

L'imagerie spatiale pour la mise à jour cartographique en Afrique : un cas d'étude en Guinée-Conakry

Nicolas Baghdadi, Anne Bourguignon, Christine King, Jean Desprats, Cédric Parent, Jean-Louis Feybesse

► **To cite this version:**

Nicolas Baghdadi, Anne Bourguignon, Christine King, Jean Desprats, Cédric Parent, et al.. L'imagerie spatiale pour la mise à jour cartographique en Afrique : un cas d'étude en Guinée-Conakry. Bulletin de la société française de photogrammétrie et de télédétection, 2001. hal-02924031

HAL Id: hal-02924031

<https://hal.inrae.fr/hal-02924031>

Submitted on 27 Aug 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'IMAGERIE SPATIALE POUR LA MISE A JOUR CARTOGRAPHIQUE EN AFRIQUE : UN CAS D'ETUDE EN GUINEE-CONAKRY

Nicolas BAGHDADI, Anne BOURGUIGNON, Christine KING, Jean François DESPRATS,
Cédric PARENT & Jean Louis FEYBESSE

BRGM, Bureau de Recherche en Géologie Minière
3 avenue C. Guillemin, B.P. 6009 - 45060 Orléans cedex 2, France
Tél. +33 2 38 64 32 02 - Fax +33 2 38 64 36 89

Résumé

Cet article présente les résultats d'une étude sur le potentiel de différents capteurs, radar et optique, et leurs complémentarité pour la cartographie de l'occupation du sol et la mise à jour des cartes géographiques en Afrique de l'ouest. Des images acquises par SIR-C, ERS et SPOT ont été analysées. Les résultats montrent que des données RSO en bande L sont plus appropriées que celles en bande C pour discriminer les divers objets cartographiques étudiés. Cependant, de meilleurs résultats ont été obtenus dans le cas d'une approche utilisant des données RSO multi date et particulièrement en combinant une image de saison sèche avec une image de saison des pluies. Les images ERS se sont avérées inadéquates pour la cartographie. Les résultats obtenus à partir de l'image SPOT acquise pendant la saison sèche montrent la nécessité de données multi date pour une bonne mise à jour cartographique. Comme il est souvent difficile d'obtenir des images optiques pendant la saison de pluies, les capteurs radars en bande L et en multi-polarisation peuvent être la solution optimale. La complémentarité entre données optique et radar permet d'améliorer les résultats de la cartographie.

Mots-clés : Cartographie, Imagerie Satellitaire, SPOT, ERS, SIR-C, Afrique, Guinée.

Abstract : *Spatial imagery for updating geographical maps in Africa : A case study in Guinea-Conakry*

This paper shows the potential of various sensors, optical and radar, and their complementarity for land use mapping and the possibility for updating geographical maps in West Africa. Images acquired by SIR-C, ERS and SPOT were analyzed. The assessment of the information content on the one hand of optical and SAR data, considered separately, and on the other hand of a set of optical and SAR data were investigated. These investigation demonstrate that SAR L-band is better suited for discriminating various classes than C-band. Better results were obtained in the case of a multitemporal SAR approach and especially when combining dry season and rainy season. ERS images were found inappropriate for mapping. For a good updating of geographic maps, multi date images are necessary. As it is often difficult to obtain optical images during the rainy season, the radar sensors in L-Band and in multi-polarization can be the optimum solution. The combined use of optical and radar data allows an improvement of the mapping result.

Keywords : Mapping, Satellite imagery, SPOT, ERS, SIR-C, Africa, Guinea.

1. Introduction

Comparativement aux continents à fort taux de croissance comme l'Asie et l'Amérique latine, on constate en Afrique un désengagement assez général des forces d'investissement et de développement depuis plus d'une dizaine d'années. Or, le continent africain a de solides potentialités géologiques unanimement reconnues pour la mine (la zone hors Afrique du sud représentant 8% de la production de minière mondiale), l'eau, et la forêt. Il est donc essentiel de mettre les Sciences de la Terre au service du cadre de vie et du développement de ce continent, ce qui constitue l'un des défis majeurs de ce début de siècle. La connaissance de l'infrastructure géologique est cruciale pour la mise en valeur des ressources minérales du continent.

L'importance stratégique de certains thèmes géographiques comme par exemple les ressources en eau, les ressources minières, les agglomérations et les infrastructures, ainsi que l'évolution rapide en fonction du temps de certains d'entre eux, pourraient tirer partie du développement d'un outil de mise à jour cartographique. En effet, toute modification de l'activité minière peut être à l'origine de modification rapide des populations et de

leurs infrastructures, avec pour conséquence immédiate des modifications dans les besoins en eau et les espaces agricoles.

Depuis plusieurs années, l'imagerie optique est largement utilisée pour la cartographie de l'occupation du sol, l'aménagement et la prospective. Sa grande efficacité réside essentiellement dans la diversité de ses mesures spectrales. Toutefois, sa capacité à acquérir des images est extrêmement dépendante de la couverture nuageuse ce qui rend difficile l'acquisition d'images optiques dans certaines régions ou pendant la saison hivernale. Quant au signal radar, il est fortement influencé par les caractéristiques de la surface imagée, en particulier la rugosité et l'humidité (Ulaby et al., 1986). Les données radar en bandes C, X et L sont insensibles aux aléas atmosphériques. Pour certaines applications (occupation du sol par exemple), l'utilisation des capteurs radars actuellement opérationnels est limitée par leurs caractéristiques mono bande, i.e. une seule bande fréquentielle et une seule polarisation (Baghdadi et al., 2000 ; Hess et al., 1995 ; etc.).

De nombreuses études d'évaluation de l'emploi d'images satellitaires radar et optique pour la cartographie de l'occupation du sol ont été effectuées

sur tous les continents. En Afrique de l'ouest par exemple, des données optiques ont été comparées à des données RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture). Il est apparu que l'identification des classes d'utilisation du sol à partir d'une image RSO mono date n'est pas satisfaisante. De meilleurs résultats furent obtenus dans le cas d'une étude RSO multi date, particulièrement en combinant données optiques de saison sèche et données radar de saison des pluies (Dallemand et al., 1993 ; King et al., 1993).

On propose dans le cadre de ce projet d'évaluer le potentiel des images SPOT, ERS et SIR-C, et leur complémentarité en matière de cartographie. Une zone d'étude située en Guinée-Conakry a été choisie. Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet MAJOR (Mise à jour optique/radar), ayant comme objectif la mise à jour des cartes géographiques par l'utilisation de données satellitaires radar et optique. Outre le fait de fournir une donnée géographique à jour, ce travail permettra d'évaluer la qualité de cette donnée et de définir dans quelles conditions la méthodologie de mise à jour est généralisable.

2. Site d'étude

Le site d'étude se situe en zone équatoriale, dans le nord-est de la Guinée-Conakry (Figure 1). Il s'agit du bassin sédimentaire de Siguiiri, à la frontière Mali/Guinée (longitude : 8.5° à 10° W, latitude : 11° à 12° N). Ce site a été choisi pour son intérêt géographique (zone frontière avec le Mali), pour bénéficier des connaissances des équipes du BRGM (Bureau de Recherche en Géologie Minière) ayant travaillé en Guinée, et enfin grâce à la possibilité de mettre à jour une grande variété de thèmes géographiques. C'est une région à morphologie peu contrastée (paysage de plaines et de collines) avec une altitude moyenne de 400 m sur l'ensemble du secteur. La couverture végétale est essentiellement de type savane (arbustive ou herbeuse) avec quelques régions boisées clairsemées et des forêts-galeries le long des cours d'eau. Le climat est de type soudanien avec une saison de pluies de juin à octobre (1500 mm par an en moyenne répartis sur trois mois). La saison sèche, la plus longue, s'étend sur sept mois.



Figure 1 : Le site d'étude se situe en zone équatoriale, dans le nord-est de la Guinée-Conakry.

Le réseau hydrographique est caractérisé par des fleuves à régimes permanents (le Niger) et des cours d'eau à régime temporaire (les rivières Tinkisso, Milo et Ntankan), à sec lors de la saison sèche. En saison de pluies, les cours d'eau transportent de nombreux débris (alluvions) qui se déposent sur les bords et servent à l'agriculture. Ces sols très fertiles permettent le développement de nombreuses cultures tels que le mil, le maïs et le sorgho alors que les bassins d'inondation constituent un lieu privilégié pour la riziculture.

On distingue plusieurs types de sols : les sols ferrugineux, les sols argilo-limoneux, les sols des plaines alluviales et des bas-fonds ainsi que les « bowal » qui sont des cuirasses ferrugineuses impropres à la culture. Notons également, la richesse de cette région en matière d'or et de diamant.

3. Données utilisées

Pour cette étude, nous disposons d'images spatiales acquises par différents capteurs optique et radar (Tableau 1), des données terrain (points GPS, photos) ainsi que des cartes topographiques (cartes JOG de 1966 au 1:250,000), géologiques, et minérales.

Capteur	Date	Caractéristiques
ERS	Août 1993, Août 1994 et Juin 1997	Bande C, polarisation VV, incidence 23°
SIR-C	Avril et Octobre 1994	Bandes C et L, HH et HV, 37°
SPOT XS	Mars 1998 (saison sèche)	3 canaux : vert, rouge, proche infrarouge

Tableau 1 : Caractéristiques des images spatiales utilisées dans cette étude.

Une image SPOT, trois images ERS et deux images SIR-C ont été utilisées dans le cadre de ce projet. L'image SPOT correspond à la fin de la saison sèche, les images ERS à la fin de la saison sèche et au début de la saison de pluies (de juin à août) alors que les images SIR-C ont été acquises pendant les deux saisons (avril et octobre).

Une campagne de terrain a été réalisée par le BRGM entre le 20 et le 31 mars 2000 dans les régions de Siguiiri et de Kankan. Lors de cette campagne, nous avons utilisé un GPS portatif, une sortie papier des images satellitaires, et des cartes topographiques.

Les différents objets présents sur la zone d'étude sont :

- Réseaux hydrographiques caractérisés par des fleuves à régime permanent et de nombreux cours d'eau à régime temporaire qui sont souvent à sec lors de la saison sèche. Des forêts-galeries bordent le réseau hydrographique permanent.
- Sable, présent seulement en saison sèche et localisé dans le lit du fleuve (le Niger).
- Forêts composées d'arbres et d'une végétation de type brousse.
- Savane arborée représentée par une végétation de type brousse avec quelques arbres dispersés.
- Zones agricoles qui se trouvent au bord des fleuves (alluvions) ou bien à l'intérieur des terres suite à des coupes dans la forêt (clairières).
- Agglomérations (concessions, villages, villes). Les villages qui sont en général de petite taille sont constitués de murs en terre surmontés d'un toit en paille

ou en taule (de forme circulaire ou rectangulaire). Les villages se situent presque exclusivement le long des voies d'accès (routes, fleuves).

- Infrastructures routières (pistes et routes). Les routes présentes sur le site d'étude ne sont pas goudronnées et sont réalisées à l'aide des matériaux du site.

- Objets miniers (orpaillages sauvages), dont on pourrait espérer que l'aire-enveloppe (la surface englobant tous les orpaillages) puisse représenter une carte des aires à potentiel minier.

- Cuirasses qui correspondent à des croûtes ferrugineuses résultant d'une importante accumulation d'oxyde de fer. La dénomination de la classe cuirasse latéritique n'inclura que les zones de cuirasse sans recouvrement végétal.

Certaines formations superficielles, et notamment les régoïlithes, sont classiquement des objets mal ou non inventoriés et qui représentent pourtant un double enjeu :

- potentiel de stockage d'eau par effet de « château d'eau »
- obstacles à la trafficabilité si la surface n'a pas atteint le stade de cuirasse latéritique.

Ces formations sont difficilement détectables par imagerie optique mais aisément différenciables sur l'imagerie radar du fait de leur organisation géomorphologique typique (Figure 2).

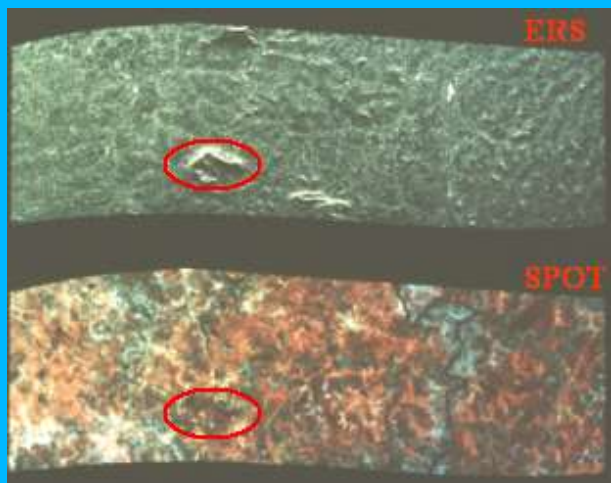


Figure 2 : Exemple illustrant la détectabilité par ERS et non par SPOT des régoïlithes sur le bassin de Siguiri (frontière Mali/Guinée).

Les cuirasses constituent la partie sommitale du profil d'altération (cf. Figure 3). Il s'agit d'un horizon cuirassé de 1 à 5 m d'épaisseur qui se développe par une importante accumulation d'oxydes de fer, au dépens de la kaolinite issue de l'altération des roches sous-jacentes. A son sommet la cuirasse présente une couche d'aspect « conglomératique » constituée de nodules ou pisolites souvent utilisés comme matériau pour charger la bande roulante des pistes. Outre un intérêt pour la gestion des ressources en eau évoquée ci-dessous, la détection des cuirasses latéritiques représente un enjeu pour les opérateurs miniers. En effet, sous ces climats, une bonne connaissance de la répartition des cuirasses est un atout important dans

l'établissement d'un plan d'exploration géochimique (stratégique ou tactique), sa réalisation et son interprétation.

Près de 200 sites ont été visités pendant notre campagne terrain. Pour chaque site, la caractérisation de l'état de surface (type de sol, couverture végétale) a été réalisée. La localisation des sites a été obtenue par le GPS à 20 m près. La Figure 4 montre les principaux objets présents sur notre zone d'étude.

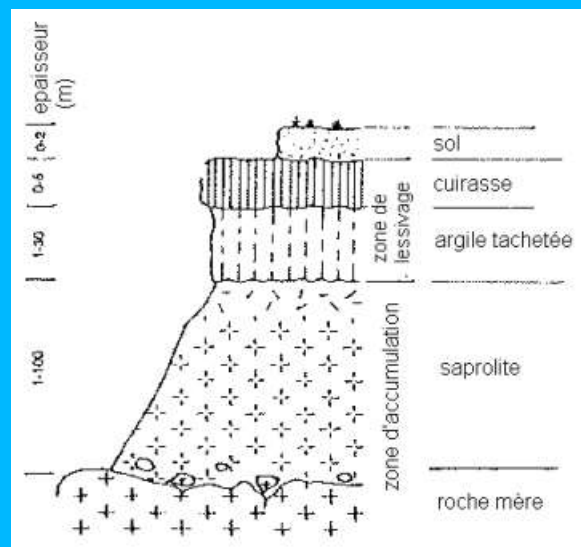


Figure 3 : Profil latéritique type adapté de Millot (1964).

4. Prétraitement des images satellitaires

La première étape consiste à réaliser divers prétraitements afin de rendre les images satellitaires exploitables pour l'analyse thématique. Dans un premier temps, les images radar ont été calibrées radiométriquement, en transformant l'amplitude du signal (compte numérique) en coefficient de rétrodiffusion (σ^0).

L'étape de géocodage des images radar qui consiste à corriger les déformations géométriques dues aux reliefs n'a pas été nécessaire dans notre zone. En effet, ce traitement lourd (nécessitant un MNT) peut être évité dans les régions à morphologie plane où les distorsions sont faibles, ce qui est le cas pour une grande partie de notre site d'étude.

Ensuite, les images ont été géoréférencées dans le système géodésique international WGS 84 à l'aide des points GPS relevés sur le terrain. Le manque de points remarquables (croisement de routes, ponts, etc.) sur la zone d'étude nous a obligé à prendre comme points d'appui les centres des petits villages. En effet, les villages forment les seules cibles de petite taille qui se distinguent aisément sur les images SIR-C (non détectables sur les images ERS et SPOT). Dans un premier temps, nous avons géoréférencé les images SIR-C et par la suite, toutes les autres images ont été géoréférencées par rapport à celles-ci. L'erreur de référencement ainsi obtenue est de l'ordre de 80 m. Elle est due d'une part aux erreurs de positionnement par GPS (donné à 20 m près) et d'autre part, à notre positionnement au milieu des villages, que ce soit sur le terrain ou sur les images. Les cartes topographiques existantes ont au moins 50 ans et seuls les cours d'eau et les villages sont facilement identifiables simultanément sur les cartes et les images. Les cours

d'eau ont été souvent tracés d'une façon approximative et de plus le lit des rivières et des fleuves a été modifié depuis la réalisation des cartes. Quant aux centres des villages, il est très difficile de les localiser avec précision (1mm sur la carte correspond à 250 m sur le terrain).

Enfin, les images radar ont été filtrées, en utilisant un filtre Gamma MAP avec une fenêtre glissante de 5 x 5, afin d'atténuer le chatoiement qui gêne l'interprétation des images. Il s'agit de supprimer le speckle tout en limitant la perte d'informations.



Figure 4 : Principaux Items rencontrés dans notre site d'étude (mars 2000/saison sèche).

5. Traitement des images

5.1. Interprétation visuelle des images SIR-C

L'interprétation visuelle des images s'est faite conjointement avec les photos issues de la campagne de terrain. Chaque photo prise lors de cette mission présente une description détaillée de la zone observée avec notamment le type de sol et le pourcentage de végétation associé. Différents critères ont permis de réaliser l'interprétation des images radar, notamment la radiométrie (teinte) et la texture des objets (la forme) ainsi que leur localisation géographique sur l'image.

La Figure 5a montre la composition colorée obtenue à partir de l'image SIR-C de saison sèche (rouge = LHH, vert = LHV et bleu = CHV). Sur cette image, les villages apparaissent avec une réponse très forte (couleur à dominance de jaune-orangé) due d'une part à l'effet de coin et d'autre part à la forte réflexion des toits. La forêt dense apparaît en vert clair. La réponse est également forte due à la diffusion multiple du couvert végétal. On visualise également les forêts-galeries qui ont des formes linéaires et possèdent une teinte très proche de la forêt dense. On distingue sur cette image deux types d'alluvions. Les alluvions rugueuses qui apparaissent avec une réponse forte (couleur rose) et correspondent

à des sols labourés et les alluvions lisses qui présentent une couleur noire tachetée de bleu sombre. Ces deux types d'alluvions sont localisés le long des cours d'eau et se distinguent très bien sur notre image dans le lit majeur du fleuve Niger. Les bancs de sable se visualisent aisément avec une couleur rouge caractéristique (n'existe qu'en saison sèche). Le fleuve apparaît avec des détours sinueux et une couleur noire avec quelques taches rouges par endroits. Cette image permet également de mettre en évidence des clairières qui servent pour l'agriculture. Ces clairières, qui sont en général de petites zones à l'intérieur des terres, apparaissent avec une couleur bleu-mauve. La savane arborée se visualise assez distinctement avec une couleur à dominance de vert foncé. Enfin, les cuirasses apparaissent de la même couleur que les alluvions lisses (noire avec des taches bleu sombre), cependant les critères de localisation et de formes permettent de faire la distinction entre ces deux objets. En effet, les cuirasses sont réparties majoritairement à l'intérieur des terres et ont des structures morphologiques particulières qui se distinguent très bien sur l'image.

Quant aux orpaillages, il est impossible de les détecter sur les images puisqu'ils se situent dans des zones forestières et sont donc cachés par le couvert végétal.

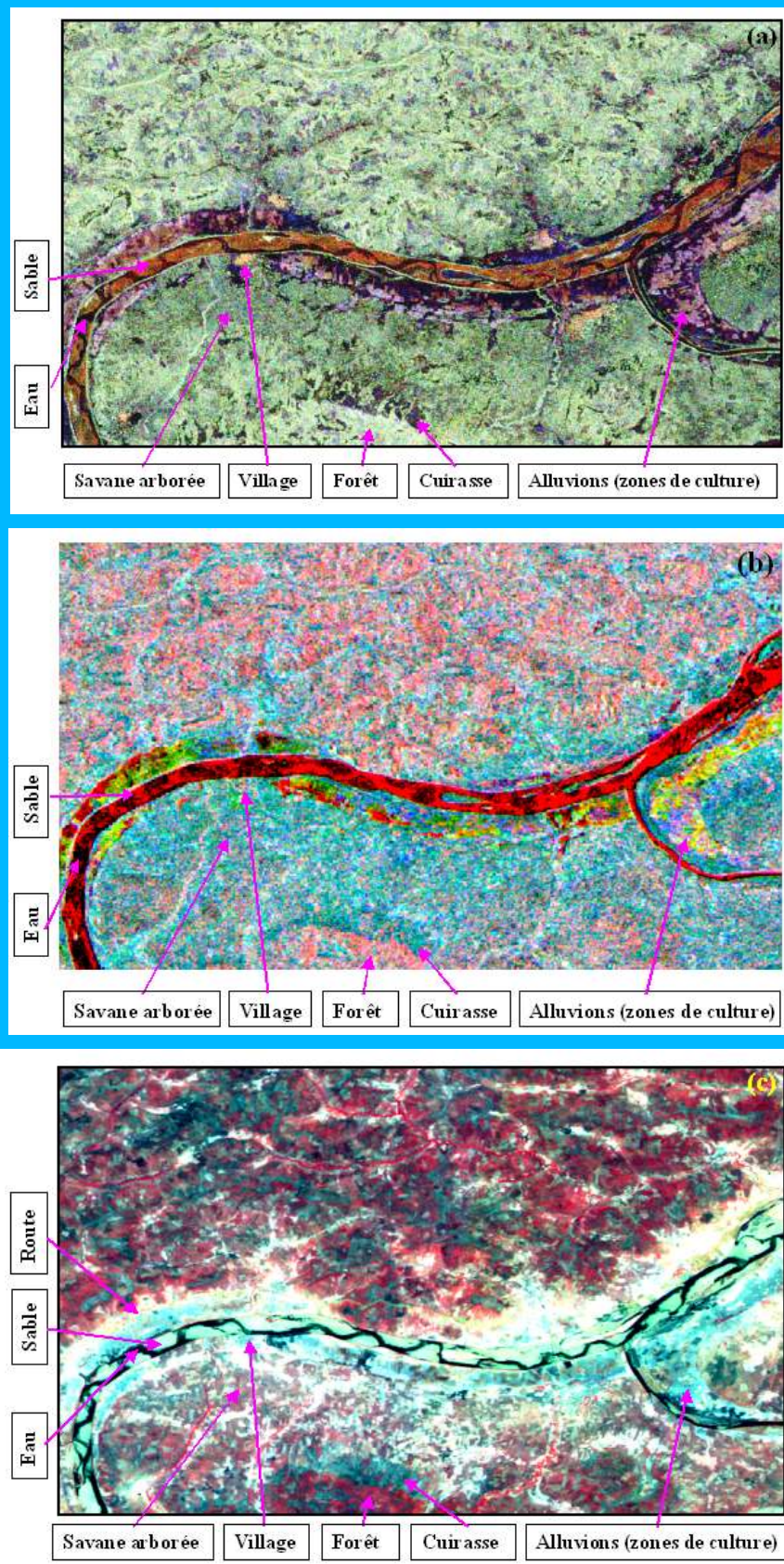


Figure 5 : (a) Image SIR-C acquise en avril 1994 avec LHH en rouge, LHV en vert et CHV en bleu. (b) Composition de trois images ERS avec celle du 08/06/1997 en rouge, celle du 20/08/1993 en vert et celle du 21/08/1994 en bleu. (c) Image SPOT acquise en mars 1998 avec le canal proche infrarouge en rouge, le canal rouge en vert et le canal vert en bleu. Le centre des images correspond à 9,3°W et 11,1°N. La taille des images est 18,3km (dimension horizontale) par 12,3km (dimension verticale).

5.2. Interprétation des images ERS

Les images ERS, à la différence des images SIR-C, ne possèdent qu'un seul canal (bande C et polarisation VV). La combinaison des images ERS acquises à différentes dates a été analysée pour étudier le potentiel de ce capteur: 8 juin 1997 en rouge, 20 août 1993 en vert et 21 août 1994 en bleu (Figure 5b). ERS est un des seuls satellites radar opérationnel à l'heure actuelle (avec Radarsat) pour une éventuelle mise à jour cartographique régulière.

Sur l'image multi date de ERS, on distingue la savane arborée, la forêt, l'eau et le sable. Quant aux autres objets (alluvions, cuirasses, villages, orpaillages), ils sont difficilement séparables ou même non détectables.

5.3. Interprétation de l'image SPOT

Une interprétation visuelle de l'image SPOT acquise en saison sèche a été réalisée. Un segment de l'image est montré sur la Figure 5c. Les zones en eau libre (fleuve par exemple) représentées par la teinte noir foncée sont bien distinctes. Le sable du fleuve dont l'extension est importante à la fin de la saison sèche apparaît sur l'image en bleu clair. Les teintes rougeâtres représentent les surfaces couvertes de végétation. Les forêts-galeries bordent le réseau hydrographique permanent et permettent ainsi de le détecter indirectement lorsque la largeur du cours d'eau est trop faible. En effet, l'interprétation visuelle des forêts-galeries est aisée compte tenu du fait que l'œil de l'observateur prend en compte en plus de la radiométrie le tracé linéaire de cette classe d'occupation du sol ce qui lui permet d'éliminer les confusions radiométriques avec la classe forêt. Les alluvions, cuirasses et clairières sont très semblables et apparaissent dans différentes teintes du bleu ou du vert. D'une façon générale, le contraste entre les classes sans couverture végétale est faible. Les brûlis qui représentent une pratique très largement utilisée par la population pour dégager des zones cultivables apparaissent sur les images en vert très sombre. Les routes détectées ne représentent que les voies de communications les plus importantes. Seule la route principale menant à une exploitation minière, large, à trafic intensif et recouverte de matériau à fort contraste avec l'environnement est détectable sur l'image SPOT. Quant aux villages, ils sont souvent difficilement repérables sur les images SPOT puisqu'ils possèdent une radiométrie équivalente à celle des sols nus.

Sur l'image SPOT, il n'est pas possible de détecter les zones d'orpaillages. En effet, lorsque les chantiers d'orpaillages sont dans des zones qui présentent un couvert végétal plus ou moins dense, ils sont réalisés sans dégradation à grande ampleur de ce couvert. Quant aux sites d'orpaillages situés dans l'environnement d'une exploitation minière et sur des zones de sols nus, ils se confondent parfaitement avec leur entourage.

6. Résultats de la classification

6.1. Images radar

Une image SIR-C présente une grande richesse d'informations avec ses deux longueurs d'ondes (C et L) et ses deux polarisations associées (HH et HV). Quatre

canaux sont donc disponibles pour chaque date. Une analyse statistique a été effectuée pour analyser la performance des différents canaux et définir ainsi ceux qui présentent un intérêt pour la cartographie des objets présents sur notre zone d'étude.

Pour chaque objet, nous avons sélectionné des sites d'entraînement en numérisant des polygones sur toute l'image. Le nombre et la dimension des polygones varient en fonction des objets étudiés (peu de pixels pour les villages comparativement à la savane arborée ou à la forêt). Nous avons choisi de regrouper forêt et forêts-galeries en un seul objet appelé forêt (même radiométrie). Ces sites ont été divisés en deux parties. Le premier lot a servi à la classification et le second à la validation de la classification. Pour étudier les performances de nos classifications, nous avons établi les matrices de confusion qui permettent de connaître le pourcentage de pixels bien classés par rapport à la réalité de terrain. A partir de ces matrices, nous avons utilisé deux estimateurs de précision : la précision moyenne et le coefficient Kappa qui est un estimateur de précision robuste puisqu'il prend en compte la précision propre à un objet ainsi que les confusions associées à cet objet. Après classification, les différentes zones de cultures (clairières et alluvions) ont été regroupées en une seule classe appelée zones de cultures.

La matrice de variance-covariance a été calculée pour analyser les réponses des objets dans les différents canaux (Tableau 2). En saison sèche, la matrice de variance-covariance met en évidence une plus grande variance pour la bande L (436 et 587) donc une plus grande dynamique pour caractériser les objets. La polarisation HV donne une variance plus forte en saison sèche et donc on peut supposer que cette configuration donne de meilleurs résultats pour la cartographie. En saison de pluies, LHH et LHV ont la même variance (562 et 572). De ce fait, ces canaux sont a priori équivalents pour la discrimination des objets. Les valeurs de corrélation montrent une relation de correspondance importante entre le canal LHH et le canal LHV (autour de 0,7) alors que les canaux CHH et CHV sont moins corrélés (autour de 0,5). De même, la corrélation entre la bande L et la bande C est faible quelle que soit la polarisation (de l'ordre de 0,55 pour la saison sèche et entre 0,4 et 0,5 pour la saison de pluies).

(a)

	LHH	LHV	CHH	CHV
LHH	436 (1)	343 (0,68)	204 (0,56)	194 (0,54)
LHV		587 (1)	224 (0,53)	216 (0,52)
CHH			301 (1)	164 (0,55)
CHV				299 (1)

(b)

	LHH	LHV	CHH	CHV
LHH	562 (1)	396 (0,7)	213 (0,5)	193 (0,48)
LHV		572 (1)	179 (0,41)	164 (0,4)
CHH			327 (1)	154 (0,5)
CHV				291 (1)

Tableau 2 : Matrices de variance-covariance et de corrélation (entre parenthèses) calculées à partir des images SIR-C : (a) saison sèche ; (b) saison de pluies.

Une analyse en composantes principales (ACP) a été également réalisée. La première composante de

l'ACP représente 74% de l'information contenue dans l'image entière et ceci pour les deux saisons. Pour la saison sèche, le premier vecteur propre est défini par $VP1 = 0,46 LHH + 0,72 LHV + 0,35 CHH + 0,39 CHV$. Le canal LHV contient le plus d'informations et sa contribution est supérieure aux autres canaux. Pour la saison de pluies, on a $VP1 = 0,62 LHH + 0,64 LHV + 0,35 CHH + 0,29 CHV$.

Ainsi, LHH et LHV présentent le même contenu informatif qui est supérieur à celui des autres canaux (CHH et CHV).

Nous avons également calculé des tables de séparabilité qui mettent en évidence, pour chaque bande, la faculté d'un objet à se distinguer d'un autre (Cumming and Van Zyl, 1989). Les résultats obtenus confirment les conclusions précédentes:

- **Village** : la bande L permet une bonne détection des villages ce qui n'est pas le cas avec la bande C. Ce résultat est confirmé par les résultats de Lichteneegger et al., (1993).
- **Eau** : indépendamment de la longueur d'onde, la discrimination entre l'eau et les autres objets est meilleure en saison de pluies.
- **Forêt** : on obtient une bonne détection de la forêt avec LHV.
- **Cuirasses** : la bande C n'est pas très adaptée pour la détection de cet objet alors que la bande L permet une bonne caractérisation des cuirasses.
- **Sable** : en saison sèche, la bande LHV donne de meilleurs résultats pour la détection du sable.
- **Savane arborée** : toutes les configurations se valent pour la distinction de cet objet avec cependant de nombreuses confusions.
- **Clairière** : la bande LHV permet une meilleure séparabilité pour les clairières, cependant il y a des confusions importantes avec le sable et la savane en saison sèche et une confusion importante avec les alluvions rugueuses en saison de pluies.
- **Alluvions** : la bande L permet une meilleure discrimination des alluvions, ceci pour les deux saisons.

En conclusion, on peut dire que la bande L semble plus appropriée que la bande C pour réaliser la cartographie de notre zone d'étude.

Une classification par maximum de vraisemblance a été réalisée sur les images radar. Chaque pixel de l'image est alors affecté à une classe en fonction de sa probabilité d'appartenance à telle classe plutôt qu'à une autre. Différentes configurations d'images ont été testées dans le cadre de cette étude. Les images SIR-C ont permis d'évaluer l'apport de chaque saison pour la cartographie de notre zone d'étude. Ensuite, nous avons combiné les images de saison sèche et de saison de pluies. De même, nous avons évalué l'apport de chaque fréquence (bandes C et L) pour la cartographie de cette zone. Les images du satellite ERS ont également été analysées.

6.1.1. SIR-C de saison sèche

L'image SIR-C de saison sèche avec ses quatre canaux (CHH, CHV, LHH et LHV) a été classifiée avec une précision moyenne de l'ordre de 82% et un

coefficient Kappa de 0,79 (cf. Tableau 3). Les villages, forêt, cuirasses et sable sont bien classés avec une précision supérieure à 90%. Quant aux alluvions et à la savane arborée, ils sont moyennement bien classés avec respectivement 71,5% et 82,8% de précision. Enfin, l'eau est très mal classée avec 51,5%. Les confusions significatives se font entre alluvions et cuirasses (19,3% des alluvions sont classifiées en cuirasses et 5,4 % des cuirasses sont classifiées en alluvions), entre eau et alluvions (38,4%), entre eau et sable (6,1%), entre forêt et savane arborée (6,1%), et entre savane arborée et alluvions (7,6%). Les alluvions qui sont mis en cause dans la confusion avec l'eau sont les alluvions lisses qui ont une radiométrie très proche que celle de l'eau. Une explication peut être avancée pour expliquer cette mauvaise détection de l'eau. En effet, en saison sèche, les cours d'eau sont peu profonds et des remous peuvent apparaître dans le lit de la rivière entraînant un signal radar plus fort qui se confond ainsi plus facilement avec les autres objets. De plus, ces cours d'eau ne représentent parfois que quelques pixels de largeur d'où la difficulté de choisir des zones d'apprentissage. Si on regroupe le sable et l'eau du fleuve en une seule classe, alors on obtient une précision de détection de 78,8%.

6.1.2. SIR-C de saison de pluies

Les objets observés sur l'image SIR-C acquise en saison de pluies sont les mêmes que ceux observés sur l'image de saison sèche. Seuls les bancs de sable n'existent plus car ils sont recouverts par l'eau. La précision de la classification est légèrement moins bonne que l'image de saison sèche mais reste acceptable avec une précision moyenne d'environ 79% et un coefficient Kappa de 0,75 (cf. Tableau 3). Sur cette image, l'eau et les cuirasses sont parfaitement bien classées avec une précision supérieure à 95%. Les alluvions et les villages sont moyennement bien classés (87,6% et 79,2% respectivement). L'essentiel de la mauvaise cartographie des alluvions est dû à la confusion avec les cuirasses (11,6%). Quant à la forêt, elle est moins bien détectée (de l'ordre de 70%) avec 5,7% de confusion avec les villages et de 24,5% avec la savane. De même, 11,6% des villages sont classifiés en forêt et 8,8% en savane. Enfin, la savane arborée est très mal classée (46,4%) et présente une grande confusion avec les villages, la forêt et les alluvions.

6.1.3. SIR-C multi saisons

L'utilisation conjointe des deux saisons a été testée. Nous avons utilisé la combinaison des huit canaux (CHH, CHV, LHH et LHV en saison sèche et saison de pluies). La précision moyenne sur la classification multi date est de l'ordre de 91% avec des faibles confusions entre les différents objets. Elle est meilleure de 10% par rapport à une classification mono date. Quant au coefficient Kappa, il est d'environ 0,9. On constate ainsi que l'apport des deux saisons permet d'améliorer sensiblement la classification. En effet, les cuirasses, l'eau, le sable et les villages sont très bien classés (entre 92 et 99%). La forêt est également très bien classée (93%) mais présente un peu de confusion avec la savane arborée (5,9%). La classification de la savane arborée et des alluvions est réalisée avec une précision

de l'ordre de 80%. Notons qu'environ 15% de la savane arborée est classée en alluvions et que 22% des alluvions sont faussement détectés en cuirasses. La Figure 6a illustre le résultat de la classification utilisant SIR-C multi saisons. Sept classes ont été retenues en accord avec les classifications réalisées sur les images radar : cuirasses, zones de cultures, eau, sable, savane arborée, forêt et villages.

6.1.4. ERS multi saisons

Nous avons étudié la combinaison des trois images ERS : 20 août 1993, 21 août 1994 et 8 juin 1997. Les résultats de la classification (cf. Tableau 3) sont nettement moins bons que ceux obtenus à partir des images SIR-C. En effet, la précision moyenne n'est que de 55,6% de pixels bien classés par rapport à la réalité de terrain et le coefficient Kappa est également faible (0,47). Cependant, les résultats obtenus sont largement sous-estimés pour l'eau et le sable car les images n'ont pas été acquises la même année (1993, 1994 et 1997). D'une année sur l'autre, ces deux objets peuvent avoir des localisations et des étendues très différentes donc notre réalité de terrain qui a été réalisée à partir des images SIR-C n'est plus tout à fait adaptée pour les images ERS. Une solution aurait été de regrouper ces deux entités en un seul objet appelé fleuve mais nous avons préféré travailler avec les résultats initiaux (la précision est d'environ 90% si on regroupe sable et eau).

Les objets les mieux classifiés sont la savane arborée et la forêt avec 76 et 61% de bonne détection. Les alluvions et les cuirasses sont mal classées (43% et 55%, respectivement) et présentent de ce fait des

confusions très importantes avec les autres objets. Ces résultats sont en bon accord avec ceux obtenus sur les images SIR-C en bande C. De ce fait, le capteur ERS avec sa fréquence en bande C n'est pas adapté pour une mise à jour cartographique.

6.1.5. Analyse fréquentielle à partir des images SIR-C

Afin de connaître l'apport de chaque fréquence, nous avons classifié séparément les images en bande C et celles en bande L. Nous nous sommes placés dans le cas le plus favorable, c'est-à-dire en prenant pour chaque bande, les deux polarisations (HH et HV) et les deux saisons. Sur les images en bande C, les villages ne sont pas détectables à l'exception de la grande ville de Siguirí (troisième ville du pays). Par contre, nous voyons quelques points brillants à l'emplacement de certains villages qui doivent correspondre à des structures métalliques (toits par exemple).

Les résultats de la classification utilisant la bande L indiquent une précision moyenne et un coefficient Kappa largement supérieurs à ceux obtenus avec la bande C (84% contre 65% et 0,81 au lieu de 0,59).

6.1.6. Analyse mono bande

Nous avons également analysé chaque canal des images SIR-C. Il ressort des traitements qu'avec une seule fréquence, une seule polarisation et une seule date, les images en bande L donnent une précision de classification de l'ordre de 50% alors que la bande C présente des résultats inférieurs à 40%. En combinant deux saisons, la précision augmente de 10 à 15% par rapport à une saison seule.

Configuration	Bien Classifié (%)							Précision Classification (%)	
	Zones de cultures	Cuirasse	Eau	Forêt	Sable	Savane arborée	Villages	Moyenne	Coefficient Kappa
SIR-C saison sèche: CHH, CHV, LHH et LHV	71,5	93,0	51,5	92,3	93,4	82,8	91,7	82,3	0,79
SIR-C saison de pluies: CHH, CHV, LHH et LHV	87,6	98,0	95,3	69,6	non présent	46,6	79,2	79,3	0,75
SIR-C saisons sèche et de pluies: CHH, CHV, LHH et LHV	77,5	98,5	91,9	93,1	99,0	82,3	95,5	91,1	0,90
SIR-C saisons sèche et de pluies: CHH et CHV	52,0	75,3	74,1	74,2	98,6	72,6	9,3	65,1	0,59
SIR-C saisons sèche et de pluies: LHH et LHV	65,3	83,9	75,4	87,2	99,2	78,9	96,9	83,8	0,81
ERS saisons sèche et de pluies: Août 93, Août 94 et Juin 97	43,1	54,5	49,4	61,3	49,1	76,1	Non détectés	55,6	0,47
SPOT	66,9	62,0	97,2	88,4	84,6	59,0	35,7	70,5	0,66
SIR-C saison sèche et SPOT	60,7	91,8	90,4	91,4	96,8	59,9	89,7	82,9	0,80
SIR-C saison de pluies et SPOT	81,7	98,1	99,9	74	Non présent	48,5	93,4	82,6	0,79
SIR-C saisons sèche et de pluies et SPOT	78	92,1	98	89,1	78,7	68,2	94,7	85,5	0,83

Tableau 3 : Résultats des classifications réalisées en utilisant diverses combinaisons d'imagerie.

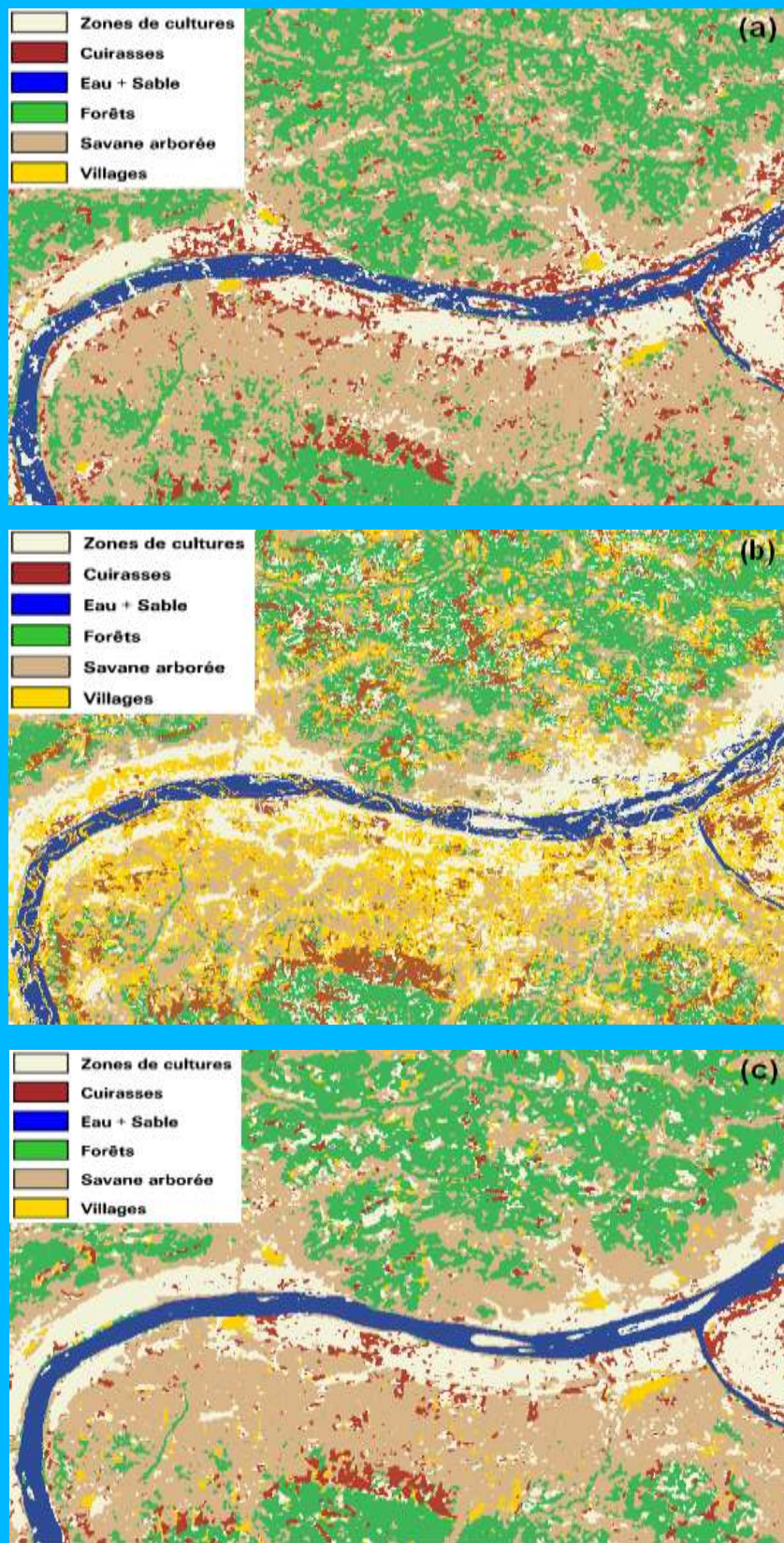


Figure 6 : (a) Classification des images multi-saisons de SIR-C (CHH, CHV, LHH et LHV en saison sèche et saison de pluies). (b) Classification de l'image SPOT (saison sèche). (c) Classification de l'image SPOT et des images multi-saisons de SIR-C (complémentarité SPOT/SIR-C).

6.1.7. Discussions

La date d'acquisition des images présente un intérêt particulier pour la détection des objets car un même objet ne se distingue pas de la même façon que l'on soit en saison sèche ou en saison de pluies. Cette différence de détection se voit de manière spectaculaire sur le fleuve (eau + sable) qui, en saison de pluies, présente une précision de classification meilleure de 20% par rapport à celle obtenue en saison sèche. La saison de pluies permet également une meilleure caractérisation des alluvions (87,6% contre 71,5%). La forêt, la savane arborée et les villages sont par contre beaucoup mieux détectés en saison sèche. Mais d'une façon générale, la saison sèche est légèrement meilleure que la saison de pluies.

Les images mono date de SIR-C donnent des résultats satisfaisants en terme de précision mais de nombreuses confusions apparaissent. L'utilisation des images multi saisons permet une amélioration de la

classification d'environ 10% par rapport à l'utilisation d'une seule saison. De même, les confusions entre classes sont moins importantes.

Les résultats obtenus à partir des données radar montrent l'importance de la bande L en terme de cartographie et éventuellement de mise à jour. Ainsi, un système satellitaire avec une fréquence adéquate (bande L) serait un bon outil de cartographie et de mise à jour pour des zones d'études en Afrique de l'ouest. Le gain apporté par l'utilisation de la bande C en plus de la bande L est faible (environ 7%). Toutefois, des confusions entre objets sont plus importantes en bande L qu'en bandes C et L (cf. Tableau 4). De plus, l'utilisation d'images en bande L acquises pendant les deux saisons fournirait une classification de qualité comparable à celle utilisant d'images acquises en bandes C et L mais à une seule saison.

	Configuration 1	Configuration 2
Zones de cultures	21,7% en cuirasses	26,9% en cuirasses et 6,1 en eau
Cuirasse	-	13% en zones de cultures
Eau	3,9% en zones de cultures et 4,1% en sable	16,1% en zones de cultures et 6,8% en sable
Forêt	5,9% en savane	11% en savane
Sable	-	-
Savane arborée	14,6% en zones cultures	15,3% en zones de cultures et 4,1% en forêt
Villages	3% en savane	-

Tableau 4 : Confusions obtenues lors de la classification des différents objets : (1) SIR-C en bandes C et L, polarisations HH et HV, et saisons sèche et de pluies; (2) SIR-C en bande L, polarisations HH et HV, et saisons sèche et de pluies. Seules les confusions supérieures ou égales à 3% ont été mentionnées dans ce tableau.

6.2. Image SPOT

La classification de l'image SPOT a été réalisée en utilisant les mêmes sites d'entraînement et de validation que ceux utilisés dans la classification des images SIR-C excepté pour les classes eau et sable (fleuve) dont les sites ont été obtenus directement à partir de l'image SPOT (la localisation de ces objets est fortement dépendante de la date d'acquisition). Pour comparer les résultats obtenus par classification sur les images radar et optique, nous avons fusionné certaines classes obtenues sur l'image optique comme par exemple forêt et forêts galeries, indiscernables l'une de l'autre sur l'image radar. De même, les clairières et les alluvions ont été rassemblées dans une classe unique dénommée zones de cultures. La Figure 6b illustre la classification réalisée à partir de l'image SPOT de saison sèche.

La précision moyenne de la classification est de l'ordre de 70% avec un coefficient Kappa de 0,66. Les résultats montrent une bonne discrimination de l'eau, du sable et de la forêt avec des pourcentages de pixels bien classés supérieurs à 80%. Les zones de cultures sont détectées avec un pourcentage d'environ 67%. La détection des éléments lithologiques représentés par la classe cuirasses est moyenne avec des pourcentages de pixels bien classés de l'ordre de 62%. Par contre, des confusions importantes peuvent être notées entre les classes villages, zones de cultures et cuirasses. Les différences radiométriques entre ces trois classes sont faibles. La détection des villages sur l'image SPOT est mauvaise et le pourcentage de pixels bien classés est d'environ 36%. Le pourcentage de fausses détections

entre villages et zones de cultures est d'environ 46%. L'absence d'images de saison des pluies ne nous permet pas de réaliser une classification multi date qui aurait permis de séparer les zones de cultures des villages et des cuirasses.

Quant à la savane arborée, la discrimination est d'environ 59%. Cette classe présente des confusions importantes avec les classes zones de cultures, forêt et villages. Ce résultat peut s'expliquer par un changement de l'occupation du sol avec la disparition de zones de savane au profit de zones cultivables. La confusion entre la savane et la classe villages est liée à la faible discrimination sur l'image SPOT entre les sols nus et les villages.

Il est important de rappeler que les images SIR-C sont acquises en 1994 et que les deux périodes de pluies et sèche sont disponibles alors que l'image SPOT date de la seule période sèche de 1998. Cet étalement dans le temps ne permet pas d'assurer que certaines classes de 1994 et de 1998 soient superposables (les zones de culture, l'eau, la savane et la forêt) puisqu'elles sont sujettes à des variations annuelles. La comparaison des classifications obtenues d'une part à partir de l'image SPOT et d'autre part à partir des images SIR-C peut être de ce fait biaisée lorsqu'elle s'applique à des objets ayant subi une évolution entre les deux prises de vue.

Les forêts galeries sont facilement distinguables ce qui permet d'envisager l'extraction du réseau hydrographique secondaire. Toutefois, l'interprétation visuelle reste indispensable pour tenir compte du caractère linéaire caractéristique de cette classe

d'occupation du sol et permettre d'éliminer les fausses détections provenant de confusions radiométriques résiduelles avec la forêt.

6.3 Complémentarité radar-optique

La complémentarité en terme de cartographie entre les images radars SIR-C et l'image SPOT a été étudiée. Les images ERS qui ne présentent qu'une seule bande et qui ont été jugées inadaptées à la cartographie n'ont pas été utilisées pour les tests de complémentarité. Une classification a été réalisée en utilisant une image combinée des images SIR-C et de l'image SPOT. La fusion entre les deux familles de capteurs n'a pas permis une amélioration des classifications obtenues par chaque type de capteur considéré seul, excepté pour la détection de l'eau du fleuve (cf. Tableau 3). La Figure 6c montre le résultat de la classification obtenue en combinant l'image SPOT et les images SIR-C des deux saisons.

On peut constater que chaque capteur, optique ou radar utilisé séparément, apporte une information différente sur l'état de surface mais qu'une combinaison de ces deux types d'images peut engendrer des

confusions dans l'étape de classification. Une solution pourrait être de réaliser une classification sur les images optique et radar séparément puis de prendre la meilleure information issue de chacune des classifications et de les regrouper par la suite pour l'interprétation finale. Avec cette manière de procéder, la complémentarité entre l'optique et le radar prend toute son importance en permettant des améliorations notables dans la phase d'interprétation et de détection manuelle (forêt galerie et route par exemple).

7. Conclusions

Chaque type d'imagerie a été analysé en fonction de son contenu informatif par rapport aux thèmes explorés. Les résultats obtenus ont permis d'évaluer quantitativement les performances respectives des capteurs SIR-C bande L, SIR-C bande C, ERS et SPOT et de proposer les voies les plus efficaces pour atteindre au mieux l'une des composantes cartographiques recherchées. Le tableau 5 résume les résultats de cette étude en matière de cartographie pour chaque type de capteur et pour chaque classe.

Items	SPOT	ERS	SIR-C
Réseau hydrographique permanent visible	Bien classé	Bien classé	Bien classé
Réseau hydrographique permanent caché : forêts galeries	Bien classé : petites confusions avec la forêt	Invisible	Impossible à classer : visible sur l'image
Réseau hydrographique temporaire	Saison inadéquate (sèche)	Déteçtable	Déteçtable
Orpaillages	NON	NON	NON
Zones urbaines	NON : confusions avec les sols nus	NON	Bien classées : bande L
Routes et pistes	Interprétation visuelle du réseau principal	NON	NON
Cuirasses	Partiellement classées : confusions avec les sols nus	Partiellement classées: confusions avec les sols nus	Bien classées : bande L
Forêt	Bien classée	Mal classée	Bien classée
Savane arborée	Bien classée	Mal classée	Bien classée
Zones de cultures	Saison inadéquate (sèche)	Mal classées	Bien classées

Tableau 5 : Potentiel des différents capteurs optique et radar pour la détection des principaux objets présents sur notre site d'étude.

L'imagerie optique, de par ses caractéristiques spectrales très sensibles à la végétation, permet d'extraire la forêt et les forêts-galeries qui apparaissent avec une réponse spécifique. Les forêts galeries avec leur caractère linéaire sont facilement distinguables ce qui permet d'envisager l'extraction du réseau hydrographique secondaire de petite largeur et qui, en plus, est bordé d'arbres. L'image SPOT avec sa bonne résolution spatiale permet également d'extraire certaines routes ou pistes mais pas de manière optimale car elles se confondent en grande partie avec le sol nu. Le réseau routier principal, représentant les voies les plus larges et les plus intensivement utilisées, peut être identifié sur l'image SPOT. L'image SPOT acquise exclusivement pendant la saison sèche a montré qu'elle n'est pas adaptée à la détection des villages qui apparaissent en sol nu. La mauvaise

classification de la savane arborée est liée au fait que les images n'ont pas été acquises à la même année (1994 pour SIR-C et 1998 pour SPOT) et donc certains objets (savane arborée, forêts) ont pu évoluer dans le temps. Une image optique en saison de pluies nous aurait permis de mieux distinguer les villages, les cuirasses et les sols nus servant à la culture (acquisition difficile en raison de la forte nébulosité régnant sur la région à cette période). L'utilisation d'une seule image SPOT permet une classification avec une précision de l'ordre de 70%.

Les résultats de cette étude montrent que les capteurs de type radar pourraient être opérationnels pour la cartographie de l'occupation du sol et la mise à jour de cartes dans des zones difficilement accessibles à condition d'utiliser des données adéquates de fréquence, de polarisation et de saison. Des images en

bande L (fréquence de 1GHz), multi polarisation (HH et HV par exemple), et multi dates (saison sèche et saison de pluies) sont les meilleures pour cette application.

L'utilisation des images SIR-C multi dates a permis une classification des cibles détectables avec une précision d'environ 90%. Les images radar en bande L permettent la détection d'objets comme les villages qui sont difficilement détectables par imagerie optique. Par contre, les zones d'orpaillages dont l'enveloppe peut représenter une carte des aires à potentiel minier ne sont détectables ni par le radar ni par l'image SPOT.

Dans l'optique d'une mise à jour régulière des cartes d'occupation du sol, le capteur radar actuellement opérationnel (RADARSAT) ne permet pas d'obtenir des bons résultats puisqu'il fonctionne en bande C et en une seule polarisation (HH). Il serait intéressant d'étudier le potentiel du capteur A-SAR d'Envisat (programmé pour fin

2001) pour la cartographie. En effet, s'il ne possède pas de radar en bande L, il pourra toutefois fournir des images en multi polarisation. De même, les résultats de cette étude montrent que les images JERS (bande L) déjà disponibles devraient pouvoir être utilisées avec succès.

L'imagerie optique haute résolution de type SPOT 5 et IKONOS devrait permettre, grâce à l'amélioration de la résolution spatiale, une meilleure caractérisation des objets qui sont détectés à partir des images SPOT 3 et 4. Quant aux limites de détection des cibles liées à la faible résolution spectrale (nombre limité de bandes disponibles), elles ne devraient a priori pas subir de changements. Toutefois des tests sur ces nouvelles images sont nécessaires pour pouvoir développer plus avant leur apport pour la cartographie.

Références

Baghdadi N., Bernier M., Gauthier R., and Neeson I. (2000) Evaluation of C-band SAR data for wetlands mapping, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, no. 1, pp. 71-88.

Cumming I. G., and Van Zyl J. J. (1989) Feature utility in polarimetric radar image classification, *Proceeding IGARSS '89*, IEEE 89CH2768-0, pp. 1841-1846.

Dallemand J.F., Lichtenegger J., Kaufman V., Schmidt N., Barry B., Diaby N., Reichert P., Paudyal D.R., and Bitter P. (1993) ERS-1 SAR and optical data for land use/land cover mapping a case study in a savannah zone of Guinea, *Colloque CNES: De l'optique au radar, les applications de SPOT et ERS*, Cépaduès Editions, ESA, pp. 447-456.

Hess L.L., Melack J.M., Filoso S., and Wang Y. (1995) Delineation of Inundated Area and Vegetation Along the Amazon Floodplain with the SIR-C Synthetic Aperture Radar, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 33, No. 4, pp. 896-903.

King C., Desprats J.F., Terres J.M., Porchier J.C. (1993) European MARS project : The potential integration of SPOT and air- and satellite-borne RADAR data over two pilot areas for agricultural statistics (PRSOPER programme and ERS1 Pilot Project), *Colloque Int.*

ESA/CNES From optics to radar, SPOT and ERS applications. Cepadues Ed., pp. 397-411.

Lichteneegger J., Dallemand J.F., Reichert P., and Rebillard P. (1993) Multi-sensor analysis for land use mapping in Tunisia, *Earth Observation Quarterly*, ESA/ESTEC, n° 33, pp. 1-6.

Millot G. (1964) *Géologie des argiles*, Masson et Cie, Paris, 499 pages.

Ulaby F.T., Moore R.K., and Fung A.K. (1986) *Microwave Remote Sensing , Active and Passive*, Vol. 3, *From Theory to Applications*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

Remerciements

Cette étude a été financée conjointement par le BRGM (Bureau de Recherche en Géologie Minière) et la Direction Générale de l'armement (DGA/CEGN) avec l'appui du Programme National de Télédétection Spatiale (PNTS). Les données SPOT ont été fournies dans le cadre du programme ISIS.