

HAPEX - SAHEL

- = - = - = -

PLAN D'EXPERIENCE

par

M. HOEPFFNER
ORSTOM

J.P. GOUTORBE
DMN/CNRM

P. SELLERS
NASA GSFC

A. TINGA
Univ. Niamey

membres du Groupe de Planification

Montpellier/Toulouse
septembre 1990

HAPEX-SAHEL
PLAN D'EXPERIENCE

RESUME	page 1
1. GENERALITES	page 4
2. DESCRIPTION DU SITE PROPOSE	page 5
2-1 DESCRIPTION DU SITE	
2-2 ETUDES EXISTANTES	
3. STRATEGIE EXPERIMENTALE	page 10
3-1 GENERALITES	
3-2 DUREE	
3-3 APPROCHE GENERALE : STRATEGIE MULTISITES ET MULTIECHELLES	
3-4 RECAPITULATIF	
4- MODELISATION	page 16
4-1 MODELISATION HYDROLOGIQUE	
4-2 MODELISATION DES PROCESSUS DE SURFACE	
4-3 MODELISATION EN TELEDETECTION	
4-4 MODELISATION METEOROLOGIQUE A MESOECHELLE	
5- ORGANISATION	page 19
5-1 ORGANISATION DU PROJET	
5-2 BASE DE DONNEES	
5-3 LOGISTIQUE AU NIGER	
5-4 CALENDRIER	
6- REFERENCES	page 22
ANNEXES	page 24
FIGURES	

PROGRAMME HAPEX-SAHEL

RESUME

Les interactions entre les surfaces continentales et l'atmosphère déterminent en partie l'évolution du système climatique, par le biais des échanges de quantité de mouvement, d'énergie, d'eau et de gaz carbonique. Une compréhension profonde de ces processus est donc nécessaire pour étudier le climat et son évolution. A l'heure actuelle, une des principales voies d'étude est la simulation numérique. Les modèles plus récents incluent une prise en compte du sol continental et de la végétation, permettant de décrire les échanges de vapeur d'eau (et d'autres constituants) avec l'atmosphère. Les résultats sont sensibles à la formulation utilisée. Une description de ces échanges qui soit précise et détaillée ouvrirait de nouvelles perspectives pour l'étude de nombreux problèmes climatiques, en particulier de ceux liés à d'éventuelles modifications de couverture végétale du globe.

Une validation directe à l'échelle globale du fonctionnement des modèles de circulation générale est pratiquement impossible, par suite de la non disponibilité de données globales, autres que celles issues de la télédétection spatiale, technique ne donnant pas accès directement aux quantités et paramètres nécessaires. Une étape intermédiaire très utile consiste à réaliser des études expérimentales sur le terrain pour collecter l'ensemble des données. Des études pilotes en ce domaine ont déjà été réalisées : citons le programme HAPEX-MOBILHY exécuté en 1986 dans le sud-ouest de la France et les programmes FIFE en 1987 et 1989 au Kansas (USA). A ces occasions des stratégies expérimentales ont été élaborées et testées sur le terrain et des bases de données très complètes mises en place. Il s'agit maintenant d'étendre les investigations aux régions non tempérées.

Parmi celles-ci, la zone sahélienne de l'Afrique de l'Ouest est une région particulièrement sensible où la végétation régresse sur de vastes étendues. Des expériences numériques de simulation de la circulation générale de l'atmosphère indiquent qu'une diminution du couvert végétal sur la région pourrait entraîner une baisse de la pluviométrie. Or, l'activité agricole est fortement dépendante des conditions climatiques.

Le projet proposé ici sous l'appellation HAPEX-SAHEL (Hydrologic-Atmospheric-Pilot-Experiment in the Sahel) a pour objectifs l'étude des processus d'évaporation, ainsi que du bilan hydrique et du bilan d'énergie associé dans une optique de paramétrisation du flux à échelle régionale, et l'étude des méthodes d'inversion de données télédéteectées dans ce contexte particulier. Pour atteindre ces objectifs, le programme expérimental doit couvrir une surface suffisante, de l'ordre de 10.000 km², et durer assez longtemps (une saison au moins), pour être compatibles avec la taille de maille des modèles climatiques et les échelles temporelles que l'on cherche à résoudre. Une des difficultés majeures du projet est l'estimation de grandeurs spatialement très variables, comme les composantes du bilan hydrique, à l'échelle régionale. Le développement de méthodes et de modèles de passage de l'échelle locale à l'échelle régionale constitue un objectif intermédiaire fondamental dans ce projet, et prolongera les études déjà réalisées en zone tempérée.

La stratégie expérimentale consiste à observer, sur un périmètre de 100 km x 200 km environ, les éléments du climat, en particulier la pluviométrie, à suivre par télédétection satellitaire l'état de la surface et ses changements et à effectuer de manière extensive des relevés de la végétation. Pour trois régions particulièrement représentatives, à l'intérieur de ce domaine, les observations seront considérablement intensifiées. Selon une méthodologie mise au point lors de l'expérience FIFE, les mesures de flux turbulents seront reliées localement aux caractéristiques du sol et de la végétation et les méthodes inverses de télédétection testées également à cette échelle. Sur chacune de ces trois régions, les observations intensives seront réalisées sur deux ou trois types de couverts dominants. L'extension spatiale sera réalisée par télédétection aérienne près des stations de mesure de flux, puis à partir de télédétection satellitaire et de modélisation pour atteindre l'échelle de tout le domaine. La méthode sera validée au moyen de mesures directes des flux turbulents par avion. Afin d'étudier le

fonctionnement hydrologique de la région, un petit bassin versant sera équipé pour chacune des zones d'investigations intensives. L'organisation dans le temps du projet est également à deux échelles avec un suivi extensif sur plusieurs cycles annuels et une période d'observation intensive en fin de saison des pluies.

Le programme expérimental est prévu pour 1992 avec une période intensive en septembre et octobre. La zone retenue est comprise entre les méridiens 2°E et 3°E et les parallèles 13°N et 15°N. Niamey, capitale de la République du Niger, est située sur la bordure occidentale de cette zone. Le climat, la pédologie et les infrastructures de cette zone ont fait l'objet de nombreuses études. Cette région particulière a été sélectionnée, car elle permet d'atteindre les objectifs scientifiques du programme tout en présentant d'importants avantages :

- elle est, par certaines de ses caractéristiques, typique d'une grande bande zonale du Sahel.
- le climat y est caractérisé par une saison des pluies bien marquées, le "stress" hydrique faisant son apparition lors des épisodes secs.
- un fort gradient nord-sud des précipitations, représentatif du gradient moyen au Sahel, y induit une variation intéressante des conditions hydriques.
- la région est bien adaptée à la télédétection, le relief étant particulièrement peu marqué et la gamme des types de végétation réduite.
- l'impact de l'activité humaine sur le paysage reste assez faible. Il n'y a pas, en particulier, d'exploitation intensive avec pratique de l'irrigation (à l'exception, restreinte, du lit du fleuve Niger) qui viendrait compliquer l'étude de l'impact de l'environnement sur la végétation.
- le développement de la végétation est très rapidement influencé par les changements dans l'humidité des sols, même à courte échelle de temps (deux semaines) .
- le forçage atmosphérique y est relativement simple, par suite de la bonne stationnarité du régime météorologique. Les régions côtières et montagneuses en sont éloignées et, au contraire de ce qui peut être rencontré en Europe, peu de phénomènes complexes de moyenne échelle s'y développent, à l'exception des lignes de grains.
- son régime hydrologique complexe, avec une forte variabilité spatiale et temporelle de l'infiltration et de l'écoulement de surface et d'importantes concentrations de nappes d'eau libre ("mares") dans certaines parties, est caractéristique de l'ensemble du Sahel. La partition des précipitations entre évapotranspiration et drainage profond est un problème clef pour l'ensemble des régions sahéliennes.

Les caractéristiques décrites ci-dessus sont communes pour la plupart à l'ensemble de la zone sahélienne. Les arguments plus spécifiques ayant conduit au choix de cette zone particulière sont :

- l'existence d'organismes de recherche nigériens et internationaux à Niamey ;
- le projet EPSAT-NIGER et les moyens associés (radar à précipitations et réseau de pluviographes).

Ce type d'expérience est encouragé par le Comité Scientifique Mixte du Programme Mondial de Recherche sur le Climat (World Climate Research Programme, WCRP) qui est à l'origine du label HAPEX (Hydrologic-Atmospheric Pilot Experiment). Par ailleurs, HAPEX-SAHÉL inclura de nombreuses études des processus liés à la végétation, et est ainsi une contribution au Programme International Géosphère-Biosphère (IGBP, ou "Global Change").

Le programme est l'oeuvre de scientifiques africains, européens et américains. Le Comité de Pilotage est dirigé par M. HOEPFFNER (ORSTOM) et composé de J.P. GOUTORBE (DMN/CNRM), P. SELLERS (NASA/GSFC) et A. TINGA (Université de Niamey). Des coordinateurs sont responsables pour chacune des parties du programme, en liaison avec un correspondant aérien.

Pour ce qui est des moyens aéroportés, on prévoit la participation de l'avion C-130 de la NASA (National Aeronautics and Space Administration, Etats-Unis). Son équipement de télédétection donnera accès aux parties visibles, infrarouge et hyperfréquence du spectre électromagnétique. On prévoit également la participation des deux avions français équipés pour les mesures des flux turbulents : le Fokker-27 de l'INSU-IGN (Institut National des Sciences de l'Univers, Institut Géographique National) et le Merlin de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN).

En 1990, des études de photo-interprétation sont réalisées sur données SPOT et LANDSAT par les équipes de l'ORSTOM. Un bassin versant est équipé par l'ORSTOM également.

En 1991, les équipements et le dispositif micrométéorologique des sites expérimentaux seront testés au cours de l'expérience "EFEDA" organisée en Espagne (région de Cuenca, La Mancha) sous l'égide du programme EPOCH de la Commission des Communautés Européennes. L'étude de l'humidité des sols commencera.

L'expérience proprement dite aura lieu en 1992, avec une période intensive d'observations programmée à la fin de la saison des pluies en septembre et octobre.

1- GENERALITES

Les échanges de matière et d'énergie à l'interface sol/atmosphère déterminent pour une large part le climat de la terre. Le processus d'évaporation, en particulier, est un important régulateur. Pourtant, le flux d'évaporation est une quantité peu mesurée et mal connue aux échelles régionale et globale. La dépendance du flux d'évaporation aux conditions de surface: humidité du sol, densité et vigueur de la végétation est également incertaine à ces échelles ce qui limite la crédibilité des scénarios climatiques.

Le problème est d'autant plus d'actualité qu'existent des moyens d'observation à échelle planétaire: les satellites, et des outils d'étude: les modèles numériques. Des méthodes d'inversion ont été développées, permettant de déterminer le flux d'évaporation à partir de données satellitaires. En modélisation également les représentations de l'interface sol-atmosphère ont gagné en réalisme. Dans les deux cas se pose le problème de la validation des méthodes.

Une première étape consiste à organiser une étude détaillée de processus pour une zone particulière. De tels programmes ont déjà été mis en oeuvre en milieu tempéré: citons les programmes HAPEX-MOBILHY 1986 et FIFE 1987 et 1989. Suite à ces premières expériences, des procédures expérimentales ont été testées et des jeux de données obtenus. Les méthodes de paramétrisation des processus de surface ont été validées pour les régions tempérées. Les étapes suivantes, telles que définies par exemple dans la stratégie du Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC), sont l'extension de ces études à d'autres milieux et zones climatiques importants, puis le passage à des jeux de données vraiment globaux, obtenues pour l'essentiel par télédétection spatiale.

Dans ce cadre, il est projeté de réaliser, sous le titre de HAPEX II SAHEL un programme d'observation sur la région sahélienne de l'Afrique de l'Ouest dont les objectifs scientifiques généraux seraient:

- l'étude du processus d'évaporation et des bilan d'énergie et hydrique associés dans une optique de paramétrisation du flux à l'échelle régionale. Il s'agit de déterminer comment se réalise la partition de l'énergie radiative incidente sur sol partiellement couvert par la végétation. Il s'agit également de quantifier, à échelle régionale la part respective de l'évaporation, du stockage superficiel des pluies et de l'infiltration vers les nappes profondes.
- l'étude des méthodes d'inversion satellitaires dans ce contexte particulier. Il s'agit d'obtenir des observations in situ pour calibrer les méthodes d'inversion. Puis de développer des techniques d'extrapolation à grande échelle.

Compte tenu des objectifs généraux du programme les points suivants sont particulièrement importants.

- Il s'agit d'obtenir des flux à échelle (régionale), à partir de mesures qui, dans l'état actuel de la technique sont généralement ponctuelles. Un objectif important du programme est de déterminer des techniques d'extrapolation pour passer du local au régional. Certaines hétérogénéités sont dues à l'atmosphère, même si la zone d'étude a été sélectionnée en raison du nombre limité de phénomènes de meso-échelle s'y produisant. Il reste néanmoins à prendre en compte les effets des lignes de grain et des cellules thermiques générées par la convection et éventuellement déformées par le forçage synoptique.
- Toutefois c'est la surface, et en particulier l'hydrologie de surface qui présente la plus grande hétérogénéité. C'est pourquoi ce programme comporte une forte (composante hydrologique). Il s'agit notamment de tester et de poursuivre le développement de la modélisation des processus hydrologiques et du continuum sol-plante-atmosphère. Se pose en particulier le problème de la méthodologie du transfert d'échelle du local au régional pour les composantes du bilan hydrique et de la détermination des échelles intermédiaires pertinentes pour suivre les diverses composantes du bilan. Pour répondre à ces questions des mesures complètes des éléments du bilan hydrique seront réalisées.

- La description de la surface introduit l'étude de la (végétation). Une particularité est le fort couplage entre bilan hydrique et végétation. Le programme doit donc comprendre une importante étude de la végétation, de son évolution et de ses échanges de vapeur d'eau et de gaz carbonique avec l'atmosphère. C'est pourquoi il est prévu de coordonner HAPEX II-SAHEL avec les études de végétation prévues sur l'Afrique de l'Ouest dans le cadre du programme IGBP (International Biosphère Géosphère Program) . Ces études placeront HAPEX II-SAHEL dans un cadre beaucoup plus large. En retour, les études de végétation bénéficieront de cette campagne de mesure intensive. Les méthodes d'extrapolation d'échelles utilisées pour la vapeur d'eau le seront aussi pour le flux de gaz carbonique.

2-DESCRIPTION DU SITE PROPOSE

2-1 DESCRIPTION DU SITE

Le site proposé pour l'expérience est compris entre les longitudes 2 et 3° E et les latitudes 13 et 15° N avec un relief très peu marqué (dénivelée maximale de 100 m sur 10 000 km²).

Niamey, la capitale du Niger, est située à la limite occidentale de cette zone.

La zone peut être considérée comme représentative de la plupart des vastes étendues sahéliennes comprises entre les isohyètes 400 et 800 mm, de N'Djamena à Kayes (Figure N° 1).

Nous allons décrire rapidement les caractéristiques générales de cette zone, en faisant appel aux études existantes.

PEDOLOGIE (Gavaud, 1966; Collinet 1988)

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

Les toposéquences du degré carré (Courault et al. 1990) présentent en général la succession d'états de surface et de sols suivante :

- un plateau cuirassé sur grès, avec culture du mil sur les ensablements et brousse tigrée (Forêt dégradée).
- une pente constituée d'un recouvrement sableux fortement dégradé par l'érosion hydrique en amont et cultivé en mil plus en aval ;
- un bas-fond sableux à nappe temporaire. Du point de vue hydrologique, ce milieu est endoréique à l'amont, à système hydrographique discontinu sur les versants, et à perméabilité en aval.

GEOLOGIE (GREIGERT, 1966 ; GREIGERT et POUGET, 1965)

Le Continental Terminal s'étend en rive gauche du fleuve Niger, depuis Gao, jusqu'au Nigéria.

L'aspect classique du Continental Terminal comprend, sous la carapace ferrugineuse et les alluvions sableux, des grès et, avant le socle cristallin, des argiles grises et blanches.

La nappe du Continental Terminal, très importante, est située au-dessus des formations de l'Eocène et du Crétacé. Elle s'étend sur la rive gauche du Niger depuis le fleuve jusqu'à une ligne allant de Tahoua à Ménaka.

Les nappes captives du Continental Terminal situées à des profondeurs de plusieurs centaines de mètres ne sont plus alimentées actuellement. Du point de vue hydrogéologique, on peut distinguer dans le degré-carré trois zones particulières :

- le Dallol Bosso, "Vallée fossile" située en limite orientale du degré-carré. Il a été creusé au début de l'ère quaternaire et remblayé ensuite par des dépôts alluviaux essentiellement sableux. La largeur de son lit varie entre 10 et 15 km entre Baleyara et Birni-N'Gaouré. Le niveau statique de la nappe phréatique est à moins de 5 m sur la majeure partie du Dallol Bosso (BRGM, 1975) ;
- la "dépression" de DANTIANDOU, située sur le centre du degré-carré, est drainée par le kori (cours d'eau temporaire) du même nom, tributaire du Dallol Bosso, avec une nappe phréatique dont le niveau est situé entre 20 et 40 m ;
- enfin le fleuve Niger avec:
 - * sur sa rive droite le Liptako- Gourma drainé par quelques cours d'eaux temporaires de faible superficie (quelques dizaines de km²) comme le kori Damari .
 - *. sur sa rive gauche, le kori de Ouallam, constitué d'une succession de mares semi-permanentes reliées entre elles lors des événements pluvieux . Les crues les plus importantes approvisionnent la nappe phréatique.

COUVERTURE VEGETALE

a) Végétation naturelle (AMBOUTA, 1984 ; GROUZIS, 1988).

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

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

Les variations de la végétation avec la latitude et la pluviométrie se manifestent surtout dans la réduction des arbres, du sud vers le nord, en taille, en nombre d'espèces et en densité.

On distingue pour la zone sahélienne trois domaines essentiels :

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

b) Cultures

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

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

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

Les formations des vallées sèches (Dallol) sont intensément cultivées (cultures de mil principalement).

Dans ces formations anthropisées, composées de jachères et de champs cultivés, se distinguent différents faciès liés à la densité et à la nature de la strate ligneuse maintenue en place.

CLIMATOLOGIE

Les principales caractéristiques climatiques obtenues à la station synoptique de Niamey-Aéroport, sont celles d'un régime sahélien type. A cela on peut ajouter les points suivants :

La direction de fréquence maximale des vents est de nord-est en saison sèche et de sud-ouest en saison des pluies (figure 2), avec de fortes intensités de vent de courte durée, de direction est-nord-est, pendant les passages des fronts des lignes de grains, au cours de la saison des pluies.

La pluviométrie moyenne annuelle est de 550mm à Niamey. (585 mm en moyenne de 1907 à 1968 et moins de 500mm de 1968 à 1987). Les répartitions spatiales et temporelles, très variables, des pluies sont décrites sur les figures 1 et 4 . L'évapotranspiration potentielle est de 2000mm à Niamey en moyenne annuelle.

Ces lignes de grains donnent lieu à des averses de faible durée pouvant présenter de fortes intensités de pluie en début d'averse suivies d'une "traîne" à intensités plus modérées.

2-2 ETUDES EXISTANTES

Les données hydrologiques acquises aussi bien sur les stations des réseaux nationaux que sur les bassins versants représentatifs ont permis d'évaluer les écoulements dans le Sahel africain à l'aide d'abaques (RODIER, 1975) et de modèles mathématiques (GIRARD, 1975). Il a été démontré (CASNAVE et VALENTIN, 1989) que le pourcentage de couverture végétale et la réorganisation de surface étaient les principaux facteurs explicatifs de l'infiltration , les organisations pédologiques internes n'ayant, sous ce régime climatique, que peu de relation avec l'aptitude au ruissellement. Il est ainsi possible, dans une telle zone, de prévoir certaines caractéristiques de l'hydrodynamique superficielle à partir de l'identification d'états de surface élémentaires, en nombres relativement réduits. Mais il reste à résoudre le problème de la transposition des mesures ponctuelles d'infiltration (obtenues à partir de simulateurs de pluies) à des surfaces plus vastes.

- Le Service Météorologique du Niger, le Laboratoire de Météorologie Dynamique et l'ORSTOM réalisent depuis 1988 une étude de la répartition spatio-temporelle des précipitations sur une partie de la zone d'expérience prévue pour HAPEX II-SAHEL. Cette étude a pour objectif l'estimation des pluies par satellites (programme EPSAT- Niger) (HOEPFFNER et al. 1989) . Un réseau dense de 95 pluviographes à mémoire statique est installé sur le site proposé pour la validation au sol des données METEOSAT et du radar de Niamey .

- Trois organismes français, l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), l'Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des cultures Vivrières (IRAT) et le Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Télédétection Spatiale (LERTS) ont étudié l'évapotranspiration pendant les saisons des pluies de 1988 et 1989. Des mesures micrométéorologiques ont été faites sur trois types de végétation : culture de mil, jachère et végétation naturelle de type brousse tigrée. Des sondages neutroniques ont également été réalisés. Une étude préliminaire de la production primaire nette a également été effectuée. L'étude a été poursuivie en 1989 par l'Institut de Géographie de l'Université de Copenhague.
- Par ailleurs l'ORSTOM a obtenu un jeu complet de données sur une culture de mil de contre saison.
- L'Institut d'Hydrologie de Wallingford étudie, depuis l'été 1988, avec le soutien de l'ICRISAT, le bilan d'énergie et le bilan hydrique sur trois types de couvert végétal (savane naturelle, brousse tigrée et culture de mil). La zone d'étude est située à Sadoré au Sud-Est de Niamey.
- Le Laboratoire d'Aérodynamique de l'Université de Toulouse III, l'Université de Niamey et le Laboratoire d'Optique Atmosphérique de Lille, étudient la dynamique de la couche-limite et les aérosols. L'influence des aérosols sur le bilan radiatif et en télédétection est étudiée par l'Université d'Abidjan et le Laboratoire de Météorologie Dynamique. Dans ce cadre, une campagne de mesures, ECLATS, a été réalisée en 1980, en début de période sèche (Novembre, Décembre), à Niamey, avec comme thème d'étude, l'interaction entre le rayonnement et la turbulence (Druilhet et Tinga, 1982). Cette campagne comportait des mesures aéroportées de flux turbulents en particulier sur une partie du domaine d'HAPEX-SAHÉL (partie nord-est). Il a été observé, à partir de mesures réalisées à bas niveau, que l'hétérogénéité sous-jaçante était considérablement lissée, à tel point que les échelles caractéristiques de température et de vitesse et les flux pouvaient être déduits sans grande variabilité, avec une bonne précision statistique (Druilhet et Durand, 1984, Durand et al., 1988). Cette conclusion n'est toutefois pas nécessairement valable pour la période choisie pour HAPEX-SAHÉL, car l'hétérogénéité induite par les précipitations module la répartition des flux.

Toujours pour la période sèche et avec les mesures de quantité de mouvement recueillies au cours d'ECLATS, une étude préliminaire de la rugosité régionale a pu être initiée. Cette étude a en particulier mis en évidence la nécessité de prendre en compte l'hétérogénéité de l'atmosphère liée aux structures convectives. (Saïd et al, 1991).

Des études sur le thème spécifique du suradiabatisme et du bilan radiatif dans la couche de surface ont également été conduites dans la région sahélienne (expérience YANTALA, 1984). L'objectif était de déterminer la perturbation des fonctions de similarité de la couche limite de surface en condition de forte divergence du flux infrarouge (Pagès et al, 1988, Frangi et Druilhet, 1988).

- Le GIMMS (Global Inventory, Monitoring and Modelling Group) du Goddard Space Flight Center, NASA, U.S.A et de l'Université du Maryland ont étudié la dynamique de la végétation pour toute la zone sahélienne depuis 1981 à partir des données NOAA AVHRR et d'études coopératives sur le terrain.

Cette liste non-exhaustive montre qu'il existe de la part de nombreux laboratoires une tradition de travail dans cette région. Les principaux avantages d'une expérience au Sahel sont en résumé les suivants :

- Le climat est caractérisé par deux périodes bien contrastées et une transition humide-sec ou peuvent se concentrer les observations intéressantes.

- un fort gradient nord-sud des précipitations y induit une variation des conditions hydriques et du couvert végétal.
- elle est adaptée pour la télédétection, le relief étant particulièrement peu marqué et la végétation, bien qu'hétérogène, relativement simple.
- le bilan hydrique et la végétation y sont très fortement couplés.
- le forçage atmosphérique y est relativement simple, par suite de la bonne stationnarité du régime météorologique. Les régions côtières et montagneuses sont éloignées.
- Le régime hydrologique, avec forte infiltration et écoulement de surface et importantes concentrations d'eaux stagnantes dans certaines parties, est caractéristique de l'ensemble du Sahel.

3-STRATEGIE EXPERIMENTALE

Le plan d'expérience découle des objectifs discutés en section 1. Les caractéristiques fondamentales de l'expérience, son extension spatiale, sa durée et l'approche générale de mesures, suivent ces objectifs et sont esquissés ci-dessous.

3-1 GENERALITES

Pour étudier les processus d'interaction entre la surface continentale et l'atmosphère, il faut prendre en compte un site assez grand pour observer les échanges dans la couche limite, pour définir les contributions des écoulements de méso-échelle et pour obtenir un échantillon raisonnable d'observations radiométriques depuis l'espace. Par ailleurs, la stratégie doit permettre de comparer les mesures atmosphériques et de télédétection avec les mesures au sol. Les techniques d'observation en surface imposent alors une expérimentation à petite échelle.

L'échelle spatiale de l'expérience reflète ces deux objectifs ; un grand domaine (100 x 200 km) est défini pour permettre la collecte des mesures de grande échelle (météorologie et télédétection spatiale). A l'intérieur de cette région seront choisis trois supersites cibles des études détaillées de processus biophysiques.

En principe, les mesures de grande échelle devront se poursuivre sans interruption pendant plus de deux années. Certaines mesures aux supersites, par contre, seront concentrées pendant une période d'observation intensive, de six à huit semaines, programmée pour observer la plus grande variation des conditions de surface.

L'expérience couvre une région de 100 km par 200 km environ, voir Fig. 1. Dans cette région, les observations extensives seront collectées pendant les deux années de l'expérience ; quelques unes de ces mesures seront poursuivies après l'expérience principale pour obtenir un enregistrement de durée suffisante. Ces mesures comprennent :

- Des observations météorologiques : un réseau de stations automatiques de surface, une ou plusieurs stations de radiosondage, un radar pluviométrique et d'autres mesures opérationnelles du réseau nigérien.
- La télédétection satellitaire : Les imageries METEOSAT, SPOT, NOAA-pair et impair, LANDSAT seront rassemblées ainsi que des données d'autre provenance (ERSI, MOS,...)
- Les observations hydrologiques : les pluies, les écoulements et les infiltrations sur quelques bassins versants.
- Production primaire: des mesures de physiologie végétale et de structure seront faites, l'accent sera mis sur la fixation du carbone et la transpiration.
- Des relevés : La cartographie pédologique, géologique et écologique de la région sera complétée.

Les observations décrites ci-dessus, de nature extensive, seront menées sans interruption dans le degré carré. Les mesures météorologiques et télédétections seront même archivées pour une zone plus grande, 500 x 500 km, centrée sur la zone d'étude.

La localisation des trois supersites dans le degré carré sera prévue pour fournir une vérité sol des échanges d'énergie et de masse (H_2O et CO_2) entre la surface et l'atmosphère. Elle sera également choisie pour faciliter l'étude du contrôle des échanges par le sol et la végétation et celle des signatures associées en télédétection. Les associations de végétation et de sol de ces supersites seront aussi représentatives que possible du Sahel : brousse tigrée, mil/ jachères et sols sableux couverts de graminées. La plus grande partie des mesures intensives de l'expérience se fera sur ces trois sites.

- . Mesures des composantes du rayonnement
- . Mesures des flux turbulent de chaleur et de masse et de quantité de mouvement en surface et par avions
- . Mesure du flux de conduction dans le sol
- . Mesures physiologiques, écologique et biométrique
- . Mesures des caractéristiques physiques et éventuellement chimiques des sols
- . Mesure des composantes du bilan hydrique du sol
- . Mesures radiométriques depuis le sol et par avion
- . Mesures de transmissivité de l'atmosphère

Ce dispositif concilie les deux objectifs de l'expérience. Les mesures collectées dans le périmètre expérimental permettront de valider les modèles météorologiques munis de paramétrisations des processus de surface et de couche limite. Les mesures aux supersites permettront d'avancer dans la compréhension des processus importants qui gouvernent les flux d'énergie, de chaleur et de masse (H_2O et CO_2) entre la surface et l'atmosphère, et dans la compréhension des processus de production primaire au Sahel. L'étape suivante consiste en leur quantification par télédétection, puis dans la description des conditions aux limites pour la surface aux échelles régionales.

3.2.. DUREE

L'expérience est planifiée pour couvrir deux échelles de temps :

- variations saisonnières

Les données extensives, à l'échelle du grand domaine seront collectées sur une période assez longue pour permettre, entre autres, l'étude des variations saisonnières de la circulation et du transport de l'humidité et de la chaleur dans l'atmosphère, de l'humidité de surface, de l'écoulement de l'eau sur et sous la surface et des variations phénologiques de la végétation. Par conséquent, les mesures extensives doivent être collectées pendant deux ou trois années avec une résolution temporelle assez fine pour décrire les variations significatives. Les observations seront plus fréquentes pendant et après la saison des pluies, quand les conditions de la surface changent rapidement, et espacées durant la saison sèche. C'est le cas en particulier des échantillonnages sur le terrain et de la détermination de la production primaire par télédétection.

- Période d'observation intensive (POI)

Les études des processus biophysiques et certaines études de télédétection sont très coûteuses en personnel et en matériel. Si bien qu'en pratique, il faut programmer l'emploi des équipes et des avions de recherche pendant une période aussi courte que possible, environ six à huit semaines.

La période de l'année la plus intéressante à bien des points de vue est la transition sol humide-sol sec à la fin de la saison des pluies. Pendant cette période, le bilan d'énergie varie fortement en réponse aux modifications de la végétation et de l'hydrologie de surface (Fig. 4). C'est donc la période optimale pour le séjour des équipes de recherche, l'utilisation des équipements spécialisés et l'organisation d'une période d'observation intensive (POI) en septembre et octobre 1992. Bien que le début et la fin de la saison des pluies se présentent assez différemment, la fin est plus prévisible et permet d'étudier à la fois les espèces herbaçées et ligneuses.

La coordination des diverses mesures programmées pour l'expérience serait impossible sans quelques lignes directrices. La fig. 5 présente une proposition de schéma d'expérience.

Les observations de surveillance commenceront au début de 1991. Courant 1991, une base de données centrale sera mise sur pied. Quelques études sont programmées entre le début 1991 et la POI ; elles seront conçues comme expériences pilotes pour la POI.

3-3 APPROCHE GENERALE : STRATEGIE MULTISITES ET MULTIECHELLES

Les mesures de surveillance sont discutées ci-dessous et reprises plus en détail en section 3-4. Ces mesures serviront de cadre aux observations de la POI et fourniront en complément les données nécessaires à l'étude des processus lents comme l'évolution de la végétation.

Les études de la Période d'observations intensives sont assez diverses et complexes pour mériter une discussion détaillée des procédures expérimentales. En bref, les objectifs techniques de la POI sont :

- (i) mesurer les flux de rayonnement, d'énergie, de masse (H_2O et CO_2) et de quantité de mouvement sur trois sites différents représentatifs des différents types de surface dans la zone sahélienne ;
- (ii) relier ces mesures de flux aux paramètres pertinents d'état de la végétation, du sol et de l'atmosphère ;
- (iii) développer les techniques pour quantifier les états de surface (conditions de végétation, d'humidité du sol etc...) associés aux flux en utilisant les données de télédétection par avion et par satellites, ainsi que les données hydrologiques à l'échelle des petits bassins.
- (iv) Mettre en oeuvre et vérifier le transfert de ces techniques développées à l'échelle locale (100 m à 10 km) aux échelles plus utiles pour les études régionales, i.e. 10 km à 100 km. Ce transfert d'échelle utilisera une combinaison des données satellitaires et des mesures de flux régionaux fournis par avions et par radiosondages.

La Fig. 6 montre l'approche qui sera utilisée sur les supersites.

La stratégie est fondée sur la théorie des échantillons : pour chaque type de surface qui peut contribuer significativement aux flux, il faut disposer d'une station de flux. Si possible, ces stations ne seront pas montées trop haut de manière à mesurer les flux émis dans une surface d'influence (le Wind-Aligned Blob ou WAB de FIFE) aussi homogène et bien définie que possible. La définition de ce WAB varie bien entendu avec la direction du vent. L'optimum serait une mesure de flux à 2 mètres au-dessus de la végétation courte et à 2-4 mètres au-dessus de végétations plus hautes. Dans ce cas, les mesures d'accompagnement (écophysiologicals, etc.) seront localisées à l'intérieur du WAB, (Fig. 6 et 7).

Les mesures dans ces surfaces d'influence) seront reliées directement aux mesures par télédétection aéroportée et satellitaire. Ainsi, les modèles qui relient les caractéristiques spectrales aux flux de surface peuvent être vérifiés. L'extrapolation spatiale d'estimation des flux peut alors être réalisée avec des images de télédétection , les données pluviométriques, hydrologiques et météorologiques et avec les modélisations météorologiques suivant une méthodologie qui reste à définir. Ces extrapolations seront finalement comparées aux flux avion.

Parallèlement, les mesures aéroportées permettent une estimation des flux à des échelles intermédiaires entre l'échelle des supersites (quelque km² et l'échelle de 100km²), ce qui peut permettre de développer, de façon quasi autonome, des algorithmes d'intégration spatiale.

(i) Stations automatiques météorologiques

Le site sera équipé d'au moins une station météorologique automatique et si possible de trois, c'est à dire une par supersite.

(ii) Stations de flux

La zone des supersites sera divisée en classes de couvert végétal et de types de sol. Dans chaque classe importante (maximum de trois par supersite) seront montées les stations de mesure des flux de chaleur et de masse H₂O ou CO₂). Les principes de mesure utilisés seront la méthode des corrélations et la méthode du rapport de Bowen.

(iii) Ecophysiologie et Biométrie

Les mesures du fonctionnement ecophysiologique de la végétation (photosynthèse, résistance stomatique etc.) seront faites en conjonction avec des mesures biométriques (indice foliaire, biomasse -sèche et humide-), densité racinaire, proportion de feuilles vertes etc...). Ces méthodes permettront d'estimer la contribution, peut-être non négligeable des arbres à l'évapotranspiration totale.

(iv) Humidité du sol

Un réseau de mesures de l'humidité du sol avec plusieurs techniques sera installé autour des stations de flux. Ces mesures permettront d'évaluer la répartition horizontale, verticale et temporelle de l'humidité du sol et les éléments du bilan hydrique. La capacité thermique sera également déterminée. La méthode inverse sera testée pour extrapoler la mesure de l'humidité de surface et pour déterminer des relations entre potentiel d'une part et conductivité hydraulique et contenu en eau de l'autre qui soient "effectives" (valables à l'échelle considérée). Les techniques de mesure comprendront des mesures gravimétriques, des sondages neutroniques et des mesures de type TDR (Time Domain Reflectivity).

(v) Etudes spectrométriques

Des spectromètres et des radiomètres seront utilisés pour mesurer les caractéristiques spectrales de la végétation et du sol dans l'anneau de garde de la station de flux. Les mesures de APAR (rayonnement utile pour la photosynthèse) sont particulièrement importantes.

(vi) Etudes d'opacité atmosphérique

Des mesures optiques de l'état de l'atmosphère seront utilisées pour corriger les données de télédétection. Les mesures coïncideront avec les vols des avions de télédétection ou les passages de satellites. De temps en temps, des mesures seront prises pendant toute la journée pour étudier les variations de la transmissivité de l'atmosphère.

(vii) Mesures de flux aéroportées

Les avions instrumentés pour les mesures de flux turbulents seront utilisés pour vérifier les schémas d'extrapolation des flux ainsi que pour étudier les gradients verticaux de flux (dans la couche limite) et horizontaux (entre zones humides et sèches).

Afin de vérifier les schémas d'extrapolation, deux sortes de vol seront utilisées, (voir Fig.8 et 9), en fonction de la méthodologie poursuivie: méthode découlant de l'analyse spectrale (Desjardins et al., 1990, Saïd et Druilhet, 1990) ou méthode de bilan. Dans le premier, l'avion spécialisé dans les mesures fines de turbulence (en principe le Fokker F-27 <<ARAT>>) décrira un plan horizontal à très bas niveau, sur une surface de 50 x 50 Km au dessus d'un supersite pour étudier la variabilité spatiale des flux de surface, pendant que le MERLIN IV réalisera des transects à bas niveau sur l'ensemble du degré carré pour assurer les mesures de gradients horizontaux, en relation avec les mesures aéroportées et par satellite. Dans le deuxième cas, les mesures seront réalisées dans une "boite" parallélépipédique dont les deux faces transversales (par rapport à la direction du vent) seront décrites par le MERLIN IV, et les faces inférieure et supérieure par l'ARAT.

Les vols seront programmés pour le milieu du cycle diurne de manière à pouvoir minimiser la variation temporelle des flux.

Les autres vols suivront des transects à quelques niveaux sur des axes nord-sud et est-ouest. Ces mesures fourniront des estimations de la variabilité spatiale des flux et de leur dépendance envers les gradients de couverture végétale et d'humidité du sol à grande échelle.

(viii) Téledétection aéroportée

La téledétection avion permettra d'interpoler entre les échelles couvertes par les mesures sol et l'échelle des observations satellitaires. Comme toutes les autres mesures épisodiques (par exemple l'humidité du sol), ces mesures doivent être programmées pour observer la variation temporelle des conditions de surface. Les études ci-dessous sont prévues :

(i) Mesures micro-ondes (NASA C-130). Le C-130 équipé du PBMR Push Broom Microwave Radiometer) suivra des paliers à basse altitude ($\approx 300-500$ m) et documentera les variations de l'humidité du sol à proximité des stations de flux. Deux ou trois transects, centrés sur les stations de flux fourniront un échantillon suffisant (voir Fig.10). Par ailleurs, des transects seront effectués au-dessus du Dallol-Bosso et pour observer le gradient Nord-Sud à travers le domaine d'expérience, en coordination avec les avions mesurant les flux turbulents .

(ii) Mesures optiques et thermiques : les imageurs TMS, TIMS et peut être ASAS seront disponibles sur le C-130 de la NASA, les autres mesures hyperfréquence seront fournies par l'avion français ARAT équipé du radiomètre PORTOS. Le survol des trois supersites à moyenne altitude permettra l'étude des effets atmosphériques et des variations en résolution spatiale (voir Sellers et Hall (1989)). Simultanément, les données de transmissivité de l'atmosphère seront prises avec l'instrument ATSA monté au-dessus du C-130. Les vols seront programmés pour coïncider si possible avec les passages des satellites. Des mesures hebdomadaires dans le domaine visible, proche infrarouge, infrarouge thermique, ainsi qu'un enregistrement vidéo et des photographies seront réalisés chaque semaine à bord d'un avion léger au moyen d'un système MMR-ICAR.

Pour les mesures PBMR le C-130 volera à basse altitude. Il sera nécessaire de faire les mêmes trajets mais à plus haute altitude pour les mesures optiques et thermiques. Pour une discussion des différents plans de vols adaptés à l'étude des effets d'échelle en liaison avec les données satellitaires, voir Sellers et Hall (1989).

Les données rassemblées au-dessus et à proximité des supersites seront utilisées pour vérifier :

- Les algorithmes d'interprétation des données satellitaires;
- Les modélisations des processus gouvernant les échanges d'énergie et de masse entre la surface et l'atmosphère;
- Les schémas d'extrapolation des flux et des composantes du bilan hydrique de l'échelle locale à l'échelle régionale, ainsi que l'apport de la modélisation hydrologique dans le problème du transfert d'échelle.
- Le lien entre modélisation de l'évapotranspiration et modélisation de la végétation.

3-4 RECAPITULATIF

Sont considérées comme essentielles :

- 1) les mesures d'encadrement sur le long terme
 - Mesures météorologiques (une station par supersite équipée de mesures de rayonnement (rayonnement solaire, rayonnement réfléchi et rayonnement net)
 - Le programme d'hydrologie (pluviométrie, ruissellement et alimentation des nappes)
 - L'acquisition d'un minimum d'imagerie satellitaire (10 couvertures SPOT à chaque supersite pour couvrir le cycle végétatif de l'année 1992, quelques images LANDSAT et un suivi NOAA pour les années 1991 et 1992 à la cadence de 3 images tous les 9 jours pendant la phase de croissance des végétaux.
 - Suivi de l'humidité des sols sur les 3 supersites à des intervalles très espacés (de l'ordre du mois pendant la saison sèche).
 - Relevés de végétation, détaillés à l'échelle du rayon d'influence des stations de mesure de flux (croissance, biomasse, proportion chlorophyllienne), plus lâche à l'échelle des supersites (surface couverte, espèces) et grossier à l'échelle du degré carré.
 - Mesure des propriétés des sols (conductivité thermique et hydraulique, infiltration)
 - Mesures quotidiennes des propriétés optiques de l'atmosphère par transmissomètre opérant à plusieurs longueurs d'onde.

Mesures essentielles pendant la période intensive

- Flux de surface: 2 points de mesure par supersite, dont au moins 1 par la méthode des fluctuations
- Flux avion (flux de chaleur sensible, de vapeur d'eau et de quantité de mouvement)
- dans le rayon d'influence des stations (200m environ)
 - . Relevé des espèces
 - . Biomasse
 - . APAR (Absorbed Photosynthetically Active Radiation)
 - . Matière sèche d'origine végétale.

- . Matière verte par type de végétal (arbres, buissons, herbes). Si possible aérienne et racinaire.
- . Spectrométrie du sol et des feuilles
- . Photométrie atmosphérique.
- Renforcement des mesures pluviographiques sur les supersites
- Mesures complémentaires de l'humidité du sol, en particulier près de la surface, pour obtenir une vérité sol pour les mesures de télédétection PBMR et PORTOS), ceci à échelle très locale
 - . Utilisation de la méthode dite TDR (Time Domain Reflectivity).
- Radiosondages au site central (c'est-à-dire au supersite central) pour corrections atmosphériques et suivi du développement de la couche limite.
- Mesures de télédétection aéroportée et satellitaires définies en 3.3 VIII.

MESURES souhaitées en période intensive

- Points supplémentaires de mesure de flux au sol
- Mesure du flux de CO₂
- Résistances stomatiques
- Respiration du sol
- Chimie du sol
- Compléments de mesures pour la modélisation atmosphérique à moyenne échelle: Sondages déportés, ballons pilotes

4- MODELISATION

L'importance de la modélisation dans ce projet est très grande. En effet ce n'est qu'à l'échelle la plus locale que les flux turbulents et les paramètres qui les gouvernent seront mesurés. Pour réaliser l'extension spatiale vers l'échelle régionale les divers types de modélisation décrits ci-dessous seront utilisés. De manière très préliminaire et en s'inspirant de ce qui a été fait pour HAPEX-MOBILHY (André et Bougeault, 1988), les étapes pourraient être les suivantes :

- Connaissance de la situation météorologique par analyse du champs d'altitude et des cartes sol et si possible adaptation d'un modèle méso-météorologique.
- Estimation des flux à l'échelle des supersites. Il s'agit d'étendre les quelques mesures ponctuelles à un voisinage le plus restreint possible mais toutefois assez grand pour que la surface considérée soit observable par NOAA/AVHRR ou par un avion mesurant les flux turbulents (soit 10 km² environ). C'est ici, pour l'essentiel, la modélisation inverse qui intervient. Les données d'entrée sont les paramètres météorologiques, les paramètres décrivant la surface, des données de télédétection infrarouge et micro-ondes obtenues par avion. La calibration se fait à partir des mesures micrométéorologiques. La modélisation hydrologique à l'échelle du petit bassin versant permet une validation sur le long terme. Une validation plus directe peut être obtenue par avion si la taille des supersites est suffisante.
- L'étape suivante est l'extension à tout le domaine qui nécessite au minimum une modélisation unidimensionnelle, en considérant une juxtaposition de boîtes ou mieux, l'utilisation d'un modèle méso-météorologique pourvu d'un schéma de surface réaliste. Les données d'entrée sont les paramètres météorologiques (en particulier les pluies antécédentes), les paramètres décrivant le sol et la végétation et les données de télédétection. La validation repose pour l'essentiel sur les mesures avion.

4-1 MODELISATION HYDROLOGIQUE

Pluviométrie : Il est proposé de fournir des estimations de la pluie moyenne à des échelles spatiales et temporelles comprises entre $(10 \text{ Km})^2$ et $(100 \text{ Km})^2$; 15 minutes et quelques heures à partir du réseau de 95 pluviographes mis en place dans le degré carré dans le cadre du programme EPSAT-NIGER. Des résolutions plus fines peuvent être envisagées sur certains sites en y augmentant la densité du réseau de pluviographes et en utilisant les données du radar numérisé de NIAMEY.

La caractérisation de la répartition spatio-temporelle des précipitations sahéniennes est par ailleurs la condition nécessaire pour modéliser correctement les écoulements.

Hydrologie

Il s'agit d'obtenir une description réaliste de la redistribution par le sol de la répartition des pluies dans les différents réservoirs de stockage : (mares, cours d'eau, zone non saturée du sol, nappes souterraines) à partir d'une étude de la répartition des états de surface définis comme l'association du couvert végétal et de l'horizon superficiel du sol. Les dimensions caractéristiques pour la modélisation hydrologique sont :

- Le versant de quelques centaines de m^2 ou se forment les écoulements et l'alimentation locale des sols.
- Les bassins versants de quelques km^2 pour l'étude de la concentration des écoulements en émissaires hydrologiques.
- Des bassins versants de quelques dizaines de km^2 pour l'alimentation des nappes.

Il est proposé une échelle de modélisation qui permettrait d'obtenir un champ de valeurs moyennes sur la zone étudiée. La modélisation aux échelles inférieures se fera sous forme stochastique, alors que, aux échelles supérieures, on procèdera à une juxtaposition des modèles de référence. Cette échelle de référence sera définie à partir de l'analyse en cours des images SPOT obtenues sur la zone et en tenant compte des échelles de référence des bioclimatologues. L'expérience déjà acquise en matière de modélisation hydrologique en milieu sahéniens sera approfondie sur les points suivants :

- fonctionnement des zones endoréiques et de la brousse tigrée,
- définition des aires homogènes,
- intégration dans un même modèle de données recueillies à différentes échelles,
- intégration d'une composante stochastique dans une modélisation conceptuelle,
- intégration de données obtenues par les partenaires de l'expérience HAPEX-SAHÉL dans le domaine de l'hydrodynamique des sols et des couverts végétaux.

4-2 MODELISATION DES PROCESSUS DE SURFACE

Les modélisations des processus de surface ont pour objectif de déterminer la partition d'énergie à la surface entre chaleur sensible, chaleur latente et flux dans le sol. Les données d'entrée sont les champs météorologiques et les données de télédétection satellitaires. Les flux obtenus en sortie, à l'échelle de tout le domaine, sont l'objet même de tout le programme.

Le développement et la vérification de ces modélisations utilisera les observations faites aux supersites et dans leur environs en surface (mesures de flux, mesures physiologiques, hydrologiques et télédétectées) et mesures avions (flux et télédétection). Le travail de modélisation sera donc commencé à petite échelle, celle d'une station de mesure individuelle, pour laquelle la vérification est possible. Puis les méthodes d'extrapolation et d'agrégation peuvent être vérifiées avec les flux avion. La modélisation peut se décomposer de la façon suivante

- Modélisation des transferts radiatifs à travers la végétation. Ces modélisations sont nécessaires aux algorithmes de télédétection et pour le calcul du bilan radiatif.
- Modélisation des processus biophysiques : extraction de l'eau par les racines, régulation stomatique, photosynthèse, etc... Cette modélisation est nécessaire pour calculer l'évapotranspiration et la fixation du carbone et pour relier les données de télédétection (APAR, etc...) aux paramètres qui gouvernent les flux et la production primaire.
- Modélisation hydrologique. Le transfert de l'eau dans le sol est important pour l'évaporation, écoulement et le remplissage des nappes.
- Modélisation de couche limite : Il est inutile de faire des modèles de végétation forcés par des données de télédétection et météorologiques sans modélisation appropriée de la couche limite, qui est le réceptacle de ces flux.

4-3 MODELISATION EN TELEDETECTION

La télédétection peut permettre d'accéder à un certain nombre de quantités caractérisant la surface, l'atmosphère et les flux. La détermination de ces quantités est contrainte par l'extension spatiale des mesures (résolution) et leur caractère instantané. De plus la mesure de télédétection peut être affectée par des effets perturbateurs (par exemple l'influence de l'atmosphère sur les mesures de surface) qu'il importe de prendre en compte.

De ce fait l'utilisation des données de télédétection n'est possible que si l'on sait relier la mesure effectuée par le capteur à un paramètre de la surface ou de l'atmosphère par le biais de modèles. Ces modèles inverses peuvent être empiriques, semi-empiriques ou physiques. Il est ainsi possible de déterminer par télédétection, entre autres, l'albedo, la température de surface, le profil de l'atmosphère, le rayonnement global incident, l'évapotranspiration. Il faut toutefois noter que certains de ces modèles reposent sur l'utilisation de données annexes et que d'autres ont une validité limitée.

La validation des sorties de ces modèles peut se faire grâce à des expérimentations de terrain dans la mesure où l'on est capable de passer d'une mesure ponctuelle à une mesure plus globale à l'échelle du pixel.

Les sorties de modèles inverses peuvent également être utilisées comme paramètres d'entrée/forçage des modèles méso-échelle ou comme moyen de validation de ceux-ci. L'expérience HAPEX-SAHÉL, grâce à l'étendue des surfaces instrumentées et à la diversité des moyens de télédétection disponibles (aéroportés et satellitaires, du visible aux micro-ondes), offrira une excellente occasion pour mettre au point, améliorer et valider les modèles inverses.

4-4 MODELISATION METEOROLOGIQUE A MESOECHELLE

Cette technique permet de modéliser l'écoulement atmosphérique sur un domaine de quelques centaines de kilomètres carrés de côté. La résolution horizontale, par ailleurs, peut descendre à une dizaine de kilomètres. Il s'agit d'une technique efficace comme l'a montré l'exemple du programme HAPEX-MOBILHY, de réaliser une extension d'échelle sur le tronçon 10km-30km, c'est-à-dire d'atteindre la taille de la maille d'un modèle climatique. En contrepartie, ces modèles sont exigeants en données d'entrée. Dans le contexte de l'expérience HAPEX II-SAHÉL est prévu un programme de simulations académiques. Le dispositif expérimental permettra une excellente connaissance des échanges sol-atmosphère sur 3 mailles correspondant aux 3 supersites. La surface sera correctement documentée dans le reste du domaine grâce aux réseaux sol en place. Les simulations seront toutefois académiques à cause de la pauvreté du réseau d'altitude, constitué au pire du seul sondage du site central (à cette échelle, le sondage de l'aéroport de Niamey fait double emploi), et au mieux de 3 sondages répartis sur une base TAHOUA-ZINDER-NIAMEY et de quelques sondages par ballon PILOT.

Il est alors envisagé d'étudier les circulations atmosphériques liées à des inhomogénéités du bilan d'énergie en surface, causées, par exemple par une répartition irrégulière des pluies. Quelques simulations permettraient également de préciser l'importance des zones singulières comme la vallée du NIGER et le DALLOL BOSSO (vallée fossile située à l'Est du domaine).

5- ORGANISATION

5-1 ORGANISATION DE PROJET

Le projet est supervisé par un comité scientifique composé des personnalités suivantes:

J.C. ANDRE	(France)
M. BEN MOHAMED	(Niger)
W. BRUTSAERT	(U.S.A)
R. FEDDES	(Pays-Bas)
F. FIEDLER	(Allemagne)
M. GANDAH	(Niger)
A. PERRIER	(France)
J. SHUTTLEWORTH	(Grande-Bretagne)

Il est coordonné par un comité de pilotage dirigé par M.Hoepffner (France) et composé de J.P. Goutorbe (France), P. Sellers (U.S.A) et A. Tinga (Niger).

Le projet est actuellement divisé en 11 thèmes, avec un responsable par thème. Les thèmes identifiés sont les suivants :

Réseaux météorologiques,
hydrologie,
humidité du sol,
écologie et végétation,
flux de surface,
flux aériens,
télé-détection,
modélisation, sol-végétation
modélisation méso-échelle,
climatologie,
base de données.

La liste des responsables de thèmes est donnée en annexe.

Pour la période à venir, et pour les besoins opérationnels il est proposé de resserrer quelque peu l'organigramme du projet en regroupant des activités voisines. Il est prévu de fédérer les thèmes en 4 groupes :

- Télédétection, corrections et calibrations,
- Météorologie, climatologie, modélisation mésoéchelle et modélisation grande échelle,
- Hydrologie et humidité,
- Flux de surface, flux aériens, écologie et végétation, modélisation sol-végétation.

5-2 BASE DE DONNEES

Une base de données centrale est essentielle pour assurer le succès du projet. Il est important que la base de données fonctionne avant la période intensive d'observation pour permettre l'harmonisation des formats entre équipes participantes. La mise en oeuvre de la base de données devra s'inspirer des principes suivants :

- L'organisation doit être logique et si possible calquée sur l'organigramme du projet (cf-4.1). En conséquence, la hiérarchie des catégories de données doit suivre le découpage naturel du projet: mesure de flux de surface, mesure physiologiques. Les considérations purement informatiques (rapidité d'accès, etc) doivent être maintenues au second rang.
- La base de données doit pouvoir évoluer pour s'adapter aux besoins des utilisateurs. Il est probable que de temps à autre une restructuration sera indispensable. Cette évolution devra se faire, comme dit précédemment en homologie avec l'organisation scientifique du projet, qui peut évoluer. Pour la bonne marche des opérations, le comité scientifique aura autorité pour autoriser ces changements.
- Pour démarrer rapidement, il est nécessaire d'utiliser l'expérience d'autres organismes et les logiciels du commerce. De ce point de vue, l'expérience du <<FIFE Information System>> sera particulièrement utile.

Dès que l'organisation du projet est en place, les participants doivent se mettre d'accord sur les formats de données et exprimer leurs besoins. Le responsable de la base de données doit assurer la coordination nécessaire.

5-3 LOGISTIQUE AU NIGER

Infrastructure

Les réseaux météorologiques et hydrologiques au Niger sont gérés par la Direction de la Météorologie Nationale et par la Direction des Ressources en Eau, respectivement. La station de Niamey possède une station de radiosondage et un radar météorologique.

Parmi les organismes actifs au NIGER, citons :

- Le Laboratoire de Physique Atmosphérique et l'Institut de Radio-Isotopes de l'Université de NIAMEY.
- Le Centre Sahélien de l'ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics)
- L'Institut National de la Recherche Agronomique du Niger (INRAN)

- Le Centre Régional de Formation et d'Application en Agrométéorologie et Hydrologie Opérationnelle ou AGRHYMET (CILSS-OMM-FAO-PNUD)
- Les mission de l'ORSTOM et du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

5-4 CALENDRIER

Le calendrier des opérations est synthétisé sur la figure 11. Le programme s'insère tout d'abord dans des études de végétation (programme SALT sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, programme SEBEX (IH/Université d'Edimbourg) sur le site de SADORE, programme de l'ORSTOM au site central). Ces études s'étendent sur les années 1990, 1991, 1992 et au-delà.

L'étude de la pluviométrie, grâce au programme EPSAT, s'inscrit également dans la durée puisque, en fin 1992, 5 ans de mesures seront disponibles.

Mesures d'encadrement : elles sont prévues pour l'année 1992 et si possible pour certaines d'entre elles pour une partie de 1991.

Les prélèvements nécessaires à l'étude des propriétés des sols seront réalisés en 1991.

Période intensive : la période intensive reste fixée aux mois de septembre et d'octobre 1992. Une période d'intercalibration, en particulier pour les systèmes de mesure du rayonnement net et des mesures de flux est prévue avant que ne débute la période intensive. Il faut également noter qu'une partie de l'équipement utilisé pour HAPEX II-SAHÉL sera testé au cours de l'expérience EFEDA en Espagne en 1991.

Cette édition du Plan d'Expérience datée de septembre 1990 a bénéficié des remarques qu'ont pu faire R. CUENCA (OSU), J. GASH (IH), Y. KERR (LERTS), S. PRINCE (NASA-GSFC) et F. SAID (L.A.) à la lecture de la version précédente (juin 1990).

6 -REFERENCES

André J.C., Goutorbe J.P., Perrier A., 1986a

"HAPEX-MOBILHY: A hydrologic atmospheric experiment for the study of water budget and evaporation flux at the climatic scale", Bull.Am.Meteorological Society, 67, 138-144.

André J.C and Ph.Bougeault., 1986b

On the use of HAPEX data for the validation and development of parameterization schemes of surface fluxes.

Proceedings of the second meeting of the scientific steering group on land surface processes and climate.

Ambouta K., 1984

Contribution à l'édaphologie de la brousse tigrée de l'ouest nigérien, Thèse Doctorat-Ingénieur, Université Nancy I.

BRGM, 1985

Schéma directeur d'aménagement hydraulique du Dallol Bosso. synthèses. Ministère des Ressources Animales et de l'Hydraulique Niger/BRGM, Orléans, 34 pp.

Casenave A., Valentin C., 1989

Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration, didactiques ORSTOM-Paris, 229 pp..

Collinet J., 1988

Comportements hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest. Evolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluie, Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.

Cornet A., 1989

Complément au programme HAPEX-SAHEL concernant l'étude de la végétation ORSTOM, Montpellier 2 p..

Courault D., D'Herbes J.M., Valentin., 1990

Le bassin versant de Sama-Day. Premières observations pédologiques et phytoécologiques, ORSTOM, Bondy, 36 p..

Desjardin R.L., Schuepp P.M., Mac Pherson I.P., 1990

Spatial and temporal variation in CO₂ sensible and latent heat fluxes over the FIFE site AMS FIFE symposium, Anaheim, Cal., AMS, Boston, Mass., USA : 46-50.

Druilhet A et Tinga A., 1982

Présentation de l'expérience ECLATS. La Météorologie VI Série n°29.

Druilhet A et Durand P., 1984.

Etude de la couche limite convective sahélienne en présence de brumes sèches (Expérience ECLATS).

Boundary layer Meteorology 28.

Durand P, Frangi J.P and Druilhet A., 1988

Energy budget for the Sahel surface layer during the Eclats experiment.

Boundary layer meteorology 42.

Frangi J.P et Druilhet A., 1988.

Rôle du sol dans les échanges d'énergie dans la couche de surface sahélienne.
Ann. Geophys., 6, 1, 81-88.

Gavaud M., 1966

Etude pédologique du Niger Occidental, ORSTOM-Rép. du Niger-Service du Génie Rural, Dakar-Hann, 2 tomes, 513 pp..

Girard G., 1975

Modèles mathématiques pour l'évaluation des lames écoulées en zone sahélienne et leur contrainte, cahiers ORSTOM, série Hydrologie, volume XII, N°3, 189-221.

Greigert J., Pougnet R., 1965

Carte géologique de la République du Niger au 1/2 000 000, BRGM, Paris.

Greigert J., 1966

Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des Iullemeden (Afrique Occidentale), mém.BRGM, Pub., 208 pp.

Grouzis M., 1988

Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens, Collection Etudes et Thèses, ORSTOM, Paris, 336 pp.

Hoepffner M., Gathelier R., Vauchel Ph., 1983

Les bassins versants de Galmi, Ibohamane et Tegueleguel, ORSTOM, Niamey.

Hoepffner M., Lebel T., Sauvageot H., 1989

EPSAT-Niger : A pilot experiment for rainfall estimation over West Africa. WMO-IAHSETH. International Workshop on precipitation measurement. Saint Moritz 4-7 Décembre 1989 : 251-258.

Pagès J.P., Frangi J.P., Durand P., Estournel C. et Druilhet A., 1988

Etude de la couche limite de surface sahélienne. Expérience "YANTALA".
Boundary layer meteorology 43, 183-203.

Rodier J., 1975

Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. Collection Travaux et Documents N°46, ORSTOM, Paris, 121 p..

Saïd F. and Druilhet A., 1990

Experimental study of the atmospheric marine boundary layer from in-situ aircraft measurements (TOSCANE-T Experiment) : variability of boundary conditions and eddy flux parameterisation.
A paraître dans Journal of Appl.Met.

Saïd F., Benech B., Druilhet A., Durand P. and De Abreu Sa L., 1991.

Influence of large-scale thermic cells on the estimation of roughness length in convective boundary layers (ECLATS experiment).
A paraître dans Ann.Geoph.

Sellers P.J., Hall F.G., 1989

FIFE 89-Experiment plan, code 923, Nasa-GSFC, Greenbelt, MD 20771, USA, 178 p+appendices.

A N N E X E S

1) Liste des coordinateurs, membres du Groupe de Coordination.

RESEAU METEOROLOGIQUE	Pierre BESSEMOULIN	CNRM 42 av. G. Coriolis 31057 TOULOUSE Cédex (France)
HYDROLOGIE	Thierry LEBEL	ORSTOM B.P. 5045 34032 MONTPELLIER Cédex (France)
HUMIDITE DU SOL	Richard CUENCA	Department of Agricultural Engineering Oregon State University CORVALIS OR 97331-3906 (USA)
ECOLOGIE ET VEGETATION	J.S. WALLACE	Institute of Hydrology WALLINGFORD OX 10 8BB UK
FLUX MESURE AU SOL	John GASH	Institute of Hydrology WALLINGFORD OX 10 8BB UK
FLUX MESURES PAR MOYENS AEROPORTES	Bruno BENECH	Laboratoire d'Aérodologie CRA 65300 LANNEMEZAN (France)
TELEDETECTION	Yann KERR	LERTS 18 avenue E. Belin 31055 TOULOUSE Cédex (France)
MODELISATION AU DESSUS DE LA CANOPEE	Pavel KABAT	Winand Staring Centre (WSC) Postbus 125 6700AC WAGENINGEN THE NETHERLANDS
MODELISATION MESOECHELLE	Robert ROSSET	LAMP/OPGC 12 avenue des Landais 63000 CLERMONT-FERRAND (France)
CLIMATOLOGIE	Bernard FONTAINE	Centre de Recherche de Climatologie Université de Dijon 36 rue Chabot Charny 21000 DIJON (France)
BASE DE DONNEES	Christine MAZAUDIER	CRPE 4 avenue de Neptune 94107 ST-MAUR-DES-FOSSES (France)

2) Participants potentiels au projet (1/09/1990)

HYDROLOGIE	ORSTOM INRAN Institut of Hydrology (IH)	<u>LEBEL</u> , LEBARBE, LENOIR MANOU BROMLEY	
HUMIDITE DU SOL	WINAND STARING CENTRE (WSC) U. WAGENINGEN U. READING	KABAT STRICKER DUGDALE) SITE)) NORD
	OREGON STATE UNIVERSITY (OSU) INRA Institut de mécanique de Grenoble (IMG)	<u>CUENCA</u> BRUCKLER VAUCLIN) SITE)) CENTRAL)
	IH	BROMLEY, COOPER) SITE SUD- OUEST
	ORSTOM INRAN U. NIAMEY	GALLE OUATTARA SANI DAOU DA) suivi long)) terme
FLUX AU SOL	U. WAGENINGEN WSC U. READING U. COPENHAGUE	DE BRUIN KABAT DUGDALE SOGAARD)) SITE) NORD)
	CNRM ORSTOM	BESSEMOULIN MONTENY, LHOMME, BRUNEL) SITE)) CENTRAL
	IH U. EDINBURGH	<u>GASH</u> JARVIS) SITE SUD-) OUEST
METEOROLOGIE	CNRM	<u>BESSEMOULIN</u> , GOUTORBE, BOULAMA	
COUCHE LIMITE	Centre de Recherche de Physique de l'Environnement (CRPE)	MAZAUDIER	

FLUX AVIONS	Laboratoire d'Aérodologie (LA)	<u>BENECH</u> , SAID
VEGETATION	IH ORSTOM U. MARYLAND INRAN U. NIAMEY	<u>WALLACE</u> D'HERBES PRINCE MAMAN KARIMOU
CLIMATOLOGIE	U. DIJON ORSTOM IMAGEO	<u>FONTAINE</u> GUILLOT COUREL
MODELISATION 1D	WSC U. WAGENINGEN U. AMSTERDAM U. NEWCASTLE U. DAVIS	<u>KABAT</u> , BASTIAANSSEN, MENENTI GOUDRIAAN GRIEND MAUDSLEY HOPMANS
MODELISATION 3D	LAMP CNRM	<u>ROSSET</u> NOILHAN
BASE DE DONNEES	CRPE ORSTOM CNRM	<u>MAZAUDIER</u> LEBEL, DELCLAUX TARRIEU
(Ce thème bénéficiera de l'expérience de l'équipe FIFE).		
TELEDETECTION	LERTS/CNES INRA ORSTOM LSIS/GSTS U. BERLIN UCL (GB) NASA/GSFC USDA USGS	<u>KERR</u> BRUCKLER, LAGOUARDE COURAULT, VALENTIN, POUGET STOLL BOLLE MULLER SELLERS, CHOUDHURY SCHMUGGE LAUER

3) Comité de Pilotage

Michel **Hoepffner** - ORSTOM - BP 5045 - 34032 Montpellier CEDEX 01-FRANCE
Tel (33) 67 61 74 00 - Telefax: (33) 67 54 78 00

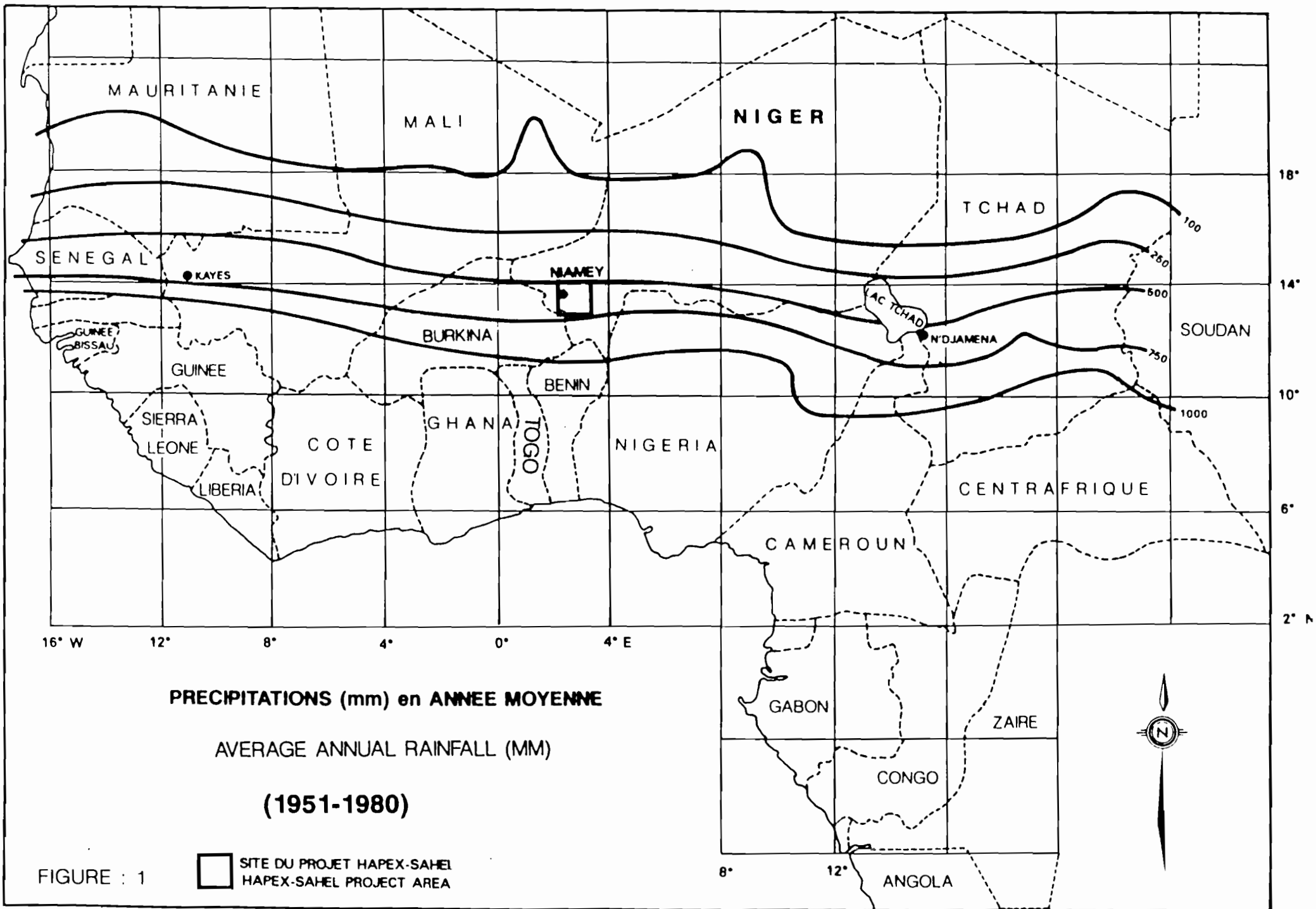
Jean Pierre **Goutorbe** - CNRM - 42, Avenue G. Coriolis - 31057 Toulouse CEDEX-France
Tel (33) 61 07 93 53 - Telefax: (33) 61 07 96 00

Piers **Sellers** - NASA/GODDARD Space Flight Centre-Biospheric sciences branch.
Greenbelt-MD 20 U.S.A
Telefax: (1) 301 286 9200

Abdoulaye **Tinga**-Faculté de Sciences de NIAMEY-Dept.de physique - BP 10662 - Niamey-Niger

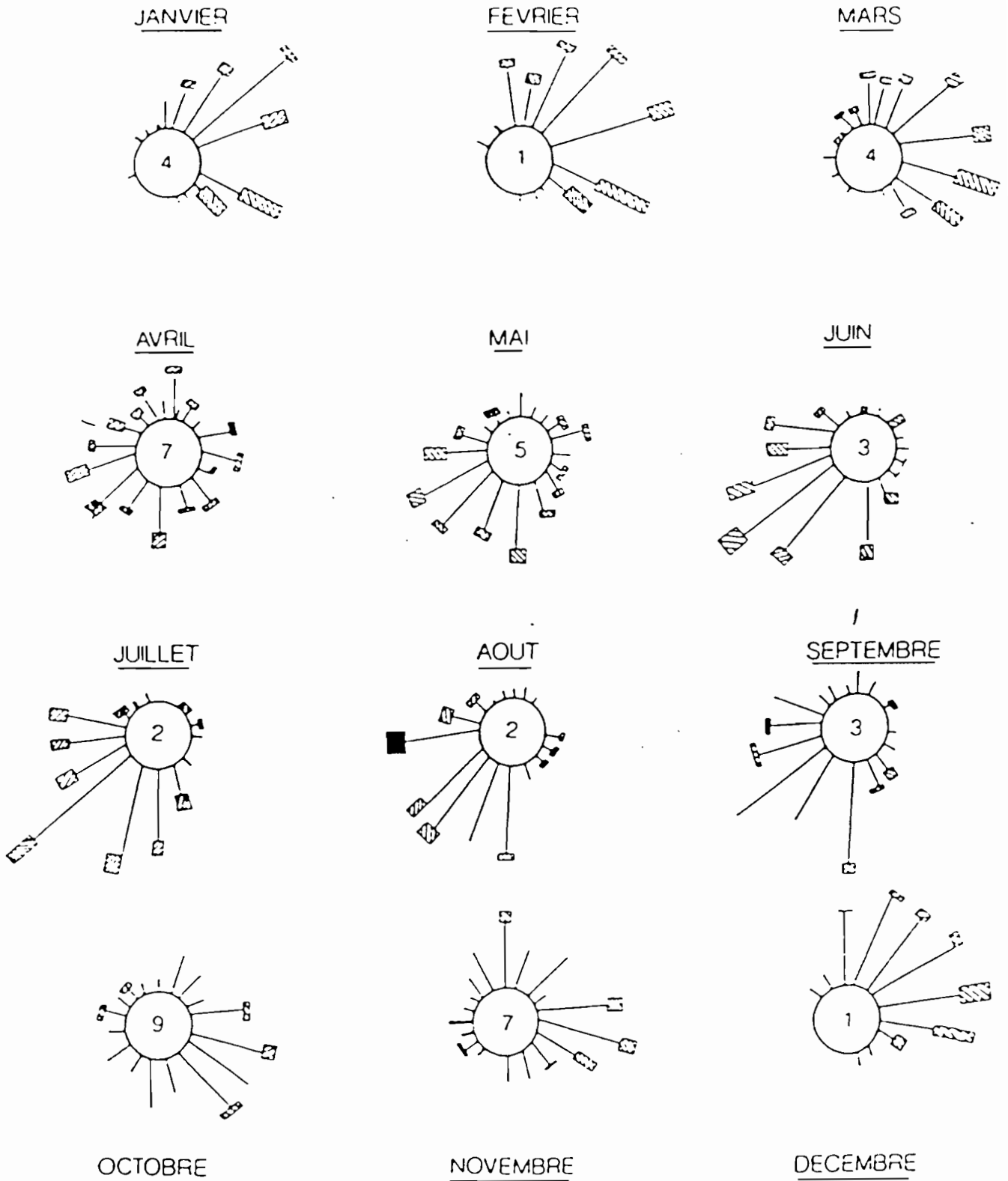
FIGURES

- Fig. 1 : Localisation du site
- Fig. 2 : Rose des vents à Niamey
- Fig. 3 : Localisation du domaine d'expérience et des supersites ; emplacement de la station de radiosondage et de la station synoptique de NIAMEY ; zone de couverture du radar.
- Fig. 4 : La période d'observations intensives est programmée pour suivre l'assèchement du sol et les changements associés du climat et de la végétation.
- Fig. 5 : Dispositif expérimental au supersite.
- (1) Mesure des flux turbulents
 - (2) Instrumentation de la zone d'émission des flux (en Anglais WAB, pour Wind Aligned Blob), en mesures biométriques, écophysiologicals, d'humidité des sols etc....
 - (3) Télédétection aéroportée au dessus du <<WAB>>
 - (4) et (5) Dispositif d'extrapolation du résultat très local obtenu à l'échelle du <<WAB>>: Réseau météorologique (4) et télédétection satellitaire (5) la télédétection satellitaire (5).
 - (6) Validation des résultats obtenus à l'échelle du supersite et de ses environs: flux turbulents mesurés par avion.
- Fig. 6 : Dispositif de validation aux environs des stations de flux : humidité du sol, spectrométrie, biométrie, écophysiology etc...
- Fig. 7 : (Figure 2. 3. 4, 1a du rapport FIFE-89)
Contribution relative au flux d'une source amont en fonction de la hauteur de mesure.
- Fig. 8 : Plans de vol des avions de mesure de flux . Couverture d'un supersite.
- Fig. 9 : Plans de vol des avions de mesure de flux . Méthode du bilan.
- Fig. 10 : Plan de vol de l'avion C-130 de la NASA équipé du PBMR (Push Broom Microwave Radiometer) aux environs des supersites. Trois ou quatre axes parallèles seront parcourus pour couvrir les <<WAB>> des supersites et obtenir un échantillon des conditions dans la zone observée par les avions de flux.
- Fig. 11: Calendrier ; préparation - mise en place - Période d'observation intensive.



DISTRIBUTION DE LA DIRECTION ET DE LA VITESSE

DU VENT EN % A NIAMEY (niger) EN 1988



le pourcentage des vents calmes (vitesse < 1 mm/s) est noté dans le cercle

— vitesse entre 1mm/s et 5mm/s ▨ vitesse entre 6 m/s et 10 m/s

■ vitesse supérieure ou égale à 11m/s

échelle : 1 mm = 1%

FIGURE : 2

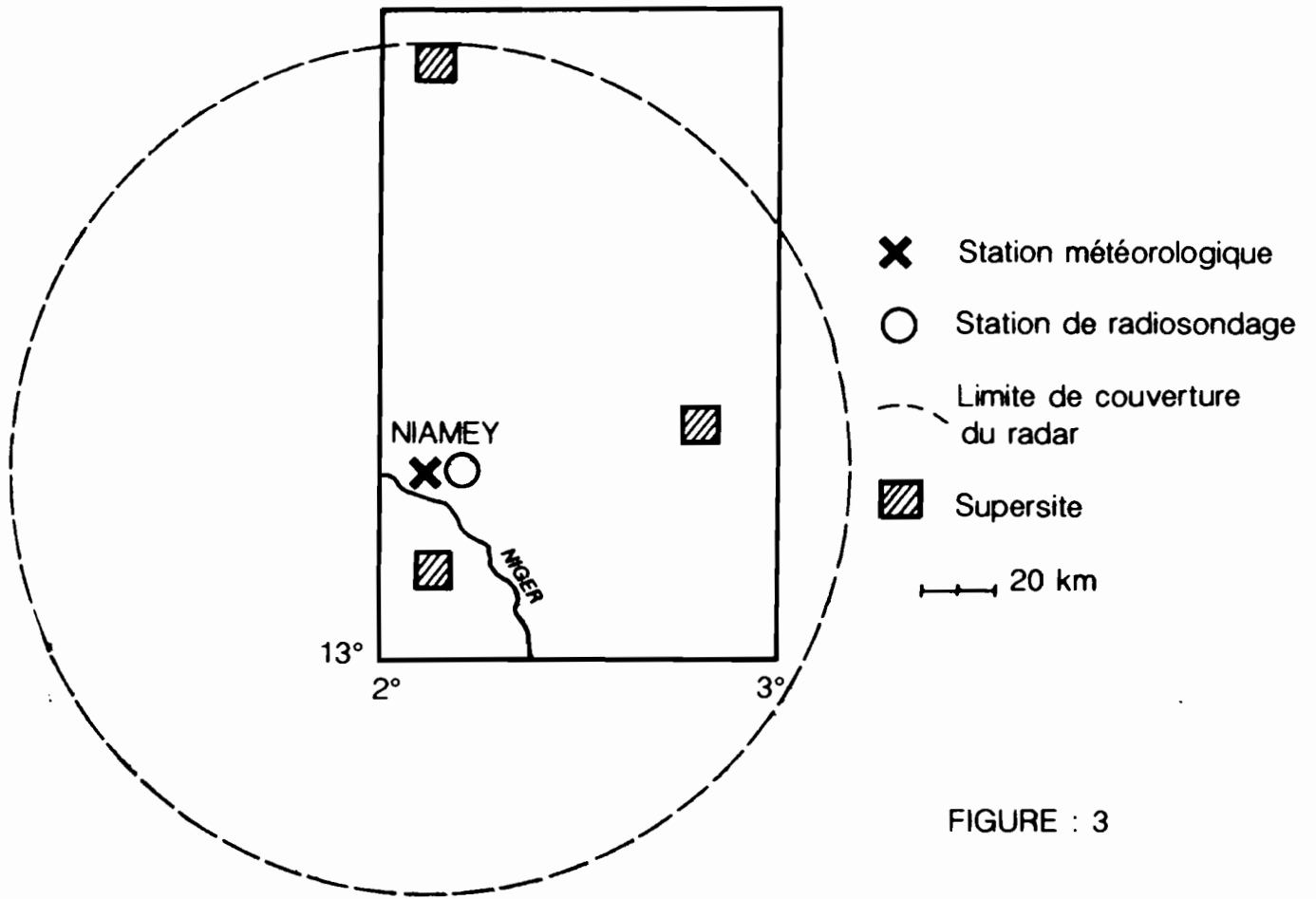


FIGURE : 3

LOCALISATION DU DOMAINE D'EXPERIENCE ET DES SUPERSITES

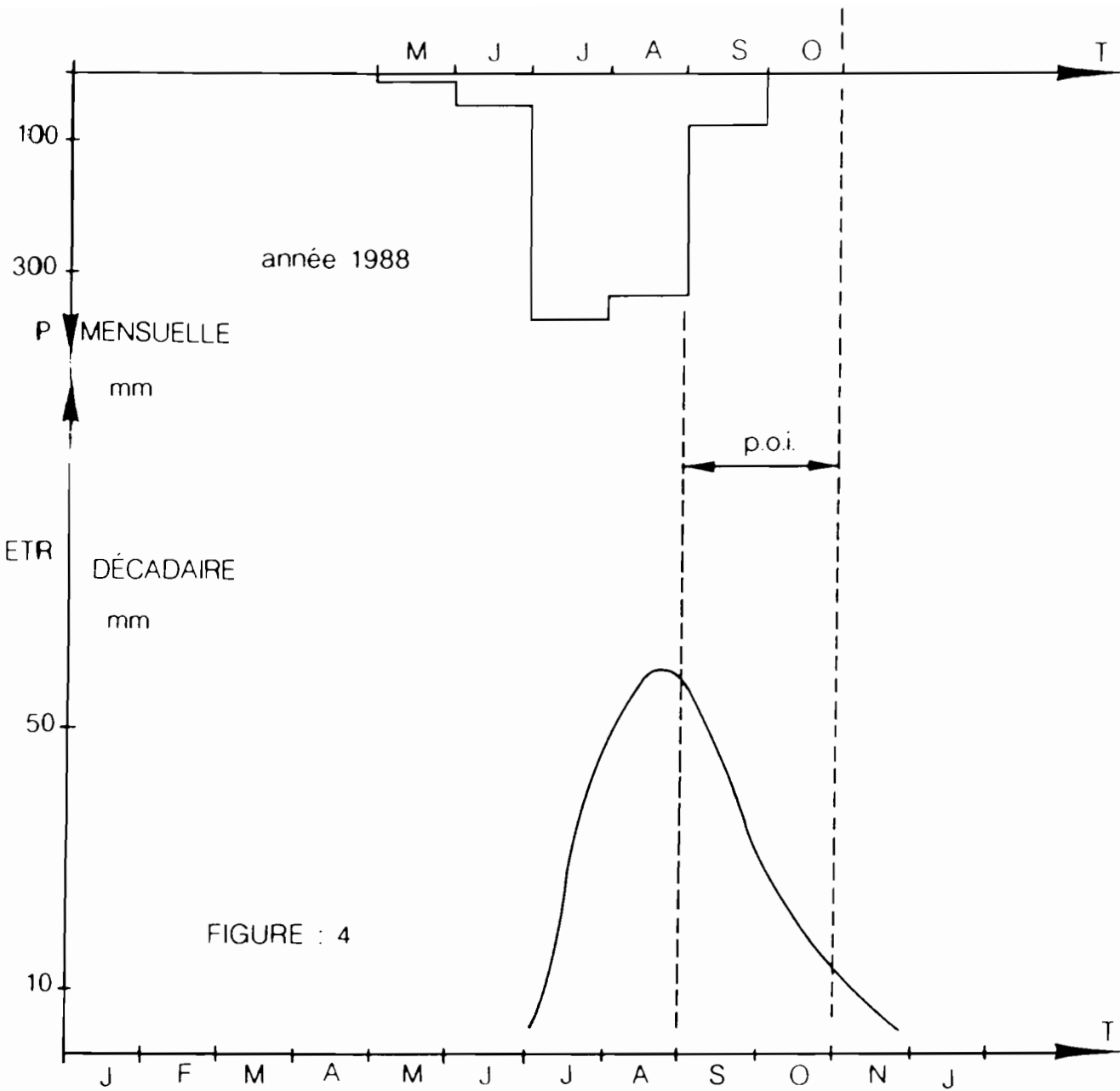


FIGURE : 4

PERIODE D'OBSERVATIONS INTENSIVES

(PROGRAMMÉE POUR SUIVRE L'ASSÈCHEMENT DU SOL ET LES CHANGEMENTS ASSOCIÉS
DU CLIMAT ET DE LA VÉGÉTATION.)

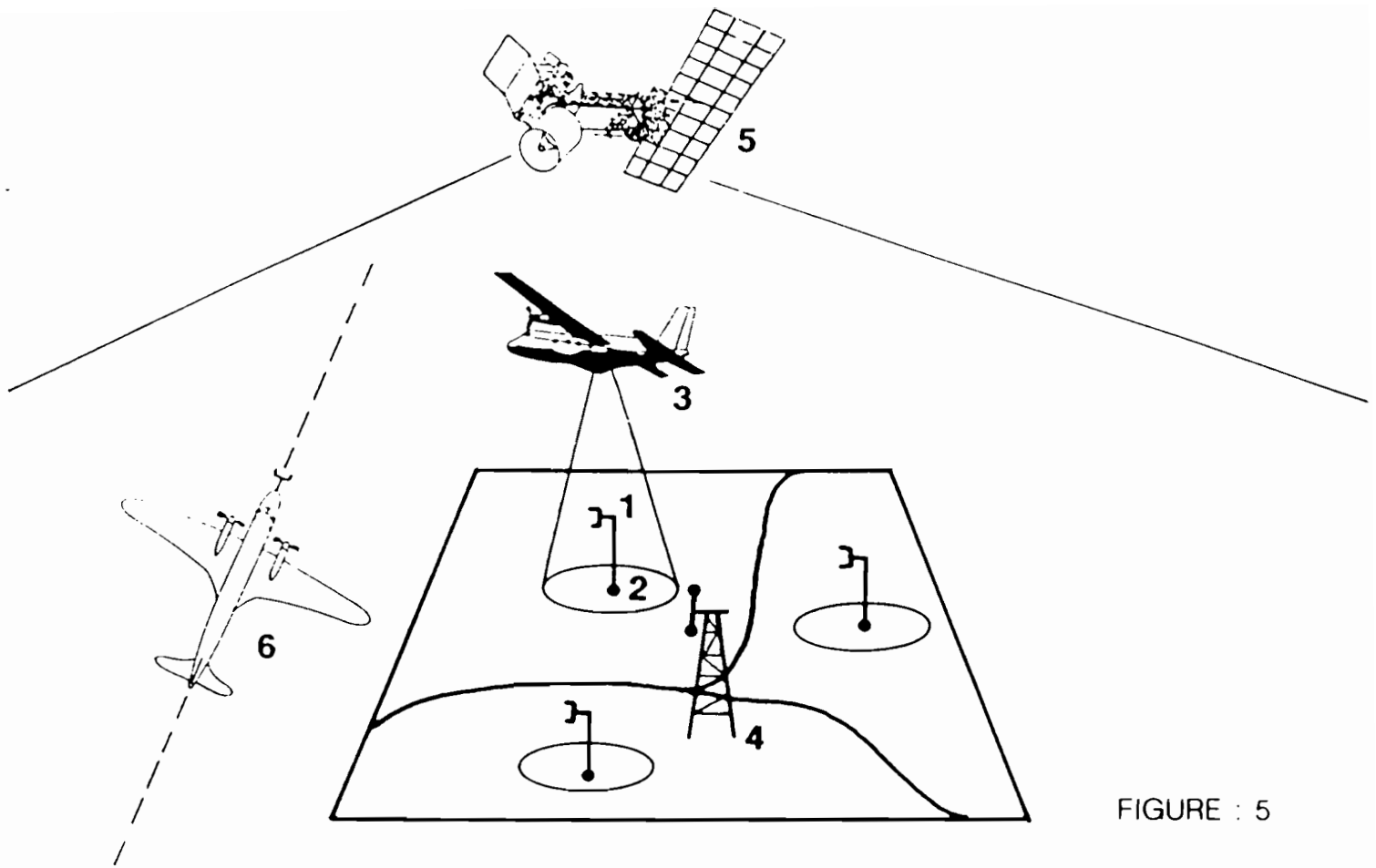


FIGURE : 5

DISPOSITIF EXPERIMENTAL SUR UN SUPERSITE.

- (1) MESURE DES FLUX TURBULENTS
- (2) INSTRUMENTATION DE LA ZONE D'ÉMISSION DES FLUX EN MESURES BIOMÉTRIQUES, ÉCOPHYSIOLOGIQUES, D'HUMIDITÉ DES SOLS ETC...
- (3) TÉLÉDÉTECTION AÉROPORTÉE
- (4) ET (5) DISPOSITIF D'EXTRAPOLATION: RÉSEAU MÉTÉOROLOGIQUE (4) ET TÉLÉDÉTECTION SATELLITAIRE (5)
- (6) VALIDATION DES RÉSULTATS OBTENUS À L'ÉCHELLE DU SUPERSITE ET DE SES ENVIRONS : FLUX TURBULENTS MESURÉS PAR AVION.

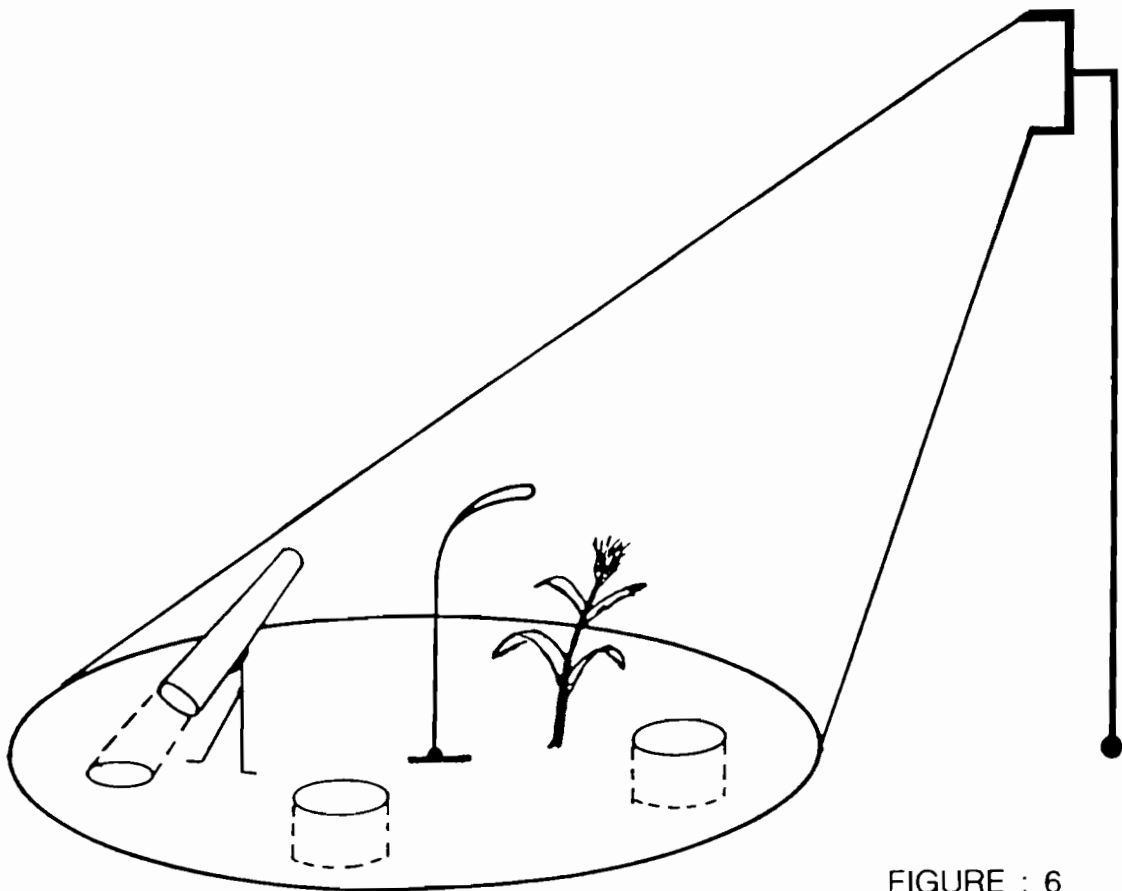
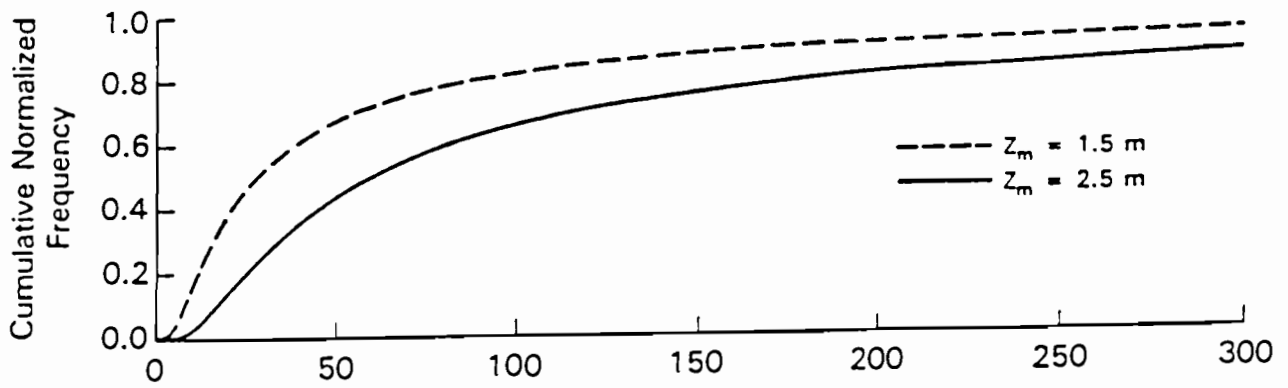
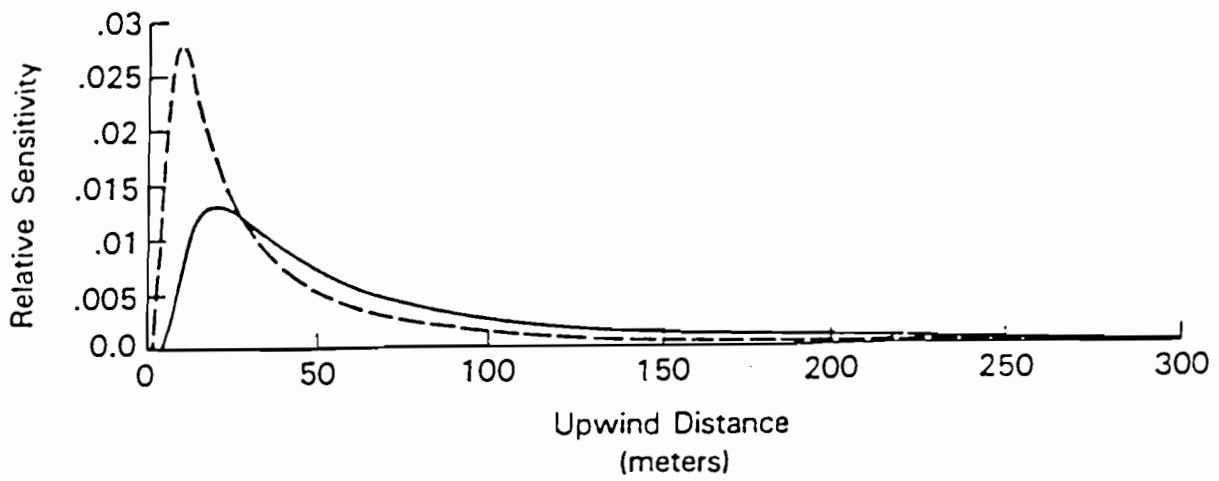


FIGURE : 6

DISPOSITIF DE VALIDATION AUX ENVIRONS DES STATIONS DE FLUX

(HUMIDITÉ DU SOL,SPECTROMÉTRIE,BIOMÉTRIE,ÉCOPHYSIOLOGIE.)



CONTRIBUTION RELATIVE AU FLUX D'UNE SOURCE AMONT
 EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE MESURE

— ARAT

— MERLIN

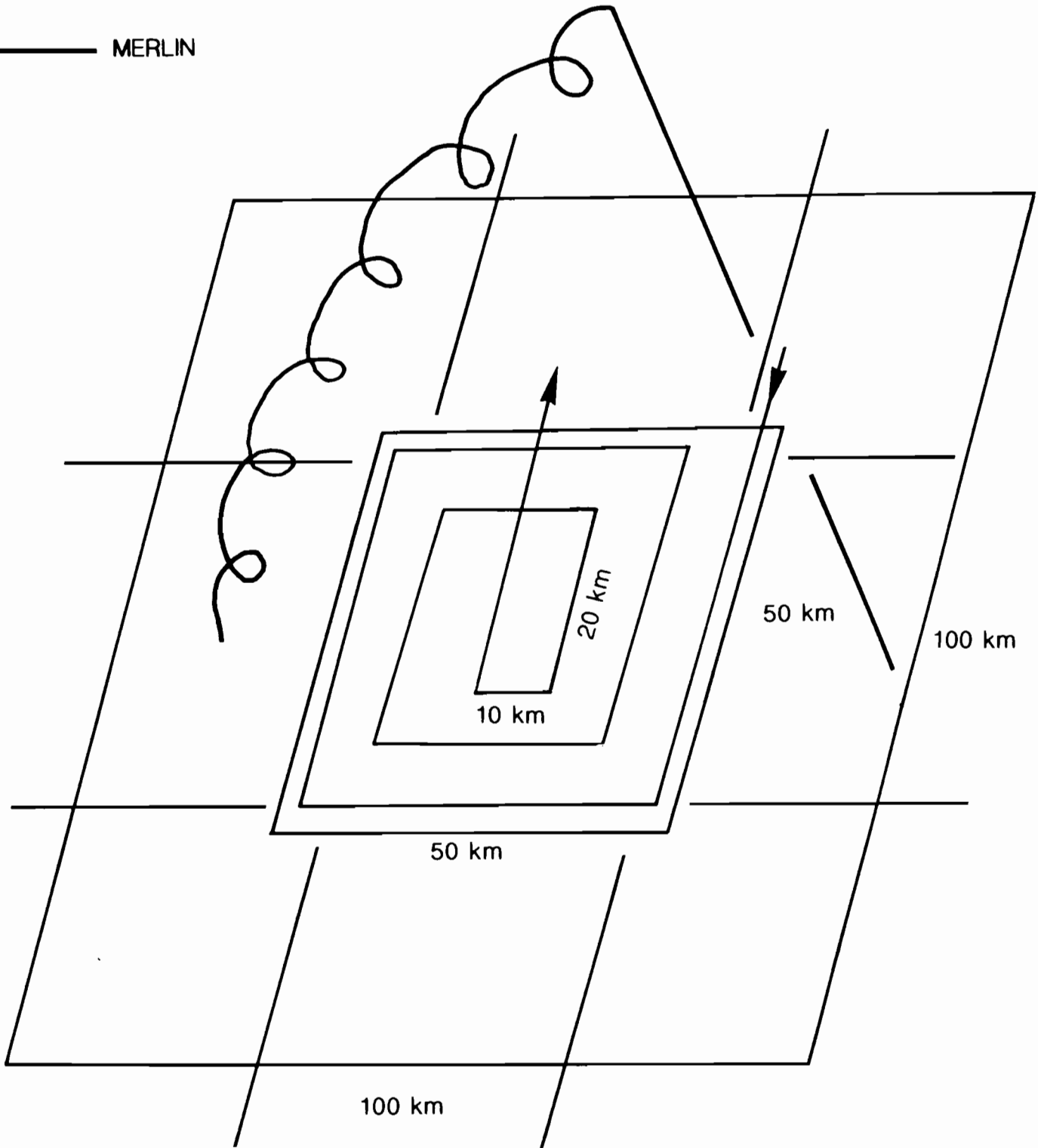


FIGURE : 8 PLANS DE VOL DES AVIONS DE MESURE DE FLUX

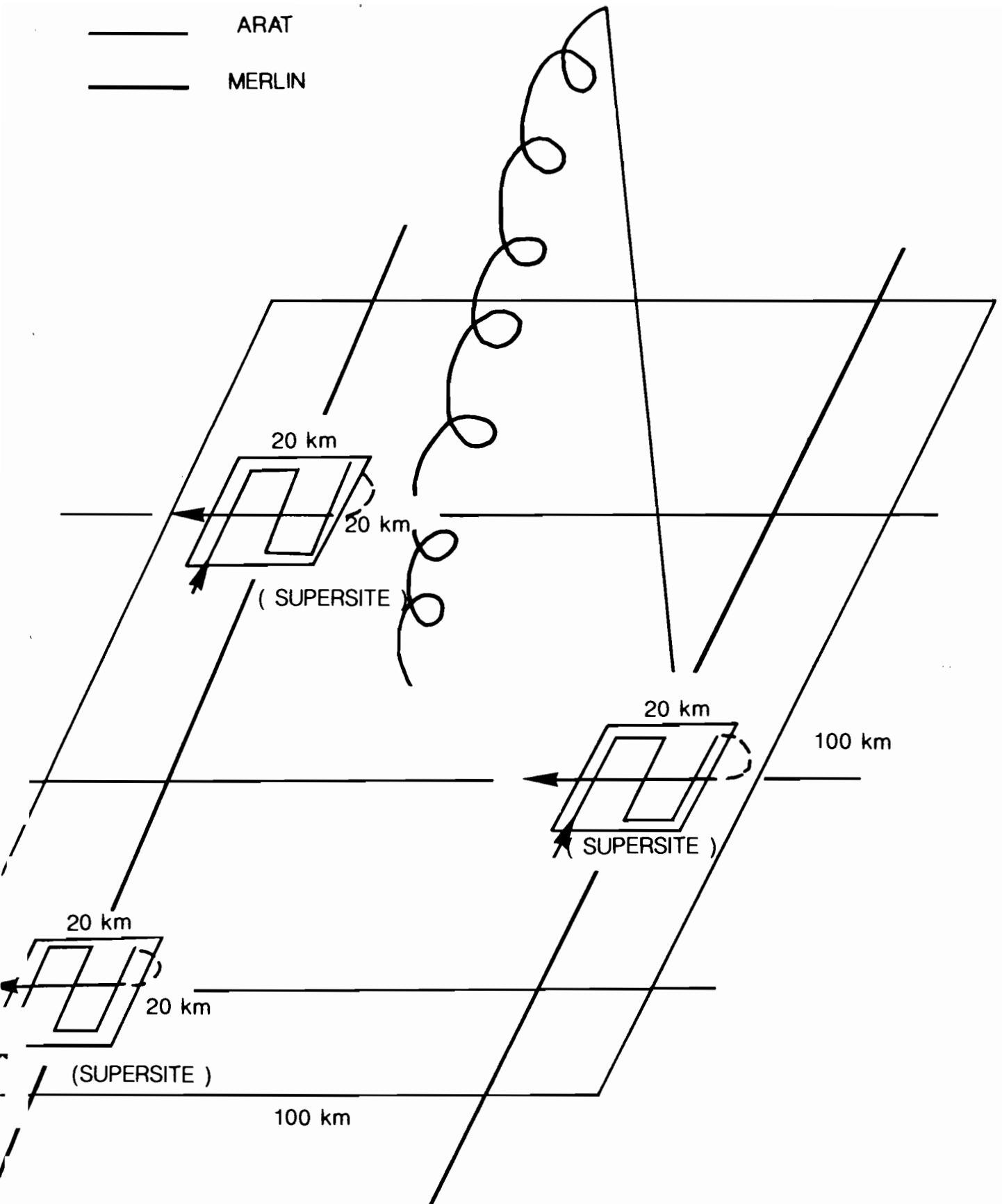


FIGURE : 8 bis PLANS DE VOL DES AVIONS DE MESURE DE FLUX

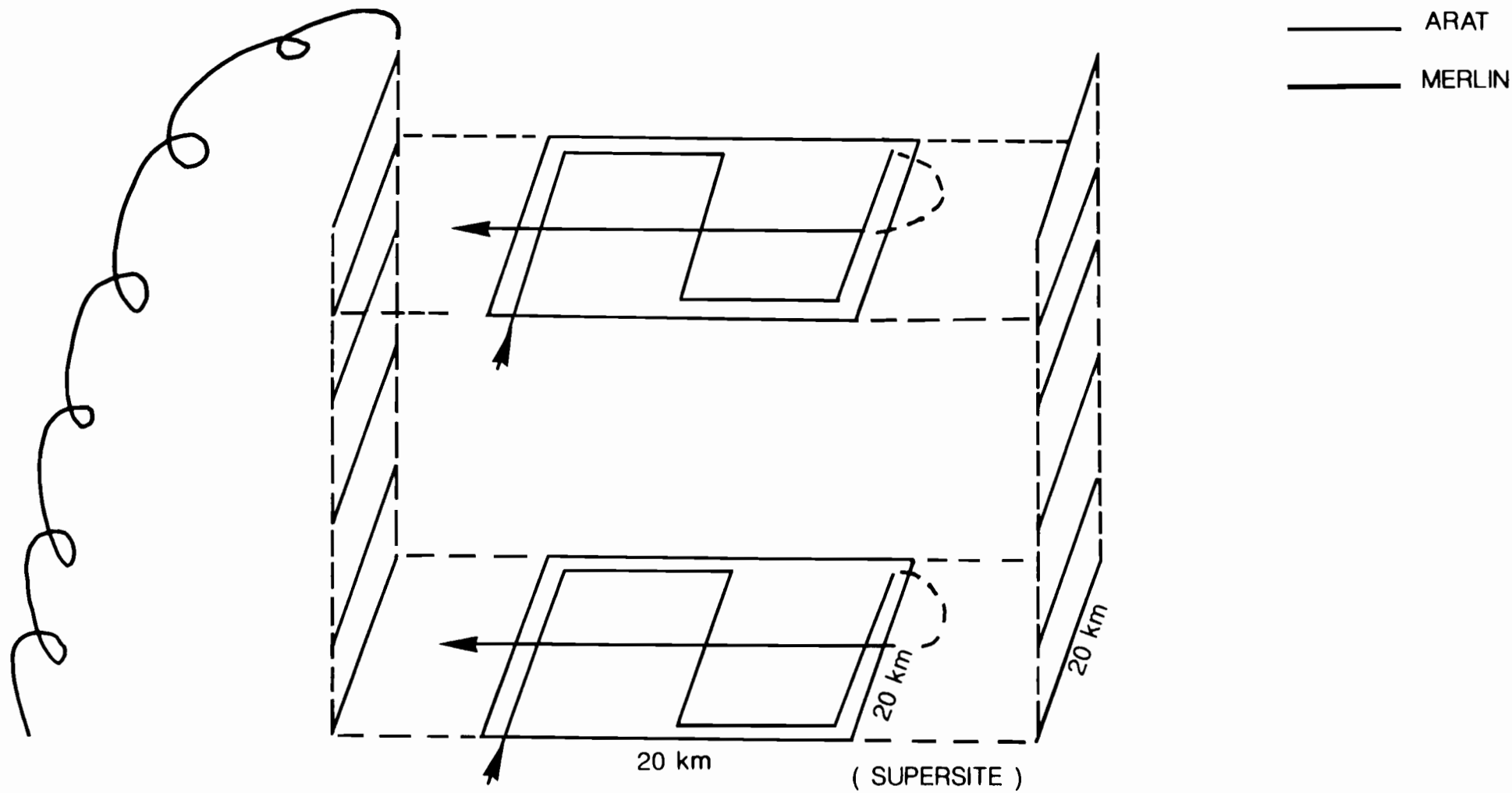


FIGURE : 9 PLANS DE VOLS DES AVIONS DE MESURE DE FLUX

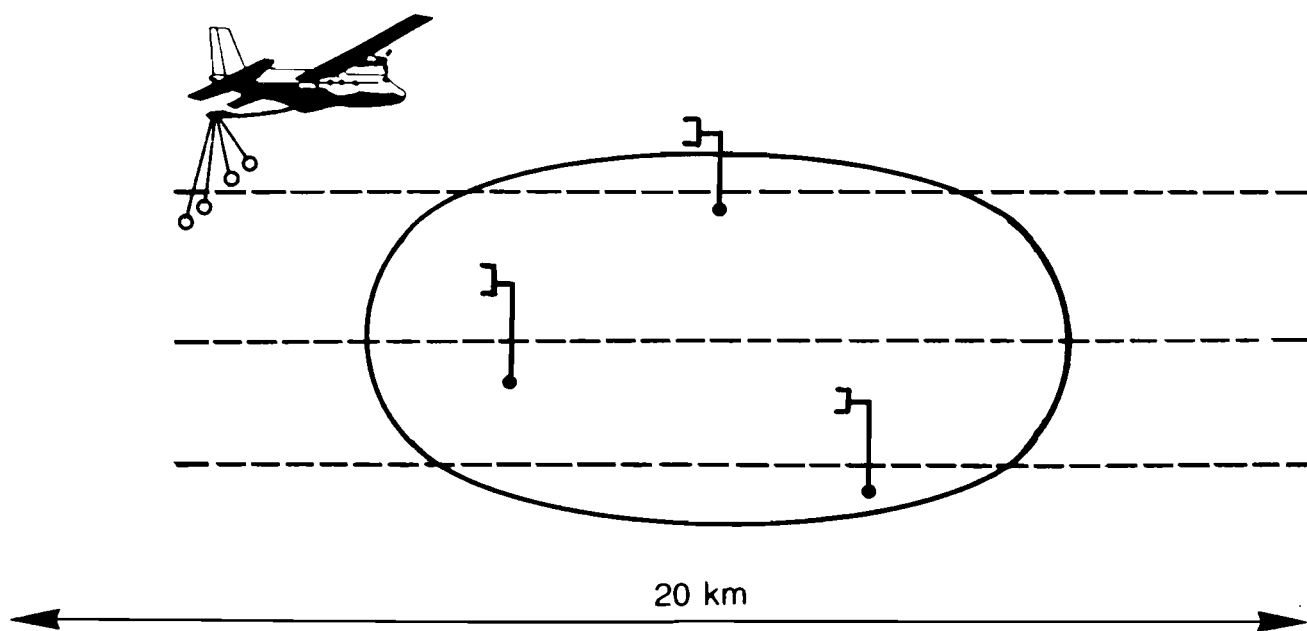


Fig. 9

FIGURE : 10

PLAN DE VOL DE L'AVION C-130 DE LA NASA EQUIPE DU PBMR
(push broom microwave radiometer)
AUX ENVIRONS DES SUPERSITES

	1990												1991												1992												1993											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Pluviographie																																																
Hydrologie																																																
Hydrogéologie																																																
Humidité sols central																																																
sud-ouest																																																
nord																																																
Végétation central																																																
sud-ouest																																																
nord																																																
Flux au sol central																																																
sud-ouest																																																
nord																																																
Moyens Aéroportés Flux																																																
Téledétection																																																
Météo) nord-ouest																																																
Parc) central																																																
) sud-ouest																																																
Réseau de 12 stations																																																

Planning prévisionnel
HAPEX-SAHÉL

- pré-campagne
- suivi extensif
- suivi intensif

FIGURE : 11

CALENDRIER (PREPARATION - MISE EN PLACE - PERIODE D'OBSERVATION INTENSIVE)