre source. Cependant, pour information les résultats se trouvent dans le tableau xxx.

Sa valeur reste plus ou moins constante d'un MNS à l'autre pour la classe de pente inférieure à 10° (0) et est égale à 73 % ou légèrement supérieure. A contrario, pour la classe 1 (supérieure ou égale à 10°) nous remarquons que cette précision est relativement faible avec des valeurs variant entre 41 et 61 %. Ces résultats soulignent d'une part, que le MNS SRTM est plus précis que les autres et d'autre part que le MNS ASTER prend bien en charge les valeurs de pentes inférieures à 10° mais que, dès que ces dernières augmentent le MNS n'est plus du tout fiable.

La précision du consommateur, quant à elle, donne le pourcentage de pixels appartenant à une catégorie sur la carte effectivement classée dans cette catégorie sur le terrain. Pour la classe 0, nous remarquons directement que les MNS SRTM et SRTM30 possèdent des précisions respectives de 94 et 95 %. Ces dernières sont nettement supérieures à celles des MNS ASTER. Cependant, les MNS ASTER corrigés (79 %) présentent une précision du consommateur légèrement supérieure à celle de MNS ASTER (73 %). Nous pouvons en conclure que les modifications apportées aux images ASTER sont intéressantes dans la mesure où elles augmentent la précision de la classification. En ce qui concerne la classe 1, la PC % est faible pour tous les MNS indiquant que la probabilité qu'un pixel de la carte appartenant à la classe 1 soit classé identiquement sur le terrain est très faible.

En ce qui concerne les pentes directionnelles, la précision totale est relativement constante avec une valeur pour les trois MNS d'un peu plus de 70 %. Les précisions du producteur sont elles aussi relativement constantes (>70%) à part pour le MNS ASTER qui, pour la catégorie 1, obtient un résultat de 59 %. La précision du consommateur offre quant à elle de très bons résultats pour la catégorie 0 avec des pourcentages supérieurs à 90%. Par contre, en ce qui concerne la catégorie 1 les résultats sont plus que médiocres avec des pourcentages ne dépassant pas les 20 %.

6. Conclusions et perspectives

L'objectif principal de ce travail était d'étudier les possibilités d'utilisation de Modèles Numériques de Surfaces par télédétection satellitale en vue de la gestion durable des ressources ligneuses et, plus particulièrement, dans le tracé du réseau routier pour l'exploitation forestière à la CEB (Gabon). Les deux MNS choisis étaient SRTM et ASTER GDEM.

Au vu des résultats obtenus dans le chapitre précédent, pour les pentes déterminées par le logiciel Arcgis, le MNS SRTM nous apparaît comme étant le plus fiable. En effet, il ne présente pas d'artefact, sa précision totale est la plus élevée (72 %) et il possède une des valeurs les plus faibles de RMSE quant à l'estimation de la précision des pentes (12.3°). Cependant, il ne nous semble pas assez précis pour l'utiliser en tant que tel dans la détermination du tracé du réseau routier. En effet, c'est un travail de précision et les MNS SRTM présentent des pixels trop étendus, de 90 x 90 m. Toutefois, les cartes de classes de pentes qui en sont dérivées peuvent être utilisées en tant qu'outil d'aide à la décision lors de la détermination du tracé théorique des routes. Ce type de carte ne comporterait qu'un nombre limité de classes afin de faciliter la visualisation et pourrait être superposée à une carte topographique déjà existante. Cette carte a été créée pour l'ensemble de la concession forestière de la CEB (voir CD-ROM accompagnant le TFE).

Pour ce qui est des autres MNS, des améliorations peuvent y être apportées afin d'envisager leur utilisation. Nous avons utilisé dans ce travail une méthode d'interpolation des données SRTM 90 m à une résolution plus fine de 30 m selon les critères déterminés par GROHMANN & STEINER [2008]. Cependant, la production d'un semi-variogramme afin de tester la qualité du choix de ces critères n'a pu être réalisée. En effet, le nombre de points, couvrant la zone, était trop important pour l'exécution de ce traitement via le logiciel Arcgis. Il aurait donc été opportun d'effectuer celui-ci via un programme statistique adapté tel que R. Cependant, en raison du temps imparti à la réalisation de ce travail, cette opération n'a pu être menée.

Pour le MNS ASTER GDEM, nous avons constaté que la qualité des images pour les zones couvertes était médiocre. En effet, le nombre de scènes utilisées à leur création pour les lieux de relevé est inférieur ou égal à 4. De plus, la précision obtenue pour les MNS ASTER GDEM est de loin inférieure à celle préconisée par les références bibliographiques. Ceci montre que la variabilité des précisions des tuiles MNS ASTER GDEM est importante et fortement influencée par le relief d'une part, et par la couverture arborée d'autre part. En outre, nous avons pu corroborer les résultats obtenus par TIGHE & CHAMBERLAIN [2009] qui suggéraient que la précision des MNS ASTER GDEM était fortement affectée dans les milieux de pentes supérieures à 10°. Par contre, le code permettant la détection des artefacts a permis une amélioration de la précision du MNS ASTER. Néanmoins, celle-ci reste inférieure à celle du MNS SRTM en raison d'une détection partielle des artefacts. Il serait donc intéressant d'améliorer ce système de détection.

En ce qui concerne le calcul des pentes directionnelles (ne prenant en compte que les pixels sur lesquels se situent les points de relevés), les résultats sont plus concluants. En effet, grâce à cette méthode, il n'y a plus de différence moyenne significative entre les données de terrains et les données issues des MNS. De même, les précisions obtenues pour les différents MNS, sont relativement bonnes à savoir, des RMSE de 9,1° pour SRTM, 11,5° pour ASTER et 9,7° pour SRTM30.

Une perspective intéressante peut ainsi être envisagée : la création d'un programme fonctionnant sous Arcgis et Access permettant la validation du tracé théorique des routes. Le principe de celui-ci consisterait en une analyse de tronçons de route digitalisés. Pour chacun d'eux la pente « directionnelle » serait déterminée et un code couleur permettrait la détection de tronçons selon deux classes de pentes inférieures à 10° ou supérieures ou égal à cette même valeur. Etant donné la bonne précision des MNS pour les pentes inférieures à 10°, il serait envisageable de considérer que les pentes classées dans cette catégorie lui correspondraient effectivement sur le terrain. Il resterait alors, soit à changer le tracé pour éviter les zones de trop forte pente, soit à se rendre sur le terrain pour vérifier ces mêmes zones. Cette étape de vérification de terrain reste nécessaire car le MNS n'est pas efficace dans les reliefs fortement vallonnés. Bien évidemment, cette méthode devra être testée sur de petits tronçons avant une application à grande échelle.

Enfin, au cours de ce travail, différents codes VBA ont été créés. Ces derniers permettent un traitement semi-automatisé des données issues des MNS. Il est fort probable que dans les années à venir, de nouveaux MNS soient disponibles gratuitement sur internet. Il est donc tout à fait envisageable de réutiliser ces codes afin d'analyser ces MNS qui seront certainement plus précis.

En guise de conclusion, nous dirons que le présent travail a contribué à la connaissance de la qualité des MNS par la détermination de leur précision totale et de leur précision quant à l'estimation des pentes. Nous avons également pu montrer que la méthode de détermination des pentes par le logiciel Arcgis ne convenait pas à la comparaison avec des données ponctuelles de terrain. Enfin, nous espérons que les perspectives envisagées pourront être mises en œuvre afin d'effectivement utiliser les MNS en vue du tracé du réseau routier dans le cadre de la gestion durable des ressources forestières.

7. Références bibliographiques

- ABRAMS M. & HOOK S., 2002. *ASTER user handbook*. Version 2. Pasadena, Jet propulsion Laboratory, 135 p.
- BARRET J., 1983. *Géographie et cartographie du Gabon, atlas illustré*. Institut Pédagogique National et Laboratoire National de Cartographie. Paris, Edicef, 135 p.
- BLOTZ F., CARTER D., HOLMES T. & PEREIRA R., 2001. Financial returns under uncertainty for conventional and reduced-impact logging in permanent production forests of the Brazilian Amazon. *Ecological Economics*. **39**, 387-398.
- BOURGINE B. & BAGHDADI N., 2005. Assessment of C-band SRTM DEM in a dense equatorial forest zone. *C. R. Geoscience*. **337**, 1225-1234.
- BOWER K., 2001. The paired T-Test using MINITAB (Technology notes). *Scientific Computing & Instrumentation*.
- BULL G., PULKKI R., KILLMANN W. & SCHWAB O., 2001. Exploitation coûteuse ou rentable? Enquête sur les coûts et avantages de l'exploitation à faible impact. *Actualités des Forêts Tropicales*. **9** (2), 12-12.
- CABALLE G., 1978. Essai phytogéographique sur la forêt dense du Gabon. *Annales de l'Université Nationale du Gabon*. **2**, 87-101.
- CARPE. *Gis Products Available for Download by Coverage Type*
<http://www.geog.umd.edu/carpe/>, dernière consultation le 8 Juillet 2010.
- CCT : CENTRE CANADIEN DE TELEDETECTION, 2009. *Tutoriel*
<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>, dernière consultation le 8 Juillet 2010.
- CHABBERT J. & PRIYADI H., 2001. Exploitation à faible impact dans une forêt à Bornéo. *Bois et Forêts des Tropiques*. **269** (3), 82-86.
- CHEVALIER J-F., 2009. Les forêts du Gabon en 2008. In :DE WASSEIGE C., DEVERS D., DE MARCKEN P., EBA' A ATYI R. & MAYAUX P. *Les forêts du bassin du Congo – Etat des forêts 2008*. Office des publications de l'Union européenne, 61-73.
- CIA: CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY. The World Factbook, Map of Gabon
<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/gb.html>, dernière consultation le 9 Mars 2010.
- COLLOMB J.-G., MIKISSA J.-B., MINNEMEYER S., MUNDUNGA S., NZAO NZAO H., MADOUMA J., MAPAGA J.D., MIKOLO C., RABENKOGO N., AKAGAH S., BAYANI-NGOYE E. & MOFOUMA A., 2000. *Un premier regard sur l'exploitation forestière au Gabon*. Washington D.C., Global Forest Watch, World Ressources Institut, 50 p.
- COURDERCHET L., JOLY D. & BROSSARD T., 2002. *Proposition pour un protocole d'étude des paysages : Définitions dans le cadre des projets d'aménagement de lignes aériennes de transport d'électricité*. Franche-Comté, Presse Universitaire Franc-Comtoise, 116 p.

- CRAIG, 2008. *Modèle numérique de terrain*. Lempdes, CRAIG, 2 p.
- DEMARQUEZ B. & JEANMART P., 2004. *Plan d'aménagement de la Concession Forestière sous Aménagement Durable de la société Thanry-CEB 2000 – 2025*. Révision au 01/01/2004. Libreville, CEB Groupe Thanry, 199 p.
- DOUCET J.-L., 2003. *L'alliance délicate de la gestion forestière et de la biodiversité dans les forêts du centre du Gabon*. Thèse de doctorat, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, 323 p.
- DROUINEAU S. & NASI R., 1999. *L'aménagement forestier : historique, bilan, perspectives*. Montpellier, CIRAD-Foret, 64 p.
- EOEdu, 2009. *Radar*
<http://eoeu.belspo.be/fr/guide/radar.asp?section=4>, dernière consultation le 18 Juin 2009.
- ESRI. *ESRI Support Center*.
<http://support.esri.com>, dernière consultation le 25 Mars 2010.
- EZZINE DE BLAS D. & RUIZ PEREZ M., 2008. Prospects for reduced impact logging in Central African logging concessions. *Forest Ecology and Management*. **256**, 1509-1516.
- FAO : FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2003. *Code régional d'exploitation forestière à faible impact dans les forêts denses tropicales humides d'Afrique centrale et de l'ouest*. Rome, FAO, 146 p.
- FAO : FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2009;
<http://www.fao.org>, dernière consultation le 24 Juillet 2009.
- FELDPAUSCH T., McDONALD A., PASSOS C., LEHMANN J. & RIHA S., 2006. Biomass, harvestable area, and forest structure estimated from commercial timber inventories and remotely sensed imagery in southern Amazonia. *Forest Ecology and Management*. **223**, 121-132.
- GAO J., 2007. Towards accurate determination of surface height using modern geoinformatic methods: possibilities and limitations. *Progress in Physical Geography*. **31** (6), 591-605.
- GEBRESLASIE M., AHMED F. & VAN AARDT J., 2010. Predicting forest structural attributes using ancillary data and ASTER satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. **12**, 23-26.
- GOND V., FÉAU C. & PAIN-OCRET M., 2003. Télédétection et aménagement forestier tropical : les pistes d'exploitation. *Bois et Forêts des Tropiques*. **275** (1), 29-36.
- GROHMANN C.H. & STEINER S. S., 2008. SRTM resample with short distance-low nugget kriging. *International Journal of Geographical Information Science*. **22** (8), 895-906.
- HANCOCK G., MARTINEZ C., EVANS K. & MOLIERE D., 2006. A comparaison of SRTM and high-resolution digital elevation models and their use in catchment geomorphology and hydrology: Australian examples. *Earth surface Processes and Landforms*. **31**, 1394-1412.

- HENGL T. & REUTER H., 2009. *Geomorphometry : Concepts, Software, Applications*. **33**. Amsterdam, Hengl T. & Reuter H., 796 p.
- HIRANO A., WELCH R. & LANG H., 2003. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. **57**, 356-370.
- HOLMES T., BLATE G., ZWEEDE J. *et al.*, 2002. Financial and ecological indicators of reduced impact logging performance in the eastern Amazon. *Forest and Ecology Management*. **163**, 93-110.
- HUGGEL C., SCHNEIDER D., JULIO MIRANDA P. *et al.*, 2008. Evaluation of ASTER and SRTM DEM data for lahar modeling: A case study on lahars from Popocatépetl Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. **170**, 99-110.
- HULLEY G. & HOOK S., 2009. The north American ASTER land surface emissivity database (NAALSED) Version 2.0. *Remote Sensing of Environment*. **113**, 1967-1975.
- IWAO K., YAMAMOTO N, PATTON D. *et al.*, 2008. Validating global elevation models with degree confluence project information and ASTER-DEM on Geo Grid. *The International Archive of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. **37**, 1847-1852.
- JARVIS A., REUTER H., NELSON A. & GUEVARA E., 2008. *Hole-filled seamless SRTM data V4*. International Centre for Tropical Agriculture (CIAT)
<http://srtm.csi.cgiar.org>, dernière consultation le 08 Juillet 2010.
- JPL, 2004. *ASTER, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*.
<http://asterweb.jpl.nasa.gov/>, dernière consultation le 28 Juillet 2009.
- KARKEE M., STEWARD B. & ABD AZIZ S., 2008. Improving quality of public domain digital elevation models through data fusion. *Biosystems Engineering*. **101**, 293-305.
- KELLNDORFER J., WALKER W., PIERCE L., DOBSON C., FITES J.A., HUNSAKER C., VONA J. & CLUTTER M., 2004. Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets. *Remote Sensing of Environment*. **93**, 339-358.
- KERVYN M., GOOSSENS R., JACOBS P. & ERNS G., 2006. ASTER DEMs for volcano topographic mapping: accuracy and limitations. *In: Int. Assoc. for mathematical Geology. XIth International Congress. Université de Liège – Belgium*. 8 p.
- KOUAMÉ K., PENVEN M., KOUADIO B., SALEY M & GRONAYES C., 2006. Contribution des images d'ASTER de Terra d'un modèle numérique d'altitude à la cartographie morphostructurale du massif des Toura (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Téledétection*, **6** (2), 103-121.
- LAPORTE J., 2005. *Dynamique des peuplements de forêt dense humide au sein des concessions de la Compagnie Equatoriale des Bois (CEB, Gabon), recommandations pour une sylviculture appropriée*. Travail de fin d'études. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, 103 p.

- LAURANCE W., ALONSO A., LEE M. & CAMPBELL P., 2006. Challenges for forest conservation in Gabon, Central Africa. *Futures*. **38**, 454-470.
- LILLESAND T., KIEFER R., CHIPMAN J., 2008. *Remote sensing and image interpretation (Sixth Edition)*. New-York, John Wiley & Sons, 756 p.
- LINES T., 2009. ASTER GDEM readme file – ASTER GDEM version 1.
<http://www.viewfinderpanoramas.org/GDEM/GDEM-README.pdf>, dernière consultation le 08 Juillet 2010.
- LOUIS A. M. & FONTES, 1996. *Richesse floristique et biodiversité des forêts du Gabon, exemple de la forêt littorale*. Actes du colloque international de phytogéographie tropicale. Paris. 183-188.
- LUEDELING E., SIEBERT S. & BUERKERT A., 2007. Filling the voids in the SRTM elevation model – A TIN-based delta surface approach. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. **62**, 283-294.
- MAYAUX P., GOND V., MASSART M., PAIN-ORCET M. & ACHARD F., 2003. Evolution du couvert forestier du bassin du Congo mesurée par télédétection spatiale. *Bois et Forêts des Tropiques*. **277** (3), 45-52.
- MEBIAME J.-B., 1999. *Stratégie nationale et plan d'action sur la diversité biologique au Gabon*. Ministère des eaux et forêts de la pêche du reboisement, chargé de l'environnement et de la protection de la nature. <http://bch-cbd.naturalsciences.be/gabon/gabondef/contribution/documentsnat/docpdf/stratnatimages.pdf>, dernière consultation le 22 Juin 2009.
- MERTENS B. & MAKAK J.-S., 2007. *Atlas forestier interactif du Gabon. Version pilote. Document de synthèse*. Washington, WRI, 56 p.
- MICROSOFT CORPORATION, 2010. *Microsoft Office Online*
<http://office.microsoft.com>, dernière consultation le 25 Mars 2010.
- MILIAREISIS G. & PARASCHOU C., 2005. Vertical accuracy of the SRTM DTED level 1 of Crete. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. **7**, 49-59.
- MINITAB INC., 2007. *Meet Minitab 15*.
<http://www.minitab.com>, dernière consultation le 25 Mars 2010.
- NASA, 2005. The Shuttle Radar Topography Mission
<http://www.nasa.gov/>, dernière consultation le 13 Juillet 2009.
- NATIONS ONLINE PROJECT, 2009. *Administrative Map of Gabon*
<http://www.nationsonline.org/oneworld/>, dernière consultation le 8 Juillet 2010.
- NGUIMBI L., MAPAGA D. & NZANG OYONO C., 2006. La gestion des concessions forestières au Gabon. In : NASI R., NGUIQUIRI J.-C. & EZZINE DE BLAS D. *Exploitation et gestion durable des forêts en Afrique Centrale : la quête de la durabilité*. Paris, Editions L'Harmattan, 169-191.

- NIKOLAKOPOULOS K., KAMARATAKIS E. & CHRYSOULAKIS N., 2006. SRTM vs ASTER elevation products. Comparaison for two regions in Crete, Greece. *International Journal of Remote Sensing*. **27** (21), 4819-4838.
- NYAR OLLAME P., 2001. *L'étude prospective du secteur forestier en Afrique. Gabon*. Ministère des eaux et forêts de la pêche du reboisement, chargé de l'environnement et de la protection de la nature <ftp://ftp.fao.org/docrep/Fao/004/AB583F/AB583F00.pdf>, dernière consultation le 22 Juin 2009.
- O'HEIX B.-C., DOUCET J.-L., ONDO R. & INGUEZA D., 2002. Critères et indicateurs : les initiatives gabonaises. *Bois et Forêts des Tropiques*. **271** (1), 79-88.
- OIBT, 2007. *Examen annuel et évaluation de la situation mondiale des bois*. Yohokama, OIBT, 222 p.
- OSGEO, 2002. *Quantum Gis 'Enceladus' version 1.4.0*. <http://qgis.osgeo.org/>, dernière consultation le 25 Mars 2010.
- PEEL M., FINLAYSON B. & MCMAHON T., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*. **11**, 1633-1644.
- PHILIPPART J., 2006. *Développement d'une application informatique d'aide à la planification et à l'optimisation de la voirie forestière en forêt dense humide tropicale*. Mémoire de fin d'études. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, 58 p.
- PNUD, 2006. *Profil pays du Gabon – Département des politiques et des Stratégies*. http://mirror.undp.org/gabon/publications/Profil_Pays_du_Gabon_Jan_2006.pdf, dernière consultation le 22 Juin 2009.
- PUECH C., 2000. *Utilisation de la télédétection et des modèles numérique de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes*. Mémoire de recherches. INPG, Grenoble, 83 p.
- RABUS B., EINEDER M., ROTH A. & BAMLER R., 2003. The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. **57**, 241-262.
- REITSMA J.-M., 1988. *Végétation forestière du Gabon. Forest vegetation of Gabon*. Ede, The Netherlands, Technical Series Tropenbos, 142 p.
- REPUBLIQUE GABONAISE, loi n°0016101 du 31 décembre 2001 *Portant code forestier en République Gabonaise*.
- REUTER H., NELSON A. & JARVIS A., 2007. An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data. *International Journal of Geographic Information Science*. **21** (9), 983 – 1008.
- RUIZ PEREZ M., EZZINE DE BLAS D., NASI R., SAYER J., SASSEN M., ANGOUE C., GAMI N., NDOYE O., NGONO G., NGUINGUIRE J.-C., NZALA D., TOIRAMBE B. & YALIBANDA Y., 2005. Logging in the Congo Basin: A multy-country characterization of timber companies. *Forest Ecology and Management*. **214**, 221-236.

- SIST P., 2000. Les techniques d'exploitation à faible impact. *Bois et Forêts des Tropiques*. **265** (3), 31-40.
- STATISTIQUES MONDIALES. *Gabon : Statistiques*
<http://www.statistiques-mondiales.com/gabon.htm>, dernière consultation le 8 Juillet 2010.
- SUN G., RANSON K.J., KIMES D.S., BLAIR J.B. & KOVACS K., 2008. Forest vertical structure from GLAS : An evaluation using LVIS and SRTM data. *Remote Sensing of Environment*. **112**, 107-117.
- SUUNTO, 2006. *Suunto PM-5 / PM-5/1520 User's guide*.
http://ns.suunto.com/Manuals/PM-5/Userguides/PM-5_userguide_multi.pdf, dernière consultation le 22 Juin 2009.
- TIGHE L & CHAMBERLAIN D., 2009. Accuracy comparison of the SRTM, ASTER, NED, NEXTMAP USA digital terrain model over several USA study site. *In: ASPRS/MAPPS 2009 Fall Conference November 16-19, 2009. San Antonio, Texas*. 12 p.
- USGS. *Global land cover facility - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*.
<http://glcf.umiacs.umd.edu/data/srtm/index.shtml>, dernière consultation le 07 Juin 2009.
- VAN DER HOUT P. & VAN LEERSUM G.J.R., 1998. Reduced impact logging: a global panacea? Comparaison of two logging studies. *Research in tropical rain forest: its challenges for the future*. Wageningen, Tropenbos, 185-204.
- VAN NIEL T., MCVICAR T., LI L., *et al.*, 2008. The impact of misregistration on SRTM and DEM image differences. *Remote Sensing of Environment*. **112**, 2430-2442.
- VAN ZYL J., 2001. The shuttle radar topography mission (SRTM): A breakthrough in remote sensing of topography. *Acta Astronautica*. **48** (5-12), 559-565.
- VANDE WEGHE J-P., 2004. *Forêts d'Afrique centrale*. Tielt, ECOFAC, 367 p.
- VANDE WEGHE J-P., 2005. *Les parcs nationaux du Gabon. Akanda et Pongara. Plages et mangroves*. Gabon, Wildlife Conservation Society (WCS), 208 p.
- WALKER W., KELLNDORFER J. & PIERCE L., 2007. Quality assessment of SRTM C- and X-band interferometric data: Implications for the retrieval of vegetation canopy height. *Remote Sensing of Environment*. **106**, 428-448.
- WHITE F., 1986. *La végétation de l'Afrique. Mémoire accompagnant la carte de végétation Unesco / AETFAT / UNSO*. Paris, France, ORSTOM & UNESCO, 384 p.
- WUNDER S., 2005. Macroeconomic change, competitiveness and timber production: A five-country comparison. *World Development*. **33** (1), 65-68.
- YAMAGUCHI Y., FUJISADA H., TSU H., SATE I., WATANABE H., KATE M., KUDOH M., KAHLE A. & PNIEL M., 2001. ASTER early image evaluation. *Adv. Space Res.* **28**, 69-76.
- YAMAGUCHI Y., KAHLE A., TSU H., KAWAKAMI T. & PNIEL M., 1998. Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. **36**, 1062-1071.