

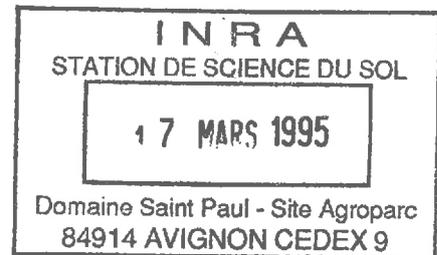
TH-EB9

INSTITUT NATIONAL de la  
RECHERCHE AGRONOMIQUE

Station de SCIENCE du SOL  
Domaine Saint-Paul  
84 140 MONTFAVET  
FRANCE

UNIVERSITE de SHERBROOKE

Boul. Université  
SHERBROKE, Québec  
J1K 2R1  
CANADA



**ESTIMATION DE L'HUMIDITE DE SURFACE DU SOL  
PAR RADIOMETRIE MICRO-ONDE**

**Caroline FOREST**

*rapport de stage  
mars-août 1994*

maître de stage:  
André Chanzy

enseignant responsable:  
Ferdinand Bonn

## TABLE DES MATIERES

|  |    |
|--|----|
| AVANT-PROPOS   |    |
| INTRODUCTION GENERALE .....                            | 1  |
| PREMIERE PARTIE: DESCRIPTION DU SITE .....             | 3  |
| 1. Campagne HAPEX-Sahel:.....                          | 3  |
| 1.1 Critères au choix du site.....                     | 3  |
| 1.2 Caractéristiques générales de la région:.....      | 4  |
| 1.2.1. Pédologie:.....                                 | 4  |
| 1.2.2. Géologie:.....                                  | 4  |
| 1.2.3. Couverture végétale:.....                       | 5  |
| 1.2.3.1. végétation naturelle:.....                    | 5  |
| 1.2.3.2. cultures:.....                                | 5  |
| 1.2.4. Climatologie:.....                              | 6  |
| 2. Supersite Central-Est.....                          | 6  |
| DEUXIEME PARTIE: THEORIE.....                          | 7  |
| 1. Caractéristiques de la radiométrie micro-onde.....  | 7  |
| 2. Paramètres physiques.....                           | 8  |
| 2.1 Humidité du sol.....                               | 8  |
| 2.2. Rugosité de la surface.....                       | 8  |
| 2.3. Effet de la végétation.....                       | 8  |
| 3. Modèle d'estimation de l'humidité du sol.....       | 9  |
| TROISIEME PARTIE: METHODOLOGIE.....                    | 11 |
| 1. Mesures radiométriques.....                         | 11 |
| 2. Mesures au sol.....                                 | 12 |
| 3. Transformations des mesures radiométriques.....     | 13 |
| 3.1 Transformation des coordonnées.....                | 13 |
| 3.1.1 La longitude.....                                | 13 |
| 3.1.2 La latitude.....                                 | 14 |
| 3.1.3 Conversion des coordonnées de mètre à degré..... | 14 |
| 3.2 Résolution au sol.....                             | 14 |
| 3.2.1 PORTOS.....                                      | 15 |
| 3.3. Pondération des températures de brillance.....    | 16 |

|  |    |
|--|----|
| QUATRIEME PARTIE: RESULTATS ET DISCUSSION .....                              | 17 |
| 1. Comparaison .....   | 17 |
| 1.1. Comparaison entre les radiomètres PBMR et PORTOS .....                  | 17 |
| 1.1.1 Méthodologie .....   | 17 |
| 1.1.2 Discussion .....   | 17 |
| 1.2. Variation angulaire .....   | 18 |
| 1.2.1 Méthodologie .....   | 18 |
| 1.2.2 Discussion .....   | 18 |
| 1.3 Visualisation de TB en fonction de la fréquence .....                    | 18 |
| 1.3.1 Méthodologie .....   | 18 |
| 1.3.2 Discussion .....   | 18 |
| 2. Caractérisation des types de végétation .....                             | 19 |
| 2.1 Méthodologie de l'approche parcelles .....                               | 19 |
| 2.2 Décroissance de TB en fonction de l'angle d'incidence .....              | 19 |
| 2.2.1 Méthodologie .....   | 19 |
| 2.2.2 Discussion .....   | 20 |
| 2.3 Variation de TB en fonction de la fréquence .....                        | 20 |
| 2.3.1 Méthodologie .....   | 20 |
| 2.3.2 Discussion .....   | 20 |
| 2.4 Croissance de la végétation .....  | 20 |
| 2.4.1 Méthodologie .....   | 20 |
| 2.4.2 Discussion .....   | 21 |
| 2.5 Conclusion .....   | 22 |
| 3. Cartographie .....  | 22 |
| 3.1 Contenu en eau de la végétation .....                                    | 22 |
| 3.1.1 Méthodologie .....   | 22 |
| 3.1.2 Discussion .....   | 23 |
| 3.1.3 Conclusion .....   | 23 |
| 3.2 Humidité de surface du sol .....   | 24 |
| 3.2.1. Estimation de l'humidité de surface .....                             | 24 |
| 3.2.1.1 Méthodologie .....   | 24 |
| 3.2.1.2 Relation TB - humidité mesurée .....                                 | 24 |
| 3.2.1.2.1 Fréquence 1.4GHz .....   | 24 |
| 3.2.1.2.2. Fréquence 5.05 GHz .....  | 25 |
| 3.2.2 Cartographie de l'humidité de surface à l'échelle régionale .....      | 25 |
| 3.2.2.1 TB à la fréquence 1.4 GHz .....                                      | 25 |
| 3.2.2.2 Humidité 0-0.5cm .....   | 26 |
| 3.2.3 Relation humidité mesurée et estimée à la fréquence 1.4 GHz .....      | 26 |
| 3.2.4 Comparaison de l'humidité volumique estimée entre PORTOS et PBMR ..... | 26 |
| 3.2.5 Conclusion .....   | 27 |
| CONCLUSION GENERALE .....  | 28 |
| BIBLIOGRAPHIE .....  | 29 |
| ANNEXES  |    |

## AVANT-PROPOS

Je tiens avant toute chose à remercier chaleureusement tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail:

Laurent BRUCKLER, directeur de l'Unité de Science du sol, de m'avoir accueilli au sein de son service

André CHANZY, mon maître de stage, pour sa disponibilité et sa rigueur tout au long du stage.

Ferdinand BONN, mon directeur d'étude, qui m'a donné la chance d'effectuer ce stage en France.

Enfin, un grand merci à Marie, Tiziano et Brigitte pour leur joie de vivre et les fous rires partagés dans les couloirs de la station.

## INTRODUCTION GENERALE

Les interactions entre les surfaces continentales et l'atmosphère déterminent en partie l'évolution du système climatique, par le biais des échanges de quantité de mouvement, d'énergie, d'eau et de gaz carbonique. Une compréhension profonde de ces processus est donc nécessaire pour étudier le climat et son évolution. Une validation directe à l'échelle globale du fonctionnement des modèles de circulation générale est pratiquement impossible. Une étape intermédiaire très utile consiste à réaliser des études expérimentales sur le terrain pour collecter l'ensemble des données. Deux études pilotes en ce domaine ont déjà été réalisées, citons le programme HAPEX-MOBILHY exécuté en 1986 dans le sud-ouest de la France et les programmes FIFE en 1987 et 1989 au Kansas (USA). A ces occasions des stratégies expérimentales ont été élaborées et testées sur le terrain et des bases de données très complètes mises en place. Maintenant, il s'agit d'étendre les investigations aux régions non tempérées (Monteny, 1993).

Parmi celles-ci, la zone sahélienne de l'Afrique de l'Ouest est une région particulièrement sensible où la végétation régresse sur de vastes étendues. Des expériences numériques de simulation de la circulation générale de l'atmosphère indiquent qu'une diminution du couvert végétal sur la région pourrait entraîner une baisse de la pluviométrie. Or, l'activité agricole est fortement dépendante des conditions climatiques. Les Campagnes HAPEX-Sahel (Hydrologic-Atmospheric-Pilot-Experiment in the Sahel), effectuées en 1991 et 1992 au Niger, avaient pour objectif de mieux cerner cette problématique dans la région sahélienne.

La télédétection est un outil qui permet d'étudier les processus à une échelle régionale ( $100\text{km}^2$ ), comblant ainsi le manque d'informations entre l'échelle locale (de l'ordre de l'ha) et l'échelle globale (de l'ordre de  $10^4$  à  $10^6\text{ km}^2$ ). De plus nous pouvons accéder, à une échelle variable dans l'espace, à des paramètres de surface tels que la température, l'humidité de surface du sol qui sont indicatrices des conditions climatiques (Gaudin, 1994).

L'humidité du sol joue un rôle important en météorologie, hydrologie et agronomie. La connaissance de l'humidité permet de prédire, entre autre, l'eau de ruissellement après une pluie, la germination et la croissance précoce de la plante. Afin de déterminer avec plus de précision l'humidité à la surface d'un sol, il est conseillé d'utiliser la radiométrie micro-onde. Cette technique offre de nombreux avantages: (1) les mesures peuvent être prises sous toutes les conditions météorologiques, (2) les micro-ondes pénètrent certains types de végétation, (3) la radiométrie est sensible à l'humidité du sol. Cependant, cette technique présente également des inconvénients, (1) une résolution spatiale limitée, (2) certaines fréquences sont sensibles à la végétation et à la rugosité de surface (Engman, 1991). En outre, les techniques de télédétection peuvent donner une estimation de l'humidité du sol que pour une couche de surface d'une épaisseur de 5cm. Cette profondeur est faible comparativement à la présence du réseau racinaire qui peut atteindre 1-2m pour certaines cultures (Schmugge, 1985).

La cartographie à l'échelle régionale de l'humidité de surface du sol estimée par radiométrie micro-onde constitue le principal objectif de ce travail. Mais avant d'estimer l'humidité du sol, nous voulons bien comprendre le rôle de la végétation sur les valeurs d'émissivité. Cet effet peut être observé en comparant différentes fréquences et polarisations. Le travail de recherche est divisée en trois parties:

- Dans la première partie nous comparons les températures de brillance mesurées à différentes fréquences, polarisations et angles d'incidence.
- Ensuite, nous caractérisons les types de végétation (mil, jachère, brousse tigrée) par diverses approches (différence de température de brillance, variation angulaire et des fréquences, contenu en eau de la végétation) afin de vérifier si les types de végétation présentent des signatures distinctes qui permettent de les identifier.
- Nous établissons une relation entre la température de brillance et l'humidité mesurée pour différentes fréquences (1.4 et 5.05 GHz). A partir de ces relations, nous pouvons observer si il y a influence ou non de la végétation sur les températures de brillance. Cette relation détermine la démarche à suivre dans l'estimation de l'humidité de surface du sol. Finalement, nous essayons de cartographier l'humidité de surface du sol à une échelle régionale pour différentes journées.

La première partie du rapport décrit la zone d'étude à l'échelle régionale et à l'échelle locale. La seconde partie présente la théorie sur laquelle s'appuie l'estimation de l'humidité du sol. La méthodologie utilisée sur le terrain pour l'échantillonnage, la description des paramètres radiométriques et les démarches suivies pour la conversion des données sont présentées dans la troisième partie. Finalement, les résultats obtenus sont discutés dans la quatrième partie.

## PREMIERE PARTIE: DESCRIPTION DU SITE

Dans cette partie, une description de la région est présentée. Nous expliquons les raisons qui ont appuyé le choix de cette région sahélienne et décrivons ses caractéristiques physiques.

### **1. Campagne HAPEX-Sahel:**

La zone d'étude de la campagne Hapex-Sahel 1992 est comprise entre les méridiens 2°E et 3°E et les parallèles 13°N et 14°30N. Elle couvre un territoire de 100km X 150km. Niamey, capitale de la République du Niger, est située sur la bordure occidentale de cette zone.

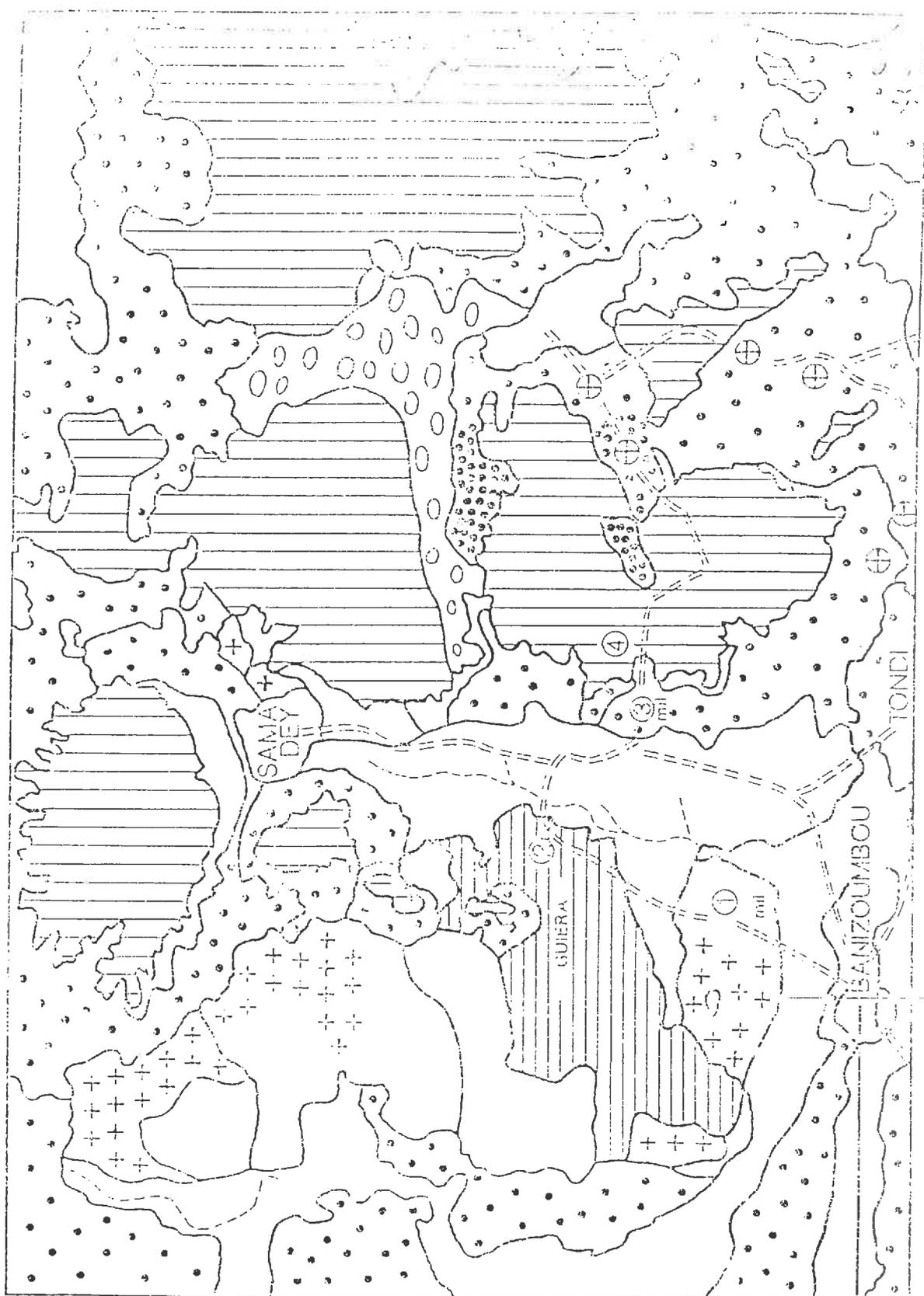
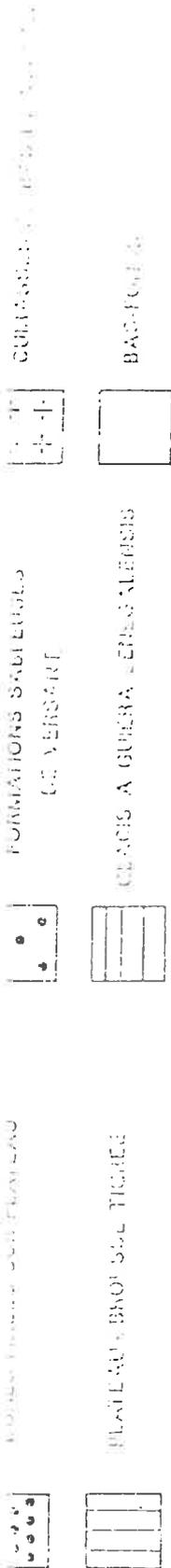
#### **1.1 Critères au choix du site**

Le choix du site pour la Campagne HAPEX-Sahel s'est arrêté sur cette zone car elle présente de nombreux avantages:

1. Elle est typique d'une grande bande zonale du Sahel.
2. Le climat est caractérisé par une saison des pluies bien marquée. le "stress hydrique" fait son apparition lors des épisodes secs.
3. Un fort gradient nord-sud des précipitations, représentatif du gradient moyen au Sahel, induit une variation intéressante des conditions hydriques (isohyètes 400-800mm, de N'Djamena à Kayes).
4. La région est bien adaptée à la télédétection. le relief est peu marqué (dénivellation maximale de 100m sur 10 000km<sup>2</sup>) et la gamme des types de végétation est réduite.
5. L'impact de l'activité humaine sur le paysage reste faible. Il n'y a pas d'exploitation intensive avec pratique de l'irrigation (à l'exception, restreinte, du lit du fleuve Niger).
6. Le développement de la végétation est très rapidement influencé par les changements dans l'humidité du sol, même à petit pas de temps (2 semaines).
7. Les régions côtières et montagneuses sont éloignées du périmètre à l'étude.
8. Son régime hydrologique complexe, avec une forte variabilité spatiale et temporelle de l'infiltration et de l'écoulement de surface et d'importantes concentration de nappes d'eau libre ("mares") dans certaines parties, est caractéristique de l'ensemble du Sahel (Notes HAPEX).

#### **1.2 Caractéristiques générales de la région:**

De nombreuses études ont été effectuées sur le terrain afin de décrire les caractéristiques physiques de la région. En voici les grandes lignes: (Notes HAPEX)



⊕ SITES PRAESELECTIONNES, NON RETENUS  
 ⊙ SITES RETENUS EN FAVORABLES 1961

13° 00' N

### **1.2.1. Pédologie:**

Le domaine des sols ferrugineux tropicaux s'étend, du nord au sud, entre les isohyètes 400mm et 1300mm (nord-est de la Côte d'Ivoire) et, d'est en ouest, depuis le lac Tchad jusqu'à Dakar, en passant par Kano, Niamey, Ouagadougou et Bamako.

Les toposéquences de la région de Niamey présentent en général la succession d'états de surface et de sols suivants (Figure I.1):

- un plateau cuirassé sur grès, avec culture de mil sur les ensablements et brousse tigrée (forêt dégradée).
- une pente constituée d'un recouvrement sableux fortement dégradé par l'érosion hydrique en amont et cultivé en mil plus en aval.
- un bas-fond sableux à nappe temporaire.

### **1.2.2. Géologie:**

Le Continental Terminal s'étend en rive gauche du fleuve Niger, depuis Gao, jusqu'au Nigeria. L'aspect classique du Continental Terminal comprend, sous la carapace ferrugineuse et les alluvions sableux, des grès et, avant le socle cristallin, des argiles grises et blanches. La nappe du Continental Terminal est située au-dessus des formations de l'Eocène et du Crétacé. Elle s'étend sur la rive gauche du Niger depuis le fleuve jusqu'à une ligne allant de Tahova à Ménaka.

Les nappes captives du Continental Terminal situées à des profondeurs de plusieurs centaines de mètres ne sont plus alimentées actuellement. Du point de vue hydrogéologique, nous distinguons trois zones particulières:

- Le Dallol-Bosso situé en limite orientale de la région. Il a été creusé au début de l'ère quaternaire et remblayé par des dépôts alluviaux essentiellement sableux. La largeur de son lit varie entre 10 et 15km, entre Baleyara et Birni-N'Gaovré. Le niveau statique de la nappe phréatique est à moins de 5m sur la majeure partie du Dallol Bosso.
- La "dépression" de Dantiadou, située sur le centre de la région, est drainée par le kori\* du même nom avec une nappe phréatique dont le niveau est situé entre 20 et 40m.
- finalement le fleuve Niger avec:
  - sur sa rive droite le Liptako-Gourma drainé par quelques cours d'eau temporaires de faible superficie (quelques dizaines de km<sup>2</sup>) comme le kori Damari.

- sur sa rive gauche, le kori de Ouallan, constitué d'une succession de mares semi-permanentes reliées entre elles lors des événements pluvieux. Ce ne sont que les crues importantes qui approvisionnent la nappe phréatique.

note \*: kori est un cours d'eau temporaire

### **1.2.3. Couverture végétale:**

#### **1.2.3.1. végétation naturelle:**

La végétation actuelle de la zone d'étude se répartit en fonction de trois facteurs principaux: la géomorphologie, la disponibilité de l'eau et l'influence humaine.

- les formations de brousse tigrée occupent les plateaux gréseux du Continental Terminal: elles présentent des faciès plus ou moins dégradés suivant l'importance de l'action anthropique.
- les formations de savanes arbustives et arborées (*Acacia albida*, *Balanites aegyptiaca*) sur substrat sableux, ont presque totalement disparu en raison de l'extension des cultures: nous ne trouvons que quelques taches réduites et des jachères.

La taille, le nombre d'espèces et la densité de la végétation varient avec la latitude (du sud vers le nord) et la pluviométrie.

Nous distinguons en zone sahélienne trois domaines essentiels:

- au nord, et sur les sables éoliens, des pâturages avec quelques espèces ligneuses.
- la steppe arbustive pour une pluie annuelle inférieure à 500mm, avec des espèces ligneuses peu nombreuses.
- les savanes arborées et arbustives, pour une pluie comprise entre 500-800mm. Elles sont les plus répandues au Niger occidental.

#### **1.2.3.2. cultures:**

90% des surfaces cultivées sont consacrées au petit mil (*Penisetum sp.*). Depuis quelques années sont pratiquées des cultures de contre-saison comme le niébé (*Vigna unguiculata*) en saison sèche, au bord des mares temporaires.

Les cultures agricoles sont toutes manuelles et extensives: préparation succincte par abattage des arbres, semis sans travail du sol, fumure naturelle par le bétail près des villages seulement.

Les principales activités développées au champ sont les semis (dès que le sol est humide sur 30 à 40cm en profondeur), le sarclage et la récolte en septembre et octobre.

Les formations de vallées sèches (Dallol) sont intensément cultivées (cultures de mil principalement). Dans ces formations anthropisées, composées de jachères et de champs cultivés, se distinguent différents faciès liés à la densité et à la nature de la strate ligneuse maintenue en place.

#### **1.2.4. Climatologie:**

Les principales caractéristiques climatiques sont celles d'un régime sahélien type.

La direction de fréquence maximale des vents est de nord-est en saison sèche et de sud-ouest en saison de pluie, avec de fortes intensités de vent de courte durée, de direction est-nord-est au cours de la saison des pluies.

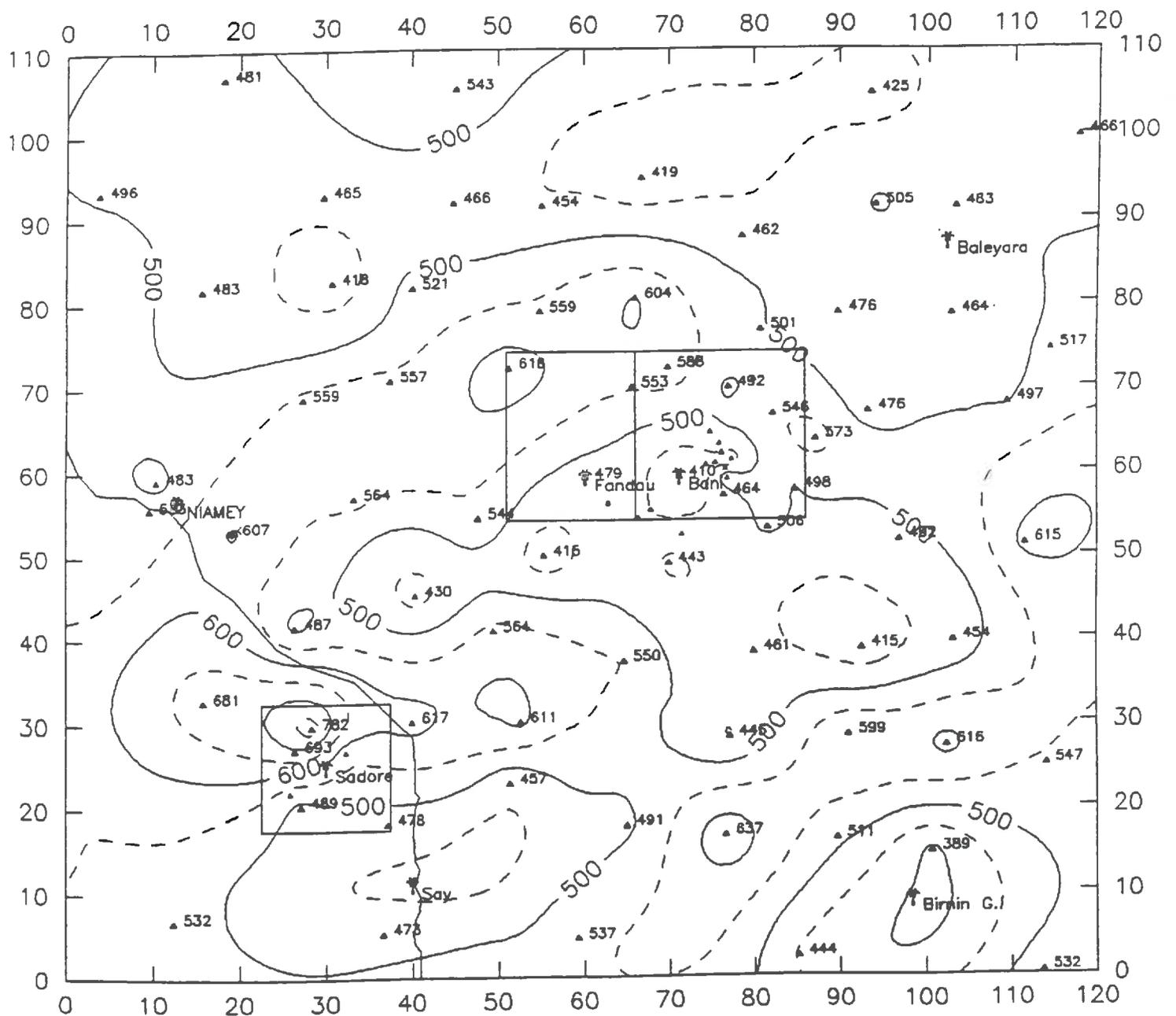
La pluviométrie moyenne annuelle est de 550mm à Niamey (583mm en moyenne de 1905 à 1967 et moins de 500mm de 1968 à 1987). Les répartitions spatiales et temporelles des pluies sont très variables (Figure 1.2). L'évapotranspiration potentielle est de 2000mm à Niamey en moyenne annuelle.

Les averses sont de faible durée pouvant présenter de fortes intensités de pluie en début d'averse suivies d'une "traîne" à intensités plus modérées.

## **2. Supersite Central-Est**

Le supersite Central-Est (SSCE) est situé à 65km à l'est de Niamey, près du village de Banizoumbou (Figure 1.2). Son périmètre est compris entre 2°36.77E - 2°47.88E et 13°29.21N - 13°40N d'une superficie de 20km X 20km. La partie centrale est constituée par le bassin versant de Sama Dey. Ce bassin comprend un système hydrologique temporaire dans le bas-fond. Les limites du bassin sont les plateaux couverts de bandes de végétation ligneuse (appelée brousse tigrée). Le plateau est raccordé au bas fond par des versants sableux provenant de l'accumulation éolienne d'origine sahélienne. Les caractéristiques de pente sont fonction de la provenance des vents transporteurs. SSCE est couvert d'une végétation arbustive dominante (*Gutiera seng.*) éparses, associée à une strate herbacée annuelle (graminéenne ou non). La densité du couvert dépend des zones d'accumulations des eaux. Le sol, d'une profondeur de 1.5-2m, est en majorité sableux (Monteny, 1993).

Des wabs et des parcelles sont sélectionnées à l'intérieur du SSCE afin d'étudier chaque type de végétation. Elles seront introduites au moment opportun.



I.2  
**Figure 1. Isohyètes (mm) de la saison des pluies 1992 (15 avril-15 octobre) sur le degré carré de Niamey. 88 stations (cumuls seuil). Coordonnées en km: origine 2° E, 13° N.**

## DEUXIEME PARTIE: THEORIE

De nombreuses études ont été effectuées afin de déterminer l'humidité de surface du sol par télédétection micro-onde depuis les années 80 (Jackson et al., 1982; Newton et al., 1982; Schmugge, 1983). L'influence de certains paramètres est bien connue. Pour d'autres, il est encore difficile de les quantifier. Cette partie présente quelques notions qui permettront de mieux comprendre la suite de ce mémoire.

### 1. Caractéristiques de la radiométrie micro-onde

Le domaine des micro-ondes (hyperfréquences) s'étend de 1 à 100 GHz en terme de fréquence et de 0,3 à 3m en terme de longueur d'onde. Nous pouvons calculer la fréquence ( $\nu$ ) ou la longueur d'onde ( $\lambda$ ) en utilisant l'équation suivante:

$$\lambda = c/\nu \quad (II.1)$$

ou "c" est la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques ( $3 \times 10^8$  m/s). L'atténuation atmosphérique  $\gamma$  est très faible, particulièrement aux fréquences inférieures à 15 GHz. De plus, l'émission du sol est peu atténué par la végétation aux basses fréquences (<2 GHz). Ces fréquences sont donc utiles pour l'estimation de la teneur en eau du sol.

Deux techniques sont utilisées en télédétection micro-onde, le domaine passif où l'émission naturelle de la surface est enregistrée et le domaine actif où la réflectivité de la surface est mesurée. L'émissivité d'une surface est obtenue par

$$\epsilon = T_B/T_S \quad (II.2)$$

où  $T_B$  est la température de brillance qui est la température qu'aurait un corps noir si il émettait cette énergie et  $T_S$  est la température de la surface. Dans le domaine des micro-ondes passives, la température de brillance varie en fonction de la polarisation soit horizontale (H) ou verticale (V), de la fréquence et de l'angle d'incidence utilisé. La Figure II.1 montre la variation de la température de brillance pour les deux polarisations à différents angles d'incidence. Ces variations sont présentées pour les fréquences 1.4 GHz (L-band) et 5.05 GHz (C-band). Il est démontré que la température de brillance diminue en polarisation H, alors qu'elle augmente en polarisation V avec l'angle d'incidence et la différence de  $T_B$  entre ces deux polarisations diminue avec l'augmentation de la fréquence.

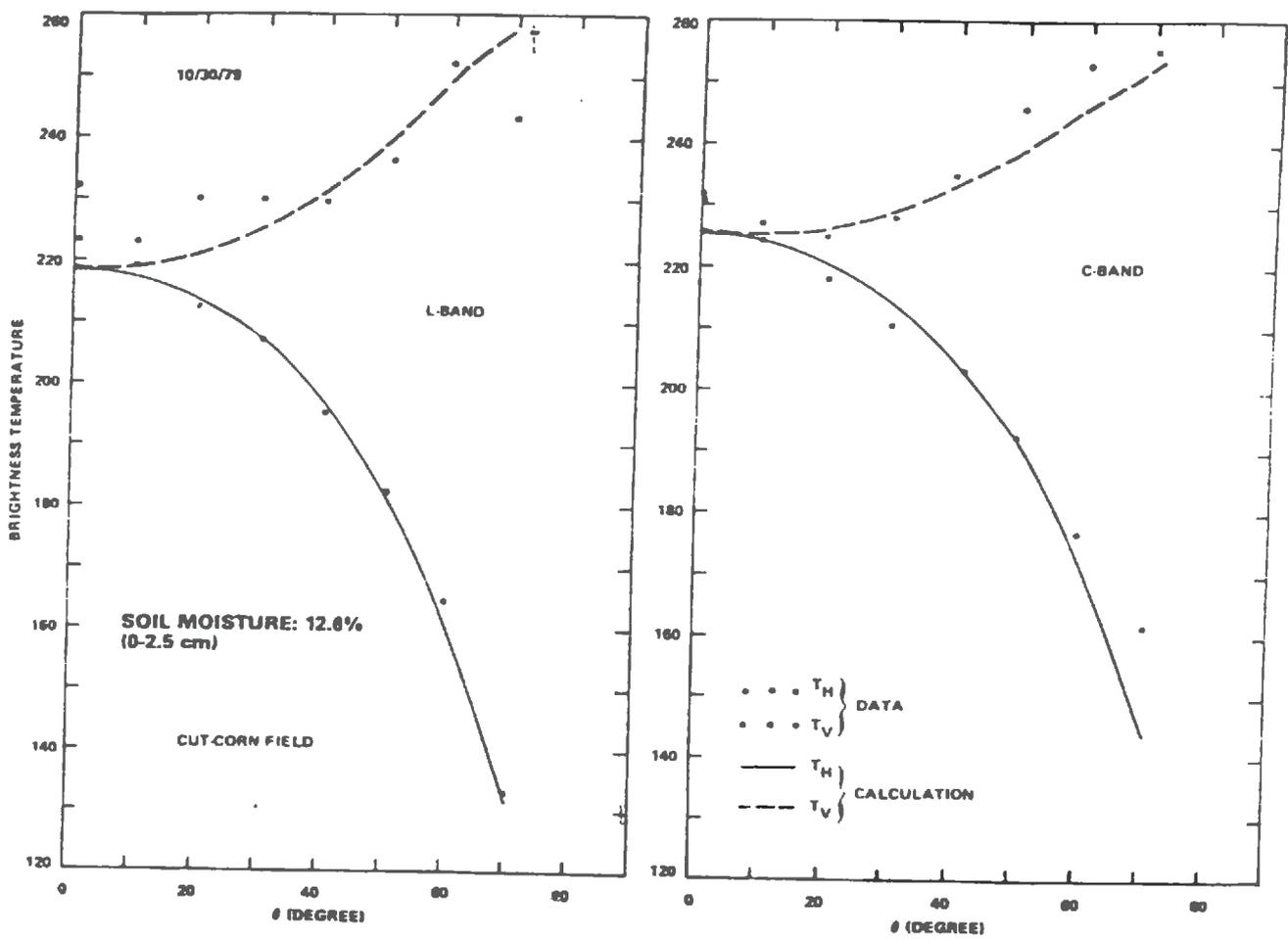


Figure II. 1:  $T_B = f(\theta, \text{polarisation})$ . (mo et al., 1990)

## **2. Paramètres physiques**

L'émissivité de la surface varie en fonction de divers facteurs physiques tels que la teneur en eau du sol, la rugosité de la surface et la végétation.

### **2.1 Humidité du sol**

En radiométrie micro-onde, l'émissivité dépend de la teneur en eau du sol qui elle est fonction de la constante diélectrique. Cette dernière varie d'un matériel à l'autre, par exemple pour l'air,  $k=1$ ; sol sec,  $k=4$ ; sol humide,  $k=20$  et l'eau libre,  $k=80$  (Schmugge, 1983; Jackson & Schmugge, 1989). C'est donc le contraste entre les valeurs de la constante diélectrique de l'eau et de la matrice du sol qui rend l'utilisation des micro-ondes intéressante pour la détection de l'humidité de surface du sol. La variation de la constante diélectrique d'un sol, basée sur le contenu en eau, peut produire un changement de l'émissivité de 0,95 pour un sol sec à 0,6 ou moins pour un sol humide, c'est-à-dire une variation de 30% dans l'émission naturelle du sol (Figure II.2).

### **2.2. Rugosité de la surface**

L'effet de la rugosité de surface varie en fonction de la fréquence et de l'angle d'incidence. La Figure II.3 montre que la différence de  $T_B$  diminue avec la rugosité. Les températures de brillance apparaissent plus élevées avec les surfaces rugueuses (Figure II.4), montrant ainsi une perte de sensibilité à la teneur en eau d'un sol.

### **2.3. Effet de la végétation**

La végétation influence les mesures de l'émissivité d'un sol dans le domaine des micro-ondes, car elle absorbe le rayonnement du sol et s'ajoute au rayonnement total par sa propre émission (Jackson & Schmugge, 1991). L'effet de la végétation sur les valeurs de l'émissivité est sensiblement le même que celui de la rugosité. C'est-à-dire qu'une diminution de la différence de température de brillance entre les polarisations H et V est remarquée avec une croissance du couvert végétal. De plus, les valeurs de l'émissivité augmentent à partir d'un sol nu à un sol couvert de végétation (Figure II.5).

L'effet de la végétation dépend du contenu en eau ( $W_c$ ) et de la structure de la végétation, et de la fréquence utilisée. Le couvert végétal est plus transparent aux petites fréquences qu'aux grandes (Engman, 1991). A la fréquence 1,4 GHz, ce n'est que le rayonnement émis par le sol qui est mesuré étant donné la faible influence de la végétation. A l'opposé, la végétation atténue l'émission du sol à la fréquence 10 GHz et diminue par le fait même la sensibilité aux variations d'humidité.

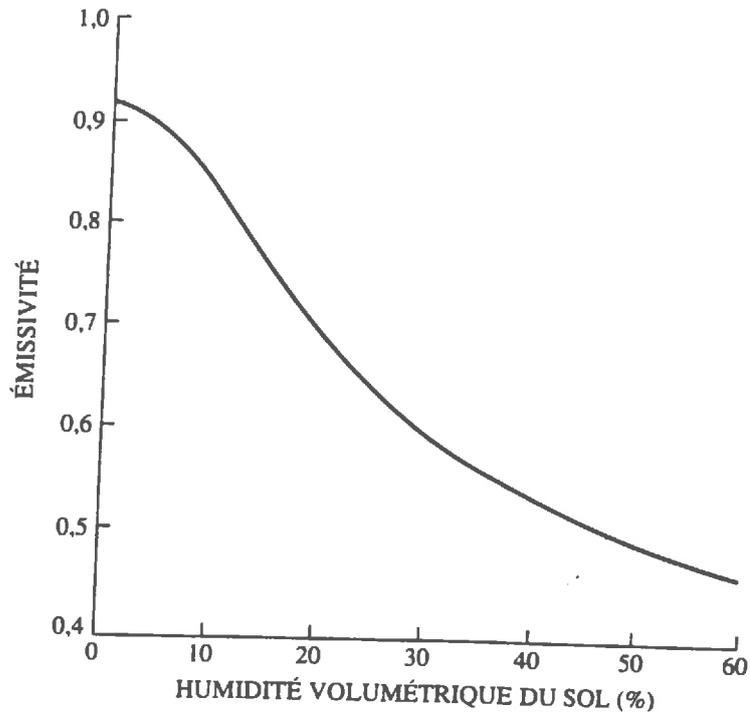


Figure II.2 : Variation de l'émissivité en fonction de la teneur en eau (Bonn et Rochon, 1993)

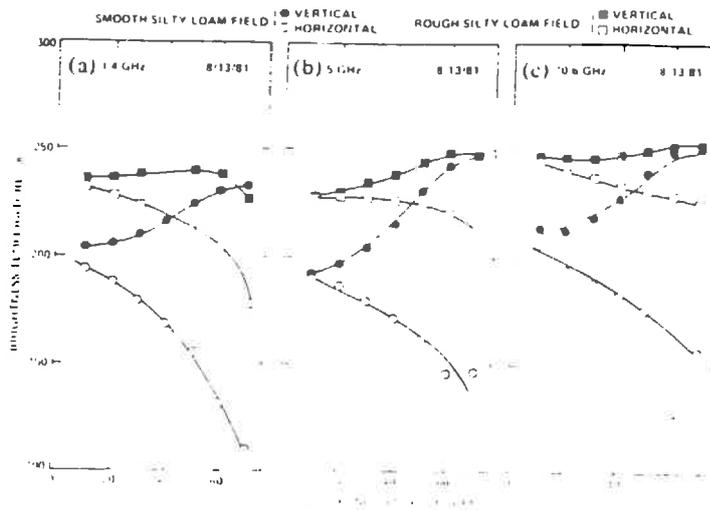


Figure II.3:  $T_B = f(\text{rugosité})$  (Wang et al. 1983)

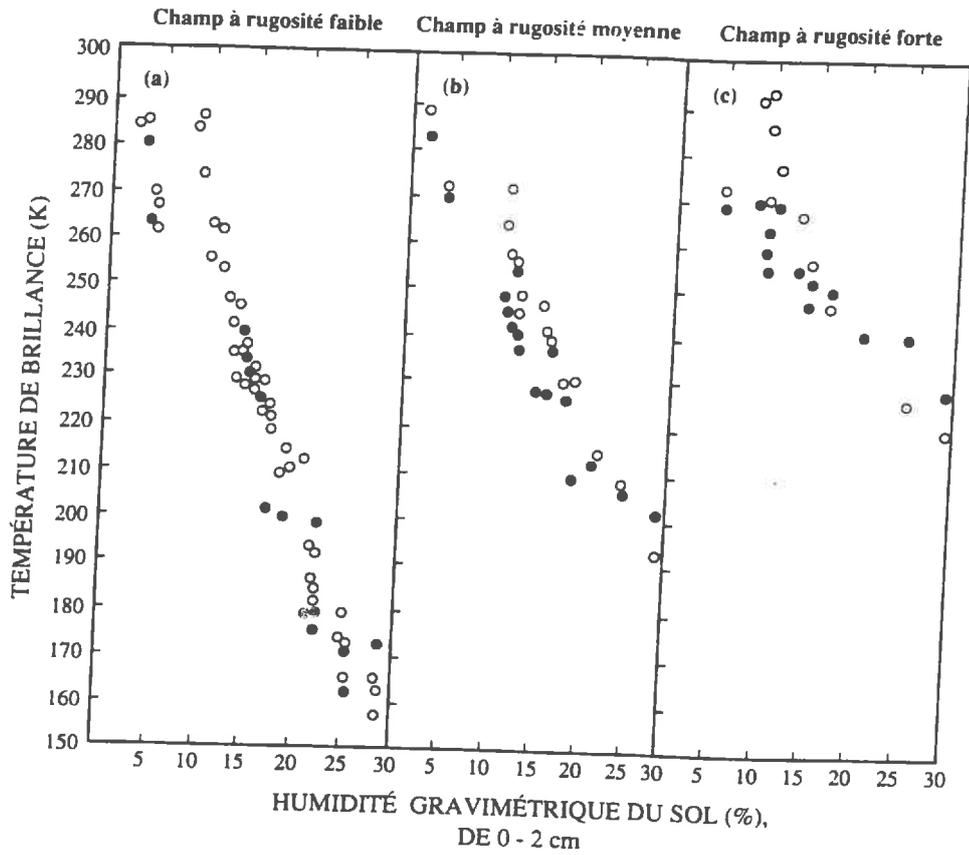


Figure II.4 :  $T_B = f(\text{rugosité})$  (Bonn et Rochon, 1993)

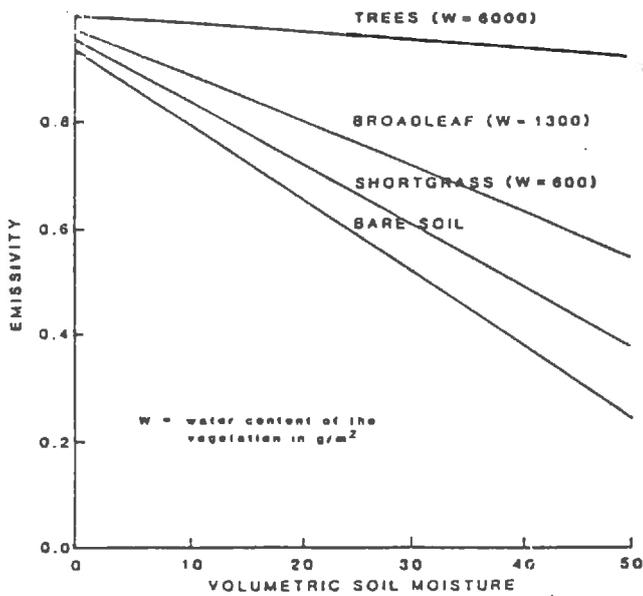


Figure II.5:  $T_B = f(\text{végétation})$   
(Jackson et Schmugge, 1989)

### 3. Modèle d'estimation de l'humidité du sol

Dans cette partie, nous introduisons le modèle semi-empirique utilisé pour l'estimation de  $T_B$  dans le cas de couverts végétaux. Si nous considérons l'influence de l'émission naturelle atmosphérique et cosmique comme négligeable, trois émissions (Figure II.6) contribuent alors à l'émission globale du couvert (Wigneron, 1993):

#### A) émission directe de la végétation

$$T_{B1} = (1-\Gamma_V) (1-\omega) (1-\gamma) T_V \quad (II.3)$$

Nous négligeons la réflectivité  $\Gamma_V$ , car l'indice de réfraction moyen de la strate de végétation est peu différent de celui de l'air et désignons par  $T_B^*$  le niveau de température de brillance provenant de l'émission naturelle de la végétation.

$$T_B^* = (1-\omega) (1-\gamma) T_V \quad (II.4)$$

#### B) émission de la végétation réfléchiée par le sol et atténuée par le couvert végétal

$$T_{B2} = T_B^* \Gamma_S \gamma \quad (II.5)$$

#### C) émission du sol, atténuée par la végétation

$$T_{B3} = e_S T_S \gamma = (1-\Gamma_S) T_S \gamma \quad (II.6)$$

En additionnant les termes  $T_B^*$ ,  $T_{B2}$  et  $T_{B3}$ , l'équation de l'émission naturelle du milieu végétation-sol s'écrit :

$$T_B = (1 + \Gamma_S \gamma) (1 - \gamma) (1 - \omega) T_V + (1 - \Gamma_S) \gamma T_S \quad (II.7)$$

Avec:

$T_B$ : température de brillance du couvert végétal (K)

$T_V$ : température physique de la végétation (K)

$T_S$ : température physique du sol (K)

$\Gamma_S$ : réflectivité micro-onde de la surface du sol

f(humidité de surface du sol)

$\gamma$ : transmissivité de la couche de végétation

$\omega$ : albédo de simple diffusion

$\Gamma_V$ : réflectivité de la végétation

$e_S$ : émissivité du sol ( $e_S \approx (1-\Gamma_S)$ )

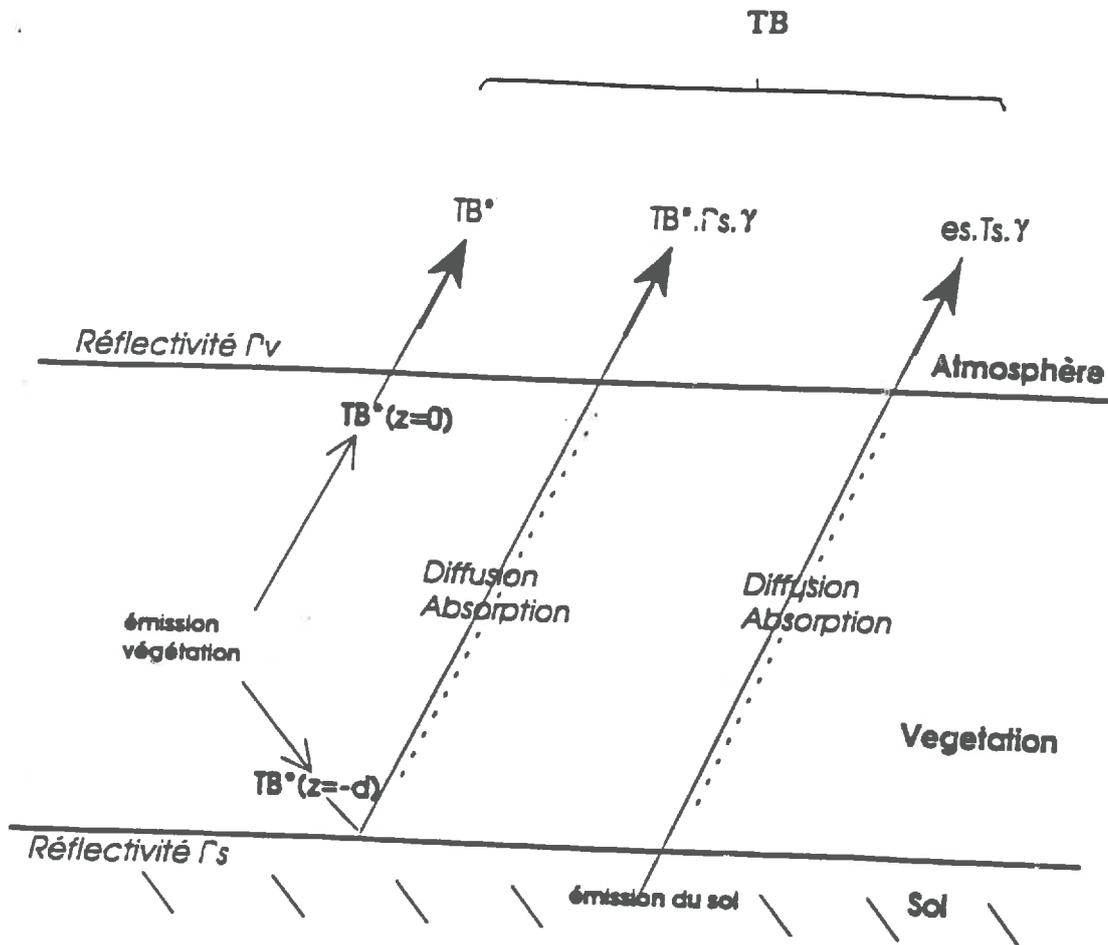


Figure II.6 : Émission globale du couvert (Wigneron, 1993)

En supposant que  $T_V = T_S$  et  $\omega$  est négligeable aux basses fréquences, l'équation II.7 s'écrit:

$$T_B = (1 - \Gamma_S \gamma^2) T_S \quad (II.8)$$

Avec:

$$\gamma = \exp(b \cdot Wc / \cos \theta)$$

$b$  = paramètre empirique dépendant de la structure de végétation

$Wc$  = teneur en eau du couvert végétal ( $kg/m^2$ )

$\theta$  = angle d'incidence

Nous constatons qu'en présence d'un couvert végétal,  $T_B$  est fonction de  $b$ ,  $Wc$ ,  $\Gamma_S$ ,  $T_S$ . Chanzy et al. (1994) ont estimé le paramètre  $b$  à 0.4 pour la fréquence 5.05 GHz. Pour ce qui est du contenu en eau de la végétation ( $Wc$ ), il est estimé à l'aide de la différence de température de brillance entre les polarisations H et V. Pour estimer la réflectivité du sol ( $\Gamma_S$ ), nous prenons en compte la rugosité de la surface à l'aide des équations II.9 et II.10:

$$\Gamma_H = [(1-Q) R_H(\theta) + Q R_V(\theta)] \exp[-h \cos^2(\theta)] \quad (II.9)$$

$$\Gamma_V = [(1-Q) R_V(\theta) + Q R_H(\theta)] \exp[-h \cos^2(\theta)] \quad (II.10)$$

où  $R_H$  et  $R_V$  sont les réflectivités du sol dans le cas d'une réflexion spéculaire sur un sol lisse (H et V sont pour les deux polarisations).  $Q$  et  $h$  sont des paramètres empiriques qui prennent en compte l'effet de la rugosité de surface sur la réflectivité du sol (Wang et al., 1983). En inversant l'équation II.8, nous observons que  $\Gamma_S$  est une fonction inverse de  $T_B$ ,  $T_S$ ,  $\gamma$ . De plus, nous savons que  $\Gamma_S$  est fonction de l'humidité du sol et des paramètres de rugosité ( $h$  et  $Q$ ). Par conséquent si  $h$  et  $Q$  sont connus, nous pouvons accéder à l'humidité de surface du sol. Dans ce travail, nous négligeons l'influence de la rugosité en supposant que  $h=Q=0$ .

L'estimation de l'humidité de surface du sol est effectuée à partir de la fonction inverse de la réflectivité de la surface du sol ( $\Gamma_S$ ). Cette inversion nécessite néanmoins de connaître  $T_B$ ,  $T_S$  et  $\gamma$  qui est fonction de  $Wc$  et  $b$ . Nous employons ce modèle lorsque le couvert végétal a un effet significatif sur les valeurs de  $T_B$ . Sinon, l'humidité est estimée à partir d'une équation de régression.

## TROISIEME PARTIE: METHODOLOGIE

Cette partie présente les mesures au sol effectuées et les radiomètres utilisés lors de l'expérience HAPEN-Sahel, télédétection micro-onde. Nous expliquons également les formules que nous avons utilisées pour convertir les données radiométriques.

### 1. Mesures radiométriques

Les mesures radiométriques au-dessus du SSCE ont été prises à l'aide de deux radiomètres. Le premier, PBMR (Pushbroom Microwave Radiometer), était à bord de l'avion C-130 de la NASA. Le second, PORTOS dont c'était la première campagne de mesures aéroportées, était embarqué sur un Fokker-27 de l'INSU-IGN (Institut National des Sciences de l'Univers - Institut Géographique National) appelé ARAT (Avion de Recherche Atmosphérique et de Télédétection). L'ARAT suivait des axes au-dessus du supersite dans le but de cartographier une zone de 20km X 3km.

Le radiomètre PBMR a quatre canaux pointant à  $\pm 8^\circ$  et  $\pm 24^\circ$  du nadir, chacun ayant une largeur d'environ  $16^\circ$ . Pendant la Campagne, ce radiomètre a effectué 5 sorties à basses altitudes. Son avantage est que l'utilisation des quatre canaux permet une meilleure résolution cartographique qu'un radiomètre. L'inconvénient de ce radiomètre est que nous obtenons que des mesures à la fréquence 1.4 GHz en polarisation H.

Pour ce qui est du radiomètre PORTOS, il fonctionne à cinq fréquences (5.05, 10.65, 23.8, 36.5 et 90 GHz) en version aéroportée. Mais dans ce travail, nous analysons que les fréquences 5.05 et 10.65 GHz. Entre le 23 août et le 17 septembre, le radiomètre a fait 7 sorties à basses altitudes. Nous avons des données du canal 5.05 GHz - H pour les 7 journées. Le canal 5.05 GHz -V n'a été opérationnel que lors des premiers vols. Ces données concernent les jours 236-237-239. Le dysfonctionnement observé résulte d'un problème sur une soudure à l'arrière d'un connecteur de la carte AF. Du fait de ces problèmes de fonctionnement, nous ne disposons que d'un échantillon de mesures assez restreint. Pour la fréquence 10.65 GHz, polarisation H et V, il n'y a que les données des jours 236-237-239 qui sont disponibles.

Finalement, le Tableau III.1 présente les fréquences, polarisations et angle d'incidence de chaque radiomètre que nous avons utilisés tout au long de ce stage.

**Tableau III.1: Caractéristiques radiométriques de PORTOS et PBMR**

| Radiomètre        | PORTOS   | PBMR                                     |
|-------------------|--|--|
| Fréquence         | 5.05 et 10.65 GHz  | 1.4GHz                                   |
| Polarisation      | H et V   | H  |
| Angle d'incidence | 45°: jours 236-237-239-246-261<br>10-50°: jour 245<br>20-40-45-50°: jour 256 | ± 8. 24<br>jours 238, 239, 246, 248, 256 |

Le périmètre afin de cartographier l'humidité de surface du sol est déterminé entre les longitudes 2°33.28E - 2°44.37E (60000 - 80000m) et les latitudes 13°32.53N - 13°35.05N (60000 - 65000m). Nous présentons à l'annexe 1 les axes passant au-dessus de cette zone pour tous les jours des vols PBMR et PORTOS. En général, les vols sont rectilignes et sont faits selon un axe est-ouest. La latitude est relativement constante sur un axe donné, il est donc possible de comparer des axes ayant une latitude moyenne similaire.

## **2. Mesures au sol**

Les mesures aéroportées micro-ondes de l'expérience HAPEX-Sahel-Téledétection se sont effectuées du 23 août au 17 septembre 1992 (jours juliens: 236 à 261). Quatre sites ont été sélectionnés pour les mesures au sol, ce sont les wabs jachère, jupe sableuse, mil bas fond et une seconde jachère que nous appelons jachère bis. L'humidité volumique, aux profondeurs 0-0.5cm, 0.5-2cm, 2-5cm, 5-10cm et 10-15cm et l'humidité TDR (0-15cm) ont été mesurées pour presque toutes les sorties aéroportées des radiomètres. Pour les journées où les valeurs d'humidité ne sont pas mesurées, par exemple le jour 238, nous l'estimons à l'aide de la relation humidité volumique - humidité TDR établie à partir des données disponibles de chaque wab. La Figure III.1 montre l'évolution temporelle de l'humidité TDR pour chaque wab. Sur la Figure III.2, nous situons géographiquement les wabs, leurs coordonnées sont données dans l'annexe 2.

## **3. Transformations des mesures radiométriques**

Nous expliquons les calculs effectués sur les valeurs employées tout au long du stage.

### **3.1 Transformation des coordonnées**

Les coordonnées de départ des axes de vol apparaissent en degré-minute décimale. Afin d'utiliser ces coordonnées pour la cartographie, elles sont transformées en mètre dont le point d'origine est 2°E, 13°N. La

11/20/2014 10:00:00 AM

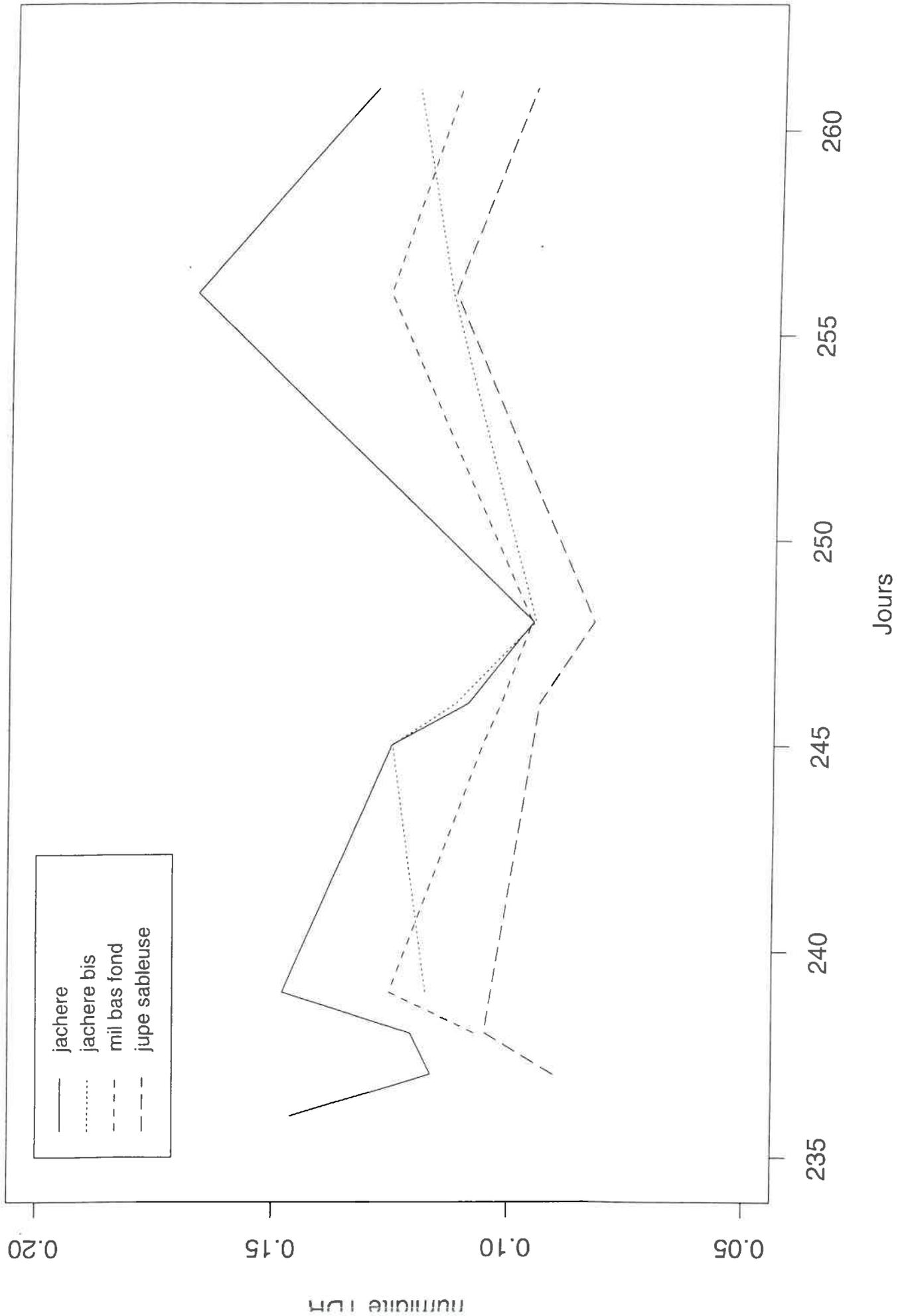
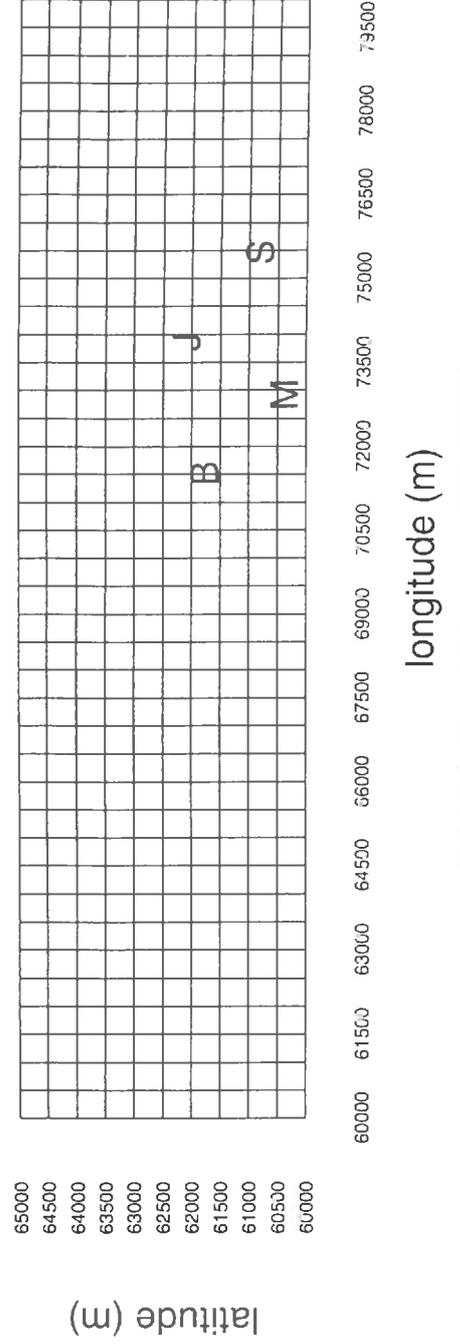


Figure III.2 Carte des sites

Legende

|   |               |
|---|---------------|
| J | Jachare       |
| M | Mil bas fond  |
| B | Jachere bis   |
| S | Jupe sableuse |



méthode de conversion est différente pour la longitude et la latitude. Mais, avant de convertir les coordonnées de degré à mètre, nous modifions les valeurs de départ.

étape 1: Convertir les degrés en entier et les minutes en décimale

$$1332.50 \Rightarrow 13 + 32.5/60 \Rightarrow 13.5417$$

longitude  $\Rightarrow$  long

latitude  $\Rightarrow$  lat

étape 2: Calcul de la différence entre le point d'origine et la latitude ou la longitude

$$\text{long} - \text{longitude 0 (2°)} \Rightarrow \text{dlo} \quad (\text{III.1})$$

$$\text{lat} - \text{latitude 0 (13°)} \Rightarrow \text{dla} \quad (\text{III.2})$$

étape 3: Démarche de la transformation des coordonnées

Le rayon terrestre diminue de l'équateur au pôle, il faut donc en tenir compte dans notre calcul.

$$r_{\text{equa}} = 6\,378\,160 \text{ m (estimation)}$$

$$r_{\text{pole}} = 6\,356\,774 \text{ m (estimation)}$$

$$\Delta r = r_{\text{equa}} - r_{\text{pole}} = 21\,386 \text{ m}$$

Pour déterminer le rayon terrestre à une latitude précise, nous utilisons

$$r_{\text{lat}} = r_{\text{equa}} - [(\text{lat} * \Delta r) / 90] \quad (\text{III.3})$$

### 3.1.1 La longitude

Pour convertir la longitude de degré à mètre, il faut également tenir compte de la variation de la circonférence des parallèles. Nous utilisons donc le terme  $[\cos(\text{lat1})]$  où "lat1" est la valeur de "lat" convertie en radian.

$$r_{\text{laty}} = \cos(\text{lat1}) * r_{\text{lat}} \quad (\text{III.4})$$

Finalement, la distance entre le point d'origine et le point mesuré est calculée par l'équation suivante:

$$dxm = [dlo * 2 * \pi * r_{\text{laty}}] / 360 \quad (\text{III.5})$$

### 3.1.2 La latitude

Pour ce qui est de la latitude, les méridiens sont tous égaux donc nous tenons compte que de la variation du rayon terrestre. La latitude est obtenue par:

$$dym = [dla * 2 * \pi * (r_{lat})] / 360 \quad (III.6)$$

### 3.1.3 Conversion des coordonnées de mètre à degré

Il est également possible de transformer les coordonnées en degré à partir des valeurs métriques. En combinant III.6 et III.3, nous obtenons une équation binômiale qui se résoud comme suit:

$$lat = [-b \pm \sqrt{b^2 - 4*a*c}] / (2*a) \quad (III.7)$$

Avec:

$$a = -\Delta r / 90$$

$$b = r_{cqua} + (\Delta r / 90 * lat_0)$$

$$c = (-r_{cqua} * lat_0) - (360 * dym / (2 * \pi))$$

Pour calculer la longitude, nous employons "lat" déterminée à l'équation III.7 et  $dlo = long - long_0$ :

$$long = [(360 * dxm) / (2 * \pi * rlaty)] + long_0 \quad (III.8)$$

Finalement pour obtenir la longitude et la latitude en degré-minute décimale, nous multiplions les entiers par 100, les restes par 60 et nous additionnons les deux termes. Nous avons validé les distances calculées à l'aide de points connus tels que les wabs jachère, mil bas fond et le parc climatique à partir des photo-aériennes.

## 3.2 Résolution au sol

Le calcul de la dimension des pixels est propre à chaque radiomètre.

### 3.2.1 PORTOS

Pour PORTOS, nous devons tout d'abord calculer l'altitude de l'avion qui est obtenue à l'aide de la distance entre l'avion et la cible au sol (dist ac) et de l'angle d'incidence ( $\theta$ ).

$$alt = dist\ ac * \cos(\theta) \quad (III.9)$$

Le pixel est de forme ovale. Le petit axe est calculé à partir de l'angle d'ouverture de l'antenne (B), fixé à 12.7° dans ce travail, et de la distance entre l'avion et la cible au sol.

$$\text{petit axe} = [\text{dist ac} * \tan (B/2)] * 2 \quad (\text{III.10})$$

Quant à la dimension du grand axe, elle varie en fonction de l'angle d'incidence et de l'altitude de l'avion.

$$d1 = \text{alt} * [\tan (\theta + B/2)] \quad (\text{III.11})$$

$$d2 = \text{alt} * [\tan (\theta - B/2)] \quad (\text{III.12})$$

$$\text{grand axe} = \text{alt} * [d1 - d2] \quad (\text{III.13})$$

Le Tableau III.2 présente les valeurs des petits axes et grands axes calculés pour chaque journée de vol du radiomètre PORTOS.

**Tableau III.2: Résolution du radiomètre PORTOS.**

| Jour-angle d'incidence | altitude moyenne (m) | distance avion-cible (m) | petit axe (m) | grand axe (m) |
|------------------------|----------------------|--------------------------|---------------|---------------|
| 236 - 45°              | 563                  | 716                      | 177           | 254           |
| 237 - 45°              | 496                  | 702                      | 156           | -             |
| 239 - 45°              | 831                  | 1176                     | 262           | -             |
| 245 - 10°              | 879                  | 893                      | 199           | 202           |
| 245 - 50°              | 959                  | 1491                     | 332           | -             |
| 246 - 45°              | 898                  | 1270                     | 223           | -             |
| 256 - 20°              | 872                  | 928                      | 206           | -             |
| 256 - 40°              | 893                  | 1166                     | 259           | -             |
| 261 - 45°              | 892                  | 1261                     | 281           | -             |

Nous savons que les canaux du radiomètre PBMR pointent à ±8° et ±24° du nadir et que chaque canal a une largeur de 16°. Afin d'obtenir la dimension du petit axe et du grand axe, nous utilisons l'angle et l'altitude de l'avion.

$$\text{petit axe} = [\text{alt} * \tan (\text{ang})] * 2 \quad (\text{III.14})$$

$$\text{grand axe} = [\text{alt} * (\tan(32^\circ) - \tan(16^\circ))] \quad (\text{III.15})$$

Les valeurs des petits axes et des grands axes calculés pour chaque sortie du radiomètre PBMR sont données dans le Tableau III.3.

**Tableau III.3: Résolution du radiomètre PBMR.**

| <b>Jour</b> | <b>altitude moyenne<br/>(m)</b> | <b>petit axe<br/>(m)</b> | <b>grand axe<br/>(m)</b> |
|-------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 238         | 354                             | 100                      | 120                      |
| 239         | 257                             | 72                       | 87                       |
| 246         | 638                             | 179                      | 216                      |
| 248         | 601                             | 169                      | 203                      |
| 256         | 244                             | 69                       | 82                       |

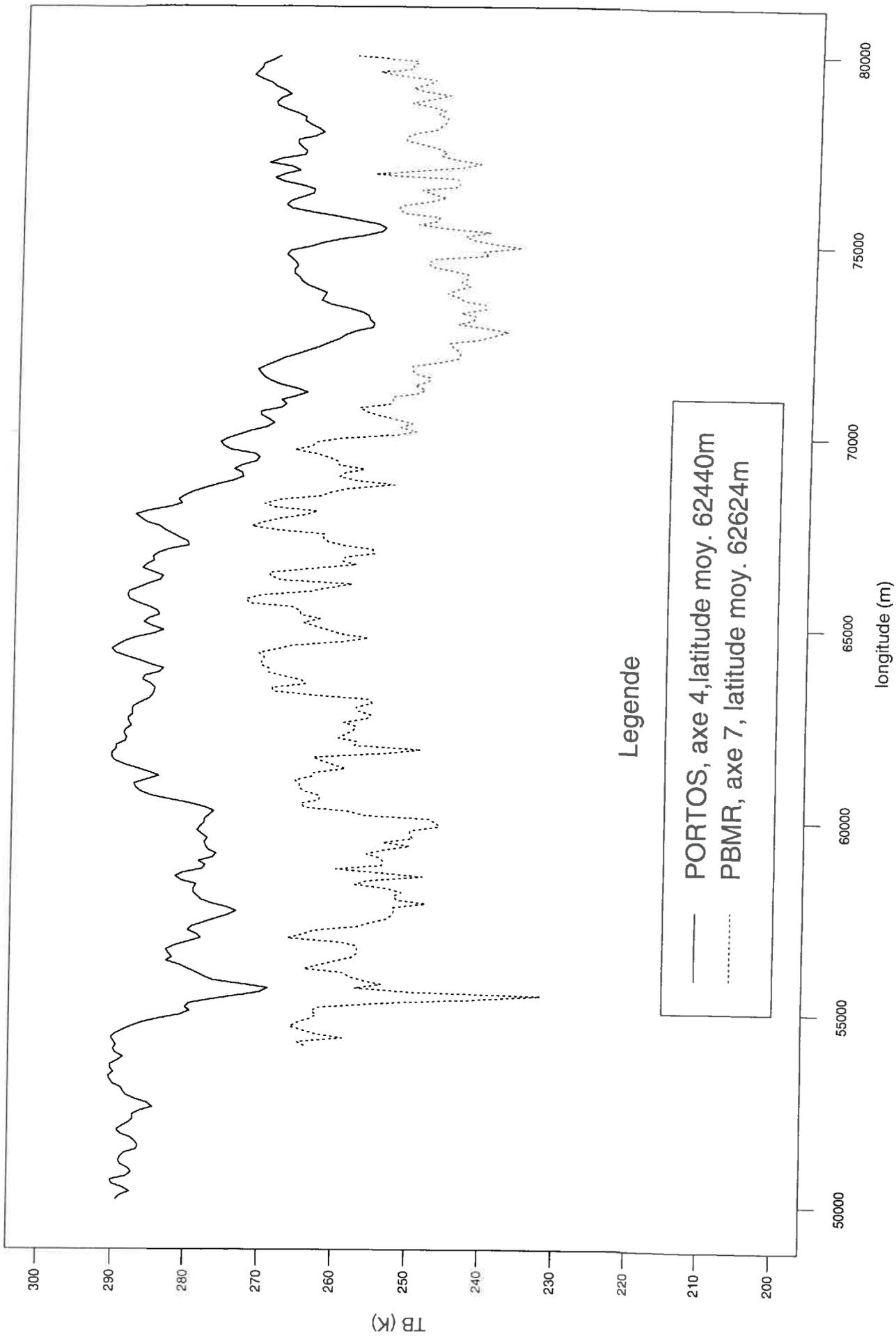
### **3.3. Pondération des températures de brillance**

Les températures de brillance du radiomètre PBMR doivent être calibrées à cause de décalages entre les différentes chaînes de mesures. La correction des températures de brillance s'effectue en tenant compte de la moyenne de température de brillance des quatre canaux ( $T_{B\text{moy.tot.}}$ ) et de la moyenne de chaque canal ( $T_{B\text{moy.canal}}$ ).

$$T_B = T_B + (T_{B\text{moy.tot.}} - T_{B\text{moy.canal}}) \quad (\text{III.16})$$

En effectuant cette pondération, nous voulons diminuer les écarts de  $T_B$  entre les différents canaux.

angle=20



## QUATRIEME PARTIE: RESULTATS ET DISCUSSION

Nous rappelons que ce travail a pour objectif de cartographier l'humidité du sol sur une zone de 20km X 5km. Mais avant d'estimer et de cartographier l'humidité de surface, nous voulons observer l'effet des différents types de végétation sur les valeurs de  $T_B$ . Nous présentons les résultats en trois parties. La première consiste à comparer des axes où les  $T_B$  sont mesurées à différents angles d'incidence, fréquences ou polarisations. Ensuite, nous essayons de différencier les types de végétation par diverses méthodes, cette démarche nous l'appelons l'approche parcelles. Finalement, le contenu en eau de la végétation et l'humidité de surface sont cartographiés pour différentes journées.

### 1. Comparaison

#### 1.1. Comparaison entre les radiomètres PBMR et PORTOS

##### 1.1.1 Méthodologie

C'est la première fois qu'une comparaison entre les deux radiomètres est tentée. Pour les comparer, nous choisissons des axes où nous avons (1) des données pour la même journée, (2) un angle d'incidence identique et (3) une latitude moyenne semblable, en supposant que les axes sont rectilignes et ont une direction est-ouest. Notre choix s'est arrêté sur la journée 256 à un angle de  $20^\circ$  pour les deux axes. Il faut cependant noter que les deux axes n'ont pas tout à fait la même latitude moyenne, un écart de 200m est observé. Nous utilisons l'axe 4 de PORTOS et le canal 1 de l'axe 7 pour PBMR.

##### 1.1.2 Discussion

Nous observons un synchronisme entre les  $T_B$  des deux radiomètres, montrant la qualité du géocodage (Figure IV.1). Les grandes variations de  $T_B$  apparaissent à la même longitude, avec quelquefois de petits décalages. Le trait plus lissé du radiomètre PORTOS s'explique par une largeur de trace plus intégratrice que celle du PBMR. Les petites variations de  $T_B$  ne sont donc pas perceptibles pour le radiomètre PORTOS. Pour un angle d'incidence identique, nous observons un écart de  $T_B$ . Cet écart peut s'expliquer par une vitesse de mesure plus superficielle à 5.05 GHz et par le comportement en fréquence des surfaces observées. Sachant que  $T_B$  est plus sensible à la végétation à 5.05 GHz qu'à 1.4 GHz, il est normal de trouver une température plus élevée à 5.05 GHz.

## 1.2. Variation angulaire

### 1.2.1 Méthodologie

Lors des sorties du radiomètre PORTOS, deux journées ont été choisies dans le but d'observer la variation angulaire à la fréquence 5.05 GHz, polarisation H. Ce sont les jours 245 et 256. Ce qui est intéressant lors de ces deux journées, c'est que les deux axes comparés ont une latitude moyenne similaire. Pour la journée 245, nous comparons des axes à des angles d'incidence de  $10^\circ$  et  $50^\circ$  et pour la journée 256, des angles de  $20^\circ$  et  $40^\circ$ .

### 1.2.2 Discussion

Nous vérifions que  $T_B$  décroît avec l'augmentation de l'angle d'incidence (Figure IV.2). Le géocodage est de bonne qualité, les grandes variations de  $T_B$  sont synchronisées. Dans le détail, nous observons parfois un faible décalage des points de mesure entre les deux axes. Les traits aux angles d'incidence de  $40^\circ$  et  $50^\circ$  apparaissent plus lissés qu'aux angles  $10^\circ$  et  $20^\circ$ . Ceci s'explique par une augmentation de la tache au sol avec les grands angles d'incidence, diminuant ainsi la sensibilité aux petites variations de  $T_B$ .

## 1.3 Visualisation de $T_B$ en fonction de la fréquence

### 1.3.1 Méthodologie

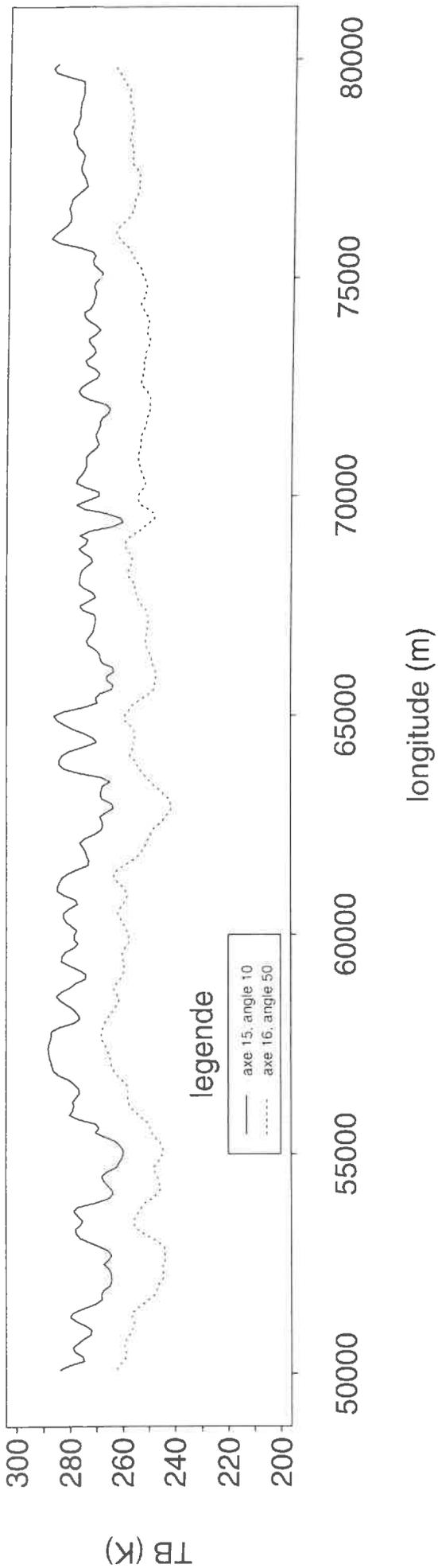
Nous voulons comparer les variations de  $T_B$  en fonction de la fréquence. Nous choisissons des axes ayant une latitude moyenne de 62400m pour la journée 239. Cette journée a l'avantage de présenter la température de brillance pour les trois fréquences 1.4, 5.05 et 10.65 GHz et les deux polarisations H et V.

### 1.3.2 Discussion

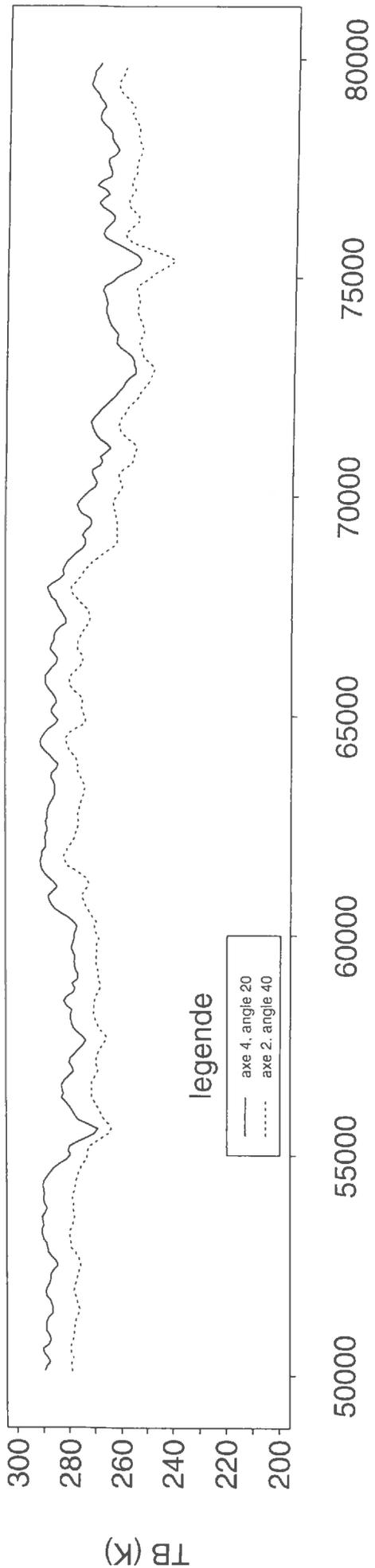
Sur la Figure IV.3, nous observons qu'en général les grandes variations de  $T_B$  sont synchronisées pour les différentes fréquences et polarisations. Cette correspondance entre les mesures de chaque fréquence démontre un bon géocodage des deux radiomètres.

Nous pouvons également comparer les valeurs de  $T_B$  entre les différentes fréquences. Nous vérifions que  $T_B$  croît avec l'augmentation de la fréquence, puisque  $T_B$  est sensible au couvert végétal aux grandes fréquences. Aucune différence significative est observée entre les fréquences 1.4 et 5.05 GHz en polarisation H sur la Figure IV.3. Il faut toutefois réaliser que l'angle d'incidence est de  $20^\circ$  pour la fréquence 1.4 GHz et de  $45^\circ$  pour la fréquence 5.05 GHz et que si l'angle était le même, les valeurs de  $T_B$  à 1.4 GHz seraient moindres. Nous vérifions également que la différence de  $T_B$  entre les deux polarisations diminue de la fréquence 5.05 à

a) Jour 245, axes 15 et 16  
latitude moy. 61192m

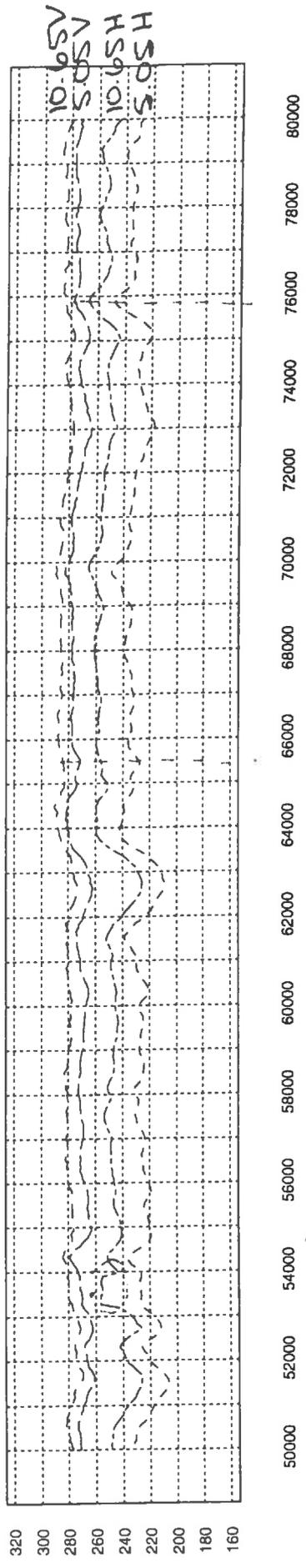


b) Jour 256, axes 2 et 4  
latitude moy. 62438m



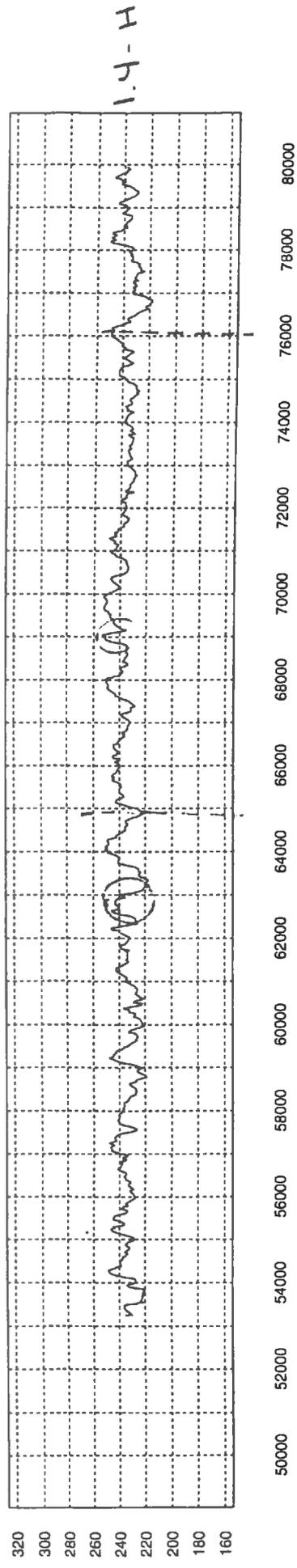
# Jour 239, Temperature de brillance 5.05-10.65 GHz, pol.H -V

axe 12, lat moy 62470m



# Jour 239, Temperature de brillance 1.4, pol.H

axe 4, canal 1, lat moy 62313m



10.65 GHz. Cette diminution s'explique par une plus grande sensibilité au couvert végétal à la fréquence 10.65 GHz qu'à 5.05 GHz.  $\Delta T_B$  moyen est de l'ordre de 40-45 K en fréquence 5.05 GHz et de 30-35 K en fréquence 10.65 GHz.

## **2. Caractérisation des types de végétation**

### **2.1 Méthodologie de l'approche parcelles**

Notre objectif est de différencier les types de végétation par leur signature radiométrique. A partir des photo-aériennes, nous avons sélectionné diverses parcelles. Elles sont montrées sur la Figure IV.4 et leurs coordonnées sont données à l'annexe 3. Trois types de végétation sont comparés. Premièrement, la brousse tigrée est une surface couverte d'une végétation pluri-annuelle, où s'alternent des arcs de végétation et de sol nu. La jachère, quant à elle, se compose d'herbe et d'arbres dont la croissance se passe principalement en période humide. Finalement, le mil est une surface cultivée où la végétation croît tout au long de l'année. Cinq parcelles de surfaces cultivées ont été choisies afin d'étudier l'homogénéité des surfaces d'une même nature.

Avant de comparer les parcelles entre elles, nous vérifions l'homogénéité à l'intérieur même des parcelles. Les écart-types de  $T_B$  à l'intérieur d'une parcelle sont de l'ordre de 1-8K pour des  $T_B$  moyennes variant entre 210-290K sur l'ensemble des parcelles. Nous considérons ces écarts satisfaisants pour espérer un signal radiométrique caractéristique à chaque type de végétation.

### **2.2 Décroissance de $T_B$ en fonction de l'angle d'incidence**

#### **2.2.1 Méthodologie**

Lors des journées de vol 245 et 256,  $T_B$  a été mesurée à différents angles d'incidence en fréquence 5.05 GHz - polarisation H. En utilisant la température de brillance moyenne extraite de chaque parcelle, nous pouvons comparer les variations de  $T_B$  en fonction de l'angle d'incidence. Pour la journée 245, nous avons des  $T_B$  mesurées aux angles  $10^\circ$  et  $50^\circ$  et pour la journée 256, des  $T_B$  aux angles  $20^\circ$ ,  $40^\circ$  et  $45^\circ$ .

#### **2.2.2 Discussion**

Nous vérifions que  $T_B$  décroît avec l'angle d'incidence pour les différentes parcelles. Nous constatons qu'à partir de la variation de  $T_B$  en fonction de l'angle d'incidence, nous ne pouvons discriminer de façon significative les types de végétation, car les signatures ne présentent pas de caractéristique propre à chaque type. Sur la Figure IV.5a, les surfaces cultivées présentent des signatures relativement hétérogènes et la brousse tigrée ne se distingue pas de ces surfaces. En outre, la signature de la surface cultivée est peu différente de celles de la brousse tigrée et de la jachère sur la Figure IV.5b.

Figure IV. 4 Carte des parcelles

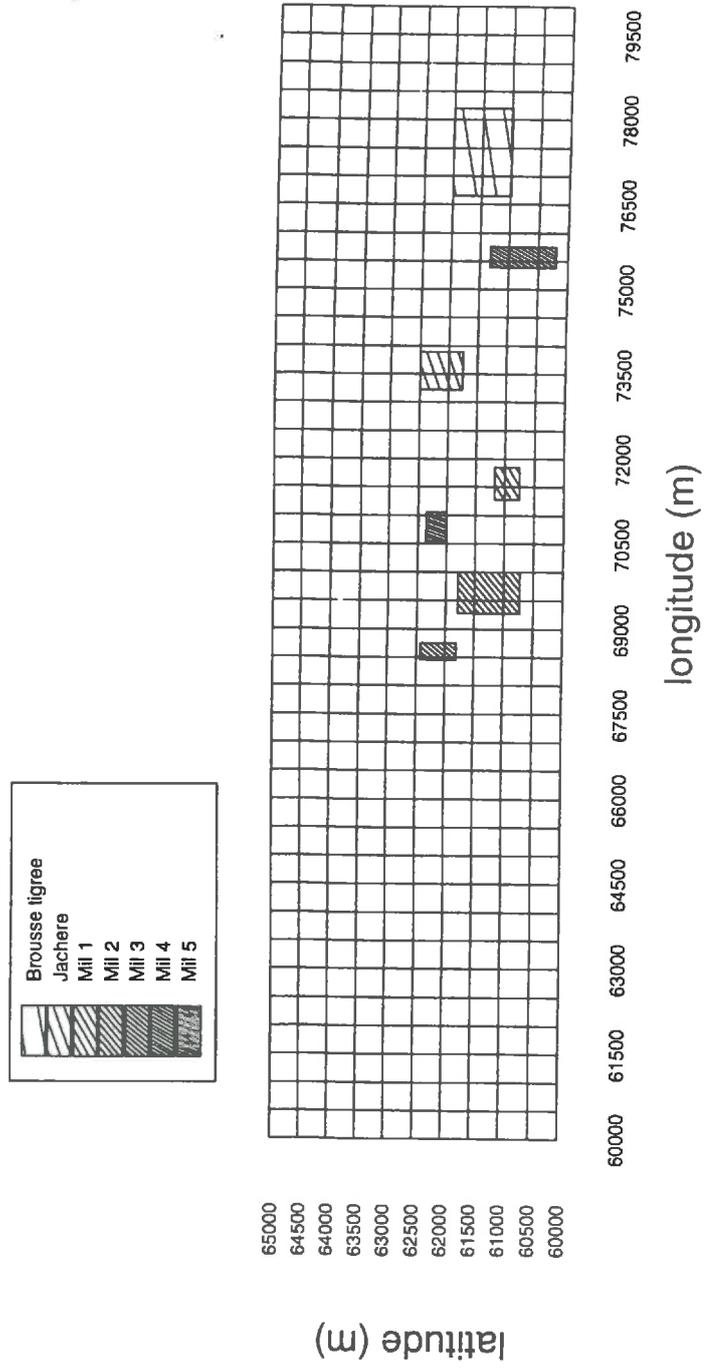
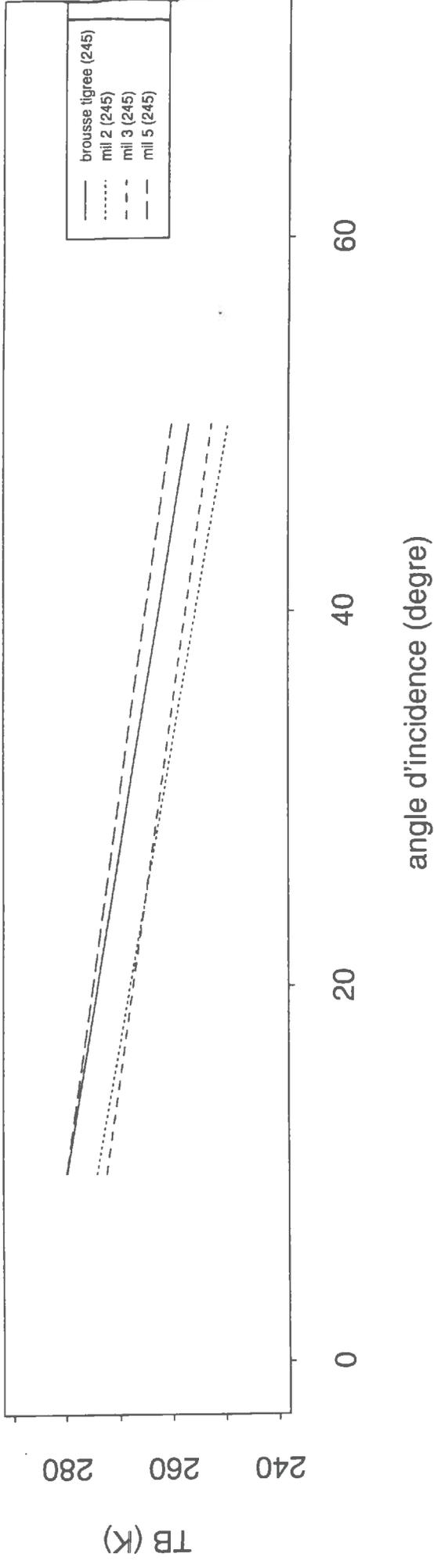
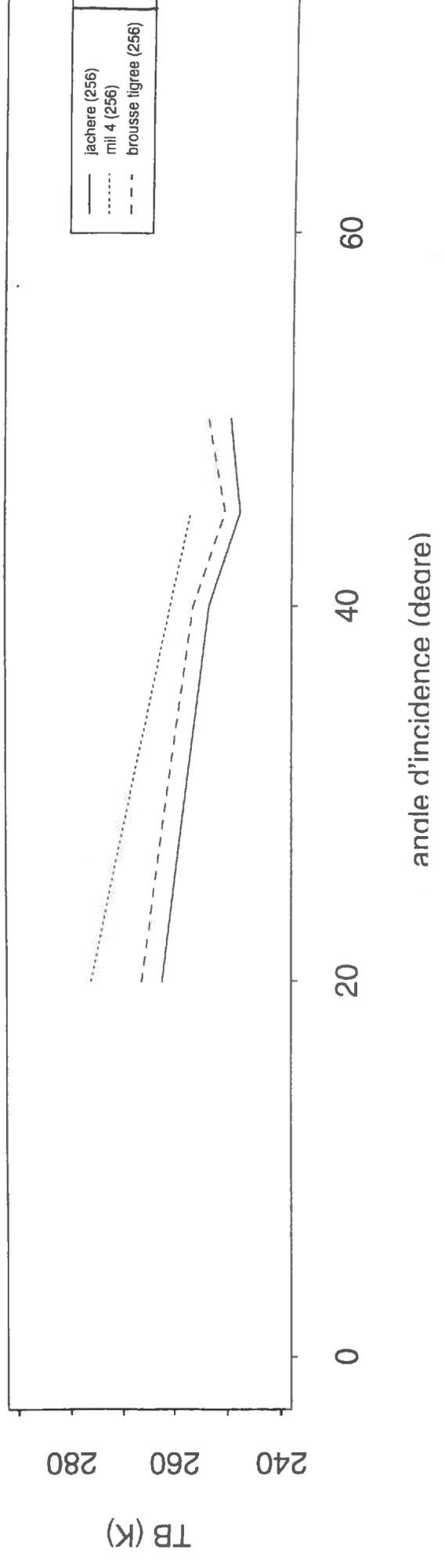


Figure W. 5: Variation angulaire: a) Jour 245



b) Jour 256



## **2.3 Variation de $T_B$ en fonction de la fréquence**

### **2.3.1 Méthodologie**

Au cours de la Campagne nous trouvons plusieurs journées (jours 236-239-246-256) où  $T_B$  est mesurée pour plus d'une fréquence (1.4-5.05-10.65 GHz) en polarisation H. Nous comparons la variation de  $T_B$  en fonction des fréquences pour les différents types de végétation.

### **2.3.2 Discussion**

Nous vérifions que  $T_B$  croît de la fréquence 5.05 à 10.65 GHz, mais pas entre 1.4 et 5.05 GHz pour les différentes parcelles (Figure IV.6). Si la valeur de  $T_B$  à la fréquence 1.4 GHz au jour 239 était mesurée à un angle d'incidence de  $45^\circ$  au lieu de  $20^\circ$ ,  $T_B$  montrerait une légère croissance de la fréquence 1.4 à 10.65 GHz du fait d'une végétation peu importante sur la brousse tigrée. Toutefois, les variations de  $T_B$  en fonction de la fréquence ne nous permet pas de discriminer clairement les types de végétation.

## **2.4 Croissance de la végétation**

Notre objectif est d'estimer la contenu en eau de la végétation ( $W_c$ ) à partir des données micro-ondes à 5.05 et 10.65 GHz en exploitant l'écart de polarisation et la variation angulaire. Nous pouvons comparer la vitesse de croissance de la végétation puisque  $W_c$  est estimée pour plusieurs journées.

### **2.4.1 Méthodologie**

Nous estimons le contenu en eau de la végétation ( $W_c$ ) à partir de trois indices de végétation.  $W_c$  peut être estimé en utilisant comme indice de végétation, soit la différence de polarisation:  $\Delta T_{B1} = T_{BV} - T_{BH}$  ou soit la variation angulaire:  $\Delta T_{B2} = T_{B\theta 2} - T_{B\theta 1}$ .

L'équation de l'estimation de  $W_c$  en utilisant la variation angulaire se présente sous la forme:

$$W_c = a + b * \Delta T_{B2} + c * \Delta T_{B2}^2 \quad (IV.1)$$

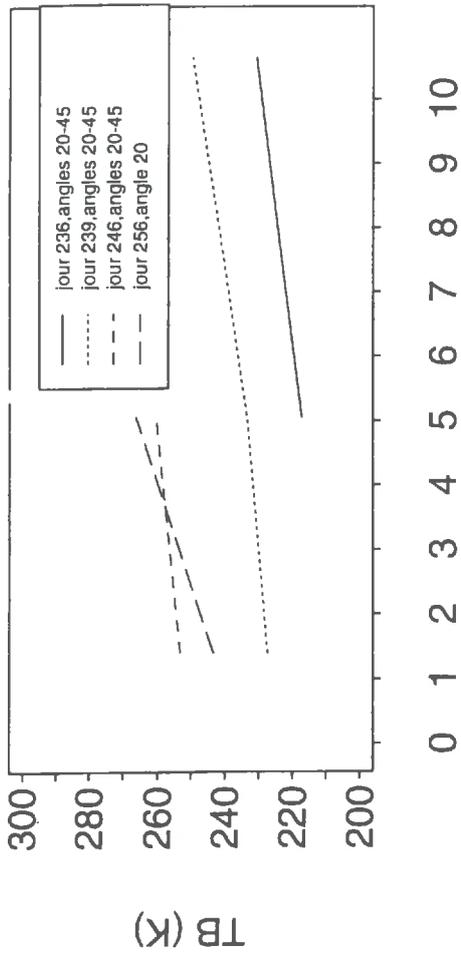
Deux équations sont utilisées pour l'estimation de  $W_c$ . L'équation IV.2 est employée pour la variation entre les angles  $10^\circ$  et  $50^\circ$  (jour 245) et l'équation IV.3 pour l'écart entre les angles  $20^\circ$  et  $40^\circ$  (jour 256).

$$W_c = 1.043 + (-0.0486 * \Delta T_{B2}) + (0.000576 * \Delta T_{B2}^2) \quad (IV.2)$$

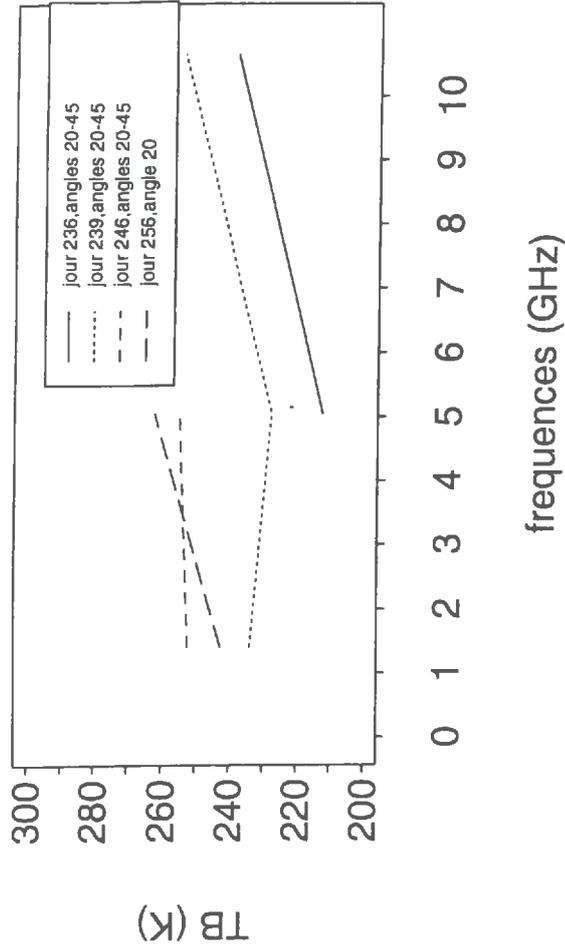
$$W_c = 0.9493 + (-0.0637 * \Delta T_{B2}) + (0.0009 * \Delta T_{B2}^2) \quad (IV.3)$$

Variation TB en fonction de la fréquence

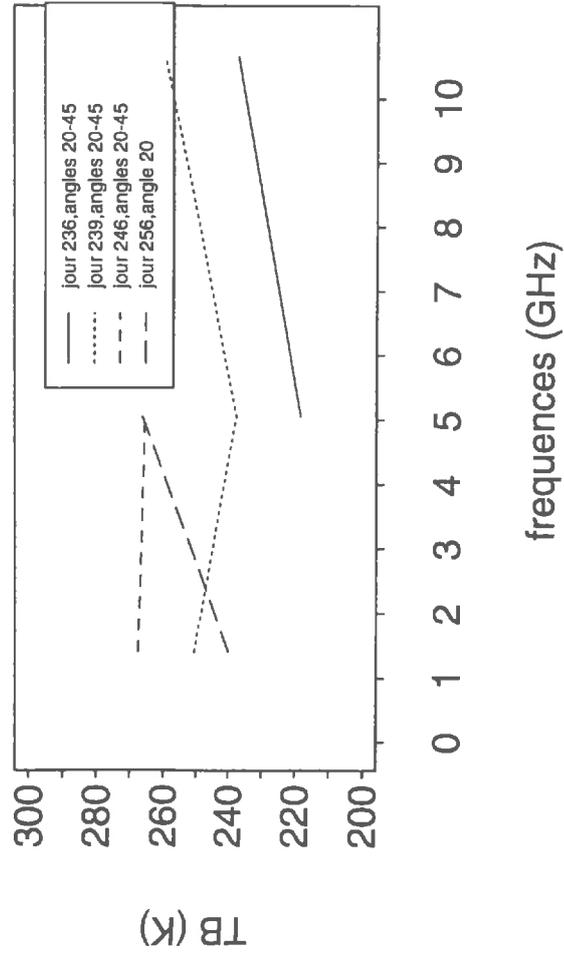
a) Brousses tigrée



b) Jachere



c) Mil 4



Nous employons un troisième indice de végétation pour estimer Wc. Cet indice exploite l'écart de polarisation et a pour but de minimiser la sensibilité à la teneur en eau. Cet indice s'écrit:

$$PD_{vm} = (\Delta T_{BI}) * T_{BV}^a \quad (IV.4)$$

où "a" est un paramètre empirique calé de manière à minimiser l'effet de l'humidité du sol sur  $PD_{vm}$ . Ce paramètre est déterminé à 1.2 dans ce rapport.

La troisième équation pour l'estimation de Wc se trouve sous la forme:

$$Wc = a \exp (b * PD_{vm}) \quad (IV.5)$$

A l'aide de ce troisième indice, nous estimons Wc pour les premiers jours de la campagne (jours 236-237-239) aux fréquences 5.05 et 10.65 GHz.

$$Wc(5.05GHz) = 1.5458 * \exp (-1.09 \times 10^{-4} * PD_{vm}) \quad (IV.6)$$

$$Wc(10.65GHz) = 1.2453 * \exp (-1.6 \times 10^{-4} * PD_{vm}) \quad (IV.7)$$

Les équations de l'estimation de Wc que nous employons dans ce rapport sont établies à partir de données obtenues sur des couverts partiels du site d'Avignon.

#### **2.4.2 Discussion**

Nous supposons une faible vitesse de croissance de la végétation sur la brousse tigrée et une plus rapide pour les surfaces cultivées. L'ordre de grandeur des valeurs de Wc estimées à l'aide des indices de végétation est satisfaisant. Wc correspond aux mesures effectuées sur le terrain. Nous croyons toutefois à une surestimation de Wc lorsque nous utilisons la variation angulaire (Figure IV.7). Des décalages entre les deux axes peuvent être à l'origine de cette surestimation.

L'indice de végétation  $PD_{vm}$  est similaire pour les fréquences 5.05 et 10.65 GHz. Les signatures de Wc sont tout de même différentes entre ces deux fréquences. A la fréquence 5.05 GHz, il est difficile de discriminer les types de végétation, car nous n'observons aucune particularité montrant une vitesse de croissance propre à chaque type de végétation (Figure IV.8). Nous pensons que la méthode d'estimation de Wc est sensible à la teneur en eau du sol, car Wc décroît entre les jours 237 et 239 et qu'entre ces deux journées, une précipitation est enregistrée. Les valeurs de Wc estimées à la fréquence 10.65 GHz présentent des propriétés intéressantes (Figure IV.9). La brousse tigrée montre une croissance nulle et la végétation sur les surfaces cultivées semble croître plus rapidement que sur la jachère. Ces valeurs nous donnent malheureusement qu'un faible espoir dans

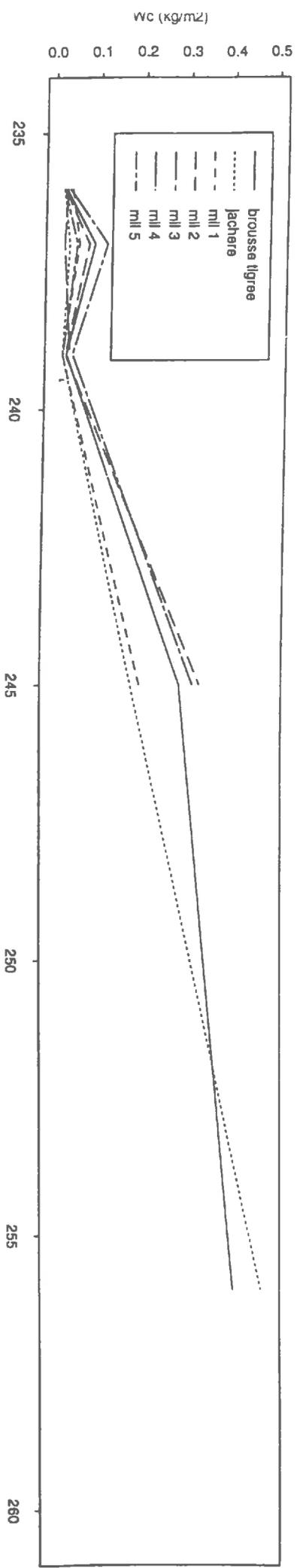


Figure IV.8: Croissance de la vegetation, frequence 5.05GHz

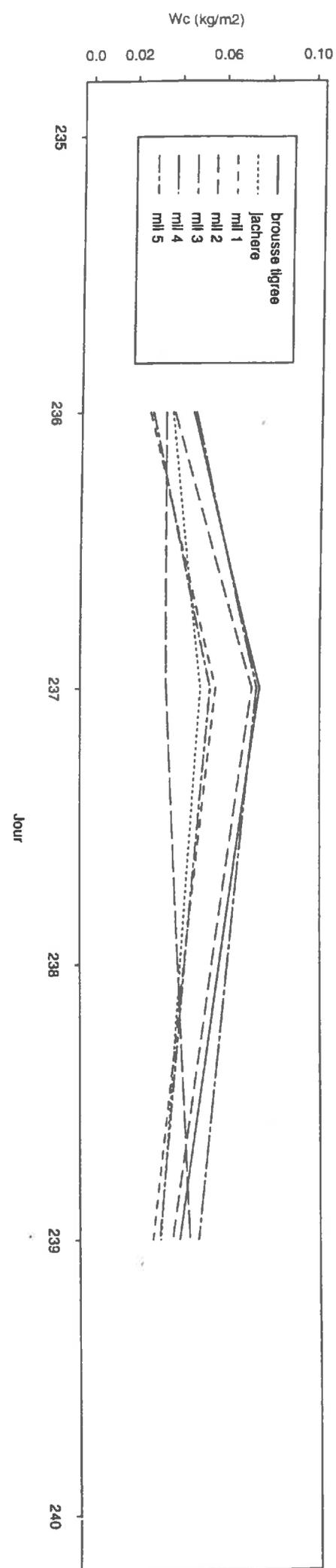
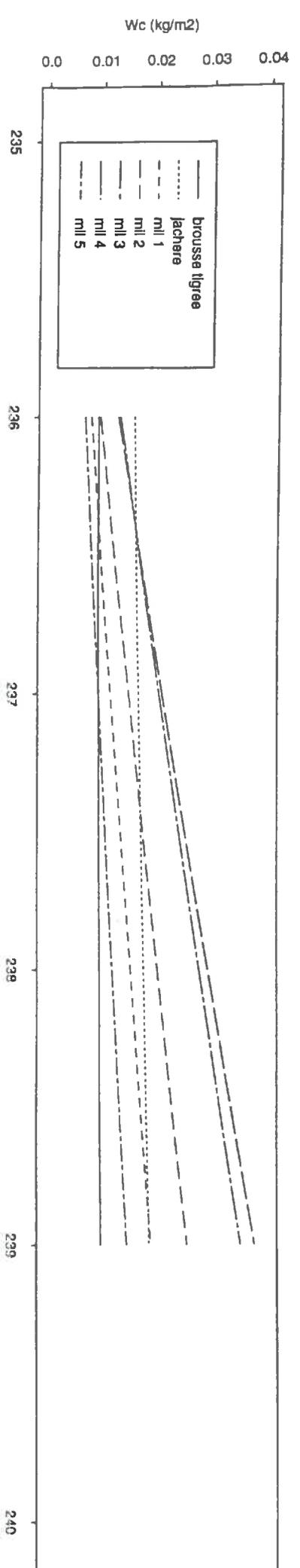


Figure IV.9: Croissance de la vegetation, frequence 10.65GHz



la distinction des types de végétation, car de grands écarts de  $W_c$  sont observés à l'intérieur des parcelles. Finalement malgré l'utilisation de l'indice de végétation  $PD_{V_{TM}}$  pour estimer  $W_c$  aux fréquences 5.05 et 10.65 GHz, nous pouvons difficilement distinguer les types de végétation par leur vitesse de croissance.

### **2.5. Conclusion**

Par l'approche parcelles, nous avons voulu évaluer l'effet du type de végétation sur  $T_B$  et essayer d'en caractériser une signature. A partir de la variation angulaire, de l'évolution des  $T_B$  en fonction des fréquences et de la croissance de la végétation, nous ne pouvons de façon significative caractériser les types de végétation. Toutefois, nous resterons réservés sur nos conclusions. En effet un certain nombre de facteurs ont nuit à la qualité des comparaisons: (1) la trop petite taille des parcelles par rapport à la résolution des radiomètres, (2) les pixels ne sont pas parfaitement superposables lorsque les données sont d'origine diverses, et (3) la difficulté de calibrer parfaitement les différentes données radiométriques.

## **3. Cartographie**

La partie cartographie consiste à comparer sur une zone de 20km X 5km les variations temporelles et spatiales du contenu en eau de la végétation et de l'humidité de surface du sol.

### **3.1 Contenu en eau de la végétation**

#### **3.1.1 Méthodologie**

La méthodologie que nous utilisons pour estimer  $W_c$  est la même que nous avons expliquée dans l'approche parcelles, partie 2.4.1. La seule différence est que nous l'appliquons à l'échelle régionale. Les valeurs de  $W_c$  sont estimées à l'intérieur de pixels ayant une dimension de 500m X 500m. De cette manière, nous pouvons observer les variations spatiales et temporelles du contenu en eau de la végétation estimé aux fréquences 5.05 et 10.65 GHz.

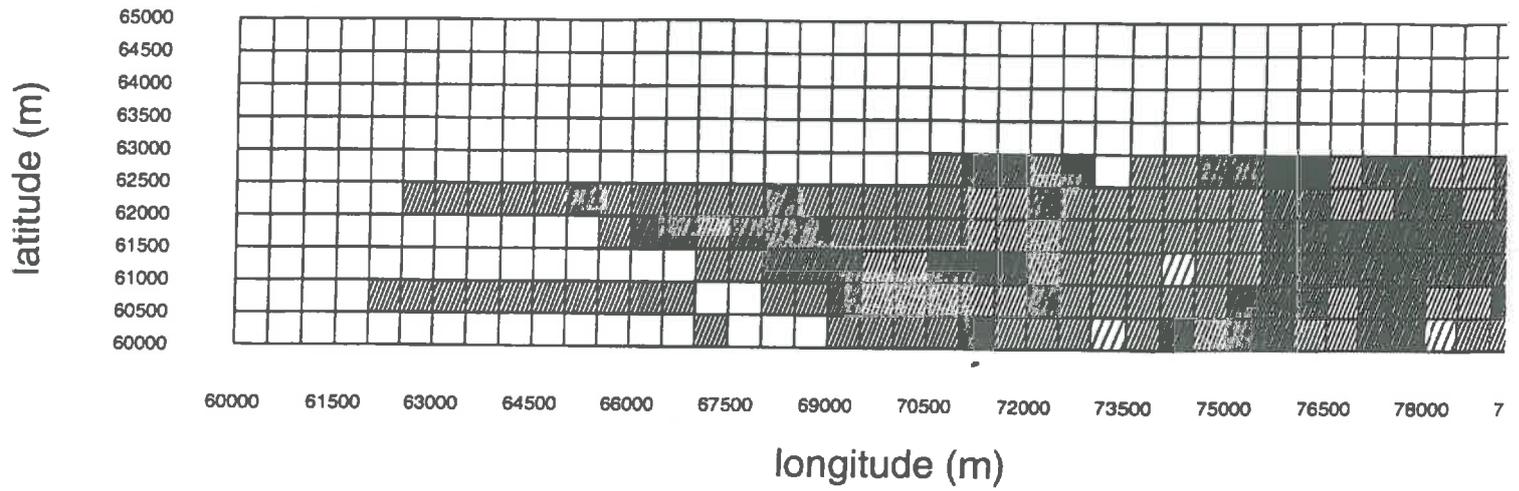
#### **3.1.2 Discussion**

La cartographie du contenu en eau de la végétation a pour objectifs (1) l'observation des ensembles de végétation à l'échelle régionale, (2) la comparaison de la vitesse de croissance des différents types de végétation et ce aux fréquences 5.05 et 10.65 GHz.

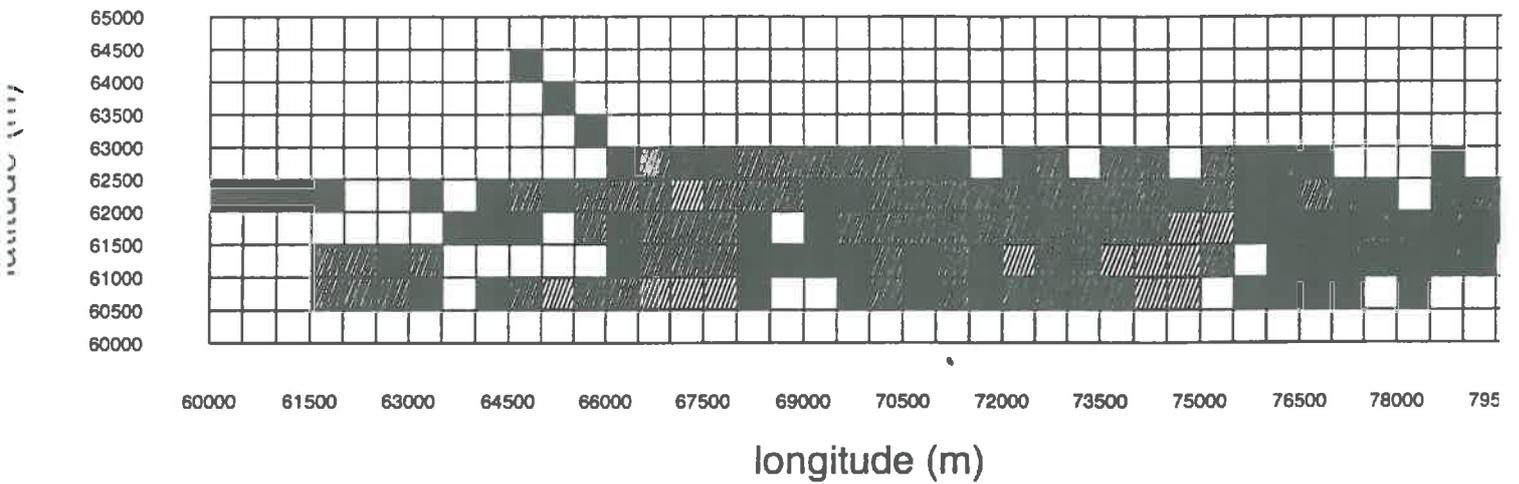
Sur la Figure IV.10 nous observons quelques grandes structures de végétation. Notamment, une grande bande orientée nord-sud entre 75000-76000m de longitude correspondant à la jupe sableuse et des surfaces cultivées se trouvant entre 68000-69000m de longitude. Ces deux zones présentent une végétation plus importante

# Figure 10-10. Contenu en eau de la vegetation, 5.05GHz

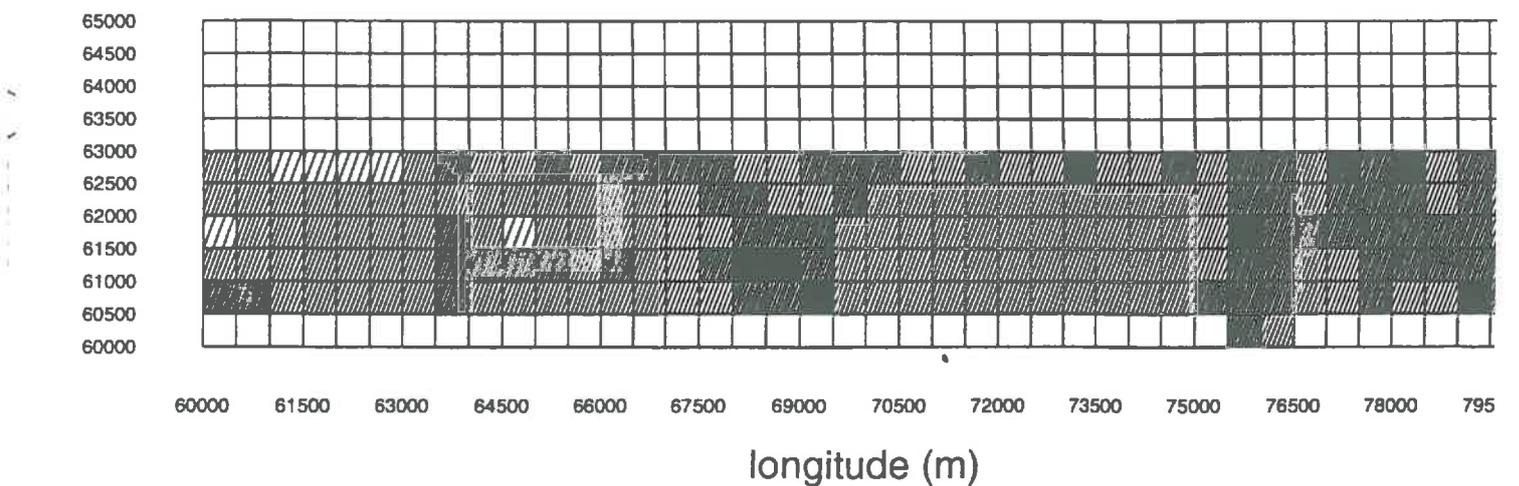
a) Jour236, PORTOS



b) Jour237, PORTOS

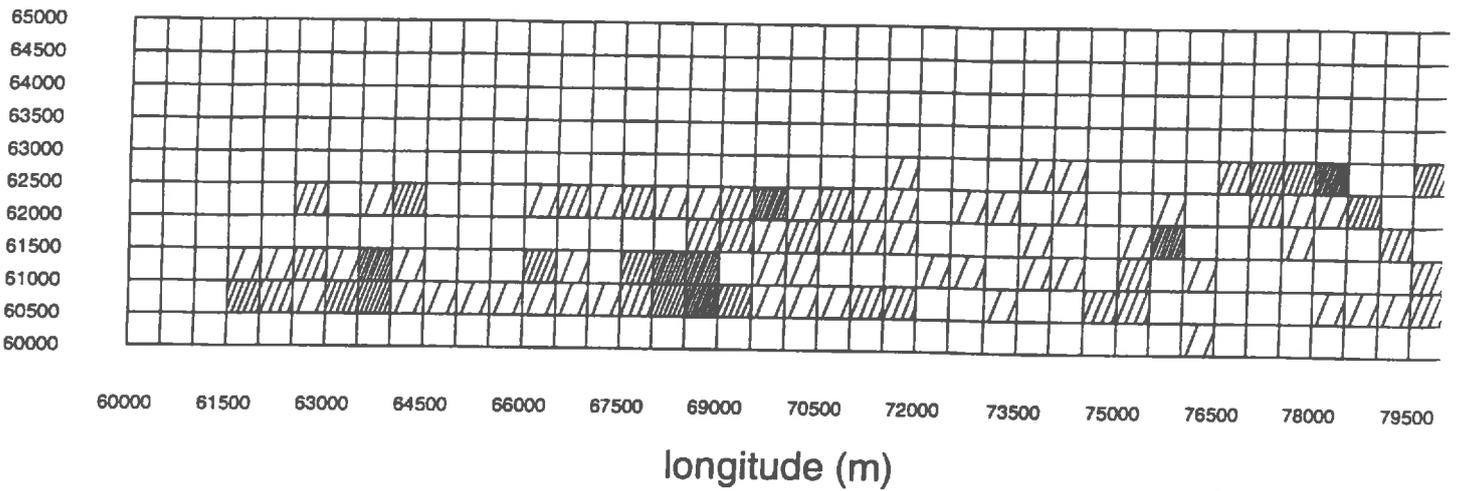


c) Jour239, PORTOS

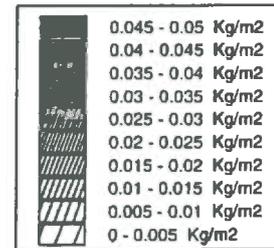


# variation du contenu en eau de la vegetation

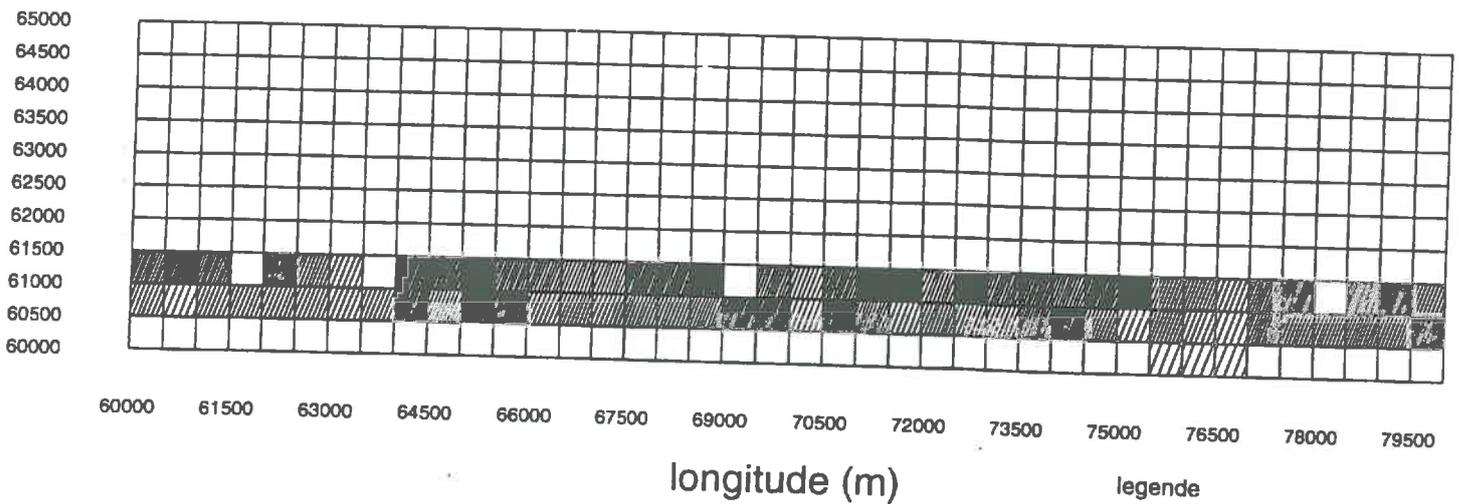
d) PORTOS; entre jour 236 et 239; 5.05 GHz



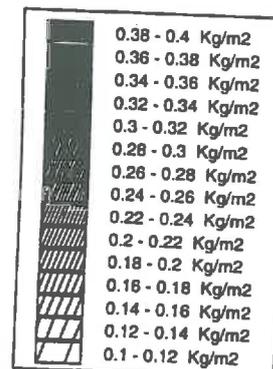
legende



e) PORTOS; entre jour 239 et 245; 5.05 GHz



legende



comparativement à la zone de jachère (72000-75000m). Certaines zones très localisées peuvent montrer un  $W_c$  élevé, par exemple la surface cultivée située à 79000m de longitude- 60500m de latitude.

La Figure IV.10b montre de grandes valeurs de  $W_c$  au jour 237. Ces valeurs peuvent être liées à la teneur en eau car ce jour est plus sec comparativement aux jours 236 et 239, présentant de plus grandes valeurs de  $T_B$ . Pour ce qui est des jours 236 et 239, ils ont une humidité similaire, nous pouvons comparer ainsi les valeurs de  $W_c$ . En observant la variation de  $W_c$  entre ces deux journées,  $W_c$  montrent une stabilité dans le temps pour certaines zones, par exemple la jachère et la brousse tigrée où la croissance est pratiquement nulle entre ces deux jours (Figure IV.10d). En outre, les grandes structures de végétation sont conservées d'un jour à l'autre. Notamment, la jupe sableuse et les surfaces cultivées présentent un  $W_c$  supérieur à la jachère.  $W_c$  a également été estimé pour la journée 245. Si nous comparons les jours 239 et 245, la variation de  $W_c$  est relativement importante mais nous ne distinguons pas les grandes structures de végétation (Figure IV.10e).

$W_c$  du jour 236, estimé à la fréquence 10.65 GHz, est faible et nous n'observons aucun ensemble de végétation mis à part la surface cultivée à 79000m et quelques zones localisées (Figure IV.11a). Au jour 239, la Figure IV.11b montre une meilleure distinction entre les structures de la végétation. Les zones de jupe sableuse et de surfaces cultivées présentent des valeurs de  $W_c$  nettement supérieures aux zones de jachère et de brousse tigrée. Cette fréquence présente donc une meilleure sensibilité au contenu en eau de la végétation comparativement à la fréquence 5.05 GHz.

### **3.1.3 Conclusion**

Nous distinguons de grandes structures de végétation aux fréquences 5.05 et 10.65 GHz, par exemple la brousse tigrée, la jupe sableuse et les surfaces cultivées. Cependant, les valeurs de  $W_c$  semblent plus sensibles à la teneur en eau du sol à la fréquence 5.05 GHz qu'à 10.65 GHz. Les surfaces cultivées et la bande de jupe sableuse montrent une croissance de la végétation plus rapide que la brousse tigrée correspondant à notre hypothèse de départ. Nous sommes satisfaits de cette méthode de cartographie car nous distinguons de façon significative les ensembles de végétation à l'échelle régionale. Toutefois, des variations locales peuvent se produire. Elles sont liées à l'origine diverses des données et des axes de vol qui ne sont pas bien superposés.

## **3.2 Humidité de surface du sol**

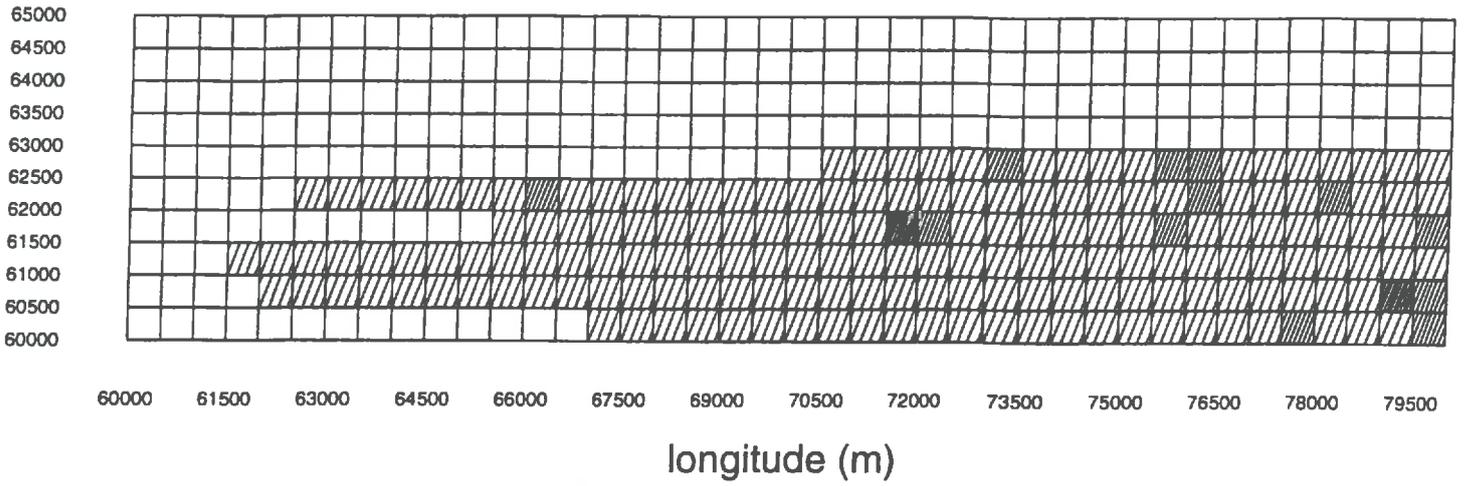
### **3.2.1. Estimation de l'humidité de surface**

#### **3.2.1.1 Méthodologie**

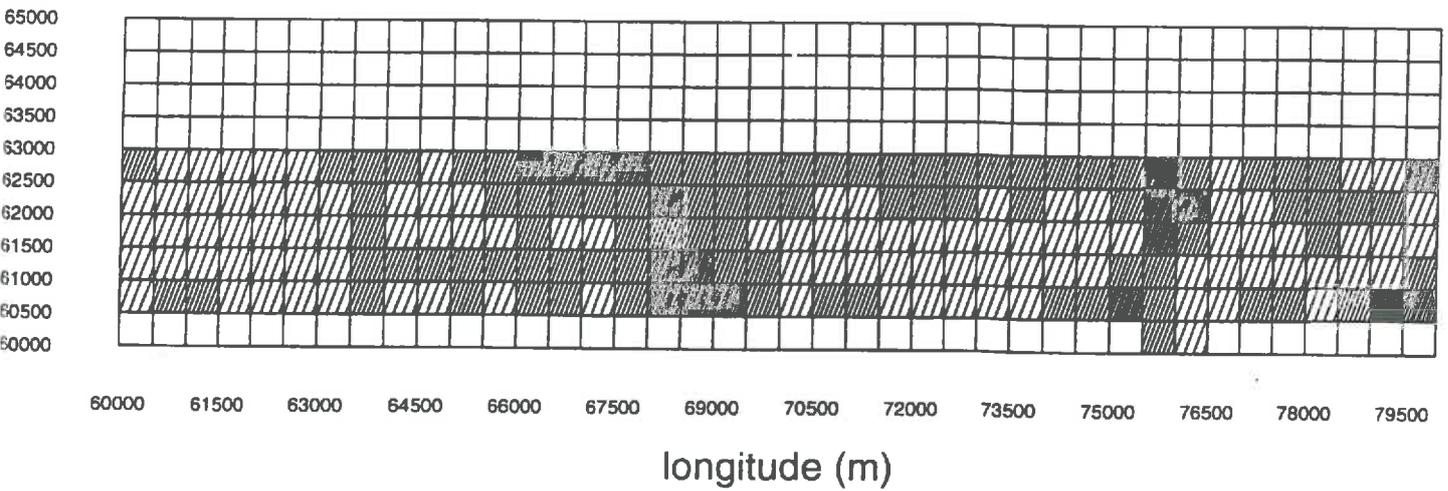
Avant d'estimer l'humidité de surface du sol, nous étudions la relation entre la température de brillance et l'humidité volumique mesurée, car nous voulons savoir si la végétation a un effet significatif sur les valeurs de

Figure IV.11:  
Contenu en eau de la vegetation, 10.65GHz

a) Jour236, PORTOS



b) Jour239, PORTOS



$T_B$ . Wang et al. (1983) démontrent une bonne relation entre  $T_B$  et l'humidité aux fréquences 1.4, 5.05 et 10.65 GHz. La principale différence entre ces fréquences est la profondeur de pénétration qui se définit comme la profondeur de la couche de surface qui contribue à l'émission micro-onde. Newton et al. (1982) indiquent que la profondeur de pénétration pour la fréquence 1.4 GHz est de 2 à 5cm, et celle des fréquences 5.05 et 10.65 GHz de 0-0.5cm. Dans ce travail, nous établissons trois relations. Dans la première, nous comparons  $T_B$  à 5.05 GHz, polarisation H et l'humidité à une profondeur de 0-0.5cm. Ensuite, les valeurs de  $T_B$  à 1.4 GHz sont utilisées avec (1) une humidité de 0-0.5cm et (2) une humidité de 0-2cm.

L'humidité étant mesurée à des profondeurs de 0-0.5cm et 0.5-2cm, nous calculons l'humidité pour la profondeur 0-2cm. Pour déterminer la  $T_B$  moyenne, nous avons tout d'abord cartographié les axes de vol passant au-dessus des wabs jachère, mil bas fond, jupe sableuse et jachère bis. La superficie du périmètre des wabs est de l'ordre de 300m X 300m. Afin d'extraire les valeurs de  $T_B$  représentant le mieux celles du wab, nous déterminons une qualité des axes de vol de 1 à 3; 1 étant les axes passant au-dessus du wab, 2 à  $\pm 100m$  et 3 à  $\pm 200m$ . Pour établir la relation TB-humidité, les valeurs de  $T_B$  utilisées sont calculées à partir des axes de qualité 1.

### **3.2.1.2 Relation $T_B$ - humidité mesurée**

#### **3.2.1.2.1 Fréquence 1.4GHz**

La relation entre  $T_B$  à la fréquence 1.4 GHz et l'humidité 0-2cm démontre que les valeurs de  $T_B$  sont pratiquement insensibles à la croissance de la végétation (Figure IV.12a et b). La relation est satisfaisante et sachant que la végétation a peu d'effet sur les valeurs de  $T_B$  à cette fréquence, nous estimons l'humidité à partir de l'équation de la régression. Cette équation se présente sous la forme:

$$\text{hum}_{0-2\text{cm}} = 0.7696 - 0.0026 * T_B \quad (\text{IV.11})$$

Une relation entre  $T_B$  et l'humidité du sol mesurée à 0-0.5cm est également établie afin de comparer l'humidité estimée à cette profondeur entre les fréquences 1.4 et 5.05 GHz. Etant donné la relation satisfaisante, l'humidité est également estimée à partir de l'équation de régression. Cette équation s'écrit:

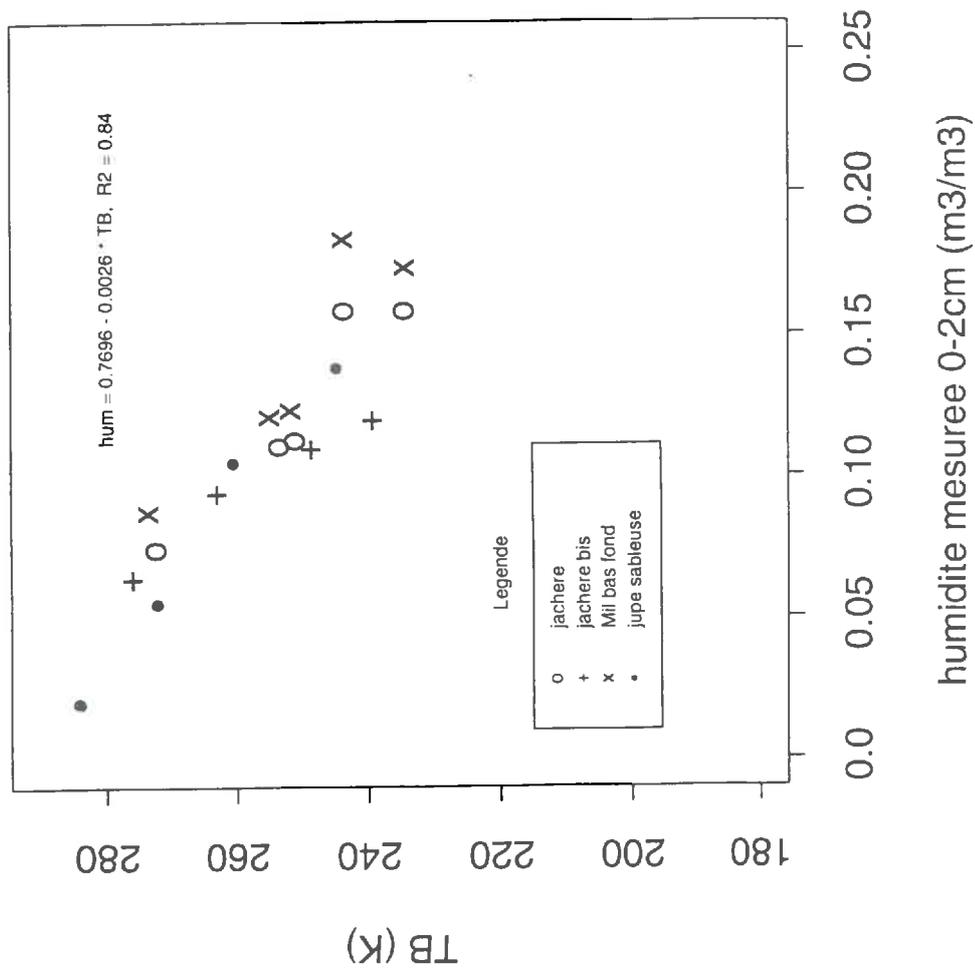
$$\text{hum}_{0-0.5\text{cm}} = 1.0057 - 0.0036 * T_B \quad (\text{IV.12})$$

#### **3.2.1.2.2. Fréquence 5.05 GHz**

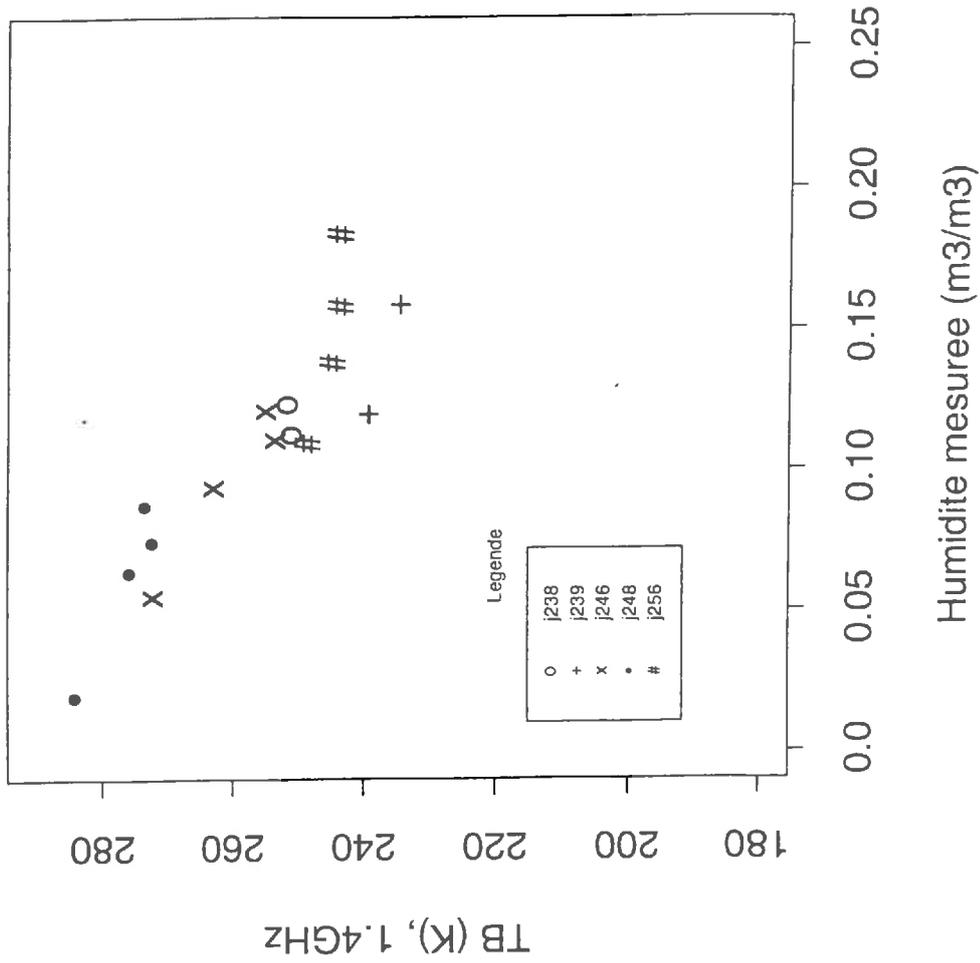
La figure IV.12c présente la relation  $T_B$  (fréquence 5.05GHz, polarisation H) - humidité (profondeur 0-0.5cm). Nous observons sur la figure IV.12d que  $T_B$  des premiers jours de vol (jour 236) sont inférieures à celles des derniers vols (jour 261). Cette augmentation s'explique par une croissance de la végétation entre les jours 236 et

Figure IV.12

a) PBMR



b) PBMR



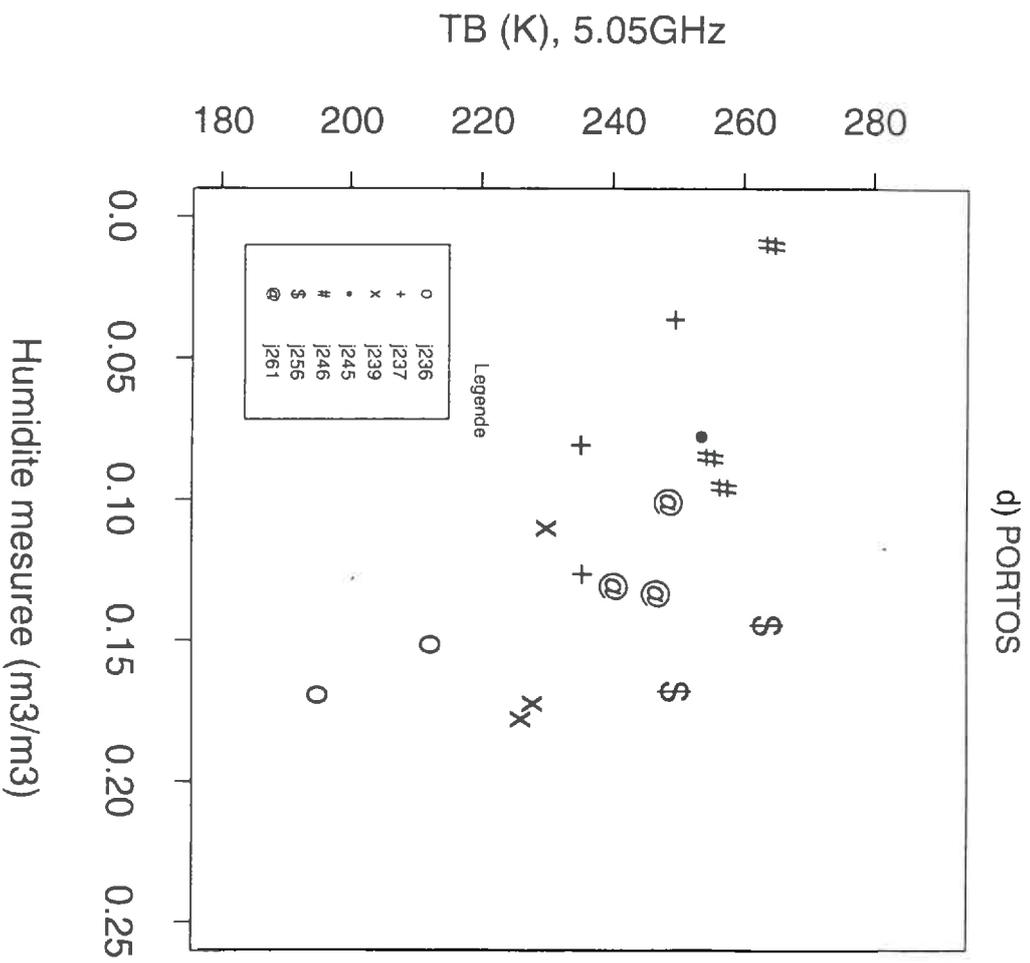
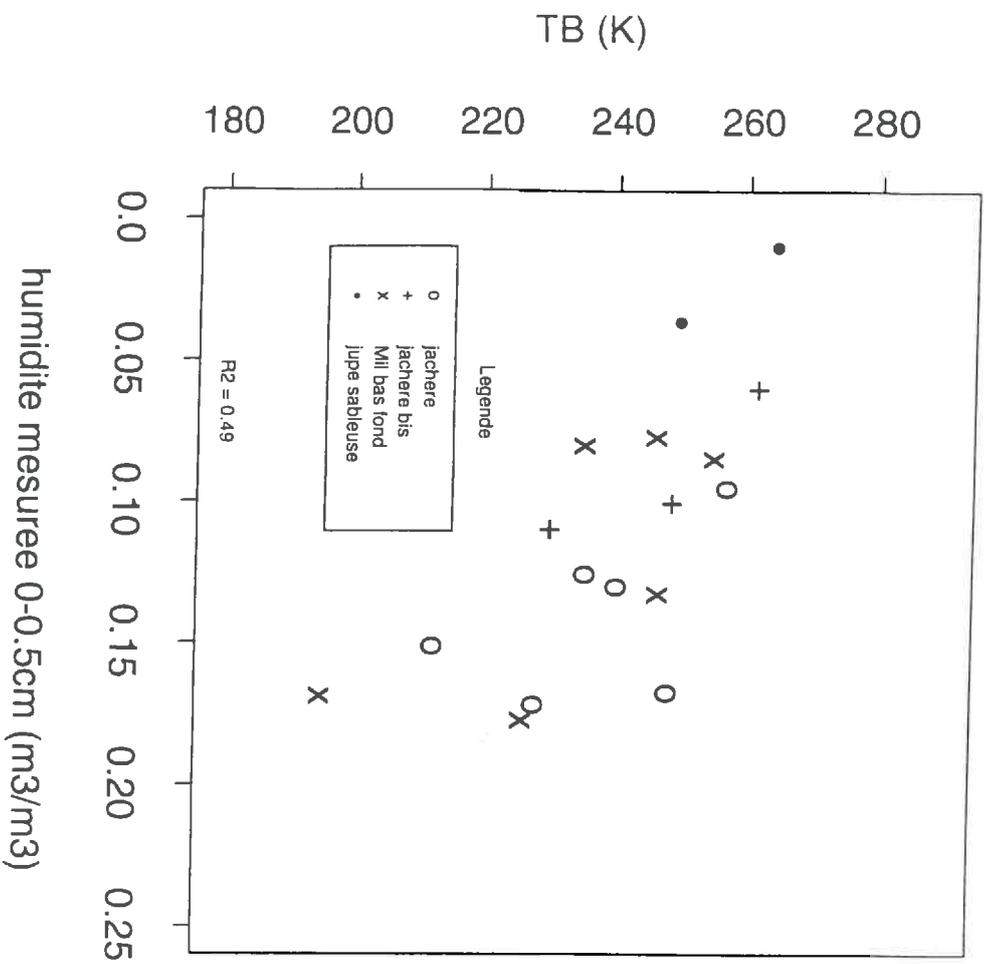
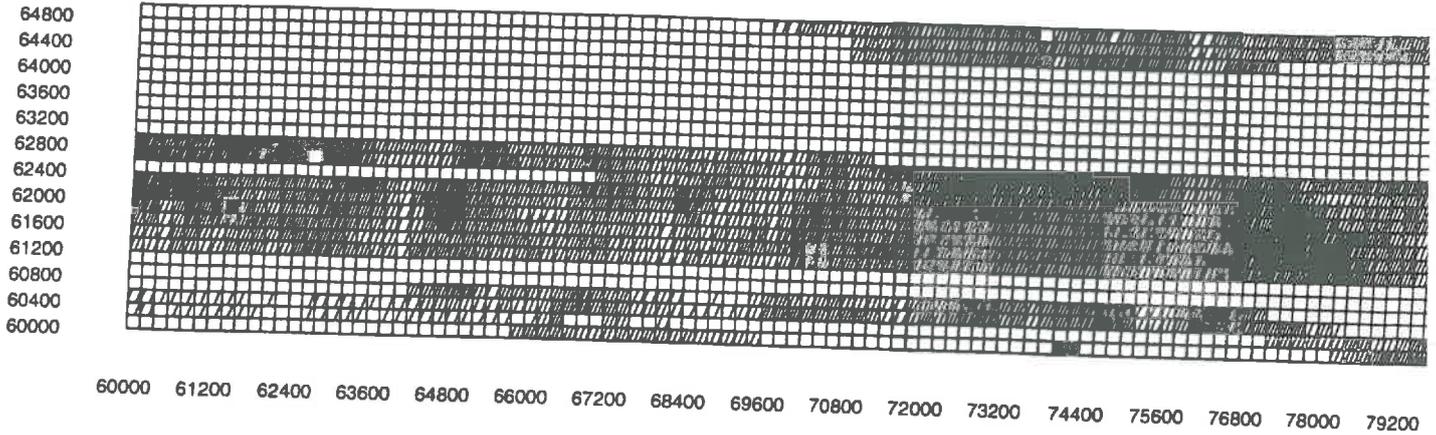


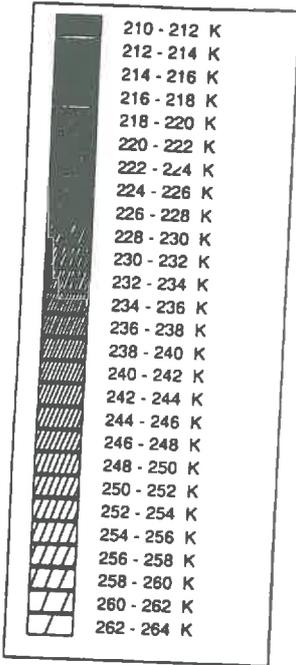
FIGURE 14-12.  
 Temperature de brillance a 1.4 GHz

a) PBMR jour 239

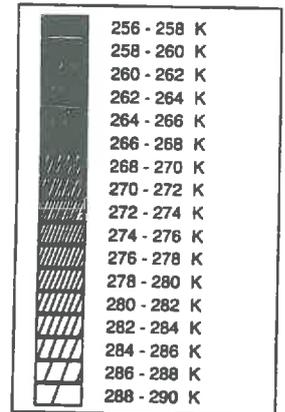


legende

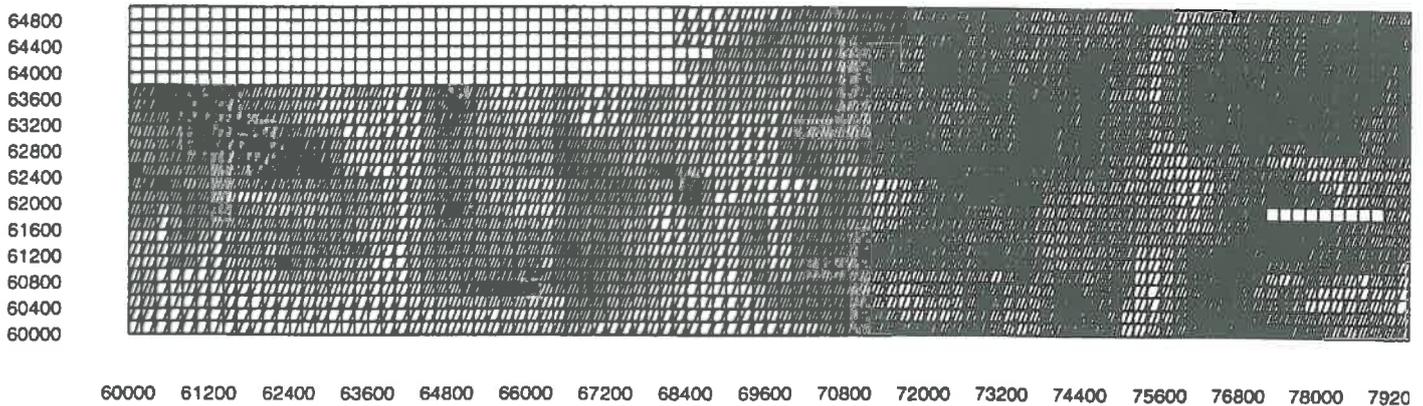
longitude (m)



legende

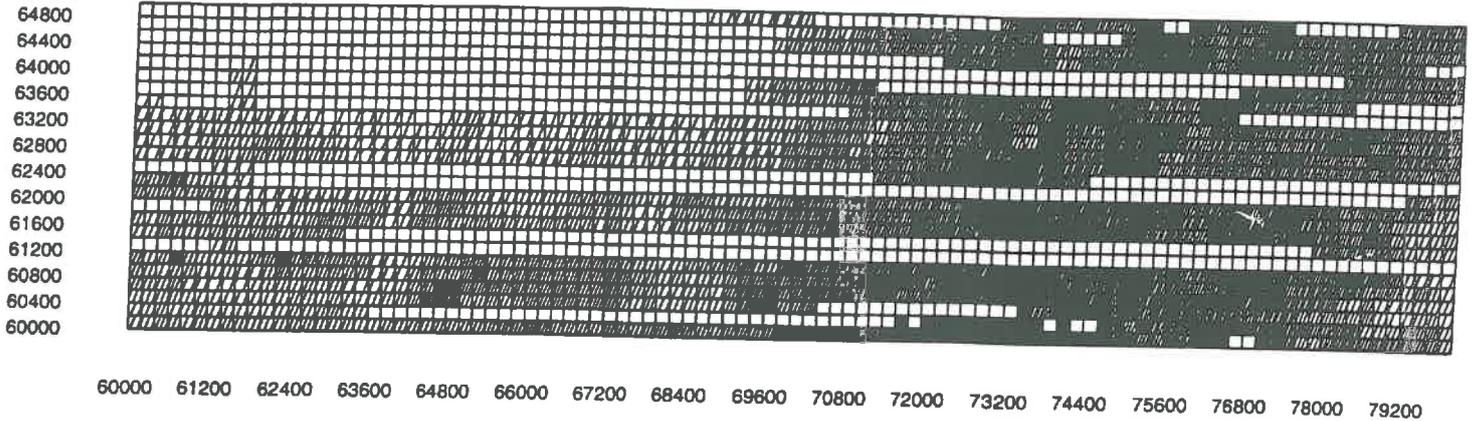


b) PBMR jour 248



longitude (m)

# c) PBMR jour 256



longitude (m)

legende

|  |             |
|--|-------------|
|  | 228 - 230 K |
|  | 230 - 232 K |
|  | 232 - 234 K |
|  | 234 - 236 K |
|  | 236 - 238 K |
|  | 238 - 240 K |
|  | 240 - 242 K |
|  | 242 - 244 K |
|  | 244 - 246 K |
|  | 246 - 248 K |
|  | 248 - 250 K |
|  | 250 - 252 K |
|  | 252 - 254 K |
|  | 254 - 256 K |
|  | 256 - 258 K |
|  | 258 - 260 K |
|  | 260 - 262 K |
|  | 262 - 264 K |
|  | 264 - 266 K |
|  | 266 - 268 K |
|  | 268 - 270 K |
|  | 270 - 272 K |
|  | 272 - 274 K |

261. Ce résultat est attendu puisqu'à cette fréquence,  $T_B$  est sensible à la végétation. Par conséquent, nous ne pouvons estimer l'humidité de surface à partir de l'équation de la régression. L'effet de la végétation est trop perceptible à la fréquence 5.05 GHz et de toute manière, la régression sous-estime l'humidité à cette fréquence. Pour ces raisons, l'humidité de surface du sol est estimée par une inversion du modèle théorique présenté dans le chapitre précédent, à l'aide des valeurs de  $T_S$ ,  $T_B$  et  $W_c$ . Nous estimons l'humidité de surface que pour les jours 239 et 246.

### **3.2.2 Cartographie de l'humidité de surface à l'échelle régionale**

L'humidité de surface du sol estimée est cartographiée à l'échelle régionale pour les fréquences 5.05 et 10.65 GHz. Nous pouvons comparer ainsi les limites de chaque fréquence à la détection de l'humidité de surface et en observer les variations spatiales et temporelles. L'humidité volumique est estimée aux profondeurs 0-2cm et 0-0.5cm. Dans un premier temps, nous discutons de la variation temporelle et spatiale de l'humidité estimée à 0-2cm pour la fréquence 1.4 GHz. Par la suite, l'humidité estimée à 0-0.5cm en fréquence 5.05 GHz est discutée.

#### **3.2.2.1 $T_B$ à la fréquence 1.4 GHz**

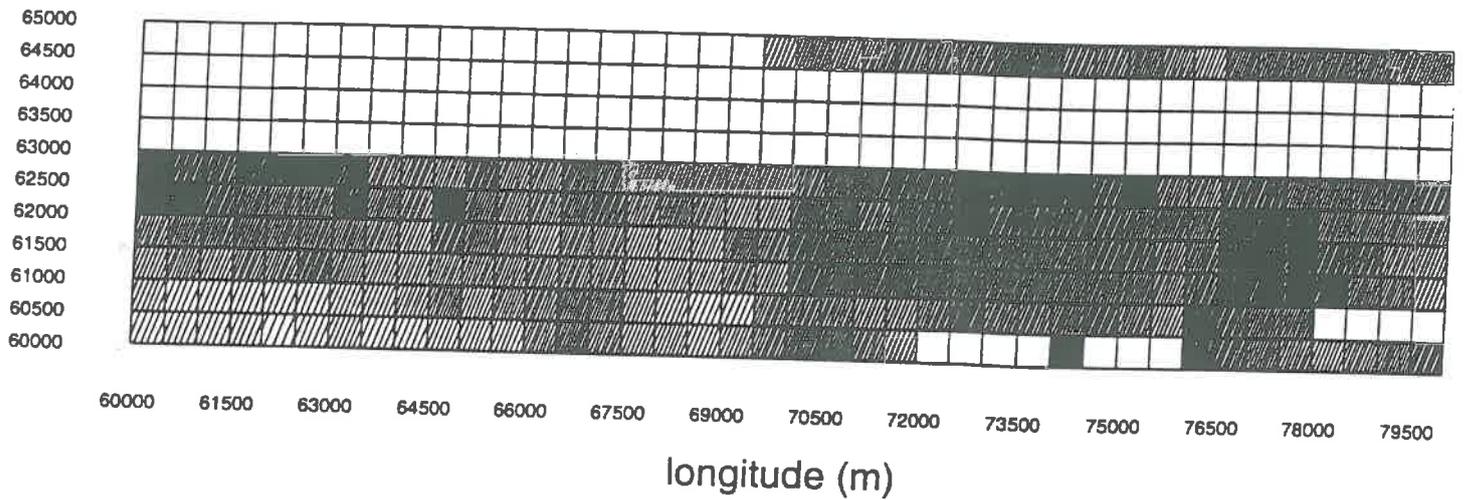
La cartographie de  $T_B$  à la fréquence 1.4 GHz nous permet de bien visualiser les ensembles de végétation à une échelle régionale (Figure IV.13). Les structures de végétation apparaissent de façon remarquable sur la Figure. Nous reconnaissons la forme plus sombre de la brousse tigrée vers 76000-78000m de longitude, puis à l'ouest la bande de jupe sableuse (75500m-76000m), la jachère (72000m-74000m) et finalement les surfaces cultivées (68000m-69000m). Si nous comparons les cartes avec les photo-aériennes, les ensembles de végétation correspondent de manière satisfaisante à la réalité. Les surfaces cultivées vers 68000-69000 et la bande de jupe sableuse présentent les surfaces les plus sèches. Nous observons un assèchement de la surface de l'ensemble de la région entre les jours 239 et 248 et les valeurs de  $T_B$  de la journée 256 montrent que la région n'a reçu de la pluie que sur la partie est de la zone cartographiée. Les surfaces cultivées sont donc très sèches, tandis que la jupe sableuse et la brousse tigrée montrent une augmentation de l'humidité comparativement au jour 248. L'augmentation de l'humidité de surface entre les jours 248 et 256 ne nous permet pas de distinguer de façon significative les limites des ensembles de végétation au jour 256.

#### **3.2.4.2 Humidité 0-0.5cm**

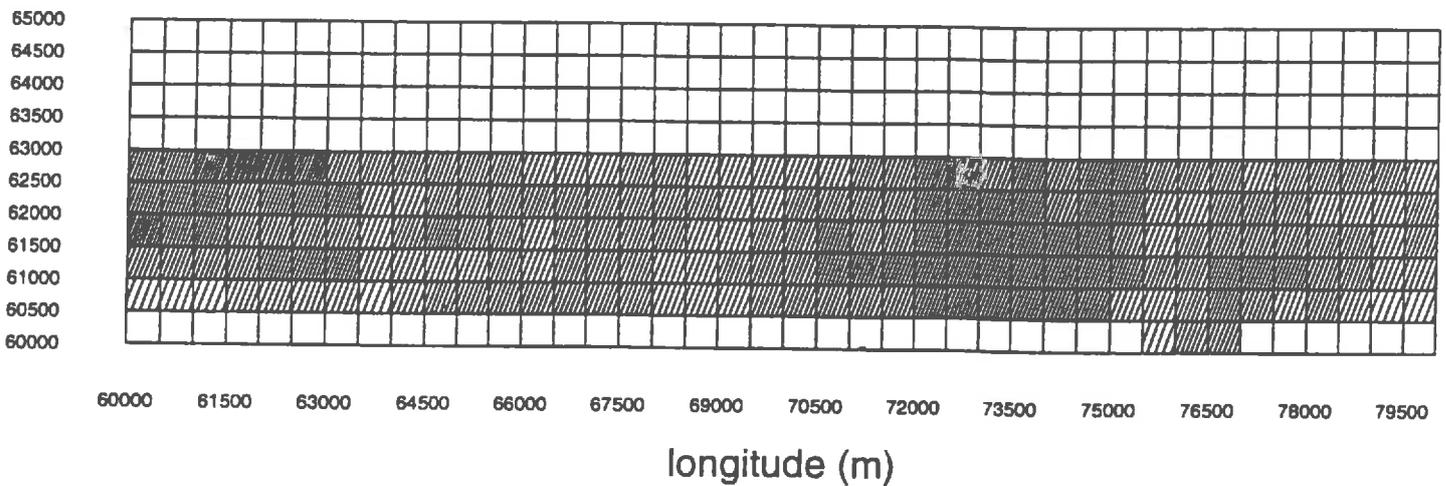
La cartographie de l'humidité de surface 0-0.5cm s'est fait à partir de pixels d'une superficie de 500m X 500m. Nous comparons les valeurs de l'humidité estimée aux fréquences 1.4 et 5.05 GHz.

Aux fréquences 1.4 et 5.05 GHz, la variation de l'humidité est intéressante entre les jours 239 et 246 (Figures IV.14 et IV.15). Nous pouvons distinguer certaines structures de végétation pour la journée 239. La jupe sableuse et les surfaces cultivées apparaissent légèrement plus sèches que la jachère et la brousse tigrée. Sur la

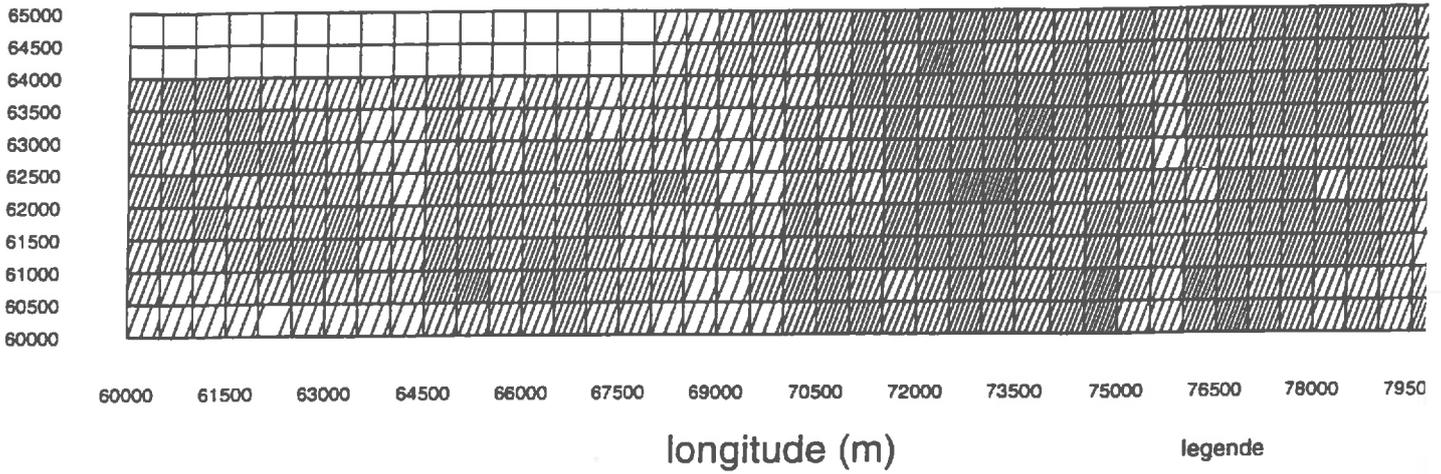
Figure IV.14  
 Humidite estimee 0-0.5cm  
 a) Jour239, PBMR



b) Estimation PORTOS (5H) jour 239



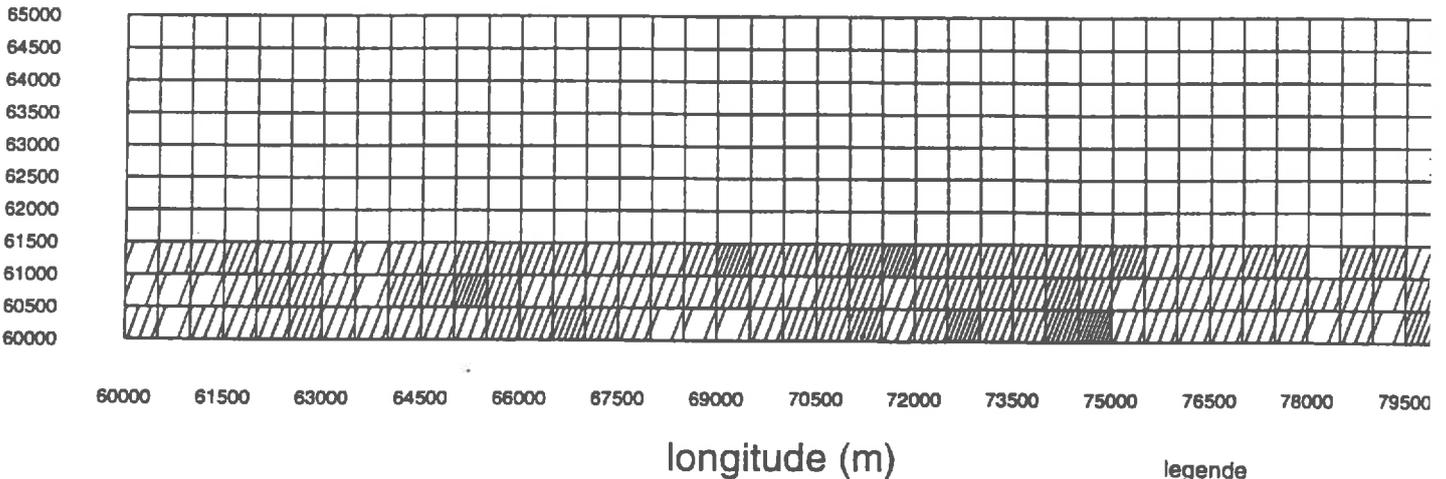
a) Jour246, PBMR



legende

|           |  |
|-----------|--|
| [Pattern] | 0.28 - 0.26 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| [Pattern] | 0.26 - 0.24 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| [Pattern] | 0.24 - 0.22 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| [Pattern] | 0.22 - 0.2 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>  |
| [Pattern] | 0.2 - 0.18 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>  |
| [Pattern] | 0.18 - 0.16 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| [Pattern] | 0.16 - 0.14 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| [Pattern] | 0.14 - 0.12 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| [Pattern] | 0.12 - 0.1 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>  |
| [Pattern] | 0.1 - 0.08 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>  |
| [Pattern] | 0.08 - 0.06 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| [Pattern] | 0.06 - 0.04 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| [Pattern] | 0.04 - 0.02 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| [Pattern] | 0.02 - 0 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>    |

b) Estimation PORTOS (5H) jour 246



legende

|           |  |
|-----------|--|
| [Pattern] | 0.24 - 0.26 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| [Pattern] | 0.22 - 0.24 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| [Pattern] | 0.2 - 0.22 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>  |
| [Pattern] | 0.18 - 0.2 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>  |
| [Pattern] | 0.16 - 0.18 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| [Pattern] | 0.14 - 0.16 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| [Pattern] | 0.12 - 0.14 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| [Pattern] | 0.1 - 0.12 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>  |
| [Pattern] | 0.08 - 0.1 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>  |
| [Pattern] | 0.06 - 0.08 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| [Pattern] | 0.04 - 0.06 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| [Pattern] | 0.02 - 0.04 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| [Pattern] | 0 - 0.02 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>    |

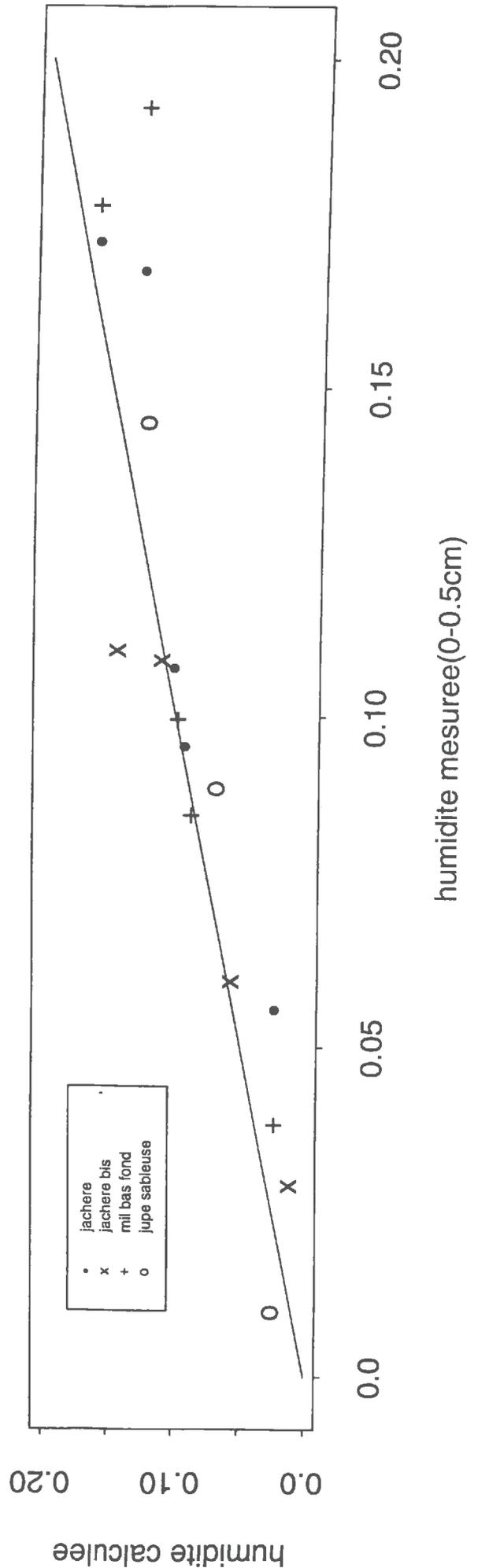
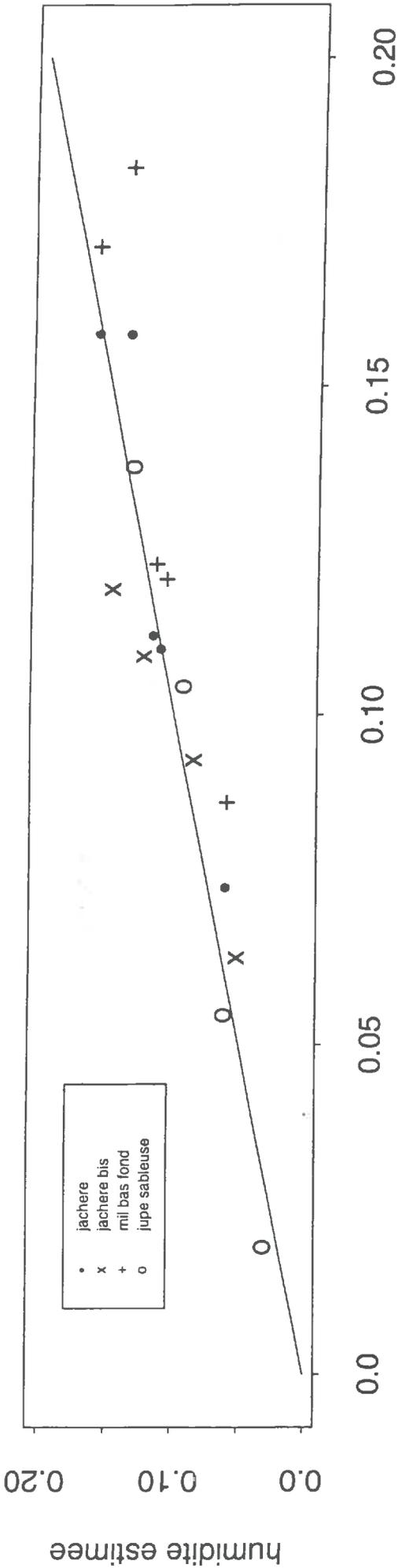


Figure IV.15b. nous remarquons que les surfaces montrent une faible humidité d'où nous ne pouvons distinguer les structures de végétation. Ces faibles valeurs de l'humidité estimée sont probablement liées à un assèchement plus rapide de la surface du sol qu'en profondeur. Toutefois sur la Figure IV.15a. certaines structures telles que les surfaces cultivées et la jupe sableuse sont observées.

### **3.2.3 Relation humidité mesurée et estimée à la fréquence 1.4 GHz**

Afin de vérifier si l'estimation de l'humidité de surface est satisfaisante, nous comparons les valeurs mesurées et celles estimées pour les profondeurs 0-0.5 et 0-2cm.

La Figure IV.16 montre la relation entre l'humidité estimée et mesurée à la fréquence 1.4 GHz. La ligne droite correspond à l'humidité mesurée = l'humidité estimée. Dans l'ensemble les valeurs se comparent favorablement. Leur coefficient de corrélation est élevé,  $R^2 = 0.84$  pour les deux relations. Toutefois, nous observons des mesures sous-estimées, particulièrement pour le wab mil bas fond. En observant les moyennes des deux types d'humidité, nous constatons que l'humidité estimée est légèrement inférieure à l'humidité mesurée sur le terrain. Ce biais peut s'expliquer par une prise de mesures effectuées à des heures différentes.

### **3.2.4 Comparaison de l'humidité volumique estimée entre PORTOS et PBMR**

Nous comparons l'humidité volumique de PORTOS estimée (1) par inversion du modèle de Jackson et Schmugge et (2) par régression linéaire et l'humidité volumique estimée de PBMR. La Figure IV.17 montre la relation de l'humidité calculée par inversion du modèle. Nous constatons que l'humidité volumique est sous-estimée. Toutefois, les valeurs de l'humidité estimée pour les jours 239 et 246 ne forment qu'un seul nuage de points. Ceci a une très grande importance car il démontre une continuité du modèle dans le temps. La Figure IV.18 présente l'humidité estimée de PORTOS par régression linéaire. Les valeurs d'humidité semblent moins biaisées que par inversion du modèle. Mais deux nuages de points apparaissent représentant chacun les valeurs estimées d'une journée. Cette relation montre que pour estimer l'humidité volumique de PORTOS par régression linéaire, il faudrait alors établir une équation pour chaque journée.

Finalement, l'estimation de l'humidité volumique de PORTOS par inversion du modèle est très satisfaisante. Cette relation démontre que la démarche que nous avons suivi est adéquate pour une étude de variation temporelle, même si les valeurs de l'humidité sont sous-estimées.

### **3.2.5 Conclusion**

Nous vérifions que la fréquence 1.4 GHz montre une bonne sensibilité à la teneur en eau pour la profondeur 0-2cm. L'estimation de l'humidité à la fréquence 5.05 GHz par inversion du modèle de Jackson et Schmugge est satisfaisante malgré une sous-estimation des valeurs.

FIGURE 10

Humidité 0-0.5 cm, jour 239 et 246  
Hapex Sahel Sites Centraux

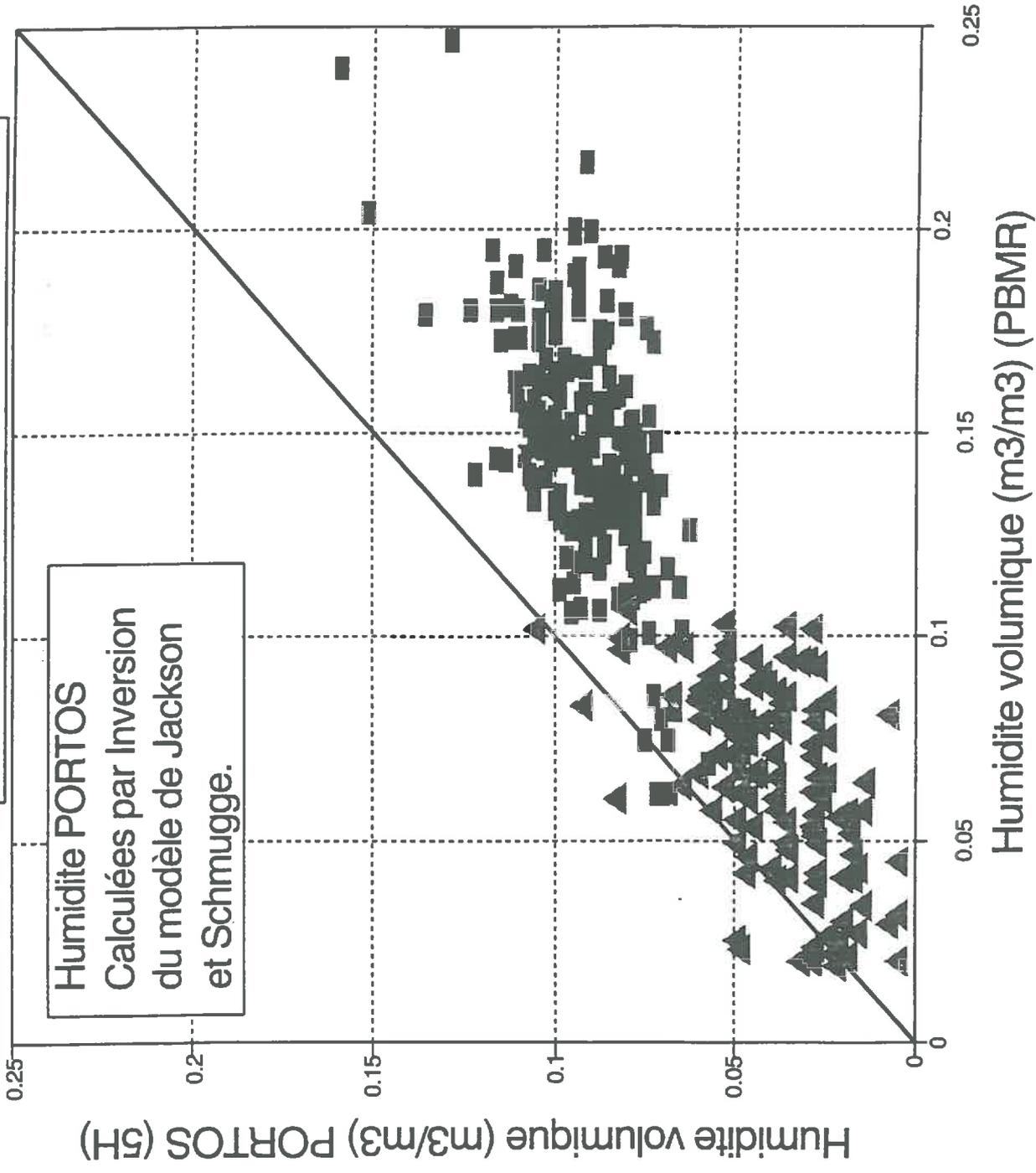
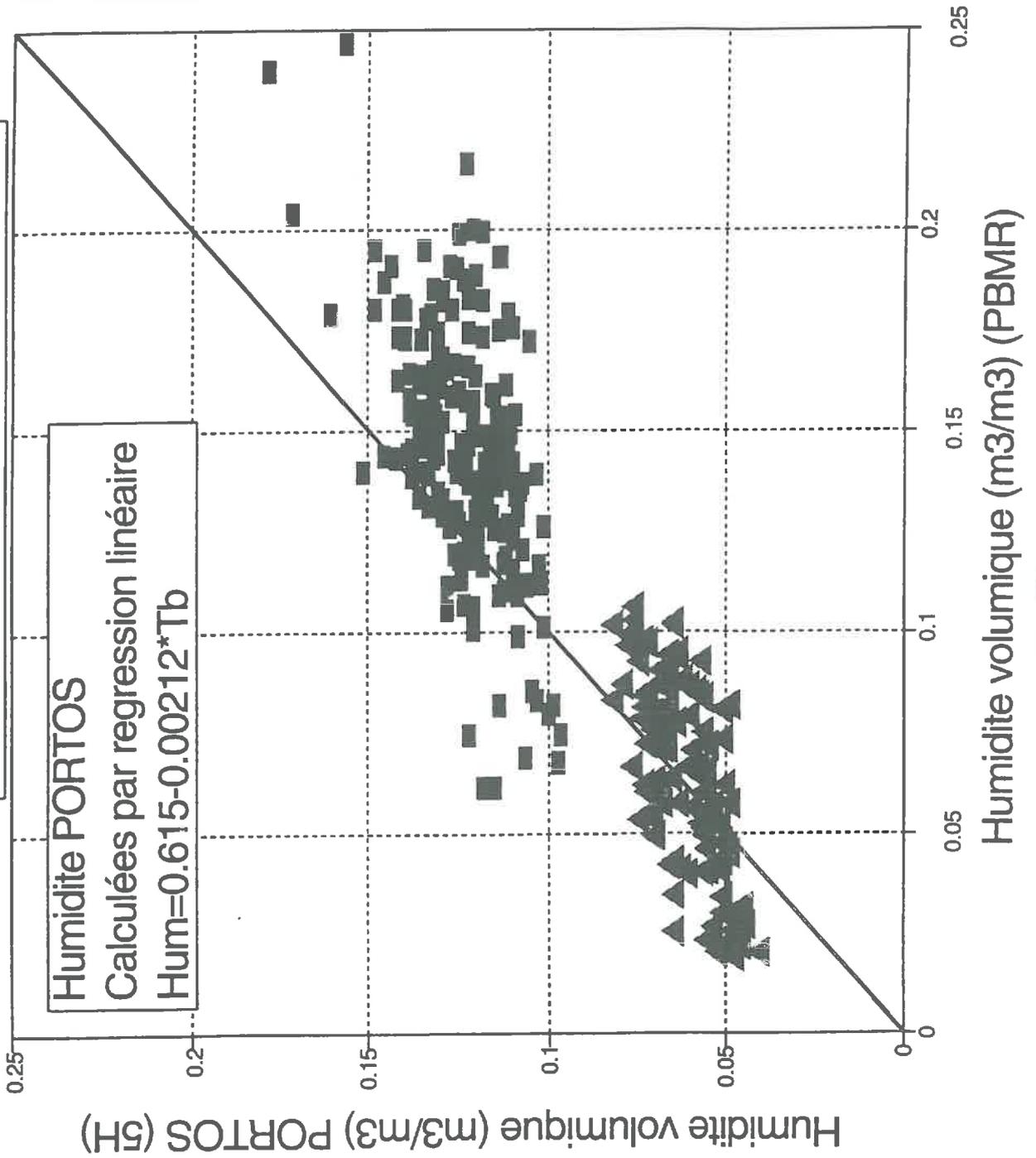


Figure W.18:

Humidité 0-0.5 cm, jour 239 et 246  
Hapex Sahel Sites Centraux



Les cartes de l'humidité de surface à l'échelle régionale montre de manière satisfaisante les structures de végétation. Nous distinguons les surfaces sèches telles que la jupe sableuse et les surfaces cultivées des surfaces plus humides, comme la brousse tigrée et la jachère et ce pour les fréquences 1.4 et 5.05 GHz. Toutefois, une certaine limite de l'estimation de l'humidité de surface (0-0.5cm) est remarquée lors des périodes sèches à la fréquence 5.05 GHz. La sous-estimation de l'humidité 0-0.5cm apparaît clairement sur les cartes du jour 248. l'humidité semble peu varié sur l'ensemble de la zone alors qu'avec une humidité estimée à une profondeur de 0-2cm, nous pouvons distinguer les ensembles de végétation.

## CONCLUSION GENERALE

La cartographie de l'humidité de surface estimée par radiométrie micro-onde constituait l'objectif principal de ce travail. Mais avant d'estimer l'humidité, nous voulions comprendre le rôle que peut jouer un couvert végétal sur les mesures radiométriques.

Nous avons vérifié que les températures de brillance mesurées à la fréquence 1.4 GHz montre une faible sensibilité au couvert végétal, sans être significative. Ainsi nous avons estimé l'humidité de surface à partir de la droite de régression établie entre  $T_B$  et humidité mesurée (0-2cm). Les valeurs de l'humidité de surface estimées à 1.4 GHz montrent une variation spatiale intéressante à l'échelle régionale. Certaines structures de végétation apparaissent clairement, par exemple la brousse tigrée ou la bande de jupe sableuse. En outre, ces valeurs d'humidité montre un caractère hydrique propre à chaque ensemble de végétation. La brousse tigrée et la jachère montrant une humidité supérieure à celles des parcelles de surfaces cultivées et de la bande de jupe sableuse.

Il est également possible d'estimer l'humidité de surface à la fréquence 5.05 GHz, mais pour ce faire nous devons prendre en compte l'effet de la végétation et utiliser un modèle simple d'émission d'un sol recouvert de végétation. Les premiers résultats obtenus en inversant le modèle semblent prometteur. Nous constatons toutefois une sous-estimation de l'humidité de surface à la fréquence 5.05 GHz. Ce biais est peut-être lié à une mauvaise estimation du couvert végétal. Afin de comprendre les raisons de cette sous-estimation, une analyse plus approfondie de la relation entre l'humidité calculée de PORTOS et l'humidité observée de PBMR est nécessaire.

Les mesures radiométriques aéroportées montrent une limite spatiale lorsque nous voulons comparer des types de végétation à l'échelle locale. Ces limites sont liées à la grande résolution au sol des radiomètres par rapport à la petite taille des parcelles. En outre, certaines erreurs peuvent être produites par la difficulté de superposer des données radiométriques d'origine diverses. Une d'améliorer la caractérisation des signatures de végétation, une diminution de la tache au sol des radiomètres est souhaitable.

## BIBLIOGRAPHIE

BONN F. et G. ROCHON. 1993. Précis de télédétection. vol. 1 Principes et méthodes. U.R.E.F.- Presses de l'Université du Québec / AUPELF, Québec, Canada. 485p.

CHANZY. A. 1991. Modélisation simplifiée de l'évapotranspiration d'un sol nu utilisant l'humidité et la température de surface accessibles par télédétection. Thèse de doctorat. Institut National Agronomique Paris-Grignon. 221p.

CHANZY. A. et W.P. KUSTAS. 1994. Evaporation monitoring over land surface using microwave radiometry (accepté pour "Passive microwave remote sensing research related to land-atmosphere interactions").

CHANZY, A., D. HABOUDANE, J.P. WIGNERON, J.C. CALVET & O. GROSJEAN. 1994. Radiométrie micro-onde sur divers types de couverts végétaux: influence de l'humidité du sol. Colloque International ISPRS. 'Mesures physiques et signatures en télédétection, Val d'Isère (FRA), 1994/01/17-21', p505-512.

DECRAMER. H. 1993. Etude des bandes vidée. Campagne Hapex-sahel. 15août-22septembre 1992. Rapport de fin de stage. 43p.

ENGMAN. E.T. 1991. Applications of microwave remote sensing of soil moisture for water resources and agriculture.

GAUDIN. T. 1994. Estimation de l'évapotranspiration réelle d'un couvert de blé à partir de mesures radiométriques micro-ondes. Mémoire de fin d'étude E.S.I.T.P.A. Val de Reuil. 67p.

JACKSON. T.J., T.J. SCHMUGGE et J.R. WANG. 1982. Passive microwave sensing of soil moisture under vegetation canopies. Water Resour. Res., vol.18, no.4, p. 1137-1142.

JACKSON. T.J. et T.J. SCHMUGGE. 1986. Passive microwave remote sensing of soil moisture. Adv. hydros. 14:123-159.

JACKSON. T.J. et T.J. SCHMUGGE. 1989. Passive microwave remote sensing system for soil moisture: Some supporting research. IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens., GE-27(2): 225-235.

JACKSON. T.J. et T.J. SCHMUGGE .1991. Vegetation effects on the microwave emission of soils. Remote Sens. Environ. vol. 36, p. 203-212.

JACKSON, T.J., D.M. LE VINE, C.T. SWIFT, T.J. SCHMUGGE et F.R. SCHIEBE. 1994. Large area mapping of soil moisture using the estar passive microwave radiometer in Washita '92.

MO, T., B.J. CHOUDHURY, T.J. SCHMUGGE, J.R. WANG et T.J. JACKSON. 1982. A model for microwave emission from vegetation-covered fields. *J. Geophys. Res.* 87(C13): 11229-11237.

MONTENY, B. 1993. Campagne de mesures HAPEX-Sahel 1992, Supersite Central-est.

NEWTON, R.W., Q.R. BLACK, S. MAKANVAND, A.J. BLANCHARD & B.R. JEAN. 1982. Soil moisture information and thermal microwave emission. *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.* GE-20(3): 275-281.

O'NEILL, P.E., N.S. CHAUHAN, T.J. JACKSON, D.M. LE VINE et R.H. LANG. 1994. Microwave soil moisture prediction through corn in Washita '92. *Proceedings of IGAARS'94*.

PALOSCIA, S. et P. PAMPALONI. 1988. Microwave polarization index for monitoring vegetation growth. *IEEE trans. geosc. rem. sens.*, vol. 26, no. 5, p.617-621.

SCHMUGGE, T.J. 1983. Remote sensing of soil moisture: Recent advances. *IEEE Trans. geosc. rem. sens.* GE-21(3): 336-344.

SCHMUGGE, T.J. 1985. Remote sensing of soil moisture. Pp. 101-123 dans *Hydrological forecasting*. Editeurs: John Wiley & Sons Ltd.

SCHMUGGE, T.J., P.E. O'NEILL & J.R. WANG. 1986. Passive microwave soil moisture research. *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.* GE-24(1): 12-22.

WANG, J.R., P.E. O'NEILL, T.J. JACKSON et E.T. ENGMAN. 1983. Multifrequency measurements of the effects of soil moisture, soil texture, and surface roughness. *IEEE Trans. Geosc. Rem. sens.* GE-21(1): 44-51.

WANG, J.R., J.C. SHIUE, S.L. CHUANG, R.T. SHIN & M. DOMBROWSKI. 1984. Thermal microwave emission from Vegetated fields: a comparison between theory and experiment. *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.* GE-22(2): 143-149.

WANG, J.R., J.C. SHIUE, T.J. SCHMUGGE et E.T. ENGMAN. 1990. The L-band PBMR measurements of surface soil moisture in FIFE. *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.* 28(5): 906-914.

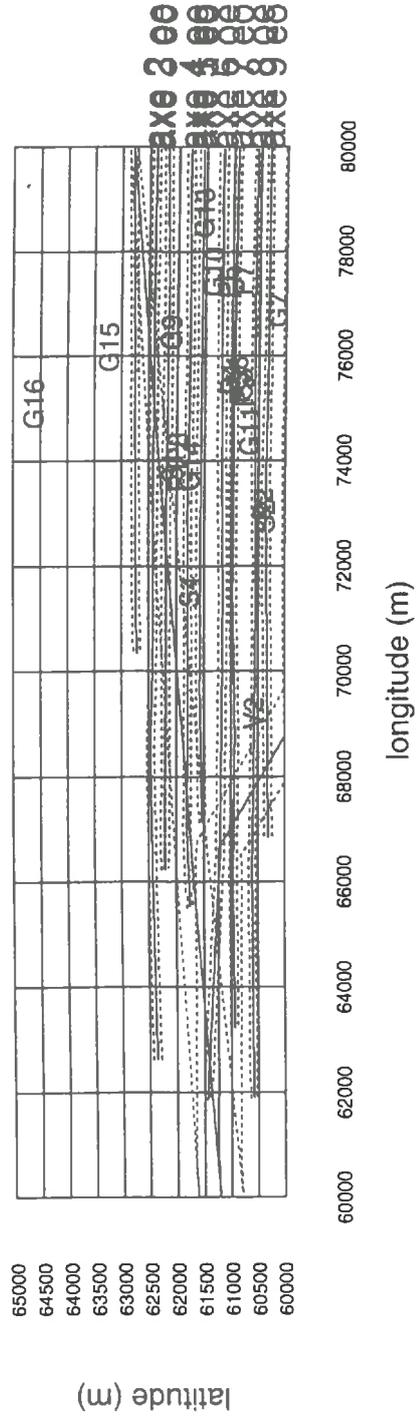
WANG, J.R., J.E. MCMURTREY III, E.T. ENGMAN, T.J. JACKSON, T.J. SCHMUGGE, W.I. GOULD, W.S. GLAZAR & J.E. FUCHS. 1994. Radiometric measurements over bare and vegetated fields at 1.4GHz and 5GHz frequencies.

WIGNERON, J.P. 1993. Modélisation de l'émission micro-onde d'un couvert végétal- Mise en relation de la mesure hyperfréquence passive avec les échanges énergétiques et hydriques d'une culture de soja. Thèse de Doctorat. Université Paul Sabatier de Toulouse.

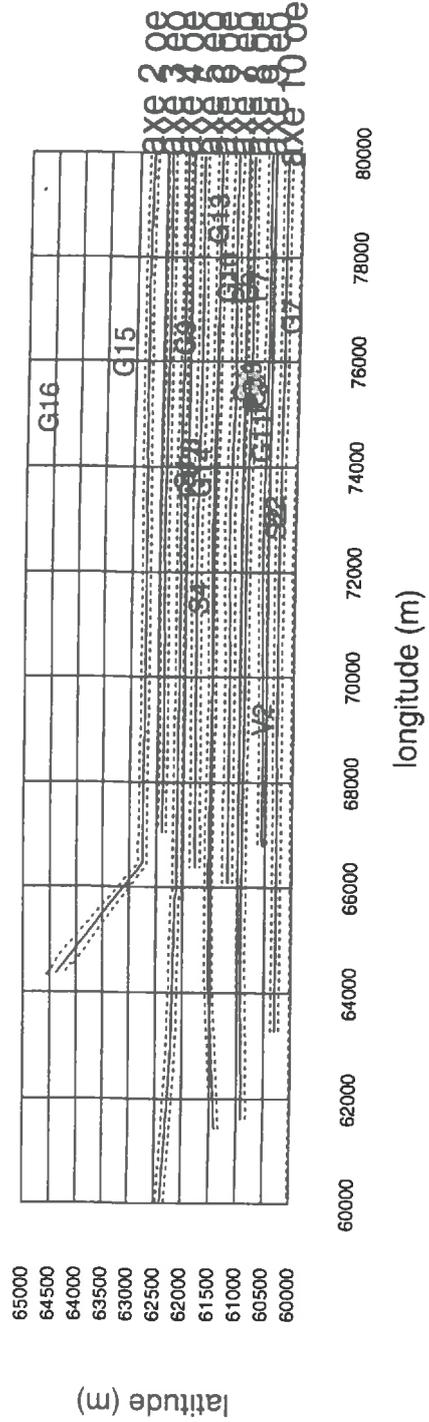
WIGNERON, J.P., Y. KERR, A. CHANZY et Y.Q. JIN. 1993. Inversion of surface parameters from passive microwave measurements over a soybean field. *Remote Sens. Environ.* 46: 61-72.

**ANNEXE 1**

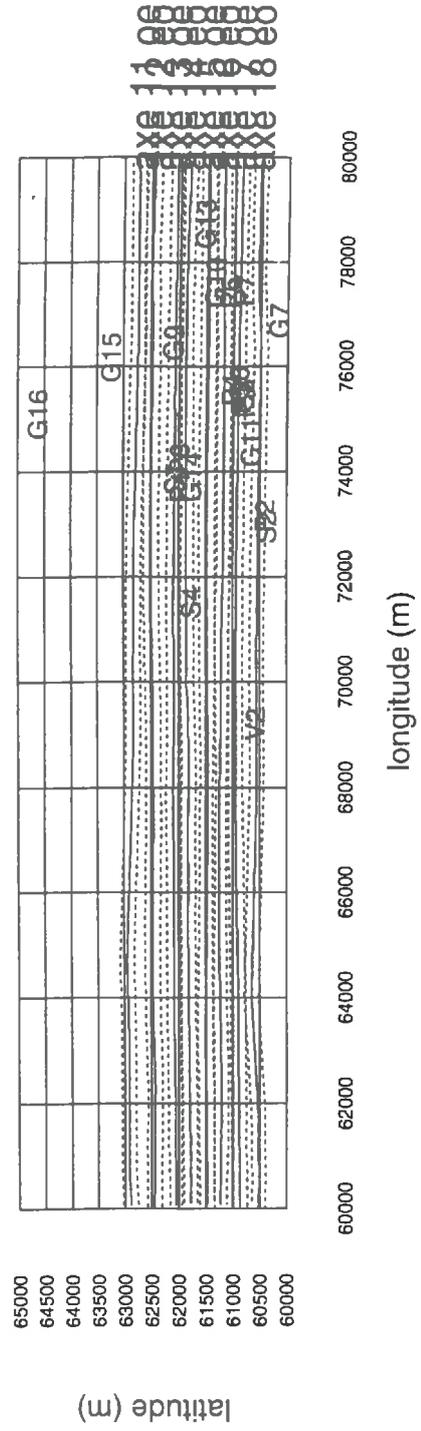
# Axes de vol du Jour 236, PORTOS



# Axes de vol du Jour 237, PORTOS



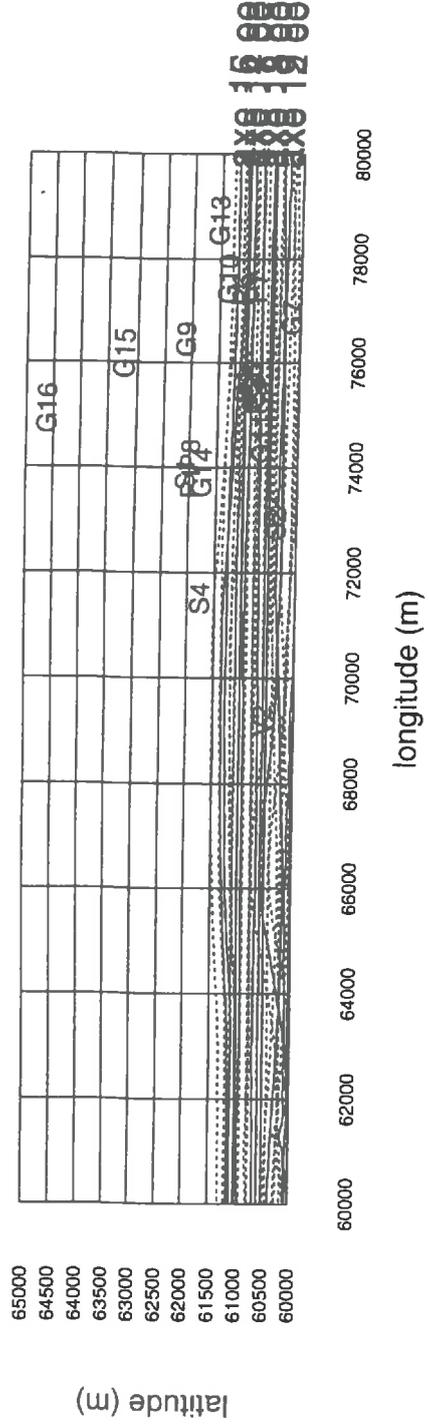
# Axes de vol du Jour 239, PORTOS



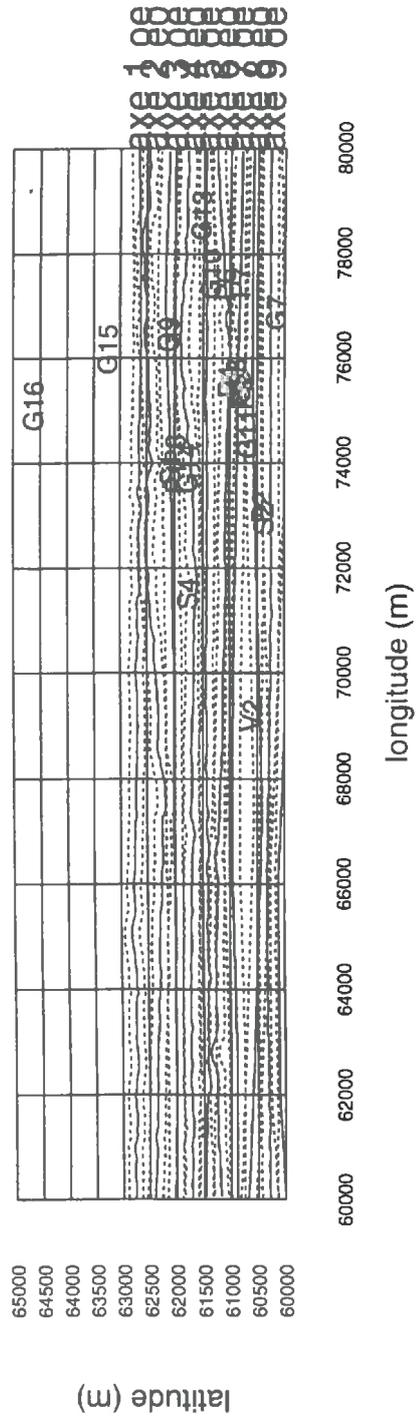
latitude (m)

longitude (m)

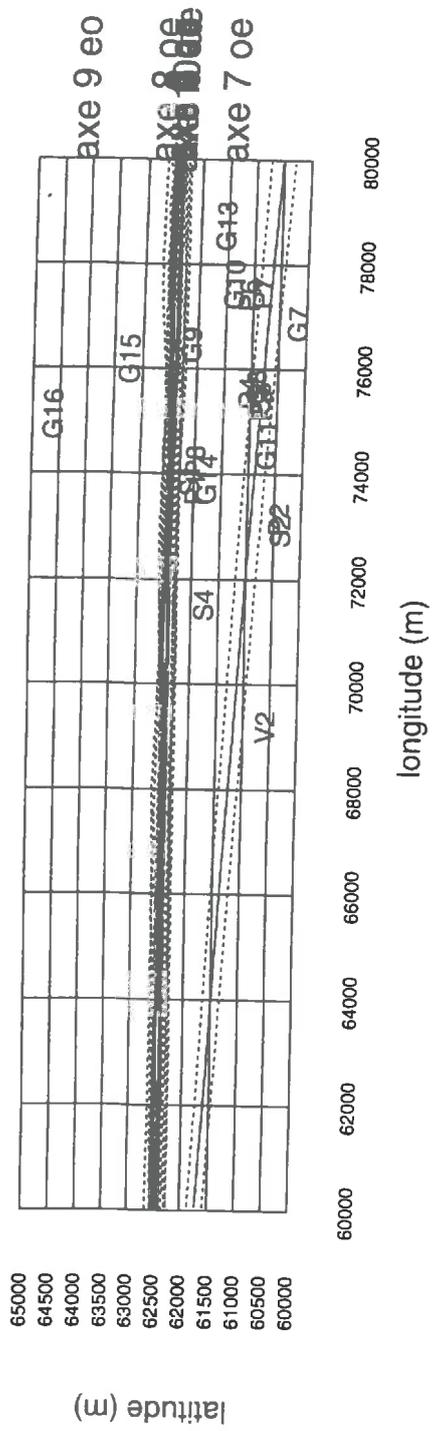
# Axes de vol du Jour 245, PORTOS

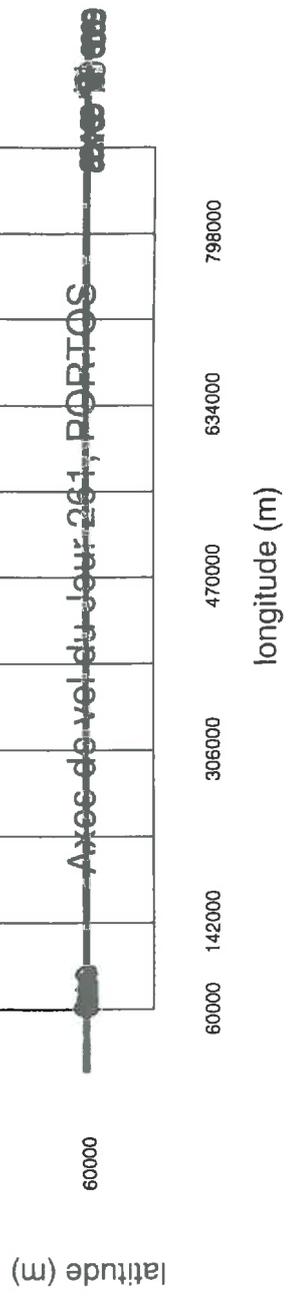


# Axes de vol du Jour 246, PORTOS

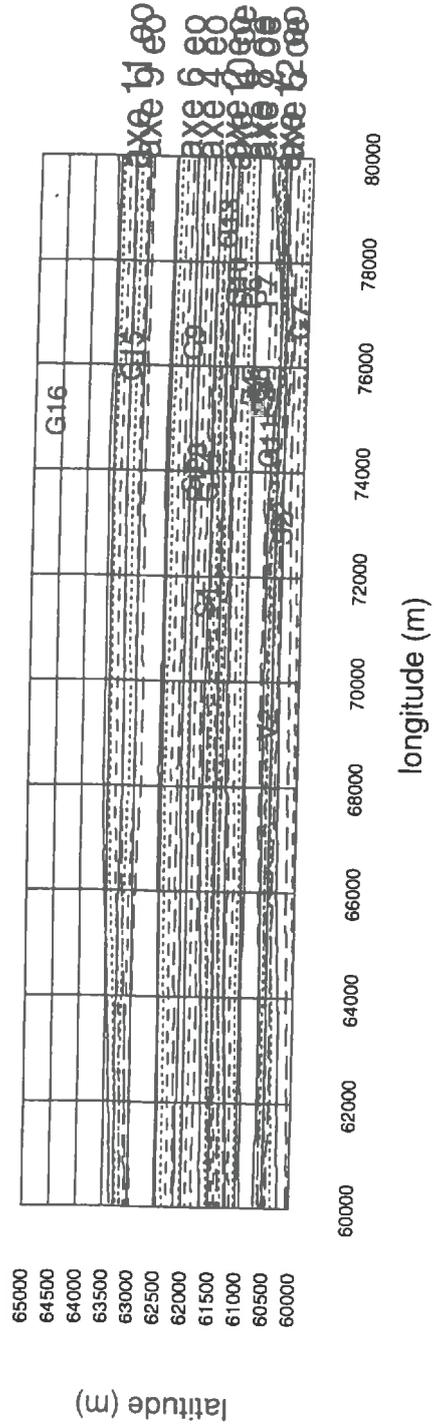


# Axes de vol du Jour 256, PORTOS

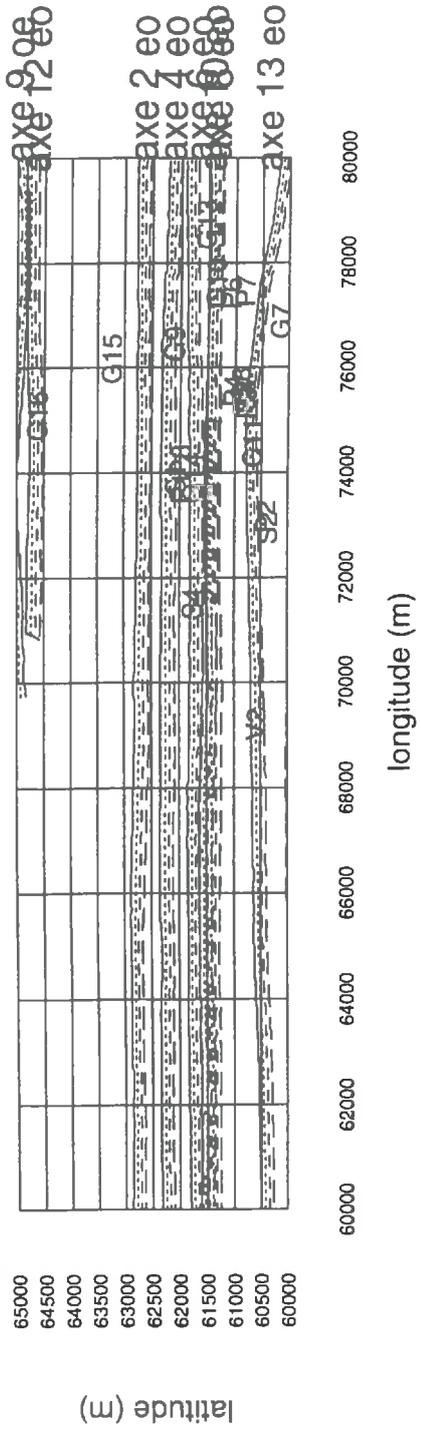




# Axes de vol du Jour 238, PBMR



# Axes de vol du Jour 239, PBMR

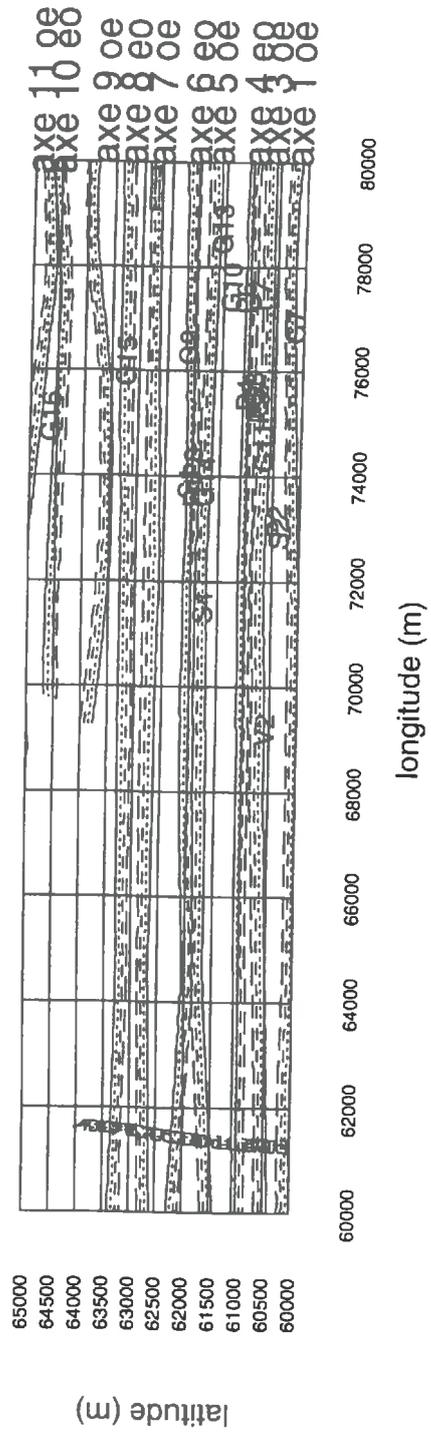




# Axes de vol du Jour 248, PBMR



# Axes de vol du Jour 256, PBMR



**ANNEXE 2**

Coordonnées des sites (wabs)

| <b>WABS</b>          | <b>COORDONNEES (degré)</b> | <b>COORDONNEES (m)</b> |
|----------------------|----------------------------|------------------------|
| <b>JACHERE</b>       | 2°40.98E - 13°33.48N       | 73875 - 62085          |
| <b>MIL BAS FOND</b>  | 2°40.45E - 13°32.56N       | 72925 - 60379          |
| <b>JACHERE BIS</b>   | 2°39.67E - 13°33.31N       | 71514 - 61770          |
| <b>JUPE SABLEUSE</b> | 2°41.86E - 13°32.80N       | 75460 - 60815          |

**ANNEXE 3**

Coordonnées des périmètres des parcelles

| <b>PARCELLES</b>      | <b>COORDONNEES (degré)</b>                          | <b>COORDONNEES (m)</b>                    |
|-----------------------|---|---|
| <b>BROUSSE TIGREE</b> | long: 2°42.52 - 2°43.38<br>lat: 13°32.89 - 13°33.43 | long: 76650 - 78200<br>lat: 60990 - 62000 |
| <b>JACHERE</b>        | long: 2°40.62 - 2°40.99<br>lat: 13°33.3 - 13°33.7   | long: 73225 - 73890<br>lat: 61750 - 62500 |
| <b>MIL 1</b>          | long: 2°39.54 - 2°39.86<br>lat: 13°32.76 - 13°32.99 | long: 71275 - 71850<br>lat: 60750 - 61175 |
| <b>MIL 2</b>          | long: 2°38.43 - 2°38.83<br>lat: 13°32.75 - 13°33.32 | long: 69275 - 70000<br>lat: 60725 - 61790 |
| <b>MIL 3</b>          | long: 2°37.97 - 2°38.14<br>lat: 13°33.33 - 13°33.66 | long: 68450 - 68750<br>lat: 61800 - 62425 |
| <b>MIL 4</b>          | long: 2°41.81 - 2°42.02<br>lat: 13°32.46 - 13°33.07 | long: 75380 - 75750<br>lat: 60200 - 61330 |
| <b>MIL 5</b>          | long: 2°39.12 - 2°39.41<br>lat: 13°33.43 - 13°33.62 | long: 70520 - 71050<br>lat: 62000 - 61350 |

