



HAPEX - SAHEL 1992

Campagne de mesures

Supersite Central Est

Synthèse partielle sur les participations

FEVRIER 1993

**MONTENY, B. A.
ORSTOM
B.P. 5045
34032 Montpellier**

19 OCT. 1993

ORSTOM Fonds Documentaire
N° 38 244 ep 1
Cote B



HAPEX-Sahel 1992

Campagne de mesures sur le site central est

Synthèse partielle sur les participations

PLAN

Introduction

Considérations générales

Objectifs Scientifiques généraux

Plan expérimental

Description du site central est de Banizoumbou.

Opération expérimentale

- * Précipitation
- * Climatologie
- * Hydrologie
 - Hydrologie de surface
 - Fonctionnement hydrogéologique
- * Humidité du sol
 - Hydrodynamique dans le sol
 - Fonctionnement hydrodynamique du bassin versant
 - Suivi du bilan hydrique sous différentes végétations
 - Redistribution de l'eau sur une toposéquence
 - Extension spatiale des mesures au sol et modélisation
- * Flux à l'interface sol-végétation et atmosphère
 - Bilan radiatif et énergétique de la surface sahélienne
 - Bilan énergétique de la savane à *Guiera*
 - Caractéristiques de transferts des couverts épars
 - Bilan énergétique de 2 surfaces (mil et savane à *Guiera*)
- * Flux aéroporté
- * Télédétection
 - Mesure et analyse des températures de surface par télédétection infrarouge thermique
 - Caractérisation des micro-ondes émises par le système sol-végétation
 - Mesures BDRF et caractérisation des aérosols atmosphériques.

Le rapport de campagne HAPEX-Sahel supersite central est (SSCE) présente une synthèse des activités déployées au cours de l'année 1992. Il n'est pas le travail d'une personne mais le résultat d'une collaboration étroite entre les chercheurs de plusieurs Instituts. Je tiens à les remercier tous et plus particulièrement ceux qui m'ont fait parvenir leur contribution :

Amadou, M. - Inran	Peugeot, Ch. - Orstom
Bessemoulin, P.- CNRM	Pion, J.C. - LSIT/GSTS
Brunel, J.P. - Orstom	Rajot, J.L. - Orstom
Castell, J.F. - Ina-PG	Said, F. - Univ P. Sabatier
Chanzy, A. - INRA	Sicot - IRI
Estèves, M. - Orstom	Tanré, D. - LOA
Galle, Orstom	Taupin, J.D. - Orstom
Gandah, M. - Inran	Troufleau - Orstom/Cemagref
Kerr, Y. - Lerts	Tuzet, A. - Ina-PG
Laguerre, L. - Lerts	Vauclin, M. - IMG/LTHE
Leduc, Chr. - Orstom	
Lenoir, F. - Orstom	

Il est évident qu'ils ne trouveront pas nécessairement leur texte reproduit *in extenso* mais pour que la cohérence des études soit réelle selon les objectifs définis, le regroupement des travaux était indispensable sans rien enlever à la participation individuelle ou d'équipe. Bien au contraire, l'ensemble se veut une présentation logique de travail constructif devant atteindre à des buts précis.

Cette première version du rapport qui vous est soumise doit être revue avec vos commentaires et m'être retournée au plus vite (20 mars date limite) pour que je puisse le reprendre et vous fournir un texte définitif qui vous aidera dans vos travaux à venir.

MONTENY, B.A.

Introduction :

Un effort sans précédent est actuellement en cours au niveau français et international pour mieux comprendre l'équilibre climatique dans les différentes régions du globe avec l'objectif de pouvoir prévoir toute évolution ou changement de l'équilibre climatique. HAPEX-Sahel est une des expériences internationales pour l'étude des interactions entre la biosphère et la géosphère (cycle global de l'eau), dans le but de fournir des modèles de fonctionnement hydrologique de la surface MHS pour les modèles de Circulation Atmosphérique Générale GCM. L'expérimentation a eu lieu dans un biosystème sahélien, situé à l'est de Niamey (Niger) : 13° et 14°N , 2° et 3°E. A l'intérieur de ce degré carré, trois supersites ont été retenus comme lieu géographique de mesures importantes qui ont débutées en 1991. Quant aux travaux intensifs de terrain POI, ils ont été réalisés au cours de la période mi-août à mi-octobre 1992.

Considérations générales

Les échanges d'énergie et de masse entre le système sol-végétation et l'atmosphère sont en grande partie les mécanismes responsables des conditions climatiques et de leur évolution. Si la communauté végétale est sous la dépendance du sol et du climat, elle joue un rôle prépondérant en déterminant la répartition de l'énergie solaire disponible et en régissant les apports d'eau et de chaleur dans la couche limite continent-atmosphère. Elle présente ainsi un effet rétroactif sur le climat.

L'expression des bilans énergétiques et hydrologiques est sous la dépendance des échelles de temps et d'espace et leur couplage nécessite la mise en commun des moyens de la communauté scientifique.

Nos connaissances sur les bilans et les mesures spatio-temporelles associées portent essentiellement sur des surfaces de quelques ha ou km² or l'échelle des modèles de Circulation Générale s'étend de 5.000 à 10.000 km². Avec l'aide de l'outil télédétection, les paramètres pertinents caractérisant l'état de la surface sont accessibles et une extension spatiale devient possible pour la validation des modèles GCM. Mais l'évolution prévisible des études se fera vers une convergence d'échelle (à méso-échelle) afin de mieux intégrer les variabilités spatio-temporelles des états de surfaces et leurs effets dynamiques sur l'ensemble des mécanismes hydrologiques et énergétiques.

Des modèles hydrologiques continentaux sont en cours de constitution en particulier la paramétrisation des différents flux (précipitations, évaporation, écoulements, infiltration, et stockage).

L'intérêt de ce rapport est de permettre à chacun de présenter les informations essentielles sur ses activités : buts, méthodes de travail, dispositifs mis en place et données disponibles. L'importance des enjeux nécessite une coordination au plus haut niveau afin que les objectifs fixés par les différentes disciplines soient effectivement réalisés.

Objectifs Scientifiques généraux

Le premier objectif est l'étude des divers mécanismes d'échange à l'interface sol-végétation et atmosphère pour l'évaluation des bilans énergétique et hydrologique d'une région. Le but est de développer une paramétrisation des flux à l'échelle régionale. Ceci nécessite une évaluation de l'interception-absorption du rayonnement solaire par la surface sol-végétation et une quantification des transferts selon les états de surface dans le cadre d'un cycle hydrologique régional.

Le second objectif doit être l'interprétation des variables pertinentes de la surface mesurées par télédétection, avec les observations au sol afin d'en déduire les algorithmes inverses les plus appropriés pour cette région. Ces variables doivent permettre de caractériser des changements au niveau des processus d'échanges au sol. Toutefois, les variables de la surface doivent être recalées, nécessitant une amélioration de la paramétrisation de la correction atmosphérique.

L'étude des écosystèmes (caractéristiques des sols, composition floristique du couvert végétal, évolution de la productivité saisonnière...) est primordiale en raison du rôle déterminant joué par la végétation au niveau des mécanismes de régulation des transferts d'énergie et d'eau. Cette régulation est couplée aux caractéristiques du sol : infiltration et stockage en eau.

Le passage d'échelle est un autre objectif de l'expérience. En effet, en raison de la non linéarité des mécanismes d'échange entre le système sol-végétation et l'atmosphère, les modèles SVAT ne peuvent pas être extrapolés à de larges superficies hétérogènes comme celles du Sahel. La télédétection est une voie pouvant permettre l'aggrégation des résultats et ultérieurement conduire à une extension spatiale. Néanmoins, une attention particulière doit être portée sur le problème de l'intégration spatiale associée à l'évolution phénologique des couverts végétaux (échelle temporelle).

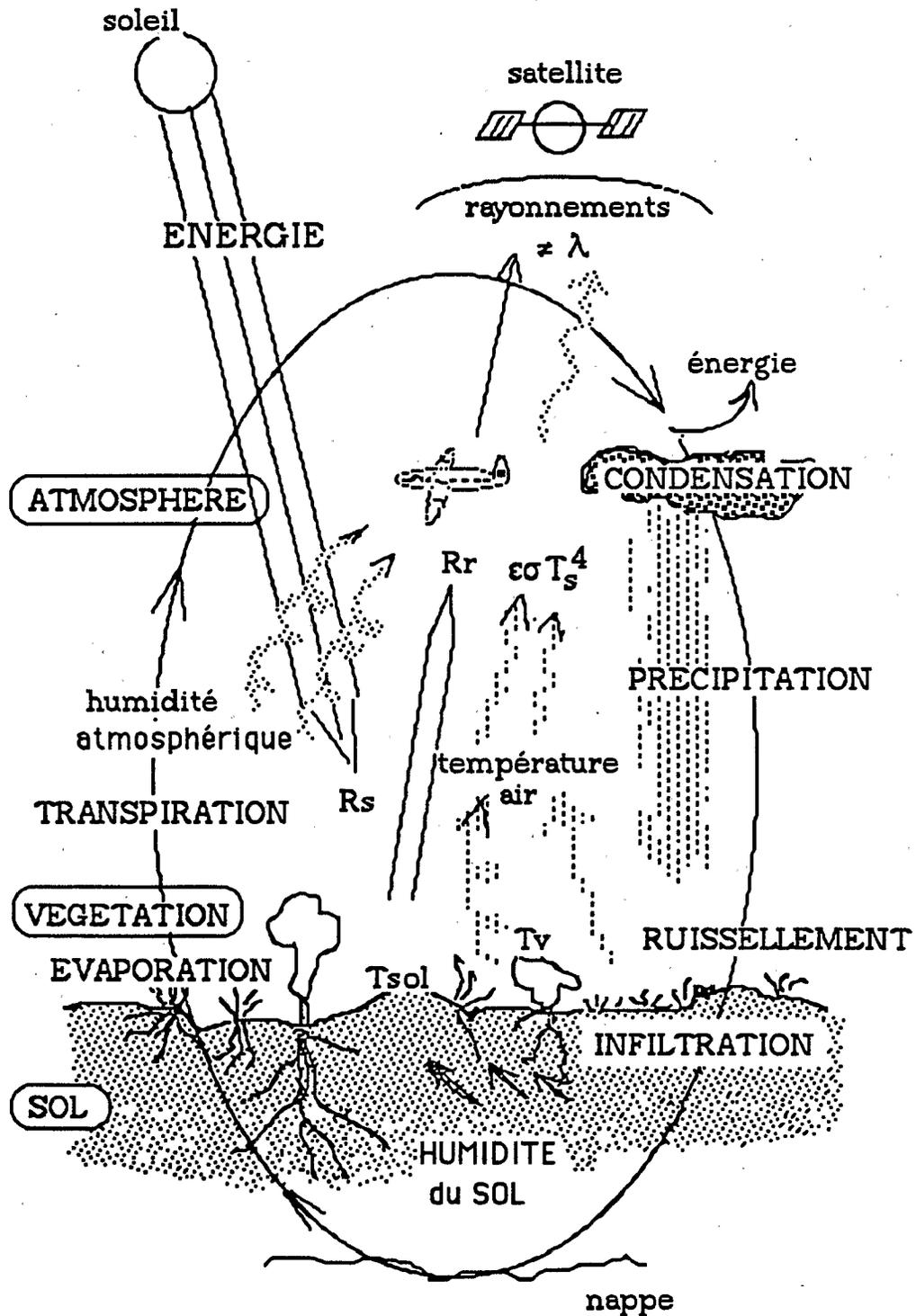
Les modèles de circulation générale fournissent une description partielle des échanges énergétiques et hydriques à l'interface sol-végétation et atmosphère. La validation directe ne peut pas être réalisée par manque de données globales autres que celles fournies par les moyens de télédétection. C'est pourquoi, la constitution d'une base de données rassemblant tous les résultats d'une expérience de cette envergure doit être un autre objectif. Cette base doit comprendre les données sur les mesures des flux sol-atmosphère (bilan radiatif, chaleur latente et sensible, échanges de CO₂), sur les variables caractérisant les surfaces (sol, ruissellement, humidité et végétation) ainsi que leur hétérogénéité et les facteurs de forçages atmosphériques (ennuagement, précipitation, aérosols...). Les images aériennes sont les intégrateurs indispensables à la réalisation de cet objectif.

La stratégie adoptée pour réaliser les objectifs a été la suivante :

- des mesures sur une longue période (mai à mars)
 - * météorologie - climatologie
 - * hydrologie de surface
 - * humidité du sol
 - * végétation
 - * suivi des mares et des recharges de nappe

- des mesures intensives sur une période déterminée (POI) en plus des mesures précédentes afin d'acquérir simultanément l'ensemble des données satellitaires, atmosphériques et de surface

- * paramètres de la couche limite - radiosondage
- * flux au sol
- * humidité de la surface du sol
- * infiltration, ruissellement, érosion
- * évolution spatio-temporelle des couverts végétaux



Le schéma présenté résume le couplage entre le cycle de l'énergie et celui de l'eau. Des relations existent entre les divers mécanismes d'échange des deux cycles, celui de l'énergie rayonnante, principal moteur de toute réaction terrestre et celui de l'eau, considéré comme l'élément primordial d'échangeur thermique du système terrestre. En raison de la complexité des divers processus intervenant au niveau de l'interface sol-végétation et atmosphère, l'étude de ces mécanismes fait appel à un grand nombre de disciplines qui travaillent à différentes échelles de temps et d'espace.

Plan expérimental

Un plan expérimental général, édité par le Comité d'opération, décrit l'ensemble du dispositif expérimental ainsi que les diverses équipes participantes. Nous n'y reviendrons pas, il est disponible. Le tableau ci-joint récapitule les diverses équipes intervenantes et leur opération de recherche sur le supersite central est.

SITE CENTRAL EST		
EQUIPES	opérations de recherche	chercheurs
CNRM 15 juillet - 30 octobre	Météorologie à mésoéchelle MET-01	P. Bessemoulin J.P. Goutorbe
Institut d'Hydrologie 1-5 septembre	Modélisation à mésoéchelle-Radiosondage MET-02	A. Dolman R.J. Harding
Université P. Sabatier Labo Aérologie 15août-15octobre	Flux aéroporté MET-05	F. Said B. Benech A. Druilhet P. Durand
Université de Floride août	Processus rétroactifs de l'évaporation et des précipitations sur le bilan radiatif MET-06	E. Smith
ORSTOM mai - novembre	Hydrologie de surface - ruissellement HS-06	M. Estèves R. Gualde J.M. Lapetite J.C. Desconnets
ORSTOM mai - décembre	Stockage et déstockage des mares HS-06	J.C. Desconnets J.D. Taupin T. Lebel
ORSTOM mai - novembre	Estimation des pluies - EPSAT HS-09	J.D. Taupin T. Lebel M. Gréard M. Adamson J. Lecocq A. Amani
ORSTOM toute l'année	Recharge des aquifères HS-11	F. Lenoir C. Leduc P. Derouet A. Karbo P. Schroeter
ORSTOM mai - novembre	Caractérisation des sols HS-15	Ch. Valentin J.L. Rajot N. Nagumo
ORSTOM toute l'année	Hydrodynamique à l'échelle du bassin versant HS-15	S. Galle C. Peugeot

IRI toute l'année	Evaluation du bilan hydrique sur les WAB HS-15	M. Sicot A. Breyhima
INRAN juin - décembre	Suivi des humidités des sols HS-15	M. Gandah M. Oumarou
I.M.G. - LTHE 13 aout - 15 octobre	Caractérisation hydrodynamique des sols en surface HS-16	M. Vauclin J.P. Vandervaere R. Angulo Jaramillo R. Haverkamp
CNRM 15 juillet - 30 novembre	Mesures des flux des surfaces (EC) FV-02	P. Bessemoulin J.P. Goutorbe
ORSTOM - CSIRO juillet et novembre	Etudes isotopiques des interactions sol-plantes-atmosphère FV-05	J.P. Brunel J. Dighton G.R. Walker
ORSTOM mai - novembre	Cartographie de la végétation Analyse de la dynamiques des écosystèmes Biomasse FV-10	J.M. D'Herbes J. Seghieri M. Loireau E. Delabre
ORSTOM mai - novembre	Bilans énergétique et hydrique des surfaces dans un bassin versant (Flux) FV-13	B.A. Monteny J.P. Lhomme, A. Chehbouni M. Amadou D. Trouffleau
INA-PG 10 aout - 10 septembre	Caractérisation des transferts énergétiques au sein des couverts épars FV-13	A. Tuzet A. Perrier J.F. Castell O. Zurfluh
INRA 17août- 22 septembre	Estimation de l'évaporation à l'échelle régionale par les micro-ondes passives. RS-06	A. Chanzy J.C. Gaudu
LERTS 10 aout - 10 octobre	Estimation de l'humidité des sols par les micro-ondes passives RS-13	Y. Kerr A.Chanzy R. Laguerre
GSTS /Institut de Géologie	Cartographie des fracturations RS-17	J.C. Pion
LSIT / GSTS 20 août-30septembre	Analyse de la température radiative des surfaces par imagerie infrarouge RS-24	M.P. Stoll F. Nerry K. Noaga J. Labed Z. Liang
Université de Maryland ?	Estimation du PAR absorbé et de la réflectance par spectromètre aéroporté RS-26	Ch. Walthall J. Irons R.N. Halthore

Description du site central est de Banizoumbou.

Le supersite centrale est (SSCE) est situé à 65 km à l'est de Niamey, dans le périmètre 13°29,21-2°36,77; 13°29,21-2°47,88; 13°40-2°36-77; 13°40- 2°47,88 dont la partie centrale est constituée par le bassin versant de Sama Dey. Ce bassin comprend un système hydrologique temporaire (un kori) 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 basfond par des versants sableux provenant de l'accumulation éolienne d'origine saharienne. Les caractéristiques des pentes sont fonction de la provenance des vents transporteurs. La superficie du site est généralement couverte d'une végétation arbustive dominante (*Gutera seng.*) éparse, associée à une strate herbacée annuelle (graminéenne ou non). La densité du couvert végétal dépend des zones d'accumulations des eaux.

Plusieurs stations ont été sélectionnées et instrumentées pour l'ensemble des mesures au sol : (voir carte)

- 2 sur parcelles cultivées dans la partie centrale (1 - 2)
- 3 sur parcelle dans une zone de savane arbustive (3 - 4 - 5)
- une parcelle aménagée sur un large versant (6)
- une parcelle sur le plateau (7)

En outre, le bassin a été instrumenté pour l'hydrologie de surface comprenant des dispositifs de mesures pour les écoulements-ruissellements et un transect plateau-bas-fond pour l'évaluation du stockage hydrique sur l'ensemble du bassin.

Les mesures des flux, mesures aéroportées, même réalisées sur une grande échelle, nous intéressent et sont incluses dans ce rapport.

Dispositif expérimental

Précipitation : (Taupin - Orstom)

L'étude pluviométrique sur le site central ne constitue qu'une partie du projet d'EPSAT-NIGER. Le dispositif global assure la couverture de la zone d'expérience d'HAPEX-Sahel et constitue les données d'entrée des modèles hydrologiques. Cette expérience a pour but d'améliorer les connaissances sur les systèmes précipitants en Afrique sahélienne et de trouver des algorithmes de passage entre pluie au sol et données radar.

Moyens

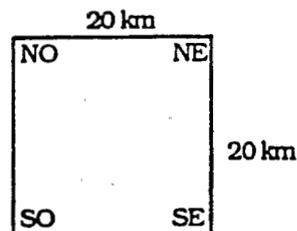
18 pluviographes ELSYDE à augets basculeurs disposés à 1,50m de la surface (plus 1 pluviographe au sol) ont été installés. La surface des bagues est égale à 400 cm², un basculement correspondant à 0,5 mm. Chaque basculement est enregistré sur une mémoire statique par l'intermédiaire de contacts à mercure. La pluie est recueillie dans une dame-jeanne enterrée et une vérification avec le nombre de basculement est effectuée tous les 10 jours, avec un réétalonnage de l'appareil si nécessaire.

9 pluviomètres à lecture directe (bague 400 cm²) ont été disposés pour des besoins plus particuliers, ils sont relevés tous les matins à 7h00.

HAPEX-Sahel

SUPER SITE CENTRAL DE BANIZOUMBOU

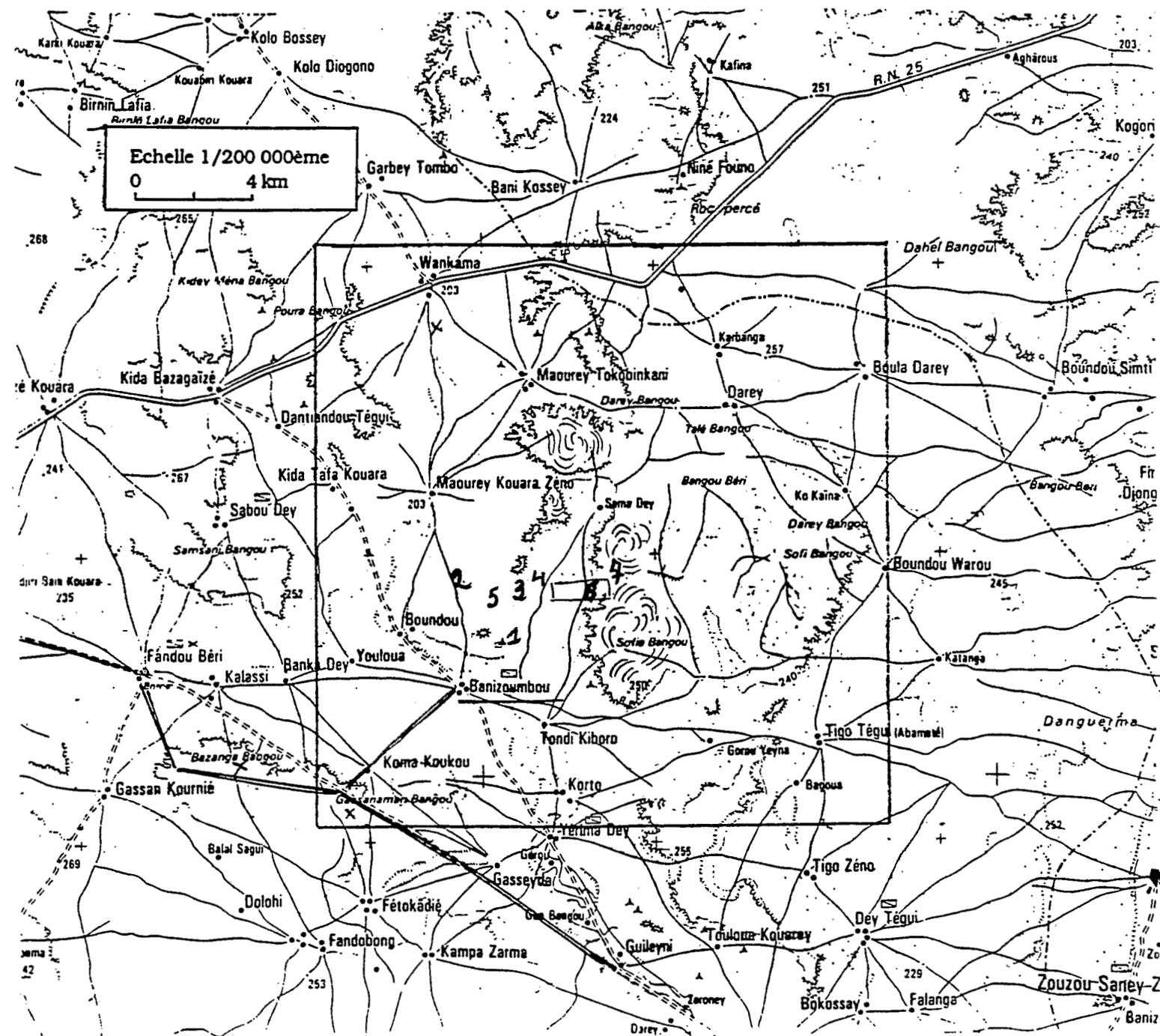
position	Latitude	Longitude	X	Y
SO	13°29,21'	2°36,77'	68,16	54,13
SE	13°29,21'	2°47,88'	88,16	54,13
NO	13°40'	2°36,77'	66,16	74,13
NE	13°40'	2°47,88'	88,16	74,13



(Lat.Lon) : coordonnées en degré, et minute décimale
(X,Y) : coordonnées en km, origine (2°E,13°N)

Scène SPOT n°062-323

Photos aériennes série 1975 NIC40 600 : 2688 à 2684, et 2764 à 2769



Coordonnées des stations pluviographiques
et période de fonctionnement

Lat. et Long. en degrés, minutes et centièmes de minutes;
X Y coordonnées dans le degré carré (origine du repère 2 E, 13N):

Nom	Identification	Lat.	Long.	X	Y	N° EPSAT
Banizoumbou	1321201100	13 31 97	02 39 62	71.34	59.25	11
Darey	1321201800	13 38 20	02 44 53	80.14	70.80	18
Darey Bangou	1321211500	13 37 72	02 42 87	77.16	69.91	115
Kokaina	1321211400	13 36 04	02 45 73	82.31	66.79	114
Komakoukou	1321200600	13 29 89	02 37 74	67.96	55.40	6
Korto	1321211100	13 30 82	02 42 51	76.55	57.12	111
SDC1 Sofia B.	1321209300	13 32 44	02 42 64	76.77	60.12	93
SDC2 Jupe	1321209500	13 32 84	02 41 97	75.56	60.86	95
SDC3	1321209600	13 33 50	02 42 41	76.35	62.09	96
SDC4	1321209700	13 33 09	02 43 05	77.51	61.33	97
SD Exutoire	1321210100	13 32 72	02 41 36	74.47	60.64	101
SD Plateau 1 S.	1321210000	13 31 85	02 42 76	76.99	59.03	100
SD Plateau 2 N.	1321209900	13 33 19	02 43 67	78.62	61.51	99
SD Rive droite	1321209200	13 33 31	02 40 99	73.80	61.73	92
SD Rive gauche	1321209800	13 34 10	02 42 25	76.06	63.20	98
SD Village	1321210200	13 34 85	02 41 66	74.99	64.59	102
Tigo Tegui	1321211200	13 31 17	02 47 10	84.81	57.77	112
Wankama	1321211600	13 39 00	02 38 91	70.02	72.28	116

Estimation des incertitudes pour les relevés NAVSTAR

Lat. 0.056' --> $0.056 \cdot 100/54 = 0.1$ km

Long. 0.171' --> $0.171 \cdot 108/60 = 0.3$ km

Pour le GPS : 36 mètres en X et Y pour une seule lecture

Coordonnées des stations pluviométriques et
périodes de fonctionnement

Lat. et Long. en degrés, minutes et centièmes de minutes;

Nom	Lat.	Long.
P1	13 33 42	02 40 89
P2	13 32 58	02 40 58
P3	13 32 78	02 41 78
P4	13 32 91	02 41 91
P5	13 32 82	02 41 82
P6	13 32 94	02 42 94
P7	13 32 80	02 42 97
P8	13 33 43	02 41 18
P9	13 31 97	02 39 62

Stockage des données de base

Sous forme de fichier "nom de station.TXT" : cumul de pluie équivalent auget au pas de temps de 5 min. pour les données pluviographiques.

Sous forme de sortie imprimée pour les données pluviométriques pour le moment, elles pourront éventuellement être intégrées dans une base de données journalières.

La période de fonctionnement des pluviographes est présentée dans le tableau suivant.

Stations	Périodes de fonctionnement								
	Nom	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.
Banizoumbou									
Banizoumbousoll									
Darey				12					23
Darey Bangou				12					23
Kokaina		19							23
Komakoukou									23
Korto		19							29
SDC1 Sofia B.									
SDC2									
SDC3									
SDC4									
SD Exutoire									29
SD Plateau 1 S		17							16
SD Plateau 2 N		17							16
SD Rive droite									29
SD Rive gauche		17							16
SD Village									29
Tigo Tegui		19							23
Wankama	20								27

19 23 : date d'installation et d'arrêt des pluviographes
|___| : période de fonctionnement des augets sans lacune

Données élaborées

Sous forme de fichier "nom de station.TXT" : cumul de pluie au pas de temps journalier corrigé par les valeurs seaux (prise en compte de la valeur réelle de la pluie mesurée dans la dame Jeanne rapportée au nombre de basculement d'auget).

Climatologie (Monteny - Orstom; Amadou - Inran)

Parc climatique : 13°31'931N - 2°39'636E (installation janvier 1991)
comprend l'instrumentation pour la mesure des paramètres suivants :

Rg : le rayonnement global est la quantité totale d'énergie rayonnée par le soleil (rayonnement direct) + celle diffusée par les composants de l'atmosphère arrivant au sol (Rd). Il est exprimé en $Wm^{-2}(=Jm^{-2}s^{-1})$ ou en $MJm^{-2}s^{-1}$. Il est mesuré à l'aide d'un pyranomètre Kipp & Zonen, capteur à surface horizontale, noire, absorbant l'ensemble du spectre de 380 à 2800nm, installé à 2m du sol

D ou **Rd** : rayonnement diffus, fraction d'énergie provenant du ciel, est enregistré par un pyranomètre Kipp & Zonen, installé sur une surface horizontale à 2m du sol sous une bande pare-soleil interceptant le rayonnement solaire direct. Même unité que Rg.

PAR : rayonnement photosynthétiquement actif, correspond à la quantité totale d'énergie rayonnante dans la bande spectrale de 400 à 720nm, encore appelé rayonnement visible. Ce rayonnement est la fraction d'énergie la plus importante pour la biosphère, car elle intervient dans les processus de l'assimilation photosynthétique. Il est mesuré à l'aide d'un quantum sensor. Il est exprimé en $\mu\text{moles.m}^{-2}\text{j}^{-1}$ ou en $\text{MJm}^{-2}\text{j}^{-1}$.

P : précipitation, fraction d'eau liquide arrivant au sol. Enregistrée à l'aide d'un pluviographe à mémoire statique (pgr EPSAT), permettant de déterminer les diverses caractéristiques : début et fin, quantité, durée, intensité, type d'averse.....selon le type de nuages; est aussi enregistrée par un pluviomètre à lecture directe (bague 400 cm²). Exprimée en mm, elle correspond à la hauteur d'une lame d'eau : 1mm = un litre au m² .

HR : humidité relative, correspond au rapport de la tension de vapeur d'eau de l'atmosphère e_a par rapport à la tension de vapeur d'eau à saturation à la même température E_a : $\text{HR} = e_a/E_a$. Mesurée à l'aide d'un capteur capacitif Vaisala, installé dans un abri climatique à 2m du sol, le protégeant du rayonnement.

T_a : température de l'air, mesurée par un thermocouple cuivre-constantan positionné près du capteur capacitif Vaisala, dans l'abri. Exprimé en °C.

T sol-2 : température à 2 cm sous la surface du sol (couvert herbacé), mesurée par un thermocouple cuivre-constantan. Exprimée en °C.

V : vitesse du vent, mesurée à 2m du sol à l'aide d'un anémomètre à pulsion (modèle Vector), nécessite une alimentation électrique continue. Exprimée en m.s^{-1} ou km.j^{-1} .

dir : direction du vent, mesurée à 2m du sol à l'aide d'une girouette potentiométrique (modèle Vector), alimentée en courant continu, exprimée en degré par rapport à la position nord.

L'alimentation des divers capteurs est assurée par une batterie de 12V - 35Ah, maintenue en charge par un panneau solaire de 10W.

La scrutation de chaque capteur est réalisée toutes les 60 secondes, les valeurs moyennes horaires sont calculées et stockées (24h sur 24). Durant la POI, la scrutation de chaque capteur est de 10 sec, la valeur moyenne calculée toutes les 10 minutes est stockée.

L'enregistrement des données climatiques et les calculs sont réalisés à l'aide d'une acquisition Campbell CR10, régulièrement relevée au moyen d'un PC portable. Les données sont vérifiées et mises sous forme de tableaux.

Le fonctionnement correct des appareils est comparé aux instruments références étalonnés et gardés au laboratoire.

Instrument	Paramètres	Résolution	Type de données
Pyrradiomètre "Kipp & Zonen"	rayonnements	1 sec	mesure
	- global - diffus	1 sec	mesure
Quantum sensor "Campbell"	rayonnement PAR	1 sec	mesure
Vitesse du vent "Vector Instr."	vitesse vent (2m)	1 sec	mesure
Origine du vent "Vector Instr."	direction (2m)	1sec	mesure
Thermocouple blindé	Température du sol (- 3cm)	1 sec	mesure
Hygrothermomètre "Vaisala"	humidité (2m)	1 sec	mesure
	température (2m)	1 sec	mesure
pluviomètre lecture directe	précipitation	journalier	mesure
	Evaporation standard Eo	1 heure	calcul
	Evapotranspiration Penman ETP	1 heure	calcul
	rapport diffus/global	1 heure	calcul
	rapport Par / global	1 heure	calcul
	I.sinh	1 heure	calcul

Calcul de l'évaporation d'équilibre ETo et de l'ETjournalière par la formule climatique de Penman

$$ETp = ETo + Ea$$

$$ETp = \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] \cdot 0,72 Rg/L + 0,26 \cdot \left[\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right] \cdot (1 + 0,54 V)(ETa - ea)$$

mm/24h

Stockage des données de base

Il existe des tableaux horaires, journaliers et mensuels fournissant les valeurs des paramètres climatiques depuis 1991. Les tableaux sont sous forme de fichiers : BC9201 H/J : valeurs horaires de la semaine
 exemples : BANI92mois : valeurs journalières du mois
 : CLIMBANI92 : valeurs mensuelles année 1992

Station météorologique (Bessemoulin et al. - CNRM)(installation dans la savane à *Guiera* du 23.07 - 30.10.92)

La station comprend un mât sur lequel sont fixés les divers capteurs et au sol un abri avec l'acquisition + émetteur alimentés par une batterie et panneau solaire. (13°33,48N - 2°40,94E) (n°3 carte)

Instrument	Paramètres *	type de données
pyrradiomètre Schenck 8111 (0,3 à 60 nm)	rayonnement solaire global et atmosphérique : (2 m) rayonnement réfléchi et tellurique : (2 m)	mesure mesure
Young wind monitor AQ	vitesse du vent (10m) et direction (10m)	mesure mesure
ATR DR2A	pression atmosphérique capteur dans l'abri (0,6 cm)	mesure
PT1000	température de l'air (2 m)	mesure
Vaisala HMP35A	Humidité de l'air (2 m)	mesure
Weathermeasure tipping bucket	précipitation (au sol)	mesure
sigma T	flux chaleur sensible (8m)	mesure

* sortie intégrée toutes les 10 minutes et envoyée aux récepteurs

Hydrologie

La contribution du groupe "Hydrologie et humidité du sol" concerne le suivi et la quantification des flux de surface (infiltration, ruissellement, évapotranspiration) afin de modéliser les bilans hydriques et thermiques sur le degré carré. L'étendue même de la zone d'étude implique un travail à différentes échelles, pour estimer des processus extrêmement variables dans l'espace et le temps, dont la mesure *in situ* est pratiquement ponctuelle et la mesure par télédétection intégratrice mais indirecte.

Différentes techniques sont utilisées, du ponctuel à l'intégratrice spatiale, et nécessitent dès lors la mise en commun des compétences des diverses équipes.

Hydrologie de surface (Estèves - Orstom)

Les objectifs de cette opération de recherche portent essentiellement sur :

- l'observation des processus de redistribution des eaux des précipitations,
- la caractérisation des mécanismes de transferts à la surface du sol, et des unités hydrologiques;
- l'estimation de la contribution des systèmes endoréiques à la recharge des aquifères
- l'élaboration d'un modèle conceptuel du fonctionnement hydrologique.

Méthode utilisée

L'identification des unités hydrologiques élémentaires est obtenue par le traitement des informations caractérisant le milieu (topographie, sols, états de surface, végétation...) à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). La caractérisation et la quantification des divers processus hydrologiques (humidité sol, évaporation, ruissellement...) fait appel aux données obtenues par les différents intervenants.

Les bilans hydrologiques seront établis pour diverses unités spatiales : micro-bassin versant = 7 à 24 ha
 petit bassin = massi Koubou : 1,1 km²
 Banizoumbou : 8.1 km²
 Sama Dey : 8 km²
 Banizoumbou exutoire : 15.4 km²

Une modélisation des processus permettra de tester les hypothèses de fonctionnement. Après validation à l'échelle des microbassins, le modèle doit être testé pour une transposition à plus grande échelle.

Dispositif expérimental

Les débits à l'exutoire des bassins sont obtenus par la mesure en continu des hauteurs d'eau à l'aide de limnigraphes électroniques, basés sur le principe de jauge piézo-résistive (modèle Chloe + mémoire statique amovible), et par la mesure des débits pendant les crues aux 6 stations limnigraphiques des bassins de Banizoumbou à l'aide de moulinets hydrométriques (jaugeage au point par point). L'étalonnage du matériel utilisé a été réalisé en fin de campagne.

Coordonnées des stations limnigraphiques

Stations	latitude	longitude	date		nb de jaugeages
			implantation	mesures	
Banizoumbou A	13°3252N	2°4200E	92.03.31	03.31-10.15	105
Banizoumbou B*	13°3254N	2°4152E	92.03.31	03.31-10.15	133
Banizoumbou C	13°3255N	2°4144E	92.04.08	04.08-10.15	56
Banizoumbou D	13°3249N	2°4145E	92.03.31	03.31-10.15	69
Bani amont	13°3214N	2°4103E	92.04.02	04.02-10.15	28
Bani exutoire	13°3214N	2°4032E	92.03.31	04.31-10.15	54
Sama Dey	13°3507N	2°4234E	92.07.29	07.29-09.16	?
Massi Koubou	13°5019N	2°2432E	92.04.09	04.09-10.20	?

* valeurs reconstituées en grande partie pour cette station

La transformation des hauteurs d'eau (enregistrées en continu) en débits est obtenue à l'aide des courbes de tarage des stations hydrométriques. Le dispositif expérimental restera en place jusqu'à la fin de la saison des pluies 94.

16

vers Sofia Bangou - aérodrôme



HAPEX-SAHEL

SUPER-SITE CENTRAL EST
Zone d'études hydro-éco-pédologiques

échelle approximative : 1/8000

brousse tigrée

bord de plateau

Légende

(site; responsable)

-  cabane hydrologie
-  campement peuhl
-  station de jaugeage; M. Esteves
-  pluviographe EPSAT; J.D.Taupin
-  pluviomètre
-  fosse pédologique; J.L. Rajot
-  écotone; J. Séghiéri
-  essais agronomiques; A. de Row
-  essais agronomiques; INRAN
-  parcelle de ruissellement; C. Peugeot
-  tube sonde à neutrons; S. Galle
-  mât micrométéo; B. Monteny

jupe sableuse

vers Sama Dey

piste bleu-rouge

vers Banizombou

ourlet

P4
PR

PR

FP

PR

FP

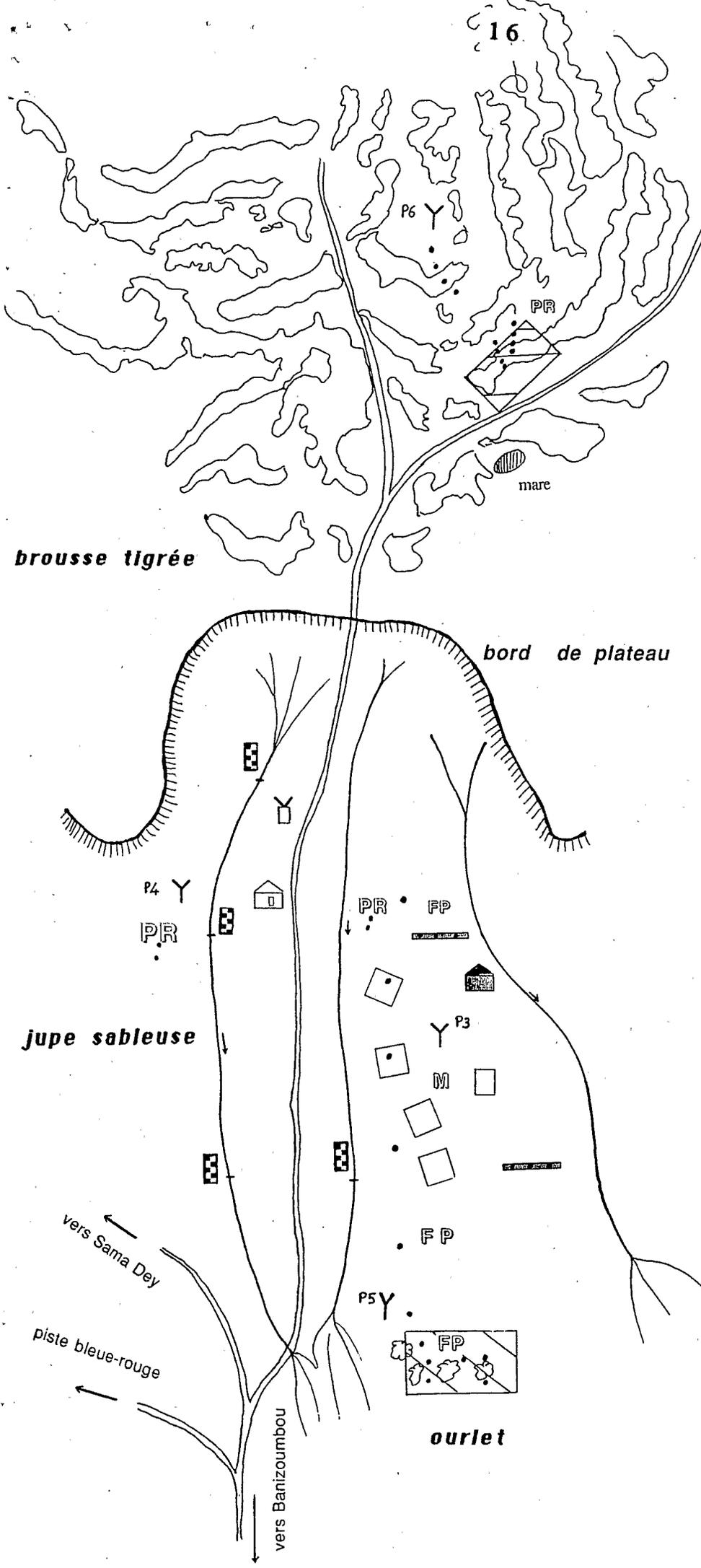
FP

P5

Y

FP

mare



Hydrodynamique dans le sol (Vauclin LTHE-IMG)

Les objectifs de l'étude du suivi de l'hydrodynamique dans le sol dans la phase de déséquilibre entre la demande évaporative de l'atmosphère et l'évapotranspiration des couverts végétaux est :

- d'une part d'établir une modélisation mécaniste des transferts
- et d'autre part d'évaluer des modélisations des flux de surface à différentes échelles spatio-temporelles.

Le but de l'opération de recherche vise à la caractérisation hydrodynamique des couches superficielles du sol dans la répartition de la pluie entre infiltration et ruissellement.

Méthode utilisée

Basée sur la métrologie "Triple Ring Infiltrometers at Multiple Suctions" (TRIMS) elle permet la détermination *in situ* de 2 paramètres contrôlant le processus d'infiltration : conductivité hydraulique et la sorptivité capillaire en fonction de l'état de saturation du sol. Leur connaissance permet d'obtenir d'autres variables comme la dimension caractéristique de pores hydrauliquement fonctionnels et le temps d'apparition de la saturation du sol. En raison de la présence de croûtes sur les sols sahéliens, d'épaisseurs millimétriques et de très faible perméabilité, l'utilisation de cette technique est rendue plus délicate. Une modélisation numérique du système physique (écoulement tridimensionnel en milieu stratifié) aidera à l'analyse et l'interprétation des données *in situ*.

Dispositif expérimental

Des mesures intensives ont été réalisées avec la méthode TRIMS avec des disques de 250, 80 et 48,5mm et 3 pressions (-100,-50,-10 mm d'eau) sur différentes surfaces de sol avec croûte et après décapage durant toute la période d'observation intensive :

- plateau à végétation de brousse tigrée
- jupe sableuse (surface cultivée en mil et jachère)
- WAB de mil bas fond
- WAB savane à *Guiera*
- ourlet et chanfrein

en relation avec une typologie des états de surface établie avec C. Valentin.

Selon les conditions de la surface du sol, des échantillons ont été prélevés pour la mesure des humidités initiale et finale. Parmi ceux-ci certains ont été conservés pour la détermination des courbes granulométriques afin de valider un modèle fractal d'estimation des propriétés hydrodynamiques.

Plusieurs jours d'expérimentation ont été réalisés en commun avec J.C.Fies (Inra-Sciences du Sol) afin de comparer cette technique avec celle de la "tache saturée" pour inférer la conductivité hydraulique à saturation des croûtes.

Hydrodynamique de surface (Peugeot et Rajot- Orstom)

A. Etude de l'influence des croûtes superficielles sur le ruissellement à l'échelle d'une parcelle.

Dispositif expérimental

Des mesures des volumes d'eau ruisselés et des pertes en sol après chaque événement pluvieux ont été réalisées sur 3 surfaces géomorphologiques représentatives. La parcelle de ruissellement est une zone rectangulaire de 5m de largeur (environ 100 m²), délimitée par une tôle de 10cm enfoncée dans le sol, avec un collecteur en aval, complété avec un système de piégeage à sédiments, une cuve 1m³ équipée d'un partiteur au dixième et une seconde cuve recevant les volumes excédentaires. Un suivi de l'humidité du sol est réalisé à l'aide d'une sonde à neutrons. Un pluviomètre est situé à proximité de chaque parcelle : Px ?; Py ? et Pz ?.

pluies suivies : juin : 29
 juillet : 11; 13; 17; 22; 27; 31;
 août : 8; 10; 11; 16; 21; 22; 24; 25; 28; 29; 31;
 septembre : 6; 11; 14;

site	pente	pluies suivies	sondes		etat de surface
			nb	prof	
mil sur jupe sable	4,5%	toutes sauf 9.6 et 9.11	2	3,40m	mil semé 7.2
savane arbustive	5,2%	toutes	2	3,40m	guiera sen. zornia
brousse tigrée (sol nu)	0,2%	toutes sauf 6.29; 7.31 8.21; 8.28 9.06; 9.11	3	3,40m	sol nu

B. Etude de l'évolution dynamique des associations buttes sableuses-croûtes d'érosion suivant le ruissellement et les pertes en terre en relation avec les conditions climatiques et hydriques.

Dispositif expérimental

Ces mêmes stations sont équipées de rails surélevés pour permettre la cartographie des états de surface et les mesures d'humidité sans perturber les organisation superficielles du sol. 2 pluviomètres complètent le dispositif. Les stations str2 et str4 sont équipées de 4 tubes d'accès de sonde à neutron implanté sur chacun des états de surface caractéristique de ces structures : croûte d'érosion et croûte structurale ou éolienne.

stations 30m ²	tube-profond.	date des relevés cartographie			
dunette 13°32'89N 02°42'97E					
str1			mai 92	19 août 92	nov. 92
str2 A.....	08.21	2m	16 mai 92	14 août 92	nov. 92
B	08.21	2m			
chanfrein 13°33'36N 02°41'21E					
str3			mai 92	19 août 92	nov. 92
str4 A.....	08.21	4m	18 mai 92	19 août 92	nov. 92
B	08.21	4m			

Les mesures de ruissellement et de perte en terre sont réalisées avec des fûts équipés de partiteurs et de piège à sable, dispositif fonctionnant depuis le 16 juin 92. Les pluies ayant ruisselé sont :

stations	juin 92	juillet	août 92	septembre
str2		13	08	
str2 + str4	07/30	18/22/27/31	16/21/22/24/ 25/28+29/30	06/11/14
str4		11		

(cf rapports de C.Peugeot et J.L.Rajot : "Détermination du coefficient de ruissellement" et "Dynamique des associations buttes sableuse / croûte d'érosion au cours de l'année").

Humidités de surface (Chanzy-Inra; Chebouni et Galle-Orstom; Laguerre-Lerts)

Le but est d'évaluer à l'échelle d'une région les possibilités de la radiométrie microonde pour l'estimation de l'évaporation d'une surface sol-végétation. Ce travail comprend 2 parties :

- analyse de la signification physique de la température de brillance microonde en étudiant l'influence de l'humidité de surface, la rugosité, la température et la végétation;
- modélisation de l'évaporation avec l'intégration des données issues de la radiométrie microonde dans les modèles.

La caractérisation de l'humidité de la surface du sol selon les mesures de télédétection microonde (voir § "Caractérisation des microondes émises par le système sol-végétation) permettrait de déterminer la relation probable entre cette variable humidité de surface et le flux d'évaporation compte tenu de l'évolution temporelle du système sol-végétation.

Dispositif expérimental

Ont été retenues 4 stations où interviennent d'autres équipes (notamment avec mesure de l'Evaporation) : la jupe sableuse, les WABs de

surface aménagée (culture de mil) et de savane à *Guiera* (jachère) et WAB complémentaire de savane sur lesquelles les mesures ont été réalisées durant la période du 23 août au 18 septembre :

* 15 profils gravimétriques réalisés selon un transect à des profondeurs de 0-0,5cm; 0,5-2cm; 5-10cm et 10-15cm et 20 à 60 mesures de TDR à l'aide de TRASE (soil moisture equipment) afin de déterminer l'humidité de surface des 15 premiers centimètres du sol.

* 10 profils de mesures de densités apparente du sol par station sont faits avec une sonde à transmission gamma LSPC (2,5; 5; 7,5; 10; 12,5; 15; et 17,5 cm) pour déterminer l'humidité volumique à partir des données gravimétriques.

Un suivi régulier de l'humidité de surface a été réalisé avec le TDR durant toute la période d'observation intensive. Par ailleurs, un aspérimètre à aiguilles a permis la mesure de la rugosité du sol sur une longueur de 10m sur la station WAB savane à *Guiera* et le plateau à brousse tigrée (sol nu).

Lors des passages avion et du satellite ERS.1 (92.08.09; 92.09.13 et 92.10.17) les mesures gravimétriques ont été couplées aux mesures de TDR sur chaque parcelle.

Fonctionnement hydrodynamique du bassin versant

(Galle-Orstom)

Il a pour but d'étudier le fonctionnement hydrodynamique des sols dans une optique hydrologique, c'est-à-dire l'influence de l'état hydrique d'un bassin versant (du type Sama Dey et de Wankama) sur sa réponse à une pluie. Cette échelle le distingue des programmes des autres équipes qui travaillent également sur le site central, mais à une échelle locale soit à caractère agronomique (IRI, INRAN) soit à caractère plus physique (IMG-LTHE, INRA).

Méthode utilisée

La dimension du bassin (une quinzaine de km²) ne permet pas une mesure exhaustive des flux. Les facteurs influençant le comportement hydrodynamique sont connus : état de surface, couverture végétale, et position dans le paysage notamment. Ils sont étudiés séparément, afin de quantifier leur influence respective pour l'étendre ensuite sur l'ensemble du bassin versant.

1- Suivi du bilan hydrique sous différentes végétations

(Sicot-IRI; Gandha-INRAN; Galle-Orstom)

Ses trois principaux couverts végétaux couvrant l'aire du supersite est (surface cultivée en mil, surface en savane arbustive et surface de plateau avec la végétation arbustive naturelle dite brousse tigrée) couvrant chacune 10 hectares environ, le stock hydrique moyen (S) et le drainage (D) sont mesurés par les méthodes neutroniques et tensiométriques, à un pas de temps qui est fonction du forçage atmosphérique. Sur chacune de ces parcelles (excepté la brousse tigrée), l'évapotranspiration (E) est

calculée par les micrométéorologues par la méthode du rapport de Bowen, et la pluie (P) par les hydrologues à l'aide du réseau EPSAT (pluviographes enregistreurs) et de pluviomètres. Le ruissellement local (R) et le transport solide associé sont mesurés sur des parcelles de ruissellement situées en des sites caractéristiques des états de surface du bassin. Les différents termes du bilan sont ainsi suivis :

$$P = E + R + DS + D.$$

Ce suivi fait l'objet d'une collaboration avec l'IRI et l'INRAN pour les parcelles de mil et de la savane à *Gutera*. Le suivi de la brousse tigrée est assuré par l'Orstom.

2- Redistribution de l'eau sur une toposéquence

L'étude du rôle de la topographie dans le bilan hydrique nécessite l'évaluation de la redistribution de l'eau sur le versant par les transferts latéraux et les échanges avec la nappe dans le bas fond. Dans ce but, l'état hydrique, la tension matricielle et le ruissellement le long de toposéquences qui comprennent la succession sont déterminés sur le plateau, la jupe sableuse, les bombements et le bas fond, caractéristiques de la morphologie du degré carré.

Les mesures de ruissellement dans les ravines et koris sont assurées par le groupe hydrologie et celle de l'évapotranspiration par les micrométéorologues.

L'étude de l'influence des croûtes superficielles sur l'hydrodynamique d'un versant, et notamment sur l'évaporation et le ruissellement, est réalisée conjointement avec le LTHE. L'INRAN est associé sur l'étude hydrodynamique de la jupe sableuse, principal lieu de culture de mil au Niger.

La redistribution de l'eau et son rôle sont également suivis sur un bassin versant endoréique: la mare de Wankama. (J.C. Desconnets)

3- Extension spatiale des mesures au sol et modélisation

Téledétection micro-onde

Les radiomètres micro-onde, sensibles à la constante diélectrique du sol, permettent d'estimer l'humidité volumique des premiers centimètres du sol. Ils sont utilisés après calibration pour estimer l'état hydrique superficiel sur l'ensemble du bassin versant. Les données sont fournies durant la POI par les 2 radiomètres micro-onde passifs (PORTOS sur l'ARAT, et PBMR sur le C-130 de la NASA). Et par le SAR du satellite ERS.1 de juillet à octobre 1992. (cf. § Humidité de surface et § micro-ondes émises par le système sol-végétation).

Modélisation

Deux types de modélisation seront testés, l'un physique, utilisant les relations observées à l'échelle locale entre l'état hydrique et les paramètres physiques, l'autre conceptuel simplifié, utilisant l'hypothèse de stabilité temporelle, c'est-à-dire la persistance des contrastes entre zones humides et zones sèches au cours du temps. L'état hydrique

instantané, interpolé sur l'ensemble du bassin, sera confronté aux données de télédétection pour les dates disponibles.

Les résultats obtenus par chacune des méthodes seront comparés aux mesures hydrologiques (ruissellement dans le cas du bassin de Sama Dey, et hauteur de mare pour Wankama), intégratrices des processus se déroulant sur un bassin versant.

INSTRUMENTATION

1. Calendrier

L'étude hydrodynamique du bassin versant de Sama Dey nécessite un suivi dont la fréquence dépend des pluies et qui comprend l'ensemble du cycle saisonnier, y compris la saison sèche (observations à long terme). Ce suivi long terme s'étale sur trois ans, encadrant la POI :

1991 : année préparatoire à la POI, permettant de tester le protocole expérimental et de mettre en place les installations pour qu'elles soient bien stabilisées pour la saison pluvieuse 1992.

1992 : fin des installations. Suivi long terme à l'aide du dispositif complet.
POI : 17 Août - 10 octobre 1992 avec dispositif au sol et les moyens de télédétection aéroportés.

1993 : suivi d'une troisième saison pluvieuse.

2. Matériel disponible

1991	1992	1993
1 sonde Solo-25 (n°36)	3 sondes Solo-25S	idem que 92
1 sonde gamma Solo-40	(n°40,41,46)	
1000 boîtes (315 ml)	1 sonde gamma Solo-40	
2 tarrières à main (4m)	1 sonde TDR (Soil moisture)	
cylindres calibrés pour densimétrie	1 balance Satorius	
	1000 boîtes (315 ml)	
	tensiomètres à bougie poreuse	
	tensiomètres à capteur de pression DTE 1000	
	séries de 10 tensiomètres à mercure DTM5000	
	1 compresseur 120l/s XA120DD	
	chariot de forage CFL61	

3- dispositif expérimental

dans les WAB (Sicot, IRI, Fac des Sciences, Niamey)

2 stations ont été équipées en 1991 selon le protocole suivant : au cours de l'hivernage 1991, 3 prélèvements d'échantillon ont été réalisés, en début, mi-saison et fin de saison, à l'aide de tarrière, tous les 50m d'un carré de 250 x250m. Un prélèvement de sol dans le profil était fait tous les 10cm le premier mètre et tous les 25cm jusqu'à la roche

mère. Le choix de l'implantation des tubes résulte de la distribution en eau dans le sol et qui conduit à l'installation de 3 ou 4 tubes à chaque fois.

En fin d'année 1991, le dispositif stationnel comprenait 11 tubes à sonde à neutrons, et à chaque tube 2 tensiomètres à bougie poreuse et à capteur de pression installés à 200 et 250 cm de profondeur pour encadrer une limite de drainage à 225 cm.

Une batterie de 10 tensiomètres à mercure complétait le dispositif avec un capteur à 5,10,40,65,90,115,140,190,220 et 240 cm de profondeur.

Un catalogue des mesures effectuées se trouve en fin de ce paragraphe.

sur brousse tigrée (Galle-Orstom)

Situé sur le plateau latéritique de Sama Dey, le site de brousse tigrée présente une très faible pente (0,2%). Les arcs de végétation de largeur 15-20 m alternent avec des bandes nues de 50-55 m. La végétation peut atteindre 6 m de haut. Le site est suivi à l'aide de trois transects. Chaque transect, composé de plusieurs tubes de sonde, coupe une bande nue et un arc de végétation.

Un appareil de forage léger (Cobra driller) a été testé en 1991 sur plateau cuirassé, permettant d'implanter 4 tubes à un mètre, profondeur à laquelle on atteint un premier niveau cuirassé, mais qui n'englobe pas le volume racinaire. Un deuxième appareil, plus puissant (Atlas Copco), a été acquis en 1992 pour forer des trous allant jusqu'à 4 m sur le sol nu, et 6m dans la bande de végétation. Les échantillons de sol prélevés lors du forage des trous sont analysés à Cadarache (France) pour en déterminer les caractéristiques nécessaires à l'étalonnage neutronique.

Un des transects est situé dans une parcelle de ruissellement pour quantifier le volume de ruissellement généré sur la bande nue.

sur la toposéquence (Galle, Orstom)

* une jupe sableuse plantée en mil, située en rive gauche et bordée par une ravine alimentée par le plateau de Sofia Bangou (le débit de cette ravine est suivi par les hydrologues). L'évapotranspiration y est mesurée par le rapport de Bowen.

* une dépression locale ou "ourlet" où l'eau des ravines venant du plateau vient s'épandre et peut former une mare provisoire après une forte pluie. La végétation de la dépression, bien alimentée en eau, est verte et haute, avec de nombreux arbres, et ressort nettement sur les photos aérienne ou les images SPOT. Ce type de dépression se retrouve couramment sur une ligne parallèle au plateau.

* le bas fond constitué de deux zones : une succession de cellules convexes limitées par des fourrés plus ou moins denses, dont l'organisation topographique est nettement moins évidente (déterminées par l'affleurement local d'un niveau induré), et une zone fortement dégradée, ou chanfrein, en bordure du lit principal (situé en rive droite contrairement au reste de la toposéquence)

sur la mare de Wankama (Desconnets-Orstom)

Le programme mare du volet hydrologique a pour objectif l'étude du bilan hydrologique des mares en région sahélienne, en fonction de leur typologie. Il est assuré par l'Orstom.

La mare de Wankama est instrumentée en vue de ce programme : située dans l'ancien lit du kori de Dantiandou, c'est une zone encaissée de vallée sableuse. Le bassin versant a une superficie de 84 ha, la mare a une surface maximale de 2 ha.

La hauteur d'eau de la mare est suivie par un limnigraphe automatique. Un transect de 4 tubes permet de suivre l'état hydrique du bassin d'alimentation de la zone endoréique et son influence sur le ruissellement.

Etat de surface

Afin de quantifier l'influence de l'état de surface sur la genèse du ruissellement, le stock hydrique est suivi sur 4 parcelles de ruissellement représentant des états de surface contrastés : une dune de plateau érodée, une jupe sableuse dégradée (jachère) et une jupe sableuse cultivée. (Le dispositif est le même que celui des parcelles de ruissellement implantées sur brousse tigrée et sur chanfrein dégradé cf. § Hydrodynamique de surface).

Description des instrumentations

Les instrumentations mises en place et suivies régulièrement par le groupe humidité des sols de l'ORSTOM du 1/8/91 au 30/11/92 sont décrites dans le tableau suivant.

Mesures neutroniques

Principe

La sonde à neutrons émet des neutrons rapides qui sont ralentis par le choc avec les atomes d'hydrogène (ie: les molécules d'eau) contenues dans le sol. Un détecteur compte le nombre de neutrons lents. Ce nombre est fonction à la fois, des caractéristiques de la sonde à neutrons (source, âge, sensibilité du compteur), et du contenu en eau volumique du sol (eau libre et eau liée). La quantité d'eau liée contenue dans un sol est fonction de sa structure. Un étalonnage est nécessaire pour chaque sonde et pour chaque type de sol. La relation liant le comptage à l'humidité volumique est linéaire.

Fréquence des mesures

Les mesures sont faites en fonction de la pluie. Le suivi des profils tensiométriques et neutroniques se fait les jours suivants:

Evénement pluvieux:	J
Le jour suivant:	J + 1
Le deuxième jour suivant:	J + 2
Le quatrième jour suivant:	J + 4
Le septième jour suivant:	J + 7
Le onzième jour suivant:	J + 11
Le quinzième jour suivant:	J + 15
puis toutes les semaines en saison des pluies	
tous les 15 jours puis tous les mois en saison sèche	

Légende du tableau :

Tube : 40 tubes en aluminium, bouchés de façon étanche au fond et de profondeur variable, destinés aux mesures de sonde à neutron ou gammamétriques sont implantés sur les sites décrits ci-dessus du bassin versant de Sama Dey. Leur implantation s'étend du 31/7/91 au 21/8/92.

Tensio : batterie de 10 tensiomètres à mercure.

PR : parcelle de ruissellement de 20mx5m = 100 m².

Ecotone : zone de transition écologique où les espèces végétales et leur phénologie sont suivis régulièrement durant la saison des pluies (suivi assuré par J.Seghieri en 1992).

Station	n° tube	profondeur (cm)	début des mesures	date fin	mesures complément.
Jupe sableuse + culture de mil	J1	340	31/7/91	-	10 tensio
	J1A	340	25/8/92	-	PR
	J1B	340	25/8/92	-	PR
	J2	340	31/7/91	-	
	J3	340	31/7/91	-	
	J4	340	31/7/91	-	10 tensio
	J4bis	340	5/6/92	-	
	J5	340	31/7/91	-	
	J6	340	31/7/91	-	
Ourlet végétation arbustive	J7	340	31/7/91	-	10 tensio
	J8	630	19/8/92	-	Ecotone
	J18	340	10/8/92	-	Ecotone
	J28	200 / 600	10/8/92	-	Ecotone
Bas fond	J101	130	19/8/92	-	
	J102	100	19/8/92	-	
	J103	640	19/8/92	-	
Chanfrein	STR4 A	340	21/8/92	-	PR
	STR4 B	340	21/8/92	-	PR
Kori	K01	440	27/8/92	-	Ecotone
Brousse Tigrée	BT1	80	6/8/91	-	
	BT2	90	6/8/91	-	
	BT3	110	6/8/91	-	
	BT4	90	6/8/91	-	
	BT11	340	13/7/92	-	
	BT12	340	13/7/92	-	
	BT13	340	13/7/92	-	
	BT14	340	13/7/92	-	
	BT15	580	21/7/92	-	
	BT21	340	15/7/92	-	
	BT22	340	23/7/92	-	PR
	BT23	340	19/7/92	-	PR
	BT24	340	19/7/92	-	PR
	Wankama	W1	340	2/9/91	17/7/92
W2		340 / 160	2/9/91	-	
W3		340	2/9/91	-	
W4		340	2/9/91	12/12/91	
Dunette	STR2 A	180	21/8/92	-	PR
	STR2 B	180	21/8/92	-	PR
Jupe raccordée	JAC A	340	21/8/92	-	PR
	JAC B	340	21/8/92	-	PR

Advenant le cas où une pluie s'inscrirait à l'intérieur de ce suivi, ce nouvel événement devra être considéré comme étant le jour J. Est considéré comme événement pluvieux une précipitation de plus de 5 mm au moins sur une station du site central. L'ensemble des mesures est effectué en une journée.

Description des mesures

Afin de tenir compte des variations des sources radioactives et du compteur de neutrons, 5 comptages sont effectués dans un fût d'eau avant et après les mesures sur le terrain. Il y a une feuille de suivi par tube. Elle contient 8 dates de mesure. Les profondeurs de mesure sont les suivantes : 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 cm, puis tous les 20 cm jusqu'au fond du tube. Les mesures-comptages sur l'ensemble des tubes sont réalisées dans la journée.

Etalonnage inter-sondes

L'ensemble des sondes a été comparé sur quelques tubes (BT1, BT2, BT3, BT4, J1, J3, J7), pour différentes dates correspondant à des états hydriques différents. L'analyse des corrélations montre une excellente adéquation entre toutes les sondes, si on utilise les rapports de comptage et non les comptages bruts.

Etalonnage des sondes à neutrons

Etant donnés les résultats ci-dessus, il suffit d'étalonner une seule sonde, c'est la sonde n°36 qui a servi à l'étalonnage des différents sites. La méthode choisie est la méthode gravimétrique : prélèvement d'échantillons à la tarière lors de l'implantation, associés avec des mesures neutroniques et gammamétriques. Cette opération est recommencée pour un état hydrique contrasté, avec, cette fois-ci des échantillons prélevés à 1 m du tube (pour toutes les profondeurs de mesure habituelles).

Sur la station de brousse tigrée la méthode d'implantation par foreuse ne permet pas d'utiliser la méthode gravimétrique. On a utilisé la méthode développée à Cadarache: les constantes neutroniques des échantillons prélevés lors du forage sont déterminées au laboratoire.

Tensiométrie

Principe de la mesure

Un tensiomètre mesure le potentiel de l'eau du sol (H) qui détermine le sens des flux d'eau dans le sol (loi de Darcy). Il est composé d'une bougie poreuse qui met en contact d'une part l'eau contenue dans le sol, et d'autre part un capteur de pression, dans notre cas, il s'agit d'un manomètre à mercure. La montée du mercure dans la colonne est proportionnelle au potentiel total de l'eau du sol. On peut également en déduire le potentiel matriciel (h) par la relation $h = H - z$, où z est la profondeur à laquelle se trouve la bougie poreuse.

Il faut noter deux limites du tensiomètre : si les capillaires reliant la bougie au manomètre contiennent des bulles d'air, le contact ne se fait pas et la mesure de pression est fautive, enfin, si la pression dépasse -800

mbar (quand la teneur en eau diminue), l'air passe à travers la bougie, on dit que le tensiomètre décroche, les mesures ne sont plus possibles. Il faut noter que le potentiel de l'eau peut atteindre -15 bars.

Description

Trois batteries de 10 tensiomètres à mercure ont fonctionné du 17/8/92 au 11/11/92, date à laquelle les tensiomètres ont décroché. Profondeurs disponibles : 5 10 40 65 90 115 140 190 220 240 cm. Le rythme de mesure est celui des mesures neutroniques.

Caractéristiques des sites

- granulométrie

une granulométrie en 5 classes (argile, limons fins et grossiers, sables fins et grossiers) des principaux horizons pédologiques de la jupe sableuse a été effectuée en 1991.

- densité (sonde gammamétrique Solo)

Le rayonnement gamma de la source radioactive est rétrodiffusé par le sol en fonction de sa densité humide (dh). La relation entre le comptage gammamétrique Cg et la densité est pratiquement indépendante du type de sol. Les coefficients d'étalonnage sont donnés pour chaque sonde par le constructeur :

$$dh = a * \ln(Cg) + b$$

La densité sèche (ds) est déterminés conjointement à une mesure d'humidité volumique (Hv) -> $ds = dh - Hv$

Les profils de densité sèche de l'ensemble des tubes ont été effectués à l'aide d'une sonde gammamétrique SOLO40, lors de l'implantation (à l'exception des sites de brousse tigrée BT11 à 15 et BT21 à 24).

Les densités sèches obtenues en 1992 par l'INRA sur les sites J1, J2, J3, J4 et J7 avec une sonde gamma à transmission du LCPC sont très proches (à 0,05 près) de celles obtenues en 1991 par l'ORSTOM sur les mêmes sites.

- topographie

Un profil en long de la jupe sableuse suivant un axe reliant l'ensemble des tubes a été levé en 1991 par M. Gréard (de J1 à J7). Il s'agit d'altitudes relatives.

- caractéristiques physiques

La courbe h(q) a été caractérisée en 1992 en trois sites de la jupe sableuse (J1, J4, J7).

L'équipe du LTHE-IMG a utilisé l'infiltromètre à succion (TRIMS) pour déterminer *in situ* les caractéristiques hydrodynamiques de différents états de surface du bassin versant de Sama Dey.

CATALOGUE

Les dates de mesure sont données ci-après. La POI est encadrée par un double trait, les "*" correspondent aux "golden days" HAPEX.

NB: 1- Chaque date indiquée dans le tableau correspond à un jour de mesure, à la condition que le tube soit implanté (voir tableau précédent).

2- Pour un jour sans mesure, il est relativement facile de modéliser la décroissance du stock hydrique et donc d'obtenir un profil hydrique pour une date particulière, à condition toutefois qu'il y ait eu une mesure entre la dernière pluie et le jour considéré.

L'ensemble de ces données est saisi sur PC avec le logiciel Excel et est actuellement en cours de critique.

La totalité des mesures de sonde à neutrons effectuées sur la période du 1/8/91 au 30/11/92 représente un volume de 10 Mega octets (15% et 85% respectivement pour les 15 tubes de 1991 et les 40 tubes de 1992).

Mesures de sonde à neutrons en 1991 selon le tableau instrumentation
(Galle-Orstom)

1991	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
1												
2										2		
3									3			
4										4		
5								5				
6									6	6	6	
7												
8												
9										9		
10												
11									11			
12								12		12		12
13								13			13	
14								14				
15								15				
16								16				
17								17		17		
18									18			
19								19				
20											20	
21								21				
22												
23										23		
24								24				
25									25			
26												26
27								27			27	
28												
29								29				
30												
31							31			31		
Total							1	12	5	8	4	2

Mesures de sonde à neutron en 1992 selon le tableau instrumentation
(Galle-Orstom)

9 2	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
1							1	1	1			
2										2		
3							3		3	*		
4								4		*	4	
5						5						
6							6		*			
7								7	7	7		
8							8		8	*		
9				9				9				9
10								10	10			
11			11			11					11	
12					12		12	12	* 12			
13							13		13			
14							14	14		14		
15						15	15		15			
16								16	16			
17							17	17	*			
18							18		18			
19							19	19	19			
20					20	20						
21							21	*		21		
22				22				22	22			
23	23						23					23
24							24	24				
25			25		25	25		25	* 25		25	
26		26					26	26				
27												
28							28	28				
29							29	29	29	29		
30						30						
31			31				31	31				
Total	1	1	3	2	3	6	18	17	13	5	2	

Tableau 1: ETAT DES DONNEES TENSIO-NEUTRONIQUES RECUEILLIES DANS LE "WAB " DE JACHERE, AVANT LA POI.

1991																						
SITE	J14		J21		J25		J33		J42		J44		J46		J55		J61		J72		J75	
DATE	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T
199	+		+				+		+		+		+				+					
204	+	++	+	++			+	++	+	++	+	++	+	++			+	++				
206	+	++	+	++			+	++	+	++	+	++	+	++			+	++				
213	+	++	+	++			+	++	+	++	+	++	+	++			+	++				
217	+	+	+	++			+	+	+	+	+	+	+	+			+	++				
225	+	++	+	++			+	++	+	++	+	++	+	++			+	++				
227	+		+	++			+		+		+		+				+	++				
231	+	++	+	++			+	++	+	++	+	++	+	++			+	++				
234	+		+				+		+		+		+				+					
239	+	++	+	++		++	+	++	+	++	+	++	+	++			+	++				
241	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++			+	++				
248	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++			+	++				
252	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++			+	++				
259	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++			+	++				
266	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++			+	++				
269	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++			+	++				
276	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++			+	++				
280	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++			+	++				
283																						
302	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
309	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
316	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
323	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
330	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
337	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
344	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
1992																						
SITE	J14		J21		J25		J33		J42		J44		J46		J55		J61		J72		J75	
DATE	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T
14	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
56	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
78	+	++	+		+	++	+		+		+		+		+		+		+		+	
119	+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		+	

H: humidité du sol, + profil complet sur 280 à 340cm.
T: tension de l'eau, ++ respectivement à profondeur 200 et 250cm.

Tableau 2: ETAT DES DONNEES TENSIO-NEUTRONIQUES RECUEILLIES DANS LE "WAB " DE MIL, AVANT LA POI.

1991																						
SITE	M13		M15		M23		M26		M32		M41		M43		M45		M46		M54		M64	
DATE	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T
199	+		+																			
204	+	++	+	++																		
206	+	++	+	++																		
213	+	++	+	++																		
217	+	+	+	++																		
225	+	++	+	++																		
227	+		+	++																		
231	+	++	+	++																		
234	+		+																			
238	+	++	+	++		++	+		+		+		+	++								
241	+	++	+	++	+	++	+		+	++	+	++	+	++								
248	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++								
252	+	++	+	++	+	++	+		+	++	+	++	+	++								
259	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++								
266	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++								
269	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++								
276	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++								
280	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++								
302	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
309	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
316	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
323	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
330	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
337	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
344	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
1992																						
SITE	M13		M15		M23		M26		M32		M41		M43		M45		M46		M54		M64	
DATE	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T
14	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
56	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
78	+	++	+		+	++	+		+		+		+		+		+		+		+	
119	+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		+	

H: humidité du sol, + profil complet sur 280 à 340cm.
T: tension de l'eau, ++ respectivement à profondeur 200 et 250cm.

Tableau 3: ETAT DES DONNEES TENSIO-NEUTRONIQUES ENCADRANT LA POI, RECUEILLIES DANS LE " WAB " DE JACHERE.

SITE	J14		J21		J25		J33		J42		J44		J46		J55		J61		J72		J75	
	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T
147	+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		+	
161	+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		+	
168	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
175	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
182	+	++	+	++	+		+		+		+		+		+		+		+		+	
189	+		+		+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
196	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
203	+		+		+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	+	+	++	+	++	+	++
210	+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		+	
213	+	++	+	++	+		+		+		+		+		+		+		+		+	
217	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
224	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
227	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+		+	++	+	++	+	++	+	++
230	+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		+	
232	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
234	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
239	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
241	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
242	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
246	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
248	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
253	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
255	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
258	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
260	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
262	+		+		+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
265	+		+																			
268	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
272	+		+		+	+	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
274	+	++	+	++	+	+	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
276	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
282	+	++	+	++	+	+	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
283	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
288	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++

H: humidité du sol, + profil complet sur 280 à 340cm.

T: tension de l'eau, ++ respectivement à profondeur 200 et 250cm.

Tableau 4: ETAT DES DONNEES TENSIO-NEUTRONIQUES ENCADRANT LA POI, RECUEILLIES DANS LE " WAB " DE MII.

SITE	M13		M15		M23		M26		M32		M41		M43		M45		M46		M54		M64	
	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T
147	+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		+	
161	+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		+	
168	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
175	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
182	+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		+	
189	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
196	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
203	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
210	+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		+	
213	+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		+	
217	+		+		+	++	+		+		+		+		+	++	+		+		+	
219	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
224	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
227	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
230	+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		+	
232	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
234	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
239	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
241	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
242	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
246	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
248	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
253	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
255	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
258	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
260	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
262	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
268	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
272	+	++	+	++	+	+	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
274	+	++	+	++	+	+	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
276	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
281	+	++	+	++	+	+	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
283	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
288	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++

H: humidité du sol, + profil complet sur 280 à 340cm.
T: tension de l'eau, ++ respectivement à profondeur 200 et 250cm.

Le but de l'opération est d'évaluer la part des précipitations qui s'infiltré au travers du sol et contribue à la recharge de la nappe phréatique à l'échelle du degré carré.

Sur l'ensemble du degré carré se rencontre un ensemble de sédiments sableux et argileux récents rattachés au Continental Terminal. Ces séries peuvent contenir 3 nappes superposées séparées par des horizons semi-perméables. Selon le cas, ces nappes peuvent être bien distinctes ou au contraire se rapprocher pour éventuellement se confondre. Les deux nappes les plus profondes (CT1 et CT2) sont captives et assez minéralisées. Elles semblent hydrauliquement peu actives (faible recharge et faible circulation). La nappe superficielle, CT3, est au contraire très peu minéralisée et est régulièrement réalimentée par l'infiltration de la pluie. C'est cette nappe qui fait l'objet des études hydrogéologiques.

Méthodologie - Instrumentation

Les eaux souterraines du secteur central sont observées dans les puits existants et ceci en vue de comprendre leur dynamique et fournir une estimation des volumes hydriques qui échappent au domaine superficiel et participent à la recharge de la nappe phréatique (le plus souvent atteinte entre 20 et 75 mètres sous la surface du sol, la topographie du sol étant le facteur principal de cette variabilité). Cette étude est menée conjointement par la DRE (Direction des Ressources en Eau, Service Hydrogéologique du Niger) et l'ORSTOM avec l'appui de la Direction de la Topographie du Ministère des Finances.

Piézométrie.

Pour comprendre l'hydrodynamique de la nappe (direction d'écoulement, zone de recharge...), il est nécessaire de suivre régulièrement les variations du niveau piézométrique par :

- des mesures espacées dans le temps sur l'ensemble du degré carré au nord du fleuve (200 puits)
- des enregistrements en continu en quelques points supposés représentatifs (5 puits équipés dont X sur le SSCE)

Afin d'avoir des repères permanents et fiables, les seuls puits considérés sont aménagés avec une margelle cimentée utilisable comme référence pour la campagne de mesures altimétriques. Cette contrainte nous a fait écarter les possibilités offertes par de nombreux puits traditionnels, aux finitions de surface trop souvent modifiées. Les coordonnées de repérage ont été obtenues par système GPS et les profondeurs par sonde portative.

Un premier inventaire des puits exploitant la nappe phréatique a été fait en août 1991, donc centré sur la phase intensive de la saison pluvieuse pour en apprécier l'influence. Le nombre des ouvrages enregistrés sur cette série de mesure se monte à plus de 140. Un

enregistreur CHLOE sur la station DRE de Banizoumbou a fonctionné pendant la saison 1991 et 1992.

L'opération a été renouvelée en Décembre 1991 et élargie à environ 200 puits. Ce dernier mois de l'année a été choisi parce qu'il est précédé par une sécheresse de deux mois, pratiquement totale sur le degré carré, éliminant ainsi les effets des apports atmosphériques. Par contre, ce stade de la saison sèche correspond à l'épisode de pointe de crue sur le fleuve Niger et nous voulions tester l'importance de ce fleuve sur le comportement de la nappe phréatique.

Ces observations ont été complétées par des mesures physico-chimiques sur le terrain (Conductivité, pH et Température) et des prélèvements pour déterminations chimiques et isotopiques.

Les premières analyses de ces mesures montrent que la réaction de la nappe est très hétérogène et non raccordable à des descripteurs simples comme la profondeur de la nappe, présence d'une mare en surface ou situation géomorphologique. Il y a absence d'un réseau hydrographique régional organisé et fonctionnel dans les conditions climatiques actuelles mais plutôt un ensemble d'unités endoréiques évoluant individuellement avec une taille variable suivant l'importance des événements pluvieux. Il existe simultanément des processus d'infiltration rapides et lents. Par ailleurs les analyses physico-chimiques (2 campagnes de prélèvements) montre une très faible minéralisation de la nappe CT3 parfois masquée par des pollutions ponctuelles d'origine animale.

Les informations seront exploitées à l'aide d'un modèle numérique de simulation des écoulements souterrains en 2 dimensions (plan horizontal), éventuellement multicouche afin de figurer les échanges avec le réseau hydrographique (mares temporaires).

Mesures des flux à l'interface sol-végétation et atmosphère

Les précipitations en régions sahéliennes proviennent essentiellement d'importants systèmes convectifs, appelés lignes de grain, qui balayent lors de leur trajectoire d'est en ouest des surfaces importantes. Ces processus de condensations et de précipitations P se produisent principalement lors de la présence des masses d'air humide de l'Equateur Météorologique (E.M. ou Z.C.I.T.) au cours de la période de mai à septembre. La concentration de vapeur d'eau dans ces masses d'air provient essentiellement de l'apport océanique et du recyclage des eaux de pluies par la surface sol-végétation, c'est-à-dire de l'évaporation ET au niveau des régions situées en aval mais aussi de la zone sahélienne elle-même. Le cycle hydrique dans cette région doit être associé étroitement aux cycles énergétique et biogéochimique du carbone en raison de leur interdépendance. Ces fractions de vapeur d'eau ET et de CO² échangées par les différentes surfaces doivent être quantifiées. Les mesures réalisées sur des surfaces représentatives de la végétation fourniront les équations permettant de quantifier les divers processus.

Néanmoins, il est nécessaire de simplifier la paramétrisation de ces processus lors du passage à une plus grande échelle avec l'utilisation des données satellitaires. Toutefois, la maille utilisée dans les GCM présente une certaine hétérogénéité, partiellement liée à l'inertie qu'oppose le sol aux mouvements de l'eau et du gaz carbonique. C'est un problème d'espace et d'échelle qui doit être résolu pour prendre en compte la variabilité des données climatiques observée au niveau des stations d'observation climatique sur le degré carré.

Bilan radiatif et énergétique de la surface.

(Monteny, Lhomme, Chebouni, Troufleau-Orstom; Amadou, -Inran)
(toute la saison des pluies de 91 et de 92)

L'objectif de cette opération est de déterminer l'importance quantitative des transferts d'énergie et de masse à l'interface sol-végétation et atmosphère à l'échelle d'un bassin versant représentatif en région sahélienne. La paramétrisation des processus d'échange entre cette surface et l'atmosphère nécessite l'évaluation des divers composants des bilans radiatif, énergétique, hydrologique et carboné de la surface. Le cycle géochimique de l'eau conditionne toute l'activité de la biosphère et donc celui du carbone. La caractérisation des divers mécanismes en jeu fournirait les éléments de base pour les modèles hydrologiques et donc aux modélisateurs des GCM pour l'analyse de la dynamique climatique de cette zone et de son évolution spatio-temporelle.

Instrumentation et dispositif expérimental

Chaque station (n°1,3,4,6), installée sur les diverses surfaces représentatives, comprend un mat sur lequel sont disposés les différents capteurs et au sol un abri avec les acquisitions, batteries couplées à un panneau solaire et un pluviomètre à 1,5m qui enregistre les hauteurs de pluies.

La scrutation de chaque capteur est réalisée toutes les 10 secondes, les valeurs moyennes sont intégrées sur une période de 20

minutes et stockées. Les appareils sont étalonnés avant et après la période d'expérimentation en comparaison à une référence. Cet étalonnage est conduit sur le terrain sauf pour le Vaisala. L'enregistrement des paramètres microclimatiques et les calculs sont réalisés à l'aide d'une acquisition Campbell CR10, régulièrement relevée au moyen d'un microordinateur portable. Les données sont vérifiées et mises sous forme de tableaux hebdomadaires.

Les calculs des flux de surface sont réalisés selon la méthode couplée bilan d'énergie/rapport de Bowen.

PARAMETRE	MIL			SAVANE à GUIERA	
	CULTURE BAS FOND n°1	SOL intercalaire	sur JUPE SABLEUSE n°6	SURFACE COMPOSEE n°3	STRATE HERBACEE n°4
capteurs sur le mât	13°33'408N 02°39'636E		13°32'795N 02°41'857E	13°33'417N 02°40'913E	13°33'488N 02°40'931E
Rayonnement réfléchi KZ inversé (380-3000nm)	12 m	--	12 m	12 m	9 m
Rayonnement réfléchi Capteur quantique (PAR: 380-700 nm)	12 m	--	12 m	12 m	9 m
Pyrradiobilanmètre REBS Q6 (380-9000nm)	12 m	1 m	12 m	12 m	12 m
Thermoradiomètre EVEREST	12 m	1 m	12 m	12 m	9 m
Profil température air	variable *	0,25 - 0,90 m	variable *	4,5 - 9,0 m	variable *
Profil humidité	variable *	0,25 - 0,90 m	variable *	4,5 - 9,0 m	variable *
Profil CO2	--	--	--	4,5 - 9,0 m	--
Vitesse Vent (VECTOR)	7 m	--	7 m	7 m	--
Acquisition (CAMPBELL)	X	X	X	X	X
multiplexeur	X	X	X	X	X
 dans le sol					
Tensiomètres	0,06; 0,145; 0,26; 0,51; 0,90; 0,153 m		0,02; 0,05; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5 m		0,10; 0,20 0,50; 1,00; 1,15; 1,52 m
Fluxmètre	un à 0,02m	3 à 0,03m	3 à 0,025m	un à 0,03m	3 à 0,025m
Température du sol thermocouples (Cu - const.)	0,00; 0,025; 0,04; 0,095; 0,215; 0,48 0,98 m		0,02; 0,05; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5 m		0,02; 0,09; 0,14; 0,28; 0,51; 1,0 m

* variable selon la croissance de la végétation

Etude radiométrique des surfaces représentatives (WABs) (Troufleau-Cemagref, Lhomme-Orstom)

Simultanément aux mesures des flux et selon les vols avion ou les passages satellitaires, un suivi radiométrique est réalisé avec pour buts:

- d'étudier la variabilité spatiale et temporelle de la température radiométrique en relation avec la variabilité des indices de végétation afin de tester la représentativité des mesures faites au niveau des mâts;
- suivre le comportement de la température composite en fonction de la température des différents composants de la surface (sol nu, végétation herbacée...) et des indices spectraux de végétation (NDVI, MSAVI);
- obtenir les données radiométriques de terrain pouvant supporter les mesures aéroportées et satellitaires acquises durant la campagne.

Instrumentation et dispositif expérimental

3 radiomètres sont fixés sur un dispositif portable (jok) avec une hauteur de 3,50 m du sol (tâche vue au sol : 1m de diamètre).

Instruments	Paramètres	observations
radiomètre infrarouge thermique EVEREST 4000A	température de surface	bande 8-14 μm FOV : 15°
2 radiomètres reflectancemètre LOA	rayonnement dans \neq bandes spectrales : incident et réfléchi	canal 1 : 550nm canal 2 : 650 nm canal 3 : 850 nm canal 4 : 1650 nm FOV : 15°
acquisition Campbell CR10		enregistrement
radiomètres portatifs - HEIMAN KT17 - HEIMAN PYROSOR	température des éléments composant la surface	lecture directe bande 8-14 μm FOV : 35° bande 8-14 μm FOV : 5°

Le dispositif permet d'acquérir simultanément des données dans l'infrarouge thermique et le visible suivant 2 méthodes :

- échantillonnage aléatoire de la surface le long de transects où les mesures sont prises à intervalle régulier,
- échantillonnage contrôlé des surfaces types (sol nu, surface à guiera ou surface herbacée associé éventuellement à des mesures complémentaires de microinfrarouge thermique (Heiman Pyrosor)

Bilan énergétique de la savane à Guiera (Chanzy/Gaudu-INRA)
du 31 août au 19 septembre. 13°??N - 02°??E

L'objectif est d'évaluer à l'échelle d'une petite région les possibilités offertes par la radiométrie micro-ondes de déterminer l'évaporation d'une surface.

Le travail se divise en 2 parties :

- * analyse de la signification physique de la température de brillance microonde en étudiant l'influence de l'humidité de la surface du sol, la rugosité, la température et la végétation; (cf § humidité de surface et § caractérisation des micro-ondes - mesure au sol)
- * modélisation de l'évaporation des surfaces en y intégrant les données issues de la radiométrie microonde

Instrumentation pour la mesure de l'évaporation

Un mât (n° 5 sur la carte) a été mis en place sur la partie ouest de la savane à *Guiera* dans le cadre d'un couplage entre radiométrie microonde/humidité de surface et évaporation de la surface.

Instrument	etalonnage	vérification	hauteur (m)
Pyrradiobilanmètre "REBS Q6"	constructeur	intercomparais.	8,20
hygromètre "Vaisala"	constructeur	sol saline	4,5 et 8,45m
thermocouple	laboratoire		différence 4,5 et 8,45m
anémomètre	constructeur	intercomparais.	4,20 - 8,35m
fluxmètre "Campbell"	constructeur		0.01 sol nu idem végétat.
sonique CA27	constructeur	intercomparais.	5,60
thermocouple sol	laboratoire		,5;1,2,3,5,10 ,15,25,50cm

Caractéristiques de transferts des couverts épars (Perrier/Tuzet-
INRA/INA-PG)
du 14 août au 2 septembre. 13°33'425N - 02°40'900E

Au-dessus du couvert hétérogène et épars (savane à *Guiera*), les mesures globales permettent d'obtenir les flux moyens de chaleur sensible et de vapeur d'eau :

- par la méthode aérodynamique
- par la méthode du rapport de BOWEN
- par la méthode des fluctuations de chaleur sensible et latente

Les mesures plus locales permettent d'analyser, en situation de zone ouverte, les flux (masse et énergie) d'un couvert herbacé continu et vaste. Mais ces mesures ne permettent pas par les méthodes utilisées (aérodynamique, rapport de BOWEN, fluctuations de chaleur) de prendre en compte les interactions entre les trois couverts lorsqu'ils sont imbriqués.

Les mesures plus locales permettent d'analyser, en situation de zone ouverte, les flux (masse et énergie) d'un couvert herbacé continu et vaste. Mais ces mesures ne permettent pas par les méthodes utilisées (aérodynamique, rapport de BOWEN, fluctuations de chaleur) de prendre en compte les interactions entre les trois couverts lorsqu'ils sont imbriqués.

Instrumentation

Paramètres	savane à Guiera	strate herbacée
mesure des flux par le rapport de Bowen		
rayonnement global descendant/ascendant	pyranomètre Eppley 6m	pyranomètre linéaire 0.10 cm
rayonnement net	Pyrradiobilanmètre swisteco 6m	Pyrradiobilanmètre swisteco 1.50m
tension de vapeur d'eau - température	psychromètre 6m	psychromètre 1.50m
flux conductifs dans le sol	fluxmètres Thornwaite 0.001m	fluxmètres Thornwaite 0.001m
température radiative	radiothermomètre Everest 5m	
vitesse du vent	anémomètre Cimel 6m	anémomètre Cimel 1.5m
mesure par méthode des fluctuations		
chaleur sensible	anémomètre sonique Campbell 6m	anémomètre sonique Campbell 1.5m
chaleur latente	hygromètre KH20 Campbell 6m	hygromètre KH20 Campbell 1.5m
mesure écophysio- logique		
conductance stomates	poromètre Delta T	
débites de sève arbustes	capteurs débits sève Dynamax	
surface foliaire	LAImètre LI-COR	

Méthodologie

Dans ce cadre, les flux de chaleur sensible et latente à la surface des couverts herbacés et du sol nu, en situation d'interaction entre les trois milieux (arbre-herbe-sol) ont été mesurés par les méthodes des fluctuations (anémomètres soniques et hygromètres KH2O). Il a été également établi des gradients horizontaux de flux le long de transects allant du couvert herbacé au sol nu. De même, certains jours, en zone dégagée, a été réalisé quelques profils verticaux, entre les mesures faites près de la surface et la mesure de référence, effectué au-dessus de la strate arbustive. La participation de la strate arbustive au flux total a été mesurée de façon continue à partir des systèmes de mesure de flux de sève, fixés sur des brins-maîtres, échantillonnés pour traduire la partie arbustive.

Pour permettre d'établir un bilan d'énergie précis au-dessus de la surface, un bilan radiatif complet a été effectué.

Le dispositif a été complété par des mesures de résistances stomatiques nécessaires à la caractérisation du fonctionnement biologique du couvert sous l'angle hydrique. Il s'appuie aussi sur une description structurale des couverts (surface, hauteur, densité, surfaces foliaires) pour fournir les éléments nécessaires à l'étude analytique des transferts à partir de la modélisation.

Bilan énergétique de 2 surfaces (WABS savane à *Guiera* et champ de mil) (Bessemoulin-CNRM) 12 août au 30 octobre 92

Evaluation des flux des chaleurs sensible et latente au-dessus des couverts végétaux, caractéristiques de la région sahélienne avec un dispositif comprenant 2 stations. (voir carte)

Instrumentation

Les instruments pour la méthode des fluctuations avec collecte des données à temps réel sont donnés dans le tableau.

Paramètres	savane à <i>Guiera</i> 13°33'48N - 02°40'94E n° 3	surface aménagée (mil) 13°33'50N - 02°439'44E n°2
mesure par méthode	des fluctuations	
rayonnement net	Pyrradiobilanmètre REBS Q6	Pyrradiobilanmètre REBS Q6
chaleur sensible	Biral "Gill" sonic thermo- anemoter 8m	Biral "Gill" sonic thermo-anemoter 8m
chaleur latente	hygromètre KH20 Campbell 8m	hygromètre KH20 Campbell 8m

Flux aéroportéF. Saïd/Benech.B/Druilhet/Durand-
Laboratoire Aérologie, TOULOUSE

du 15 août au 30 octobre

Objectifs de la mesure des flux par avion.

Le programme de mesure des flux aéroportés vise à remplir les objectifs suivants :

- estimer les flux de chaleur, d'évaporation et de quantité de mouvement de la surface autour des supersites sur une aire de 60x60km;
- étudier la variabilité spatiale de ces flux sur l'ensemble du degré carré et en particulier le long d'un méridien;
- analyser la structure verticale de la couche limite sahéenne dans des conditions d'écoulement diverses.

Les flux de chaleur sensible, chaleur latente et quantité de mouvement sont estimés à bas niveau dans la couche limite de sorte qu'on puisse les assimiler aux flux à la surface. Cependant, certains vols ont été conçus de sorte que la variation verticale des flux puisse être calculée, ce qui permettra l'extrapolation à la surface. Les flux d'inversion à la limite supérieure de la couche limite ont été aussi évalués.

Les flux sont calculés par la méthode des corrélations. Ceci sous-entend que les échantillons de calcul sont des séquences de vol rectilignes de 4-5 minutes, soit 20-25km. Une valeur de chaque flux est obtenue sur chaque séquence. Sous réserve que les échelles caractéristiques des flux turbulents le permettent, ces flux pourront être partitionnés à des intervalles plus restreints (d'au-moins 5km), ce qui permettra d'étudier leur variabilité spatiale sur la surface de 60x60km. Ainsi, l'estimation des flux à une échelle variant entre 5x5km et 60x60km en parallèle avec celle des paramètres caractéristiques de la surface (ex.: albedo, relief, température...) devrait pouvoir permettre d'étudier les processus d'intégration des transferts.

En ce qui concerne la variation méridienne des flux, la méthode de mesure est identique. La réalisation de grands axes de vol (typiquement 30minutes, soit 150km) permettra en outre d'étudier des échelles caractéristiques de basse fréquence avec une statistique suffisante. L'analyse de la structure verticale de la couche limite sahéenne nécessitait la présence des 2 avions afin de décrire en détail la répartition verticale des flux, aussi ce type de mission n'a-t-il pu être réalisé qu'à partir de la fin septembre. pour cette raison, on peut regretter que les couches limites typiques des conditions de flux de mousson n'aient pu être étudiées.

Stratégie expérimentale

3 types de plan de vol ont été réalisés :

1. Intégration des flux autour des supersites

(plans de vols M2, M4, A4)

Le plan de vol type est de décrire un "trombone" à bas niveau (150') pour explorer une surface de l'ordre de 60x60km. La figure en trombone" a été préférée à la figure en axes parallèles, d'une part pour réaliser les mesures sur des axes perpendiculaires et minimiser (en moyenne) les

problèmes d'orientation des axes par rapport au vent, et d'autre part pour essayer de limiter la variation temporelle des flux, d'une extrémité à l'autre de la surface.

Trois sondages ont été intercalés dans le plan de vol, pour observer la structure verticale de l'atmosphère jusqu'à environ 6000' et pour déterminer la hauteur de la couche limite (Zi). Cette information a permis de réaliser un palier juste en dessous de la couche d'inversion pour évaluer les flux au sommet de la couche limite.

A partir de ce plan de vol de base M2 des variantes ont été réalisées: l'une d'elles consistait à décrire l'un des axes sur 3 niveaux différents (M2*) à 150', 0.5Zi et 0.9Zi par exemple, avec un sondage en extrémité d'axe pour déterminer Zi. L'autre variation (M4 et A4) était de réaliser le vol 2 avions en patrouille, le Merlin IV décrivant la surface à bas niveau (150') et l'Arat à mi-couche limite (0.5Zi). Ceci permettrait de connaître sur toute la surface et non plus simplement le long d'un axe, la variation verticale des flux.

2. Variation des flux sur le degré carré (plan de vol M1, M5 et A5)

Le plan de vol nominal M1 a consisté à décrire des transferts nord-sud à trois niveaux différents dans la couche limite : 150', 0.5Zi et 0.9Zi. Un sondage vertical est réalisé à une extrémité de chacun des transects pour connaître la hauteur de la couche limite.

En plus, des transects méridiens, certains vols (M1b) avaient pour mission d'estimer les flux sur le Dallol Bosso, à bas niveau, plus pour apporter aux modélistes une information sur la variation des conditions aux limites en raison de la spécificité de cette zone, que pour étudier les phénomènes de transition entre l'ensemble du carré et cette zone. Avec une optique semblable, un axe de vol a parfois été réalisé sur le fleuve Niger, pour apporter une autre information de conditions aux limites.

Enfin, quand les 2 avions ont pu voler en patrouille (M5 et A5), ils ont décrit à 2 niveaux différents (250' et 0.5Zi) l'ensemble du degré carré aussi bien du nord au sud que d'est en ouest.

3. Répartition verticale des flux (plan de vol : M6-A6)

A ces 2 missions de base que l'on peut qualifier de "contractuelles" dans le cadre d'HAPEX-Sahel, s'ajoutent quelques vols essentiellement consacrés à l'étude de la répartition verticale des flux dans la couche limite. Ils consistaient à décrire 1 ou 2 axes de vol horizontaux et perpendiculaires à des niveaux répartis sur toute la hauteur de la couche limite. Pour 2 de ces vols, les 2 avions ont été utilisés pour effectuer ce type d'étude dans un intervalle de temps le plus restreint possible. Au cours d'un autre vol, un avion a décrit la couche limite dans un plan vertical et l'autre s'intéressait aux flux de surface dans un plan horizontal. Enfin, un vol de reconnaissance a été réalisé par le Merlin IV en début de campagne, ainsi qu'un vol intercomparaison entre les 2 avions vers la fin de la POI.

Un rapport de campagne (note de travail n° 92 -1 et 2) présente un compte rendu des expériences aéroportées réalisées par le Merlin IV pour la mesure des flux turbulents. Saïd, F; Benech, B.; Druilhet, A. et Durand P. 1992.

Il peut être résumé comme suit (si cela est possible).

Généralités

- résumé des objectifs scientifiques des vols avion flux
- stratégie expérimentale utilisée
- coordonnées géographiques des points de référence utilisés pour les différentes trajectoires de vol
- vue d'ensemble des trajectoires de vol positionnées sur la carte IGN au 1/1M
- tableau récapitulatif des vols classés par type de mission
- conventions utilisées dans le rapport
- note sur la qualité des mesures
tableau récapitulatif des missions réalisées par les 2 avions avec une note provisoire attribuée en fonction de la qualité technique et de l'intérêt scientifique des vols pour le choix de "golden days"

Pour chaque jour de vol

- résumé journalier de l'ensemble des opérations avion et radiosondages >>fiche préparée lors du briefing la veille de l'opération
- schéma horizontal et vertical de la trajectoire du ou des vols
- compte rendu du vol pour chacun des 2 avions
- trajectoire horizontale enregistrée en vol pour chaque avion
- sondages verticaux des vols Merlin
- fiche de découpage des vols Merlin. Ces découpages correspondent aux heures de début et fin de palliers horizontaux et stabilisés sur lesquels sont calculés les flux turbulents de chaleur, évaporation et quantité de mouvement. Cette fiche permet en particulier de repérer les séquences de mesure réalisées directement au-dessus des supersites.

TELEDETECTION**Mesure et analyse des températures de surface par télédétection infrarouge thermique**

Stoll/Pion LSTI-G.S.T.S. (13/08 au 17/09/92.)

Objectifs

Approfondir l'approche par télédétection de problèmes d'hydrologie et des problèmes climatiques.

Confronter des modèles de mesure avec les données de terrain.

Les buts de l'opération de recherches est de caractériser les différents types de surfaces (surfaces minérales, sols, végétation) du point de vue spectral :

- dans le visible et le proche infrarouge, en relation avec les images SPOT et TM ;
- dans l'infrarouge thermique (IRT), en relation avec les données avion TIMS et TMS et les données satellites NOAA/AVHRR.

Ceci afin de :

- a) valider les méthodes d'analyses spectrale dans l'IRT par le biais des Indices Spectraux Indépendant de la Température (TISI), à l'aide des données avion TIMS ;
- b) définir expérimentalement des grandeurs spatialement intégrées et examiner le rôle de la variabilité à différentes échelles : terrain, avion, satellites ;
- c) étudier le rôle des paramètres de surface et des caractéristiques atmosphériques : T_{air} , humidité totale, dans l'extraction de la température de surface T_s à partir des données de télédétection et comparer les différentes méthodes et algorithmes ;
- d) comparer la qualité des résultats obtenus avec AVHRR et avec ATSR, si ces dernières images sont disponibles.

Méthodologie utilisée**mesures spectroradiométriques**

- a) domaine solaire réfléchi : mesure de réflectivité bidirectionnelle dans les canaux SPOT (1, 2, 3) et TM (1 à 6) et d'albédo solaire dans des conditions de ciel clair, pour l'étalonnage et la classification des images.
- b) domaine IRT :
 - * mesures de température de brillance : canaux AVHRR 3, 4, 5 ; mesures de variation angulaire de température de brillance : sols, végétation ; mesures de variabilité spatiale de température de brillance, échelle TIMS et TM
 - * mesures spectrales IRT relatives, haute résolution spectrale sur les sols et mesures de rayonnement atmosphérique descendant
 - * mesures d'émissivité par : méthode de la "boîte" et / ou méthode par réflexion, canal 3.7 um de AVHRR

Instrumentation

Pas d'instrumentation fixe. Le matériel de radiométrie a été placé, suivant les besoins, en différents points du site central Est : savane à guiera (jachère), surface cultivée en mil et plateau de brousse tigrée. Malheureusement, les conditions climatiques de la POI en Télédétection (du 17 août au 18 septembre) ont été particulièrement défavorables : de nombreuses pluies, des passages nuageux importants, des ciels couverts partiellement ou en totalité, des conditions d'éclairement à variations rapides, ont ralenti les acquisitions. Toutes les mesures programmées n'ont pu être réalisées. On peut considérer qu'un quart seulement des mesures nécessaires ont été effectuées.

Instrument	Caractéristiques
*radiomètre BARNES PRT-5	canal [10.5-12.5 μm], FOV 20°
* " MINARAD RST-10	canal [3,7, 11, 12 μm], FOV 4°
* " BARRINGER HHRR	10 canaux[3SPOT] [6TM] + AVHRR
*albédomètre Kipp et Zonen	[3-5 μm] et [8-14 μm]
*spectroradiomètre DESIGN	résolution 4 cm^{-1}
*PROTOTYPES, FTIR	spectralon (Vis-PIR)
*LABSPHERE cible réflecteur (étalon)	(diffus) (IRT)

Il faut noter également que pour la thématique scientifique concernant la reconnaissance des "drains principaux" qui alimentent les nappes phréatiques, la période choisie a été défavorable. Il a été possible de réaliser des mesures sur les zones de plateaux à différents stade d'humidification et de début d'assèchement. En revanche, dans les zones de bas-fonds on peut considérer que les observations sur un mois ne concernent qu'une situation de maximum d'humidité.

Pour toutes les raisons exposées plus haut, et indépendantes de notre volonté, il faut envisager une campagne de mesures complémentaires dans le visible et le proche infrarouge après la saison des pluies 1993.

Vérification des instruments après la campagne

Le radiomètre RST-10 est en fait un prototype, livré in extremis avant la POI d'HAPEX. Les contrôles, post expérience, ont mis en évidence des problèmes d'étalonnage (surtout canal 3,7 μm) et de FOV. Les données acquises sur le terrain devront être réexaminées et réajustées éventuellement après retour de l'instrument du constructeur.

Catalogue des données obtenues durant la POI.

mesures	site	date	heure	instrument
transects Tb	CE jachère	19.08	15h20	PRT-5
	CE jachère	20.08	14h45	"
	CE mil	21.08	14h30	"
	CE mil	23.08	12h40	"
	CW mil	26.08	8h45 à 10h30	"
	CW mil	"	14h25 et 16h40	"
	CW Sable/mil	31.08	09h et 14h05	"
	CW sable	01.09	9h,9h30,10h30	"
		"	15h40	"
	CW LOA	03.09	15h30	"
	CW LOA	04.09	15h50	"
	CW sable/mil	05.09	15h45	"
	CE brousse tig.	10.09		
	"	11.09	02.30	
	"	11.09		
"	12.09			
"	13.09			
visible/PIR	CW sable/mil	08.09	12h30	Barringer
	CE brousse tig.	09.09	9h30 à 11h30	"
	CE " "	10.09	11h30 à 13h30	"
	CE " "	13.09	12h30 à 16h30	"
	CE " "	16.09	16h00 à 17h30	"

Caractérisation des microondes émises par le système sol- Y. Kerr-Lerts végétation

L'objectif de cette étude est d'aboutir à une modélisation fine du transfert radiatif à l'interface sol-atmosphère et à la validation d'un modèle inverse permettant une détermination des paramètres de surface tels que l'humidité des sols et éventuellement le contenu en eau de la végétation à partir de données satellitaires.

Cette étude comporte deux volets:

* les mesures au sol ont pour objectifs de caractériser les types de sol (échantillonnage spatial, détermination de paramètres utiles), fournir une information sur leur variabilité spatiale, servir pour la validation des modèles inverses.

* les mesures aéroportées, à différentes fréquences et différentes polarisations fourniront les données de base nécessaires à l'analyse des problèmes d'intégration spatiale et permettre ainsi le passage aux données satellitaires.

Méthodologie

Mesures aéroportées et spatiales

Le projet repose sur l'acquisition de transects de températures de brillance (capteurs PORTOS pour les fréquences 5; 10.7; 23.8; 36.5, 90 GHz et PBMR (Push Broom Microwave Radiometer à 1.4 GHz) sur un carré de 10 Km² autour d'un des trois supersites à différentes altitudes ayant des résolutions allant de 150 m (taille de la WAB échantillonnée au sol) à 2 km et pour différentes configurations (incidences et polarisations) pour caractériser au mieux les sols nus et les sols couverts.

Au niveau satellitaire les données SSMI et les longs transects PBMR sont destinés à réaliser l'extension spatiale au degré carré et l'utilisation des données du diffusiomètre vent d'ERS-1 permettra de valider le concept de détermination de rugosité "à grande échelle"

Mesures au sol

L. Laguerre (LERTS), A. Chehbouni (ORSTOM),
J.-C. Calvet (CNRM), en relation avec l'expérimentation d' A. Chanzy.
(INRA -Avignon).

du 17 Août au 5 Octobre

La campagne de mesure intensive s'est déroulée sur le WAB savane à Guiera. Les différents types de mesure sont effectués sur des surfaces représentatives du site:

- sol nu (lisse, moyennement rugueux)
- strate herbacée
- arbuste de Guiera

et consistent en une caractérisation de ces surfaces par acquisition simultanée d'un jeu de données radiométriques micro-ondes passives et infra-rouge thermique couplé à un jeu de mesures sol.

Les acquisitions de températures de brillance micro-ondes se font dans les deux polarisations et pour divers angles d'incidence (de 10° à 60°) au moyen du radiomètre de terrain MARMOTTE; les mesures infra-rouge sont effectuées à la verticale (parcelle sol nu), et en incidence (parcelle strate herbacée).

Les mesures sol servent à caractériser les paramètres relativement stables dans le temps (texture, rugosité, densité) et variables dans le temps (profils thermiques et teneur en eau), ainsi que de paramètres concernant la couverture de ces sols (type de végétation, état phénologique, LAI, teneur en eau) et ceci à l'échelle de la parcelle d'expérimentation (5mx5m). (cf § humidité de surface)

Dispositif de mesure

Les deux capteurs sont fixés sur une structure métallique, comprenant :

- un support MARMOTTE:
- mât mobile autour de la verticale de la scène observée (angle incidence de 10° à 60° par pas de 10°) hauteur: 2.50 m

- un support capteur Heinman KT 17;
- mât fixe à la verticale de la scène observée; hauteur: 2.80 m
- accessoirement un radiothermomètre Everest fixé sur le support MARMOTTE

Instrumentation radiométrique

Instruments.	Caratéristiques
Microonde passif * radiomètre portable MARMOTTE	fréquence: 4.2 -4.4 GHZ Polarisation : Horizontale-Verticale
Infra-Rouge Thermique: *Radiothermomètre Heinman KT17	bande : 8 - 14 μm Décteur type A Objectif M
Everest 4000 A	bande : 8 - 14 μm Résolution 0.1°C FOV : 15°

Mesures

Une mesure radiométrique représente la valeur moyennée sur une minute d'une température de brillance (MO et IRT) échantillonnée toutes les secondes, pour une configuration donnée (angle d'incidence, polarisation) et pour une surface donnée

Une expérimentation consiste en une série de mesures radiométriques (différentes incidences et polarisations) sur une même surface et dure en moyenne deux heures.

L'étalonnage de MARMOTTE est réalisé sur le terrain (visée ciel, visée absorbant à température ambiante) en début et fin de chaque expérimentation

L'étalonnage du KT17 a été effectué en laboratoire avant la campagne.

L'étalonnage de l'Everest a été effectué en laboratoire avant et après la campagne.

Matériel utilisé pour caractériser l'état de la surface observée :

Instruments	Paramètres	Observations
rugosimètre à aiguilles	rugosité de surface	résolution : 5mm longueur : 2m
gamma densimètre	densité du sol	prof. 2.5; 5.0; 7.5; 10; 12.5; 15 et 17.5 cm
humidité sol 4 points/parcelle	pesée et séchage	prof. 0.25; 0.75; 1.5; 3; 5 et 8 et 12.5 cm
prélèvement de sol	texture	500g jusqu'à 20cm
thermocouple	température du sol	prof : 1; 5; 10cm

Données obtenues durant la Période d'observation intensive

Jour Julien 1982	Type de surface	Radiométrie			Données Sol					Données Végétation	
		MO	IRT		Humidité ondérale	Tempéra- ture Sol	Densité sèche	Rugosité surface	Texture	Poids Humide et Sec gr.m-2	Hauteur
			KT 17	Eve rest							
247 03/09	Calibration MARMOTTE + PORTOS Aéroport Niamey										
249 05/09	Sol Nu	B	B		B	B	B		B		
251 07/09	Sol Nu	B	B		B	B	B		B		
252 08/09	Sol Nu	B	B		B	B	B		B		
254 10/09	Sol Nu	B	B		B	B	B		B		
	Sol Nu Rugueux	B	B		B	B	B	B	B		
258 14/09	Strate Herbacée	ND	ND		ND	ND			ND	ND	
260 16/09	Calibration MARMOTTE+ PORTOS Aéroport Niamey										
262 18/09	Calibration MARMOTTE+ PORTOS Aéroport Niamey										
261 17/09	Strate Herbacée	ND	ND			ND			ND		
266 22/09	Strate herbacée	ND	ND		ND	ND			ND	ND	ND
267 23/09	Strate Herbacée	ND	ND		ND	ND			ND		
270 26/09	Strate herbacée	ND	ND	ND	ND	ND			ND		
272 28/09	Strate Herbacée	ND	ND		ND	ND			ND	ND	ND
273 29/09	Strate Herbacée	ND	ND	ND	ND	ND		ND	ND		
276 02/10	Sol Nu	B	B		B	B		B	B		
277 03/10	Sol Nu Rugueux	B	B		B	B		B	B		
279 05/10	Sol Nu + Guiera	M	M	M	M	M		M	M		

B Bonne Qualité
 ND Non Dépouillé
 M Moyenne Qualité
 Golden Days

Mesures BDRF et Caractérisation des aérosols atmosphériques

Tanré - LOA

du 24 Août au 10 Octobre

Objectif

Cette opération de recherches doit caractériser et suivre les aérosols atmosphérique ainsi que la fraction Par absorbée par les couverts végétaux. L'analyse est basée sur le BDRF des différents types de couverts en utilisant les mesures aéroportées (Polder) et satellitaires.

1. Déroulement de la campagne de mesure

Le début de l'expérience (du 24/08 au 17/09) a fait l'objet d'une alternance de périodes pluvieuses durant parfois plusieurs jours, et de périodes plus sèches. Le nombre potentiel de jours d'observation n'a été que de 9 jours sur un total de 25 jours, avec parfois passage d'importantes masses nuageuses au cours de la journée, 6 vols POLDER ont malgré tout pu être effectués au cours de cette période. L'atmosphère était claire et relativement stable. L'épaisseur optique a varié entre 0.28 et 0.50 avec une valeur moyenne proche de 0.30. Pendant cette période, les conditions de surface ont radicalement changé, la végétation étant alors en pleine croissance.

Après une période de 4 jours pendant laquelle l'ARAT a changé de configuration, les conditions climatiques se sont nettement améliorées et dans la deuxième phase (du 22/09 au 10/10), des mesures ont pu être effectuées pendant une douzaine de jours. En moyenne l'épaisseur optique a été plus importante de l'ordre de 0.7-0.8 (entre 0.50 et 1.40) avec un événement de brumes sèches du 28/09 au 01/10 où l'épaisseur optique a atteint 1.4. Ce phénomène de brumes sèches, bien qu'inhabituel par son ampleur, n'a rien d'exceptionnel; il a en effet été montré que, dans les régions sahéliennes, l'épaisseur optique en aérosols pouvait être importante en fin de saison des pluies et pouvait présenter des fluctuations journalières importantes (Ben Mohamed et Frangi, 1986; Holben et al., 1991; Faizoun et al., 1991). Cette deuxième période, beaucoup plus favorable aux mesures atmosphériques, nous a permis de bénéficier de conditions de turbidité très différentes. 3 vols spécifiques POLDER ont eu lieu au cours de cette même période, l'épaisseur optique valant respectivement 0.62, 0.78 et 1.30, et à des dates suffisamment rapprochées (6 jours entre les trois vols) pour que les conditions de surface puissent être supposées identiques.

2. Description du site

La station de mesures au sol a, pour des raisons de commodité, été installée sur le site Central Ouest, site le plus facilement accessible puisque situé à environ 50Km à l'est de Niamey avec seulement 8Km de piste (Figure 1). A l'intérieur de ce site, nous nous sommes placés dans un champ de Mil (noté b) très peu dense qui, après avoir été sélectionné comme site test pour ce type de culture, a du être abandonné en raison de la trop faible croissance de la végétation. La position exacte de la station était 13°32.44'N et 2°30.66'E, elle se trouvait à une centaine de mètres de la piste, au Sud de celle-ci afin de minimiser les perturbations

éventuelles dues au soulèvement par les véhicules, les vents dominants étant orientés Sud-Ouest à cette période de l'année.

A l'intérieur de ce site, quatre sous-sites avaient été sélectionnés. Le sous-site a-a' correspondait à une zone de jachère arbustive et herbeuse, la prairie de cette zone a fait l'objet de mesures de BRDF, les zones arbustives n'ont, par contre, pas fait l'objet de mesure pour des raisons techniques, le balayage angulaire ne pouvant s'effectuer que sur des zones uniformes à l'échelle de la dizaine de mètres. Le champ de Mil que nous avons sélectionné se trouvait au Nord de la zone a-a' (noté e). Il est évident que vu la hauteur de la végétation qui compose les zones c et d, guirra et brousse tigrée, aucune mesure n'a été effectuée sur ce type de végétation. Enfin, deux types de sol nu ont été étudiés (notés f et f') situés au Nord-Ouest de la station, le site f' présentant une surface plus rugueuse due à la présence de cailloux.

3. Mesures optiques solaires

La station de mesures optiques du LOA permet d'atteindre les grandeurs atmosphériques suivantes:

- * l'épaisseur optique à une longueur d'onde de référence mesurée à l'aide d'un instrument rudimentaire étalonné à partir de ballons stratosphériques (instrument ETAL) et l'épaisseur optique spectrale (8 canaux) entre 400nm et 2200nm (instrument EOP),
- * le contenu en vapeur d'eau à partir de l'absorption différentielle
- * auréole solaire à 860nm afin de minimiser la contribution de la diffusion moléculaire (instrument AUR),
- * luminance descendante et le taux de polarisation dans le plan principal solaire à trois longueurs d'onde (instrument RADISOL),
- * flux descendant total et diffus à l'aide de pyranomètres entre 400nm et 2.200nm et 700nm et 2200nm (instrument FLUX).

Les longueurs d'onde centrales des instruments à bandes étroites sont reportées dans le tableau I, les journées où des mesures ont pu être effectuées sont reportées dans le tableau II pour les différents capteurs. Les instruments ont été développés et étalonnés au sein du LOA

4. Mesures dans l'infra-rouge thermique

Deux radiomètres Barnes type PRT-5 ont été utilisés conjointement avec la station-sol-LOA pendant l'expérience HAPEX-Sahel. Ce type de radiomètre infra-rouge est habituellement employé comme moyen de détermination de la température du sol ou de surfaces d'eau, en supposant que l'émissivité de la cible soit connue et en faisant appel à une conversion luminance/température basée sur la réponse spectrale du radiomètre. Pendant l'expérience HAPEX-Sahel, un radiomètre, parfois les deux, a été orienté de façon à mesurer la luminance zénithale du ciel, c'est à dire la luminance descendante au nadir quantité reliée à l'émission par les composants atmosphériques. Interpréter de telles données nécessite de connaître les profils verticaux de température et d'humidité relative de l'air. Une fois corrigée, ces mesures nous permettent d'estimer l'émission due aux seuls aérosols désertiques.

Le radiomètre n°278 était équipé d'un filtre couvrant la gamme 8-14mm dont la dynamique a été ajustée afin de permettre la mesure à la

fois de la luminance du ciel et du sol. Sur le radiomètre n°224, le filtre original a été remplacé par un filtre couvrant la gamme 9,5-11,5mm, intervalle spectral dans lequel la luminance du ciel est plus sensible à la présence d'aérosols, l'effet de masque de la vapeur d'eau étant moins important

Les deux radiomètres ont été étalonnés en laboratoire avant la réalisation de l'expérience, en suivant la procédure habituelle: comparaison entre la sortie analogique du radiomètre et la luminance arrivant à l'entrée de son optique, luminance calculée en connaissant la fonction filtre et la température d'un corps noir placé devant le radiomètre. Le corps noir était soumis, successivement à différentes températures comprises afin de couvrir toute la gamme de températures potentielles. La validité de l'étalonnage fait en laboratoire a été vérifiée sur le terrain et la précision des mesures peut être estimée à 5%

Le dépouillement des données de luminance de ciel acquises pendant l'expérience au Niger comprend trois phases distinctes: vérification (et éventuelle correction) des constantes d'étalonnage sur le terrain, conversion des données brutes en luminance, et comparaison des luminances mesurées à des simulations effectuées à partir de la connaissance des profils verticaux de température et d'humidité. Les résultats seront alors interprétés en terme d'épaisseur optique des aérosols, l'impact de la granulométrie mesurée simultanément sera également estimée. Le dépouillement des données de luminance de sol sera effectué de la même façon. (tableau II)

5. Mesures *in situ*

Deux types de prélèvements ont été réalisés durant la campagne : le premier prélèvement se faisait de façon continue (de jour comme de nuit) et le second dépendait des épaisseurs optiques mesurées par la station-sol du LOA.

Pour réaliser ces deux types de prélèvements, nous avons installé deux expériences identiques en parallèle. Elles se composaient d'un filtre nucléopore 0.4 μm monté sur clips, posé sur un porte-filtre et relié à une pompe Réciprotor à l'aide d'un tuyau en polyvinyle de cristal de 10mm. Les pompes étaient elle-même reliées à un compteur Gallus 2000. L'ensemble pompe et compteur se trouvait à une dizaine de mètres d'un mât de 7m de haut et sur lequel se trouve l'ensemble filtre et porte-filtre. Le groupe électrogène était éloigné de plus de 30 m de la station de pompage et dans une direction opposée à celle du vent.

Les prélèvements ont été réalisés de la façon suivante :

=> Prélèvement en continu :

Ce type de prélèvement a été réalisé dans le but de déterminer les variations en fonction du temps de la concentration des différents constituants de la poussière filtrée principalement Al, Si, Fe, S, Na, Ca, Zb et Cu.

De jour, les filtres sont changés toutes les 6 heures. De plus, le débit d'air des pompes est réglé différemment suivant la quantité de poussières présente dans l'atmosphère. S'il y a beaucoup de poussières, le débit est d'environ 4 à 5 l/min; dans le cas d'une atmosphère très claire, il avoisine les 12-15 l/min. De nuit, vu

l'autonomie du groupe électrogène, le pompage durait environ 8 à 10 heures avec un débit d'air d'environ 10 l/min.

=> Prélèvement spécifique :

La station-sol du LOA nous permettait de connaître l'épaisseur optique des aérosols. Afin d'établir une corrélation entre concentrations de particules et épaisseurs optiques, nous avons prélevé les aérosols pendant 3 heures dans le cas où l'épaisseur optique était faible ($t^{aer} < 0.5$) et pendant 1/2 heure pour les fortes turbidités. Le débit d'air était toujours maximal (18 l/min)

6. Mesures de réflectance sur les couverts végétaux

Les réflectances directionnelles de surface en lumière polarisée ont été mesurées dans 4 canaux (Tableau I) . La luminance est mesurée à travers un analyseur dont on fait tourner la direction de polarisation de 45° entre chaque mesure, ceci trois fois pour chaque filtre. On peut donc connaître la luminance totale, la quantité de lumière polarisée ainsi que la direction du plan de polarisation. Deux optiques différentes peuvent être montées et qui donnent respectivement un champ total de 4 ou 16°. Le zéro est mesuré à chaque tour de roue. Les détecteurs visibles sont des photodiodes, le signal infrarouge est mesuré grâce à un détecteur au germanium. L'appareil est étalonné grâce à une sphère intégrante.

L'appareil est placé sur l'axe d'un scanner permettant de faire un balayage de $\pm 75^\circ$ autour du nadir, le balayage de 150° s'effectue en 120s. La potence a une longueur de 1.3m et elle est fixée en haut d'un mât de 7m. Au nadir, l'IFOV est donc de 2m de diamètre. La potence est orientable depuis le sol dans n'importe quelle direction azimutale. L'appareil est fixe et la directionnalité est donc obtenue en visant des portions de sol différentes, il faut donc placer l'instrument à l'intérieur d'une cible homogène sur un rayon de l'ordre de 30m si on veut utiliser le balayage jusqu'à 70° . Trois types de surface ont été échantillonnés, une surface cultivée avec du mil, de la prairie et du sol nu de deux types, lisse et rugueux. (Tableau III)

7. Mesures aéroportées

7.1. Description de l'instrument POLDER.

Le concept instrumental est une caméra grand champ (114 degrés) fournissant des données numérisées (12 bits) dans plusieurs bandes spectrales, entre 430 et 910 nm. Un point de la surface survolé par la caméra est donc vu successivement sous divers angles pendant le passage de l'avion. La tête de visée est constituée d'un objectif télécentrique au plan focal duquel est disposée une matrice CCD (288 sur 384 pixels). Une roue porte filtre entraînée par un moteur pas à pas permet la sélection des bandes spectrales et la mesure de polarisation. La roue porte-filtres présente 9 positions utilisables; pour HAPEX-Sahel elle était équipée des longueurs d'onde suivantes (Tableau I), 443nm et 865 nm en polarisation ce qui représente 6 positions, une mesure de luminance à 550 et 665nm, un filtre étroit à 910nm pour la mesure de la vapeur d'eau. L'étalonnage a eu lieu au LOA avant et après la campagne, les 2 séries de coefficients n'ont varié que de quelques pourcents.

7.2. Plan de vol.

Les données à acquérir imposent de nombreuses contraintes sur les plans de vol qu'il importe de définir précisément. L'acquisition de mesures dans un plan vertical fixe au-dessus d'un point donné, ne pose pas de problème compte tenu des possibilités de visées directionnelles le long de l'axe de déplacement de l'avion, mais pour composer des indicatrices complètes, on doit faire varier l'azimut de prise de vue et donc multiplier les axes de vol.

Pour un site et une acquisition donnée, nous avons défini une direction principale dans le plan du soleil. On a effectué cinq axes de vol, convenablement espacés suivant cette direction (Figure 2). L'altitude de vol était de l'ordre de 15000' (4500m) avec un espacement de 2km environ afin d'avoir un recouvrement entre les axes assez important. Pour obtenir une forte variation azimutale, on a effectué par ailleurs un axe de vol dans une direction orthogonale à la direction principale en survolant le centre du site. Les trois super-sites ont été échantillonnés une fois, le site central West où se trouvait la station a été survolé dans des conditions de surface et d'atmosphère très différentes

7.3. Résultats des vols.

Cela a représenté 8 vols spécifiques POLDER totalisant une quinzaine d'heures (tableau IV). Les valeurs de l'épaisseur optique mesurées au sol simultanément aux vols POLDER sont reportées sur la figure 3. On peut globalement dire que les premiers vol devraient permettre d'étudier l'évolution de la végétation alors que les derniers sont très intéressants pour l'étude de la composante atmosphérique.

Tableau I: Longueur d'onde centrale des différents instruments

Etal	Eop	Aureole	Radisol	Refpol	Polder
450	450			450	443
	550				570
	680			650	670
	870	865	860	850	864
	935				911
	940		940		
	1040				
	1250				
	1650		1650	1650	
	2200				

Jours	Etal.	Eop	Aureole	Radisol	Flux	Prelev	Infra-Rouge.
24/08	X	X	X(2)	X(6)		2_1	
25/08						1	
26/08	X					2	
27/08						0	
28/08						1	
29/08						2	
30/08						0	
31/08						2	X
01/09	X	X		X(4)		3_1	X
02/09						2	
03/09	X	X	X(5)	X(11)		3_1	X
04/09						2	
05/09	X					3	
06/09	X	X		X(1)	X	3_1	X
07/09						2	
08/09	X	X	X(1)			2_1	X
09/09	X	X	X(3)	X(10)		4_2	X
10/09						2	
11/09	X	X	X(4)	X(7)	X(5)	3_1	X
12/09						2	
13/09	X	X	X(5)	X(13)		3_1	X
14/09						3	
15/09						0	
16/09						2	
17/09	X	X	X(3)	X(11)	X(4)	3_1	X
18/09						3	X
19/09						3	X
20/09						1	
21/09						3	
22/09	X	X	X(3)	X(7)	X(4)	3_2	X
23/09	X	X	X(2)	X(5)	X(2)	3_1	X
24/09						3	
25/09	X	X	X(3)	X(8)	X(3)	3_2	X
26/09	X	X	X(2)	X(5)	X(2)	3_2	X
27/09	X	X	X(1)	X(3)		2_1	X
28/09	X	X	X(3)	X(4)	X(3)	3_1	X
29/09	X	X	X(2)	X(4)	X(3)	2_1	X
30/09						2	
01/10	X	X	X(1)			2	X
02/10	X		X(3)	X(4)		3	X
03/10	X	X	X(2)	X(2)	X(4)	2_1	X
04/10	X	X	X(5)	X(2)	X(4)	3_1	X
05/10						0	
06/10						3	
07/10	X	X	X(5)	X(8)	X	3	X
08/10	X	X	X(7)	X(8)	X	3_1	X

Tableau II: Récapitulatif des mesures atmosphériques

Jours	Mil	Sol nu	Prairie
25/08			
26/08			
27/08			
28/08			
29/08			
30/08			
31/08		X (sol 1)	
01/09		X (sol 1)	
02/09			
03/09		X (sol 2)	
04/09			
05/09			X
06/09			X
07/09			
08/09			
09/09	X		
10/09			
11/09			
12/09			
13/09			
14/09			
15/09			
16/09			
17/09	X		
18/09			
19/09			
20/09			
21/09			
22/09	X		
23/09			
24/09			
25/09			X
26/09			X
27/09			
28/09		X (sol 1)	
29/09		X (sol 1)	
30/09			
01/10			
02/10			
03/10			
04/10			
05/10			
06/10			
07/10	X		
08/10	X		X

Tableau III: Récapitulatif des mesures de surface
(sol1: sol lisse; sol2: sol rocailleux)

Tableau IV : Récapitulatif des mesures aéroportées. (i) signifie que le vol a du être interrompu à cause de la nébulosité au dessus du site Central West.

Jours	site	heure/vol	Remarques
24/08	Cent. West	09.25-10.00 /32	vol spécifique
25/08			
26/08			
27/08			
28/08			
29/08			
30/08			
31/08			
01/09	Cent. West	/33	inter. apres 5 mn
02/09			
03/09	Cent. W-E	14.45-16-05/34	vol spécifique
04/09			
05/09			
06/09	South-Cent.W	14.25-15.15(i)/35	vol spécifique
07/09			
08/09			
09/09			
10/09			
11/09			
12/09			
13/09	Cent. West	14.40-15-20/36	vol spécifique
14/09			
15/09			
16/09			
17/09	Cent. West	14.50-15-30/37	vol spécifique
18/09			
19/09			
20/09			
21/09			
22/09	X	/38	vol technologique
23/09			
24/09			
25/09	X	/39	vol flux
26/09	X	/40-41	vol flux
27/09			
28/09	X	/42	vol flux
29/09	Cent. West	07.30-08.15/43	vol spécifique
30/09			
01/10			
02/10	Cent. West	07.50-08.35/44	vol spécifique
03/10			
04/10	Cent. West	07.55-08.40/45	vol spécifique
05/10			
06/10			
07/10			
08/10			

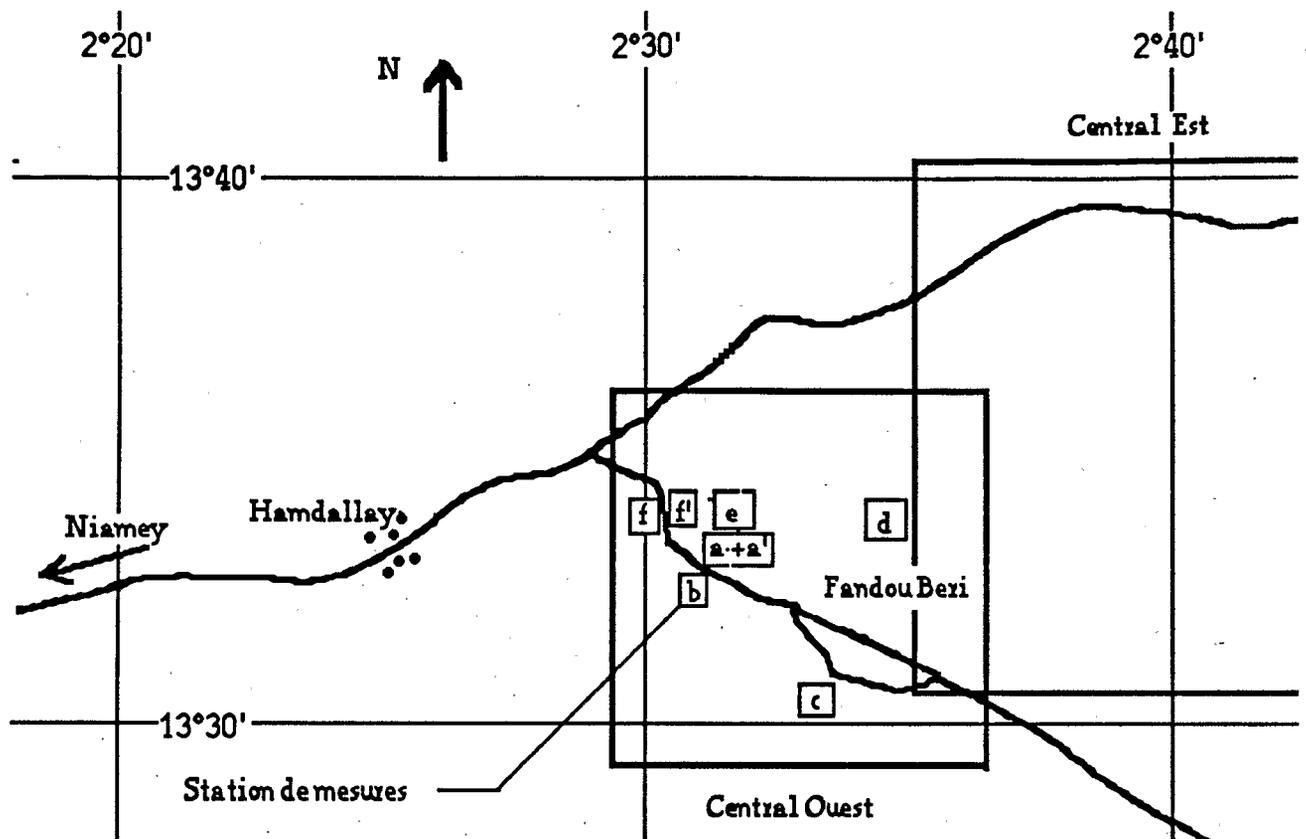


Figure 1: Situation géographique du site Central Ouest et des sites de mesures

Site a-a': Jachère arbustive et herbacée - site de mesures de BRDF pour la Prairie

Site b: Champ de mil - station de mesures

Site c: Brousse tigrée - non analysée

Site d: Jachère dégradée - non analysée

Site e: Site de mesures de BRDF pour le Mil

Site f: Site de mesures de BRDF pour le sol nu lisse

Site f: Site de mesures de BRDF pour le sol nu rugueux

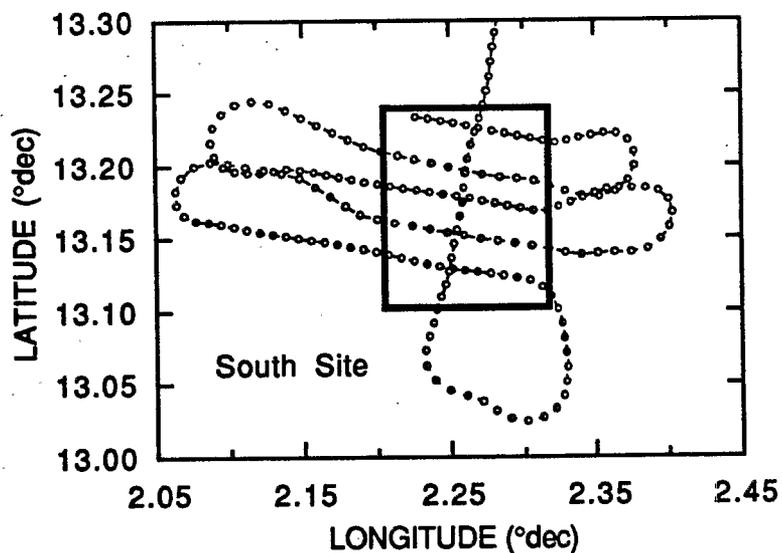
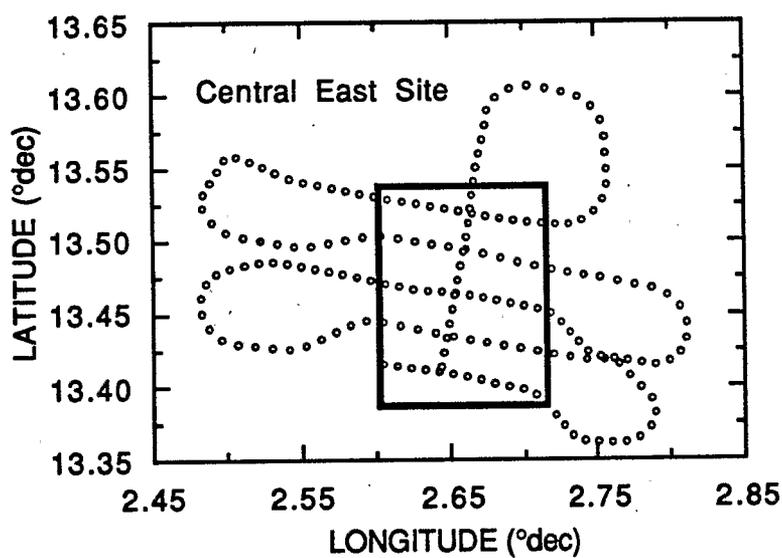
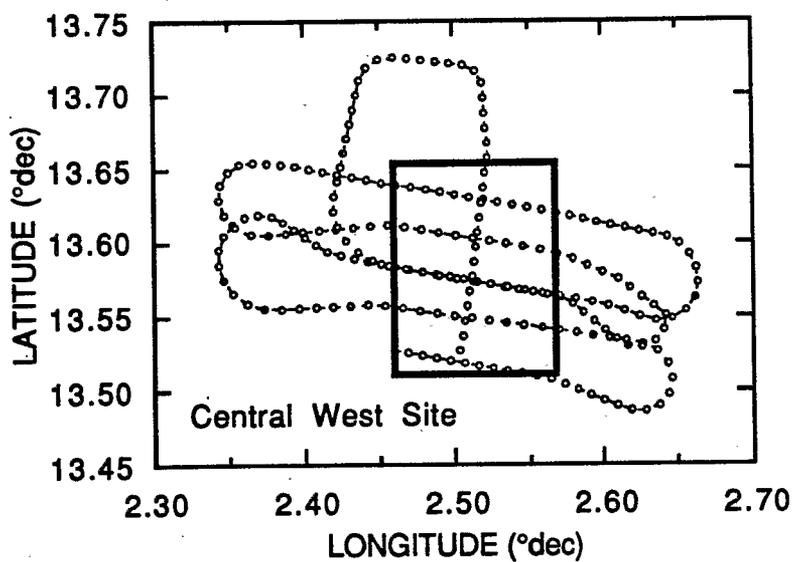


Figure 2 : Plans de vol typique POLDER sur les trois sites.
Le rectangle correspond aux parties utiles du vol