



HAL
open science

Apport de l'imagerie radar pour la cartographie de l'humidité du sol et des croûtes biologiques en zone sahélienne

P. Camus

► **To cite this version:**

P. Camus. Apport de l'imagerie radar pour la cartographie de l'humidité du sol et des croûtes biologiques en zone sahélienne. Sciences de l'environnement. 2010. hal-02593342

HAL Id: hal-02593342

<https://hal.inrae.fr/hal-02593342>

Submitted on 15 May 2020

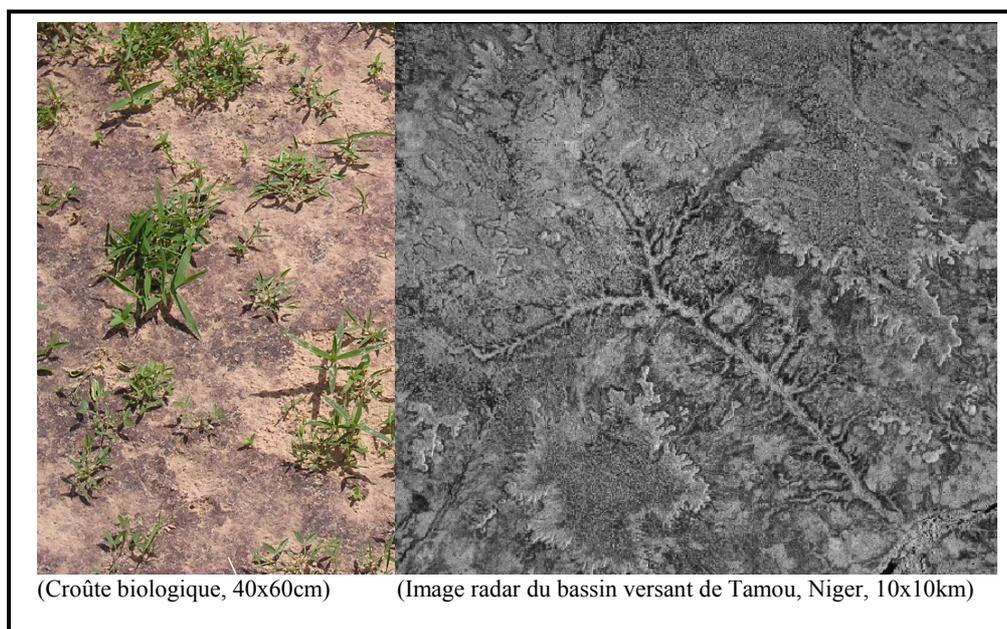
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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.

Master II Société Aménagement Géographie Environnement (SAGE)
Spécialité : Espace et Environnement (EE)
option : Télédétection et Analyse Spatiale de l'Environnement (TASE)
parcours : Information Spatiale et Agronomie (ISA)

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Apport de l'imagerie radar pour la cartographie de l'humidité du sol et des croûtes biologiques en zone sahélienne



Soutenu le 30 juin 2010

Travail effectué par Pauline CAMUS à la Maison de la Télédétection de Montpellier
Du 12/01/10 au 09/07/10

Encadré par Nicolas BAGHDADI (CEMAGREF, UMR TETIS, Montpellier)

Jury composé de : Hervé NICOLAS (PSN, Agrocampus Ouest, Rennes)

Samuel CORGNE (COSTEL, Rennes 2)

Laurence HUBERT-MOY (COSTEL, Rennes 2)

Christine LARGOUET (Labo informatique, Agrocampus Ouest, Rennes)



Remerciements

Je tiens à remercier mon maître de stage Nicolas Baghdadi de m'avoir confié ce sujet de recherche et de s'être toujours montré à l'écoute et disponible tout au long de la réalisation de ce travail. Je remercie également Pascal Kosuth de m'avoir accueillie au sein de l'UMR TETIS qu'il dirige.

Mes remerciements s'adressent également à toute l'équipe de la Maison de la Télédétection de Montpellier pour son accueil et son aide. Plus particulièrement je voudrais remercier Maëlle et Roberto pour leurs conseils sur les manipulations de logiciel de télédétection, Soizic pour son soutien dans la découverte de l'utilisation d'Erdas et du traitement d'images radars, Sylvie pour son appui au niveau de la documentation, Nicolas Moyroud, Guy Roussin, Alain Clopes pour leur aide dans la résolution de problèmes informatiques.

Je remercie Soizic, Nico, Isa, Elodie, Lucas, Julie, David, Antoine, Elder, Valter et Jean pour l'ambiance de travail agréable qu'ils ont participé à créer.

Merci également à Hervé Nicolas, responsable du master TASE et du suivi de mon stage. Je remercie également les cinq autres élèves de ce master, Rima, Sana, Frédéric, Pauline et Yessin que j'ai apprécié de découvrir lors des quatre mois à Rennes préalable à ce stage et avec qui nous avons pu correspondre et nous épauler à distance lors de la rédaction du mémoire.

Enfin, j'adresse mes remerciements à Antoine pour avoir été présent lors de ces six mois et pour m'avoir soutenu dans ce travail, ainsi qu'à ma famille.

Table des matières

Table des illustrations	3
Introduction	4
1. Contexte de l'étude	5
1.1. <i>La croûte biologique</i>	5
1.2. <i>Typologie de la zone d'étude</i>	6
1.2.1. Le Niger traversé par le Sahel.....	6
1.2.2. Géomorphologie et typologie de surface	7
1.3. <i>Projet BioCrust</i>	8
1.4. <i>Cartographie de la croûte biologique par imagerie radar</i>	9
2. Matériel et Méthode	10
2.1. <i>Sites d'étude et relevés terrains au Sahel</i>	10
2.2. <i>Images Radar</i>	11
2.2.1. Imagerie satellite TerraSAR-X.....	11
2.2.2. Nos images	13
2.2.2. Prétraitements des images.....	13
2.3. <i>Images optiques</i>	15
2.3.1. Images KOMPSAT-2	15
2.3.2. Carte d'occupation du sol et extraction des sols nus	16
2.4. <i>Méthodologie de cartographie de l'humidité</i>	17
2.4.1. Relations entre signal et humidité.....	17
2.4.2. Inversion des relations obtenues	19
3. Résultats et discussions	20
3.1. <i>Corrélations entre coefficient de rétrodiffusion et humidité</i>	20
3.1.1. Méthode 1: sans prise en compte de la rugosité	20
3.1.2. Méthode 2 : prise en compte de la rugosité	21
3.2. <i>Cartographie de l'humidité</i>	22
3.2.2. Application de la méthode 1	22
3.2.3. Application de la méthode 2	25
3.2.4. Fiabilité des estimations d'humidité	28
Conclusion et perspectives	31
Références bibliographiques	33
Table des annexes	35

Table des illustrations

Tableaux

Tableau 1 : Liste des images TerraSAR-X.....	13
Tableau 2 : Comparaison entre images radar acquises et relevés terrain disponibles	18
Tableau 3 : Analyse des écarts entre humidités mesurées et estimées	28
Tableau 4 : Analyse des écarts entre humidités mesurées et estimées sur Banizoumbou et Tamou.....	29

Figures

Figure 1 : Principales unités géomorphologiques du paysage du Sud-Ouest nigérien.....	7
Figure 2 : Brousse tigrée sur plateau à Banizoumbou et brousse tachetée sur plateau à Tamou	7
Figure 3 : Situation des sites d'études de Banizoumbou et Tamou au Niger dans le Sahel.....	10
Figure 4 : Aperçu de la classification des types d'occupation du sol.....	16
Figure 5 : Coefficients de rétrodiffusion des AOI en fonction de l'humidité du sol mesurée.....	20
Figure 6 : Différentiel du coefficient de rétrodiffusion des AOI (saison humide – saison sèche) en fonction de l'humidité du sol.....	21
Figure 7 : Evolution de l'humidité moyenne du sol estimée au cours de l'année 2010 sur les sites de Banizoumbou et de Tamou.....	22
Figure 8 : Cartographie de l'humidité du sol sur Banizoumbou, le 29 mai.....	23
Figure 9 : Mise en évidence de l'évolution de l'humidité au cours du temps et en fonction de l'occupation du sol	24
Figure 10 : Mise en évidence d'une humidité plus importante sur sol nu que sur jachère.....	24
Figure 11 : Carte d'humidité du sol du 08 octobre sur Banizoumbou.....	25
Figure 12 : Carte d'humidité du sol du 11 septembre sur Tamou	25
Figure 13 : Evolution de l'humidité moyenne du sol au cours de l'année 2010 sur les sites de Banizoumbou et de Tamou	26
Figure 14 : Comparaison des cartes d'humidité du sol du 08 octobre entre les deux méthodes	26
Figure 15 : Evolution de l'humidité du sol dans l'année sur une zone de bas-fonds sur Tamou	27
Figure 16 : Corrélation entre humidité estimée et humidité mesurée.....	28
Figure 17 : Corrélation entre humidité estimée et humidité mesurée sur chacun des sites	29
Figure 18 : Moyennes des humidités relevées sur les AOI à chaque date (mesurées et estimées) sur les plateaux et sur les bas-fonds et sur chacun des sites d'étude.....	30

Introduction

La croûte biologique encore appelée croûte microbiotique se retrouve en surface de certains sols des zones semi-arides à arides voire désertiques et notamment en zone sahélienne. Ses fonctions écologiques ont été mises en évidence notamment dans la lutte contre la dégradation des sols au Sahel. L'étude de cette croûte est importante à la fois pour comprendre le processus de sa mise en place, les conditions environnementales nécessaires à son maintien mais aussi pour éclaircir ses fonctions de façon plus précise. De plus, la répartition des croûtes biologiques semble être liée à la pression humaine et aux conditions hydriques et c'est à ce titre qu'elles pourraient être un indicateur de la dégradation des sols en zone sahélienne (Hahn et Kusserow, 1998).

C'est dans ce contexte qu'a été mis en place le projet BioCrust (vulnérabilité des croûtes biologiques et dégradation des sols en zone sahélienne), financé par l'ANR¹. Il comprend l'élaboration d'outils de spatialisation et de cartographie de la croûte. L'étude s'appuie sur des vérités terrains récoltées au Niger et des images radar acquises simultanément dans le courant de l'année 2009. Elle se déroule de janvier à juillet 2010 au CEMAGREF² dans les locaux de la Maison de la Télédétection à Montpellier.

La télédétection permet avec de petits moyens de rendre compte de la localisation et de l'évolution de certains éléments au sol sur de vastes zones. La possibilité de cartographier ces croûtes semble être un préliminaire à leur étude notamment en permettant de les localiser et de suivre leur extension et/ou leur dégradation. La cartographie par imagerie optique devrait permettre de cartographier des aires de probabilité de présence de croûte biologique en se basant sur certains critères favorables à son développement (notamment sur le type d'occupation du sol tel que jachères et plateaux) mais elle ne permet pas la cartographie directe de la croûte. Avec l'imagerie radar, il semble possible d'obtenir de meilleurs résultats notamment en tenant compte du facteur humidité. En effet, le signal radar est fortement dépendant de l'humidité du sol et il semble que la croûte biologique ait besoin d'une certaine humidité afin de se développer. Nous pouvons espérer cartographier la croûte sur ces zones en la corrélant avec l'humidité du sol. Nous chercherons à comprendre la répartition des croûtes en fonction de l'humidité du sol à une date donnée mais également en fonction de l'évolution de l'humidité du sol au cours des saisons et ce, toujours en tenant compte du type d'occupation du sol. Pour atteindre cet objectif il faudra au préalable établir des relations entre le signal radar et l'humidité du sol puis mettre en place une cartographie de l'humidité du sol sur les zones d'étude. Les résultats de ces travaux sont destinés à faciliter le travail de spatialisation et de cartographie des croûtes biologiques à l'échelle locale et régionale en apportant une méthodologie concluante.

La première partie de ce rapport présentera le contexte de l'étude ; une description de la croûte biologique, de la zone d'étude et du projet BioCrust sera établie et la problématique de l'étude sera abordée. La deuxième partie présentera le matériel et les méthodes utilisés, à savoir les images radar, la carte d'occupation du sol, les données terrains et la méthodologie générale de travail. La troisième partie sera, quant à elle, consacrée à l'exposé des résultats obtenus sur l'estimation de l'humidité du sol et sur sa cartographie, avec des discussions à leurs égards. Puis nous conclurons avant d'évoquer les perspectives de travail.

¹ Agence Nationale de Recherche : agence publique de financement de projets de recherche

² CEMAGREF : Institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement

1. Contexte de l'étude

1.1. La croûte biologique

La croûte biologique de surface ou croûte microbiotique résulte de la colonisation de la surface du sol par des micro-organismes en majorité des cyanobactéries, accompagnées de bactéries, d'algues vertes, de lichens et parfois de mousses. Ces microorganismes sont associés à des particules de sol. Nous retrouvons en Annexe A des illustrations de cette croûte et des microorganismes la constituant. Spécifiquement retrouvée sur les sols nus, la croûte biologique se retrouve à la surface du sol, sur les premiers millimètres. L'étude de Belnap (2005), sur les plaines à l'Ouest des Etats-Unis montre que la proportion des différents microorganismes présents dans la croûte biologique varie au cours de l'année. La croûte biologique se forme plus particulièrement sous des climats arides, semi-arides ou désertiques. On en retrouve notamment aux Etats-Unis (Brostoff *et al.*, 2002 ; Belnap, 2005 ; Bowker *et al.*, 2008), en Chine (Chen *et al.*, 2005 ; Zhang *et al.*, 2007), en Israël dans le désert du Néguev (Zaady *et al.*, 1994), en Afrique du Sud (Thomas et Dougill, 2006), au Mexique (Rivera-Aguilar *et al.*, 2006), au Turkmenistan (Orlovsky *et al.*, 2004), dans certaines régions alpines (Türk et Gärtner, 2001), en Australie (Eldridge et Leys, 2003) et au Sahel (Malam Issa *et al.*, 2009). Cependant, les études portant sur cette croûte en Afrique sont encore très peu nombreuses.

Cette croûte, caractéristique d'écosystèmes semi-arides et arides, possède des fonctions écologiques importantes dans le maintien des sols. En effet, elle stabilise le sol et protège sa surface de l'érosion hydrique et éolienne. L'amélioration des propriétés physiques du sol (rétention d'eau et plus grande stabilité) est permise grâce à la formation d'associations organo-minérales et d'agrégats stables sous l'action de filaments et produits de sécrétion extracellulaire (Belnap, 2005). Les croûtes biologiques constituent une source non négligeable de carbone, de leur vivant à travers la photosynthèse (fixation de CO²) et la sécrétion de substances extracellulaires, puis après leur mort par la décomposition de leurs tissus (Belnap, 2005). Les micro-organismes qui composent la croûte biologique fixent également l'azote atmosphérique, un élément fertilisant, et apportent ainsi au sol des nutriments (Thomas et Dougill, 2006). Elle contribue ainsi à l'amélioration des sols dégradés en augmentant la fertilité des surfaces dénudées de végétation. Les conditions hydriques du sol seraient, elles aussi, influencées par l'organisation des croûtes en succession de couches riches en particules minérales souvent grossières et de couches riches en éléments plus fins, organiques et minéraux (Malam Issa *et al.*, 1999). Le sol est ainsi plus aéré et donc la perméabilité et l'infiltration de l'eau accrues. Ce point est cependant controversé car d'autres études précisent que l'encroûtement peut provoquer un ruissellement plus important et donc une érosion accrue (Ambouta *et al.*, 1996). Au delà de la diminution de l'érosion hydrique, la croûte biologique, de par sa structure, limite également l'érosion éolienne qui peut faire des dégâts sur le sol notamment dans les déserts arides (Eldridge et Leys, 2003). L'étude de Belnap et Harper (1995) montre que les plantes qui évoluent sur des sols couverts de croûtes microbiotiques, accumulent plus de substances nutritives primaires dans leurs tissus (azote, potassium, sodium, calcium, fer et magnésium) que des plantes évoluant sur des sols dénués de croûtes microbiotiques.

Ces caractéristiques viennent compléter l'étude de Valentin *et al.*, 2004, démontrant l'importance des jachères. En effet, les jachères arborées ou de sol nu, où se forment des croûtes biologiques, sont importantes et complémentaires puisqu'elles permettent un transfert de fertilité au sol et sont donc un gage d'une agriculture durable en Afrique.

Le rôle de ces croûtes dans les écosystèmes arides et semi-arides et plus spécifiquement dans le fonctionnement des sols est donc d'une grande importance. Or, le développement et le fonctionnement de ces croûtes biologiques sont affectés à la fois par le changement climatique et les modalités d'usage des sols. Les modifications pourraient perturber la répartition et le fonctionnement des croûtes biologiques et donc les fonctions écologiques pourraient elles-mêmes être remises en cause. De par les fonctions importantes des croûtes biologiques, celles-ci peuvent devenir un bio-indicateur de l'état de santé de certains écosystèmes (Bowker *et al.*, 2008) et notamment permettre de suivre la désertification au Sahel (Hahn et Kusserow, 1998). Mahamane *et al.*, 2007, précisent que le développement de la croûte biologique est un indicateur pertinent pour alerter les agriculteurs de la possibilité de remettre en culture les jachères.

De nombreux travaux de recherche ont été menés à travers le monde pour étudier ces croûtes dans différents type d'écosystèmes, mais c'est en Afrique qu'elles ont été jusqu'à présent les moins étudiées. Cependant, les études de Hahn et Kusserow (1998) et Malam Issa *et al.* (1999, 2001) constituent les premiers travaux réalisés sur les croûtes microbiotiques au Niger. Ces travaux ont notamment démontré le rôle important de ces croûtes dans la dynamique du sol et l'environnement naturel pour les raisons que nous venons d'évoquer.

1.2. Typologie de la zone d'étude

1.2.1. Le Niger traversé par le Sahel

La zone sahélienne peut s'apparenter à une bande plus ou moins horizontale limitée au Nord par le désert du Sahara et au sud par la savane soudanienne (les délimitations variant d'année en année). Le climat saharien dénué de saison des pluies est sec et désertique (moins de 100 mm de pluie par an). Le climat soudanien comprend une saison sèche et une saison des pluies de mai à octobre avec une pluviométrie annuelle d'environ 1000 mm. Enfin, au Sahel, nous sommes entre ces deux climats, la saison des pluies s'étend de juin à octobre, le mois d'août étant le plus pluvieux. Les précipitations annuelles se situent entre 250 et 500 mm dans cette région (voir 900 mm exceptionnellement en zone sahélo-soudanienne).

Le climat du Sahel est considéré comme aride à semi-aride, et sa pluviométrie instable et aléatoire en fait une région assez hostile pour l'homme et le développement des cultures qui lui sont associées. La végétation au Nord du Sahel est d'ailleurs quasiment absente. Notons que nous assistons à une diminution de la pluviométrie dans cette région désertique, baisse probablement liée au changement climatique.

Cette ceinture sahélienne traverse cinq pays d'Afrique de l'Ouest (Mauritanie, Sénégal, Mali, Burkina Faso et Niger) et représente une superficie totale d'environ 2 500 000 km². Le Niger est donc traversé par ce climat sahélien. Au Nord d'Agadez le climat devient Saharien et au sud de Niamey il est qualifié de Sahélo-Soudanien (*cf.* 2.1.). Dans ce pays parmi les plus pauvres au monde (182^{ème} sur 182 au classement IDH¹), les problèmes de sécurité alimentaire sont importants. La diminution de la pluviométrie et l'appauvrissement des sols liés aux pratiques anthropiques entraînent l'expansion de la désertification.

¹ *Indice de Développement Humain*

1.2.2. Géomorphologie et typologie de surface

Sur nos sites d'étude au Niger, la géomorphologie du terrain peut être découpée en trois zones suivant le schéma de la Figure 1.

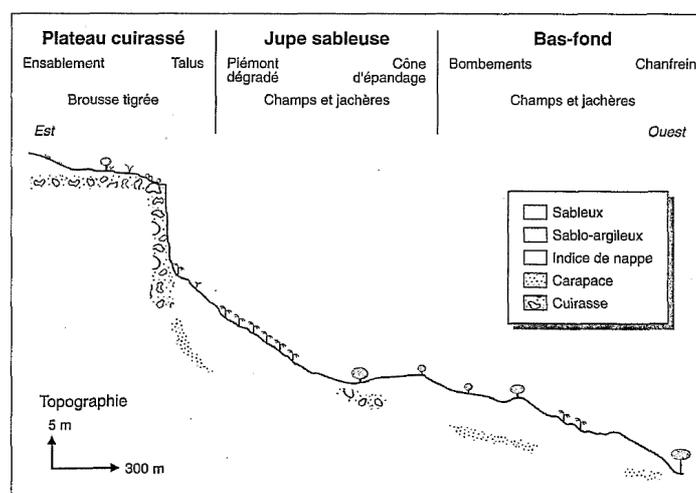


Figure 1 : Principales unités géomorphologiques du paysage du Sud-Ouest nigérien (d'après Courault *et al.*, 1990)

Sur les plateaux latéritiques cuirassés, les sols de type argilo-sableux contiennent environ 50% de graviers de cuirasse. Sols nus et végétation (fourrés) s'alternent, formant ainsi la brousse. La brousse peut être qualifiée de brousse tigrée (Figure 2a) lorsque le sol nu et les fourrés forment des arcs ou bandes plus ou moins longues (Seghieri *et al.*, 1997). Lorsque la largeur des bandes de végétation diminue, on rentre dans le domaine de la brousse dite tachetée (Figure 2b). Les jupes sableuses se retrouvent à la base des plateaux. Le sol y est pauvre en matière organique et sensible à l'érosion. Ces jupes sableuses peuvent constituer des zones cultivées ou mises en jachère. Dans les bas-fonds, on retrouve un sol plus ou moins sableux. Sur les bombements sableux l'agriculture est intensément développée.

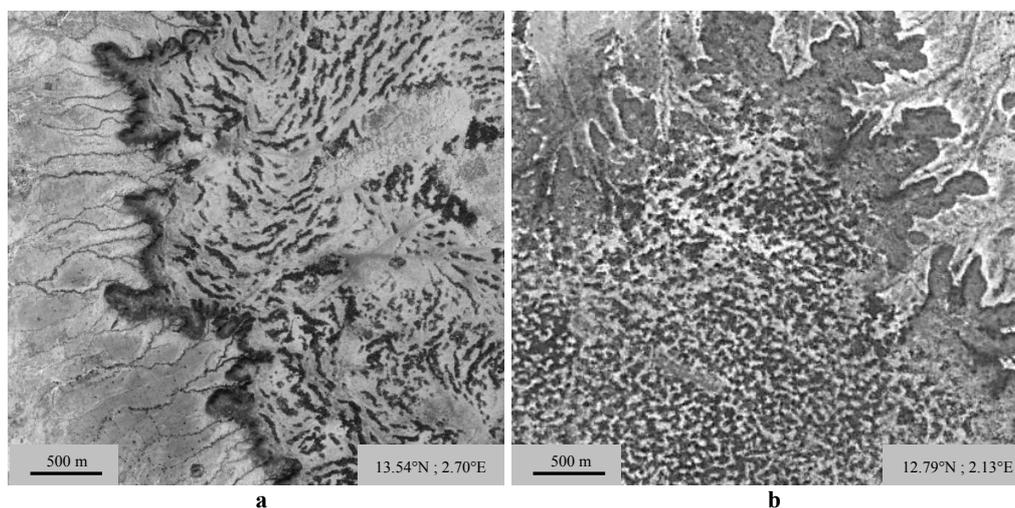


Figure 2 : Brousse tigrée sur plateau à Banizoumbou (a) et brousse tachetée sur plateau à Tamou (b)

La croûte biologique se retrouve essentiellement sur les sols nus latéritiques des plateaux (au niveau de ce que l'on appelle brousse) et sur les sols sableux des jachères. Le sol nu des plateaux est caractérisé par un encroûtement important lié aux fortes pluies en saison des pluies qui ruissellent à la surface. Ces pluies s'infiltrant dans les arcs de végétation et jouent ainsi un rôle important pour le maintien de ces fourrés (Galle *et al.*, 1997).

Les jachères sont des terres temporairement non cultivées, elles permettent au sol de se régénérer. Associées au pâturage, l'effet est accentué et reste le seul moyen de palier aux coûts des intrants trop élevés pour les populations d'Afrique de l'Ouest. Au Niger, les jachères se retrouvent sur la jupe sableuse (en bordure de plateau) là où l'on retrouve les nombreuses cultures de mil et sorgho notamment. Les plateaux sont des lieux de passage pour le bétail ainsi que les fournisseurs de bois, il y a donc des piétinements potentiels sur les zones qui nous intéressent pour l'étude de la croûte.

1.3. Projet BioCrust

Le projet BioCrust datant de 2008 est un projet ANR. Le programme concerné s'intitule « Vulnérabilité : Milieux, Climat et Sociétés » et s'inscrit sur le thème de l'énergie développement durable et environnement. BioCrust est financé à hauteur de 861 959 euros pour une durée de 36 mois à compter du 1^{er} janvier 2009 (Annexe B). Le projet BioCrust concerne la dynamique spatio-temporelle des croûtes biologiques avec notamment l'utilisation de la télédétection. L'objectif est de proposer un outil pour le suivi de la dégradation des sols. Les croûtes biologiques vont être utilisées comme indicateur de l'altération des écosystèmes sahéliens notamment face aux variations des conditions climatiques et à la pression humaine croissante.

Le projet BioCrust s'appuie sur un réseau de collaboration qui regroupe des laboratoires de recherche publics et privés basés en France et à l'étranger : l'Université de Reims Champagne Ardenne (EA 3795 GEGENA, Reims), le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM-ARN, Orléans), l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, Niamey, Niger), le bureau d'étude des Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS, Villeneuve d'Ascq), le Centre de l'Ecologie Estuarienne et Marine de l'Institut d'Ecologie de Hollande (NIOO-CEMO, Yerseke, Hollande), l'institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement (CEMAGREF, UMR TETIS, Montpellier), l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA, UMR FARE, Reims), le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS, UMR Géosciences Azur, Nice) ainsi que l'Université Catholique de Louvain (UCL, Département de Géographie, Louvain La Neuve, Belgique).

Le projet comporte quatre axes de recherche (*cf.* Annexe C). Le premier axe concerne la caractérisation des croûtes biologiques afin de pouvoir évaluer la sensibilité de ces croûtes au changement climatique et aux changements d'usage des terres. Cela comprend l'étude des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des croûtes et donc également la connaissance des microorganismes présents ainsi que l'étude des substrats sur lesquels ces croûtes évoluent. Le deuxième axe concerne l'intégration spatiale et la modélisation des fonctions écologiques des croûtes biologiques. Il consiste en l'utilisation de l'imagerie satellite et le traitement géostatistique des données collectées sur le terrain dans le but notamment d'élaborer des cartes et outils nécessaires au suivi de l'évolution des croûtes. C'est au sein de cet axe que s'inscrit notre travail de recherche. Le troisième axe se consacre à la validation des outils d'intégration et de spatialisation à l'échelle régionale. Il s'agit de valider puis vérifier à l'échelle régionale des outils de spatialisation mis en place à l'échelle locale. Cette étape est nécessaire pour permettre le suivi de l'évolution de la répartition des croûtes. Enfin, le dernier axe concerne la valorisation et la dissémination des résultats de recherche et des connaissances. Il comprend également une enquête sur les perceptions des acteurs locaux vis-à-vis des croûtes biologiques et leur sensibilité face aux changements climatiques et aux changements d'usage de terres puis l'élaboration d'outils de transfert de connaissances scientifiques.

Ainsi le projet BioCrust vise une approche pluridisciplinaire de l'étude des croûtes biologiques. Elle comprend tout aussi bien la mise en place d'une méthode d'identification des croûtes biologiques par imagerie radar satellitale que l'étude des croûtes sur l'écosystème sahélien (Malam Issa *et al.*, 2009). Il est prévu dans ce projet de travailler sur trois sites d'expérimentations au Niger pour l'étude de la dynamique spatio-temporelle des croûtes et d'avoir deux sites de validation (au Mali et au Burkina) bien que ce point soit actuellement en pourparlers.

Les résultats du projet contribueront à la compréhension des processus microbiologiques à la surface des sols. Cela pourrait faciliter le développement d'indicateurs régionaux de dégradations des sols qui serviraient à identifier les zones à haut risque d'érosion avant qu'il ne soit trop tard pour intervenir.

1.4. Cartographie de la croûte biologique par imagerie radar

L'objectif de notre étude menée par l'UMR TETIS (CEMAGREF) s'intègre dans l'élaboration d'un outil de suivi de la dégradation des sols. Dans ce travail de recherche méthodologique nous nous intéresserons au potentiel de l'imagerie radar à cartographier les croûtes biologique de surface.

Les images radars, bien que plus complexes à analyser que les images optiques, vont permettre d'apporter des renseignements différents sur la cible (rugosité de surface et humidité notamment) et une observation de la zone d'étude quelle que soit la météo. Nous allons étudier la variation du signal radar face à l'humidité du sol dans un premier temps, avant de cartographier l'humidité du sol. L'étude menée par Zhang *et al.*, 2007, en Chine a montré que les croûtes biologiques se développaient mieux en présence d'une humidité plus importante. Des facteurs favorables au développement des croûtes ont été préalablement relevés : lumière, humidité, absence de piétinement, absence de travail du sol ; ainsi que des facteurs défavorables : sécheresse, piétinement par les hommes et le bétail.

Chen *et al.*, 2005, puis Zhang *et al.*, 2007, ont étudié le potentiel de l'imagerie satellite hyperspectrale pour cartographier la répartition de la croûte biologique dans le désert du Gurbantunggut en Chine en couplant des données de télédétection avec des relevés terrains. Cependant, ils ont montré que la croûte biologique n'est détectable qu'à partir d'une couverture au sol de la croûte supérieure à 33%. Ustin *et al.*, 2009, montrent que l'évolution de la croûte biologique peut être suivie dans les déserts du Sud Ouest des Etats-Unis avec l'utilisation de la spectroscopie. Cependant, dans ces études, la croûte biologique est majoritairement constituée de lichen et est différente de la croûte biologique sahélienne nettement plus fine et impossible à détecter directement par imagerie satellite.

Puisque nous faisons l'hypothèse que la croûte est liée à l'humidité du sol, nous allons dans un premier temps tenter de cartographier l'humidité du sol (sol nu ou avec peu de végétation) à l'aide de l'imagerie radar. De nombreuses études (Ulaby *et al.*, 1996 ; Baghdadi *et al.*, 2006), ont démontré qu'avec l'imagerie radar à synthèse d'ouverture (SAR) il était possible d'estimer l'humidité du sol avec une RMSE¹ d'environ 5% d'humidité.

¹ Root Mean Square Error ou erreur quadratique moyenne : racine carrée de la moyenne des différences au carré entre valeurs estimées et mesurées

Nous chercherons à établir une relation linéaire entre coefficient de rétrodiffusion et humidité du sol de la même façon que dans le travail effectué en France par Baghdadi *et al.*, 2007, qui a permis d'estimer l'humidité du sol avec une précision proche de 5%. Cette étude utilise la relation suivante qui reste approximative puisque négligeant la rugosité de surface :

$$\sigma_{db}^{\circ} = a m_v + b$$

- σ_{db}° : coefficient de rétrodiffusion radar en décibel
- m_v : humidité du sol
- a : coefficient dépendant à la fois de l'angle d'incidence du radar et de la polarisation¹.
- b : coefficient principalement contrôlé par l'angle d'incidence, la polarisation et la rugosité de surface du sol.

Zribi et Dechambre (2002) ont montré en utilisant des images radars (images avec longueur d'onde de polarisation HH² et angle d'incidence³ de 39°) que la relation linéaire était de l'ordre de 0,22 db/% pour des humidités du sol allant de 5 à 30%. A partir de 30-35%, on obtient une saturation et ensuite une forte décroissance du signal. Sur les sols nus sahéliens relativement secs, nous nous attendons donc à obtenir une relation linéaire puisque nous sommes sur des valeurs bien inférieures au seuil de saturation en eau du sol. Cependant, dans ces précédentes études, les humidités du sol prennent des valeurs comprises entre 5 et 40% tandis que dans notre cas au Sahel, les humidités du sol ne dépassent guère 20% (Zribi *et al.*, 2007). De ce fait une précision de l'ordre de 5%, pourrait être moins satisfaisante dans notre étude où les valeurs d'humidité sont plus faibles.

L'humidité du sol affecte le signal radar et cet aspect nous permet de mener à bien notre étude. Cependant la croissance de la végétation et la présence d'arbres va également influencer le signal radar. Il faudra donc veiller à ne pas imputer l'augmentation du signal à une forte humidité du sol lorsqu'il y aura de la végétation au sol.

2. Matériel et Méthode

2.1. Sites d'étude et relevés terrains au Sahel

Dans le Sahel, nous avons deux sites d'étude qui se situent au Niger : Banizoumbou (13,53°N ; 2,67°E) et Tamou (12,80°N ; 2,14°E) que l'on retrouve sur la Figure 3. Nous nous limiterons à ces deux sites pour tenter d'établir une méthodologie de cartographie de l'humidité du sol qui soit transposable à d'autres sites sahéliens.

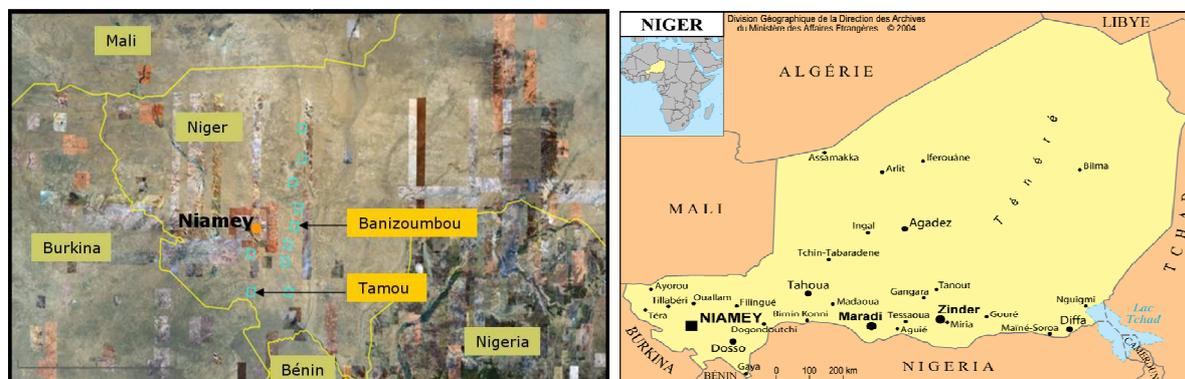


Figure 3 : Situation des sites d'étude de Banizoumbou et Tamou au Niger dans le Sahel

¹ Orientation du vecteur électrique de l'onde électromagnétique

² Ondes émises et captées Horizontalement

³ Angle formé par la normale à la surface avec l'onde électromagnétique incidente

Une série de relevés associant un point GPS à des caractéristiques du milieu nous permettra d'établir des relations. Il s'agit de l'humidité du sol, présence de croûte avec pourcentage d'occupation (approximatif), type de sol, piétinements observés et autres observations.

L'humidité du sol sur le terrain a été mesurée à l'aide d'une sonde TDR¹. Des séries de relevés terrain ont été effectuées à différentes dates entre juillet et octobre 2009 et sur différents types de sol à Tamou et Banizoumbou de manière à pouvoir établir des relations entre signal radar et humidité du sol. Ce sont les cinq premiers centimètres du sol qui sont concernés. En effet, les images radar utilisées sont en bande X (longueur d'onde de 3 cm) et la profondeur de pénétration de l'onde théorique est de l'ordre de 5-10cm. La mesure TDR se base sur la relation entre la constante diélectrique (ϵ) du sol et la teneur en eau volumique (θ) du même sol. La méthode d'estimation de l'humidité par sonde TDR étant moins précise que la méthode gravimétrique, une correction doit être apportée aux humidités relevées par sonde TDR à l'aide d'une relation linéaire. Les mesures gravimétriques utilisent cette formule :

$$\% \text{ d'humidité du sol} = (\text{masse humide} - \text{masse sèche}) / \text{masse sèche}$$

Les deux types de mesures réalisées sur certains points ont permis d'établir la relation suivante :

$$\text{Humidité volumique gravimétrique} = 0,91 \text{ Humidité}_{TDR} + 0,311$$

Des équipes de l'IRD se sont rendues sur place afin d'effectuer ces relevés. Les mesures d'humidité effectuées sur Banizoumbou sont synchrones avec l'acquisition des images radars (deux heures maximum de décalage) mais sur Tamou il peut y avoir jusqu'à une journée d'écart. De ce fait, il faudra rester critique quant aux relations obtenues puisqu'en 24 heures il peut y avoir eu des précipitations ou encore le sol peut subir un dessèchement non négligeable.

Par la suite, des fichiers vecteurs ont été créés sous Erdas² avec ces vérités terrains. Ces vecteurs permettent l'affichage des informations de façon localisée sur les images radar ou optique. Les renseignements sur le type de projection doivent être apportés aux vecteurs pour une bonne superposition.

2.2. Images Radar

2.2.1. Imagerie satellite TerraSAR-X

Le terme radar est l'acronyme de *RA*dio *DE*tectio*N* *AN*d *R*ang*ING* (détection et télémétrie par onde radio). Un des intérêts de l'imagerie radar est la possibilité d'avoir des images quelles que soient les conditions météorologiques. De plus, le signal radar est très sensible aux caractéristiques du milieu. Le fonctionnement du système radar se décompose en deux actions principales :

- Emettre un signal radio vers une scène
- Capter le signal rétrodiffusé de la scène

Le radar fournissant lui-même l'énergie requise, le système de télédétection est qualifié d'actif (Centre Canadien de Télédétection, 2005).

¹ Time Domain Reflectometry

² Logiciel de traitement d'image

Le signal radar montre une forte sensibilité à la rugosité et à la constante diélectrique du milieu. La profondeur de pénétration de l'onde radar augmente avec la longueur d'onde¹ et diminue avec l'humidité du sol. Les images radar permettent de différencier certaines caractéristiques qui ne peuvent être discernées par les capteurs optique et notamment l'humidité au sol. En effet, l'humidité présente dans la matière en modifie les propriétés électriques. La présence d'humidité augmente la constante diélectrique du milieu. Ainsi, le signal radar augmente avec l'humidité du sol (Dallemand, 1991). C'est essentiellement sur cette caractéristique de l'imagerie radar que nous allons nous appuyer afin de cartographier l'humidité du sol.

La télédétection radar n'utilise qu'une portion du spectre, à savoir des longueurs d'onde situées entre 1 mm et 1 m, correspondant à des fréquences qui s'étendent de 0,3 GHz à 300 GHz. Dans notre étude, les images radar proviennent du capteur TerraSAR fonctionnant en bande X. La bande X correspond à des longueurs d'onde de 2,4 à 3,75 cm, soit une fréquence de 12,5 à 8 GHz (Centre Canadien de Télédétection, 2005). Ces petites longueurs d'onde ne permettent a priori qu'une faible pénétration dans le sol. Notre objectif est de cartographier l'humidité du sol. En présence de végétation dense, la contribution du sol nu sur le signal radar est faible. De ce fait, seuls les sols nus ou avec peu de végétation sont utilisés. Il faudra donc veiller à ce que le couvert végétal soit suffisamment faible pour ne pas perturber la cartographie de l'humidité du sol.

TerraSAR-X est doté d'un capteur RSO² (désigné aussi par l'abréviation anglo-saxonne SAR³) c'est à dire que le système radar est à visée latérale et permet ainsi l'acquisition de données avec une bonne résolution spatiale. En effet, le radar à visée latérale accumule des données d'images tout en parcourant sa trajectoire. Un même point est donc illuminé plusieurs fois. Les données ainsi accumulées sont par la suite traitées afin de produire une image radar. TerraSAR-X est capable d'acquérir des données jusqu'à un mètre de résolution, quelles que soient les conditions météorologiques, de jour comme de nuit (Centre Canadien de Télédétection, 2005).

L'antenne émet des impulsions d'ondes en direction de la terre et l'onde arrivant au sol subit des phénomènes de réflexion, transmission et absorption. Par conséquent, l'énergie rétrodiffusée arrivant à l'antenne réceptrice est différente de celle émise. L'onde radar interagit avec chaque élément de la surface et du couvert de la surface et est diffusée dans toutes les directions. Il sera nécessaire d'utiliser une équation reliant énergies reçue et transmise en prenant en compte les paramètres du capteur ainsi que les caractéristiques de la surface (Probert-Jones, 1962) :

$$Pr/Pt = (G^2 \lambda^2 \sigma^o) / ((4\pi)^3 R^4)$$

Pr : Puissance reçue	λ : longueur d'onde
Pt : Puissance transmise	σ^o : coefficient de réflexion de la cible
G : gain de l'antenne	R : distance entre la cible et l'antenne

¹ La longueur d'onde est la plus courte distance entre deux sommets consécutifs d'une onde

² Radar à Synthèse d'Ouverture

³ Synthetic Aperture Radar

2.2.2. Nos images

Quinze images radar multi-dates très haute résolution spatiale de type TerraSAR-X ont été acquises sur les sites des bassins versants de Banizoumbou et de Tamou. Les deux types de saison sont représentés avec une seule image par site pour la saison sèche puisque l'humidité de surface du sol en saison sèche est très proche de 0. Nous avons différentes dates d'acquisition pour la saison humide. Nos images sont acquises en mode SpotLight (cf. Annexe D sur les différents modes d'acquisition) avec une polarisation parallèle HH et une résolution d'environ un mètre. Les images mises à disposition sont répertoriées dans le tableau 1.

Site	Date d'acquisition	Saison	Heure d'acquisition	Angle d'incidence	Polarisation	Type d'orbite
Banizoumbou	29 mai 2009	sèche	17h51 TU ¹	27°	HH	Ascendante
	01 juillet 2009					
	23 juillet 2009	humide				
	14 août 2009					
	25 août 2009					
	16 septembre 2009					
	08 octobre 2009					
	30 octobre 2009					
Tamou	04 juin 2009	sèche	05h44 TU	39°	HH	Descendante
	07 juillet 2009	humide				
	29 juillet 2009					
	31 août 2009					
	11 septembre 2009					
	22 septembre 2009					
	14 octobre 2009					

Tableau 1 : Liste des images TerraSAR-X

Il semble que la sensibilité du signal radar à l'humidité du sol soit importante pour des angles d'incidence relativement faibles ($\leq 37^\circ$) (Baghdadi *et al.*, 2007). Dans notre cas, les angles d'incidence sont respectivement de 27° et 39° sur Banizoumbou et Tamou ce qui devrait tout de même nous permettre de mener à bien notre étude. Le fait que les angles d'incidences soient différents sur ces deux sites va nous contraindre à étudier les deux sites séparément. En effet, le signal diminue en fonction de l'angle d'incidence.

2.2.2. Prétraitements des images

Afin de rendre nos images utilisables, une série de traitements va être effectuée sur les images brutes TerraSAR-X. Une calibration radiométrique sera suivie du géoréférencement.

2.2.2.1. Corrections radiométriques

Le but de l'étalonnage radiométrique est de prendre en compte toutes les contributions des valeurs radiométriques qui ne sont pas liées aux caractéristiques de la cible afin que les valeurs de rétrodiffusion des cibles puissent être comparées entre elles (si mêmes longueur d'onde, angle d'incidence et polarisation). La calibration radiométrique est en effet nécessaire pour obtenir des images dont les informations sur les pixels² auront un sens physique. Une transformation des valeurs brutes délivrées par le fournisseur de l'imagerie satellite en coefficient de rétrodiffusion est effectuée afin d'étalonner et de corriger les données fournies.

¹ Temps Universel. Heure nigérienne = TU +1 heure

² Picture Element

Durant l'acquisition d'une image, le capteur TerraSAR-X mesure le bruit. Cela va permettre de modéliser le bruit ou NEBN¹ afin de pouvoir le soustraire au coefficient de rétrodiffusion et obtenir ainsi une image avec un moindre bruit. Les paramètres relatifs à la modélisation de NEBN sont contenus dans le fichier *header*² du produit. Le calcul des coefficients de rétrodiffusion standardisés et normalisés dépend de la luminosité radar et de la géométrie globale de la cible. Pour le calcul du coefficient de rétrodiffusion (σ°) nous devrions donc tenir compte de l'angle d'incidence (θ). Voici la formule utilisée pour ce calcul (Infoterra, 2008) :

$$\sigma^\circ = (K_s \cdot |DN|^2 - NEBN) \times \sin(\theta)$$

- θ : angle d'incidence
- K_s ou *Calibration Factor* : constante de calibration propre à la configuration de l'antenne satellite, disponible dans le fichier *header*
- DN : valeur du pixel ou compte numérique
- NEBN : contribution du bruit

2.2.2.2. Images radars en linéaire ou en décibel

L'image radar obtenue après calibration radiométrique est une image qui contient les coefficients de rétrodiffusion. Ils peuvent être exprimés sur une échelle linéaire, ou bien en décibels (db). Une échelle logarithmique permet une meilleure exploitation visuelle de l'image. En effet, l'image exprimée en linéaire présente une dynamique qui ne permet pas d'interprétation qualitative à cause des très fortes différences de radiométrie. La dynamique des détails « observables » par l'œil est négligeable et l'on ne distingue que des pixels blancs répartis sur un fond noir. Voici la formule qui permet de transformer l'image linéaire (σ°) en décibel (σ°_{db}) :

$$\sigma^\circ_{db} = 10 \times \log_{10}(\sigma^\circ)$$

Pour un usage à des fins d'analyse statistique, il est nécessaire de disposer de l'image en linéaire. Par la suite, il est possible de convertir les données statistiques en décibel mais établir des statistiques directement sur les valeurs en décibel serait incorrect.

Enfin, pour limiter l'influence du bruit, les pixels dotés de valeurs aberrantes (bruit $> K_s DN^2$) peuvent subir un forçage à 0. En effet, certains pixels ont un signal localement inférieur au bruit et il serait incohérent de les prendre en compte dans les calculs. Lors de l'emploi de l'outil statistique sur l'image, nous veillons à exclure de l'ensemble de pixels analysés les coefficients de rétrodiffusion ayant des valeurs nulles afin d'éliminer la prise en compte de pixels aberrants dans l'étude.

2.2.2.3. Géoréférencement

Cette étape est une correction géométrique des images. Pour le géoréférencement de nos images TerraSAR-X, nous avons utilisé des images optiques acquises sur les mêmes sites et préalablement géoréférencées avec une grande précision par l'équipe du SIRS³. Chacune des 15 images radar est géoréférencée en repérant des points stratégiques (une cinquantaine répartis sur l'image) appartenant à un même objet au sol sur les deux images optique et radar. La difficulté vient du fait que sur nos sites il n'y a pas réellement de route ou de bâtiment et

¹ Noise Equivalent Beta Naught

² Fichier *.xml* qui contient les paramètres d'acquisition du capteur et de géométrie de l'orbite du satellite mais également d'autres informations telles que les dates et heures d'acquisition

³ Bureau d'étude sur les Systèmes d'Information à Référence Spatiale

que les points d'eau ne sont pas totalement fiables puisque leur étendue varie au cours de l'année.

Une interpolation par convolution cubique a été utilisée. Cette méthode permet de conserver la géométrie des éléments (Centre Canadien de Télédétection, 2005). Sur nos images, le système de projection à préciser lors du géoréférencement est de type UTM¹ zone 31°Nord et le système géodésique est WGS 84².

Les images sont alors parfaitement superposables et les interprétations visuelles sont donc possibles, ainsi que l'affichage de fichiers vecteurs correspondant aux relevés effectués sur le terrain (avec latitude et longitude données par un GPS³). L'Annexe E montre un aperçu de ces images radar.

2.2.2.4. Effets de pente

Les effets de pente et de rugosité pourront être minimisés en utilisant la différence de deux images sur un même site. Si l'on fait l'hypothèse que l'humidité du sol est nulle sur les sols nus en saison sèche et que la rugosité du sol est identique sur l'année, en soustrayant une image de saison sèche aux images de saisons humides, nous obtenons des informations, corrélées avec l'humidité, avec un effet de pente et de rugosité minimisé.

2.2.2.5. Analyse des informations face à l'effet de chatoiement

Un important chatoiement, appelé également *speckle* est présent sur les images radars. Il est possible de diminuer ce bruit pour une meilleure visualisation des images mais pour notre étude cela n'est pas nécessaire puisque nous utiliserons des moyennes sur des zones précises de l'image et que nous ne voulons pas altérer les informations contenues dans les images.

Pour analyser les informations sur les images radars, il sera important de ne jamais prendre en compte le coefficient de rétrodiffusion⁴ (σ^0) contenue dans un seul pixel de façon indépendante. En effet, en imagerie radar, à cause du chatoiement, la valeur contenue dans un pixel n'a pas de sens à elle seule. Il faudra extraire l'information moyennée sur un ensemble de pixels sur une zone la plus homogène possible.

2.3. Images optiques

2.3.1. Images KOMPSAT-2

Des images optiques hautes résolutions spatiales KOMPSAT⁵-2 ont été acquises sur les bassins versants de Banizoumbou et de Tamou. Ces images ont un mètre de résolution pour le canal en mode panchromatique (Pan) et quatre mètres de résolution pour les images couleur multi-spectrales (MS) composées de quatre bandes (bleu, vert, rouge et proche infrarouge). L'acquisition simultanée d'images Pan et MS permet la création d'images fusionnées à un mètre de résolution. Dans le cadre de cette étude, deux images sur Banizoumbou (06 juillet et 23 septembre 2009) et quatre sur Tamou (16 juin, 21 août, 13 novembre et 26 septembre 2009) ont été utilisées.

¹ Universal Transverse Mercator

² World Geodesic System of 1984

³ Global Positioning System

⁴ Le coefficient de rétrodiffusion est assimilable au pouvoir réflecteur de la surface éclairée

⁵ KOrean MultuPurpose SATellite

Comme vu précédemment, ces images optiques nous permettent de géoréférencer les images radar mais aussi de fournir une carte d'occupation du sol. Elles aident également à la photo-interprétation des images radar.

2.3.2. Carte d'occupation du sol et extraction des sols nus

La société SIRS s'est chargée de fournir une carte d'occupation du sol à partir d'images optiques KOMPSAT-2 à leur disposition. Cette PIAO¹ est, d'un point de vue technique, un mélange de classification et d'interprétation. La carte d'occupation n'a pas été produite date par date et ne tient pas compte de l'évolution des types d'occupation des sols. Cette cartographie permet de distinguer sept classes selon le modèle exposé sur la Figure 4 (eau, fourré, jachère, parcelle cultivée, sol nu, sol nu caillouteux et zone urbaine). Concernant la classe *eau*, c'est le lit majeur des rivières qui est pris en compte. La classe *fourré* représente essentiellement la végétation située sur les plateaux, et les *parcelles cultivées* sont la plupart du temps plantées en mil.

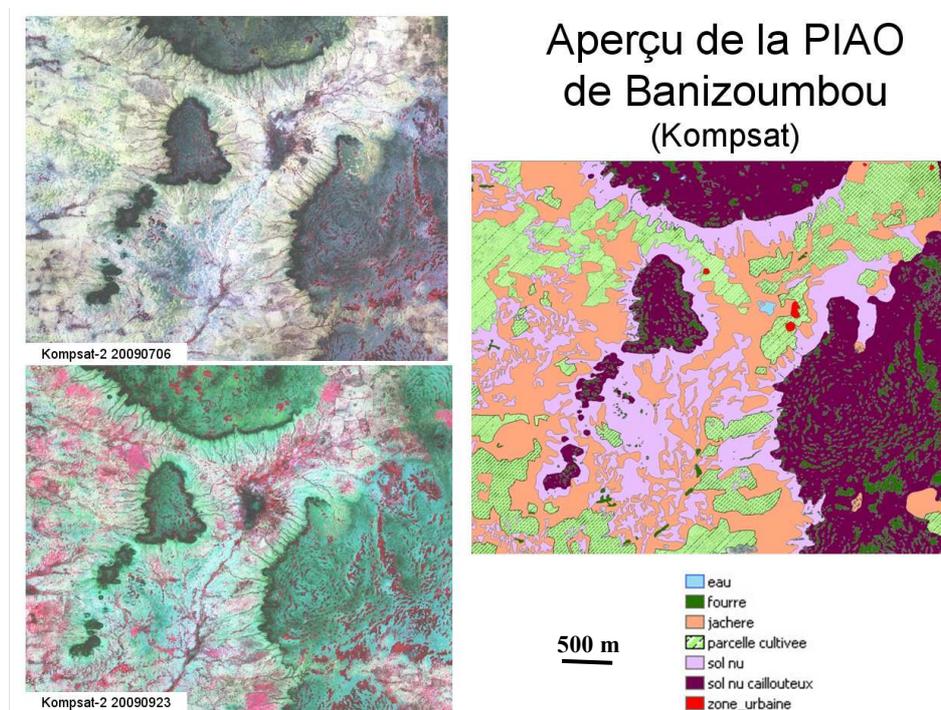


Figure 4 : Aperçu de la classification des types d'occupation du sol (SIRS, 2010)

Ces images ont été récupérées en format vecteur. Pour travailler sur Erdas une transformation en fichier *raster* est obligatoire. Cette conversion est un traitement très lourd mais nous avons tout de même pu obtenir des images rastérisées avec des pixels de 2x2m. Etant donné que nous souhaitons travailler le plus précisément possible et que les images radars sont de résolution 1x1m, nous avons effectué un rééchantillonnage sur ENVI² de façon à obtenir des pixels de 1x1m pour les cartes d'occupation des sols. Le rééchantillonnage n'ajoute pas de la précision par rapport aux images en 2x2m puisque l'opération consiste simplement à « découper » chaque pixel en 4 pixels identiques mais cela permet d'homogénéiser avec la résolution des images radars, ce qui sera nécessaire pour utiliser la carte d'occupation du sol par la suite.

¹ Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur

² Logiciel d'analyse d'images

Pour l'estimation de l'humidité du sol, nous nous intéressons strictement aux sols nus. Ainsi, nous avons masqué les autres classes d'occupation du sol selon la classification faite par le SIRS. Les parcelles cultivées, l'eau, l'habitat et les fourrés sont masqués. De plus, des seuils sont appliqués de façon à exclure les pixels aberrants (signal inférieur au bruit) et les pixels avec des coefficients de rétrodiffusion trop élevés correspondant à des arbres isolés (au dessus de -7db pour Tamou et -6db pour Banizoumbou).

Cependant, avec cette méthode il reste des zones végétalisées non masquées (petits bosquets, parcelles cultivées mal classifiées, jachère où la végétation est importante). Ce problème est plus largement rencontré sur Tamou que sur Banizoumbou de par les conditions environnementales du site. En effet, après plusieurs tests, nous avons pu remarquer qu'en utilisant cette méthode il y avait des incohérences dans les résultats à cause de cette végétation non masquée. Pour parer à cela, nous avons calculé le NDVI¹ sur les images optiques des deux sites en septembre :

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$$

- PIR correspond à la bande du proche-infrarouge (longueur d'ondes de 0,76 à 0,90 μm)
- R correspond à la bande rouge (longueur d'ondes de 0,63 à 0,69 μm)

Notons que nous n'obtenons pas un véritable NDVI puisque les images optiques n'ont pas été corrigées de l'effet atmosphérique. Mais cela ne nous pose pas de problème pour notre manipulation. Nous prenons l'image optique de septembre car c'est à ce moment que la végétation est la plus importante, et il est donc d'autant plus facile d'isoler les parcelles cultivées qui aurait pu apparaître comme étant du sol nu quelques mois plus tôt. Puis par photo-interprétation un seuil de NDVI est fixé de façon à ce que les valeurs supérieures à ce seuil correspondent à la présence de végétation au sol. Le seuil obtenu est de -0,2 sur Banizoumbou et de 0,25 sur Tamou. Le masque utilisé dans notre étude correspond donc à la superposition du masque des occupations du sol et du masque de végétation que nous venons de voir.

Enfin, sur l'image optique utilisée pour calculer le NDVI, la présence de nuages va poser problème. En effet, certaines zones sont fortement végétalisées, mais à cause de la présence de nuages elles ne sont pas masquées. Nous devons donc veiller à ne pas extrapoler sur l'humidité de ces zones qui ne sont finalement pas du sol nu. Aussi, des masques dessinés manuellement autour des nuages seront ajoutés.

2.4. Méthodologie de cartographie de l'humidité

2.4.1. Relations entre signal et humidité

Dans un premier temps, nous cherchons une relation entre coefficient de rétrodiffusion et humidité relevé sur le terrain. Pour ce faire, nous calculons la moyenne des coefficients de rétrodiffusion sur des AOI² de l'image radar en linéaire. Ces AOI correspondent à des zones homogènes de plusieurs pixels autour des relevés GPS sur le terrain ; il faut donc afficher sur l'image radar le fichier vecteur avec les informations sur les humidités terrain (acquises à la même date que l'image). Les AOI situées à proximité et ayant une humidité mesurée similaire sont regroupées et leurs coefficients de rétrodiffusion sont moyennés. L'Annexe F contient un aperçu de cette méthodologie. Aussi, nous séparons les résultats obtenus sur Banizoumbou et Tamou car les angles d'incidence sont différents (27° et 39° respectivement).

¹ Normalized Difference Vegetation Index ou indice de végétation normalisé

² Area Of Interest ou région d'intérêt

Une vérification est faite AOI par AOI en s'appuyant notamment sur les descriptifs terrain et les images optique. Il arrive qu'un point se situe à proximité de deux zones différentes, cela se repère par interprétation visuelle sur l'image radar en décibel, et étant donné qu'il existe une marge d'erreur sur le positionnement des points GPS et sur le géoréférencement de nos images, il arrive qu'il faille modifier l'AOI.

Il est important de prendre en compte l'image radar acquise à la même date que les relevés sur le terrain. En effet, il ne serait pas judicieux de comparer le signal à une date donnée avec une humidité correspondant à une autre date. Cependant, pour certaines images, les mesures terrain d'humidité ont été réalisées le lendemain (images radars du 29 juillet, 31 août et 22 septembre pour des relevés terrains du 30 juillet, 1^{er} septembre et 23 septembre). L'image radar du 11 septembre ne peut être exploitée, faute de relevé terrain ce jour là. Les données relatives au 1^{er} septembre ne seront pas utilisées en raison d'une pluie importante, dans la nuit du 31 août au 1^{er} septembre, qui modifie de façon importante l'humidité du sol. Le tableau 2 récapitule l'ensemble des images et des relevés terrain utilisés.

Site	Images radar		Relevés terrain				Commentaires
	Date d'acquisition (2009)	Heure d'acquisition (TU)	Date de prélèvement (2009)	Heure de prélèvement (TU)	Nombre de prélèvements	Humidités mesurées dans les bas-fonds ¹	
Banizoumbou	29 mai	17h51	-	-	-	-	Humidité estimée nulle en saison sèche, pas de prélèvement
	01 juillet	17h51	-	-	-	-	idem
	23 juillet	17h51	23 juillet	10h30-11h30	21	0 - 5.28%	7 h d'écart
	14 août	17h51	14 août	17h15-18h30	9	7.41 - 10.70%	ok
	25 août	17h51	25 août	17h30-19h00	11	4.09 - 9.56%	ok
	16 sept	17h51	16 sept	17h40-18h40	9	2.73 - 5.41%	ok
	08 octobre	17h51	08 octobre	17h35-18h35	10	0 - 3.81%	ok
	30 octobre	17h51	30 octobre	-	11	1.68 - 3.70%	Heure de prélèvement manquante
Tamou	04 juin	05h44	-	-	-	-	Humidité estimée nulle en saison sèche
	07 juillet	05h44	07 juillet	4h30-5h45	6	3.00 - 3.13%	ok
	29 juillet	05h44	30 juillet	-	14	9.40 - 12.63%	Heure de prélèvement manquante, probablement 24 h d'écart
	31 août	05h44	01 sept	5h25-6h45	13	16.85 - 21.49%	Données inexploitable, forte pluie dans la nuit du 31/08 au 01/09
	11 sept	05h44	-	-	-	-	Pas de prélèvement à cette date
	22 sept	05h44	23 sept	5h20-6h30	9	5.23 - 9.79%	24 h d'écart
	14 octobre	05h44	14 octobre	5h30-6h40	7	0 - 3.17%	ok

Tableau 2 : Comparaison entre images radar acquises et relevés terrain disponibles

Comme vu dans la méthodologie d'extraction du sol nu, la présence d'arbres isolés est extrêmement gênante et pour établir ces relations entre signal radar et humidité du sol, les images utilisées doivent impérativement subir un seuillage. Sur les images en linéaire, les valeurs des pixels supérieures à un certain seuil ont été mises à 0 et n'ont donc pas été pris en compte lors des calculs statistiques sur les AOI (Cf. 2.3.2). Cela a permis d'éliminer les arbres

¹ Les humidités mesurées sur les plateaux sont nulles, nous ne présentons donc ici seulement celles des bas-fonds

dans le calcul de la moyenne des coefficients de rétrodiffusion de chacune des AOI. Il a fallu faire de nombreux essais afin d'optimiser les seuils utilisés et d'améliorer ainsi les résultats ; la présence de quelques arbres pouvant suffire à augmenter de façon illusoire le coefficient de rétrodiffusion du sol. Ce phénomène était plus gênant sur Tamou que sur Banizoumbou, ce bassin versant est en effet plus boisé.

Pour ne plus négliger les effets de pente et de rugosité, nous avons utilisé la différence entre l'AOI d'une image de saison humide et la même AOI sur une image de saison sèche. Le rapport ($\Delta\sigma^\circ$) devrait tenir compte de l'humidité du sol et non plus de la rugosité, comme le montre la relation suivante :

$$\Delta\sigma^\circ_{db} = (a m_{v_{saison\ humide}} + b) - (a m_{v_{saison\ sèche}} + b) = a m_{v_{saison\ humide}}$$

Pour ce calcul, nous faisons l'hypothèse d'une part que la rugosité du sol est identique au cours de l'année et d'autre part que l'humidité du sol est nulle en saison sèche.

2.4.2. Inversion des relations obtenues

Les relations linéaires (différentes sur le site de Banizoumbou et de Tamou) ont ensuite été utilisées dans un programme de façon à cartographier les humidités du sol sur les images radar. Les deux méthodologies ont été appliquées : utilisation d'une seule image ($\sigma^\circ_{db} = a m_v + b$) et utilisation de deux images ($\Delta\sigma^\circ_{db} = a m_v$). Dans un premier temps une humidité est attribuée sur toute l'image date par date, puis sur des fenêtres de 100x100 pixels et enfin sur des fenêtres de 500x500 pixels et en prenant compte de l'occupation du sol. En effet, pour ce dernier test, le programme tient compte des différentes classes d'occupations du sol en les séparant lors des calculs. De ce fait, sur une même maille, nous n'auront plus seulement une unique valeur mais autant de valeurs que de classes présentes dans cette maille. En l'occurrence, nous pourrions avoir jusqu'à trois valeurs par maille puisque les classes d'occupations du sol conservées sont : *sol nu*, *sol nu caillouteux* et *jachère*. Notons que de nombreux aller-retour entre résultats obtenus et méthodologies utilisées ont été nécessaires afin de perfectionner la cartographie de l'humidité.

Pour utiliser ce programme, les images d'entrée doivent toutes avoir un nombre de lignes et de colonnes identique et les pixels doivent être de même taille (ici un mètre) car les calculs se font pixel par pixel. Pour ce faire, il faudra effectuer quelques prétraitements relativement simples.

En entrée de programme, nous utilisons pour le masque une image binaire codée en 0 (coefficient de rétrodiffusion supérieur ou inférieur à un certain seuil, NDVI supérieur à un certain seuil, occupation du sol différente du sol nu, bords des images radars ou d'occupation du sol avec données manquantes) et en 1 sur toutes les parties sur lesquelles le programme pourra travailler (sol nu au sens strict). En effet le radar permet d'estimer l'humidité volumétrique des cinq premiers centimètres de sol et pour une végétation de petite taille. Il semblerait qu'il y ait un potentiel de l'imagerie radar pour détecter l'humidité du sol sous couvert végétal, mais il n'existe cependant pas encore d'algorithme opérationnel à ce sujet (Ulaby *et al.*, 1996). Cette image binaire est obtenue à l'aide d'un Modeller sous Erdas. Nous utilisons également dans ces programmes l'image radar en linéaire ainsi que la carte d'occupation du sol dans certains cas. Les images utilisées par le programme doivent être exportées en format *generic binary* puis elles pourront être réimportées sous Erdas en format *image*.

En Annexe G, nous retrouvons un extrait du programme utilisé. Il fut créé par un autre étudiant et réutilisé pour notre étude après quelques modifications. Il nous faut rentrer quelques informations, telles que les chemins pour les images utilisées, renseigner le nombre de lignes et de colonnes, les bornes de coefficients de rétrodiffusion maximum et minimum à utiliser (*RadarMin* et *RadarMax* selon les seuils tel qu'expliqué précédemment), l'humidité maximum et minimum en sortie et des coefficients A et B correspondant à la relation d'inversion. Enfin, les *bornes* permettront de connaître le nombre de pixels utilisés dans le calcul, c'est en réalité un indice de fiabilité. Puis il suffira de lancer en ligne de commande l'un des trois types de test du programme que nous utiliserons.

Les images en sortie sont à nouveau à géoréférencer en entrant les paramètres initiaux liés au géoréférencement des images radars. Ainsi, nous obtenons des cartes d'humidité du sol. Notons que Zribi *et al.*, 2007, utilisent une méthode similaire pour cartographier l'humidité du sol : les effets de rugosité sont éliminés lors de l'estimation de l'humidité du sol en ôtant le signal radar de saison sèche du signal radar de saison humide.

3. Résultats et discussions

3.1. Corrélations entre coefficient de rétrodiffusion et humidité

3.1.1. Méthode 1: sans prise en compte de la rugosité

Nous obtenons une relation entre signal radar et humidité du sol comme le montre la Figure 5. Nous remarquons que la relation linéaire obtenue sur Banizoumbou est au dessus de celle de Tamou, ce qui est certainement lié à l'angle d'incidence plus faible sur Banizoumbou et au fait que le signal diminue en fonction de l'angle d'incidence. Ici le différentiel est d'environ 1,3 db entre les deux relations.

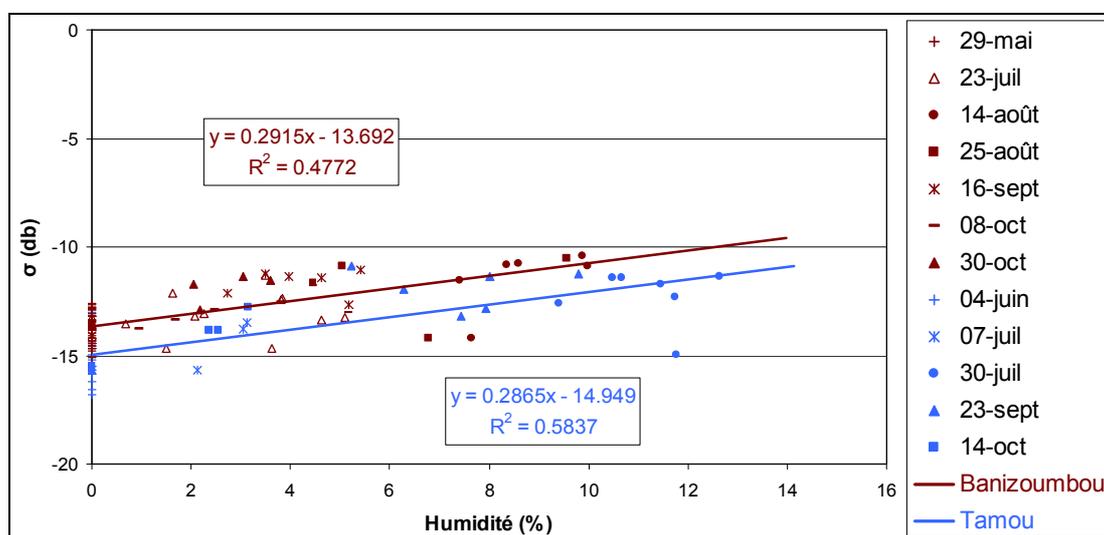


Figure 5 : Coefficients de rétrodiffusion des AOI en fonction de l'humidité du sol mesurée

Nous obtenons, sur les images radar de Banizoumbou, la relation : $\sigma_{db}^{\circ} = 0,2915 m_v - 13,692$; et sur celles de Tamou : $\sigma_{db}^{\circ} = 0,2875 m_v - 14,949$ avec un coefficient de détermination (R^2) d'environ 0,5 ce qui signifie que l'utilisation de ces relations linéaires permet d'expliquer 50% de la variation du signal. Les coefficients 0,287 et 0,292 sont proches pour les deux relations, ce qui n'est pas surprenant puisque nous nous attendions à ce qu'ils soient identiques. Mais notons que ces deux relations négligent les effets de rugosité et de pente, ce qui peut être relativement gênant notamment au niveau des plateaux.

3.1.2. Méthode 2 : prise en compte de la rugosité

Nous allons ici tenter de corriger l'effet de la rugosité à l'aide de la méthode expliquée précédemment (cf. 2.4.1). Cette méthode utilise la différence entre une image de saison humide et une image de saison sèche. Nous ne recherchons qu'une seule relation pour les deux sites d'étude car l'utilisation d'un différentiel a permis d'éliminer l'ordonnée à l'origine (*b*). De plus, c'est la même relation qui est obtenue quel que soit le site d'étude et l'incidence du radar. Ainsi, nous obtenons une relation correspondant à l'humidité du sol en fonction du différentiel du signal (AOI de saison humide moins AOI de saison sèche). Le différentiel est présenté en décibel mais les coefficients de rétrodiffusion sont bien issus des images en linéaire. Cette relation est présentée dans la Figure 6.

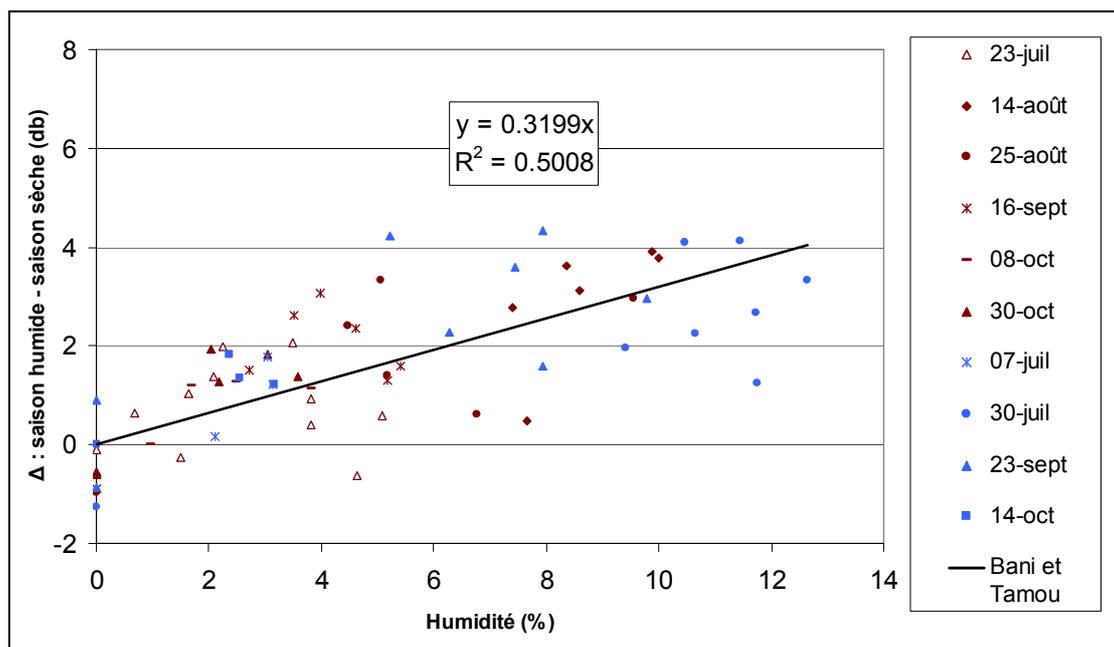


Figure 6 : Différentiel du signal des AOI (saison humide – saison sèche) en fonction de l'humidité du sol

La relation obtenue et que nous retiendrons est : $\Delta\sigma_{db}^{\circ}=0,3199m_v$. Notons qu'en séparant les résultats sur les deux sites nous obtenons sur Banizoumbou : $\Delta\sigma_{db}^{\circ}=0,3472m_v$; et sur Tamou : $\Delta\sigma_{db}^{\circ}=0,2998m_v$. Finalement, les différentes relations obtenues (méthodes 1 et 2) vont permettre par inversion de cartographier l'humidité sur l'ensemble des sols nus des deux sites d'étude.

Concernant les relations qui ont été établies entre le signal et le coefficient de rétrodiffusion, nous aurions peut-être pu obtenir des résultats plus proches de la réalité avec une plus grande rigueur dans l'acquisition des données en 2009. En effet, les conditions d'humidité du sol sont très dynamiques et d'autant plus au Sahel où le sol peut se dessécher très vite et où les pluies, quand elles arrivent, sont très importantes. Certains décalages ou manque de relevés terrains à certaines dates nous ont empêché la possibilité d'exploiter le maximum de paramètres d'entrée. Notamment sur le site de Tamou, nous n'avions que deux dates sur lesquelles acquisitions radar et relevés terrain étaient réellement synchrones. Nous avons utilisé d'autres données avec un décalage de 24 heures mais nous pouvons douter de l'exactitude des résultats qui en découlent. De plus, lors de la sélection des AOI sur les images radar, il y a une grande part de photo-interprétation qui engendre certains choix plus ou moins subjectifs. Cependant, le fait qu'avec la méthode 1 nous obtenons deux relations bien parallèles est plutôt positif. En effet, l'allure générale des courbes est celle qui était attendue, nous pouvons donc être rassurés sur les relations obtenues.

3.2. Cartographie de l'humidité

L'humidité du sol est cartographiée à l'aide du programme puis une comparaison entre résultats obtenus et mesures terrains est effectuée. Le but est de tester les deux méthodes de cartographie de l'humidité afin de définir celle qui sera utilisée par la suite en mode opérationnel. Ces deux méthodes seront chacune utilisées dans trois types de tests et sur les deux sites d'étude en fonction des dates d'images radar disponibles. Le premier test permettra de cartographier l'humidité du sol moyenne, à une date donnée, sur une image entière. Le deuxième fournira une carte avec une valeur par maille de 100x100 pixels (soit un hectare) et enfin le troisième une carte avec des mailles de 500x500 pixels et prenant en compte le type d'occupations du sol. Au final, pour les 15 dates (dont 12 de saisons humides) sur les sites de Banizoumbou et de Tamou, avec les 3 tests du programme et avec les 2 méthodes de relations, nous obtenons 81 cartes d'humidité (15x3+12x3).

3.2.2. Application de la méthode 1

Des cartes de l'humidité du sol sont obtenues sans tenir compte de l'effet de la rugosité. Le test 1 nous fournit dans un premier temps des cartes avec une valeur moyenne d'humidité du sol nu sur toute l'image radar. Cela nous permet de suivre l'évolution de l'humidité du sol au cours de l'année comme le montre la Figure 7.

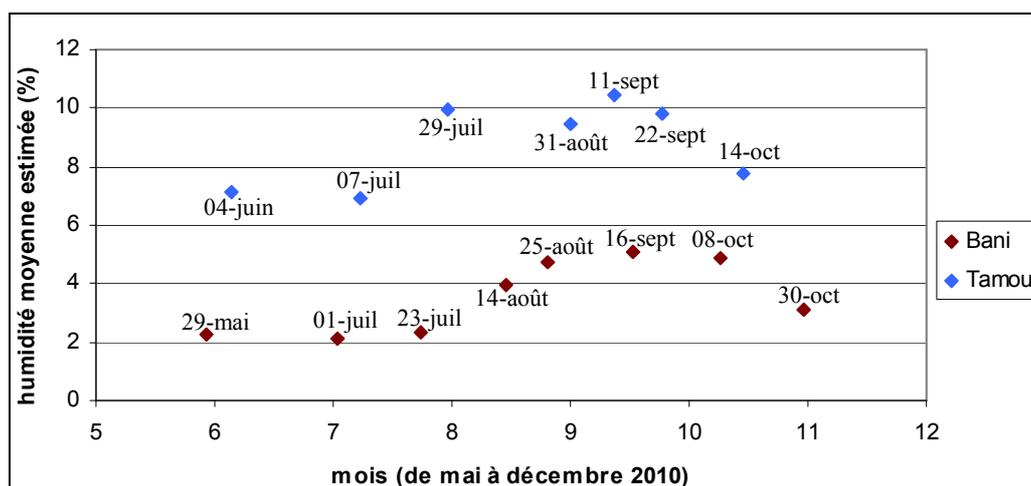


Figure 7 : Evolution de l'humidité moyenne du sol estimée au cours de l'année sur les deux sites d'étude (méthode 1)

Nous remarquons une nette augmentation de l'humidité du sol sur les deux sites lors de la saison des pluies. Il semble que les premières précipitations aient eu lieu entre le 23 juillet et le 14 août sur le bassin versant de Banizoumbou et entre le 7 et 29 juillet sur celui de Tamou. On remarque une baisse de l'humidité le 31 août, ce qui n'est pas étonnant puisqu'il a été relevé une forte pluie dans la nuit suivante (nuit du 31 août au 1^{er} septembre) et s'il n'avait pas plu depuis plusieurs jours le sol aurait bien eu le temps de se dessécher. Notons qu'il est impossible de comparer ces humidités estimées moyennes sur le bassin, aux humidités mesurées, puisque nos humidités *in situ* sont distribuées de manière non homogène. Bien que Tamou soit plus au Sud, donc plus humide (plus éloigné du Sahara), l'humidité du sol semble nettement surestimée sur les deux sites et surtout sur Tamou. En effet l'humidité du sol en saison sèche est en réalité quasiment nulle ce qui n'apparaît pas sur ce graphique. Il ne faut pas perdre de vue que l'effet de rugosité est ici négligé ce qui pourrait expliquer une humidité largement surévaluée. Le fait que ce phénomène soit plus largement visible sur Tamou pourrait s'expliquer par la présence plus importante de plateaux sur ce site, la rugosité étant plus importante sur les plateaux.

A toutes les dates et avec cette méthode 1, il apparaît que les plateaux soient plus humides qu'ailleurs. Ceci est surprenant, les plateaux étant normalement très secs sur le terrain (humidité nulle). Pour illustrer ce phénomène, regardons la carte obtenue le 29 mai sur Banizoumbou (Figure 8).

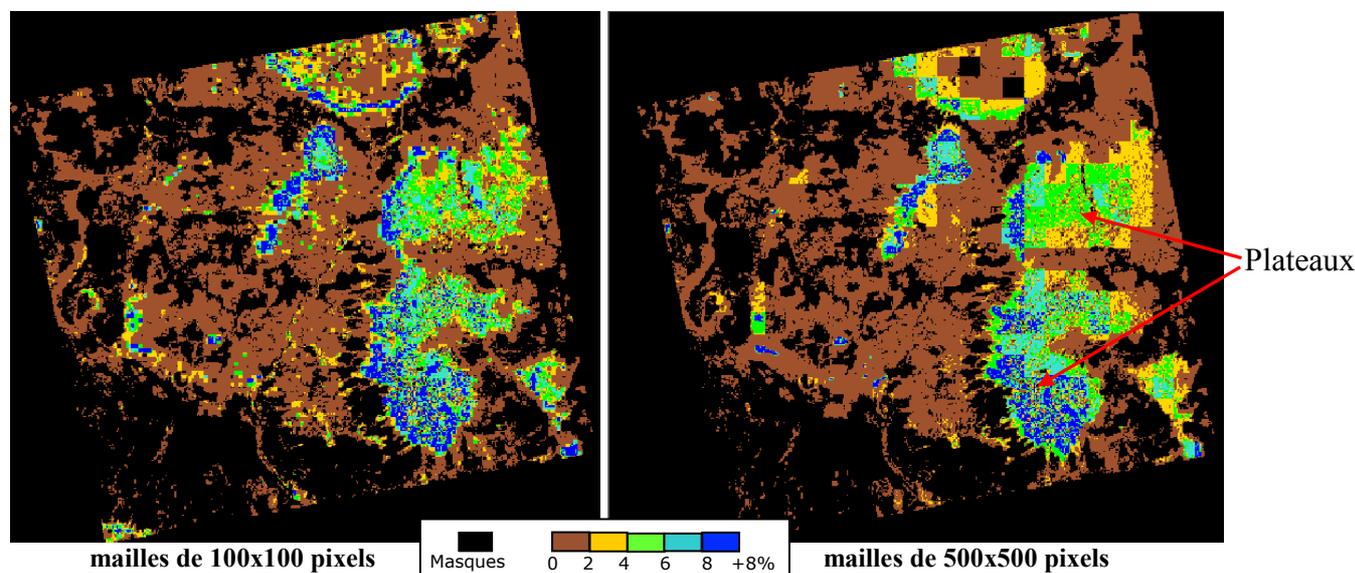


Figure 8 : Cartographie de l'humidité du sol sur Banizoumbou, le 29 mai (méthode 1)

A cette date, en pleine saison sèche, nous nous attendons à cartographier une humidité quasiment nulle sur toute l'image ce qui n'est pas le cas sur les plateaux. Nous observons bien que l'humidité est proche de 0 sur cette carte sauf sur les plateaux où l'humidité estimée dépasse parfois les 8%. Notons également que les contours de plateaux apparaissent encore plus humides, cela pourrait être lié à une pente importante à ces endroits. Sur les plateaux, l'humidité sans doute surévaluée pourrait être due, comme expliqué précédemment, à une plus forte rugosité du sol (cuirasses) alors que le sol des jachères est relativement plus lisse (sableux).

En dehors de ce problème de surestimation de l'humidité sur les plateaux, nous remarquons que le sol reste plus sec sur les occupations du sol classées *sol nu* (par le SIRS) que sur les occupations du sol *jachères*. Ces classes d'occupation du sol étant toutes deux des sols nus (cf. 2.2.4). En effet, sur la Figure 9 qui représente une zone de bas-fonds de Banizoumbou, on remarque nettement que les zones classées *sol nu* (vertes sur l'image optique), que l'humidité reste relativement faible même en saison humide avec une valeur de 0 à 4% maximum.

Ce phénomène s'explique par le fait que le *sol nu*, très lisse, engendre une sous-estimation de l'humidité mais surtout parce que ces sols nus forment une croûte d'érosion à la surface (à la différence des sols nus de jachère) qui limite les infiltrations et, de ce fait, le sol y est véritablement plus sec. En revanche, les jachères (dont le sol est nu également) ont une humidité qui évolue de façon nettement plus importante au cours de l'année.

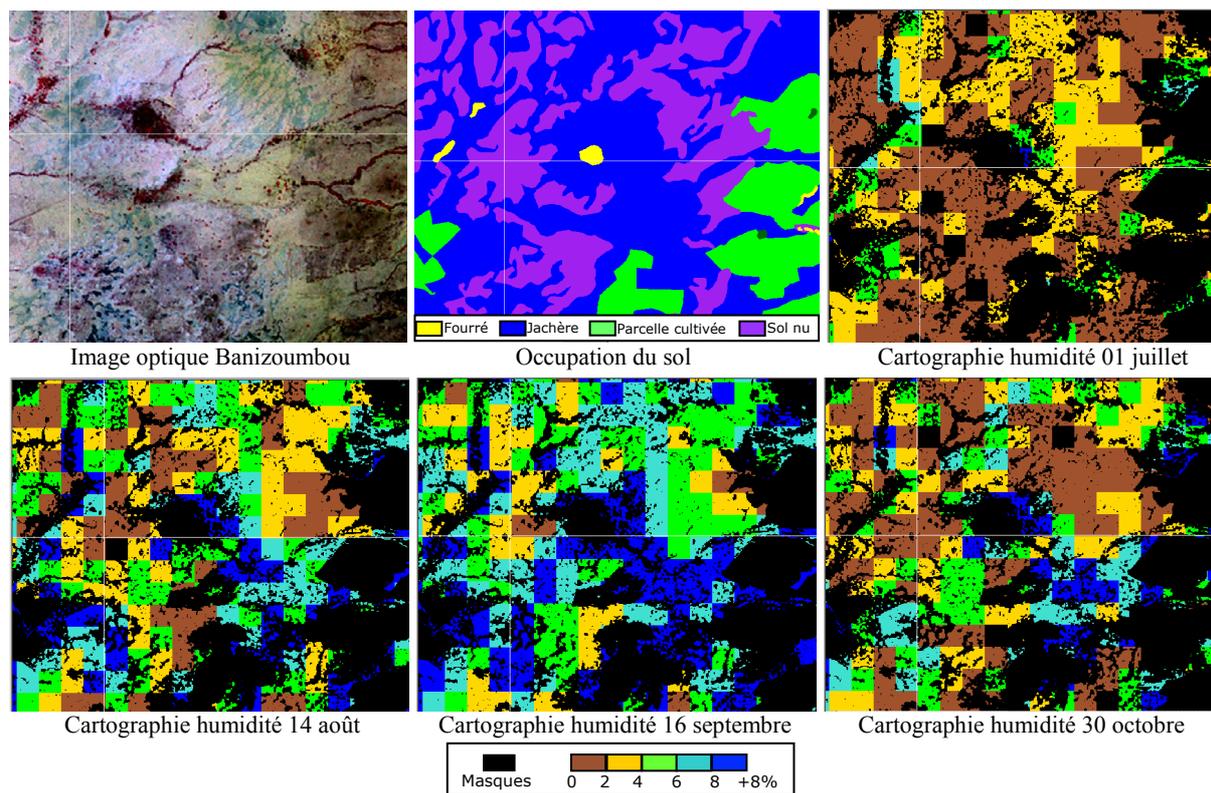


Figure 9 : Mise en évidence de l'évolution de l'humidité au cours du temps et en fonction de l'occupation du sol (méthode 1, mailles de 100x100 pixels)

En utilisant l'autre test qui prend en compte la carte d'occupation des sols, nous avons une confirmation de ce que nous venons de voir. Pour une meilleure comparaison, la même portion d'image que précédemment est présentée en Figure 10.

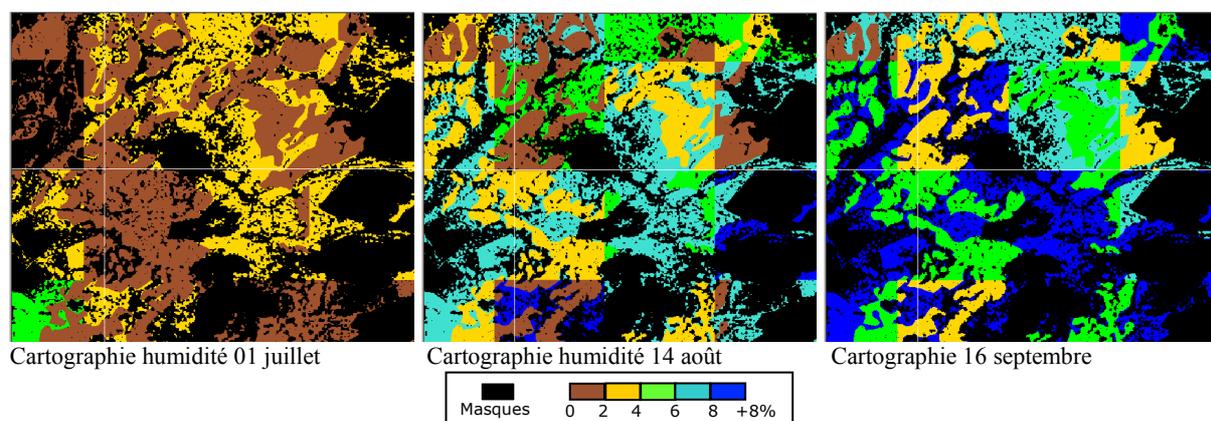


Figure 10 : Mise en évidence d'une humidité plus importante sur sol nu que sur jachère (méthode 1, mailles de 500x500 pixels)

Pour chacune des mailles et à chacune des dates présentées, l'humidité cartographiée est plus faible pour la zone de sol nu que pour la zone de jachère. Lorsque l'humidité est de 6-8% sur les jachères, elle est de 4-6% voire 2-4% sur les sols nus, et quand elle est de 4-6% sur les jachères, elle est de 0-2% sur les sols nus. Ce phénomène se retrouve sur toute l'image de façon plus ou moins marquée. Sur la Figure 11, nous remarquons l'évolution de l'humidité du sol au cours de la saison de la même façon que sur la figure 10 qui utilisait l'autre type de test. Notons que, globalement, les résultats sont similaires entre les deux types de tests bien que le lissage soit plus important avec des mailles de 500x500 pixels.

3.2.3. Application de la méthode 2

En utilisant la différence entre deux images (méthode 2), nous prenons en compte l'effet de la rugosité. Dans un premier temps, nous cartographions l'humidité du sol moyenne à une date donnée sur une image. Nous obtenons par exemple le 08 octobre sur Banizoumbou la carte en Figure 11 et le 29 juillet sur Tamou la carte en Figure 12.

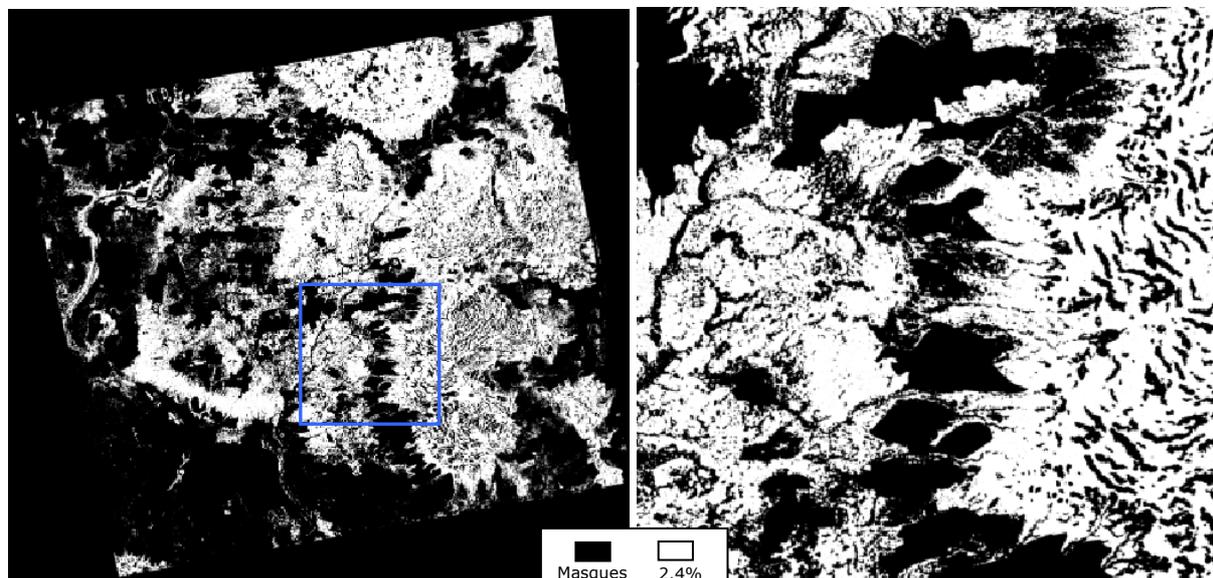


Figure 11 : Carte d'humidité du sol du 08 octobre sur Banizoumbou (méthode 2, humidité moyenne par date)

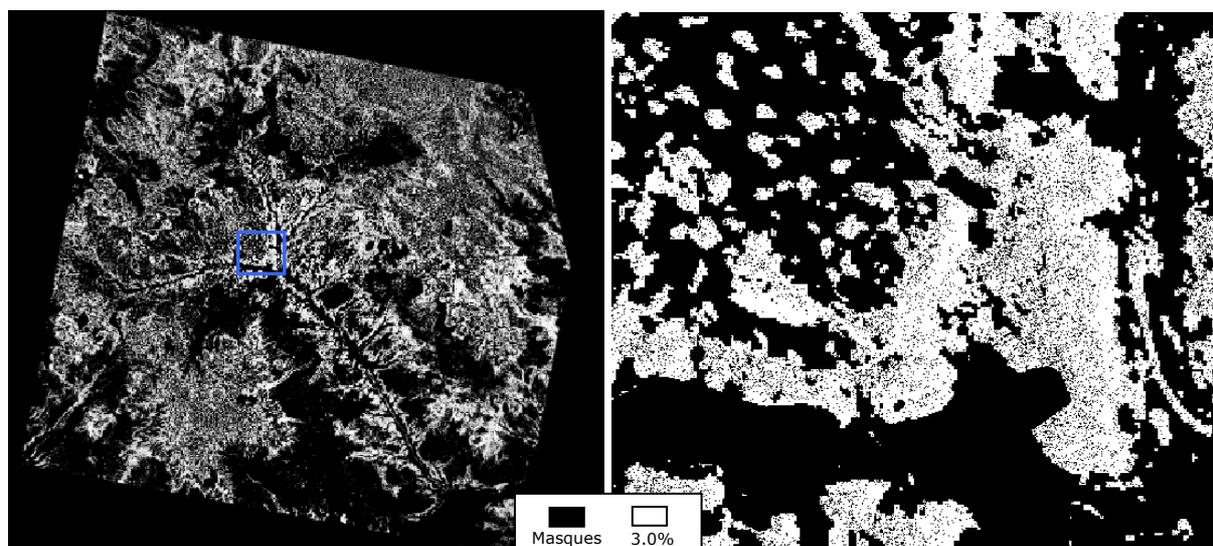


Figure 12 : Carte d'humidité du sol du 11 septembre sur Tamou (méthode 2, humidité moyenne par date)

Le suivi de l'humidité du sol moyenne au cours de l'année (Figure 13) permet d'obtenir de meilleurs résultats qu'avec la précédente méthode. L'humidité n'est plus surestimée sur Tamou. Elle semblerait même sous-évaluée. En effet, les humidités moyennes ne dépassent pas 3 %, ce qui paraît très peu mais qui peut cependant être possible. La présence de plateaux étant plus importante sur le site de Tamou, l'élimination de l'effet de rugosité est plus remarquable sur ce site. Nous n'avons cependant pas suffisamment de dates sur les courbes pour valider les impressions concernant l'évolution de l'humidité, mais comme pour la méthode 1, nous remarquons une augmentation de l'humidité du sol lors de la saison des pluies.

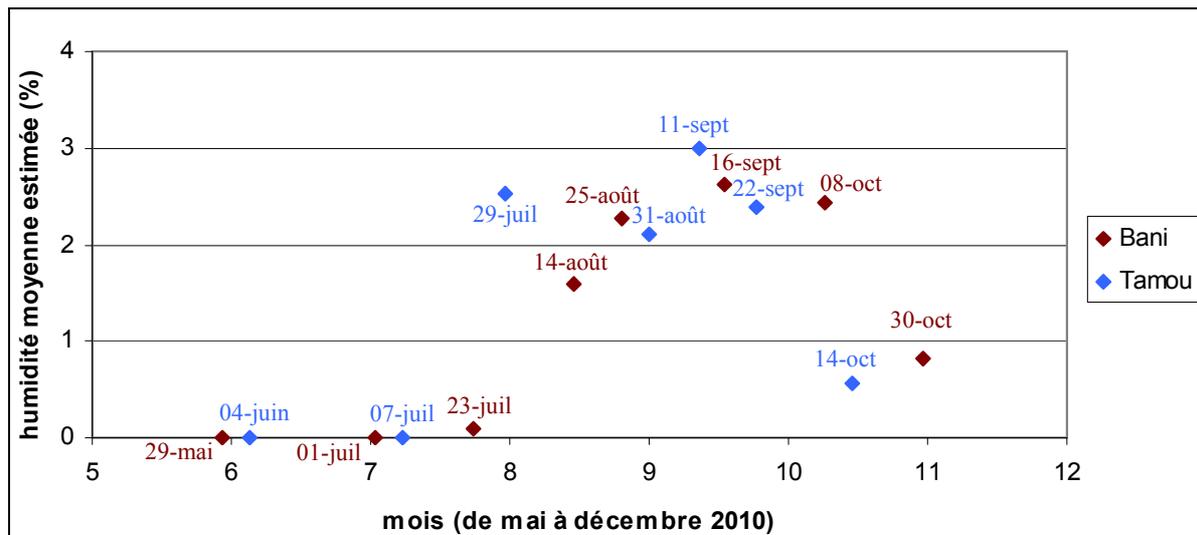


Figure 13 : Evolution de l'humidité moyenne du sol au cours de l'année 2010 sur les sites de Banizoumbou et de Tamou (méthode 2)

Nous utilisons maintenant le test qui permet de cartographier l'humidité sur des mailles. Les cartographies d'humidité du sol semblent, ici aussi, plus justes avec cette deuxième méthode puisqu'un biais important est éliminé. Prenons comme exemple la cartographie du 08 octobre sur Banizoumbou (Figure 14). Nous pouvons effectivement apercevoir que les effets de pente et de rugosité sont éliminés. Il n'y a plus, notamment, cette importante surestimation de l'humidité à la limite entre bas-fonds et plateaux. Sur les plateaux, l'effet de rugosité est bien éliminé. En effet, l'humidité estimée sur les plateaux est proche de 0 avec la méthode 2, ce qui est plus proche des observations terrain.

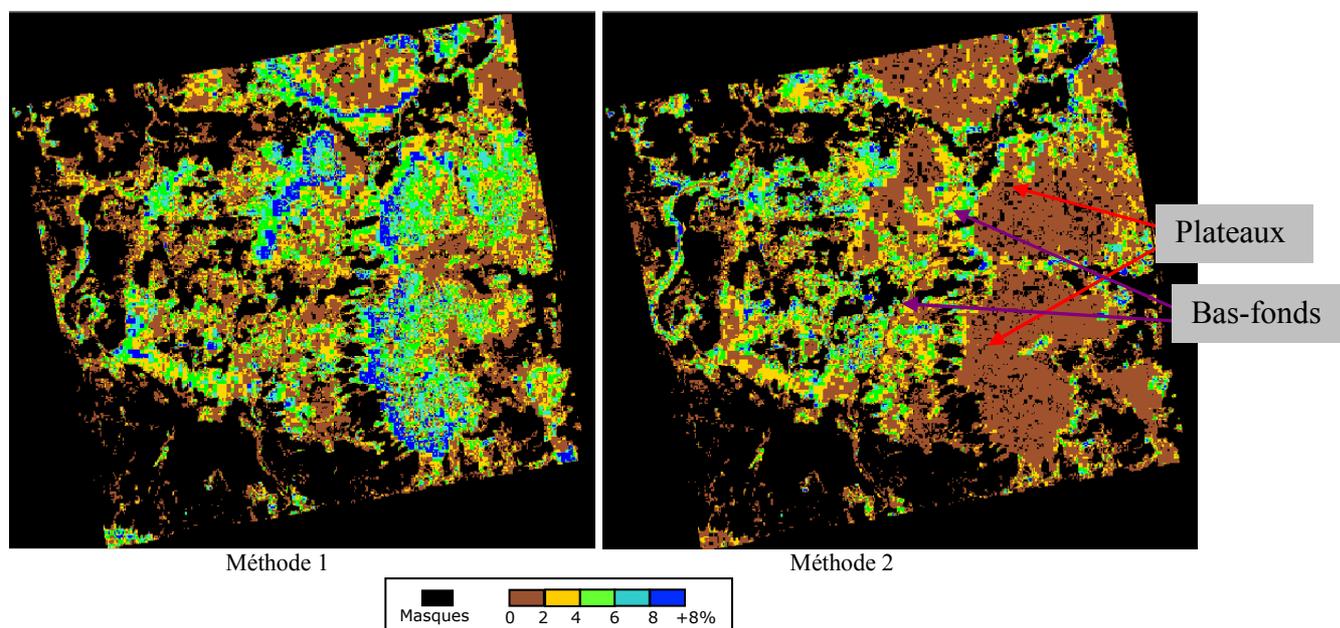


Figure 14 : Comparaison des cartes d'humidité du sol du 08 octobre entre les deux méthodes (mailles de 100x100 pixels)

Enfin, si on analyse l'évolution de l'humidité du sol au cours de l'année, sur Tamou par exemple (Figure 15), nous constatons que l'humidité reste stable sur les plateaux (aux alentours de 0 à 2% sur toute l'année) et qu'elle évolue dans les zones de bas-fonds.

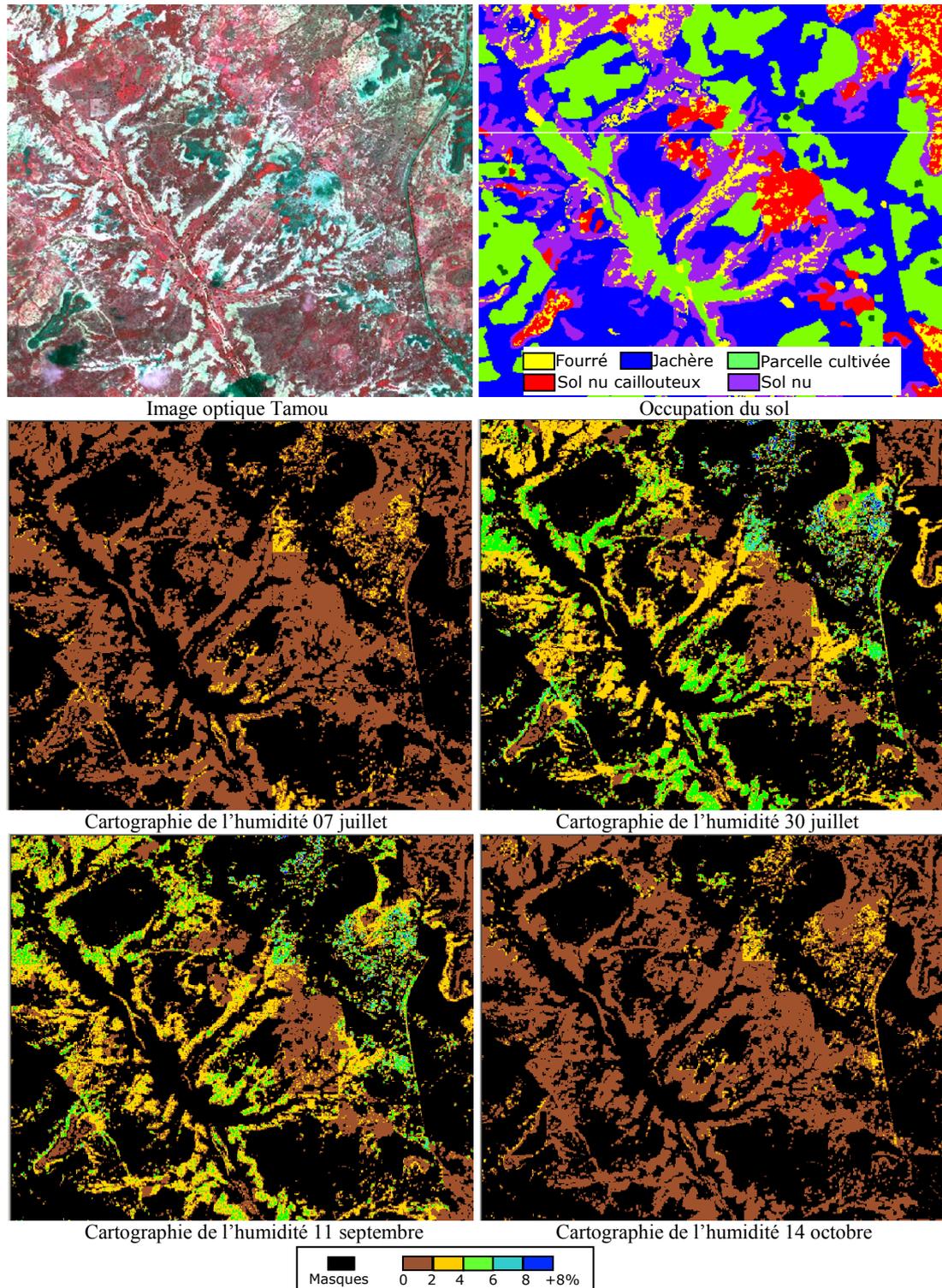


Figure 15 : Evolution de l'humidité du sol dans l'année sur une zone de bas-fonds sur Tamou (méthode 2, mailles de 500x500 pixels)

Avec cette deuxième méthode, nous remarquons également que le sol reste plus sec sur les occupations du sol classées *sol nu* et *sol nu caillouteux* que sur les occupations du sol *jachères*. Il se peut que les jachères retiennent mieux l'humidité en comparaison aux autres sols nus sur lesquels une croûte d'érosion imperméable peut s'être formée, limitant ainsi la

pénétration de l'eau. Sur la Figure 15, cela est difficile à voir car la quasi-totalité des jachères a été masquée du fait de la présence de végétation. Le *sol nu caillouteux* reste ici bien sec alors qu'avec la méthode 1 il apparaissait très humide de par sa forte rugosité.

En Annexe H, nous retrouverons de plus amples illustrations des cartes d'humidité de sortie pour les deux méthodes et sur les deux sites d'étude nigériens.

3.2.4. Fiabilité des estimations d'humidité

Nous comparons maintenant un à un les relevés terrains avec les humidités cartographiées estimées par TerraSAR-X. Certains relevés ne sont pas pris en compte lorsqu'ils se situent sur les masques des cartes d'humidité. Ce sont seulement 50% des relevés utilisés pour la relation qui sont réutilisables pour la validation (53 sur 105). La comparaison entre humidités estimées et humidités mesurées est illustrée sur la Figure 16. Elle permet de distinguer les quatre tests effectués (deux méthodes, deux tailles de maille). Nous remarquons que la méthode 1 montre une tendance à surestimer l'humidité du sol tandis que la méthode 2 la sous-estime. Notons que les résultats sont très similaires entre les deux types de test au sein d'une même méthode.

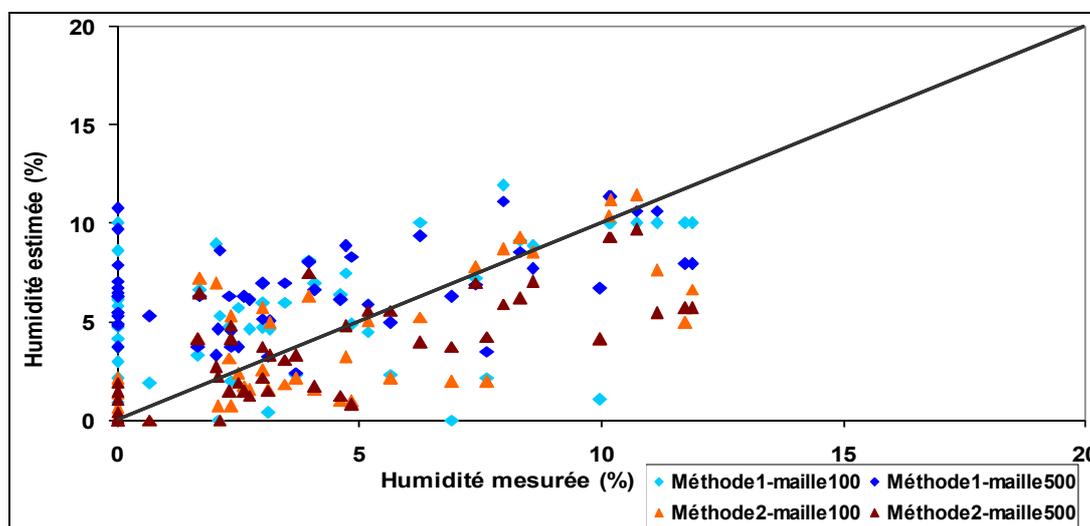


Figure 16 : Corrélation entre humidité estimée et humidité mesurée

L'analyse des écarts entre les humidités du sol mesurées sur le terrain et les humidités estimées sur nos cartes se retrouvent également dans le Tableau 3 :

Méthode	1		2	
Taille des mailles ¹	100x100	500x500	100x100	500x500
Moyenne des écarts (humidité mesurée-humidité estimée)	-1,63	-2,71	0,55	0,77
Ecart-type des écarts	3,47	3,25	2,52	2,23
RMSE	3,81	4,21	2,56	2,34

Tableau 3 : Analyse des écarts entre humidités mesurées et estimées

La moyenne des écarts n'est pas la moyenne des écarts absolus mais des vrais écarts, elle permet de rendre compte du biais. Nous remarquons que le biais est moins important pour la méthode 2 qui prend en compte l'effet de la rugosité. La méthode 1 montre un biais négatif, ce qui correspond à une surestimation de l'humidité par radar. Le biais est plus faible pour les

¹ Le test effectué sur des mailles de 500x500 pixels tient compte de l'occupation du sol (il y a autant de valeurs d'humidité que de classes d'occupation du sol dans une maille) et sur celui avec des mailles de 100x100 pixels il y a une valeur moyenne d'humidité par maille.

cartographies effectuées sur des mailles de 100x100 pixels plutôt que de 500x500 pixels. L'écart-type des écarts est un indicateur de fiabilité des estimations, il caractérise la dispersion de la mesure. La fiabilité est meilleure sur les cartes d'humidité qui utilisent le test prenant en compte l'occupation du sol sur des mailles de 500x500 pixels mais la différence n'est pas flagrante. Les mailles de 100x100 pixels montrent donc de meilleurs résultats face au biais mais de moins bons face à la fiabilité des estimations. Enfin la précision de nos résultats peut être analysée à l'aide de la RMSE¹, qui intègre à la fois la moyenne et l'écart-type, comme le conseille Willmott, 1981 :

$$RMSE = \mu^2 + ((N-1)/N) \sigma^2$$

μ = moyenne des écarts

N = nombre de mesures

σ = écart-type des écarts

La RMSE caractérise l'exactitude de la mesure. Nous obtenons des RMSE allant de 2,34 à 4,21, les meilleures étant celles calculées sur la méthode 2 et pour des mailles de 500x500 pixels.

Si l'on sépare les résultats sur chacun des sites (Tableau 4), on remarque que la tendance générale semble légèrement meilleure sur Banizoumbou que sur Tamou. Le biais est d'ailleurs quasiment nul sur le site de Banizoumbou pour cette méthode 2. L'écart-type des écarts est lui aussi relativement plus faible sur Banizoumbou. Les RMSE sont, sur chacun des sites, meilleures pour la méthode 2.

Méthode	Banizoumbou				Tamou			
	1		2		1		2	
Taille des mailles	100x100	500x500	100x100	500x500	100x100	500x500	100x100	500x500
Moyenne des écarts	-1,59	-2,90	0,51	0,39	-1,71	-2,34	0,64	1,58
Ecart-type des écarts	3,76	2,97	2,53	2,07	3,00	3,94	2,58	2,40
RMSE	4,04	4,12	2,55	2,08	3,37	4,48	2,59	2,81

Tableau 4 : Analyse des écarts entre humidités mesurées et estimées sur Banizoumbou et Tamou

Lorsque l'on regarde les nuages de points sur chacun des sites, il est difficile visuellement de dire si les résultats sont meilleurs sur Banizoumbou ou sur Tamou (Figure 17).

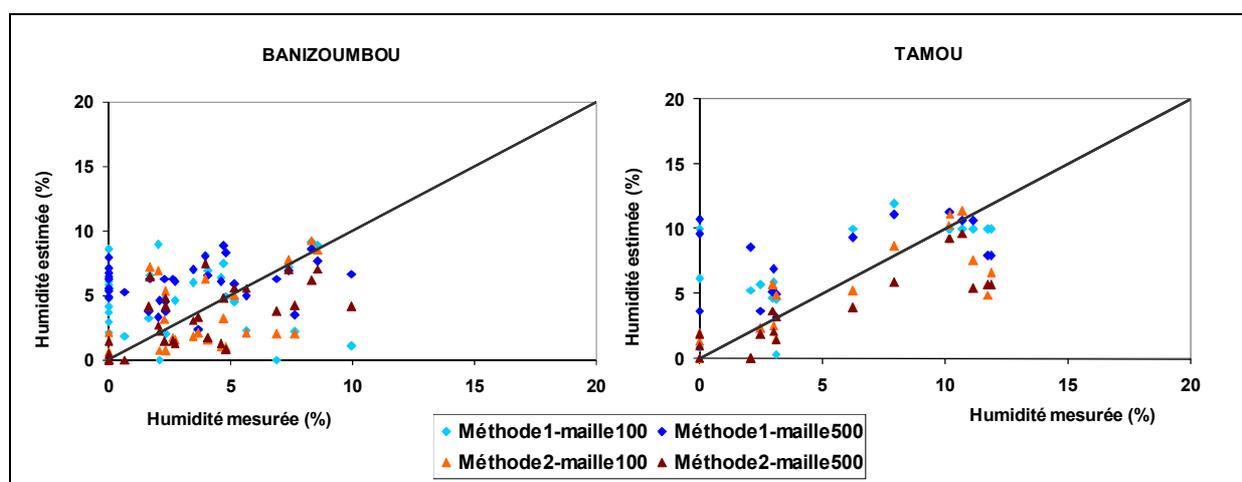


Figure 17 : Corrélation entre humidité estimée et humidité mesurée sur chacun des sites

¹ Erreur quadratique moyenne des écarts

Nous remarquons sur cette Figure 17 que de nombreuses mesures d'humidités nulles correspondent à de fortes valeurs d'humidités estimées (jusqu'à 10,7%). Cela concerne essentiellement des points situés sur les plateaux et obtenus avec la méthode 1 qui néglige l'effet de la rugosité. Avec la méthode 2 ces humidités sont estimées à des valeurs plus proches de 0.

Concernant les quelques points dont les valeurs sont incohérentes, rappelons que l'estimation se fait sur des mailles dont le signal n'est pas nécessairement homogène. Il se peut qu'une zone relativement humide sur le terrain soit située à proximité d'une zone plus sèche et que cette zone sèche soit plus largement représentée dans la maille. Il est également possible que certains points situés en bordure de mailles aient une valeur plus proche de la maille voisine qui le représenterait mieux.

Regardons maintenant l'évolution de l'humidité du sol au cours de l'année en séparant les plateaux des bas-fonds (Figure 18). Pour chaque point on a moyenné la valeur des humidités mesurées sur une même journée (moyennes des humidités de chacun des AOI). Les humidités estimées correspondent aux moyennes des humidités estimées non pas sur toute l'image mais au niveau de chacun des point GPS correspondant aux mesures terrains. Les humidités mesurées nulles sur les plateaux sont effectivement estimées à des humidités proches de 0. Sur les bas-fonds (en dehors de plateaux), les estimations sont relativement proches des mesures et l'allure générale de l'évolution est similaire. Cependant, il manque de nombreux relevés terrain pour pouvoir suivre l'évolution de l'humidité notamment sur le site de Tamou.

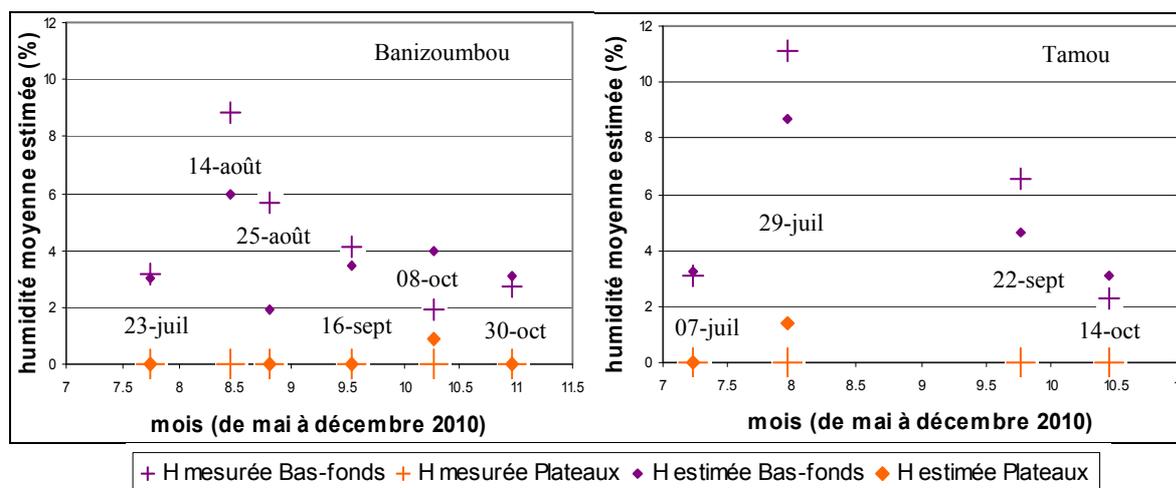


Figure 18 : Moyennes des humidités relevées sur les AOI à chaque date (mesurées et estimées à l'aide de la méthode 2 sur des mailles de 100x100 pixels) sur les plateaux et sur les bas-fonds et sur chacun des sites d'étude

Notons que la validation des cartes d'humidité a été effectuée sur les mêmes points que ceux qui ont permis d'obtenir des relations linéaires. Cela n'est pas conseillé et peut permettre d'améliorer de façon artificielle la validité des résultats. Il aurait fallu avoir de plus nombreux relevés terrain à notre disposition pour mettre en place une validation plus correcte. Cependant, la relation linéaire est inversée sur des mailles relativement grandes (100x100 et 500x500 pixels) et celles-ci ne correspondent pas aux AOI sélectionnées nettement plus petites.

Conclusion et perspectives

L'objectif de notre étude était d'établir une méthodologie de cartographie de l'humidité du sol en zone sahélienne. Après de nombreuses corrections et modifications, nous avons pu obtenir des cartes d'humidité du sol sur les deux sites d'étude au Niger. Nous avons utilisé deux méthodes différentes. L'une d'elle prenant compte de la rugosité du sol et des effets de pente, nous sommes parvenus à éliminer un biais important notamment sur les zones rugueuses telles que le sol nu des plateaux qui est caillouteux.

Des relations linéaires ont été établies puis utilisées par inversion dans un programme. Trois types de test ont été utilisés. Le premier a permis d'obtenir une valeur d'humidité moyenne du sol à chacune des dates d'acquisition d'image radar. Ce test nous permet notamment de suivre l'évolution moyenne de l'humidité du sol au cours de l'année. L'humidité du sol augmente effectivement de manière importante lors de la saison des pluies. Le deuxième test a permis de créer des cartes d'humidité sur des mailles de 100x100 pixels avec une valeur unique par maille. Cependant, la géométrie des mailles, très rigide, ne permet pas de prendre en compte l'hétérogénéité qui subsiste au sein d'une même maille. En prenant en compte le type d'occupation du sol avec le troisième test sur des mailles plus grandes de 500x500 pixels, nous pouvions nous attendre à améliorer les résultats en ce sens. Mais finalement ces deux tests montrent des résultats relativement similaires.

Les classes d'occupation du sol pourraient peut-être être démultipliées, en prenant compte des caractéristiques pédologiques par exemple. Il pourrait être intéressant également d'imaginer un maillage automatique de façon à ce que ces « mailles » soient plus homogènes au détriment de leur forme facile d'utilisation. Des tests sur des mailles plus fines pourraient également être envisagés, malgré la lenteur des traitements. Cependant, les quelques essais que nous avons pu réaliser en ce sens n'ont pas montré de résultats probants. En effet, les mailles ne deviennent pas nécessairement plus homogènes en étant réduites, surtout en imagerie radar.

La présence de la végétation sur les sols nus a été l'un des principaux problèmes. Le but était de masquer toute la végétation y compris les arbres isolés. Il reste relativement difficile de trouver le seuil le plus juste car en cherchant à ne pas prendre en compte la végétation de manière trop radicale, nous risquons de perdre certaines informations importantes et notamment sur des sols nus dont les coefficients de rétrodiffusion seraient relativement élevés. Cela est notamment une explication aux humidités parfois sous-évaluées avec l'utilisation de la méthode 2. Une autre explication pourrait être que l'humidité du sol en saison sèche ne soit pas totalement nulle voire que les relations utilisées en entrée étaient elles-mêmes surévaluées. Face à cela, l'humidité est surévaluée avec la méthode 1. La présence de l'effet de rugosité estime de façon illusoire une plus forte humidité.

Nous avons remarqué que l'humidité du sol est quasiment nulle tout au long de l'année sur les sols nus des plateaux mais elle évolue dans les bas-fonds. Les sols nus de jachères montrent une humidité plus importante que les autres tout au long de l'année.

Finalement, les humidités du sol peuvent être estimées avec une RMSE de 2,34% en comparaison avec les humidités mesurées sur le terrain, ce qui est tout à fait positif. Les résultats sont nettement meilleurs avec la méthode 2 qu'avec la méthode 1. Ils sont légèrement meilleurs sur le site de Banizoumbou que sur celui de Tamou, bien que cela

demeure relatif. Enfin ils sont similaires pour les deux types de tests utilisés par le programme.

Des perspectives de travail sont ouvertes concernant l'utilisation de ces cartes d'humidité pour cartographier la répartition de croûtes biologiques sur le sol et permettre ainsi leur suivi. Notamment, les cartes d'humidité sont à mettre en relation avec la présence de croûtes. Une fois la relation établie, il pourrait alors être envisageable d'établir les cartes de croûtes biologiques sur le sol nu au Sahel. Pour ce faire, il faudrait tenir compte à la fois de l'humidité du sol mais aussi des paramètres d'influence reconnus. Notamment, nous pouvons nous demander si une humidité plus importante en saison des pluies conditionnera le développement des croûtes le reste de l'année. Il serait envisageable aussi de regarder si la détection de croûte est dépendante de la saison en comparant la présence de croûte aux variations d'humidité de surface du sol au cours de l'année. L'équipe de SIRS travaille de son côté sur l'établissement de cartes de probabilité de présence de croûtes, ces cartes pourraient être mises en relation avec les humidités que nous avons estimées. Une étude sur les relations entre coefficients de rétrodiffusion et présence de croûte directement pourrait également s'avérer intéressante.

Il resterait utile, par la suite, d'extrapoler les résultats obtenus à une échelle régionale, voire plus globale (sur les méthodes de cartographie de l'humidité et de croûtes biologiques). Pour cela il faudrait avoir accès à des cartes d'occupation du sol sur ces zones. Enfin, de façon à valider la méthodologie de façon définitive, de nouveaux relevés terrain devraient alors être effectués sur ces nouvelles zones.

Références bibliographiques

- Ambouta K.J.M., Valentin C. et Laverdière M.R. 1996. Jachères et croûtes d'érosion au Sahel. *Sécheresse*, 7(4): 269-275.
- Baghdadi N., Holah N. and Zribi M. 2006. Soil moisture estimation using multi-incidence and multi-polarization ASAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 27(10): 1907-1920.
- Baghdadi N., Aubert M., Cerdan O., *et al.* 2007. Operational mapping of soil moisture using synthetic aperture radar data: Application to the touch basin (France). *Sensors*, 7(7): 2458-2483.
- Belnap J. and Harper K.T. 1995. Influence of cryptobiotic soil crusts on elemental content of tissue in two desert seed plants. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 9: 107-115.
- Belnap J. 2005. Crusts: Biological. In: Hillel D. (Ed). *Encyclopedia of Soils in the Environment*: London, Elsevier, p. 339-346.
- Bowker M.A., Miller M.E., Belnap J., *et al.* 2008. Prioritizing conservation effort through the use of biological soil crusts as ecosystem function indicators in an arid region. *Conservation Biology* 22(6): 1533-1543.
- Brostoff W.N. 2002. Cryptobiotic crusts of a seasonally inundated dune-pan system at Edwards Air Force Base, western Mojave Desert, California. *Journal of Arid Environments*, 51: 339-361.
- Centre Canadien de Télédétection, 2005, http://cct.mcan.gc.ca/index_f.php. Date de modification du site: 2009-11-17.
- Chen S.P., Bai Y.F., Lin G.H. and Han X.G. 2005. Variations in life-form composition and foliar carbon isotope discrimination among eight plant communities under different soil moisture conditions in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China. *Ecological Research*, 20: 167-176.
- Courault D., D'Herbes J.M. et Valentin C. 1990. Le bassin versant de Sama Dey: premières observations pédologiques et phyto-écologiques, ORSTOM, Paris.
- Dallemand J.F., Lichtenegger J., Laur H. et Rebillard P. 1991. Principes d'imagerie radar FAO. In: RSC Series (FAO), no. 62 / FAO, Rome (Italy). Div. du Développement de la Recherche et de la Technologie; Agence Spatiale Européenne, Paris (France), 88 p.
- Eldridge D.J. and Leys J.F. 2003. Exploring some relationship between biological soil crusts, soil aggregation and wind erosion. *Journal of Arid Environments*, 53: 457-466.
- Galle S., Seghieri J. et Mounkaila H. 1997. Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens. John Libbey Eurotext. Chapitre 9, Fonctionnement hydrologique et biologique à l'échelle locale. Cas de la brousse tigrée au Niger. p.105-118.
- Hahn A. and Kusserow H. 1998. Spatial and temporal distribution of algae in soil crusts in the Sahel of W Africa: Preliminary results. *Willdenowia*, 28: 227-238.
- Infoterra GmbH. 2008. Radiometric calibration of TerraSAR-X data. Beta naught and sigma naught coefficient calculation. Technical document TSXX-ITD-TN-0049-radiometric_calculations_11.00. 16p.
- Mahamane A., Ichaou A., Ambouta K., *et al.* 2007. Indicateurs écologiques de la période optimale de remise en culture de jachères au Niger. *Sécheresse*, 18(4): 289-295.
- Malam Issa O., Trichet J., Défarge C., *et al.* 1999. Morphology and microstructure of microbiotic soil crusts on a tiger bush sequence (Niger, Sahel). *Catena*, 37: 175-196.

- Malam Issa O., Le Bissonais Y., Défarge C. and Trichet J. 2001. Role of a microbial cover on structural stability of a sandy soil in Sahelian part of western Niger. *Geoderma*, 101: 15-30.
- Malam Issa O., Bouchet T., Cancès B., *et al.* 2009. BIOCRUST: biological soil crusts vulnerability and soil surface disturbance in Sahelian zone, European Geosciences Union General Assembly, Vol. 11: Vienna (Austria), Geophysical Research. p. 11887.
- Orlovsky L., Dourikov M. and Babaev A. 2004. Temporal dynamics and productivity of biogenic soil crusts in the central Karakum desert, Turkmenistan. *Journal of Arid Environments*, 56: 579-601.
- Probert-Jones J. R. 1962. The radar equation in meteorology. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 88: 485-495.
- Rivera-Aguilar V., Montejano G., Rodríguez-Zaragoza S. and Durán-Díaz A. 2006. Distribution and composition of cyanobacteria, mosses and lichens of the biological soil crusts of the Tehuacán Valley, Puebla, México. *Journal of Arid Environments*, 67: 208-225.
- Seghieri J., Galle S., Rajot J.L. and Ehrmann M. 1997. Relationships between the soil moisture regime and the growth of the herbaceous plants in a natural vegetation mosaic in Niger. *Journal of Arid Environment*, 36: 87-102
- Thomas A.D. and Dougill A.J. 2006. Distribution and characteristics of cyanobacterial soil crusts in the Molopo Basin, Southern Africa. *Journal of Arid Environments*, 64: 270-283.
- Türk R. and Gärtner G. 2001. Biological soil crusts of the subalpine, alpine and nival areas in the Alps. In Belnap J., Lange O.L. (Ed). *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Springer-Verlag, Berlin (Germany). *Ecological Studies*, 150: 67-73.
- Ulaby F.T., Dubois P.C. and Zyl J.V. 1996. Radar mapping of surface soil moisture. *Journal of hydrology*, 184(1-2): 57-84
- Ustin S.L., Valko P.G., Kefauver S.C., *et al.* 2009. Remote sensing of biological soil crust under simulated climate change manipulations in the Mojave Desert. *Remote Sensing of Environment*, 113: 317-328.
- Valentin C., Rajot J.L. and Mitja D. 2004. Responses of soil crusting, runoff and erosion to fallowing in the sub-humid and semi-arid regions of West Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104: 287-302.
- Willmott C.J. 1982. Some Comments of the Evaluation of Model Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63: 1309-1313.
- Zaady E. and Shachak M. 1994. Crustsoil crust and ecosystem leakage in the Negev Desert. *American Journal of Botany*, 81: 109.
- Zribi M. and Dechambre M. 2002. A new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from C-band radar data. *Remote Sensing of Environment*, 84: 42-52.
- Zribi M., Saux-Picart S., André C., *et al.* 2007. Soil moisture mapping based on ASAR/ENVISAT radar data over a Sahelian region. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (15-16): 3547-3565.

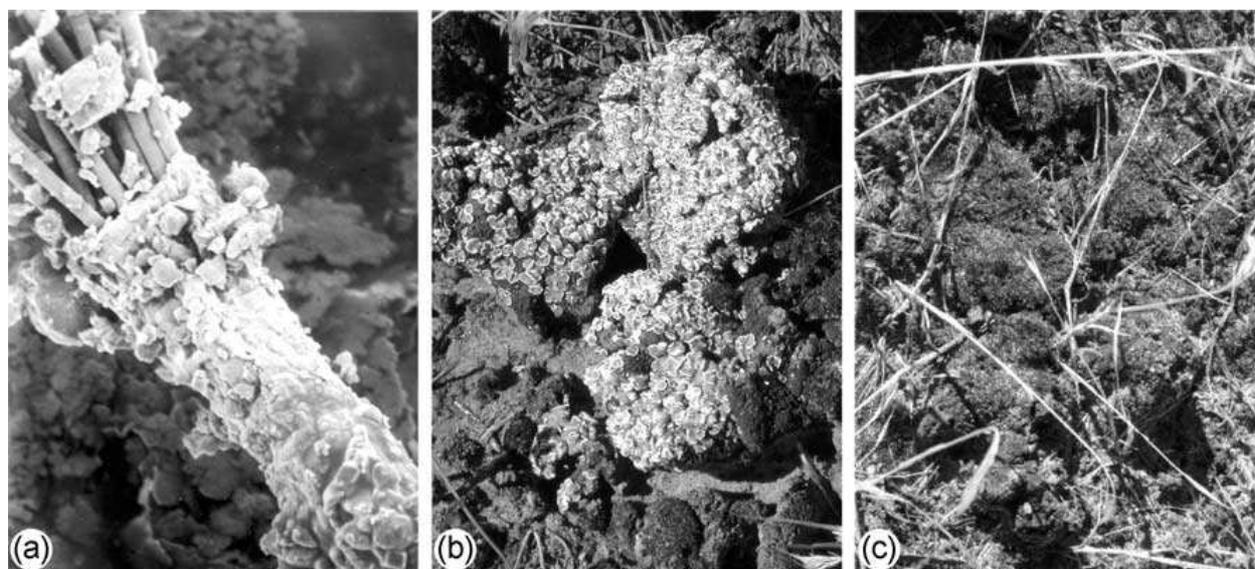
Table des annexes

Annexe A : Illustrations de la croûte biologique et des micro-organismes la constituant.....	36
Annexe B : Résumé sur le projet BioCrust	37
Annexe C : Les axes de recherché du projet BioCrust	38
Annexe D : Illustration des différents modes d'acquisition de l'imagerie radar et résultats visuels.....	39
Annexe E : Aperçu des images radar (en décibels) disponibles sur chacun des sites d'étude.	40
Annexe F : Méthodologie utilisée pour établir les relations entre humidités mesurées et coefficients de rétrodiffusion	41
Annexe G : Extrait du programme utilisé pour la cartographie de l'humidité, ici le script utilisé pour le test qui utilise des mailles de 100x100 pixels	42
Annexe H : Quelques exemples de cartes d'humidités.....	44

Annexe A : Illustrations de la croûte biologique et des micro-organismes la constituant



Croûte biologique sur sol nu au Sahel (Languille, 2009 ; Baghdadi, 2009)



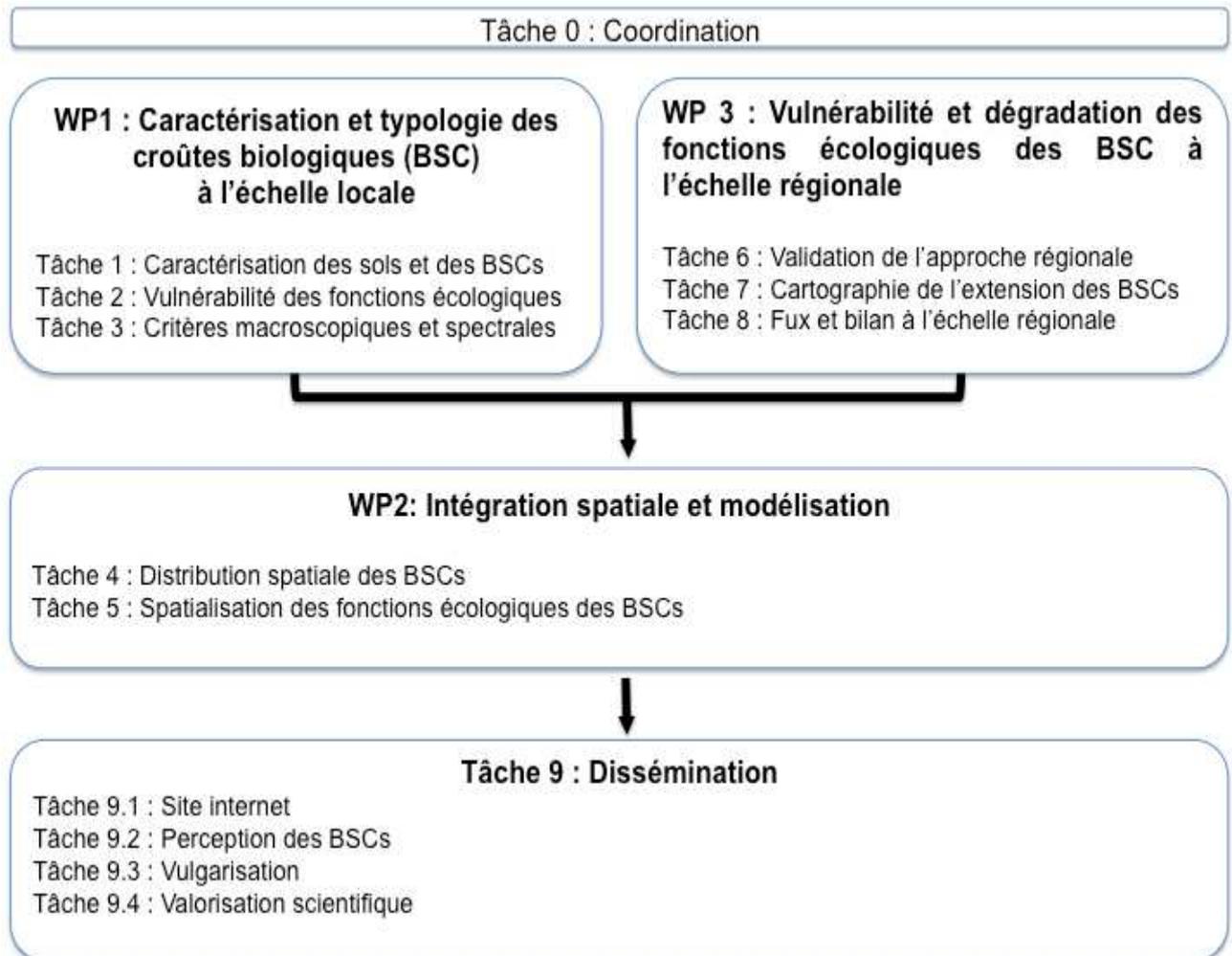
Microorganismes présents dans la croûte: cyanobactérie - *Microcoleus vaginatus* (a), lichens - *Psora decipiens* et *Collema coccophorum* (b) et mousses - *Syntrichia caninervis* (c)

Annexe B : Résumé sur le projet BioCrust**Programme « Vulnérabilité : Milieux, Climat et Sociétés »**

Edition 2008

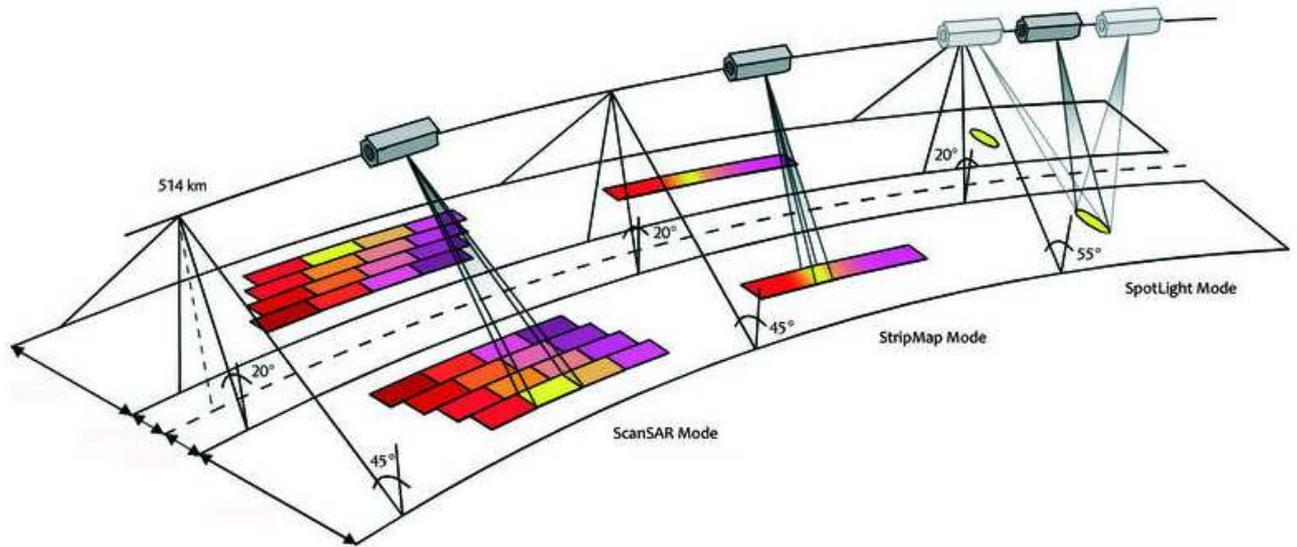
Titre du projet	BIOCRUST : Vulnérabilité des croûtes biologiques et dégradation des sols en zone sahélienne.
Résumé	<p>La dégradation des sols est un problème environnemental majeur affectant la productivité des zones arides et semi-arides.</p> <p>Les croûtes microbiotiques des surfaces « nues » sont au contraire des facteurs favorables au maintien de la productivité dans ces zones. Les micro-organismes constitutifs de ces croûtes, en majorité des cyanobactéries, possèdent des propriétés qui permettent la formation de substrats stables vis-à-vis de l'érosion et l'apport de nutriments.</p> <p>L'apparition de ces croûtes marque le début de la dégradation des sols et leur développement en l'absence de toute forme de perturbations permet l'amélioration de la qualité des sols dégradés et leur destruction correspond à un franchissement de seuil dans le processus de dégradation des sols. Le développement et le fonctionnement de ces croûtes seront profondément affectés par le changement global et un changement d'usages des sols.</p> <p>Le projet BIOCRUST a pour objet l'étude de la dynamique spatio-temporelle des croûtes microbiotiques dans différents contextes climatiques et perturbations anthropiques en zone sahélienne. L'objectif est d'élaborer un outil pour le suivi de la dégradation des états de surface des sols face aux variations sensibles des conditions climatiques et la pression humaine croissante que connaît la zone sahélo soudanienne.</p>
Partenaires	<p>Laboratoire GEGENA EA 3795 BRGM SOLUTIONS IRD UR 176 SIRS CEMAGREF UMR TETIS INRA UMR 614 Géosciences Azur UMR6526 Université Catholique de Louvain la Neuve</p>
Coordinateur	<p>Monsieur Oumarou Malam Issa oumarou.malam-issa@univ-reims.fr</p>
Aide de l'ANR	861 959 €
Début et durée	01/01/2009 - 36 mois
Référence	ANR-08-VULN-003

Annexe C : Les axes de recherché du projet BioCrust



(d'après O. Malam Issa, 2009)

Annexe D : Illustration des différents modes d'acquisition de l'imagerie radar et résultats visuels



(www.spotimage.com, 2010)

Annexe E : Aperçu des images radar disponibles sur chacun des sites d'étude

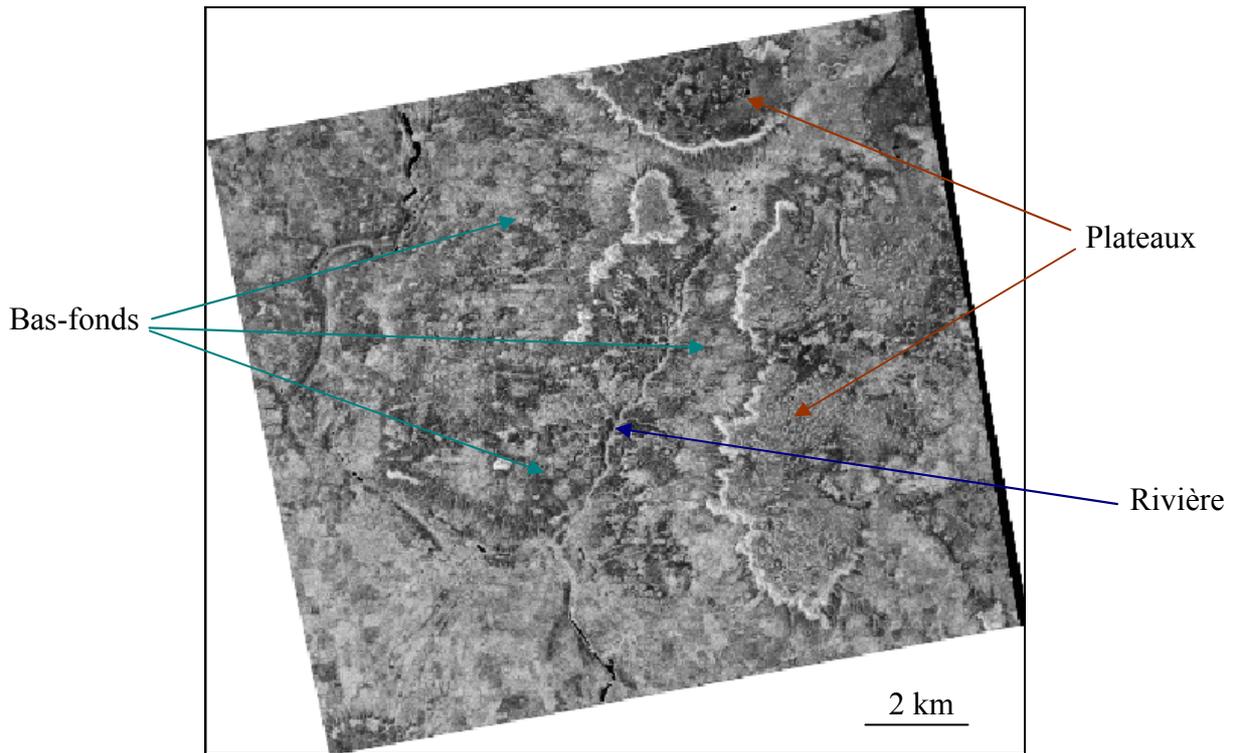


Image radar du 08 octobre sur Banizoumbou (en décibel)

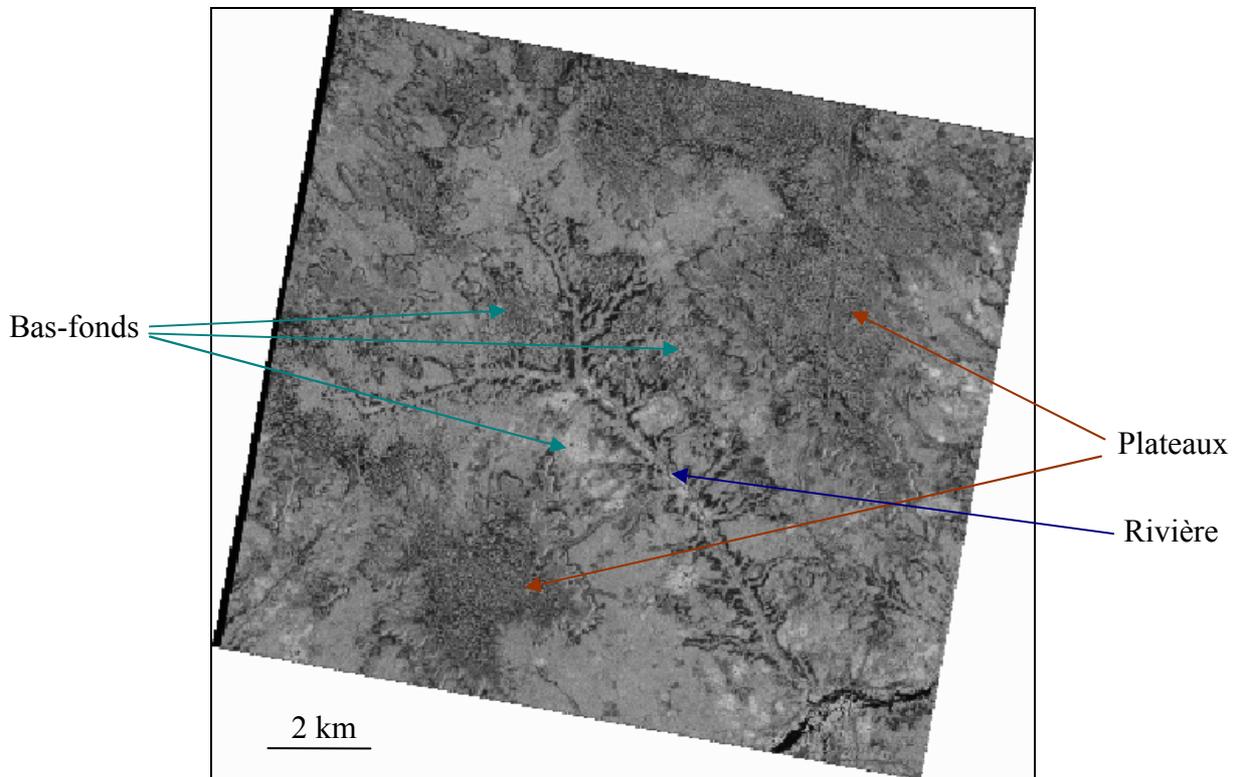


Image radar du 31 août sur Tamou (en décibel)

Annexe F : Méthodologie utilisée pour établir les relations entre humidités mesurées et coefficients de rétrodiffusion

Voici un extrait de la méthodologie utilisée pour obtenir la relation $\sigma^{\circ}_{db} = a m_v + b$ puis $\Delta\sigma^{\circ}_{db} = a m_v$.

A gauche, nous avons l'image radar en décibel. Le fichier vecteur avec les humidités mesurées est affiché par dessus. La croix verte représente par exemple un des points GPS. Nous sélectionnons une AOI autour de la croix en veillant à ce que la zone soit bien homogène, pour ce faire nous nous appuyons sur l'image optique (à droite). Une fois l'AOI sélectionnée, elle est utilisée, cette fois-ci sur l'image radar en linéaire afin de calculer la valeur du signal moyen.

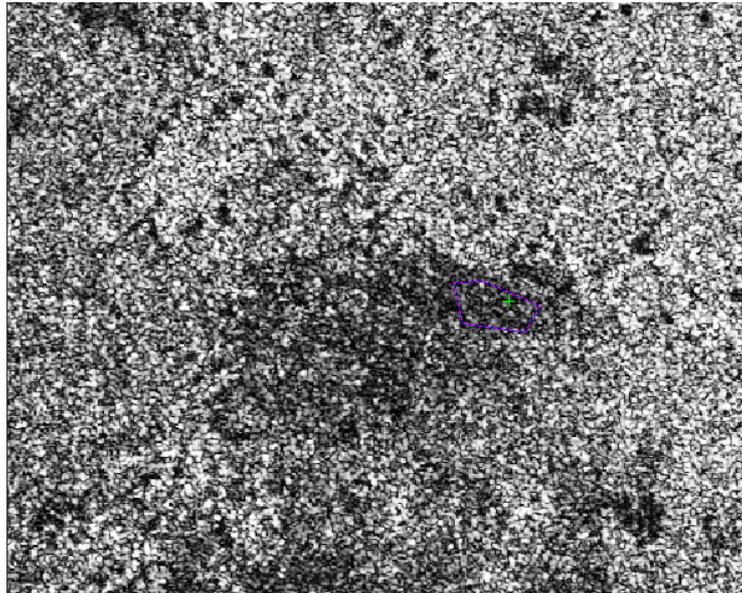


Image radar en décibel et fichier vecteur des humidités mesurées

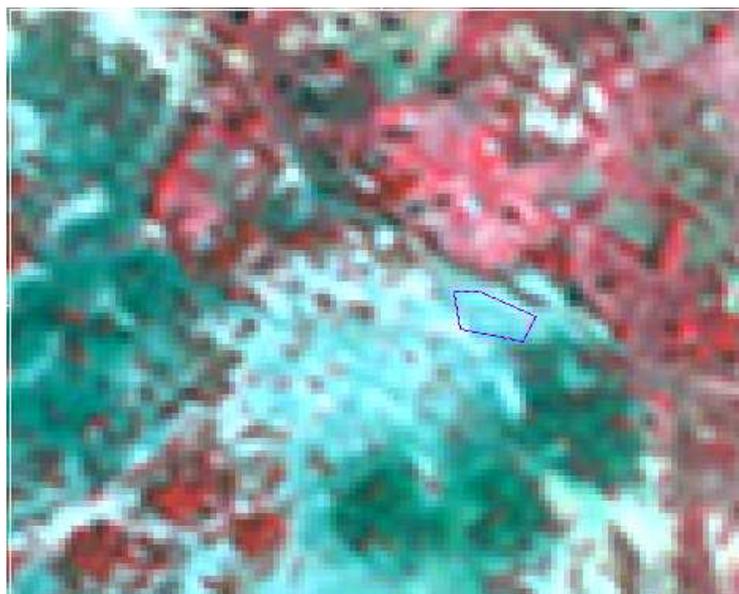


Image optique

Annexe G : Extrait du programme utilisé pour la cartographie de l'humidité, ici le script utilisé pour le test qui utilise des mailles de 100x100 pixels

```

Fichier test7
#
# Fichier de configuration de l'utilitaire Humidite
#
# Nom du fichier descriptif pour la grille decrivant le Sol Nu (Image codee 1=Sol nu, autre valeur = sol non nu)
# [Obligatoire]
ImgSolNu: SolNu.conf
#
# Nom du fichier descriptif pour la grille contenant les valeurs Radar. [Obligatoire]
ImgRadar: Radar.conf
#
# Nom du fichier descriptif pour la grille contenant les valeurs (codees) des zones homogenes. [Facultatif]
#ImgPedologie: Pedologie.conf
#
# Numero du traitement a effectuer [Obligatoire]
#
# 3 : calcul valeur moyenne sur l'ensemble du bassin : SolNu, Radar, [Zone etude]
# 4 : calcul valeur moyenne par zone de pedologie : SolNu, Radar, Pedologie, [Zone etude]
# 7 : calcul valeur moyenne sur l'ensemble du bassin avec fenetre : SolNu, Radar, [Zone etude]
# 8 : calcul valeur moyenne par zone de pedologie avec fenetre : SolNu, Radar, Pedologie, [Zone etude]
(A1, B1, A2, B2)
#
Traitement: 7
#
# Radical du nom des fichiers grilles crees en sortie [Obligatoire]
ImgOutput: F:\MTD-Camus\carto-humidite\programmes\tamou-1410-tout-sansmil\output-test7-f100
#
# Les parametres HumiditeMin, HumiditeMax, HumiditeDefaut seront utilises pour les traitements 1 et 2 s'ils
# sont presents dans le fichier de configuration.
HumiditeMin: 0
HumiditeMax: 40
HumiditeDefaut: -1
#
# Intervalle de validite des valeurs radar
RadarMin: 0.001
RadarMax: 0.20
#
# Definition de la taille (en pixels) de la fenetre d'analyse
xWindow: 100
yWindow: 100
#
# Nombre de bornes (Max 10)
nBornes: 4
#
# Definition des bornes (valeurs de 1 a 100 car pourcentage)
# entre 0 et 10% des pixels, 10 et 20%, 20 et 50%, 50 et 80% et entre 80 et 100% (5 intervalles)
borne1: 20
borne2: 40
borne3: 60
borne4: 80
#
# Definition du codage des intervalles (nb intervalles =nb bornes + 1) definis par les bornes
#
code_borne1: 1
code_borne2: 2
code_borne3: 3
code_borne4: 4

```

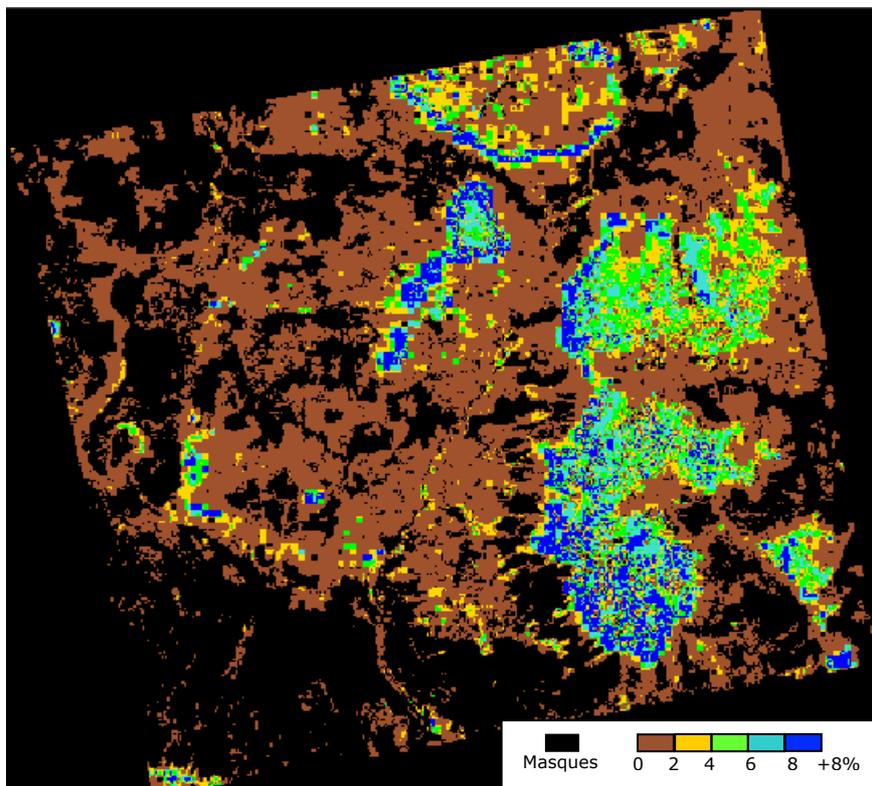
```
code_borne5: 5
#
# Valeurs des coefficients pour les calculs.
#
# Suivant la presence ou non de la grille de rugosite, {A,B} ou {A1, B1, A2, B2} seront utilises.
#
A: 15
B: 0
#
OptionInversion: 0
```

```
Fichier radar
# Fichier descriptif de raster pour humidite
#
# Nombre de lignes
NROWS: 12331
#
# Nombre de colonnes
NCOLS: 12999
#
# Nom du fichier contenant les valeurs binaires de la grille
NOM: F:\MTD-Camus\carto-humidite\images-utiles\radar1410
#
TYPE: float
```

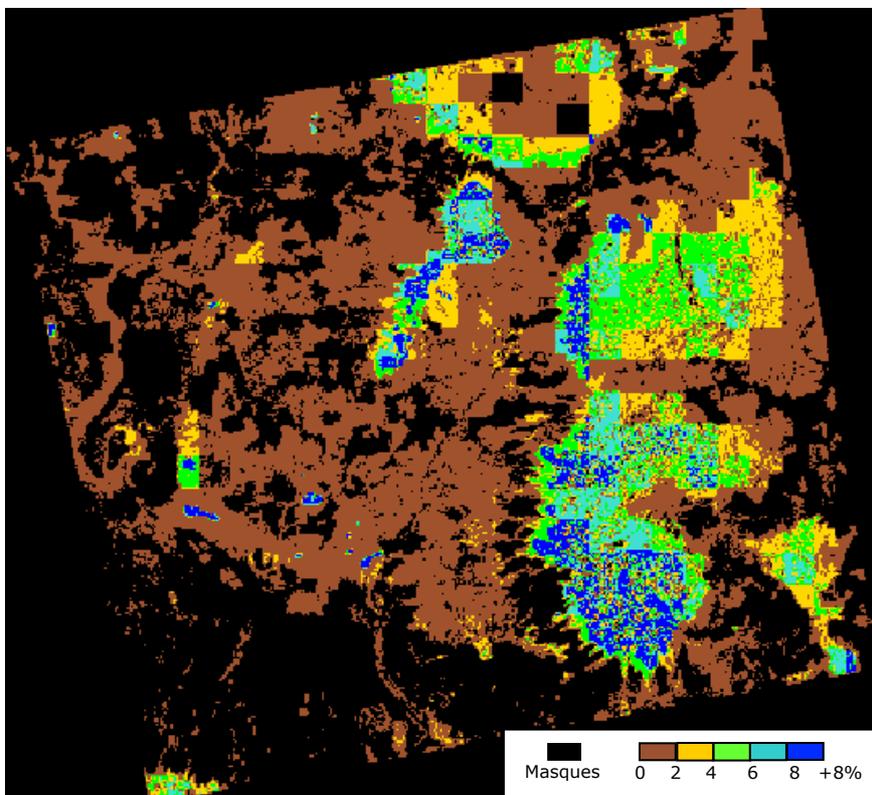
```
Fichier Sol Nu
#
# Fichier descriptif de raster pour humidite
#
# Nombre de lignes
NROWS: 12331
#
# Nombre de colonnes
NCOLS: 12999
#
# Nom du fichier contenant les valeurs binaires de la grille
NOM: F:\MTD-Camus\carto-humidite\images-utiles\solnu-tamou-ndvi
#
TYPE: int8
```

```
Fichier occupation du sol
#
# Fichier descriptif de raster pour humidite
#
# Nombre de lignes
NROWS: 12331
#
# Nombre de colonnes
NCOLS: 12999
#
# Nom du fichier contenant les valeurs binaires de la grille
NOM: F:\MTD-Camus\carto-humidite\images-utiles\pedo1410
#
TYPE: int8
```

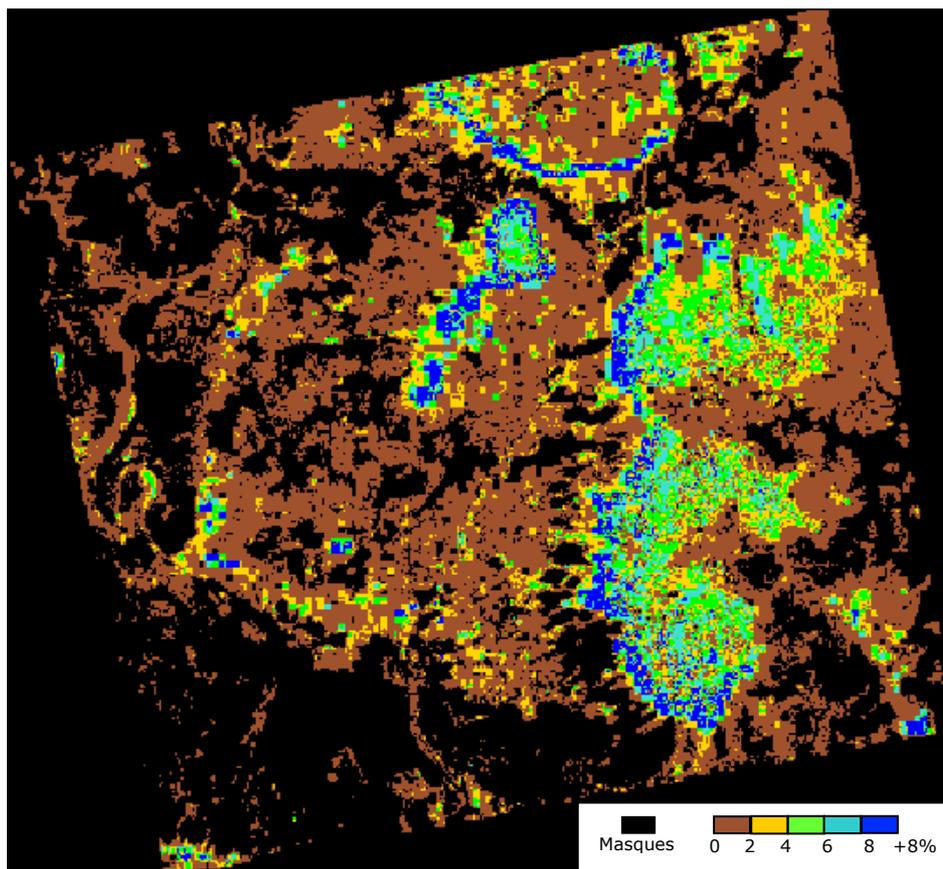
Annexe H : Quelques exemples de cartes d'humidités



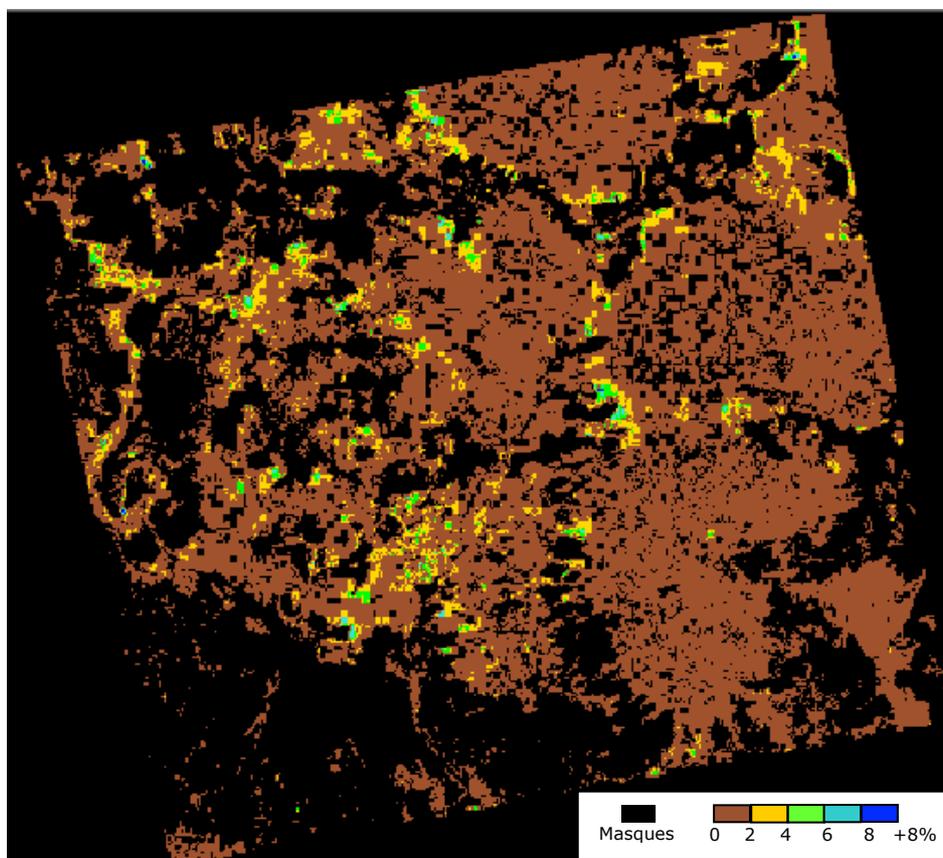
Banizoumbou, 29 mai, méthode 1, mailles de 100x100 pixels



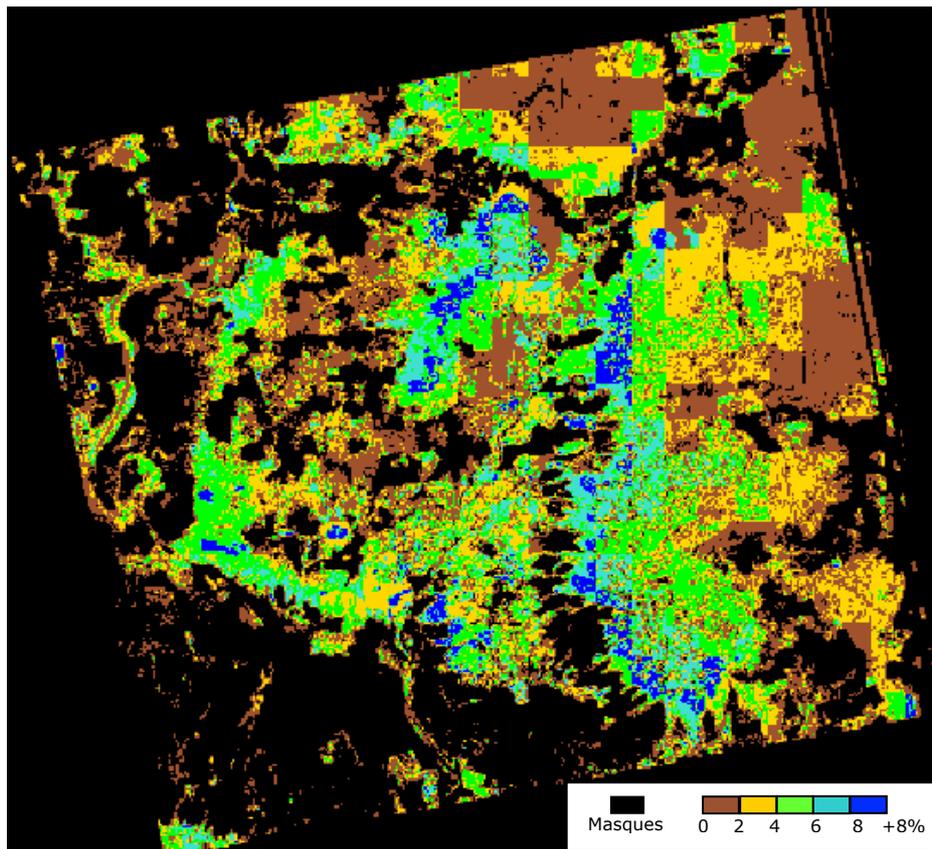
Banizoumbou, 29 mai, méthode 1, mailles de 500x500 pixels



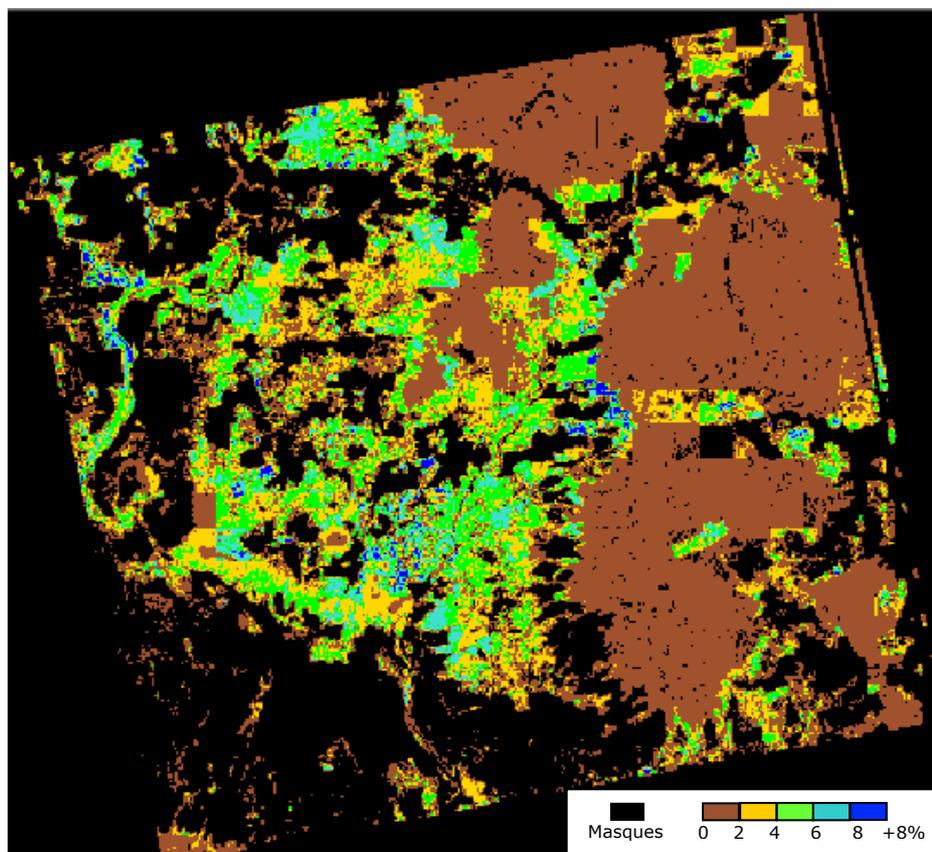
Banizoumbou, 23 juillet, méthode 1, mailles de 100x100 pixels



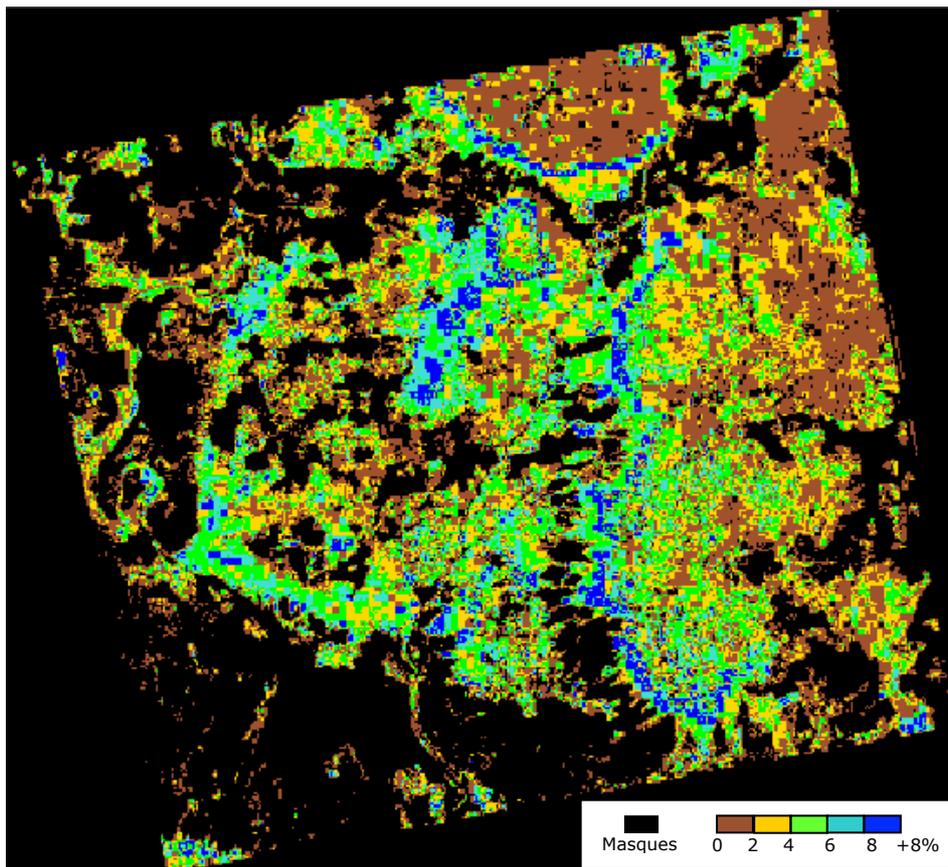
Banizoumbou, 23 juillet, méthode 2, mailles de 100x100 pixels



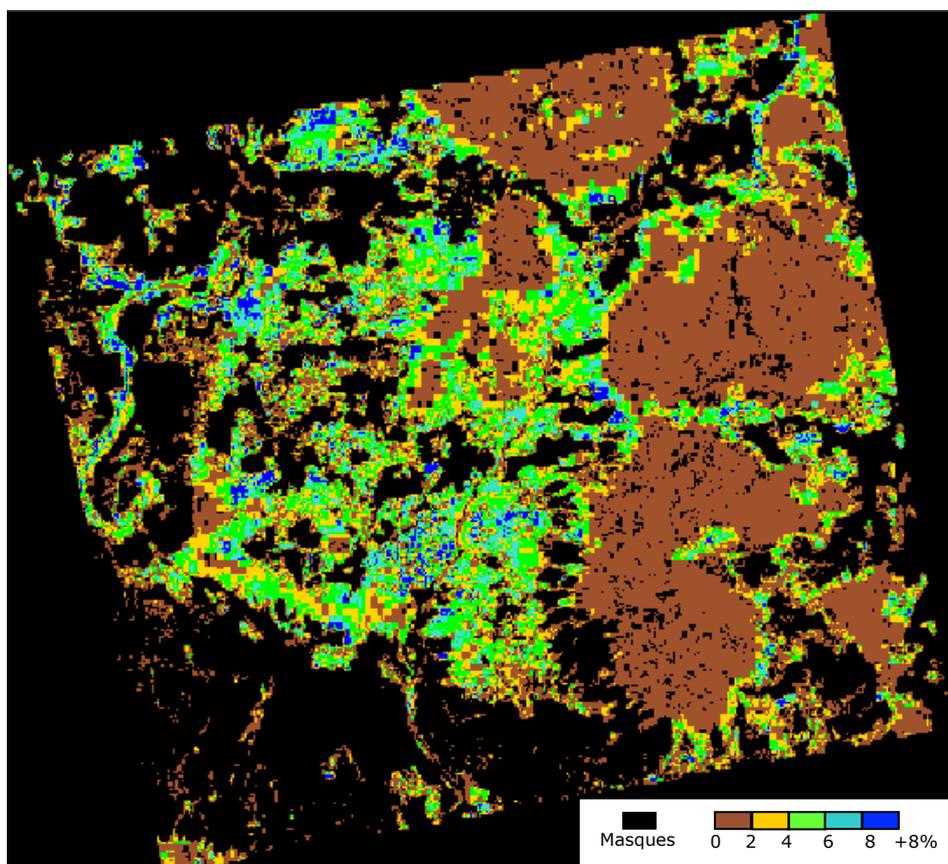
Banizoumbou, 25 août, méthode 1, mailles de 500x500 pixels



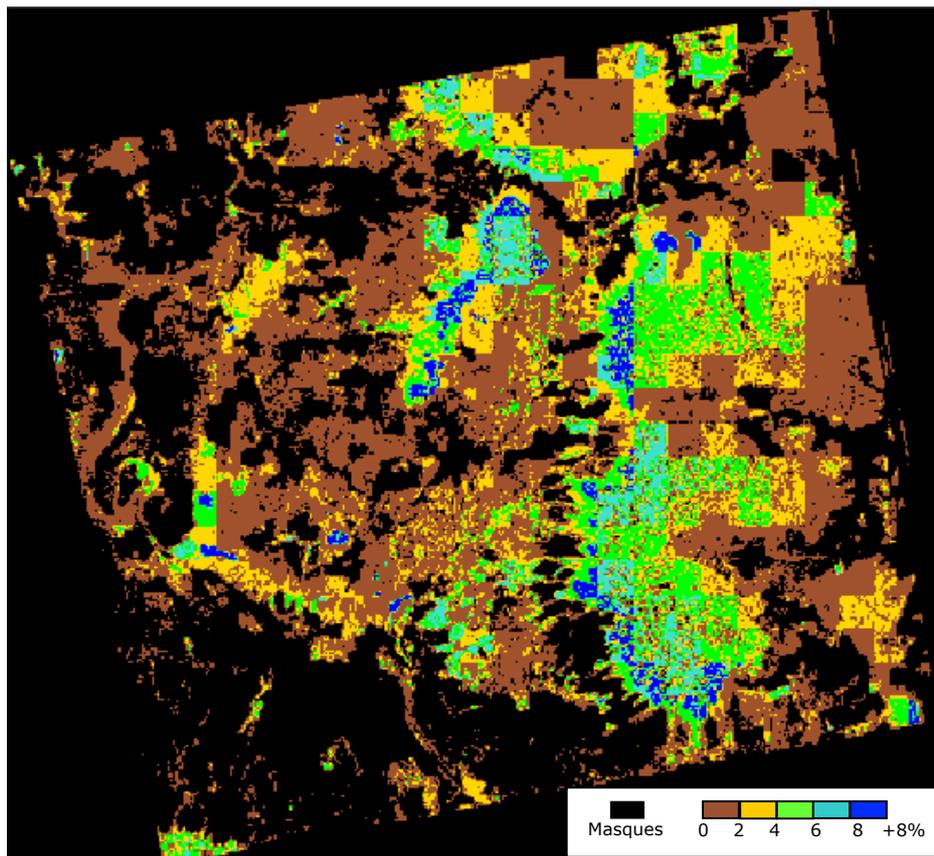
Banizoumbou, 25 août, méthode 2, mailles de 500x500 pixels



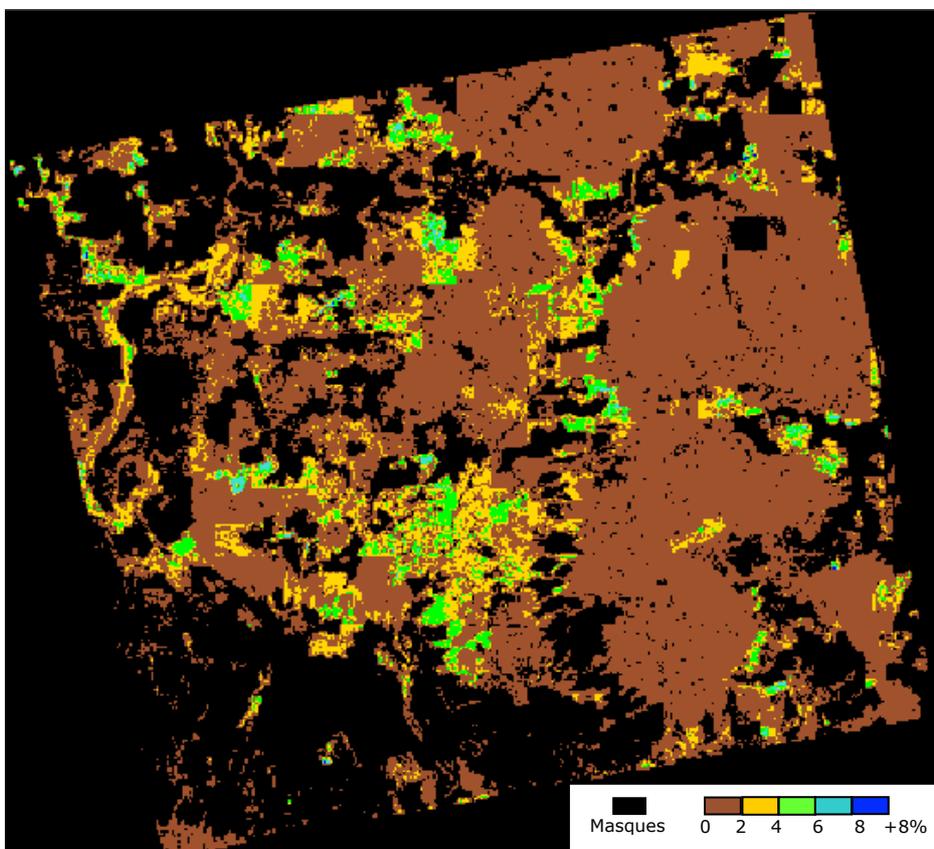
Banizoumbou, 16 septembre, méthode 1, mailles de 100x100 pixels



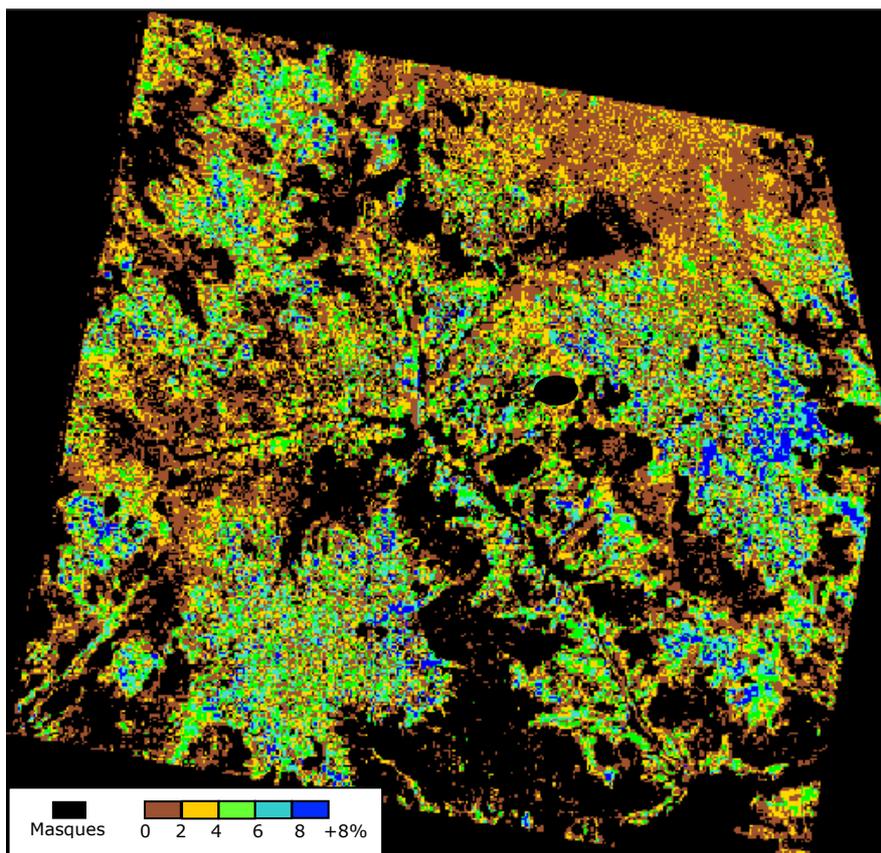
Banizoumbou, 16 septembre, méthode 2, mailles de 100x100 pixels



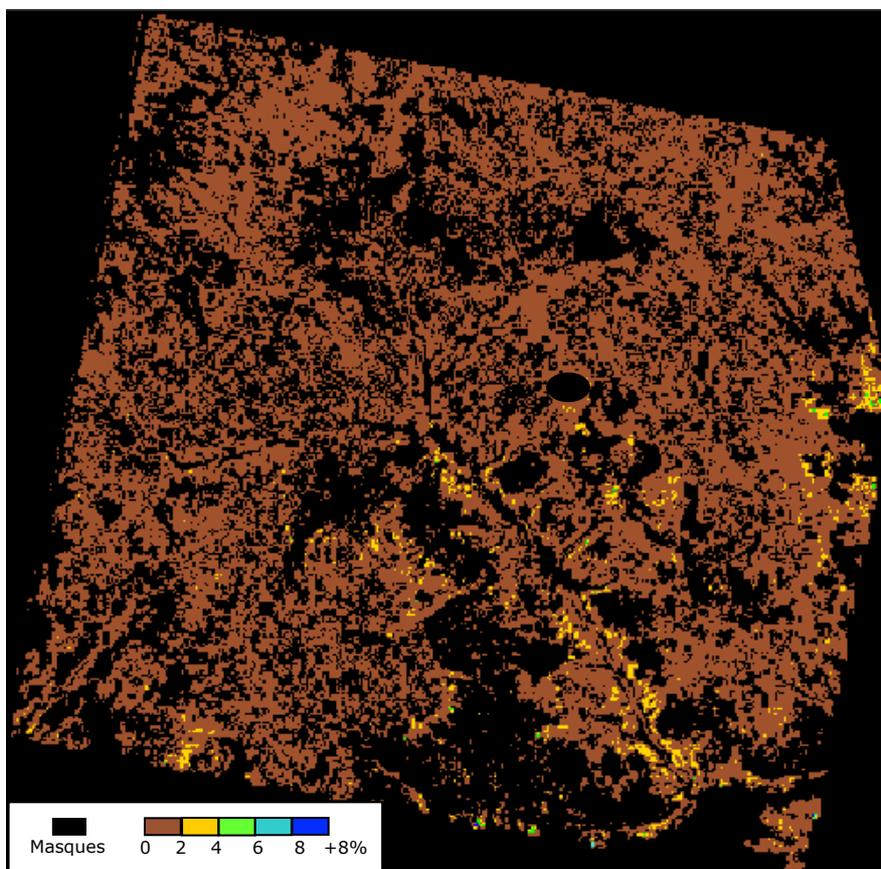
Banizoumbou, 30 octobre, méthode 1, mailles de 500x500 pixels



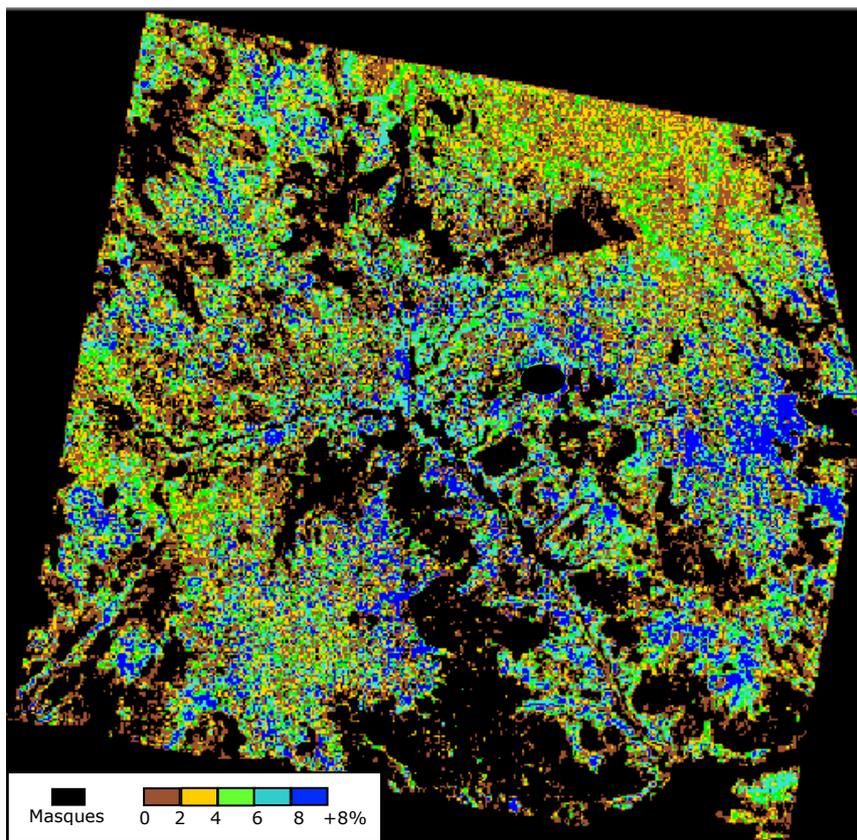
Banizoumbou, 30 octobre, méthode 2, mailles de 500x500 pixels



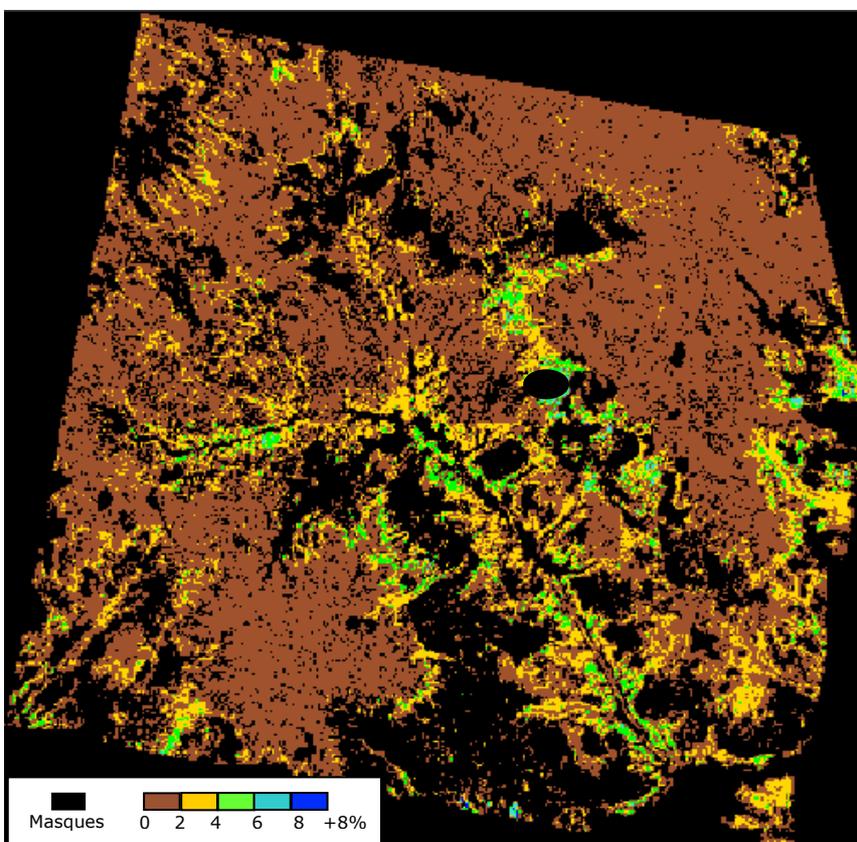
Tamou, 7 juillet, méthode 1, mailles de 100x100 pixels



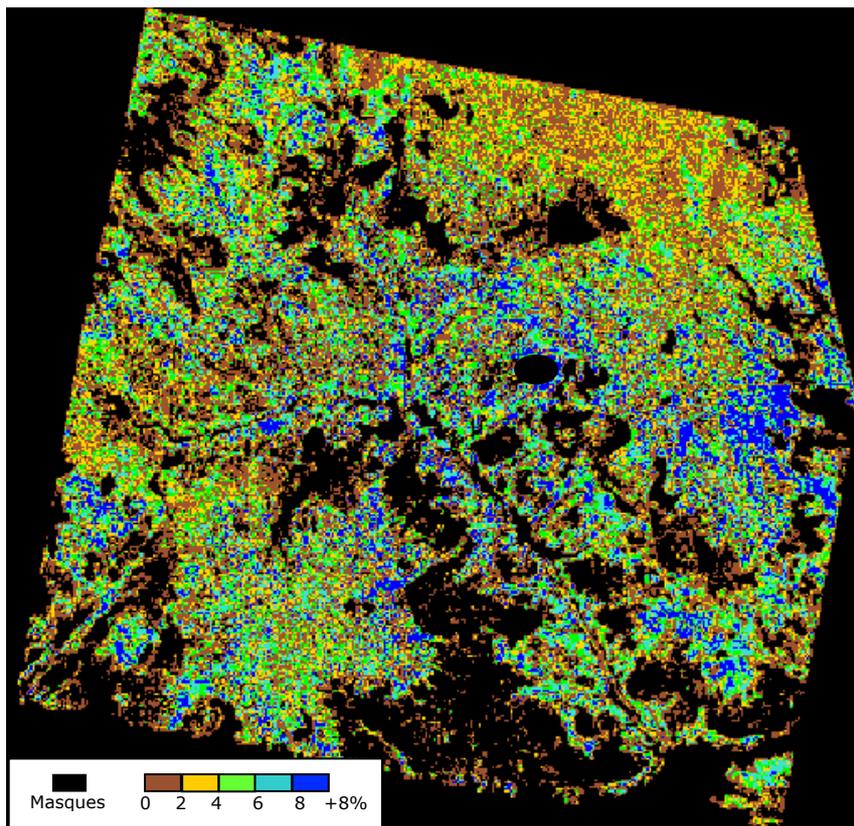
Tamou, 7 juillet, méthode 2, mailles de 100x100 pixels



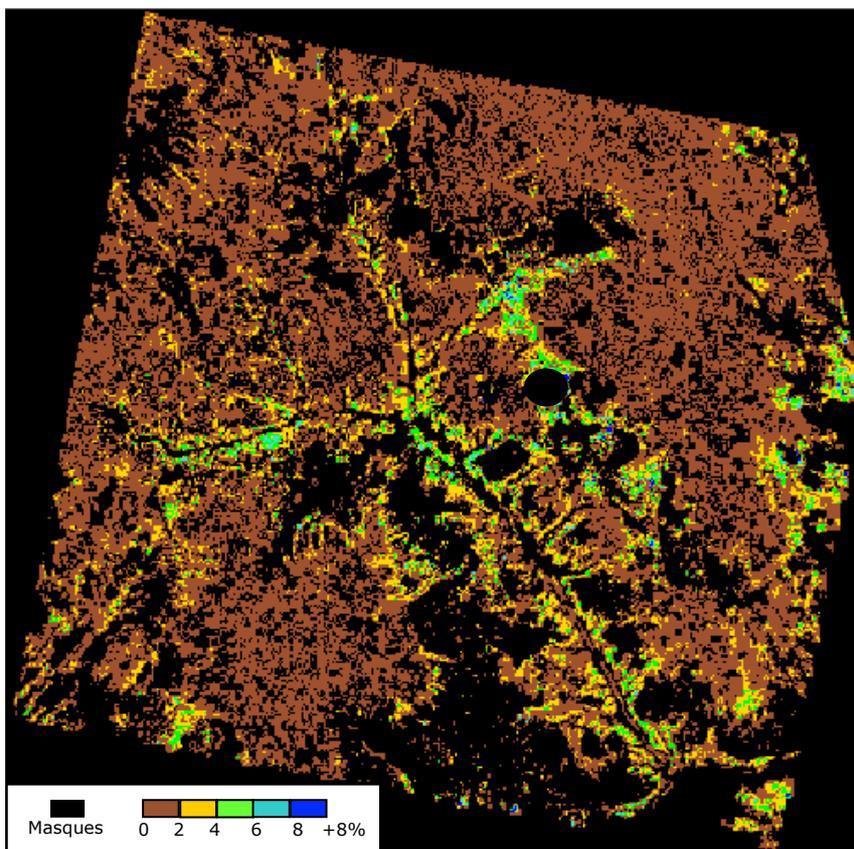
Tamou, 29 juillet, méthode 1, mailles de 500x500 pixels



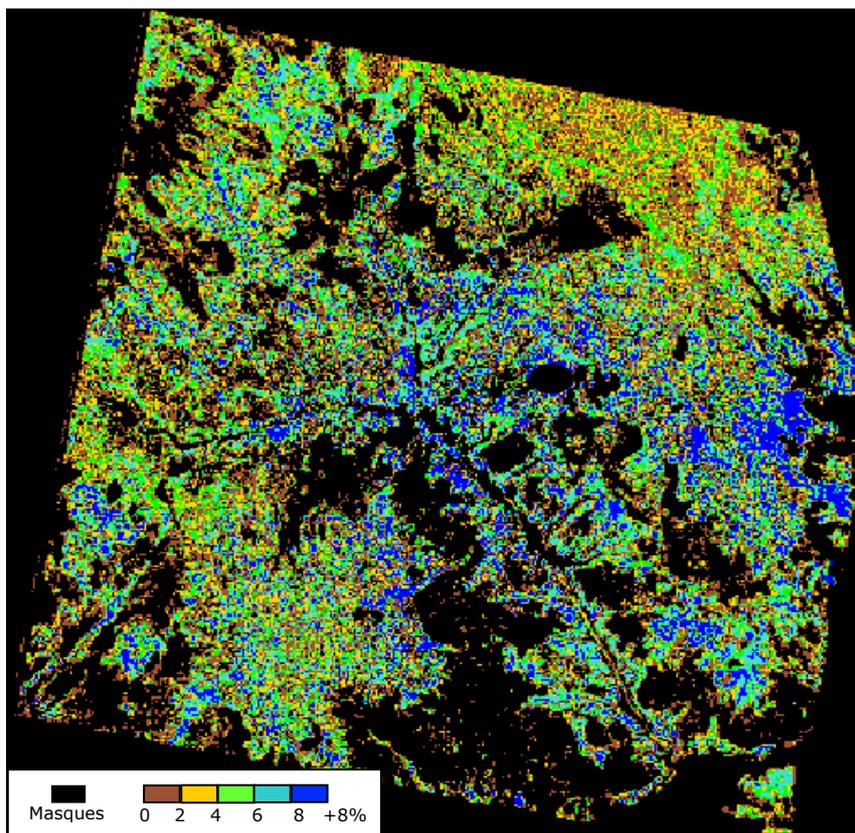
Tamou, 29 juillet, méthode 2, mailles de 500x500 pixels



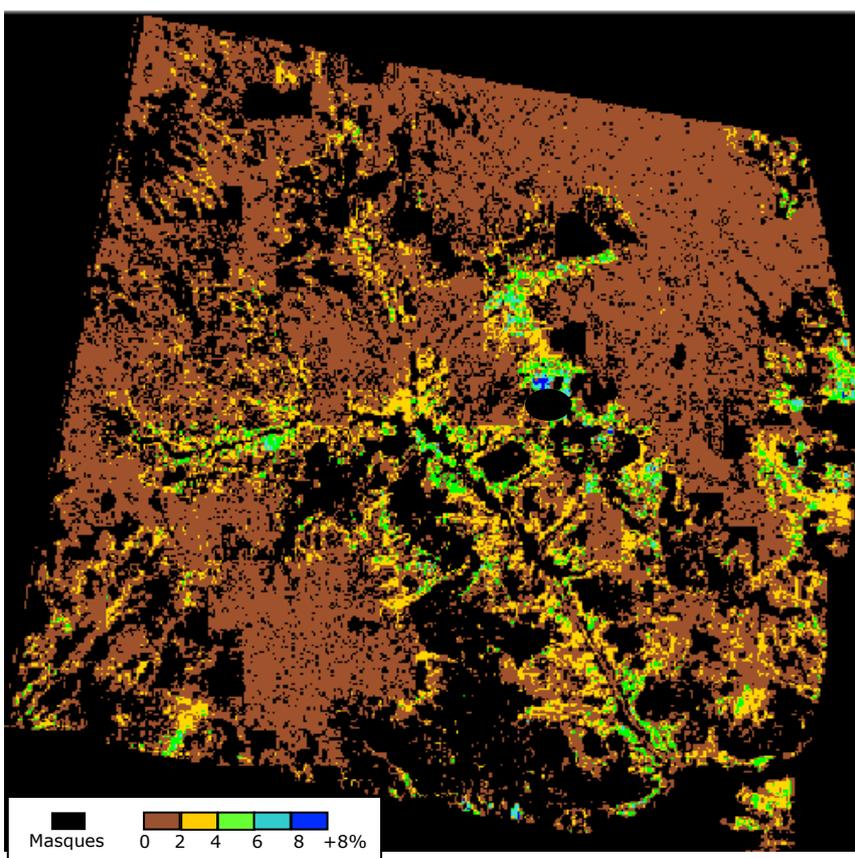
Tamou, 31 août, méthode 1, mailles de 100x100 pixels



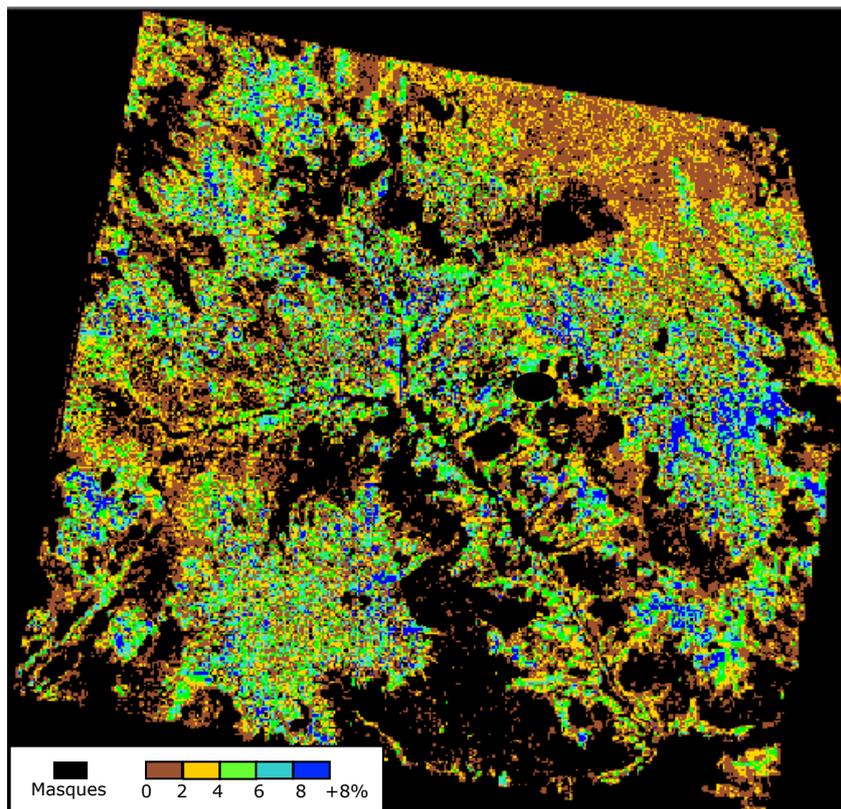
Tamou, 31 août, méthode 1, mailles de 100x100 pixels



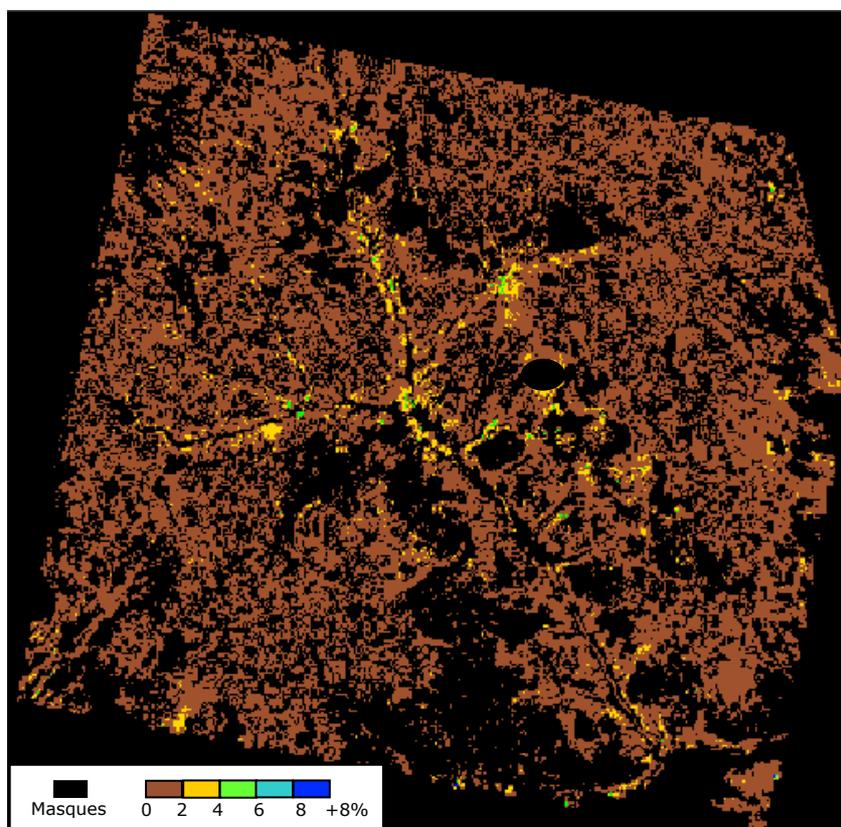
Tamou, 22 septembre, méthode 1, mailles de 500x500 pixels



Tamou, 22 septembre, méthode 2, mailles de 500x500 pixels



Tamou, 14 octobre, méthode 1, mailles de 100x100 pixels



Tamou, 14 octobre, méthode 2, mailles de 100x100 pixels

Résumé/Abstract

La dégradation des sols est alarmante dans de nombreuses régions du monde. Le Sahel, région aride, constitue un milieu hostile au développement anthropique et l'agriculture y est de plus en plus problématique, notamment par la pauvreté des sols en matière organique. Cependant, le développement de croûtes biologiques sur les sols nus des jachères et des plateaux joue un rôle prédominant d'un point de vue écologique. Les caractéristiques physiques et l'activité microbienne de ces croûtes permettent en effet d'enrichir voire de stabiliser le sol. L'étude approfondie de cette croûte apparaît nécessaire et son suivi à l'échelle régionale serait facilité par l'utilisation de l'imagerie satellitale. Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet BioCrust portant sur la vulnérabilité des croûtes microbiennes et la dégradation des sols en zone sahélienne. L'imagerie optique fournit des cartes d'occupation du sol alors que l'imagerie radar permet de suivre l'humidité du sol. Un des objectifs du projet BioCrust est d'étudier la possibilité de cartographier les zones où la présence de croûtes biologiques est importante. L'humidité du sol qui semble corrélée à la présence de croûte va permettre d'établir des relations entre signal radar et humidité, puis entre humidité et croûte. L'évolution de l'humidité du sol au cours des saisons sera prise en compte également. L'objectif de l'étude est d'obtenir des cartes fiables d'humidité du sol, afin de, par la suite, enrichir les possibilités de cartographie de la croûte biologique au Sahel. L'étude porte sur deux sites au Niger de 100 km² chacun sur lesquels des relevés de terrains ont été effectués simultanément à l'acquisition des images radars TerraSAR-X. Les données multi-dates permettent une estimation de l'humidité du sol suivant le type de saison. La cartographie de l'humidité des sols nus sur les deux sites nigériens et sur les différentes dates montre des humidités estimées avec une précision de l'ordre de 2,34% dans les meilleurs cas. Le lien entre humidité et présence de croûte reste cependant à établir. Ces résultats contribueront à la mise en place d'un outil de suivi de la dégradation des sols et de la vulnérabilité des croûtes microbiennes face aux changements climatiques et changements d'usage des sols.

Mots Clés : cartographie, croûte biologique, dégradation des sols, estimation de l'humidité du sol, imagerie radar, Sahel.

Soil degradation is alarming in many places. The arid area named Sahel is an hostile place for anthropological development and farming is very problematic due to soil poverty with a lack of organic matter. However, development of biological crusts on naked fallows and plateaus plays an important ecological role for soils. Physical characteristics and microbiotic activity of these crusts allow soil enrichment and stabilisation. In-depth studies of this crust seems necessary and its monitoring on a regional scale would be facilitated in using remote sensing. This study is a part of the BioCrust project, a project on microbiotic crust vulnerability and soil degradation in Sahelian zone. Optical imaging allows to establish probability maps of biological crust presence. Radar imaging brings new information on soil moisture. Soil moisture seems correlated to crust, thus relations between radar data and soil moisture can be draw up then between soil moisture and crust. Seasonal evolution of soil moisture will also be taken into account. The purpose of the study is to obtain reliable soil moisture map in order to enrich possibilities of biological crust mapping afterward. The study concerns two places in Niger of 100 km² each on which ground statements were simultaneously picked up with the acquisition of TerraSAR-X pictures. Multi dates data allow seasonal soil moisture. Soil moisture mapping on naked grounds on both sites of Niger and on various dates was done with a precision of 2.34% for the best case. However relationship between soil moisture and crust location remains to be established. These results will contribute to the implementation of a soil degradation and biocrust vulnerability monitoring tool in front of climate and land use changes.

Key Words: biological crust, mapping, radar imagery, Sahel, soil damage, soil moisture estimation.