



Mise en place de filières d'approvisionnement en cacao à impact réduit en termes de déforestation en Côte d'Ivoire

Aide-mémoire de la mission #5

Jérôme MAURICE – ingénieur forestier (SalvaTerra)



Commission nationale REDD+ de la
République de Côte d'Ivoire



Facilité UE REDD+, Institut européen de
la forêt (EFI)

Avril 2016



Sommaire

Sommaire	2
Liste des figures	3
Liste des tableaux	4
Acronymes	5
Résumé pour décideurs	6
1. Rappels	8
1.1. Approche HCS : cartographie wall-to-wall et inventaires des stocks de carbone (rappel sur la méthodologie HCS)	8
1.2. Objectif et résultats attendus dans le cadre du projet FFCSC	9
2. Cartographie de l'utilisation des terres	10
2.1. Présentation de la zone d'étude	10
2.2. Matériel : images SPOT 6/7 et Pléiades	21
2.3. Méthode d'analyse (classification supervisée)	22
2.4. Méthode de validation	34
2.5. Résultats	38
2.6. Recherche d'alternatives	39
2.7. Discussion	40
2.8. Recommandations	41
3. Conception d'un dispositif d'inventaire "HCS"	43
3.1. Grandeur à mesurer	43
3.2. Strates à inventorier	43
3.3. Plan de sondage	43
3.4. Taille des échantillons	44
3.5. Forme des placettes	45
3.6. Fiche de comptage et protocole de mesures	46
3.7. Notes sur la notion de "seuil HCS" dans le contexte de Bianouan	46
3.8. Recommandations finales	46
Annexe 1 – Calendrier de la mission #5	48
Annexe 2 - Détail des images SPOT 6/7 et Pléiades fournies par Airbus	49
Annexe 3 – Calcul du nombre d'unités d'échantillonnage théorique (validation)	50
Annexe 4 – Méthodologie de validation CORINE LAND COVER (Addendum 2009)	51
Annexe 5 – Protocole HCS provisoire	54
Annexe 6 – Fiche de comptage HCS	56
Annexe 7 – Extraits choisis des présentations de la formation "inventaires HCS"	57
Bibliographie	82

Liste des figures

Figure 1 : Qu'est-ce que le zonage HCS ?	8
Figure 2 : Qu'est-ce que le zonage HCS+?	9
Figure 3 : Carte de la zone d'étude au 1/500 000.....	10
Figure 4 : Géolocalisation des trois jeux de données collectées sur le terrain.....	11
Figure 5 : Cacaoyère de type 1 (sous couvert – bien drainé)	12
Figure 6 : Cacaoyère de type 2 (plein soleil – bien drainé).....	13
Figure 7 : Cacaoyère de type 3 (plein soleil – sol engorgé).....	13
Figure 8 : Détail des zones de plantations d'hévéa	14
Figure 9 : Plantation d'hévéa mature	14
Figure 10 : Plantation d'hévéa jeune	14
Figure 11 : Plantation de café encore exploitée.....	15
Figure 12 : Détail des zones de cultures pérennes à cacao et café	15
Figure 13 : Palmeraie vue du sol	16
Figure 14 : Palmeraie visible à partir de l'image Pléiades (RGB/123).	16
Figure 15 : Plantation de Teck (<i>Tectona grandis</i>).....	17
Figure 16 : Cultures associées - igname et banane	18
Figure 17 : Détail des zones de forêts secondaires et jachères sur l'image SPOT 6	18
Figure 18 : Rappel de la classification provisoire proposée dans l'aide-mémoire de mission #3.....	20
Figure 19 : Jachères anciennes.....	20
Figure 20 : Jachères récentes	20
Figure 21 : Jachères très récentes sur sol bien drainé (à g.) et engorgé périodiquement (à d.).....	21
Figure 22 : Illustration de zones de cultures annuelles (bas fond).....	21
Figure 23 : Localisation de la zone d'étude et emprise des images SPOT 6 & Pléiades.....	22
Figure 24 : Visualisation des images SPOT6, SPOT6-pansharpned et Pléiades.....	23
Figure 25 : Scène SPOT 6, zone d'étude et masque des nuages	24
Figure 26 : Visualisation des différences de luminosité sur plusieurs zones de l'image SPOT 6.	24
Figure 27 : Représentation de la réflectance moyenne des zones d'entraînement	26
Figure 28 : Comparaison SPOT 6 / Pléiades – visualisation d'une plantation d'hévéa.....	28
Figure 29 : Variations spectrales en zone de cultures pérennes à cacao et café (zone à pentes fortes)	28
Figure 30 : Visualisation des plantations d'hévéa avec différents capteurs optiques	29
Figure 31 : Illustration des variations spectrales en plantations d'hévéa (exemple)	29
Figure 32 : Illustration des variations spectrales en palmeraie (exemple)	30
Figure 33 : Similarité spectrale entre des palmeraias et des forêts moyennement à faiblement conservées.	30
Figure 34 : Représentation de la réflectance moyenne des nouvelles zones d'entraînement	32
Figure 35 : Détail des post-traitements - tamisage des pixels avec une MMU de 69 pixels (0,25 ha).....	32
Figure 36 : Cartographie de l'utilisation des terres dans la zone d'étude.....	33
Figure 37 : Exemple de matrice de confusion (d'après Congalton et Green, 2009).....	34
Figure 38 : Représentation de la réflectance moyenne des classes.....	39
Figure 39 : Exemple de "cluster" dans un plan de sondage aléatoire.....	43

Liste des tableaux

Tableau 1 : Sous-classes d'utilisation des terres pour le cacao	12
Tableau 2 : Sous-classes d'utilisation des terres pour l'hévéa.....	13
Tableau 3 : Sous-classes d'utilisation des terres pour le café	15
Tableau 4 : Sous-classes d'utilisation des terres pour le palmier	16
Tableau 5 : Sous-classes d'utilisation des terres pour le teck	17
Tableau 6 : Sous-classes d'utilisation des terres pour les cultures annuelles	17
Tableau 7 : Sous-classes d'utilisation des terres pour les forêts secondaires et jachères.....	18
Tableau 8 : Caractéristiques du capteur SPOT 6 et 7	21
Tableau 9 : Caractéristiques du capteur Pléiades	22
Tableau 10 : Indice de séparabilité spectral (Jeffreys-Matusita) des zones d'entraînement.....	26
Tableau 11 : Zones d'entraînement et points de contrôle regroupés pour la nouvelle classification	27
Tableau 12 : Indice de séparabilité spectral (Jeffreys-Matusita) des nouvelles zones d'entraînement.....	31
Tableau 13 : Avantages et inconvénients de la forme des unités d'échantillonnage (données de contrôle)	35
Tableau 14 : Nombre d'unités d'échantillonnage requises pour une validation à 5 classes.....	36
Tableau 15 : Avantages et inconvénients des différents modes d'échantillonnage	36
Tableau 16 : Nombre de points de contrôle échantillonnés par classe (k = 5)	37
Tableau 17 : Matrice de confusion des résultats de la classification	38
Tableau 18 : Tableau récapitulatif des facteurs de variabilité spectrale dans la zone d'étude.....	41
Tableau 19 : Coefficients de variation types pour les forêts denses humides et autres formations.....	44
Tableau 20 : Intensité d'échantillonnage provisoire pour l'inventaire HCS dans la zone de Bianouan	45
Tableau 21 : Estimation de la quantité de personnel technique nécessaire pour mener l'inventaire HCS	45
Tableau 22 : Stockage de carbone en plantations cacaoyères (revue de littérature)	46

Acronymes

ACP	Analyse en composantes principales
Airbus DS	<i>Airbus Space and Defence</i>
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
CORINE	Coordination de l'information sur l'environnement
EFI	Institut européen de la forêt
FFCSC	<i>Forest-Friendly cocoa supply chain</i>
GAR	<i>Golden Agri Resources</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HCS	<i>High Carbon Stock</i>
HR	haute résolution
IGN-FI	Institut géographique national France international
JRC	<i>Joint Research Center</i>
MMU	<i>Minimum mapping unit</i>
NDVI	Indice de végétation par différence normalisé
ONF-I	Office national des forêts international
REF3D	<i>Reference 3D</i>
RGB	<i>Red, Green, Blue</i>
ROI	<i>Regions of interest</i>
SAVI	Indice de végétation ajusté pour le sol
SIG	système d'information géographique
SIRS	Système d'information à référence spatiale
THR	très haute résolution
TSAVI	Indice transformé de végétation ajusté pour le sol

Résumé pour décideurs

La première partie de ce rapport présente un essai de cartographie wall-to-wall de l'utilisation des terres dans une zone d'approvisionnement en cacao de près de 116 000 ha située dans la région de Bianouan, à l'est de la Côte d'Ivoire. Elle s'appuie sur la classification supervisée d'une image SPOT 6 à 6 mètres de résolution spatiale, après transformation ACP (*Analyse en composantes principales*, dont les détails techniques sont fournis dans le présent rapport). Des images à très haute résolution (Pléiades et Google Earth) ont également été utilisées en appui à l'identification de zones d'entraînement.

Pour ce faire, une typologie de l'utilisation des terres a été élaborée en novembre 2015 au cours d'une mission de caractérisation sur le terrain (305 sites géolocalisés). Parmi les types d'utilisation des terres identifiés figurent les cultures pérennes (café, cacao, palmier, hévéa et teck), les jachères (anciennes, récentes et très récentes) et les forêts secondaires moyennement à faiblement conservées. Des sous-types ont également été identifiés, essentiellement par leurs caractéristiques structurales. Par la suite, une seconde mission de terrain a permis, en janvier 2016, de collecter des données d'entraînement (270 points GPS) nécessaires pour calibrer la classification supervisée. Seules les zones les plus homogènes du point de vue de leur réflectance ont servi de zones d'entraînement.

Une analyse de la séparabilité spectrale de ces classes et leur classification provisoire ont montré un risque de confusion élevé, avec un taux de bonne classification faible (28%). Afin d'améliorer ces résultats, des regroupements de classes ont été proposés et de nouvelles zones d'entraînement ont été identifiées par interprétation visuelle d'images à très haute résolution (images Pléiades à 2 m en multi-spectral, images SPOT 6 "*pansharpened*" à 1,5 m et images Google Earth), dans le but de rechercher des zones d'entraînement plus homogènes.

Une seconde analyse de la séparabilité spectrale a montré des résultats encourageants. Différents procédés de classification supervisée ont ensuite été employés afin d'établir la carte d'utilisation des terres finale. Le procédé permettant d'obtenir les meilleurs résultats a été réalisé à partir des trois nouvelles bandes spectrales résultant de la transformation ACP. Un procédé de post-traitement de la classification a été effectué, prenant comme référence une Unité minimum cartographiable (MMU) de 0,25 ha, permettant d'éliminer les pixels isolés et d'améliorer la qualité de la lecture visuelle.

Pour évaluer les résultats de la classification, une procédure de validation a été mise en œuvre en suivant les recommandations de Congalton et Green (2009). Le nombre d'unités d'échantillonnage (412 sites géolocalisés en janvier 2016) et la procédure d'échantillonnage (aléatoire stratifiée) ont été déterminés de façon à obtenir le meilleur compromis entre robustesse statistique et faisabilité technique. En l'absence de données ancillaires telles que des photographies aériennes, les unités d'échantillonnage ont été inventoriées directement sur le terrain.

La classification, évaluée à travers une matrice de confusion, présente une précision encore faible (39% de classification satisfaisante). Malgré la recherche de différentes alternatives (classifications orientée-objets), ces résultats finaux n'ont pu être améliorés. La faible fiabilité est principalement due à l'hétérogénéité au sein d'une même classe d'utilisation des terres, résultant de la diversité des associations (cultures pérennes x cultures vivrières, cultures pérennes sous ombrage, jachères anciennes sur café, etc.), des états phénologiques (comportement caducifolié de certaines espèces comme l'hévéa ou le cacao à différents stades de maturité, attaques parasitaires dans le cacao, etc.) et des caractéristiques structurales (fonction des modes de gestion "plein soleil" ou avec arbres d'ombrage, de l'ancienneté des jachères, de l'âge et des espacements des plantations d'hévéa, etc.). Les variations saisonnières et les caractéristiques propres à chaque espèce, ainsi que des variations topographiques, engendrent une forte hétérogénéité au sein d'une même classe, dans un espace qui plus est très fragmenté. Enfin, si la classification des cultures de cacao et de café n'obtient pas non plus des résultats satisfaisants (51% de bonne classification), elle constitue tout de même la classe présentant le pourcentage de fiabilité le plus élevé.

Plusieurs tests, intégrant des indices de biomasse – par exemple, le NDVI - comme critère de classification, la classification sur l'image fusionnée (*pansharpened*) ou encore l'utilisation de différentes unités minimum cartographiables (0,1 ha et 0,5 ha) et la classification orientée-objets ont été tentés pour améliorer les résultats de la classification. Ces procédés alternatifs n'ont pas permis d'améliorer les résultats, ni en termes de pourcentage de bonne classification, ni pour résoudre les problèmes de confusion entre les classes. Compte tenu de la forte variabilité de la réponse spectrale

dans les bandes utilisées par le capteur, il n'est pas permis de distinguer nettement les différentes classes de végétation via les procédés de classification automatisés (supervisée ou non-supervisée).

Différentes alternatives pourraient être mises en place pour tenter de réduire la variabilité spectrale des classes, en commençant par sélectionner une zone d'étude plus réduite, voire travailler sur plusieurs zones d'analyses distinctes, en fonction de leurs caractéristiques topographiques par exemple. Il serait également nécessaire d'inclure dans la sélection de zones d'entraînement des variables liées à l'état de végétation de certaines cultures, comme l'hévéa qui présente des risques de confusion élevée avec la classe "forêts secondaires moyennement à faiblement conservées". En effet, la maturité des plantations ainsi que la régularité des espacements sont deux facteurs qui influencent la régularité et la texture du couvert, donc la signature spectrale des plantations.

Des relevés pourraient également être effectués à différentes époques de l'année afin de prendre en compte la phénologie des espèces comme l'hévéa ou le cacao qui, à différentes saisons, pourraient présenter des signatures spectrales différentes permettant d'améliorer les résultats de la classification. En continuité du point précédent, d'autres indices de végétation pourraient être suivis au plan saisonnier (NDVI, SAVI, TSAVI, etc.). L'objectif serait de déterminer si un indice de végétation est plus pertinent à une époque donnée, mais sans garanti sur le résultat final.

La conclusion principale est qu'il n'est pas possible de suivre l'évolution de l'utilisation des terres dans l'ensemble de la zone d'étude, avec les techniques de classification automatiques, avec une précision acceptable (supérieure à 80%) sur des images optiques à haute et très haute résolution. Les techniques d'interprétation visuelle sont quant à elles trop coûteuses pour envisager de les employer sur toute la zone.

La seconde conclusion est que, **dans ce contexte**, même si leur plus grande résolution spatiale est également source de plus grande variabilité au niveau des signatures spectrales (cas des ombres portées des houppiers d'hévéa par exemple), les images à haute et très haute résolution apportent un grand nombre d'informations pouvant être interprétées visuellement pour définir des zones d'entraînement – voire dans certains cas des zones de contrôle (cas des plantations de palmiers sur image Pléiades en transformation ACP en multi-spectral). Leur emploi nécessite toutefois une très bonne connaissance préalable du terrain pour pouvoir reconnaître certaines classes avec exactitude et éviter les risques de confusion.

L'approche HCS doit donc être adaptée dans le cas présent, en privilégiant une interprétation visuelle de zones d'analyses restreintes plutôt qu'une cartographie wall-to-wall sur l'ensemble de la zone d'étude (à moins que celle-ci soit réduite considérablement). Le dispositif de suivi HCS consisterait donc plutôt à suivre l'évolution d'un échantillon de producteurs par interprétation visuelle d'images à haute résolution.

Par la suite, la mise en œuvre d'un inventaire HCS ne pose pas en soit de difficulté technique, même si les moyens disponibles dictent en partie le niveau de précision qu'il est possible d'atteindre. Toutefois si la relation entre "strates" et "stocks de carbone aérien moyens" n'est pas suffisamment robuste en utilisant les équations de biomasse "générique" à une entrée, les estimations seront probablement faussées. Dans ce cas, il faut donc investir des moyens de R&D conséquents pour affiner les équations de biomasse en modélisant les stocks de carbone dans les strates, y compris dans la strate cacaoyère, pour laquelle il existe peu voire pas de données sur la Côte d'Ivoire.

Enfin, même si la définition de forêt est commune d'un bout à l'autre du pays, les formations écologiques et les dynamiques d'utilisation des terres varient quant à elles. On peut considérer que les seuils HCS proposés seraient valables dans des conditions écologiques et des pratiques culturelles similaires. Certaines classes de végétation peuvent toutefois apparaître ou disparaître, selon les dynamiques d'utilisation des terres au niveau local. En théorie, il faudrait donc vérifier que la classification HCS est applicable à toute nouvelle zone d'étude, et dans le cas contraire, proposer une autre classification plus adaptée au bassin d'approvisionnement étudié.

1. Rappels

1.1. Approche HCS : cartographie wall-to-wall et inventaires des stocks de carbone (rappel sur la méthodologie HCS)

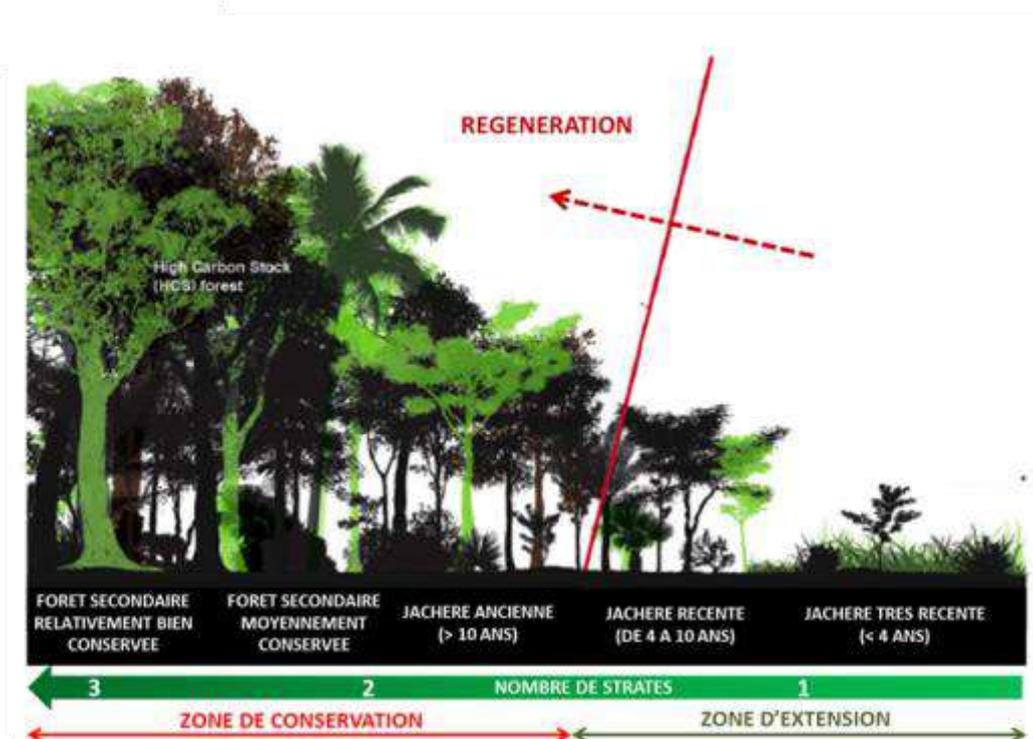


Figure 1 : Qu'est-ce que le zonage HCS ?

- Cartographie de l'utilisation des terres

L'objectif final de la cartographie de l'utilisation des terres est de pouvoir identifier, dans un premier temps, des zones de préservation (forêts et jachères anciennes) dans laquelle l'extension de la culture cacaoyère serait prohibée, par opposition aux zones de production (jachères récentes, cultures pérennes et annuelles, etc.) dans lesquelles la production cacaoyère pourrait être étendue et intensifiée (voir **Figure 1**).

La méthodologie employée repose sur l'analyse spectrale des différents types d'utilisation des terres (dont les cacaoyères) pour produire une carte de l'utilisation des terres. L'hypothèse de travail est qu'une bonne connaissance de la signature spectrale d'une strate de végétation (signature dépendante de sa structure, son organisation spatiale et sa dynamique d'évolution) pourrait permettre sa cartographie à partir d'une image satellite à haute ou très haute résolution avec une précision satisfaisante.

L'interprétation visuelle et la classification automatique (supervisée ou non-supervisée) sont quelques traitements de télédétection exploitant la signature spectrale des peuplements qui, combinés à des caractérisations de terrain, conduisent à la cartographie de l'utilisation des terres.

- Inventaire des stocks de carbone "HCS"

L'analyse de l'utilisation des terres est complétée par un inventaire des stocks de carbone "HCS", correspondant à une estimation partielle de la biomasse aérienne totale. L'objectif de cet inventaire est d'estimer le stock de carbone aérien moyen de chacune des strates de végétation identifiées lors de la cartographie de l'utilisation des terres. Théoriquement, en comparant ces stocks de carbone avec le "seuil HCS", on en déduit les zones HCS (au-delà du seuil) et non-HCS (en deça du seuil).

Deux conditions doivent cependant être réalisées pour que cette approche soit valide : (i) la différence entre les stocks de carbone moyen par strate doit être statistiquement significative. Dans le cas

contraire, il ne serait pas possible de différencier les strates de végétation sur le seul critère "carbone", le stock moyen étant trop similaire (ii) les équations allométriques utilisées pour estimer les stocks de carbone aérien moyen dans les différentes strates de végétation doivent être valides pour le contexte étudié.

- Zonage "HCS+"

Cette première étape est complétée par un zonage socio-économique et environnemental, prenant en compte la présence de forêts sacrées, de zones humides, de zones à fort potentiel de conservation de la biodiversité, de forêts classées, etc. aboutissant au zonage "HCS+". Ce point ne sera pas abordé dans le cadre des présents travaux.

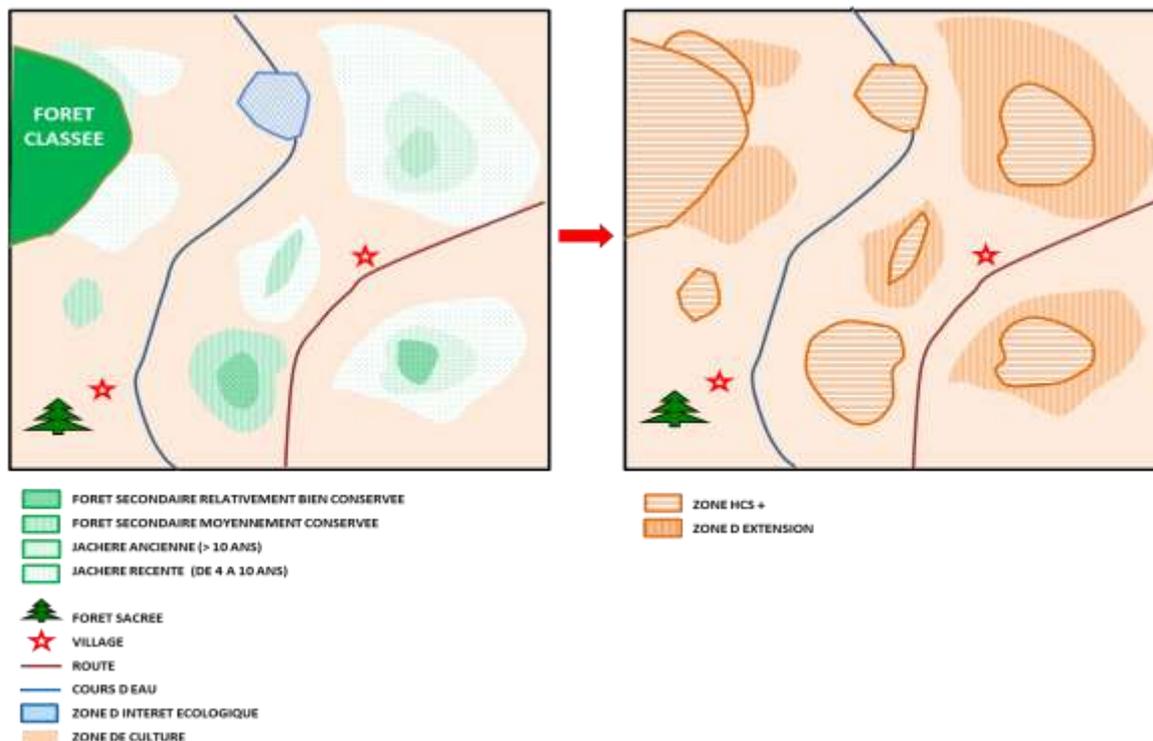


Figure 2 : Qu'est-ce que le zonage HCS+?

1.2. Objectif et résultats attendus dans le cadre du projet FFCSC

L'objectif de la composante de travail MRV du projet FFCSC est de fournir des recommandations opérationnelles pour le suivi spatial et temporel de la déforestation à l'échelle d'un bassin d'approvisionnement cacaoyer en mobilisant – et en adaptant, si besoin – l'approche HCS développée en Indonésie auprès des industriels de la filière huile de palme.

Les résultats attendus sont donc d'étudier la faisabilité de la cartographie wall-to-wall d'un bassin pilote, à partir d'images à haute résolution voire très haute résolution (HR/THR), ainsi que la proposition d'un dispositif d'inventaire HCS incluant un plan d'échantillonnage, un protocole de terrain et une fiche de comptage. La formation d'agents techniques pour l'exécution de l'inventaire fait également partie des résultats attendus.

Le bassin d'approvisionnement pilote finalement retenu, présenté ci-dessous et dénommé "zone d'étude" dans ce qui suit, a été défini d'un commun accord entre les parties-prenantes du projet sur la base des propositions de SalvaTerra, suite aux missions #3 et #4 réalisées dans le centre et l'est de la Côte d'Ivoire.

2. Cartographie de l'utilisation des terres

2.1. Présentation de la zone d'étude

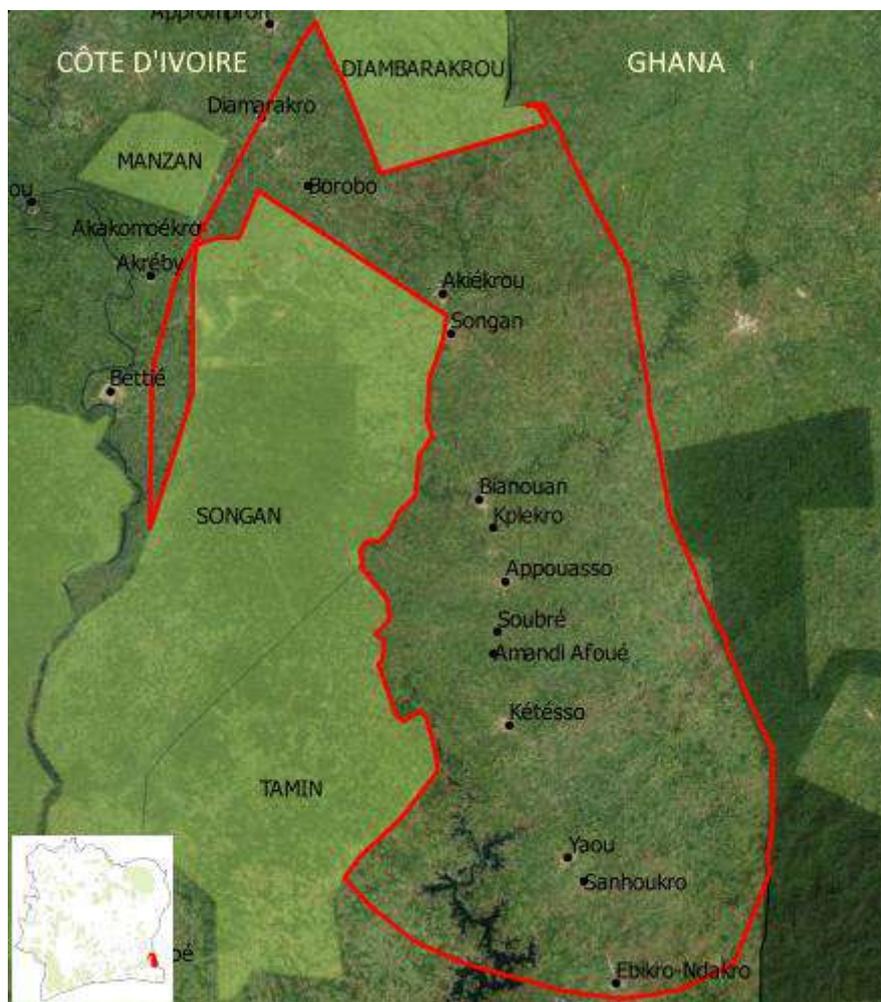


Figure 3 : Carte de la zone d'étude au 1/500 000

La zone d'étude s'étend du village d'Ebikro Ndakro au sud jusqu'à celui de Diamarakro et la forêt classée de Diamarakrou au nord. La limite à l'est correspond à la frontière avec le Ghana, celle à l'ouest correspond aux forêts classées de Songan et Tamin, bordées par la rivière Bia.

L'exploitation des données SIG permet d'estimer la surface de la zone d'étude à environ 115 930 ha¹. Les données acquises sur le terrain au cours de trois missions réalisées en juin 2015, novembre 2015 et janvier 2016 indiquent la très faible présence de forêts secondaires dans la zone d'étude. Il existe cependant de nombreuses jachères plus ou moins arborées ayant fait l'objet d'une première typologie en tenant compte de leur structure (hauteur et recouvrement des strates arborées, arbustives et herbacées). A priori, il y aurait donc plusieurs sous-classes de jachères, certaines étant très pauvres et aptes à l'extension des cultures, et d'autres plus riches et pouvant être considérées comme des zones de préservation (leur mise en défens pouvant permettre de reconstituer, à terme, des espaces à caractère forestier). Les cultures pérennes sont quant à elles dominées par le cacao, l'hévéa et le café, loin devant le palmier à huile et le teck. Les cultures annuelles sont également nombreuses (manioc, banane, igname, maïs...).

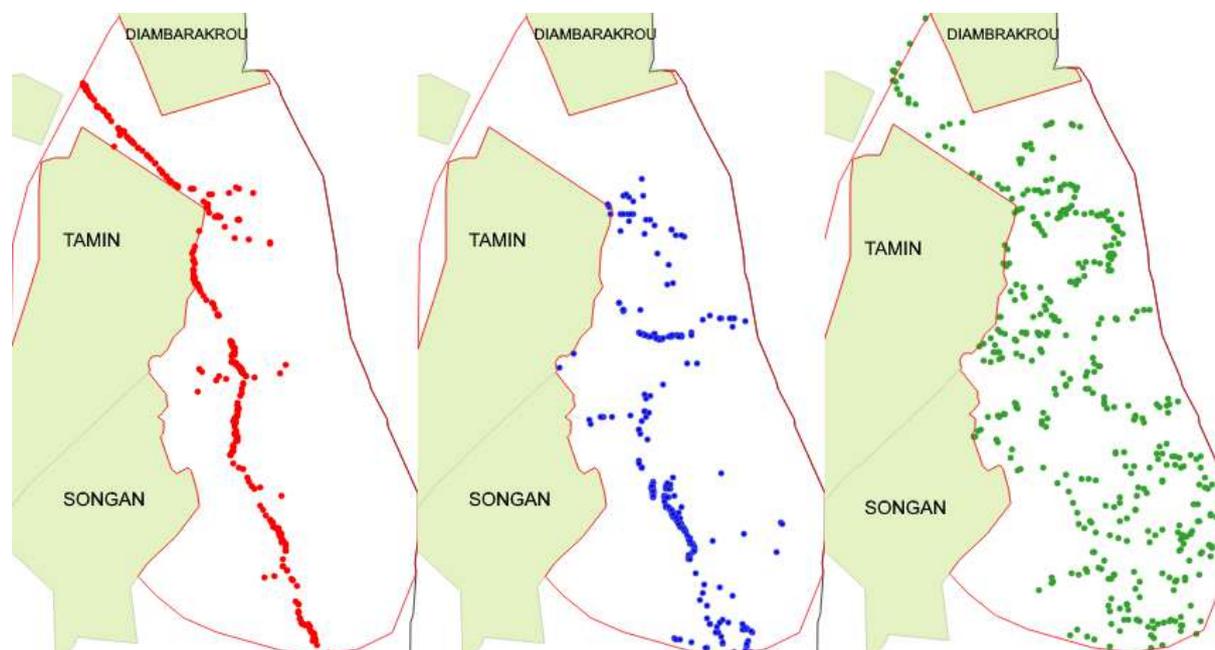
En l'absence de données ancillaires telles que des photographies aériennes, une mission de terrain a été organisée en novembre 2015 afin de caractériser finement les différents types d'utilisation des

¹ Surface calculée sous Q-GIS avec la projection UTM zone 30 N.

terres. Les types rencontrés ont été décrits du point de vue structural (nombre de strates, hauteur et recouvrement), physiologique (présence de fleurs, fruits), écologique (caractéristiques du sol, humidité) et phénologique (présence de feuilles). Près de 305 sites ont été visités, avec collecte de points GPS et de photographies, permettant à l'analyste de capturer l'hétérogénéité de la zone d'étude et de disposer de points de référence à son retour au bureau.

Plusieurs portions de la zone d'étude ont été identifiées au préalable par l'analyste, et à l'intérieur, les sites à visiter ont été repérés par leurs coordonnées GPS. Chaque portion a été parcourue par une équipe de deux agents progressant en sens contraire (ex : l'un progressant du nord vers le sud, et l'autre du sud vers le nord). Dans la sous-préfecture de Bianouan, si le temps de description d'un site est en moyenne de 15 à 20 minutes, le temps de cheminement pour joindre les différents sites varie de 20 minutes à 1h45, en fonction des distances (de 7 à 36 km, parcours à moto). Au cours du cheminement, les agents étaient tenus de visiter *a minima* chaque site pré-identifié. Ils ont également eu la possibilité de compléter leurs observations par des sites non pré-identifiés et présentant un intérêt particulier : type d'utilisation des terres non reconnu jusqu'alors, variation d'un type déjà reconnu, etc.

Pour assurer une exploitation maximale des données récoltées, il était essentiel que l'analyste participe lui-même à la mission de caractérisation, ce qui lui a permis d'orienter la collecte des données sur le terrain en temps réel. Les sites étudiés en janvier 2016 ont permis de définir des zones d'entraînement et de validation (deux jeux de données indépendants) que l'analyste a mobilisés par la suite.



Gauche : données de caractérisation (305 points), novembre 2015.
Centre : données d'entraînement (270 points), janvier 2016.
Droite : données de validation (412 points), janvier 2016.

Figure 4 : Géolocalisation des trois jeux de données collectées sur le terrain

2.1.1. Typologie de l'utilisation des terres

L'ensemble des données collectées a permis d'identifier les types d'utilisation des terres ci-contre :

- Cultures pérennes :

Il s'agit pour l'essentiel de cultures pérennes de type arbustives (cacao) ou arborées (hévéa). A côté de ces deux principales cultures, quelques parcelles de caféiers et, dans une moindre mesure, des palmeraies sont représentées.

La période de prise de vue (janvier) correspond à la saison sèche qui dure de décembre à février dans la région. Ces deux principales cultures – cacao et hévéa – perdent une partie de leur feuillage de façon progressive de décembre jusqu'à février :

- Pendant la saison sèche, les parcelles de cacaoyers perdent environ le tiers de leur feuillage. Il s'agit également d'une période où les cacaoyers sont couverts de cabosses matures, soit la fin de la grande traite ;
- Au niveau des parcelles d'hévéa, la chute des feuilles peut atteindre les deux tiers.

Comme nous le verrons dans la suite de ces travaux, cette situation rend complexe la discrimination spectrale de ces deux types d'utilisation des terres majoritaires dans la zone.

Plusieurs sous-types d'utilisation des terres sont distingués visuellement pour les cultures pérennes en fonction du type de sol, du taux de recouvrement de la strate ligneuse (cas des cultures sous-couvert) et de la hauteur des différentes strates, ligneuse(s) et herbacée. On dénombre :

- **Trois sous-types pour la culture du cacao :**

Utilisation du sol	Strates ligneuses				Strate herbacée		Sol
	Strate 1		Strate 2		H	R	
	H*	R**	H	R			
Cacaoyère type 1 (sous couvert)	10 à 20 m	5 à 20%	2 à 4 m	40 à 80%	0 à 1 m	10 à 80%	Bien drainé
Cacaoyère type 2 (plein soleil)	absent	-	2 à 5 m	60 à 80%	0 à 1 m	10 à 80%	Bien drainé
Cacaoyère type 3 (plein soleil)	absent	-	2 à 5 m	20 à 60%	0 à 2 m	80 à 100%	Engorgé généralement

*H = hauteur de la strate (en mètres) ; **R = pourcentage de recouvrement (en % de surface au sol)

Tableau 1 : Sous-classes d'utilisation des terres pour le cacao

Par la présence de la strate ligneuse, la cacaoyère de type 1 diffère logiquement de celle de type 2 qui est de plein soleil. La cacaoyère de type 3 diffère des deux autres du fait qu'elle est pratiquée sur des sols engorgés. Cependant, en saison sèche, cette dernière caractéristique ne se reflète pas sur les images (les sols apparaissent secs) et les deux types 2 et 3 se confondent.



Figure 5 : Cacaoyère de type 1 (sous couvert – bien drainé)



Figure 6 : Cacaoyère de type 2 (plein soleil – bien drainé)



Figure 7 : Cacaoyère de type 3 (plein soleil – sol engorgé)

- Deux sous-types pour la culture de l'hévéa :

Utilisation du sol	Strates ligneuses				Strate herbacée		Sol
	Strate 1		Strate 2		H	R	
	H*	R**	H	R			
Hévéa mature	5 à 7 m	70 à 80%	absent	-	0 à 2 m	70 à 80%	Bien drainé
Hévéa jeune	1 à 7 m	10 à 70%	absent	-	0 à 2 m	10 à 80%	

*H = hauteur de la strate (en mètres) ; **R = pourcentage de recouvrement (en % de surface au sol)

Tableau 2 : Sous-classes d'utilisation des terres pour l'hévéa

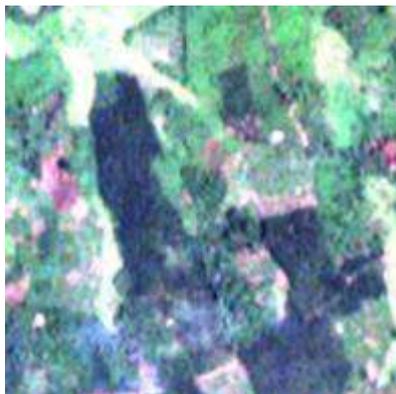


Figure 8 : Détail des zones de plantations d'hévéa

Source: scène DIM.SPOT6_MS_201401031013379_ORT_1561707101 (RGB/123)

La présence d'une strate herbacée avec un taux de recouvrement plus important dans les plantations d'hévéa matures (cf. **Tableau 2**), en comparaison des jeunes plantations, pourraient principalement s'expliquer par le port étriqué des hévéas et leur houppier peu dense, occasionnant un éclaircissement relatif important au sol, combiné à l'arrêt des entretiens. Les herbacées se développent également dans les jeunes plantations d'hévéas, mais celles-ci sont entretenues successivement pendant plusieurs années, avec plus ou moins d'attention selon les producteurs, pouvant expliquer la plus grande variabilité des taux de recouvrement (10 à 80%).



Figure 9 : Plantation d'hévéa mature



Figure 10 : Plantation d'hévéa jeune

- **Un sous-type pour la culture du café :**

Utilisation du sol	Strates ligneuses				Strate herbacée		Sol
	Strate 1		Strate 2		H	R	
	H*	R**	H	R			
Café mature	5 à 15 m	10 à 15%	3 à 4 m	60 à 70%	0 à 2 m	20 à 50%	Bien drainé

*H = hauteur de la strate (en mètres) ; **R = pourcentage de recouvrement (en % de surface au sol)

Tableau 3 : Sous-classes d'utilisation des terres pour le café

Cette culture, essentiellement sous couvert, occupe aujourd'hui de très petites surfaces car elles ont généralement été converties en cacao ou en hévéa. On n'observe donc logiquement pas de plantations jeunes/récentes. Certaines sont également complètement à l'abandon et présentent une signature spectrale proche des jachères anciennes.



Figure 11 : Plantation de café encore exploitée



Figure 12 : Détail des zones de cultures pérennes à cacao et café

Source: scène DIM.SPOT6_MS_201401031013379_ORT_1561707101(RGB/123)

- **Un sous-type pour la culture du palmier :**

Utilisation du sol	Strates ligneuses				Strate herbacée		Sol
	Strate 1		Strate 2		H	R	
	H*	R**	H	R			
Palmier	1 à 5 m	50 à 70%	absent	-	0 à 2 m	70 à 90%	Bien drainé et hydromorphe

*H = hauteur de la strate (en mètres) ; **R = pourcentage de recouvrement (en % de surface au sol)

Tableau 4 : Sous-classes d'utilisation des terres pour le palmier

Les palmeraies sont très faiblement représentées dans la zone d'étude. Peu de jeunes palmeraies ont été rencontrées.



Figure 13 : Palmeraie vue du sol

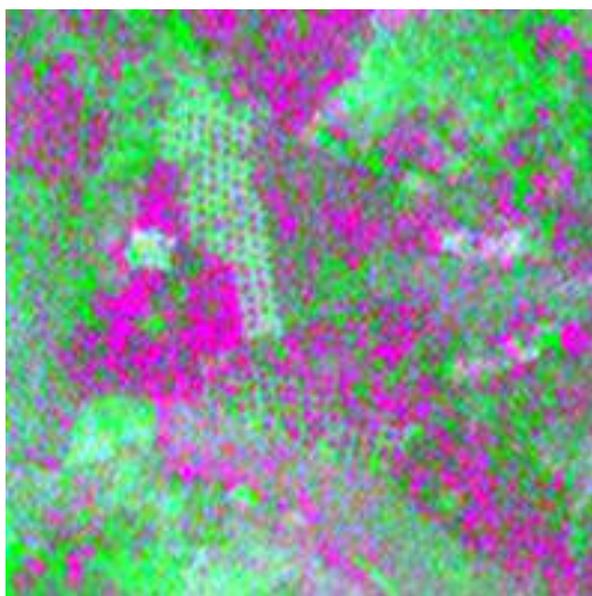


Figure 14 : Palmeraie visible à partir de l'image Pléiades (RGB/123).

Source: scène Pléiades DS_PHR1A_201602021044227_FR1_PX_W004N06_1101_02572 (RGB/123)

- Plantations de teck (*Tectona grandis*) :

Ces plantations sont extrêmement peu représentées dans la zone d'étude. Elles sont décrites comme suit :

Utilisation du sol	Strates ligneuses				Strate herbacée		Sol
	Strate 1		Strate 2		H	R	
	H*	R**	H	R			
Teck	4 à 6 m	30 à 70%	absent	-	0 à 1 m	10 à 90%	Bien drainé

*H = hauteur de la strate (en mètres) ; **R = pourcentage de recouvrement (en % de surface au sol)

Tableau 5 : Sous-classes d'utilisation des terres pour le teck



Figure 15 : Plantation de Teck (*Tectona grandis*)

- Cultures annuelles :

Utilisation du sol	Strates ligneuses				Strate herbacée		Sol
	Strate 1		Strate 2		H	R	
	H*	R**	H	R			
Cultures annuelles	0 à 3 m	40 à 70%	absent	-	0 à 1 m	10 à 90%	Bien drainé et hydromorphe

*H = hauteur de la strate (en mètres) ; **R = pourcentage de recouvrement (en % de surface au sol)

Tableau 6 : Sous-classes d'utilisation des terres pour les cultures annuelles

De façon générale, il s'agit de très petites parcelles de cultures vivrières associées (d'ignames, de banane, de maïs, de manioc, de taro, de piments, etc.) qui se confondent visuellement aux jachères jeunes (avec une strate ligneuse rare ou absente).

Ces parcelles de cultures annuelles sont en réalité des stades transitoires pour l'établissement des cultures de rente (cacao et hévéa). Le manioc est la culture la plus rencontrée car généralement en association avec les jeunes parcelles d'hévéa. Les rizières entrent également dans cette catégorie.



Figure 16 : Cultures associées - igname et banane

- Forêts secondaires et jachères :

Utilisation du sol	Strates ligneuses						Strate herbacée		Sol
	Strate 1		Strate 2		Strate 3		H	R	
	H*	R**	H	R	H	R			
Forêts secondaires moyennement à faiblement conservées	15 à 30 m	20 à 70%	7 à 15 m	>40%	0 à 6 m	10 à 90%	0 à 2 m	5 à 90%	Bien drainé et hydromorphe
Jachères anciennes	7 à 15 m	50 à 90%	absent		0 à 6 m	10 à 100%	0 à 3m	5 à 90%	
Jachères récentes	2 à 10 m	50 à 90%	absent		0 à 5 m	50 à 100%	0 à 3m	70 à 90%	
Jachères très récentes	0 à 6 m	30 à 60%	absent		absent		0 à 2 m	40 à 90%	Hydromorphe le plus souvent

*H = hauteur de la strate (en mètres) ; **R = pourcentage de recouvrement (en % de surface au sol)

Tableau 7 : Sous-classes d'utilisation des terres pour les forêts secondaires et jachères

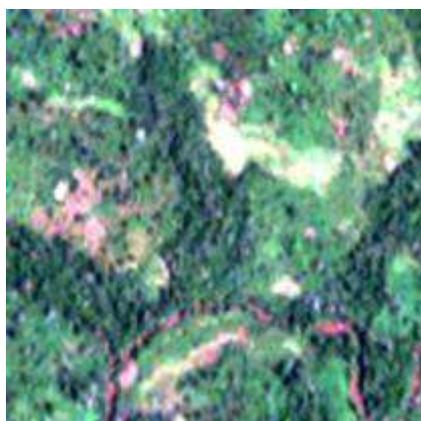


Figure 17 : Détail des zones de forêts secondaires et jachères sur l'image SPOT 6

Source: scène DIM.SPOT6_MS_201401031013379_ORT_1561707101 (RGB/123)

Sous-type "forêts secondaires" :

Les forêts secondaires rencontrées dans la zone d'étude sont moyennement à faiblement conservées et présentes en patchs de très petites dimensions. Ces forêts ne présentent pas de traces de conversion agricole, à la différence des jachères anciennes qui sont issues de la mise en repos de terres agricoles. En revanche, ces forêts sont très dégradées. Leur présence peut s'expliquer par les caractéristiques physiques – sommets, présence de roches et d'éléments grossiers, sols engorgés périodiquement, forêts galeries – ou culturelles (forêts sacrées) des sites en question.

Il s'agit de forêts avec trois strates ligneuses dont la plus haute, atteignant de 15 à 30 m, présente une faible densité d'arbres de grands diamètres pour un taux de recouvrement compris entre 20% et 70% (d'où la notion de faible niveau de conservation). On y distingue ainsi communément une strate intermédiaire, haute de 7 à 15 m et dont le recouvrement atteint plus de 40%, et une strate inférieure plus ou moins ouverte atteignant jusqu'à 6 m de hauteur. Les traces d'activités humaines (coupes de bois, pistes, anciennes souches de bois exploités, etc.) y sont fréquentes.

Cette description confirme la classification provisoire proposée dans l'aide-mémoire #3 et reprise dans l'aide-mémoire #4, même s'il paraît plus judicieux de ne pas créer de classe spécifique pour les forêts secondaires "bien conservées", quasiment absentes de la zone d'étude. Il est probable que les forêts secondaires "bien conservées" soient davantage représentées dans les Forêts Classées, mais celles-ci sont situées en dehors de la zone d'étude.

Sous-type "jachères" :

Comme rappelé dans l'aide-mémoire de mission #3, la zone d'étude présente de très nombreuses jachères anciennes, principalement sur caféières et cacaoyères. En raison de leur aspect (structure et composition en espèces), elles semblent présenter des stocks de carbone et un potentiel de régénération assez importants. Par ailleurs, malgré leur caractère très fragmenté, les surfaces cumulées pourraient être élevées à l'échelle d'un bassin d'approvisionnement : si quasiment aucun planteur ne dispose d'un morceau de forêt, quasiment tous possèdent une parcelle en jachère.

Initialement, quatre classes de jachères ont été identifiées sur le terrain en fonction de leurs caractéristiques structurales. Trois types de jachères présentaient des caractéristiques très similaires : absence de strate ligneuse haute (15-30m), taux de recouvrement de la strate ligneuse n°1 assez proches (50 à 90%), strates basse et herbacées de hauteur et d'amplitude similaires en termes de taux de recouvrement... Elles se différenciaient principalement par la hauteur de la strate ligneuse principale : 7 à 15 m pour les jachères plus anciennes contre 2 à 10 m pour les jachères plus récentes. C'est ce critère qui a été finalement retenu dans la classification. Une quatrième classe représentait les jachères très récentes, facilement reconnaissables par la rareté ou l'absence de toute strate ligneuse. Deux sous-types pouvaient être distingués en fonction du type de sol (bien drainé vs. engorgé) mais comme indiqué précédemment, la période d'étude étant située en saison sèche, cette caractéristique n'apparaissait pas sur le plan spectral et la distinction a été abandonnée.

Ces caractéristiques étant assez proches de celles utilisées pour la classification provisoire proposée dans l'aide-mémoire #3, la dénomination "jachères anciennes", "jachères récentes" et "jachères très récentes" a été conservée. Néanmoins, étant donné qu'il n'était pas possible de connaître avec précision les âges de toutes les jachères lors de la visite sur le terrain (il aurait fallu retrouver tous les propriétaires pour leur poser la question...), il paraît finalement difficile d'utiliser le critère "âge de la jachère" comme facteur de description complémentaire. Les jachères anciennes et récentes se distinguent donc principalement par la hauteur de la strate ligneuse principale, ce qui est un critère suffisant – et plus facilement identifiable.

→ FORET SECONDAIRE RELATIVEMENT BIEN CONSERVÉE

Il s'agit d'une forêt avec trois strates ligneuses dont la plus haute, atteignant de 25 à 30 m, présente une forte densité d'arbres de grands diamètres pour un taux de recouvrement compris entre 70 et 80%. La strate intermédiaire, haute de sept à 15 m, a un recouvrement qui varie entre 30 et 40% tandis que la strate inférieure, atteignant jusqu'à sept m est caractérisée par sa faible densité. L'ensemble comporte de nombreuses lianes et de rares traces d'activités humaines récentes, notamment des coupes et souches de bois ou encore des pistes de circulation.

→ FORET SECONDAIRE MOYENNEMENT A FAIBLEMENT CONSERVÉE

Il s'agit d'une forêt avec trois strates ligneuses dont la plus haute, atteignant de 20 à 25 m (rarement 30 m) présente une faible densité d'arbres de grands diamètres pour un taux de recouvrement compris entre 60 et 70%. Toutefois, de par l'irrégularité de cette strate ligneuse haute, cette forêt secondaire se limite en de nombreux endroits à seulement deux strates ligneuses.

On y distingue ainsi communément une strate intermédiaire, haute de sept à 15 m et dont le recouvrement atteint de 20 à 30%, et une strate inférieure très ouverte et atteignant jusqu'à sept m de hauteur. Les traces d'activités humaines (coupe de bois, piste de traversée, anciennes souches de bois exploités, etc.) y sont fréquentes.

→ JACHERE ANCIENNE (plus de 10 ans)

Il s'agit d'anciennes zones de cultures avec une strate ligneuse irrégulière haute (10 à 15 m) pour un recouvrement 30 à 45%, et une strate ligneuse basse très fermée (70 à 80%).

→ JACHERE RECENTE (4 à 10 ans)

Il s'agit également d'anciennes zones de cultures avec une strate ligneuse irrégulière (sept à 10 m) avec un faible recouvrement 30 à 40%. La strate ligneuse basse est rare ou inexistante et la strate herbacée est développée.

→ JACHERE TRES RECENTE (1 à 4 ans)

Il s'agit de parcelles exploitées et laissées à l'abandon il y a une, deux ou trois années. La strate ligneuse y est pratiquement absente. Ces parcelles se confondent souvent aux cacaoyères jeunes et mal entretenues / enherbées.

Figure 18 : Rappel de la classification provisoire proposée dans l'aide-mémoire de mission #3



Figure 19 : Jachères anciennes



Figure 20 : Jachères récentes



Figure 21 : Jachères très récentes sur sol bien drainé (à g.) et engorgé périodiquement (à d.)



Figure 22 : Illustration de zones de cultures annuelles (bas fond)

Source: scène Pléiades DS_PHR1A_201602021044227_FR1_PX_W004N06_1101_02572 (RGB/321)

L'étape suivante consiste à s'appuyer sur cette typologie d'utilisation des terres pour élaborer la cartographie wall-to-wall de la zone d'étude. Un des enjeux principaux sera de déterminer dans quelle mesure les types observés sur le terrain ont une signature spectrale suffisamment marquée pour être différenciées avec précision par des méthodes de classification supervisée à partir d'images SPOT 6/7.

2.2. Matériel : images SPOT 6/7 et Pléiades

SPOT 6 et SPOT 7 forment une constellation de satellites d'observation de la Terre conçue pour assurer la continuité de la disponibilité des données de haute résolution sur la totalité du globe terrestre. Les images sont acquises de manière simultanée dans les bandes spectrales aux fréquences suivantes :

Bandes	Longueur d'onde	Résolution
Bleue	455 – 525 nm	6 m
Verte	530 – 590 nm	6 m
Rouge	625 – 695 nm	6 m
Proche infrarouge (PIR)	760 – 890 nm	6 m
Panchromatique	455 – 745 nm	1,5 m

Tableau 8 : Caractéristiques du capteur SPOT 6 et 7

Source: SPOT 6 & SPOT 7 Imagery User Guide (Airbus DS)

Les images SPOT 6/7, dont le détail est fourni en **Annexe 2**, ont été fournies par *Airbus Defence and Space* pour des dates récentes, en saison sèche (de janvier 2014 pour l'image couvrant la plus grande partie de la zone d'intérêt à décembre 2014 - janvier 2015 pour les deux autres couvrant une faible portion de la zone d'intérêt), en mailles dénuagées (moins de 15% de nuages), bundle (présence des canaux panchromatique et monospectraux bruts), corrigées géométriquement et ortho-rectifiées grâce à REF3D. Ces images ont une résolution de 6 m en multi-spectral et 1,5 m en panchromatique.

Airbus DS a fourni trois images SPOT 6/7, en multi-spectral et en panchromatique non fusionné. L'image principale² est composée de quatre dalles synchrones (R1C1, R1C2, R2C1, R2C2), pour des raisons de taille. Deux autres images³ ont été fournies pour pallier aux éventuels problèmes de couverture nuageuse sur l'image principale.

Une image Pléiades⁴ à 2 m de résolution en multi-spectral, correspondant à une fraction de la zone d'étude, a également été utilisée en appui à l'identification de nouvelles zones d'entraînement (voir **Section 2.3**). Toutefois aucune classification n'a pu être élaborée à partir de cette image, étant donné que les classes identifiées à cette résolution (2 m) sont encore plus hétérogènes qu'avec la résolution de SPOT 6 (6 m). Les effets des sols nus et de la composition en espèces y sont exacerbés, dans des surfaces qui plus est très réduites. Par ailleurs, les effets d'ombre portée sont élevés sur l'image en question en raison d'un angle de prise de vue élevé.

Bandes	Longueur d'onde	Résolution
Bleue	430 – 550 nm	2 m
Verte	500 – 620 nm	2 m
Rouge	590 – 710 nm	2 m
Proche infrarouge (PIR)	740 – 940 nm	2 m
Panchromatique	470 – 830 nm	0,5 m

Tableau 9 : Caractéristiques du capteur Pléiades

Source: Airbus DS⁵



1. Scène SPOT 6 - DIM.SPOT6_P_201401031013379_ORT_1561707101
2. Zone d'étude
3. Scène Pléiades - DS_PHR1A_201602021044227_FR1_PX_W004N06_1101_02572

Figure 23 : Localisation de la zone d'étude et emprise des images SPOT 6 & Pléiades.

Source: scène DIM.SPOT6_MS_201401031013379_ORT_1561707101 (SPOT 6) et scène Pléiades DS_PHR1A_201602021044227_FR1_PX_W004N06_1101_02572

2.3. Méthode d'analyse (classification supervisée)

Les techniques classiques et éprouvées de classification supervisée ont été privilégiées dans le cadre de cette étude. L'interprétation visuelle des images sur une zone proche de 115 930 ha, extrêmement

² ORT_SPOT6_20140103_101343000_000

³ ORT_SPOT6_20150114_102229900_000 et ORT_SPOT7_20141227_101120400_000

⁴ DS_PHR1A_201602021044227_FR1_PX_W004N06_1101_02572

⁵ <http://www.geo-airbusds.com/fr/3170-les-produits-pleiades>

Cette procédure (*pansharpening*) a permis d'améliorer la visualisation de l'image, l'identification en détail de certaines zones d'entraînement, et l'analyse des résultats à deux échelles différentes de résolution spatiale (6 mètres et 1,5 mètres dans le cas des images SPOT 6/7) dans le but de rechercher des résultats plus performants (voir **Section 2.3**).

La totalité de la scène SPOT a été découpée avec le polygone de la zone d'étude, pour obtenir une seule image avec les limites exactes de la zone du projet. Une première analyse visuelle des nuages présents dans la zone d'étude a été réalisée, et comparée avec le masque fourni par Airbus. Il a été constaté que ce masque ne couvrait pas la totalité des nuages existants.

Un nouveau masque couvrant les zones affectées par la présence de nuages a donc été élaboré. Son élaboration a été réalisée à travers une classification non supervisée (algorithme k-means à 15 classes et 10 itérations) permettant d'identifier les centres nuageux à partir de leur comportement spectral, avec une réflectance très élevée dans l'ensemble des canaux. Une fois les centres nuageux identifiés, et pour éviter une influence éventuelle de ces nuages aux alentours, une zone tampon de 150 mètres a été élaborée.

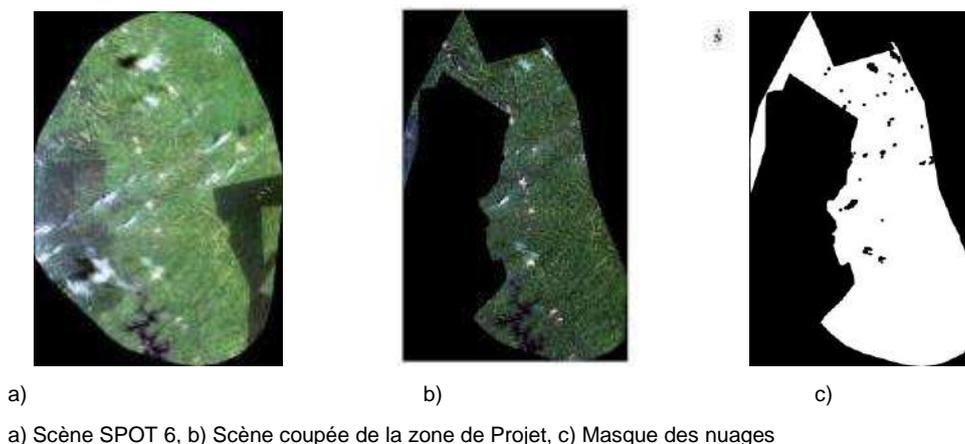


Figure 25 : Scène SPOT 6, zone d'étude et masque des nuages

Des perturbations au niveau local causées par des effets de brumes ou de nuages fins ont également pu être identifiées. Les zones avec des perturbations se situent à proximité des centres nuageux et de façon plus prononcée dans le secteur ouest de l'image correspondant à la zone plus étroite du polygone "zone d'étude". Même si l'image, dans son ensemble, reste assez homogène au niveau de la luminosité, certaines différences ont été identifiées.

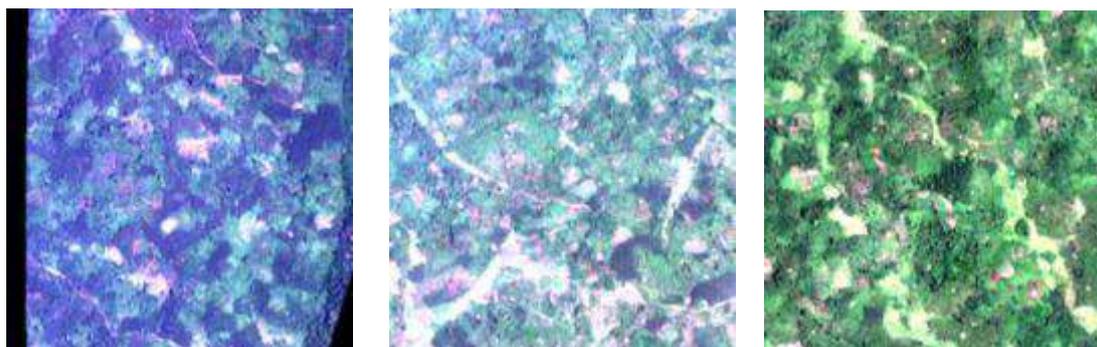


Figure 26 : Visualisation des différences de luminosité sur plusieurs zones de l'image SPOT 6.

A propos de la transformation ACP : Il existe souvent une forte corrélation entre les données des différents canaux. Par exemple, un pixel ayant une valeur élevée dans le rouge a une probabilité forte d'avoir une valeur élevée dans le vert (la réflectance est presque identique pour un type de surface). Les différentes composantes spectrales n'ajoutent alors pas beaucoup d'information à l'image. La transformation ACP permet de réorganiser les données pour qu'elles deviennent indépendantes. La nouvelle image combine les différentes sources d'information de manière à rehausser certaines caractéristiques ou propriétés des données. Le nombre de bandes est réduit ce qui permet un traitement plus simple et plus efficace de l'information. Les nouvelles bandes générées sont dénommées "composantes" ou "néo-canaux". Source pour approfondir : RNCAN (2015).

2.3.2. Classification provisoire

Les méthodes de classification supervisée reposent sur la définition de zones d'apprentissage, appelées également zones d'entraînement ou "ROI" (*regions of interest*), qui permettent au logiciel de classification de reconnaître une signature spectrale et lui affecter automatiquement une classe. On parle de méthode "supervisée" car c'est le télédéacteur qui définit la correspondance entre les zones d'apprentissage et les classes. Cette affectation automatique repose sur des algorithmes qui varient d'un logiciel de traitement d'image à l'autre. Le choix de l'algorithme a aussi un impact sur la précision du traitement.

Le travail du télédéacteur consiste donc à identifier ces zones d'apprentissage sur le terrain ou à partir de données ancillaires (images à très haute résolution et/ou photographies aériennes). Dans cette étude, nous nous sommes appuyés sur des données collectées au cours de trois missions :

- La mission de reconnaissance effectuée en Juin 2015 (40 points GPS et prises de vue), avant l'élaboration de la typologie d'utilisation des terres définitive (il s'agissait à l'époque d'identifier un bassin d'approvisionnement pilote - cf. **Aide-mémoire mission #4 et #5**).
- La mission de caractérisation des types d'utilisation des terres en Novembre 2015 (305 points GPS et prises de vue), qui avait pour but d'élaborer une typologie d'utilisation des terres avant de procéder aux traitements d'images.
- La mission mixte dite "entraînement / validation" de Janvier 2016, qui avait pour but de collecter à la fois des données d'entraînement et de validation (deux sous-échantillons indépendants : 272 et 413 points GPS et prises de vue, respectivement). Les données d'entraînement ont spécifiquement servi à la définition des zones d'apprentissage.

En complément des données collectées sur le terrain, il s'est avéré nécessaire de travailler en parallèle sur des images à très haute résolution. En effet, la prospection sur le terrain est nécessairement limitée aux zones les plus accessibles et les moins accidentées. Pour certaines zones, aucune donnée de terrain ne peut donc être collectée et l'utilisation d'images THR représente un avantage déterminant. De plus, étant donné la taille de la zone d'étude (115 930 ha), les données collectées sont ponctuelles car il n'est pas possible de géolocaliser des parcelles entières lors des visites de terrain : cela prendrait un temps considérable. L'intérêt de disposer d'images THR est que le télédéacteur peut déterminer les polygones correspondants aux parcelles (= les zones d'apprentissage) à partir de ces données ponctuelles.

2.3.3. Tests de séparabilité des classes

Pour évaluer la différence spectrale entre les classes identifiées lors de la mission de caractérisation, la réalisation d'un test de séparabilité est recommandée : l'indice de séparabilité est utilisé pour distinguer la séparabilité des signatures spectrales entre les zones d'entraînement (ENVI User's Guide, 2009). Il est basé sur le calcul de la distance spectrale et compare, en général, deux pixels ou deux groupes de pixels mesurés en unité de luminance.

Les valeurs proches de 2 indiquent une séparabilité parfaite avec un risque nul de confusion entre les classes. Une valeur comprise entre 0 et 1 indique une très faible séparabilité. Si la valeur est trop proche de 0 alors une des classes peut être ignorée, sinon les deux classes peuvent être fusionnées. Une valeur entre 1 et 1,9 indique une faible séparabilité. Ceci indique qu'il existe en effet deux classes, mais qu'une mauvaise sélection des sites d'entraînements est en cause. Dans ce cas-là, il est recommandé de procéder à une meilleure sélection des sites d'entraînement des deux classes, en sélectionnant les parties les plus représentatives de la classe, et en évitant les zones de l'image qui contiendraient des pixels mixtes entre plusieurs classes. Les valeurs supérieures à 1,9 indiquent une très bonne séparabilité entre deux classes. Les moyennes des classes sont assez distantes l'une de l'autre, et les variances sont assez réduites pour que le risque de confusion de la classe à laquelle appartiendrait un pixel soit moindre (Bakary, 2007).

A partir des zones d'entraînement identifiées, un premier test de séparabilité des signatures spectrales a été élaboré pour les sous-classes "cacao", "café", "hévéea", "palmier", "teck" (du groupe des "cultures pérennes") et pour les sous-classes "forêt secondaires moyennement à faiblement conservées", "jachères anciennes", "jachères récentes" et "jachères très récentes" (du groupe des "forêts secondaires et jachères"). Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Classes	Cacao	Café	Hévéa	Forêts secondaires	Jachères anciennes	Jachères récentes	Jachères très récentes	Localités	Palmeraies	Teck
Cacao										
Café	0,384									
Hévéa	0,367	0,695								
Forêts secondaires	1,322	1,064	1,224							
Jachères anciennes	0,458	0,589	0,174	0,912						
Jachères récentes	0,097	0,370	0,286	1,184	0,318					
Jachères très récentes	0,542	1,038	0,827	1,613	0,883	0,671				
Localités	1,668	1,642	1,593	1,849	1,586	1,655	1,214			
Palmeraies	0,639	0,542	0,394	0,785	0,210	0,521	1,128	1,665		
Teck	0,160	0,654	0,471	1,500	0,649	0,229	0,633	1,721	0,843	

Tableau 10 : Indice de séparabilité spectral (Jeffreys-Matusita) des zones d'entraînement

En général, l'ensemble des zones d'entraînement présente donc une faible séparabilité. En dehors des localités, seules les "forêts secondaires moyennement à faiblement conservées" présentent des distances spectrales autour de la valeur 1, valeur déjà considérée comme faible. On peut par ailleurs constater la proximité spectrale entre le cacao et le café (0,384) ou le cacao et les jachères récentes (0,097). Une représentation de la réflectance moyenne des zones d'entraînement permet d'obtenir une vision graphique de la réponse spectrale de cette zone.

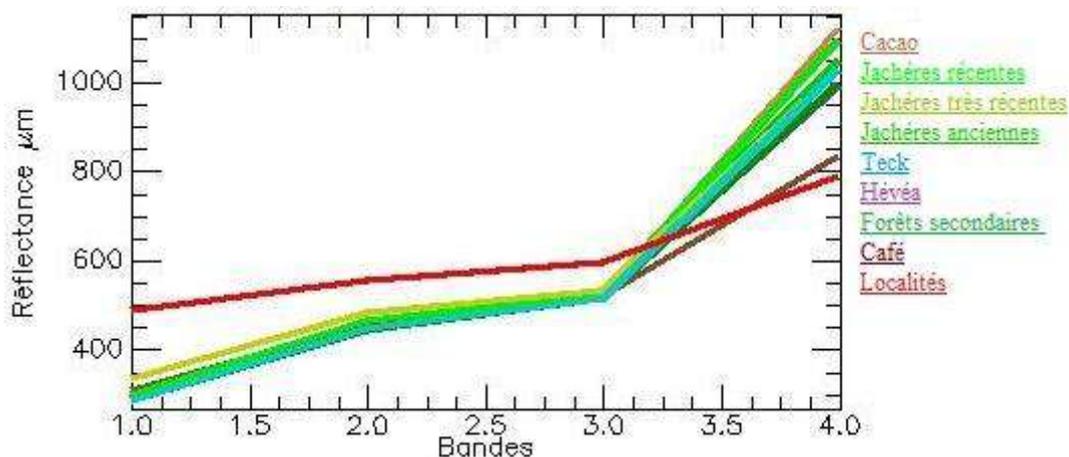


Figure 27 : Représentation de la réflectance moyenne des zones d'entraînement

2.3.4. Regroupement de classes

Ce premier test de séparabilité indique qu'il n'est pas possible de distinguer les classes proposées avec la précision souhaitée. En effet, la classification supervisée réalisée à partir de ces classes montre un taux de bonne classification très faible (28%).

Afin d'améliorer les résultats de la classification, de nouvelles zones d'entraînement ont été définies à partir de l'interprétation visuelle d'images à très haute résolution (Pléiades et Google Earth⁷) dans le

⁷ Images THR fournies par Digital Globe. L'inconvénient est qu'on ne sait pas de quel satellite provient l'image (World View ? Ikonos ?) ni sa résolution spatiale/spectrale.

but de rechercher des zones d'entraînement les plus homogènes possibles. Par ailleurs, des regroupements de classes ont été effectués en fonction de leur proximité spectrale et thématique :

- regroupement des plantations de cacao et de café d'une part, ces dernières étant assez proches structurellement (plantations arbustives, pures ou sous couvert d'arbres d'ombrage), et des plantations d'hévéa et de palmiers d'autre part (se différenciant des deux précédentes par leur unique strate et leur port) ;
- regroupement des classes de "jachères anciennes" et "jachères récentes" en une classe unique "jachères anciennes et récentes" ;
- regroupement des cultures annuelles, sols nus et des "jachères très récentes" en une classe unique "mosaïque de sols nus, cultures annuelles et jachères très récentes" ;
- création d'une classe "plans d'eau", pour représenter les étendues d'eau, rivières larges, barrages et bassins.
- élimination de la classe "teck", étant donné sa très faible représentativité spatiale et le nombre réduit de zones d'entraînement disponibles.

Les zones d'entraînement et points de contrôle initiaux ont donc été regroupés dans les nouvelles classes, ainsi que le présente le tableau ci-dessous :

N°	Classes	Zones d'entraînement	Points de contrôle
1	Cultures pérennes à café et cacao	123	143
2	Plantations d'hévéa et de palmiers	65	74
3	Forêts secondaires moyennement à faiblement conservées	32	15
4	Jachères anciennes et récentes	67	15
5	Mosaïque de sols nus, cultures annuelles et jachères très récentes.	69	69
6	Localités	27	0
7	Plans d'eau	30	0
Total		270	412*

*Sur les 413 points de contrôle initiaux, un point de contrôle a été supprimé, correspondant à la classe "teck" qui disparaît de cette seconde classification.

Tableau 11 : Zones d'entraînement et points de contrôle regroupés pour la nouvelle classification

L'identification de nouvelles zones d'entraînement sur l'image Pléiades n'a été possible que pour les palmeraies (transformation ACP sur l'image en multi-spectral). La différenciation visuelle des autres classes sur cette image étant très difficile, probablement en partie à cause d'un angle de prise de vue élevé (ayant des effets sur les ombres portées et la résolution), des images issues de Google Earth ont été utilisées. Les zones d'entraînement ont ensuite été matérialisées directement sur l'image SPOT 6.

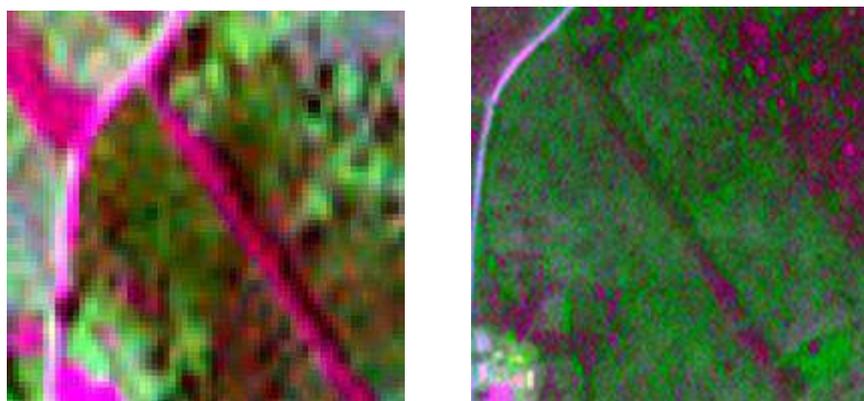
De nouvelles zones d'entraînement ont donc été ajoutées, principalement à l'aide de Google Earth, en utilisant une image à très haute résolution de Janvier 2016 :

- pour la classe "cultures pérennes à café et cacao", 74 points d'entraînement ont été sélectionnés dans le jeu de données collectées sur le terrain (parmi les plus représentatifs), et 49 nouvelles zones ont été créées par photo-interprétation ;
- pour la classe "forêts secondaires moyennement à faiblement conservées", 2 points ont été conservés et 30 nouvelles zones ont été incluses par photo-interprétation ;
- pour la classe "jachères anciennes et récentes", 67 points ont été conservés, aucune nouvelle zone n'a été créée par photo-interprétation ;
- pour la classe "mosaïque de sols nus, cultures annuelles et jachères très récentes", 54 points ont été conservés et 15 nouvelles zones ont été créées par photo-interprétation ;
- pour la classe "localités", 6 points ont été sélectionnés et 21 nouvelles zones ont été créées par photo-interprétation ;

- pour la classe "plans d'eau", 30 nouvelles zones ont été créées par photo-interprétation.

2.3.5. Recherche de zones d'entraînement complémentaires par photo-interprétation

Pour identifier les nouvelles zones d'entraînement, différentes techniques ont été mises en place, notamment la combinaison de bandes. Les combinaisons RGB 342 et 123 ont été très utiles pour identifier des zones de plantations d'hévéa et des zones de "forêts secondaires moyennement à faiblement conservées".



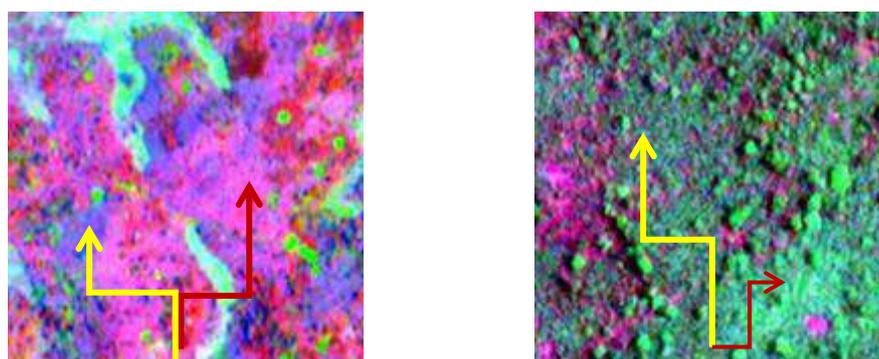
a) Composition RGB/342 SPOT 6

b) Composition ACP RGB/123 Pléiades

Figure 28 : Comparaison SPOT 6 / Pléiades – visualisation d'une plantation d'hévéa

L'analyse en composantes principales (ACP), en apportant une simplification de l'information, facilite l'identification et l'analyse des surfaces. Elle est très utile pour analyser l'homogénéité spectrale des différentes zones. À travers l'analyse visuelle des nouveaux canaux issus de la transformation ACP, on peut mettre en évidence certains facteurs de variabilité au sein des différentes classes.

Par exemple, les variations dues à l'exposition et l'humidité de la classe "cultures pérennes à café et cacao" sont assez marquées en fonction de leur exposition, donnant des réflectances différentes pour une zone jugée *a priori* homogène du point de vue structural et phénologique lors de la visite de terrain.



a) Composition ACP RGB/123 SPOT 6

b) Composition RGB/342 Pléiades

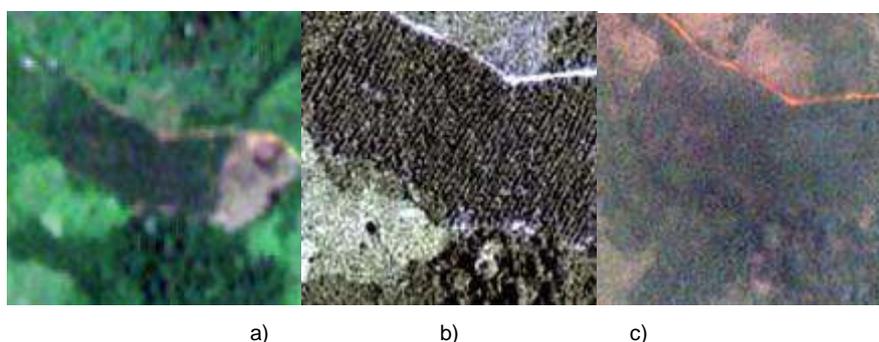


Figure 29 : Variations spectrales en zone de cultures pérennes à cacao et café (zone à pentes fortes)

Sur la figure ci-dessus, on peut apercevoir que pour une zone homogène composée par des cultures de cacao, la tonalité passe du rose en versant sud au bleu en versant nord sur l'image en transformation ACP SPOT 6, et de couleur bleu fuchsia en versant sud au bleu turquoise en versant nord sur la composition RGB/342 Pléiades.

Les plantations d'hévéa identifiées dans la zone d'étude présentent également une grande diversité spectrale, liée principalement à leur stade de croissance en hauteur, leur espacement de plantation ou à des situations de développement végétatif particulières :

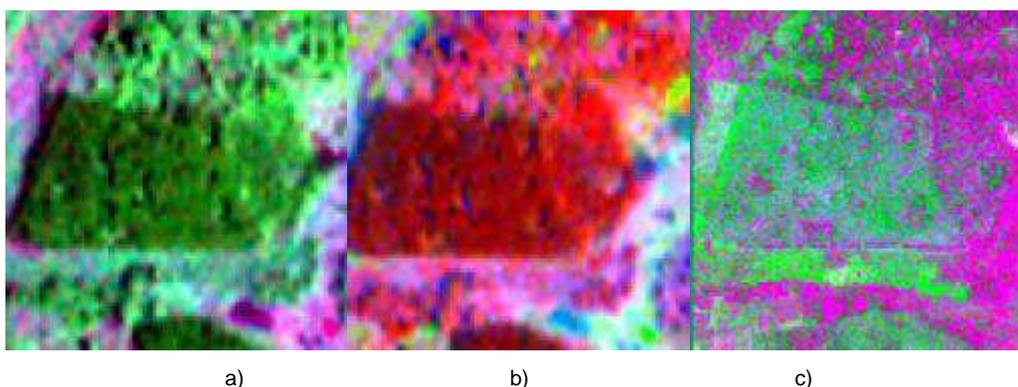
- les espacements varient d'une plantation à l'autre, de même que la qualité des entretiens. Ainsi, certaines plantations présentent une signature spectrale mixte de couverture végétale et de sol nu, alors que d'autres plantées plus densément présentent davantage une signature spectrale de couverture végétale ;
- les plantations avec des interlignes plus espacés présentent des zones ombragées dues à l'inclinaison solaire. Ces espaces ombragés, représentés par de pixels noirs, sont observables dans d'autres formations comme les "forêts secondaires moyennement à faiblement conservées" avec la présence d'arbres de différentes tailles, d'où la confusion possible entre les deux classes ;
- l'hévéa est considéré comme un arbre à feuilles pérennes pendant les quatre ou cinq premières années de sa vie ; il adopte par la suite un comportement d'arbre à feuilles caduques et renouvelle son feuillage chaque année pendant la saison sèche (Escobar-Acevedo, 2004). On peut observer une coloration particulière au niveau de la canopée dans des plantations âgées, pouvant rappeler des zones de forêts secondaires.



a) Composition RGB/123 sur image SPOT 6 à 6 mètres de résolution spatiale
 b) Composition RGB/123 sur image pansharpened à 1,5 mètres de résolution spatiale
 c) Composition RGB/213 image Pléiades à 2 mètres de résolution spatiale

Figure 30 : Visualisation des plantations d'hévéa avec différents capteurs optiques

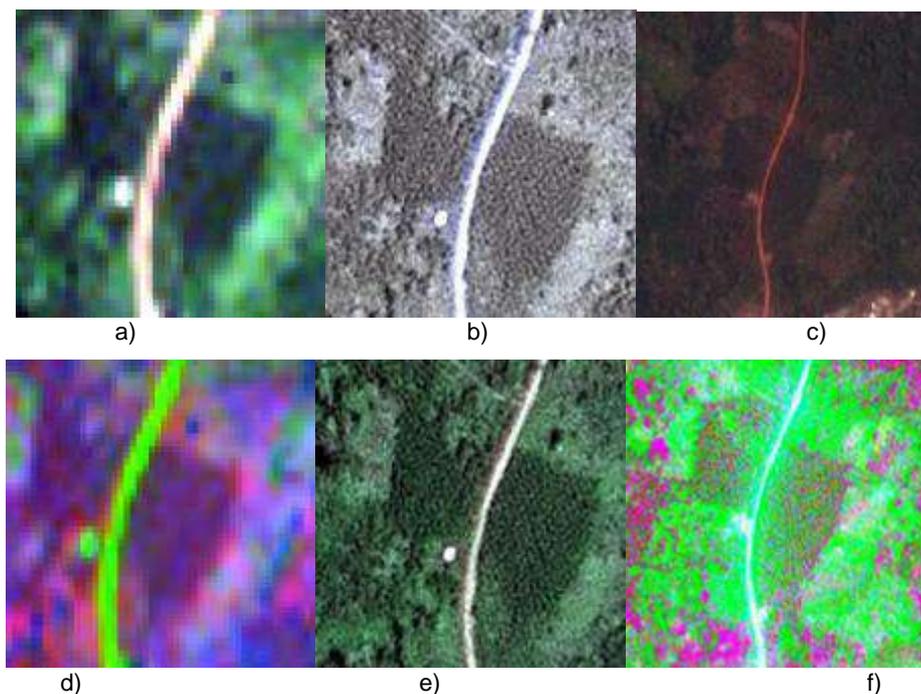
Les plantations d'hévéa sont identifiables avec la combinaison de bandes 342 et la transformation ACP sur image SPOT 6, comme on peut le voir dans la figure suivante. Cependant, au stade mature, elles auront tendance à se confondre aux "forêts secondaires moyennement à faiblement conservées", alors qu'au stade juvénile, elles auront tendance à se confondre aux jachères jeunes (avec de rares ligneux d'ombrage).



a) Composition RGB/342 sur SPOT 6
 b) Composition ACP RGB/123 sur SPOT 6
 c) Composition ACP RGB/123 sur Pléiades

Figure 31 : Illustration des variations spectrales en plantations d'hévéa (exemple)

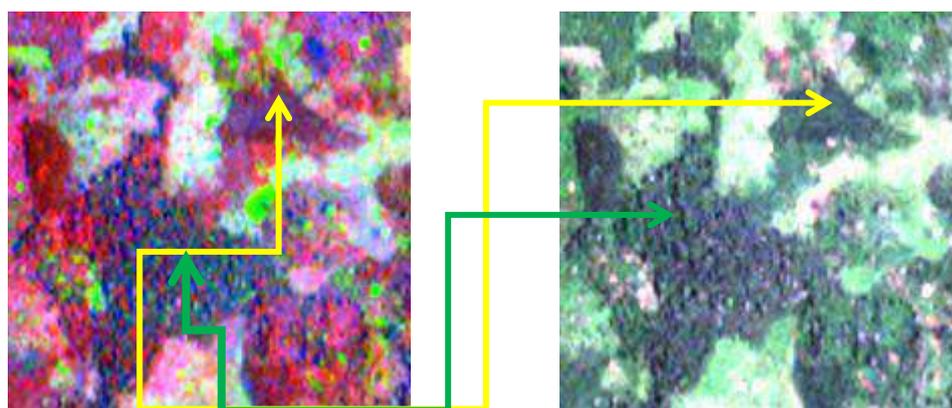
Les plantations de palmiers présentent aussi des similitudes spectrales avec les "forêts secondaires moyennement à faiblement conservées". Bien que leur composition puisse être homogène au niveau des canopées, avec des similitudes de texture à celles de plantations d'hévéa, leur comportement spectral ne présente pas de différences marquées avec celle des forêts.



- a) Composition RGB/123 sur l'image SPOT 6 à 6 m de résolution spatiale.
- b) Composition RGB/123 sur image SPOT 6 pansharpened à 1,5 m de résolution spatiale.
- c) Composition RGB/321 sur l'image Pléiades à 2 m de résolution spatiale.
- d) Composition bandes ACP RGB/123 sur image SPOT 6 pansharpened à 6 m.
- e) Composition ACP RGB/123 sur l'image SPOT 6 pansharpened.
- f) Composition ACP RGB/123 sur l'image Pléiades.

Figure 32 : Illustration des variations spectrales en palmeraie (exemple)

Chacune de ces classes possède une grande variabilité de par leurs caractéristiques structurales et spécifiques (association de plusieurs espèces, phénologie variée, espacement de plantation pas toujours régulier, etc.), si bien que des plantations d'hévéa à un stade adulte peuvent se confondre spectralement avec de la forêt secondaire moyennement conservée ou à des plantations de palmiers. Les facteurs "pentes" et "exposition" influent également sur les caractéristiques spectrales de chaque classe, notamment dans la classe "cultures pérennes à café et cacao".



a) Composition ACP RGB/123, image SPOT 6 b) Composition RGB/123, image SPOT 6

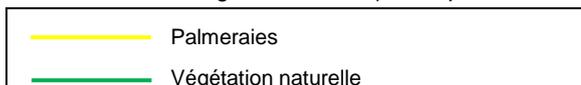


Figure 33 : Similarité spectrale entre des palmeraies et des forêts moyennement à faiblement conservées.

Dans la figure ci-dessus, la palmeraie apparaît en violet et bleu. Or des pixels aux couleurs identiques apparaissent également dans la zone de végétation naturelle. Enfin, il faut également noter que la classification supervisée ne tient pas compte de la géométrie du couvert (port étoilé des palmiers), ce qui explique aussi pourquoi l'œil humain a plus de facilité à reconnaître une palmeraie.

En conclusion, la discrimination de ces classes d'utilisation des terres reste visuellement faisable sur de petites surfaces, mais complexe lorsqu'il s'agit de s'appuyer sur leur signature spectrale (de surcroît lorsque l'échelle d'analyse et les modes de gestion induisent des variations importantes). La transformation ACP permet en outre de distinguer plusieurs classes d'utilisation des terres, au moins sur des petites surfaces.

2.3.6. Test de séparabilité sur les nouvelles zones d'entraînement

Pour connaître la réponse spectrale des nouvelles zones d'entraînement, une analyse plus détaillée de la distance spectrale des couvertures est présentée dans le tableau suivant :

	Cultures pérennes à café et cacao	Plantations d'hévéa et palmiers	Forêts secondaires moyennement à faiblement conservées	Jachères anciennes et récentes	Mosaïque de sols nus, cultures annuelles et jachères très récentes.	Localités
Cultures pérennes à café et cacao						
Plantations d'hévéa et palmiers	1,957					
Forêts secondaires moyennement à faiblement conservées	1,753	1,725				
Jachères anciennes et récentes	1,794	1,914	1,790			
Mosaïque de sols nus, cultures annuelles et jachères très récentes.	1,879	1,993	1,915	1,734		
Localités	1,999	1,992	1,926	1,995	1,967	
Surfaces d'eau	1,998	1,992	1,902	1,964	1,998	1,994

Tableau 12 : Indice de séparabilité spectral (Jeffreys-Matusita) des nouvelles zones d'entraînement

Comme on l'observe dans le tableau ci-dessus, les paires de plus faible séparabilité spectrale sont les "forêts secondaires moyennement à faiblement conservées" et les "plantations d'hévéa et de palmiers" avec un indice de 1,725.

La classe "cultures pérennes à café et cacao" présente une séparabilité acceptable avec les "plantations d'hévéa et palmiers" (1,957), mais plus faible avec les classes de "forêts secondaires moyennement à faiblement conservées" (1,753) et "jachères anciennes et récentes" (1,794). Une confusion pourrait également exister entre les classes "mosaïque de sols nus, cultures annuelles et jachères très récentes" et la classe de "jachères anciennes et récentes" (1,734).

Le reste des classes avec des valeurs supérieures à 1,9 ont *a priori* un plus faible risque de confusion. Les classes "localités" et "plans d'eau" n'étant pas des classes d'utilisation des terres à couverture végétale, elles possèdent logiquement une meilleure séparabilité du reste des classes.

À partir des nouvelles zones d'entraînement identifiées, on arrive à obtenir une meilleure séparabilité des classes, encore faibles pour certaines paires, mais qui pourrait toutefois donner des résultats de classification acceptables. La figure ci-dessous montre comment, à travers les nouvelles zones d'entraînement, la réflectance moyenne par classe à différentes longueurs d'onde permet une plus grande différenciabilité, principalement dans le proche infrarouge.

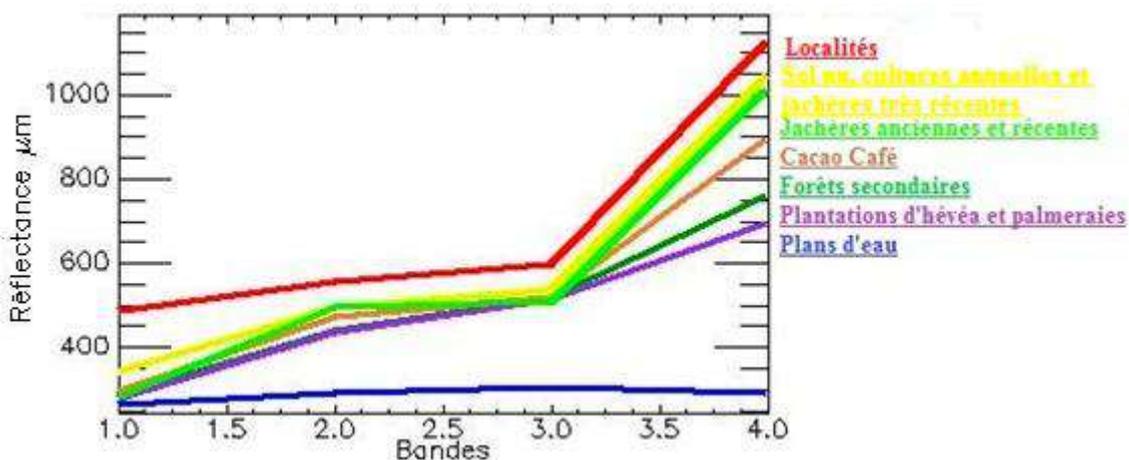


Figure 34 : Représentation de la réflectance moyenne des nouvelles zones d'entraînement

2.3.7. Classification finale

La classification a été effectuée à partir de la transformation ACP de l'image SPOT 6 à 6 mètres de résolution spatiale. Pour la réalisation de cette classification, l'algorithme de classification "maximum de vraisemblance" (*maximum-likelihood*) a été employé.

Pour cette classification, les trois premiers néocanaux issus de l'analyse en composantes principales ont été utilisés. Ces canaux contiennent plus de 90% de l'information de l'image multispectrale initiale. Le quatrième néocanal, produit de la transformation ACP, inclut normalement l'information liée aux effets de bruit de l'image (correspondant aux 10% restant).

Les points d'entraînement ont été convertis en zones d'entraînement (polygones), permettant d'obtenir une meilleure représentativité spectrale de chaque classe. La conversion de points d'entraînement en polygones s'est faite par l'élaboration d'une zone tampon en polygones circulaires de 25 mètres de rayon (soit 1 963 m²), soit 52 pixels par zone d'entraînement.

Une MMU de 0,25 ha a été retenue initialement. En considérant que 0,25 ha représente 2 500 m², et que la taille d'un pixel SPOT 6 est de 36 m², une MMU équivalente de 69 pixels a été retenue (2500/36 = 69 pixels). Tous les groupes de pixels inférieurs à cette MMU ont été éliminés, en appliquant des filtres de surfaces. Les pixels éliminés ont été ajoutés aux classes les entourant. Cette procédure permet d'homogénéiser les résultats, en éliminant des pixels isolés.



- a) En vert, classe "forêts secondaires moyennement à faiblement conservées", en violet, classe "plantations d'hévéa et de palmiers", en marron, "cultures pérennes à café et cacao" et en vert clair, classe des "jachères anciennes et récentes".
 b) En noir : Groupes de pixels inférieurs à la MMU éliminés
 c) Les pixels éliminés absorbés par la classe alentour.

Figure 35 : Détail des post-traitements - tamisage des pixels avec une MMU de 69 pixels (0,25 ha)

Tout d'abord, une analyse visuelle de la classification a permis d'observer ce qui suit :

- La confusion entre les classes de forêts secondaires, jachères et les cultures pérennes à café et cacao ;

- La confusion entre "forêts secondaires moyennement à faiblement conservées" et "plantations d'hévéa et de palmiers" ;
- L'inclusion des palmeraies dans les classes "forêts secondaires moyennement à faiblement conservées" ou "jachères anciennes et récentes" principalement ;
- Les effets d'ombres et de relief ont une influence très importante dans les résultats de la classification ;

Ces observations confirment les analyses menées à l'étape précédente sur les signatures spectrales des différentes classes d'utilisation des terres. L'étape suivante consiste à vérifier le niveau de précision de la classification obtenue, dont la représentation cartographique est donnée ci-après.

NB : Des tests de classification sur une image issue de la fusion panchromatique à 1,5 m de résolution spatiale ont également été réalisés. Toutefois, les effets d'ombres, plus accentués que sur l'image à 6 m de résolution, ainsi que l'influence des sols nus sur les couvertures végétales ouvertes, donnent des résultats visuellement moins adéquats que sur l'image à 6 m de résolution. La validation à partir des points de contrôle n'a pas permis d'obtenir de meilleurs taux de bonne classification avec cette image panchromatique.

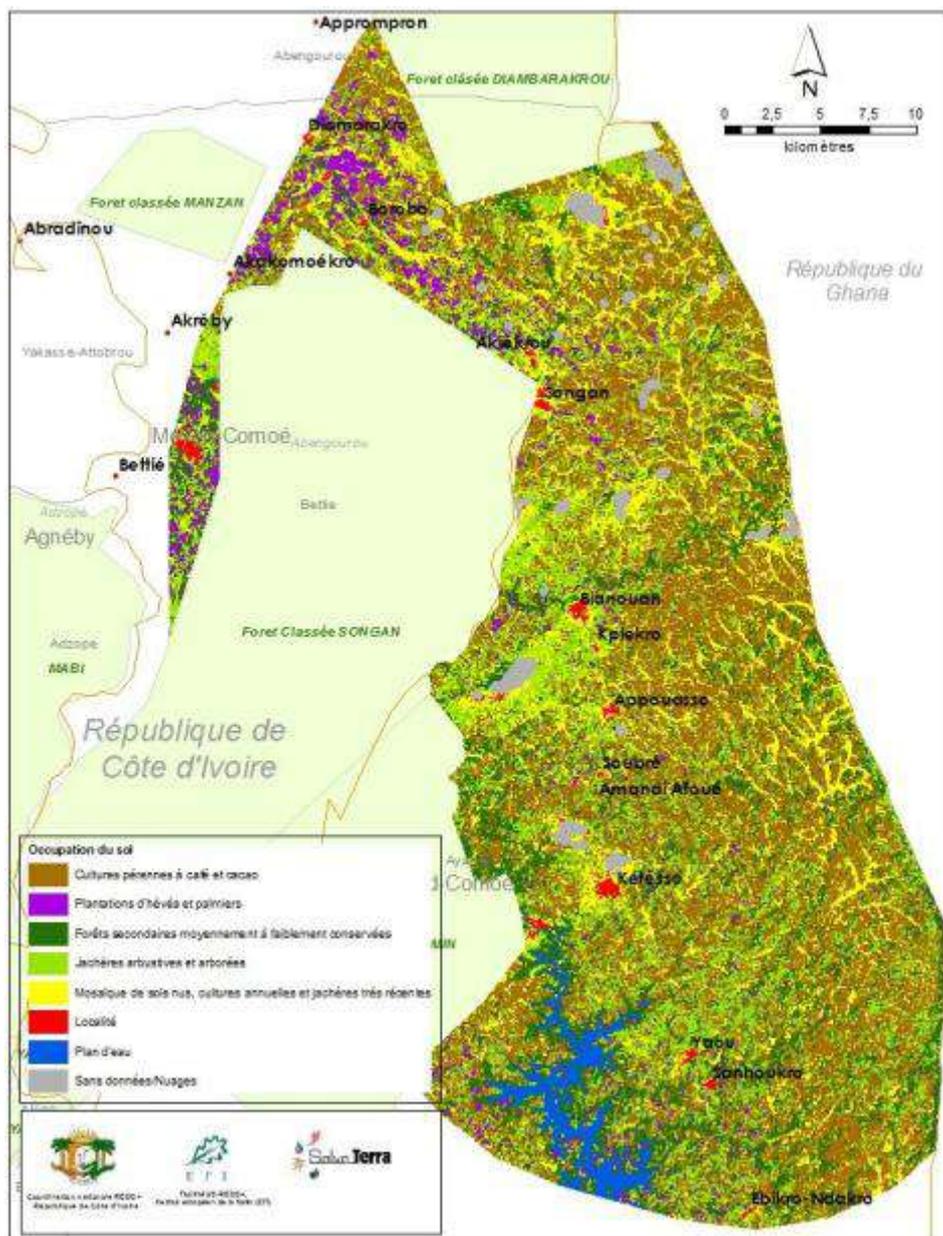


Figure 36 : Cartographie de l'utilisation des terres dans la zone d'étude

2.4. Méthode de validation

2.4.1. Rappels théoriques

Introduction

Ce paragraphe a été rédigé de façon à bien expliciter la méthodologie de validation retenue pour confirmer les résultats de la classification supervisée, afin que celle-ci puisse être reproduite de façon routinière dans le cadre de travaux similaires. Il n'a pas vocation à être exhaustif et à présenter toutes les méthodes de validation possibles ainsi que leurs fondements statistiques, mais constitue une introduction permettant d'expliquer les choix techniques réalisés dans le cadre du présent projet.

Les éléments bibliographiques cités sont complétés par des informations obtenues dans le cadre de consultations de différents centres d'expertise en télédétection, tels que le Centre Commun de Recherche de l'Union Européenne (JRC), l'Institut Géographique France International (IGN-FI), l'Office National des Forêts International (ONFI) et le bureau d'études Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS).

Les bonnes pratiques (Congalton et Green, 2009 ; CORINE, 2009)

La précision d'une carte s'apprécie sur deux aspects, géographique (= représentation spatiale fidèle) et thématique (= représentation des classes fidèle). Il n'y a pas une méthode unique mais toutes reposent sur un choix rigoureux de l'échantillon de validation, constitués de sites de référence (ou "données de contrôle"⁸), ainsi que sur des méthodes d'échantillonnage non-biaisées.

La précision géographique est généralement bonne avec les outils technologiques dont nous disposons à l'heure actuelle (ce qui n'était pas le cas quelques décennies en arrière). En pratique, on s'intéresse donc essentiellement à la précision thématique. Dans cette optique, l'établissement d'une matrice de validation est l'outil le plus communément utilisé à l'heure actuelle. Un exemple de matrice de confusion est présenté ci-dessous :

		Données de référence				Row
		D	C	AG	SB	Total
Données classées	D	65	4	22	24	115
	C	6	81	5	8	100
	AG	0	11	85	19	115
	SB	4	7	3	90	104
Column Total		75	103	115	141	434

*D = forêt décidue ; C = forêt de conifères ; AG = agriculture ; SB = *shrubs*.

Figure 37 : Exemple de matrice de confusion (d'après Congalton et Green, 2009)

Dans la figure ci-dessus, les données générées par le procédé de classification (fictif) sont présentées en ligne et les données de référence sont présentées en colonne. Cette présentation permet d'évaluer le nombre de sites de validation correctement classés, et pour ceux mal classés, quelles sont les confusions possibles entre classes (omissions⁹ et commissions¹⁰). Ces résultats permettent de calculer la précision globale du traitement, et s'il s'agit d'une classification provisoire, d'identifier les

⁸ Également dénommées "vérité-terrain", même si certains auteurs réfutent cette appellation.

⁹ Concerne les unités d'échantillonnage exclues de leur classe d'appartenance.

¹⁰ Concerne les unités d'échantillonnage incluses dans la mauvaise classe.

classes sur lesquelles l'accent doit être mis pour essayer d'améliorer le traitement. Pour Congalton et Green (2009), le taux de bonne classification est le pourcentage d'unités d'échantillonnage correctement classifiées.

La collecte d'un échantillon de données de référence est une étape cruciale pouvant impacter fortement les coûts et la précision des résultats. Au delà, du nombre d'unités d'échantillonnage à collecter, il convient de déterminer leur forme (points, polygones, etc.) et des procédures de tirage non-biaisées.

Forme de l'u.e.*	Avantages	Inconvénients	Recommandation
Pixel	Simplicité	Faible représentativité thématique Erreur de positionnement géographique liée à la précision des instruments Taille de l'UE inférieure à la MMU	Moins adapté.
Groupe de pixels (cluster)	Bonne représentativité thématique et positionnement géographique. Taille de l'UE proche de la MMU (à définir par l'utilisateur)	Interprétation difficile des clusters hétérogènes (i.e. à cheval sur deux classes ou plus). Échantillon possiblement biaisé en cas de choix délibéré de clusters homogènes.	Adapté. La taille du cluster dépend de la résolution spatiale du capteur. <i>Exemples : Landsat (30m) 3x3 pixels, SPOT (6m) 5x5 pixels...</i>
Polygones	Meilleure représentativité thématique et positionnement géographique. Pas de limitation due à la MMU.	Procédures de validation plus longue sur le terrain (cheminement + site), en fonction de la taille et de la forme des polygones.	Plus adapté, mais plus coûteux.
Groupe de polygones (cluster)	Meilleure représentativité thématique et positionnement géographique. Pas de limitation due à la MMU. Temps de cheminement réduit.	Procédures de validation sur site plus longue et risques d'auto-corrélation des UE à déterminer.	Plus adapté, mais techniquement plus complexe (autocorrélation).

*u.e. = unité d'échantillonnage

Tableau 13 : Avantages et inconvénients de la forme des unités d'échantillonnage (données de contrôle)

Source : Congalton et Green, 2009.

La taille de l'échantillon de données de référence est déterminée sur la base de considérations statistiques et opérationnelles, l'objectif étant d'obtenir le meilleur rapport coût-robustesse statistique possible. Parmi les considérations statistiques, la plupart des travaux déterminent la taille de l'échantillon en s'appuyant sur une distribution binomiale (unités d'échantillonnage correctement classée vs. incorrectement classée). En toute rigueur, il serait préférable de s'appuyer sur une distribution multinomiale dans l'optique de produire une matrice de confusion, puisque la matrice informe également sur les confusions entre classes (pour une catégorie parmi n, il y a 1 chance de succès et (n-1) chances d'échec). La distribution binomiale peut toutefois être utilisée s'agissant de déterminer, par exemple, la précision d'une carte des changements d'utilisation des terres à deux classes - type "Forêt – Non Forêt" par exemple.

En considérant une distribution multinomiale, et considérant qu'aucune information n'existe au préalable sur les surfaces représentées par chaque classe d'utilisation des terres¹¹, on détermine la taille de l'échantillon par l'équation suivante :

$$n = B/4b^2.$$

¹¹ S'il existe des informations préalables sur la répartition spatiale des terres, une autre équation s'applique et permet de réduire le nombre d'unités d'échantillonnage (consulter Congalton et Green, 2009 – p.76 à 78).

où n représente la taille de l'échantillon, B la valeur du $X^2_{(1; 1- \alpha/k)}$ – à 1 degré de liberté et $1- \alpha/k$, k étant le nombre de classes d'utilisation des terres, α le niveau de confiance et b étant l'erreur relative tolérée *ex-ante*.

Le tableau en **Annexe 3** indique le nombre d'unités d'échantillonnage recommandées pour différents niveaux de confiance et taux d'erreur tolérée *ex-ante*. Ci-dessous sont présentés les résultats pour 5 classes de végétation :

Valeur de n en fonction de la précision tolérée *ex-ante* et du couple (α ; k).

k = 5 Erreur tolérée	α (degré de confiance)		
	0,1	0,05	0,01
5%	541	663	955
10%	135	166	239
15%	60	74	106
20%	34	41	60

Tableau 14 : Nombre d'unités d'échantillonnage requises pour une validation à 5 classes.

En complément, Congalton et Green (2009) proposent une règle empirique consistant à tirer au moins 50 unités d'échantillonnage par classe si la zone d'étude mesure moins de 400 000 ha et présente moins de 12 classes. Les auteurs précisent que cette règle empirique est basée sur la réalisation de plusieurs travaux s'appuyant sur une distribution multinomiale, et représente un bon compromis entre coût et robustesse statistique.

Enfin, les procédures d'échantillonnage doivent être fixées de façon à minimiser les biais pour générer une matrice de confusion représentative. Pour autant, le choix du mode d'échantillonnage impacte également le coût de l'opération. Les modes d'échantillonnage classiques sont l'aléatoire simple, le systématique, l'aléatoire stratifié et le tirage en grappes. Le tableau suivant présente leurs principaux avantages et inconvénients :

Plan d'échantillonnage	Avantages	Inconvénients
Aléatoire	Localisation non biaisée des unités d'échantillonnage. Excellentes propriétés statistiques.	Plus coûteux, en particulier le travail de terrain. Ne garantit pas un nombre suffisant d'unités d'échantillonnage dans chaque classe, ni la représentativité spatiale de la zone d'étude.
Aléatoire stratifié	Localisation non biaisée des unités d'échantillonnage. Assure un nombre d'échantillons minimal dans chaque classe.	Nécessite au préalable la connaissance des strates. Plus coûteux, en particulier sur le terrain. Difficile d'atteindre le quota minimum d'unités d'échantillonnage dans certaines classes. Ne garantit pas la représentativité spatiale de la zone d'étude.
Systématique	Facile à mettre en œuvre. Moins coûteux que l'aléatoire. Bonne distribution des unités d'échantillonnage dans la zone d'étude.	Peut être biaisé en cas de corrélation avec une périodicité spatiale dans la zone d'étude. Statistiquement moins robuste.
En cluster	Moins coûteux (les unités d'échantillonnage sont proches les unes des autres).	Peut être biaisé en cas d'auto-corrélation spatiale (tirages potentiellement non indépendants)

Tableau 15 : Avantages et inconvénients des différents modes d'échantillonnage

Source : Congalton et Green, 2009.

La combinaison des méthodes aléatoires, systématiques et stratifiées offre le meilleur équilibre possible entre coût de l'opération et robustesse statistique. Le caractère stratifié de l'échantillonnage permet de s'assurer que les classes faiblement représentées mais d'intérêt fort sont bien présentes dans l'échantillon.

Un cas concret est présenté en **Annexe 4**. Il s'agit de la méthodologie de validation utilisée dans le cadre du programme européen d'observation CORINE LAND COVER. A la différence de Congalton et Green (2009), le calcul de la taille de l'échantillon repose sur une loi binomiale. L'objectif de cette annexe est de montrer qu'il n'existe pas une seule méthode de validation, mais que celle-ci dépend des objectifs poursuivis et des moyens disponibles.

Dans ce qui suit, nous présentons la méthodologie retenue dans la présente étude et s'inspirant des bonnes pratiques énoncées ci-dessus.

2.4.2. Méthode de validation retenue

Nombre d'unités d'échantillonnage et plan d'échantillonnage

D'après ce qui précède (Congalton et Green, 2009), la taille minimale de l'échantillon serait de l'ordre de 166 unités d'échantillonnage en considérant $k = 5$ strates, $e = 10\%$ d'erreur et $\alpha = 5\%$ ainsi qu'une distribution multinomiale. Les mêmes auteurs indiquent qu'un minimum de 50 points par classes devrait toutefois être retenu, *a minima*.

Près de 412 points de contrôle ont été collectés sur le terrain lors de la mission de validation de Janvier 2016. Initialement, un total de 769 points de validation était envisagé, correspondant à l'intensité d'échantillonnage préconisée pour 9 classes, (cf. calculs en **Annexe 3**, avec un taux d'erreur tolérée ex-ante de 5% et un niveau de confiance $\alpha = 5\%$). Le regroupement en 5 classes a permis d'abaisser l'effort de collecte à 663 points (cf. **Tableau 14**). Ce niveau n'ayant pu être atteint, il a été décidé d'abaisser le taux d'erreur tolérée ex-ante de 5% à 10%.

Avec un taux d'erreur tolérée ex-ante de 10%, les quotas sont atteints pour les classes "cultures pérennes à café et cacao", "plantations d'hévéa et de palmiers" et "mosaïque de sol nu, cultures annuelles et jachères très récentes". Cependant, pour les classes "forêts secondaires moyennement à faiblement conservées" et "jachères anciennes et récentes", le quota minimum n'a pu être atteint. Lors de la mission de collecte de points de validation, il s'est en effet avéré très difficile de les identifier, étant donné leur faible représentativité dans la zone.

N°	Classes	Points de contrôle
1	Cultures pérennes à café et cacao	143
2	Plantations d'hévéa et palmiers	74
3	Forêts secondaires moyennement à faiblement conservées	15
4	Jachères anciennes et récentes	15
5	Mosaïque de sol nu, cultures annuelles et jachères très récentes.	69
Total		412

Tableau 16 : Nombre de points de contrôle échantillonnés par classe (k = 5)

Forme et taille des unités d'échantillonnage

Idéalement, il serait nécessaire d'échantillonner des polygones ou un cluster de polygones, mais ces procédures sont les plus coûteuses car il est nécessaire de relever les contours de chaque parcelle sur le terrain avant de les croiser avec les polygones déterminés par le procédé de classification.

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats de la validation par pixels. Une fois sur site, les agents ont procédé à la description de l'utilisation des terres selon la classification initialement déterminée (voir **Section 2.1**).

Une validation par clusters circulaires a également été réalisée mais les résultats, peu différents de la validation par pixels, ne sont pas repris dans ce rapport.

Plan d'échantillonnage

Nous avons opté pour un échantillonnage aléatoire stratifié, afin de s'assurer que les classes de forêts secondaires faiblement présentes dans la zone d'étude soient tout de même représentées dans la matrice de confusion. Cette méthode représente le meilleur compromis coût-efficacité compte tenu des caractéristiques de la zone d'étude (très large, fragmentée et difficile d'accès).

Nous avons exclu la méthode aléatoire pure car celle-ci aurait été trop coûteuse vis-à-vis du déploiement des équipes sur le terrain, la zone étant particulièrement difficile d'accès. Afin de limiter la prospection de terrain aux zones accessibles, nous avons restreint la zone de validation à plus ou moins 500 mètres de part et d'autres d'une route ou d'un chemin. Si cette simplification entraîne un biais au niveau de la représentativité des zones inaccessibles, elle était néanmoins nécessaire pour limiter les coûts opérationnels.

Enfin nous avons exclu la méthode d'échantillonnage "par cluster" n'étant pas en mesure de procéder à l'évaluation du risque d'auto-corrélation entre les unités d'échantillonnage.

2.5. Résultats

La classification supervisée de la zone d'étude a permis d'obtenir un taux de bonne classification faible, de l'ordre de 39%. La matrice de confusion permet d'analyser plus en détails les résultats.

Classes	Cultures pérennes à café et cacao	Plantations d'hévéa et de palmiers	Forêts secondaires moyennement à faiblement conservées	Jachères anciennes et récentes	Mosaïque de sol nu, cultures annuelles et jachères herbacées.
Cultures pérennes à café et cacao	51%	18%	12%	36%	30%
Plantations d'hévéa et de palmiers	3%	20%	23%	0%	0%
Forêts secondaires moyennement à faiblement conservées	17%	18%	29%	27%	5%
Jachères anciennes et récentes	24%	36%	36%	34%	23%
Mosaïque de sol nu, cultures annuelles et jachères herbacées.	5%	8%	0%	3%	42%
	100%	100%	100%	100%	100%

Tableau 17 : Matrice de confusion des résultats de la classification

Source : transformation ACP de la scène SPOT 6 à 6 m de résolution

Le regroupement de classes n'a donc pas permis d'obtenir des résultats plus satisfaisants, même si les tests de séparabilité semblaient montrer la bonne voie. Ces résultats confirment les observations précédentes en termes de confusion entre classes. Ainsi près de 24 % des zones de "forêts secondaires moyennement à faiblement conservées" ont été classés de façon erronée en "plantations d'hévéa et de palmiers". Même si les classes "cultures pérennes à cacao et café" et "mosaïque de sol nu, cultures annuelles et jachères très récentes" ont obtenu le plus haut pourcentage de bonne classification (51% et 42%, respectivement), ces résultats restent très faibles en terme de fiabilité.

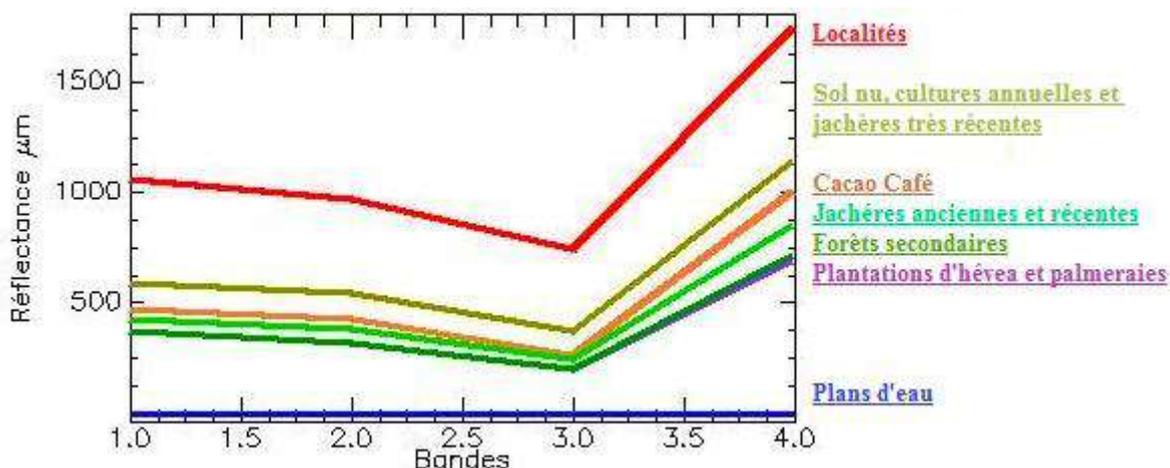


Figure 38 : Représentation de la réflectance moyenne des classes

L'analyse de réflectance des zones classifiées confirme la similitude entre les classes de "forêts secondaires moyennement à faiblement conservées" et les "plantations d'hévea et de palmiers". Cette similitude est due, d'une part, aux effets de tamisage de la classification, qui combine des zones avec des couvertures mélangées sous une seule classe, et d'autre part aux difficultés de discriminer clairement ces deux classes dans l'ensemble des bandes utilisées.

2.6. Recherche d'alternatives

2.6.1. Autres procédés de classification supervisée

Afin d'améliorer les résultats de la classification, plusieurs alternatives en termes de traitements automatisés ont été recherchées. Pour chaque cas, une matrice de confusion a été réalisée, mais celles-ci ne sont pas reprises dans le présent rapport. Seuls les pourcentages de bonne classification sont exprimés :

- classification sur l'image SPOT 6 multi-spectrale (4 bandes, MMU de 0,25 ha) a une résolution de 6 mètres avec un pourcentage de 34% de bonne classification ;
- classification sur l'image SPOT 6 issue de l'ACP (MMU de 0,1 ha soit la superficie minimale considérée comme forêt en Côte d'Ivoire), avec un résultat de 34% de bonne classification.
- classification sur l'image SPOT 6 multi-spectrale à partir des deux premières bandes issues de l'ACP et transformation NDVI (MMU de 0,25 ha) avec un pourcentage de bonne classification de 32% ;
- classification sur l'image SPOT 6 à partir des quatre bandes multi-spectrales fusionnées avec la bande panchromatique (MMU de 0,25 ha), avec une résolution finale de 1,5 mètre et un pourcentage de bonne classification de 28%.

2.6.2. Tests de classification non-supervisée

Les méthodes de classification supervisée n'apportant pas de résultats probants, un test de classification orientée-objets a été réalisé. Cette technique permet de regrouper les pixels par leur proximité spectrale (procédé de "segmentation"). La segmentation, après analyse visuelle, a été estimée satisfaisante. À partir de cette segmentation, la classification a été réalisée en prenant les variables spectrales et de textures de chacun des polygones créés à travers la segmentation. Les résultats ont conclu à 17% de bonne classification.

Dans le but d'obtenir une meilleure discrimination entre les classes "plantations d'hévea et de palmiers", "forêts secondaires moyennement et faiblement conservées" et "jachères anciennes et récentes", un test de classification non-supervisée a été mis en place à travers la méthode de classification dite "emboîtée". D'une manière générale, la classification emboîtée est une succession de classifications non supervisées qui permet d'affiner de proche en proche la définition des classes.

À la fin de chaque étape de classification, la signature spectrale des classes est analysée de façon à les interpréter en termes d'unités de couverture du sol (Andrieu et Mering, 2008). Cette méthode n'a pas permis de différencier clairement les couvertures végétales, principalement à cause de la similitude spectrale entre les plantations d'hévéa et de palmiers, les forêts et les jachères.

2.6.3. Conclusion sur les alternatives

Ces procédés alternatifs n'ont pas permis d'améliorer les résultats, ni en termes de pourcentage de bonne classification, ni pour résoudre les problèmes de confusion entre les classes. Aussi, la variabilité de chaque classe, associée à la réponse spectrale dans les bandes utilisées par le capteur, ne permet pas de distinguer nettement les différentes classes de végétation via les procédés de classification automatisés (supervisée ou non-supervisée).

Différentes alternatives pourraient être mises en place pour tenter de réduire la variabilité spectrale des classes, en commençant par sélectionner une zone d'étude plus réduite, voire travailler sur plusieurs zones d'analyses distinctes, en fonction de leurs caractéristiques topographiques par exemple. Il serait sans doute nécessaire d'inclure les pentes et expositions comme variables explicatives de l'hétérogénéité de la réflectance des classes.

Il serait également nécessaire d'inclure dans la sélection de zones d'entraînement des variables liées à l'état de végétation de certaines cultures, comme l'hévéa. Comme vu précédemment, la maturité des plantations ainsi que la régularité des espacements sont deux facteurs qui influencent la régularité et la texture du couvert, donc la signature spectrale des plantations.

Des relevés pourraient également être effectués à différentes époques de l'année afin de prendre en compte la phénologie des espèces comme l'hévéa ou le cacao qui, à différentes saisons, pourraient présenter des signatures spectrales différentes (et potentiellement plus marquées ?) permettant d'améliorer les résultats de la classification.

En continuité du point précédent, d'autres indices de végétation pourraient être suivis au plan saisonnier (NDVI, SAVI, TSAVI, etc.). L'objectif serait de déterminer si un indice de végétation est plus pertinent à une époque donnée.

2.7. Discussion

L'aide-mémoire #3 rappelle que plusieurs travaux basés sur la classification supervisée d'images satellitaires (maximum de vraisemblance) à résolution spatiale moyenne (Landsat) et haute (SPOT) ont identifié des risques de confusion entre classes liés à la cartographie à grande échelle du verger cacaoyer (N'doume et al., 2002 ; N'da, 2007; N'da et al. 2008; Kouame, 2013; Dedjo, 2014; Koffi, 2014 et 2D Consulting Afrique, 2015) : confusion entre culture pérennes et jachères, entre jeunes cacaoyères (2-5 ans) et cultures annuelles, entre cacaoyères sous couvert et forêts dégradées... Nos travaux confirment ces observations et les étendent à d'autres types d'utilisation des terres, même ceux qui paraissent à première vue plus facile à distinguer (plantations d'hévéa matures et palmeraies villageoises par exemple). Le tableau suivant est un rappel des risques de confusion identifiés dans l'aide-mémoire de mission #3 et complétés par les présents travaux :

Facteur	Risques de confusion et explications
Age des parcelles cacaoyères	Les premières visites sur le terrain indiquent que sur la même parcelle cohabitent des plants de plusieurs âges de 1 à 15 ans voire 20 ans. Cette situation induit une grande hétérogénéité dans la signature spectrale. En effet, au niveau des plants âgés, le recouvrement au sol de la canopée peut atteindre 100%, donc une signature spectrale influencée principalement par la couverture végétale (réflectance dans le visible et le moyen infrarouge : faible / réflectance dans le proche infra-rouge : élevée). Or dans les jeunes parcelles la signature spectrale résulte d'une mosaïque de surface végétalisée et de sols nus (réflectance dans le visible et le moyen infra-rouge : relativement plus élevée que dans les vieilles plantations / réflectance dans le proche infra-rouge : moins forte que précédemment).

Pathologie	Étant donné le faible niveau d'utilisation d'engrais et les attaques parasitaires, les parcelles présentent de nombreuses pathologies qui affectent la teneur en chlorophylle des feuilles, puis leur structure anatomique selon leur sévérité. Ainsi, les parcelles âgées présentent souvent une canopée ouverte suite au dessèchement des plants par endroit. Comme conséquence, on observe une baisse de la réflectance dans le proche infra-rouge.
Couverts végétaux	La réflectance des parcelles cacaoyères est très complexe. En effet, cette culture à un stade jeune, se trouve associée et parfois masquée par d'autres cultures vivrières telles que l'igname, la banane plantain, le maïs, le manioc, le tarot, l'aubergine, etc. A ce stade, les sols nus participent à la réflectance globale du verger dominé par les cultures associées. Ainsi, de la deuxième à la cinquième année, le recouvrement de ces cultures associées peut varier de 50 à 80%, avant de se stabiliser, puis de baisser au profit du recouvrement des plants de cacaoyers. A un stade plus âgé (5 à 20 ans), la strate arbustive constituée par les plants de cacaoyers est supplantée par une ou deux strates arborées. Le recouvrement cumulé des deux strates arborées peut varier par endroit de 15 à 30%, ayant ainsi, une influence significative sur la signature spectrale du verger dans ces zones. A l'opposé de cette configuration, il existe aussi des plantations âgées où la strate arborée est pratiquement nulle.
Géométrie du couvert	La géométrie d'un couvert est l'un des facteurs essentiels dont dépend la réflectance. Au stade jeune (2 à 5 ans), les plants de cacao et de cultures associées forment une voûte unique (1 à 2 m) surplombée par des bananiers. A un stade plus âgé (5 à 20 ans), la strate arbustive constituée par les plants de cacaoyers est supplantée par une strate arborée à un ou deux niveaux. Alors que la strate arborée basse (5 - 10 m) est constituée de fruitiers (orangers, colatier et avocatiers), la strate ligneuse haute (15 - 20 m) est composée d' <i>Albizia adianthifolia</i> , <i>Ceiba pentandra</i> , <i>Rhicinodendron heudelotii</i> , <i>Cola nitida</i> etc. A l'opposé de cette configuration, il existe aussi des plantations âgées où la strate arborée est pratiquement nulle.
Structure spatiale du couvert	L'emprise géographique (surface) des parcelles et leur forme géométrique sont des paramètres qui peuvent influencer la signature spectrale des exploitations agricoles. Une exploitation agricole sera d'autant plus facile à discriminer que sa surface est beaucoup plus grande que la résolution spatiale de l'image de base de la cartographie. Or, bien souvent, les parcelles cacaoyères sont de très petites tailles, ce qui ne favorise pas sa discrimination spectrale. En plus de la superficie, la régularité des formes (rectangle, carré, circulaire) est un paramètre facilitant la discrimination spectrale des exploitations. Les exploitations cacaoyères étant essentiellement des entreprises de type familiale, ces dernières présentent des formes très irrégulières et en mosaïque avec la jachère.

Tableau 18 : Tableau récapitulatif des facteurs de variabilité spectrale dans la zone d'étude

2.8. Recommandations

La conclusion principale est qu'il n'est pas possible de suivre l'évolution de l'utilisation des terres dans l'ensemble de la zone d'étude, avec les techniques de classification automatiques, avec une précision acceptable (supérieure à 80%) sur des images optiques à haute et très haute résolution¹². Les techniques d'interprétation visuelle sont quant à elles trop coûteuses pour envisager de les employer sur toute la zone (115 930 ha). La principale explication est la très forte variabilité des signatures spectrales au sein d'une même classe, entraînant des similitudes élevées entre les classes (forêts, jachères, cultures), dans un espace particulièrement fragmenté.

La seconde conclusion est que, dans ce contexte, même si leur plus grande résolution spatiale est également source de plus grande variabilité au niveau des signatures spectrales (cas des ombres portées des houppiers d'hévéa par exemple), les images à très haute résolution apportent beaucoup

¹² On peut donc s'interroger sur la précision de travaux similaires basés quant à eux sur des images à moyenne résolution...

d'informations pouvant être interprétées visuellement pour définir des zones d'entraînement – voire dans certains cas des zones de contrôle (cas des plantations de palmiers sur image Pléiades en transformation ACP en multi-spectral). Leur emploi nécessite toutefois une très bonne connaissance préalable du terrain pour pouvoir reconnaître certaines classes avec exactitude.

L'approche HCS doit donc être adaptée dans le cas présent, en privilégiant une interprétation visuelle de zones d'analyses restreintes, complétées par la collecte de données de contrôle sur le terrain. Plutôt que de travailler sur l'ensemble de la zone d'étude, sans distinction, il serait envisageable de ne travailler que sur des portions de zone d'étude présentant des enjeux en termes de zéro-déforestation, en commençant par travailler uniquement avec les coopératives qui approvisionnent l'entreprise agroindustrielle partenaire. Le dispositif consisterait à suivre l'évolution de la surface cacaoyère au sein des coopératives entre t_0 et t_0+n (n étant la période de monitoring), mais comme il n'est pas possible de suivre tous les coopérateurs, ni toutes les coopératives, il serait nécessaire de procéder par un échantillonnage de producteurs.

Pour chaque coopérateur échantillonné, à t_0 , on identifierait ses cacaoyères actuelles et ses réserves de terres (forêts secondaires, jachères, etc.). A t_0+n , on identifierait les changements d'utilisation des terres (dont les défrichements pour l'installation de cacaoyères). Il faudrait procéder par enquêtes de terrain croisées avec une interprétation visuelle des images, pour avoir une représentation spatialisée fidèle, facilitant les procédures d'audit. L'interprétation visuelle des images semble la technique la mieux adaptée dans ce contexte, mais elle doit être réservée à des surfaces limitées pour réduire les coûts opérationnels (cf. **Section 2.3**).

Si l'extension a lieu sur des réserves de terres non repérées à t_0 (acquises par le coopérateur entre t_0 et t_0+n par exemple), on devrait être en mesure de les repérer sur les images satellites datées de t_0 (d'où l'importance d'avoir des images datant de t_0 et t_0+n). Si le coopérateur vend ses terres, on pourrait également discuter du bienfondé d'en faire le suivi, en fonction de leur destination (coopérateur participant ou pas au programme 0-déforestation).

On pourrait imaginer deux échantillons pour les besoins du programme: un témoin et un "programme", pour comparer les résultats avec/sans programme. *In fine*, cela reviendrait donc à réaliser la classification HCS à l'échelle du planteur plutôt qu'à l'échelle régionale. Cette recommandation apparaît cohérente puisque c'est l'échelle de planification de la culture cacaoyère dans la zone de Bianouan, la compagnie agroindustrielle ne faisant qu'acheter son cacao aux coopératives et n'ayant pas de réel pouvoir de décision sur les nouveaux défrichements. A contrario, en Indonésie, c'est l'agroindustriel de la filière huile de palme qui planifie les zones d'extension industrielles à l'échelle régionale.

3. Conception d'un dispositif d'inventaire "HCS"

[L'**Annexe 7** présente un résumé des principales caractéristiques de la méthodologie employée par GAR/SMART en 2012 : grandeur à mesurer, strates à inventorier, méthodologie d'échantillonnage, taille de l'échantillon, forme et localisation des placettes (voir l'extrait du powerpoint de formation intitulé "Approche HCS, principes et méthode : cas GAR/SMART en Indonésie").

3.1. Grandeur à mesurer

Le résultat de l'inventaire doit permettre de vérifier si les classes de végétation "forêts secondaires moyennement à faiblement conservées", "jachères anciennes", "jachères récentes" et "jachères très récentes" présentent un stock de carbone aérien moyen différent à l'aide de méthodes statistiques : analyses de covariance, tests multicritères, etc. Ces stocks moyens devront ensuite être comparés au stock moyen en plantation cacaoyère afin d'en déduire un "seuil HCS" (cf. **Figure 1**) et confirmer la faisabilité de l'approche dans le contexte ivoirien.

Le recours à une équation allométrique à une entrée permet d'exprimer la relation entre la biomasse d'un arbre et son diamètre à hauteur de poitrine. En l'absence d'équation allométrique spécifique au contexte de l'étude, une équation générique pour les forêts tropicales humides peut être employée (Brown, 1997). Cette équation¹³ a été développée à partir d'un échantillon de 170 arbres de zone tropicale, avec un d_{bh} compris entre 5 et 148 cm. Un facteur de 0,47 permet de convertir les tonnes de biomasse en tonnes de carbone (IPCC, 2006). Les valeurs par hectare sont obtenues en sommant les valeurs obtenues pour chaque arbre de la placette et en ramenant la surface à un hectare.

♣ **La grandeur à mesurer est donc le dbh à partir de 5 cm.**

3.2. Strates à inventorier

Compte tenu de la typologie d'utilisation des terres présentée dans le premier chapitre de ce rapport, les strates à inventorier seraient les suivantes : (i) forêts secondaires moyennement à faiblement conservées ; (ii) jachères anciennes ; (iii) jachères récentes et (iv) jachères très récentes.

3.3. Plan de sondage

Étant donné les difficultés d'accès sur le terrain et la faible représentativité de la classe "forêts secondaires moyennement à faiblement conservées", le sondage par cluster a pour avantage d'obtenir plusieurs mesures au sein d'une seule unité d'échantillonnage (exemple dans la figure ci-dessous : 5 unités de relevé dans une unité d'échantillonnage). L'inconvénient principal est la perte de robustesse statistique, puisque les résultats peuvent être biaisés en cas d'autocorrélation spatiale (les tirages ne sont pas indépendants). En toute rigueur, les unités de relevé ne sont pas des unités statistiques.

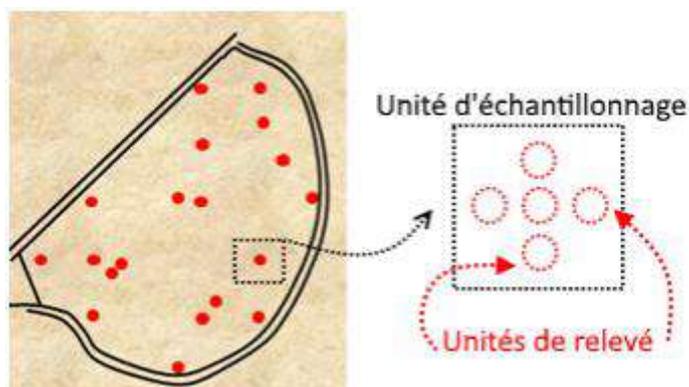


Figure 39 : Exemple de "cluster" dans un plan de sondage aléatoire

¹³ Biomasse (tonnes/arbre) = $42,69 - 12,800 \cdot d_{bh} + 1,242 \cdot d_{bh}^2$ [$R^2 = 0,84$]

L'échantillonnage doit conserver un caractère aléatoire et stratifié. C'est le cas en choisissant au hasard les parcelles de forêts ou de jachères à inventorier au sein d'un listing. Ce listing doit être établi une fois la cartographie de l'utilisation des terres réalisée (auprès d'un échantillon de n producteurs, par exemple – voir chapitre 1). Le tirage aléatoire peut se faire de plusieurs manières, la plus simple consistant à numéroter les parcelles au sein de chaque strate et à réaliser un tirage aléatoire sans remise.

♣ **Le sondage par cluster est donc fortement recommandé dans le cas présent.**

3.4. Taille des échantillons

Comme présenté en **Annexe 7** (Powerpoint de formation intitulé "Les fondements de l'inventaire forestier", diapositive 28), l'intensité d'échantillonnage n au sein de chaque strate dépend principalement du coefficient de variation utilisé¹⁴, à un niveau de confiance α et pour un taux d'erreur relative tolérée ex-ante (ER) donnés.

En pratique, on utilise un coefficient de variation déterminé lors d'un pré-inventaire ou d'un inventaire réalisé dans des conditions similaires, ou encore pris dans la littérature (dans cet ordre de choix). Un exemple de valeurs de coefficient de variation pris dans la littérature est donné ci-dessous :

Formation	Caractéristiques	CV%
Forêt dense humide	Volume total, dbh > 10 cm Toutes essences confondues	60-80 %
	Volume total, dbh > 60 cm Toutes essences confondues	100-150 %
	Volume total, N > 2 arbres/ha, dbh > 60 cm (essence abondante)	150-200 %
	Volume total, N < 1 arbre/ha, dbh > 60 cm (essence peu abondante)	250 %
Autres formations	Jachères	90-100 %
	Forêt claire et savane arborée	40-70 %
	Savane arborée	50-90 %

Tableau 19 : Coefficients de variation types pour les forêts denses humides et autres formations

Source : Centre technique de la forêt tropicale, 1989

En l'absence de pré-inventaire ou d'inventaire réalisé dans des conditions similaires, les données ci-dessus peuvent être utilisées temporairement pour estimer la taille des échantillons par strate. Cependant, nous recommandons plutôt de diviser l'inventaire en deux parties, la première (pré-inventaire) permettant de recalculer des coefficients de variation plus proches de la réalité, et la seconde (finalisation de l'inventaire) permettant de boucler la collecte des données avec le bon nombre d'unités d'échantillonnage.

Avec un niveau de confiance α de 5%, l'intensité d'échantillonnage provisoire se présente comme suit :

¹⁴ rapport entre l'écart type de l'estimateur et sa moyenne.

Strates	CV%	ER=5%	ER=10%	ER=15%	Commentaire
Forêts secondaires moyennement à faiblement conservées	70%	753	188	84	CV% = moyenne de la classe forêt dense humide (dbh > 10 cm)
Jachères anciennes	95%	1 387	347	154	CV% = moyenne de la classe Jachères (cf. Figure 40)
Jachères récentes	95%	1 387	347	154	Idem
Jachères très récentes	70%	753	188	84	CV% = moyenne de la classe forêt claire / savane arborée (cf. Figure 40)
Total		4 280	1 070	476	-

Tableau 20 : Intensité d'échantillonnage provisoire pour l'inventaire HCS dans la zone de Bianouan

Enfin, le tableau ci-dessous indique une estimation du nombre d'homme-jours nécessaires pour inventorier 476 à 4 280 placettes (selon la précision attendue, cf. Tableau précédent), dans le contexte de Bianouan. On estime qu'une équipe de deux personnes peut réaliser entre 5 et 10 placettes par jour (une fois le protocole bien pris en main par les techniciens), le principal facteur limitant étant le temps de cheminement parfois très long dans la zone. L'échantillonnage par cluster devrait toutefois permettre de limiter les temps de cheminement.

Nombre de placettes	HJ* min	HJ max
ER = 15 % - 476	95	190
ER = 10 % - 1 070	214	428
ER = 5 % - 4 280	856	1 712

*homme-jour

Tableau 21 : Estimation de la quantité de personnel technique nécessaire pour mener l'inventaire HCS

♣ **Le choix du niveau d'erreur tolérée ex-ante a donc un impact direct sur les coûts opérationnels.**

3.5. Forme des placettes

Il n'y a pas de règle générale sur la forme des placettes, le critère principal étant la facilité d'implantation qui varie avec l'expérience et le contexte. Il y a surtout des recommandations pratiques issues de l'expérience. Les placettes carrées ou rectangulaires ne nécessitent pas de compétences techniques particulières alors que les placettes circulaires sont plus faciles à implanter mais nécessitent un peu de pratique. Les arbres limites sont plus clairement identifiés dans ce cas.

On admet généralement que le CV est lié à la surface de l'unité de sondage, mais la taille des placettes est souvent fixée de manière empirique. En forêt dense humide, pour les inventaires d'aménagement, la recommandation générale est d'adopter des placettes de 0,5 ha de côté 10 ou 25 m, disposées sur des layons parallèle, plus faciles à matérialiser que des placettes circulaires (Centre technique de la forêt tropicale, 1989).

♣ **Dans le cas présent nous recommandons des placettes carrées de 20 m de côté, très faciles à matérialiser à l'aide de rubans décamétriques.**

3.6. Fiche de comptage et protocole de mesures

Des exemplaires de fiche de comptage et de protocole de mesures sont repris en **Annexe 5** et **Annexe 6**. Ils ont été présentés et testés au cours de la formation "Inventaires HCS" qui s'est déroulée en Février 2016.

3.7. Notes sur la notion de "seuil HCS" dans le contexte de Bianouan

Le "seuil HCS" est basé sur une comparaison avec un stock de carbone moyen d'une palmeraie "mature" (ou d'une cacaoyère dans le cas ivoirien), or en réalité, l'âge d'exploitabilité peut varier d'une variété à l'autre, d'une zone plus fertile à une autre, etc. Mais c'est une simplification nécessaire pour opérationnaliser l'approche, sinon, le seuil HCS varierait pour chaque producteur.

Les recherches bibliographiques menées font état de plusieurs travaux de quantification du carbone des cacaoyères dans la sous-région (principalement Cameroun et Ghana). Les valeurs moyennes peuvent varier fortement d'une source à l'autre, compte tenu de l'hétérogénéité des conditions culturelles (densité de plantation, âge, importance de l'ombrage... voir tableau ci-dessous) qui, de surcroît, ne reflètent sans doute pas tout à fait les conditions culturelles de la zone d'étude.

Auteurs	Pays	Résultats
DUGUMA et al. , 2000	Sud Cameroun	125 tC/ha pour les systèmes agroforestiers cacaoyers (densité inconnue)
GOCKOWSKI, 2011	Sud Cameroun	49 tC/ha pour des systèmes "plein soleil" avec 1111 cacaoyers/ha et 12-15 arbres d'ombrage /ha
WADE, 2010	Ghana	Systèmes agrof. cacaoyers (taux d'ombrage > 25%) : 131 tC/ha Systèmes purs (taux d'ombrage > 25%) : 39 tC/ha
DUROT, 2013	Centre Cameroun	85 tC/ha pour les SAF cacaoyers avec 1158 cacaoyers/ha et précédent forestier dont 9 tC/ha stockés par les seuls cacaoyers (pour des cacaoyers âgés de 30 ans.
KOTTO SAME, 1997	Sud Cameroun	136 tC/ha pour les systèmes agroforestiers cacaoyers (pas de précision sur la densité) .
TAYO GAMO, 2014	Centre Cameroun	Pour une densité de 1100 à 1800 cacaoyers /ha : 78 tC/ha pour les systèmes agroforestiers cacaoyers de moins de 10 ans 103,9 tC/ha pour les systèmes agroforestiers cacaoyers de 11 à 20 ans 121,9 tC/ha pour les systèmes agroforestiers cacaoyers de 21 à 40 ans 183,2 tC/ha pour les systèmes agroforestiers cacaoyers de plus de 40 ans

Tableau 22 : Stockage de carbone en plantations cacaoyères (revue de littérature)

Une alternative consisterait à faire appel à une équation allométrique spécifique au cacao, telle que développée par exemple par le CATIE¹⁵ en Amérique centrale (avec les mêmes limitations que précédemment, à savoir que les conditions culturelles doivent être le plus proches possible de celles de la zone d'étude, ce qui n'est pas toujours garanti). Elle nécessiterait de réaliser un inventaire dans la strate cacaoyère, mais celui-ci pourrait être réalisé par une ou deux équipes supplémentaires.

3.8. Recommandations finales

Le coût et la précision des analyses wall-to-wall peuvent varier fortement d'un contexte à un autre. En cas de paysage très fragmenté et de risque de confusion élevé entre classes (comme à Bianouan), les images sont bien plus difficiles à interpréter... Il faut donc proposer des solutions présentant un compris coût-efficacité satisfaisant, comme par exemple, interpréter visuellement les parcelles appartenant à un échantillon de producteurs plutôt que cartographier un bassin d'approvisionnement entier.

La mise en œuvre d'un inventaire HCS ne pose pas en soit de difficulté technique, même si là encore les moyens disponibles dictent en partie le niveau de précision qu'il est possible d'atteindre. Toutefois si la relation entre "strates" et "stocks de carbone aérien moyens" n'est pas suffisamment robuste en utilisant les équations de biomasse "générique" à une entrée, les estimations sont probablement

¹⁵ Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Un exemple d'équation allométrique est donné par Somarriba et al. 2013 : $\text{Log Biomass} = (-1.684 + 2.158 * \text{Log}(d) + 0.892 * \text{Log}(\text{altitude}))$.

faussées. Dans ce cas, il faut donc investir des moyens de R&D conséquents pour affiner les équations de biomasse en modélisant les stocks de carbone dans les strates, y compris dans la strate cacaoyère.

Même si la définition de forêt est commune d'un bout à l'autre du pays, les formations écologiques et les dynamiques d'utilisation des terres varient quant à elles. On peut considérer que les seuils HCS proposés seraient valables dans des conditions écologiques similaires. Certaines classes peuvent apparaître ou disparaître, selon les dynamiques d'utilisation des terres au niveau local. En théorie, il faudrait donc vérifier que la classification HCS est applicable à toute nouvelle zone d'étude, et dans le cas contraire, proposer une autre classification plus adaptée.

Annexe 2 - Détail des images SPOT 6/7 et Pléiades fournies par Airbus

SPOT 6

La zone d'étude est incluse dans sa totalité dans une scène SPOT 6, composée d'une image multi-spectrale et d'une image panchromatique. Ces images, pour des raisons de taille, sont morcelées en dalles synchrones et peuvent être ouvertes ensemble à partir du fichier de métadonnées en format DIMAP V2.

Données multi-spectrales (MS) :

- DIM.SPOT6_MS_201401031013379_ORT_1561707101
 - IMG_SPOT6_MS_201401031013379_ORT_1561707101_R1C1
 - IMG_SPOT6_MS_201401031013379_ORT_1561707101_R1C2
 - IMG_SPOT6_MS_201401031013379_ORT_1561707101_R2C1
 - IMG_SPOT6_MS_201401031013379_ORT_1561707101_R2C2

Données panchromatiques (P):

- DIM.SPOT6_P_201401031013379_ORT_1561707101
 - IMG_SPOT6_P_201401031013379_ORT_1561707101_R1C1
 - IMG_SPOT6_P_201401031013379_ORT_1561707101_R1C2
 - IMG_SPOT6_P_201401031013379_ORT_1561707101_R2C1
 - IMG_SPOT6_P_201401031013379_ORT_1561707101_R2C2

Dans la totalité de la scène, deux images multispectrales et deux images panchromatiques ont été utilisées, correspondant à la zone d'étude :

- IMG_SPOT6_MS_201401031013379_ORT_1561707101_R1C1
- IMG_SPOT6_MS_201401031013379_ORT_1561707101_R2C1
- IMG_SPOT6_P_201401031013379_ORT_1561707101_R1C1
- IMG_SPOT6_P_201401031013379_ORT_1561707101_R2C1

La date d'acquisition des images, 2014-01-03 à 10h13m:37.9s, correspond au début de la saison sèche. Un fichier en format vectoriel correspondant à la zone des nuages (masque) est fourni par Airbus :

- CLD_SPOT6_MS_201401031013379_ORT_1561707101_MSK.GML

Pléiades

L'image DS_PHR1A_201602021044227_FR1_PX_W004N06_1101_02572 a été prise en date du 2016-02-02 à 10:44:58, en saison sèche, un mois après les inventaires de terrain. Les images MS et P ne sont composées que d'une seule dalle (R1C1).

Données multi-spectrales (MS) :

- DIM_PHR1A_MS_201602021044584_ORT_1679678101-002.XML
 - IMG_PHR1A_MS_201602021044584_ORT_1679678101-002_R1C1

Données panchromatiques (P) :

- DIM_PHR1A_P_201602021044584_ORT_1679678101-001.XML
 - IMG_PHR1A_P_201602021044584_ORT_1679678101-001_R1C1.JP2

Masque des nuages :

- CLD_PHR1A_P_201602021044584_ORT_1679678101-001_MSK.GML

Annexe 3 – Calcul du nombre d'unités d'échantillonnage théorique (validation)

Valeurs de B* pour 1 degré de liberté

k (nombre de classes)	α (degré de confiance)		
	0,1	0,05	0,01
5	5,41190	6,63490	9,54954
6	5,73114	6,96040	9,88461
7	6,00249	7,23669	10,16854
8	6,23853	7,47677	10,41494

*ces valeurs peuvent être obtenues sous Excel (c) en utilisant la formule "KHAÏDEUX.INVERSE(1; α/k)"

Valeur de n en fonction de la précision tolérée ex-ante et du couple (α ; k).

k = 5	α (degré de confiance)		
Erreur tolérée	0,1	0,05	0,01
5%	541	663	955
10%	135	166	239
15%	60	74	106
20%	34	41	60
k = 6	α (degré de confiance)		
Erreur tolérée	0,1	0,05	0,01
5%	573	696	988
10%	143	174	247
15%	64	77	110
20%	36	44	62
k = 7	α (degré de confiance)		
Erreur tolérée	0,1	0,05	0,01
5%	600	724	1017
10%	150	181	254
15%	67	80	113
20%	38	45	64
k = 8	α (degré de confiance)		
Erreur tolérée	0,1	0,05	0,01
5%	624	748	1 041
10%	156	187	260
15%	69	83	116
20%	39	47	65
k = 9	α (degré de confiance)		
Erreur tolérée	0,1	0,05	0,01
5%	645	769	1 063
10%	161	192	266
15%	72	85	118
20%	40	48	68

Annexe 4 – Méthodologie de validation CORINE LAND COVER (Addendum 2009)

La stratification préalable peut se faire sur base thématique (1 strate = 1 classe) ou géographique (1 strate = 1 région), voire les deux. Pour chaque strate "h", le nombre de points d'échantillonnage (noté "n") est déterminé par la formule:

$$n_h = \frac{p_h(1-p_h)}{\sigma_h^2}$$

p_h représente un taux d'erreur estimé. Par exemple, il peut être estimé en interprétant deux fois la même unité de paysage, et en comparant les différences de surface totale et pour chaque classe entre les deux interprétations.

σ_h est l'erreur standard absolue acceptée pour l'estimation du pourcentage d'erreur associée à l'estimation de la surface de la strate h (en anglais: "*σh is the accepted absolute standard error for the estimation of the percentage of incorrect identified size of area for the stratum h*").

Ces deux paramètres doivent donc être estimés pour calculer le nombre de points à échantillonner par strate. Pour les très petites strates, une limite de 2 points/km² est fixée, afin d'éviter des densités d'échantillonnage élevées sur de très petites surfaces. Cela augmente de facto l'erreur standard.

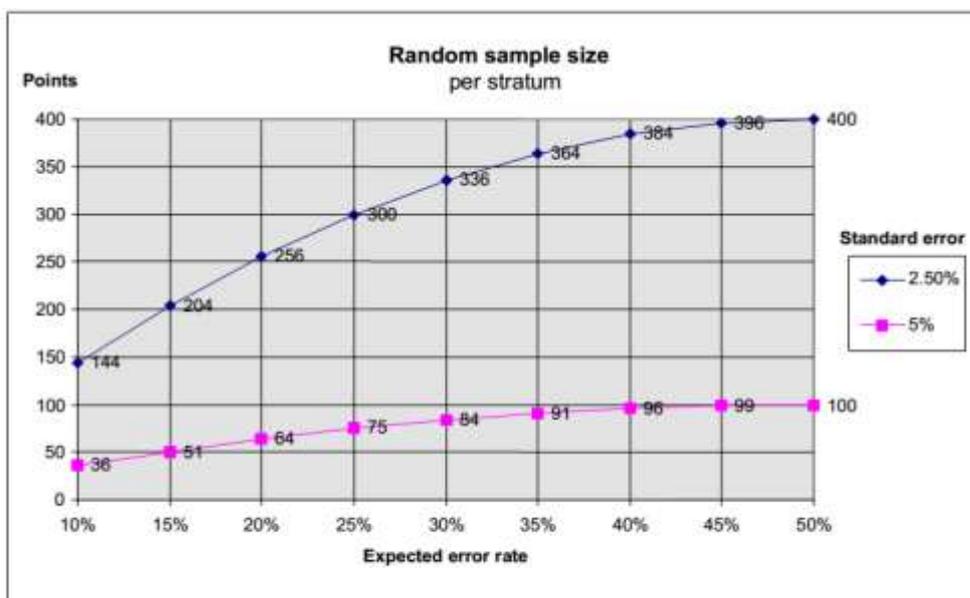


Figure 1: Number of sample points dependent on the expected error rate and the accepted absolute standard error

Les points sont ensuite échantillonnés aléatoirement au sein de chaque strate en utilisant une technique en deux temps:

- (i) Sélection des polygones à échantillonner et calcul du nombre de points d'échantillonnage au sein de ses polygones par une méthode dite de "sélection cumulative" (voir Figure ci-dessous).

Il suffit de disposer de la liste des polygones, pour une classe donnée, numérotés de 1 à x en partant du nord-ouest (par exemple) et de positionner un point d'échantillonnage tous les y km², y étant égal à la surface totale de la classe divisée par le nombre de points d'échantillonnage de la classe. Le premier point est positionné aléatoirement au sein du polygone n°1.

NB: Un tableur Excel devrait permettre d'y arriver sans trop de difficultés...

- A_h : Total area of the stratum h .
- A_{hi} : Area of the land cover unit i in the stratum h .
- n_h : Number of random sampling point in the stratum h .
- $\frac{A_h}{n_h}$: Step-size

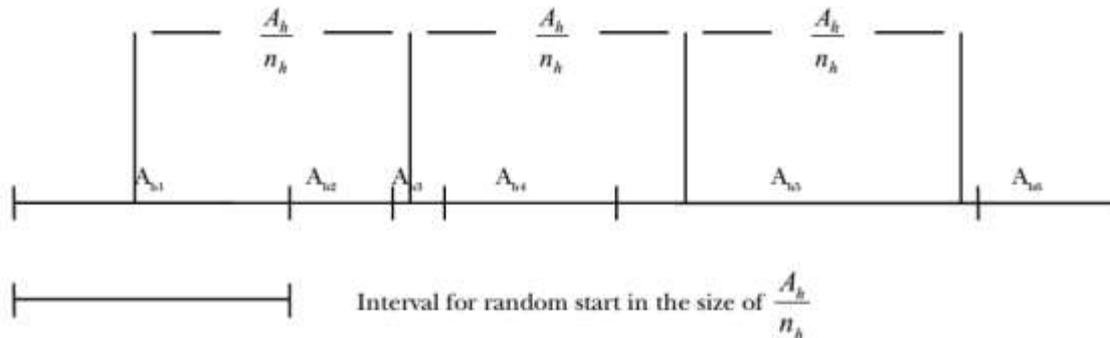


Figure 2: Scheme for cumulative selection of land cover units and calculation of the number of random sampling points

- (ii) Localisation du/des point(s) d'échantillonnage au sein des polygones sélectionnés.

Pour un polygone donné, trois cas se présentent:

- a. Cas n°1: un seul point à positionner aléatoirement. On dessine un "rectangle limite" (*boundary rectangle*) en utilisant les coordonnées extrêmes du polygone (voir figure ci-dessous) et on positionne le point aléatoirement à l'intérieur (le point doit évidemment être à l'intérieur du polygone...).
- b. Cas n°2 et 3: plusieurs points à positionner aléatoirement. On a alors recours à un échantillonnage systématique (couplé à une sélection aléatoire des points sur la grille [NB: la maille n'est pas déterminée].
 - i. Cas n°2: $n < 5$. Le "rectangle limite" est divisé en n rectangles de dimensions égales (par des lignes parallèles à son plus petit côté), et un point est choisi au sein de chaque rectangle ainsi produit. Si le point est valide (= à l'intérieur du polygone), il est conservé, sinon il est remis au tirage. Et ainsi de suite, jusqu'à ce que les points soient tous valides.
 - ii. Cas n°3: $n >$ ou égal à 5. On superpose aléatoirement une grille à maille carrée orientée Nord sur le "rectangle limite". La maille de la grille (d) dépend de n et de la longueur/largeur du "rectangle limite" (noté R et H dans l'équation ci-dessous, qui sont en réalité des deltas de longitude et latitude respectivement). Elle est calculée en utilisant l'équation ci-dessous.

$$d = \sqrt{\frac{\Delta R \Delta H}{n-1} + c^2} + c, \quad \text{with} \quad c = \frac{\Delta R + \Delta H}{2(n-1)},$$

Figure 3 shows how the unit and the boundary rectangle are covered by the grid:

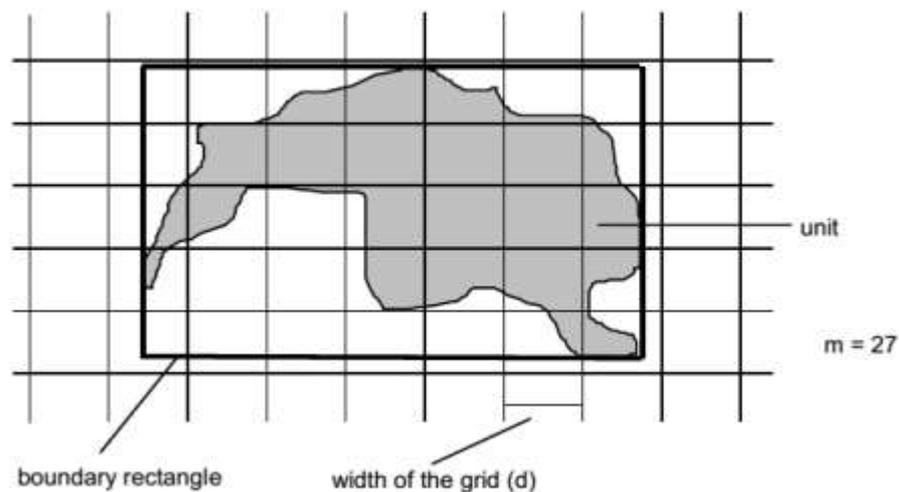


Figure 3: Method for drawing the plots - stage one

"m" est le nombre de carrés qui intersectent le polygone. Une fois déterminé, la procédure présentée au cas 2 est répétée (tirages aléatoires successifs avec remise).

Calcul de l'erreur standard (et rappels de statistiques...)

Pour une strate h donnée, l'exactitude (*accuracy*) représente le % de surface correctement classifiée et correspond au ratio "nombre de points valides/nombre de points total". L'exactitude globale, pour i strates, représente la moyenne pondérée (par la surface) des exactitudes de chaque strate.

La variance (V) de l'estimation du pourcentage de points correctement classés (p) se calcule comme suit: $V = p(1-p)/(n-1)$, pour chaque strate h. Pour l'ensemble des strates, la variance totale intègre la surface relative de chaque strate

$$Var(\hat{P}) = \sum_h \left(\frac{A_h}{A} \right)^2 \frac{p_{hh}(1-p_{hh})}{n_h - 1}$$

L'écart type ou erreur standard est "l'écart moyen à la moyenne" pour tous les individus (racine carrée de la variance). Il s'exprime dans l'unité de la grandeur mesurée. C'est un indicateur de dispersion autour de la moyenne.

L'erreur relative est encore appelée marge d'erreur. Elle se détermine de la façon suivante, avec "s" l'écart type, t la variable de Student, n la taille de l'échantillon et x la moyenne. Elle s'exprime en % .

$$Er = \frac{t \cdot s}{\bar{x} \cdot \sqrt{n}}$$

Par exemple, pour un degré de confiance de 5%, une erreur relative de 12% signifie que la moyenne "vraie" a 95% de chance de se situer entre la moyenne calculée +/- 12%.

Annexe 5 – Protocole HCS provisoire

Protocole de collecte des données dendrométriques et fiche de terrain "HCS - Bianouan"

Méthode

Cheminement

Dans les classes de végétation issues de la classification de l'utilisation des terres (hors cultures pérennes) de la zone d'étude, l'analyse est faite en utilisant le dispositif de sondage suivant :

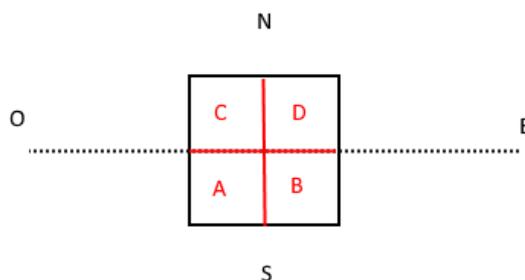
[Inclure une carte de localisation des placettes]

Chaque placette est repérée par le code classe (FS pour forêts secondaires, JAR pour jachères anciennes et récentes, JTR pour les jachères très récentes) et le n° du point (FS {1 à n} ; JAR {1 à m} ; etc.). Les coordonnées GPS de chacun des points sont pré-enregistrées dans les GPS, numérotés de 1 à 4.

Le cheminement est réalisé de façon à parcourir les distances les plus courtes entre les points.

Matérialisation des placettes

Le point GPS représente le centre d'une placette carrée (20 m x 20 m). La placette est matérialisée à l'aide de 2 rubans déroulés perpendiculairement selon les directions E-O et N-S, en effectuant une visée à la boussole depuis le centre de la placette. Les 4 sous-parcelles ainsi déterminées mesurent 10 m de côté. Les sous-placettes SO / SE / NO / NE sont respectivement notées A, B, C, D.



Variables relevées

Important : il est nécessaire de renseigner toutes les cases, si une difficulté empêche de déterminer l'information, le noter en observation.

Métadonnées

- Code placette : FS {1 à n} ; JAR {1 à m} ; etc. - indiqué sur le GPS.
- N° fiche : numéro de la fiche, dans l'ordre chronologique. Chaque jour, la numérotation repart de 1.
- Date : date du relevé
- Heure : heure du relevé
- Opérateur : nom de l'opérateur

Observations générales

- Prise de vue (noms) : nom des photos prises depuis le centre de la placette, selon les 4 directions cardinales (N/S/E/O) et vers le ciel.
- Code appareil : noter le numéro de l'appareil photo ou le nom de son propriétaire (initiales).

- Structure : décrire les strates. Si la strate x{1,2,3} est présente, cocher la case . Sinon laisser la case vide (). Indiquer le taux de recouvrement de la strate en pourcentage (estimation à vue d'œil). Le taux de recouvrement sur la placette est égal à la moyenne des taux de recouvrement estimés sur chaque sous-placette.
- Inclinaison : depuis le centre de la placette, indiquer les inclinaisons en visant successivement les 4 points cardinaux (N/S/E/O). Noter l'inclinaison en degrés. Si cette inclinaison est comprise entre 0° et plus ou moins 5°, la valeur nulle est retenue (absence de correction de pente).
- Type de sol : si le sol est hydromorphe en surface, cocher la case . Sinon laisser la case vide ().

Données dendrométriques

Dans la sous-placette A : relevés des arbres de $d_{bh}^* > 5$ cm.

Dans les sous-placettes B, C et D : relevés des arbres de $d_{bh} > 20$ cm.

**diamètre à hauteur de poitrine*

- Colonne N : chaque arbre est numéroté de 1 à n dans son ordre d'apparition et une étiquette y est apposée.
- Colonne SP : la sous-placette est indiquée (A, B, C ou D).
- Colonne L : les grosses lianes devront être comptabilisées dans l'inventaire : l'indication « liane » devra être mentionnée par une croix (X).
- Colonne Esp : si l'espèce est connue, elle est relevée, sinon elle est notée "inconnue".
- Colonne d_{bh} (cm) : le dbh est noté en cm, avec une précision d'un mm (couvert). Ce dbh est mesurable par lecture de la face blanche des rubans diamétriques.

Documents fournis en complément :

- Carte des relevés avec n° des placettes.
- Inventaire du matériel à emporter
- Fiches de comptage en nombre suffisant

Annexe 7 – Extraits choisis des présentations de la formation "inventaires HCS"

REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE
Union - Discipline - Travail



MINISTRE DE L'ENVIRONNEMENT DE LA SALUBRITE
URBAINE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE



Pilote de système MRV pour l'approvisionnement en cacao zéro-déforestation

*Inventaires forestiers – principes et
méthodes, recommandations pratiques*

Jérôme MAURICE, ingénieur forestier SalvaTerra

1. Les fondements de l'inventaire forestier

- La dendrométrie ?

- C'est l'ensemble des méthodes de mesure des arbres, des peuplements et de leur accroissement.
- Fait appelle à des connaissances statistiques de base pour concevoir un plan d'échantillonnage, un protocole de mesures, etc.
- Quelques règles de base :
 - Grandeurs en minuscule : ha, m, m²... et variables « individu » : d, g, h
 - Grandeurs en majuscule : D, G, N, V, H
- Les différentes parties de l'arbre répondent à une nomenclature bien spécifique :
 - Souche, empattement, fût, houppier, couronne...
- Il n'y a pas une seule façon de faire pour décrire un peuplement... mais des règles de base à respecter.

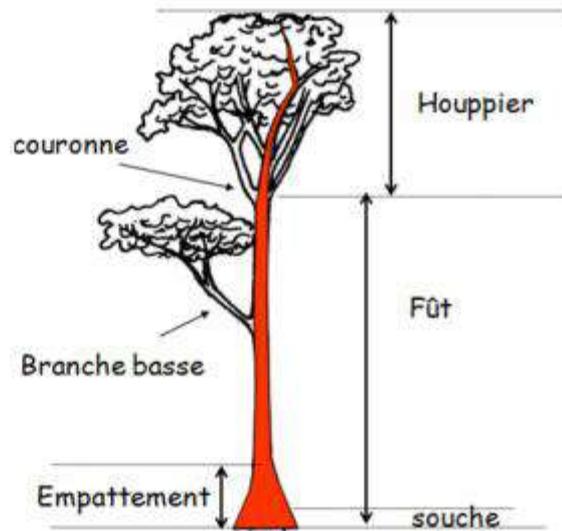


1. Les fondements de l'inventaire forestier



• L'arbre

- Les différentes parties de l'arbre répondent à une nomenclature bien spécifique
 - Souche, empattement, fût, houppier, couronne...



Salva.Terra

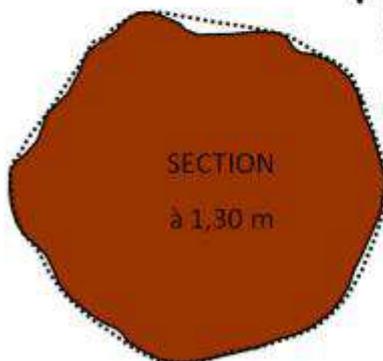
5

1. Les fondements de l'inventaire forestier



• Diamètre ou circonférence ?

- Outils de mesure : rubans - compas (classiques, angulaires, finlandais) – pentaprismes – relascopes...
 - Les rubans ont l'avantage d'être peu chers et faciles à transporter.
 - Les rubans forestiers proposent une mesure en circonférence et une mesure en diamètre. Ils sont mieux adaptés aux gros arbres que les compas.
 - Pour les **très gros arbres** de forêts tropicales, il existe des règles montées sur manche (« planchette »)



Attention :

- Par convention, on mesure à hauteur de poitrine
- La mesure doit être bien perpendiculaire à la section de tronc
- Le ruban doit être bien plat et non distendu (chaleur)
- Le lierre ou les lianes doivent être retirés
- On mesure au cm le plus proche ou au cm couvert (selon ce qui est précisé dans le protocole)

Salva.Terra

7

1. Les fondements de l'inventaire forestier

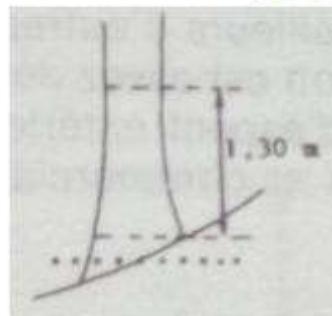
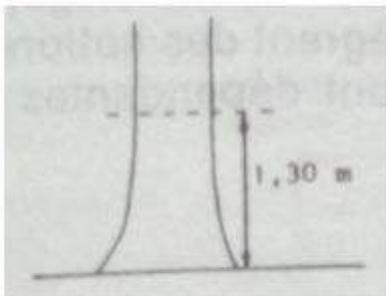
- Diamètre ou circonférence ?

- Attention :

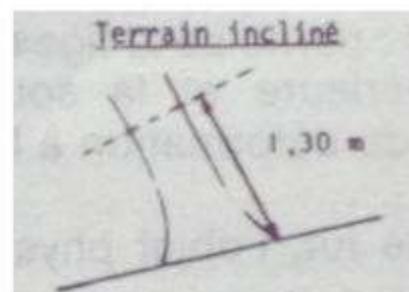
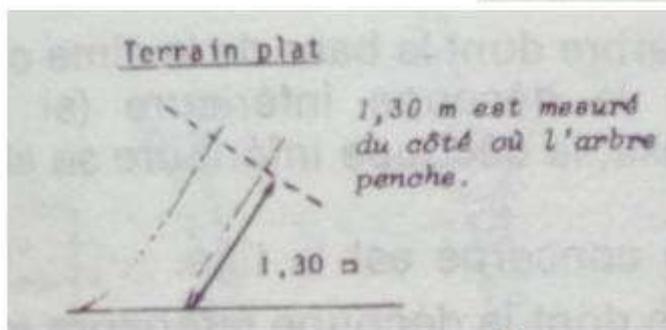
- « Jumelles » : mesurer chaque arbre séparément si la division est $< 1,30$ m
 - En cas de pente : mesure côté amont
 - En cas d'arbre penché : on incline le compas ou le ruban (toujours dans un plan perpendiculaire à la section de tronc)
 - Contreforts, nœuds : on se place au dessus ou en dessous
 - Pour les empattements larges en forêt tropicale : +30 cm au-dessus
 - Arbres limites : si le centre de la section de l'arbre est dans la placette on le compte. Sinon il n'est pas mesuré.



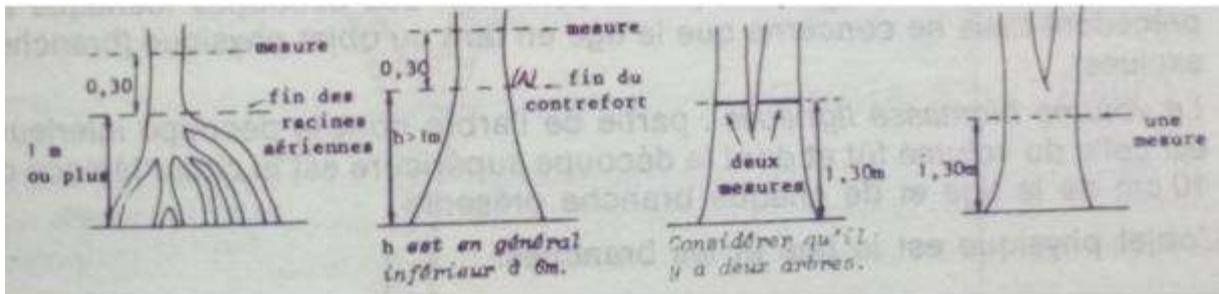
1. Les fondements de l'inventaire forestier



Le memento du forestier. CTFT, 3^e édition 1989.



1. Les fondements de l'inventaire forestier



Le mémento du forestier. CTFT, 3^e édition 1989.

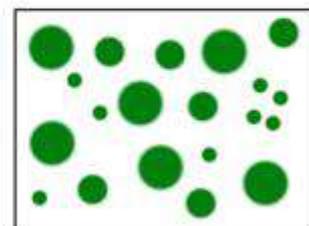


10

1. Les fondements de l'inventaire forestier

- Le choix de la méthode d'inventaire est fonction :

- De la problématique :
 - aire géographique ? variables d'intérêt ? enjeux ?
- De la qualité de l'information recherchée
- Des moyens économiques disponibles



Un domaine forestier

- L'inventaire en plein

- On compte tous les arbres du domaine
- On ne peut calculer l'erreur associée à la mesure
 - +/- 10% et un biais moyen relatif de 2,5 % selon certains auteurs .
- Réserver à des petites forêts (< 10 ha) = très peu usitée



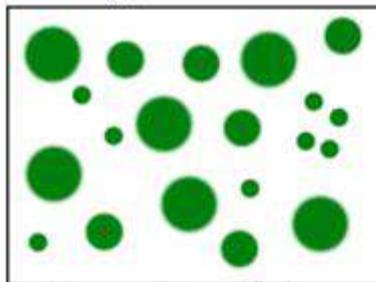
11

1. Les fondements de l'inventaire forestier

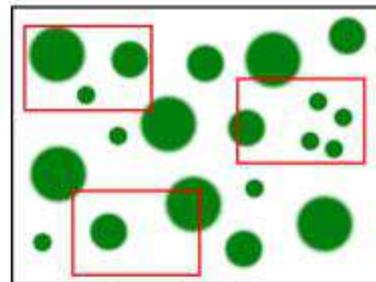
- L'inventaire par échantillonnage :

- Repose sur des lois statistiques

- On échantillonne une population d'arbres. Les unités d'échantillonnage sont appelées placettes. Elles sont déterminées par un plan d'échantillonnage (ou de sondage)



Une population d'arbres



Un échantillon



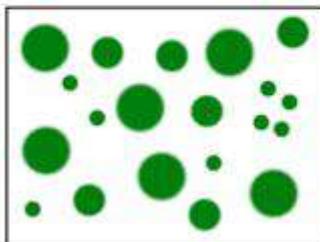
12

1. Les fondements de l'inventaire forestier

- L'inventaire par échantillonnage :

- Repose sur des lois statistiques

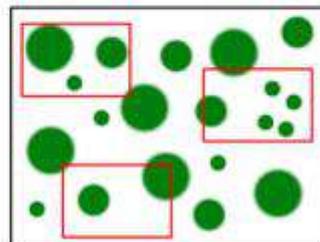
- Des « estimateurs » sont utilisés pour approcher les paramètres « vrais »



Paramètres « vrais » de la population

- La moyenne « vraie » (m)

- La variance de la pop. (σ^2), ou somme des écarts à la moyenne au carré divisé par la taille de la population...
ou encore écart-type au carré



Estimateurs de la population

(moyenne m^* et variance σ^{2*})



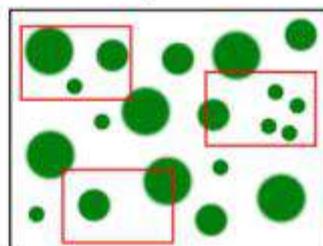
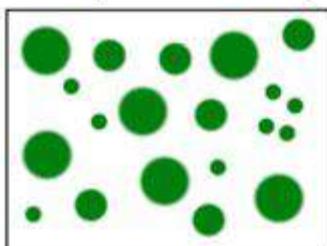
13

1. Les fondements de l'inventaire forestier



- L'inventaire par échantillonnage :

- Repose sur des lois statistiques
 - En plus d'estimer une grandeur, on s'intéresse à la précision des mesures



Paramètres
« vrais » de la
population

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sum x_i}{n} = m$$

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sum (x_i - m)^2}{n} = \sigma^2$$

Précision
des estimations ?

$$m^* = \frac{\sum x_i}{n}$$

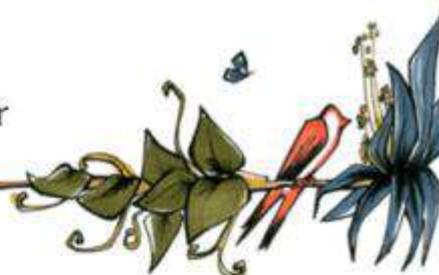
Estimateurs
de la
population
(moyenne et variance)

$$\sigma^{*2} = \frac{\sum (x_i - m^*)^2}{n-1}$$



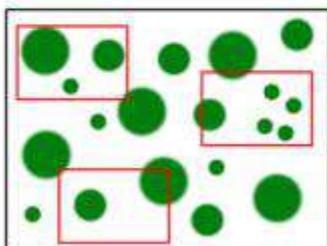
14

1. Les fondements de l'inventaire forestier



- L'inventaire par échantillonnage :

- Repose sur des lois statistiques
 - Rappels sur la théorie de l'échantillonnage aléatoire simple



- Les observations sont considérées comme des réalisations de variables aléatoires.
- Toutes les unités d'éch. ont la même probabilité d'être choisies.
- Les tirages sont indépendants (avec remise) et les observations sont ponctuelles.
- Pour n unités d'éch. indépendantes, la grandeur X est caractérisée par :

$$m^* = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_1 + \dots + X_n}{n}$$

$$E(m^*) = m$$

Tel que son espérance est égal à la moyenne vraie : si je répète l'échantillonnage à l'infini, la « moyenne des moyennes » tend vers la moyenne vraie

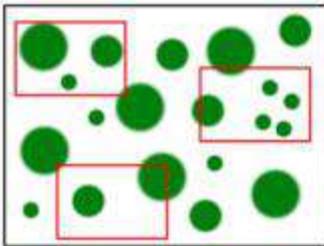


15

1. Les fondements de l'inventaire forestier



- L'inventaire par échantillonnage :
 - Repose sur des lois statistiques
 - Rappels sur la théorie de l'échantillonnage aléatoire simple



$$\sigma^{2*} = \text{Var}(m^*) = \frac{1}{n^2} \times \sum (\text{Var}(X_i)) = \frac{n \text{Var}(X)}{n^2} = \frac{\sigma^2}{n}$$

Théorème central limite : quel que soit la distribution de X, la moyenne tend vers la loi normale.

Donc si n est assez grand, X suivant une loi normale, m* suit également une loi normale. Alors on détermine l'intervalle de confiance sur la moyenne comme suit :

Écart type :

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$IC = m^* \pm t \sigma^* = m^* \pm t \frac{\sigma^*}{\sqrt{n}}$$

t est la valeur de la variable de Student pour (n-1) degrés de libertés au seuil de confiance choisi (ici 5%).

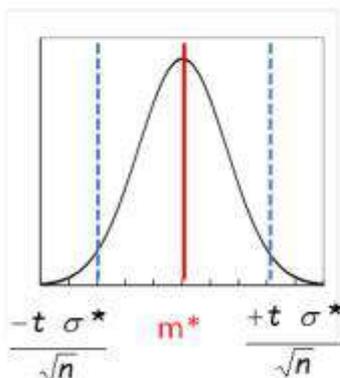


16

1. Les fondements de l'inventaire forestier



- L'inventaire par échantillonnage :
 - Repose sur des lois statistiques
 - Rappels sur la théorie de l'échantillonnage aléatoire simple



L'erreur (d'échantillonnage) absolue est notée EA :

$$EA = t \frac{\sigma^*}{\sqrt{n}}$$

L'erreur (d'échantillonnage) relative est notée ER :

$$ER = \frac{EA}{m^*} = \frac{t \sigma^*}{\sqrt{n} m^*} = CV^* \frac{t}{\sqrt{n}}$$

Où CV* est le « coefficient de variation » (en %)



17

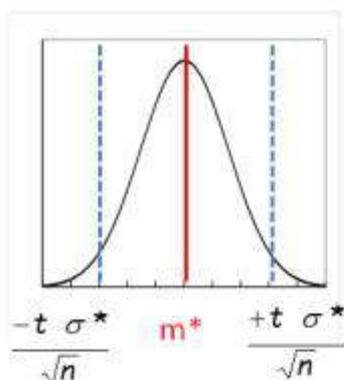
1. Les fondements de l'inventaire forestier



• L'inventaire par échantillonnage :

– Repose sur des lois statistiques

• Rappels sur la théorie de l'échantillonnage aléatoire simple



- En réalité, les unités d'échantillonnage ne sont pas ponctuelles et possèdent une surface (S). Et on ne veut pas mesurer deux fois la même placette (tirage sans remise).
- On devrait donc corriger le calcul de l'erreur relative en tenant compte du taux d'échantillonnage f tel que $f = nS/D$ (D étant la surface du domaine). En pratique, on le fait rarement.
- Seul problème : risque de biais en cas de périodicité dans le domaine forestier avec la largeur de la maille (ex: plantations en bandes ; alternance vallons/crêtes)

$$E_x = \sqrt{1-f} \times \frac{t \times CV}{\sqrt{n}}$$



18

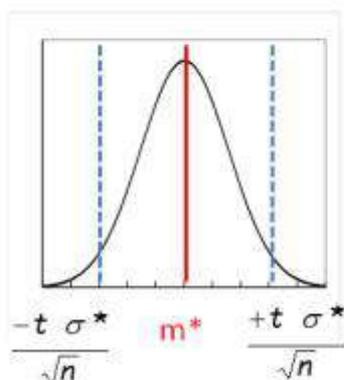
1. Les fondements de l'inventaire forestier



• L'inventaire par échantillonnage :

– Repose sur des lois statistiques

• Rappels sur la théorie de l'échantillonnage aléatoire simple



A RETENIR : L'erreur d'échantillonnage et le seuil de confiance sont deux choses différentes.

Ex ci-contre : au seuil de confiance 5%, si je répète 100 fois la procédure d'échantillonnage, la moyenne estimée tombera 95 fois dans le domaine entre les droites bleues (cf. à gauche). Ce domaine est de largeur égale à deux fois l'erreur absolue, qui rend compte de la dispersion autour de la moyenne.

En pratique, on fixe un seuil de confiance α entre 0 et 10%, 5% dans la plupart des cas.



19

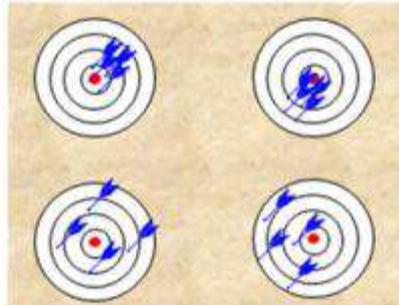
1. Les fondements de l'inventaire forestier



- L'inventaire par échantillonnage :

- Repose sur des lois statistiques
 - Pour résumer sur la précision et fiabilité des résultats

Faible dispersion
(= bonne précision)



Forte dispersion
(= faible précision)

Erreur aléatoire
(= pas de biais)

Erreur systématique (= biais)



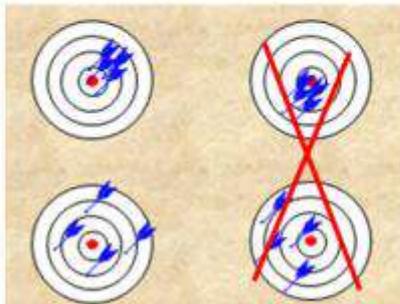
20

1. Les fondements de l'inventaire forestier



- L'inventaire par échantillonnage :

- Repose sur des lois statistiques
 - Permettant de calculer la précision et la fiabilité des résultats



Dans un monde idéal, on voudrait une estimation **la plus précise possible**. Comme on le verra plus tard, on devrait améliorer la précision en augmentant la taille de l'échantillon...

On voudrait aussi **ne pas avoir de biais** dans les estimations.



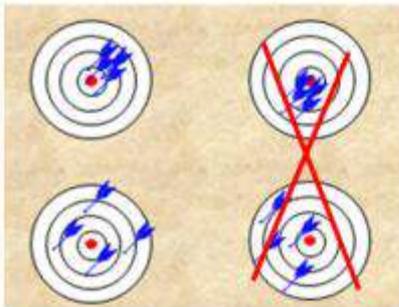
21

1. Les fondements de l'inventaire forestier



• L'inventaire par échantillonnage :

- Repose sur des lois statistiques
 - Permettant de calculer la précision et la fiabilité des résultats



... dans le cadre d'un inventaire forestier :

- Citer des sources d'erreur aléatoire ?
- Citer des sources d'erreur systématique ?
- Erreurs aléatoires : erreur d'échantillonnage (ER / EA), mauvaise lecture d'un instrument de mesure, prise de note erronée...
- Erreurs systématiques : instrument mal réglé, échantillonnage non représentatif



22

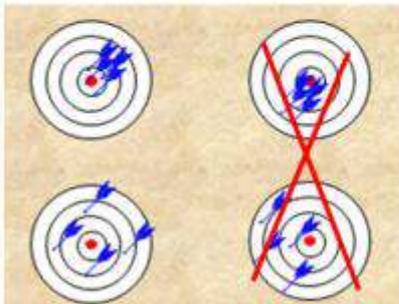
1. Les fondements de l'inventaire forestier



• L'inventaire par échantillonnage :

- Repose sur des lois statistiques
 - Permettant de calculer la précision et la fiabilité des résultats

Aléatoire ou systématique ?



- « Mon échantillon est trop petit ! »
- « Mon ruban diamétrique en caoutchouc est distendu à cause de la chaleur ! »
- « Mon opérateur a un problème de vue ! »
- « Mon GPS est précis à 5 m en terrain ouvert »

Réponses :

- aléatoire (erreur d'échantillonnage)
- systématique (correction: étalonnage / remplacement)
- potentiellement, les 2 ! Si erreur constante (ex: pb de parallaxe) = systématique, sinon aléatoire.
- aléatoire (correction : GPS différentiel... rarement utilisé !)



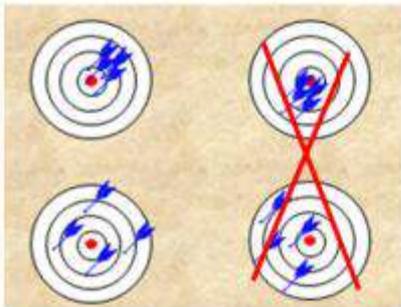
23

1. Les fondements de l'inventaire forestier



• L'inventaire par échantillonnage :

- Repose sur des lois statistiques
 - Moralité : on agit sur les sources d'erreur aléatoire/systématique maîtrisables !



- On établit un plan d'échantillonnage le plus rigoureux possible pour limiter l'erreur d'échantillonnage
- On forme les opérateurs à la mesure de données
- ... ET à la prise de note
- ... ET au recopiage des données
- On utilise un matériel étalonné. Si on constate un problème de matériel : on le reporte au coordinateur.
- On s'assure que les opérateurs ont une bonne vue ! (al./syst.)



24

1. Les fondements de l'inventaire forestier

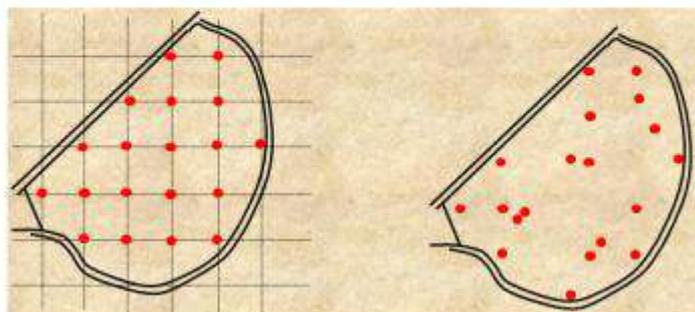


• L'inventaire par échantillonnage :

- Le choix du plan d'échantillonnage

Aléatoire systématique

Aléatoire strict



Maillage carré ou rectangulaire (distances à parcourir moindres)

Peu utilisé

L'important c'est de ne pas choisir la placette sur le terrain en fonction du contexte local

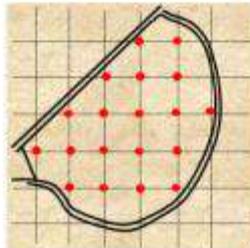


25

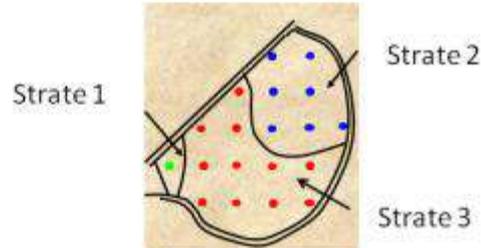
1. Les fondements de l'inventaire forestier

- L'inventaire par échantillonnage :
 - Le choix du plan d'échantillonnage : la stratification

AS simple



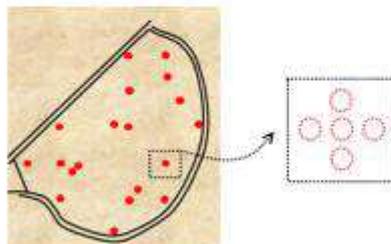
AS stratifié



26

1. Les fondements de l'inventaire forestier

- L'inventaire par échantillonnage :
 - Le sondage aléatoire en grappes
 - Une alternative pour les zones d'accès difficile



Une grappe est une unité de sondage qui est un groupe d'unités plus petites (*unités de relevés*). Ces UR ne sont pas des unités statistiques.

- Le sondage par sentiers (ou transects) [non développé ici]
 - Utiliser notamment pour étudier la dynamique des populations d'arbres précieux en forêt tropicale humide (on ne s'intéresse qu'à une poignée d'espèces commerciales - voir *Bibliographie*).



27

1. Les fondements de l'inventaire forestier



• L'inventaire par échantillonnage :

– Le nombre de placettes à échantillonner

- On détermine rigoureusement le nombre de placettes
- On fixe une erreur tolérée « ex-ante ». Par exemple: 10% d'erreur toléré sur l'estimation du diamètre moyen
- On utilise un CV déterminé lors d'un pré-inventaire ou lors d'un inventaire précédent dans des conditions similaires, ou pris dans la littérature (dans cet ordre de choix)
- On fixe un seuil de confiance : 5% par exemple (pour fixer t)

$$ER = \frac{EA}{m^*} = \frac{t\sigma^*}{\sqrt{nm}} = CV^* \cdot \frac{t}{\sqrt{n}}$$

$$n = \frac{CV^2 t^2}{ER^2}$$

Erreur / CV*	35%	40%	50%
5%	196	256	400
10%	49	64	100
15%	22	28	44



28

1. Les fondements de l'inventaire forestier



• L'inventaire par échantillonnage :

– Le nombre de placettes à échantillonner

- En forêt dense humide :
 - Vtot (toutes essences, $d_{bh} > 10cm$) : 60-80 %
 - Vtot (toutes essences, $d_{bh} > 60cm$) : 100-150 %
 - Vtot (essence abondante – $N > 2$ arbres/ha, $d_{bh} > 60cm$) : 150 – 200%
 - Vtot (essence peu abondante – $N < 1$ arbre/ha, $d_{bh} > 60cm$) : 250 %
- Formations forestières sèches
 - Jachères : 90 – 110 %
 - Forêt claire et savane arborée : 40- 70%
 - Savane arborée : 50 – 90 %

$$n = \frac{CV^2 t^2}{ER^2}$$

Ainsi, plus la précision souhaitée est élevée, plus il faudra faire de placettes...
logique non ?

Idem si la grandeur étudiée est très variable au sein d'une formation végétale



29

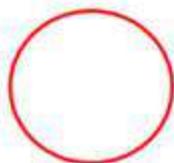
1. Les fondements de l'inventaire forestier



• L'inventaire par échantillonnage :

– La forme des placettes

- Il n'y a pas vraiment de règle en général, le critère principal étant la facilité d'implantation des placettes qui varie avec l'expérience et le contexte.
- Il y a surtout des recommandations pratiques issues de l'expérience (cf. Bibliographie)
- Les placettes carrées ou rectangulaires ne nécessitent pas de compétences techniques particulières.
- Les placettes circulaires sont plus faciles à implanter mais nécessitent un peu de pratique. Les arbres limites sont plus clairement identifiés.



Sierra Terra

30

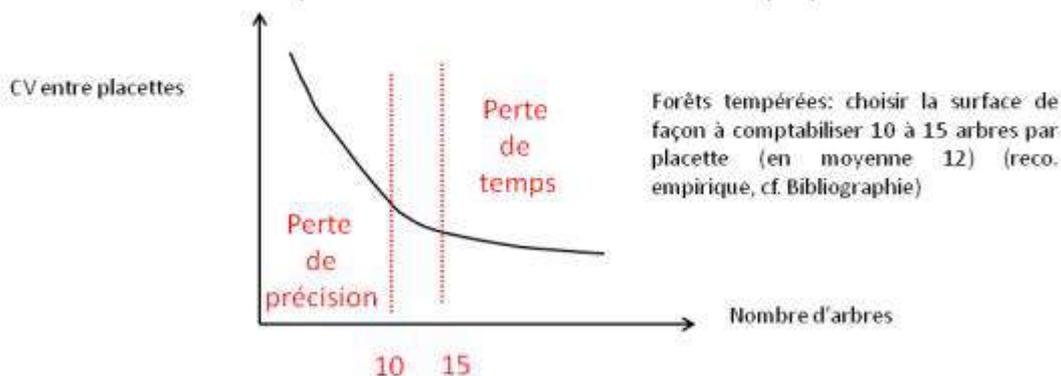
1. Les fondements de l'inventaire forestier



• L'inventaire par échantillonnage :

– La taille des placettes :

- On admet généralement que le CV* est lié à la surface de l'unité de sondage
- La taille des placettes est souvent fixée de manière empirique



En forêt dense humide, pour les inventaires d'aménagement, la recommandation générale est d'adopter des placettes de 0,5 ha de côté 10 ou 25m, disposées sur des rayons parallèle, plus faciles à matérialiser que des placettes circulaires.

Sierra Terra

31

REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE
Union - Discipline - Travail



MINISTRE DE L'ENVIRONNEMENT DE LA SALUBRITÉ
URBAINE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE



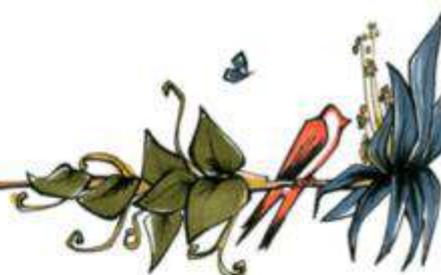
Pilote de système MRV pour l'approvisionnement en cacao zéro-déforestation

*Approche HCS – principes et méthodes, cas
de GAR/SMART en Indonésie*

Jérôme MAURICE, ingénieur forestier SalvaTerra

SOMMAIRE

1. Les bases de l'approche High Carbon Stock
2. Cas concret : application en Indonésie (GAR/SMART)
3. Limites et discussion



2. Application GAR/SMART

GREENPEACE

tft

gar
agribusiness and food



- Les premiers essais concrets ont démarré sous l'impulsion de Greenpeace et The Forest Trust sur l'île de Kalimantan, en Indonésie, dans les concessions de la compagnie Golden Agri Resources Limited (GAR) et sa filiale PT SMART Tbk (SMART), productrices d'huile de palme. Ce chapitre résume l'étude menée en 2012.



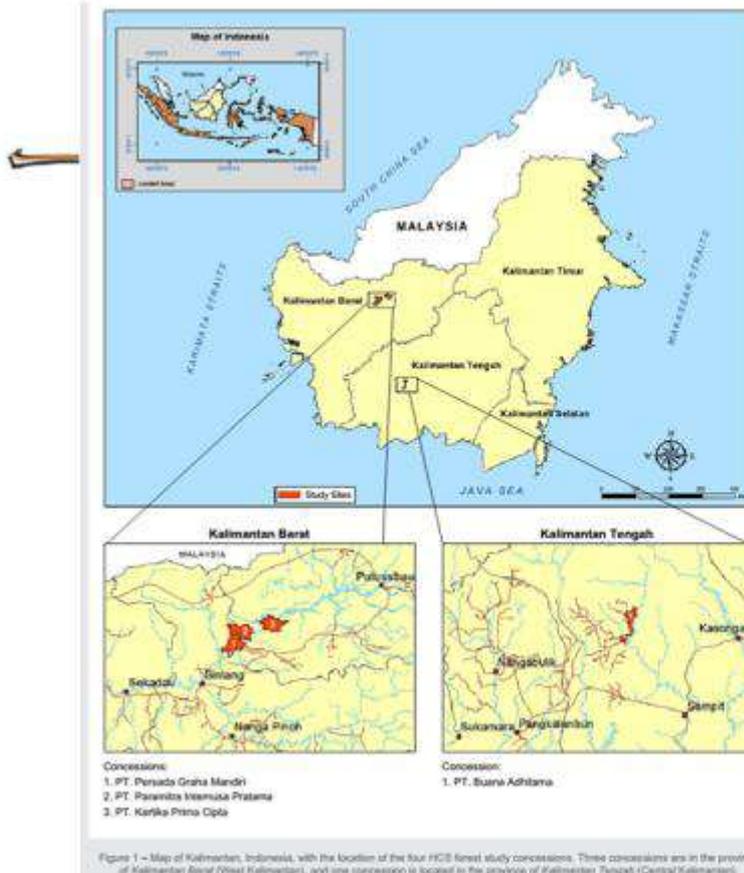
SoloTerra

HIGH CARBON STOCK FOREST STUDY REPORT

Defining and identifying high carbon stock forest areas for possible conservation

Published by Golden Agri-Resources and SMART
June 2012
In collaboration with The Forest Trust and Greenpeace

14

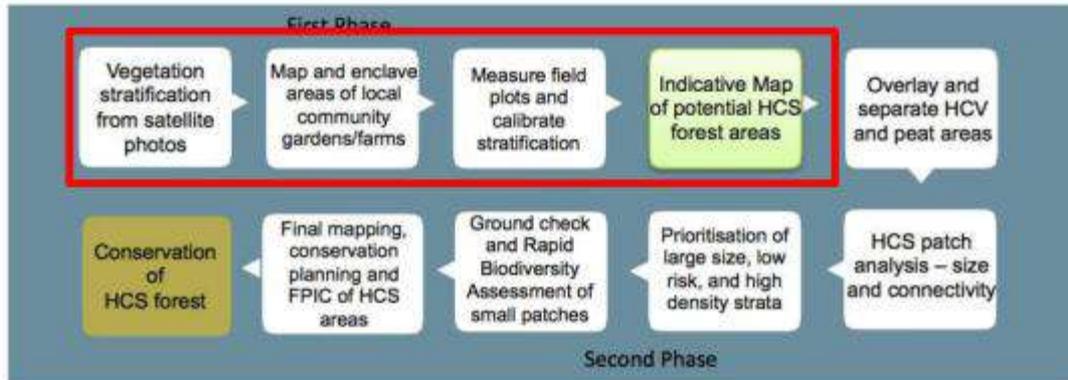


- Le site d'étude: 4 concessions sur l'île de Kalimantan

15

2. Application GAR/SMART

HCS Approach – Summary of steps



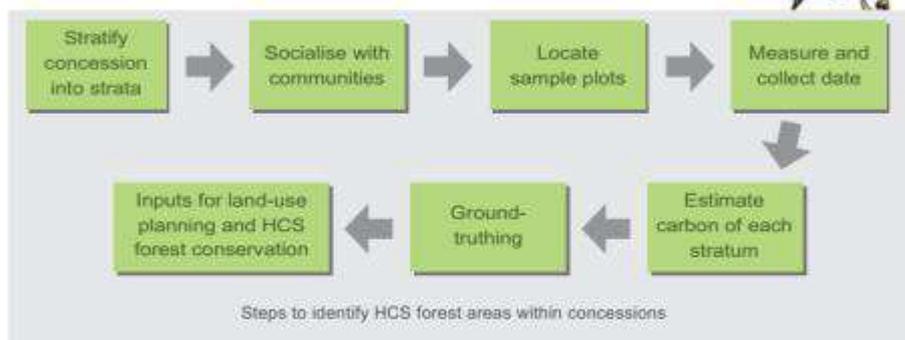
Zonage « HCS », première phase du zonage « HCS+ » (GAR/SMART, 2012)

La seconde phase inclue notamment la « Socialisation » de l'approche



16

2. Application GAR/SMART



Zonage « HCS », première phase du zonage « HCS+ » (GAR/SMART, 2012)



17

2. Application GAR/SMART



- Cartographie wall-to-wall de l'utilisation des terres :

- à partir d'images Landsat (30m) + SPOT 4 (20 m) + SPOT 5 (10 m)
 - Interprétation visuelle préférée aux classifications non-supervisées :
 - L'histoire ne dit pas combien de temps cette étape a duré ! Ni pourquoi les techniques de classification non-supervisée n'ont pas été testées...
 - d'abord 16 classes d'utilisation des terres...
 - ramenées à 6 classes d'utilisation des terres : forêt dense, forêt moyennement dense, forêt faiblement dense, formations arbustives anciennes, formations arbustives récentes, terres ouvertes et défrichées.
- Recommandation générale pour la zone tropicale : ne pas dépasser 6 classes de végétation (travaux similaires réalisés au Libéria) dans la stratification HCS



18

High Density Forest: HK3



19

Medium Density Forest: HK2



20

Low Density Forest: HK1



21

Old Scrub: BT



22

Young Scrub: BM



23

Cleared/Open Land: LT



2. Application GAR/SMART

• Inventaire stratifié par échantillonnage

- dans la population d'arbres de $d_{bh} > 5\text{ cm}$ (diamètre à hauteur de poitrine)
 - Forme des placettes : rectangulaires
- taille de l'échantillon : 431 placettes (CV = 45% - e = 5%) [voir présentation 2]
 - Avec une intensité d'échantillonnage plus élevée dans les strates intermédiaires
- distribution:
 - (a) transect (1 concession)
 - (b) aléatoire (3 concessions)
- unités d'échantillonnage à deux degrés :
 - 20 m x 50 m = inventaire des arbres de $d_{bh} > 20\text{ cm}$
 - Sous-placette de 10 m x 10 m = inventaire des arbres de $d_{bh} > 5\text{ cm}$ [voir présentation 2]
- mesure des arbres de $d_{bh} < 5\text{ cm}$ a été écarté pour réduire le temps de collecte/analyse
 - avec l'hypothèse que la baisse de précision sur l'estimation des stocks de carbone aérien moyens (proxies) resterait acceptable

2. Application GAR/SMART



• Inventaire stratifié par échantillonnage

Table 2 – Total plots visited in each of the four concessions under each stratum

Strata	Concession				Total
	PT Buana Adhitama	PT Kartika Prima Cipta	PT Persada Graha Mandiri	PT Paramitra Internusa Pratama	
High Density Forest (HK3)	3	9	0	0	12
Medium Density Forest (HK2)	4	5	1	0	10
Low Density Forest (HK1)	29	19	8	13	69
Old Scrub (BT)	39	39	2	13	93
Young Scrub (BM)	20	62	0	9	91
Cleared/Open Land (LT)	10	97	0	24	131
Plantation	0	23	0	2	25
Total	105	254	11	61	431

Au final, 317 points ont été exploités sur les 431 prévus... notamment car de nombreux points présentant une utilisation des terres différente que celle vue sur les images (trop anciennes)



26

2. Application GAR/SMART



• Inventaire stratifié par échantillonnage



Figure 3 – Schematic of the plot design used during the field inventory

- Chaque arbre est numéroté (plaquette d'indentification), pour un éventuel contrôle *a posteriori*. On relève son d_{bh} et son espèce.
- La structure de la végétation est décrite succinctement.
- Le type de sol est décrit visuellement.
- 5 photos sont prises: N/S/E/O et en direction du ciel.



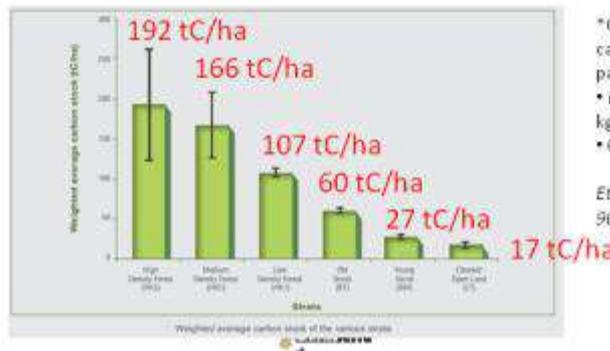
28

2. Application GAR/SMART



• Estimation des stocks de carbone aériens moyens (proxies):

- En utilisant une équation allométrique à une entrée*...
 - Brown, 1997 - $Biomass = 42.69 - 12.800 \cdot DBH + 1.242 \cdot DBH^2$
- ... spécifique aux forêts du sud-est asiatiques.
 - En fait, c'est une équation générale, non-spécifique aux forêts de Kalimantan mais intégrant ce type de forêts à Diptérocarpacées.



*Conversion en stocks de carbone en utilisant les données par défaut du GIEC pour l'Asie :
 • masse volumique = 600 kg/tonne de matière sèche (tms)
 • 0.47 tC/tms

Et un niveau de confiance de 90% sur les estimations

29

2. Application GAR/SMART



• Estimation des stocks de carbone aériens moyen (proxies):

- Comparaison par ANOVA (analyse de la variance) et un test de comparaison multiples (paire à paire – test de Scheffe)
- Étant donné la proximité des stocks moyens (différences non significatives), certains regroupements pourraient être effectués:
 - Forêt dense + forêt moyennement dense
 - Formations arbustives récentes + terres ouvertes/défrichées



30

2. Application GAR/SMART



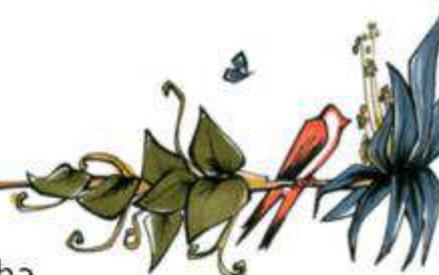
- Détermination du « seuil HCS » : 35 tC/ha

- De façon empirique (= à dire d'expert), en tenant compte de plusieurs paramètres :
 - La conversion de formations arbustives et de prairies en palmeraies génère une « dette carbone » dès lors que ces formations présentent un stock de carbone supérieur à 40 tC/ha.
 - Au cours d'une rotation de 25 ans, une plantation de palmier à huile stockerait en moyenne environ 35 tC/ha.
- Avec un seuil fixé à 35 tC/ha, on s'assure, en théorie du moins, que toute nouvelle conversion de terres en palmeraie ne générera pas de « dette carbone ».
- En pratique, l'âge d'exploitabilité peut varier (en fonction des variétés par exemple, ou des pratiques locales) donc le stock final également... mais on réalise un compromis.

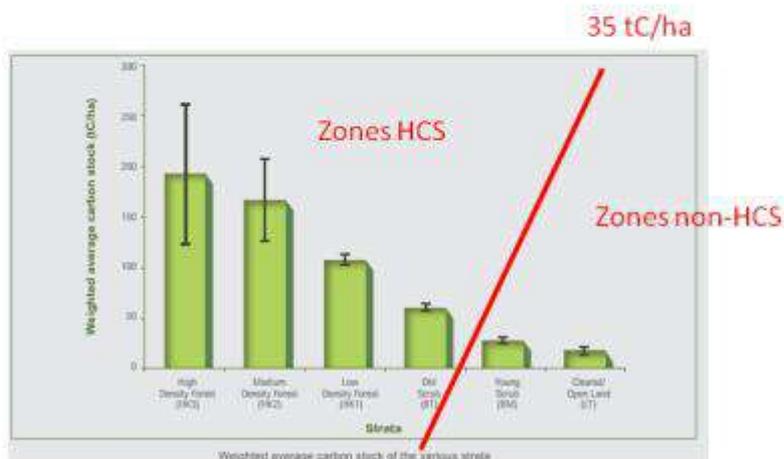


31

2. Application GAR/SMART



- Détermination du « seuil HCS » : 35 tC/ha



32

Bibliographie

- 2D CONSULTING AFRIQUE (2015). *Land-use Survey of the Yaoure Gold Project Yaoure Gold Project*, Côte d'Ivoire. 27p. (rapport non publié)
- ANDRIEU, J. & MERING, C. (2007). *Cartographie par télédétection des changements de la couverture végétale sur la bande littorale ouest-africaine : exemple des rivières du sud du delta du Saloum (Sénégal) au rio Gêba (Guinée-Bissau)*. Pôle Image de l'Université Paris Diderot – Paris 7.
- BAFETEGUE KONE, B. (2007). *Utilisation des données Lidar pour la caractérisation des grandes cultures*. Faculté de foresterie et géomatique, Université Laval, Québec.
- BROWN, S. (1997). *Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer*. FAO Forestry Paper n°134. Rome, Italie.
- CENTRE TECHNIQUE DE LA FORET TROPICALE (1989). *Le mémento du forestier, "techniques rurales en Afrique"*, 3^{ème} édition. Ministère de la coopération et du développement. Paris, France.
- CONGALTON, R. G., & GREEN, K., 2009. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*(second edition). CRC press.
- DEDJO, Y.S. (2014). *Cartographie de la dynamique spatiale des ressources forestières et tendance évolutive dans l'ancienne boucle du cacao (sud-est de la Côte d'Ivoire) : Apport de la Télédétection et des SIG*. Master 2. UFR STRM (CURAT), Université Félix Houphouët Boigny. 63p.
- ESCOBAR ACEVEDO, C.J. (2004). *El cultivo del caucho (Hevea brasiliensis muell.) con enfoque agroforestal Programa nacional de transferencia Educativa PRONATTA*. Florencia, Caquetá, Colombia.
- FERANEC, J. et al. (2006). *CORINE Land Cover Technical Guide-Addendum 2006*. EEA, Copenhagen.
- HAKDAOUL, M. (2005). *Traitement des données Landsat sous ERDAS*. Faculté des Sciences Casa II, Centre Régional Africain des Science des Sciences et Technologies de l'Espace.
- IPCC (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Chapter 4: Forest Land, Volume 4, Agriculture, Forestry and Other Land Use. Publié par IGES, Japon.
- KOFFI, I. (2014). *Caractérisation et dynamique spatiale des exploitations agricoles dans l'ancienne boucle du cacao, département d'Abengourou (sud-est de la Côte d'Ivoire) : Apport de la Télédétection et des SIG*. Master 2. UFR STRM (CURAT), Université Félix Houphouët Boigny. 77p.
- KOUAME, N'D.P. (2013). *Apport de la télédétection et de l'imagerie satellitaire a la détection précoce de la cacao-culture sous couvert forestier dans une aire protégée soumise à des pressions anthropiques : cas du parc national du mont samgbe a l'ouest de la Cote-d'Ivoire*. Master 2. UFR STRM (CURAT), Université Félix Houphouët Boigny. 58p.
- MAFHOUD, I. (2009). *Cartographie et mesure de la biodiversité du Mont Ventoux. Approche par Système d'Information Géographique et Télédétection, préconisations méthodologiques et application pour l'aménagement forestier*. Ecology, environment. Université d'Avignon.
- MATHER, P. & KOCH, M. (2011). *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*.
- N'DA DIBI, H. (2007). *Etude et suivi par télédétection et système d'information géographique d'une aire protégée soumise aux pressions anthropiques*. Thèse Unique de Doctorat UFR. STRM (CURAT), Université de Cocody. 139p.
- N'DA DIBI, H. et al (2008). *Apport de la télédétection au suivi de la Déforestation dans le Parc National de la Marahoué (Côte d'Ivoire)*. Télédétection, vol. 8, n° 1, pp. 17-34.
- N'DOUME, C. et al. (2002). *Cartographie statistique d'inventaire des vergers café et cacao par télédétection satellitaire* (<http://agritrop.cirad.fr/489397/>)
- RNCAN, (2015). *La transformation des images*. Site web consulté en mars 2016 : <http://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/geomatique/imagerie-satellitaire-photos-aeriennes/imagerie-satellitaire-produits/ressources-educatives/9378>
- SOMMARRIBA, E. et al. (2013). *Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America*. Agriculture, Ecosystems and Environment n°173, pp. 46 à 57.
- WILEY J., et al (1999). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An introduction*. Springer, 363 p.



Avril 2016

SAS SalvaTerra

6 rue de Panama

75018 Paris | France

Tel : +33 (0)6 66 49 95 31

Email : info@salvaterra.fr

Skype : o.bouyer.salvaterra

Web : www.salvaterra.fr

