



**HAL**  
open science

## Mémoire d'habilitation à diriger des recherches

Jean-Daniel Lan Sun Luk

► **To cite this version:**

Jean-Daniel Lan Sun Luk. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. Physique [physics]. Université de La Réunion, 2000. tel-01402802

**HAL Id: tel-01402802**

**<https://hal.univ-reunion.fr/tel-01402802v1>**

Submitted on 23 May 2017

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

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

# **Mémoire d'habilitation à diriger des recherches**

**Jean-Daniel Lan Sun Luk**  
Laboratoire de Génie industriel

Université de La Réunion

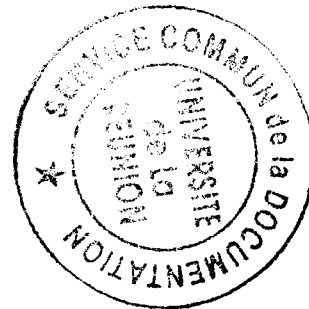
soutenue le 24 Janvier 2000

Président du jury : Pr Albert Papiernik  
(Université de Nice Sophia Antipolis)



**Université de la Réunion**

Facultés des Sciences et Technologies



**MEMOIRE  
D'HABILITATION  
A DIRIGER  
DES RECHERCHES**

*Jean Daniel LAN SUN LUK, MC 63<sup>ième</sup> section CNU*

Version du mois de septembre 99

SCD UNIVERSITE DE LA REUNION



350103 0350

# TABLES DES MATIERES

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>PREMIERE PARTIE : ENVIRONNEMENT</b> .....	<b>4</b>
<b>I. CONTEXTE ET GENESE</b> .....	<b>4</b>
I.A. CONTEXTE UNIVERSITAIRE.....	4
I.B. GENESE DE LA RECHERCHE EN ELECTRONIQUE A L'UNIVERSITE DE LA REUNION .....	5
I.B.1. DEVELOPPEMENT ET INTEGRATION DE SYSTEMES DE MESURE AU LPA .....	5
I.B.2 CREATION DE L'EQUIPE DE RECHERCHE ITS AU SEIN DU LGI .....	8
<b>II. ACTIVITES PEDAGOGIQUE ET ADMINISTRATIVE</b> .....	<b>11</b>
II.A. ACTIVITES D'ENSEIGNEMENTS.....	11
II.B. ACTIVITES COLLECTIVES .....	14
<b>III. ACTIVITES D'ENCADREMENT ET DE RECHERCHE</b> .....	<b>16</b>
III.A. AU NIVEAU DE L'EQUIPE .....	16
III.B. ENCADREMENT D'ETUDIANTS.....	17
<b>IV. SYNTHESE</b> .....	<b>19</b>
<b>DEUXIEME PARTIE : EXPOSE DETAILLE DES TRAVAUX DE RECHERCHE</b> .....	<b>26</b>
<b>I. INTRODUCTION</b> .....	<b>26</b>
<b>II. CARACTERISATION DE MILIEU A L'AIDE DES TECHNIQUES DES METHODES INVERSES</b> .....	<b>28</b>
II.A. CARACTERISATION DE LA PERMITTIVITE D'UN MILIEU NATUREL .....	29
II.A.1. LA DEMARCHE .....	29
II.A.2. LE DISPOSITIF DE MESURE .....	30
II.A.3. LE CALCUL D'HUMIDITE POUR UN MILIEU STRATIFIE SANS PERTE .....	32
II.A.3.a. Mise en place du modèle .....	32
II.A.3.b Validation du modèle.....	35
II.A.3.c L'identification des caractéristiques .....	37
II.A.4. L'IDENTIFICATION DE L'HUMIDITE POUR UN MILIEU AVEC PERTE MAIS SANS DISTORSION.....	40
II.A.4.a. Prise en compte des pertes dans le modèle .....	40
II.A.4.b. Méthode d'identification à l'aide des algorithmes génétiques .....	42
II.A.4.c. Les résultats obtenus .....	44

II.A.5. CONCLUSION .....	47
II.B LA CARACTERISATION DES PARAMETRES PHYSIQUES D'UN MATERIAU .....	48
II.B.1. LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	48
II.B.2. MATERIAU HOMOGENE .....	50
II.B.2.a. Modélisation .....	50
Le modèle de Parker .....	51
Le modèle de Degiovanni .....	52
II.B.2.b. Validation expérimentale.....	53
II.B.3. MATERIAU STRATIFIE .....	54
II.B.3.a. Modélisation .....	54
La méthode des quadripôles.....	54
La méthode des différences finies .....	55
II.B.3.b. Validation des modèles.....	58
II.B.3.c. Identification d'un profil de diffusivité .....	59
II.B.4. CONCLUSION .....	60
II.C. PERSPECTIVES .....	61
<b>III. LE TRANSPORT D'ÉNERGIE SANS FIL.....</b>	<b>62</b>
III.A. INTRODUCTION .....	62
III.B. ETUDE DE CAS DE GRAND BASSIN.....	63
III.B.1. PRESENTATION DU CAHIER DES CHARGES DU SYSTEME.....	63
III.B.2. L'UNITE D'EMISSION.....	65
III.B.2.a. Le magnétron.....	65
III.B.2.b. Antenne à réflecteur parabolique multifocale.....	66
III.B.3. L'UNITE DE RECEPTION.....	67
III.B.3.a. Technologies employées pour les antennes .....	67
III.B.3.b. Le circuit de redressement.....	69
III.B.3.c. Organisation générale du système de redressement .....	70
III.B.4. L'UNITE DE CONDITIONNEMENT .....	70
III.B.4.a. Présentation de l'unité de conditionnement de l'énergie .....	72
III.B.4.b Les différents sous-systèmes .....	73
III.B.5. BILAN DE PUISSANCE.....	74
III.B.6. CONCLUSION SUR L'ETUDE DE CAS.....	76
III.C. DEVELOPPEMENT D'UN PROTOTYPE .....	78
III.D. PERSPECTIVES.....	79
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>81</b>
<b>LISTES DES TABLEAUX ET FIGURES .....</b>	<b>83</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>85</b>

<b>TROISIEME PARTIE : PUBLICATIONS .....</b>	<b>89</b>
<b>IV.A. Publications liées à mes activités de recherche antérieures à mon recrutement à l'Université de La Réunion .....</b>	<b>89</b>
<b>IV.B. Publications liées à mes activités de recherche à l'Université de La Réunion .....</b>	<b>91</b>
<b>IV.C. Copie des publications les plus significatives.....</b>	<b>96</b>

## INTRODUCTION

L'université de La Réunion possède une position singulière dans le système d'enseignement universitaire français. Jeune et excentrée, elle doit faire face à une forte croissance de son effectif étudiant. En 1990, l'université comptait 4804 étudiants, dont 735 à l'UFR<sup>1</sup> Sciences. Aujourd'hui, elle compte plus de 9000 étudiants, dont 2100 dans le secteur scientifique et technologique. La priorité de l'établissement était d'augmenter sa capacité d'accueil afin de répondre aux attentes de la population locale et des îles avoisinantes. La volonté politique d'accompagner l'émergence d'une Université Française de l'Océan Indien a permis le démarrage d'un grand nombre de projets visant à élargir l'offre de formation. De 12 diplômes nationaux délivrés en 1990, on dénombre aujourd'hui plus de 30 en formation initiale que pour l'UFR Sciences et Technologies. Ce phénomène a conduit tout naturellement à la création d'une université multidisciplinaire. Il est à noter l'apparition d'une dimension technologique, concrétisée par l'évolution de la dénomination de l'UFR Sciences en UFR Sciences et Technologies. Au vu des dernières prévisions démographiques de l'INSEE<sup>2</sup>, on estime à 13 000 le nombre d'étudiants inscrits à l'université pour 2006.

Le rôle de l'université comme acteur non seulement sur le plan de la formation mais aussi sur le plan social et économique est clairement affiché dans le contrat quadriennal de l'établissement ainsi que dans le plan Etat-Région. La faiblesse du tissu industriel et l'absence d'une recherche privée industrielle, concentrée dans le secteur agroalimentaire autour de la filière sucrière, sont de gros handicaps à surmonter pour favoriser l'émergence d'une activité technologique à forte valeur ajoutée. Cet axe allié à une politique des pouvoirs publics facilitant les exportations est une solution envisagée pour se démarquer des autres îles de la zone Océan Indien, où la main-d'œuvre est à plus faible coût. En partenariat avec les collectivités locales, l'université accroît son action en direction des PME et des PMI en favorisant une recherche appliquée et le transfert de technologie avec la création d'un BRUMI<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Unité de Formation et de Recherche

<sup>2</sup> Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

<sup>3</sup> Bureau des Relations Université-Milieu Industriel

Le Laboratoire de génie industriel, dont je suis membre, s'est donné comme mission d'apporter son concours au développement économique local autour du thème générique de la maîtrise de l'énergie. En effet, l'énergie et l'information sont les points clés du développement, envisagés pour la Région Réunion. La production électrique locale est à 30% hydroélectrique. Deux centrales thermiques cogénératrices bagasse<sup>4</sup>-charbon fournissent plus de 50% de nos besoins énergétiques. Ces unités sont installés à proximité des deux sucreries en fonctionnement. Une centrale thermique classique complète ce dispositif. Pour remédier à notre dépendance énergétique, l'Etat soutient les initiatives visant à réduire la consommation électrique et l'utilisation accrue des énergies renouvelables

Ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches comporte trois parties. Dans la première partie, je m'efforcerai de présenter le contexte et mon parcours au sein de l'université de la Réunion. J'aborderai sous un angle historique les différentes fonctions que j'ai assumées depuis mon recrutement aussi bien au niveau administratif que pédagogique et de recherche. Je mettrai l'accent sur les actions qui m'ont permis de construire et de consolider mon environnement actuel de recherche et d'enseignement.

Dans la deuxième partie, je développerai les thèmes de recherche que j'ai dirigés au sein du Laboratoire de Génie Industriel. En accord avec le directeur du laboratoire, j'ai assuré majoritairement, l'encadrement scientifique de trois doctorants. Mes actions de recherche se caractérisent par leur aspect pluridisciplinaire et appliqué. De plus elles sont en prise directe avec mon environnement immédiat. Ces deux points répondent à la politique de recherche de l'université de La Réunion et sont fortement encouragés par le ministère par le biais des contrats quadriennaux.

Dans la troisième partie, je présenterai les éléments permettant une quantification de ma production scientifique. J'ai sélectionné les publications les plus pertinentes résumant mon parcours au niveau de la recherche.

---

<sup>4</sup> résidu végétal de la canne à sucre obtenu après extraction du jus de canne



---

# **PREMIERE PARTIE**

## **ENVIRONNEMENT**

- **CONTEXTE ET GENESE**
- **ACTIVITES PEDAGOGIQUES ET ADMINISTRATIVES**
- **ACTIVITES D'ENCADREMENT ET DE RECHERCHE**
- **SYNTHÈSE**

## I. CONTEXTE ET GENESE

### *I.A. CONTEXTE UNIVERSITAIRE*

J'ai été affecté en 1990, lors de mon recrutement, au département physique-mécanique de la faculté des sciences. Ce département comptait 7 enseignants-chercheurs à mon arrivée, regroupés au sein du Laboratoire de Thermique et Energétique Solaire (LTES). Les deux structures étaient sous la direction du Professeur Jean Leveau. Mon recrutement était lié à la mise en place d'enseignement en électronique pour la licence et maîtrise de physiques et applications au niveau pédagogique. Pour la partie recherche, je devais prendre en charge l'installation du système d'acquisition et de traitement d'un LIDAR à l'Université de La Réunion.

Cette même année, ce département ouvrait ses trois premières filières de second cycle. La mise en place de ces nouvelles filières prévues dans le cadre du plan quadriennal de l'université répondait à une forte demande des étudiants afin d'accéder à l'institut universitaire de formation des maîtres (IUFM).

- La licence de Technologie Mécanique (LTM) intégrait essentiellement des étudiants de BTS qu'on préparait pour une intégration possible à l'IUFM en CAPET technologie Mécanique.

- La licence es Sciences Physiques (LSP) était plus dédiée aux étudiants s'orientant vers la préparation du CAPES Physique-Chimie.

- La licence de physique et applications (LPA), option mesures physiques, associée à la maîtrise de Physique et Applications (MPA), ouverte l'année suivante, devaient s'ouvrir davantage vers le monde industriel local, tout en constituant un vivier potentiel d'étudiants de troisième cycle pour le laboratoire. Néanmoins beaucoup d'étudiants préféraient intégrer l'IFUM à la fin de leur LPA en vue de préparer le CAPES de physique appliquée plutôt que de continuer en MPA.

Mes premières années furent fortement consacrées à la mise en place de mes nouveaux enseignements ainsi qu'à son environnement pédagogique immédiat essentiellement en licence et maîtrise de physique et applications. Nous ne disposions que de deux salles d'enseignement spécialisées pour l'ensemble des enseignements pratiques pour ce département. Le directeur de département me

confia la gestion des enseignements de l'électronique analogique et des systèmes de mesure ainsi que la création d'un environnement pédagogique en technologie. Pour mener à bien ce travail, j'entrepris dès mon intégration en novembre 1990, une mission pédagogique au niveau national. J'ai rencontré des enseignants du secteur EEA, travaillant en physique et applications à Paris VI et à Luminy. Le département me confia l'année suivante comme mission de gérer les enseignements relevant du secteur EEA avec l'aide de missionnaires pour la MPA. De cet embryon d'activités technologiques, nous avons aujourd'hui complété l'offre de formation avec une licence d'ingénierie électrique, un DEUG sciences et technologies pour l'ingénieur, un IUP d'agroalimentaire et un département de génie civil. Grâce à un travail collectif et le soutien de l'université, nous disposons aujourd'hui de salles spécialisées adéquates pour nos enseignements pratiques.

Le département de physique-mécanique accompagne le développement de l'université de La Réunion en élargissant son offre de formation. Il a proposé lors du dernier contrat quadriennal, l'ouverture :

- d'une maîtrise de sciences physiques
- d'une licence et maîtrise de génie civil
- d'un nouveau département d'IUT en génie des télécommunications et réseaux.

## ***I.B. GENESE DE LA RECHERCHE EN ELECTRONIQUE A L'UNIVERSITE DE LA REUNION***

### **I.B.1. DEVELOPPEMENT ET INTEGRATION DE SYSTEMES DE MESURE AU LPA**

Étant le premier maître de conférences de la section 63 à être recruté à l'université de La Réunion, l'émergence d'une recherche propre à ma section d'origine fut mon premier défi au sein de mon laboratoire d'accueil le LTES. La majorité des enseignants-chercheurs étaient de la 60ième section. La demande en système de mesure au sein de ce laboratoire m'a permis de me raccrocher rapidement à une recherche expérimentale. J'assurai du même coup une forte interaction entre mes enseignements et la recherche.

Les actions de recherche du laboratoire comportaient deux axes forts. L'axe traditionnel du laboratoire était conduit par les Professeurs Jean Claude Gatina et Jean Leveau, en forte liaison avec le milieu industriel local. La maîtrise de l'énergie était l'axe fort de recherche. Il se déclinait autour du confort thermique de l'habitat,

du séchage, du gisement solaire et éolien de l'île et enfin de l'analyse exergétique des procédés sucriers. Le Professeur Serge Baldy s'était positionné sur un nouvel axe de recherche plus orienté vers la physique atmosphérique. Il s'intéressait à la production des aérosols marins ainsi qu'à leurs effets sur l'albédo. Le Professeur Jean Leveau, soutenu par le service d'aéronomie, a obtenu le soutien de l'université et des collectivités locales pour l'installation d'une station de mesure atmosphériques.

C'est dans ce contexte que j'ai intégré l'équipe de la physique de l'atmosphère où j'ai participé à la mise en place de deux types de mesure :

- la mesure de la concentration d'ozone par radiosondage
- et la mesure de température par analyse d'un signal laser rétrodiffusé.

L'étude de l'équilibre de l'ozone dans l'atmosphère est l'un des axes majeurs de recherche dans le domaine de la physico-chimie de l'atmosphère. En effet, dans la stratosphère, la diminution rapide et spectaculaire de la quantité d'ozone dans la basse stratosphère au-dessus du pôle Sud, a démontré l'importance des processus chimiques en phase hétérogène et du couplage chimie-dynamique. Les activités humaines sont directement mises en cause du fait des émissions (industrie, agriculture, transport) de constituants tels que le méthane, les hydrocarbures, les oxydes d'azote, les chlorofluoro-carbures. Une meilleure connaissance des phénomènes passe par l'élaboration d'un modèle global. L'absence de système de mesure en zone tropicale dans l'hémisphère sud pour valider ces modèles a positionné l'île de La Réunion comme un point d'observation potentiel. Nous avons installé à l'université de La Réunion deux dispositifs de mesure, avec le soutien du Professeur Gérard Mégie du Service d'Aéronomie de Paris VI, nous permettant de constituer la première base de données tropicales permanente dans l'hémisphère sud. A l'aide de radiosondages, nous mesurons la température, la pression, l'humidité et la concentration d'ozone au niveau de la troposphère, du sol à 12 km. Cette mesure est complétée par un LIDAR<sup>5</sup>, qui nous donne la température et la concentration d'ozone dans la basse stratosphère de 12 km à 60 km.

Ces deux expériences de transfert de technologie furent enrichissantes sur le plan pratique. La physique de l'atmosphère est reconnue comme un pôle d'excellence par l'université et la Région. Le laboratoire est intégré au réseau

---

<sup>5</sup> Light Detection And Ranging

mondial NDSC<sup>6</sup> et participe à la création d'un observatoire de physique de l'atmosphère à l'île de La Réunion en relation avec l'institut Simon Laplace.

En 1993, les deux équipes du LTES ont évolué en laboratoire au sein du département de Physique-Mécanique : le laboratoire de Physique de l'Atmosphère, dirigé par le Professeur Jean Leveau et le laboratoire de Génie Industriel, dirigé par le Professeur Patrick Hervé.

Les contacts fréquents, lors de l'encadrement d'étudiants de maîtrise physique et applications, m'ont amené à côtoyer des chercheurs du CIRAD. Il faut savoir que la filière canne à sucre et plus largement l'agroalimentaire constitue le socle de base de l'industrie réunionnaise. J'ai coopéré, en parallèle avec mon action en physique de l'atmosphère, avec le CIRAD<sup>7</sup> sur le développement d'une méthode de mesure baptisée l'EPG<sup>8</sup>. Ce système s'appuie sur la variation du dipôle électrique constitué par l'insecte, la plante et le sol en fonction de l'activité de l'insecte. C'est une technique identique à la bio-impédance, à ceci près que nous souhaitons remonter à l'activité alimentaire d'un insecte à partir de l'état électrique du dipôle. Pour cela, nous polarisons notre dipôle électrique à l'aide d'une source de tension continue. Un dispositif électronique, installé sous une cage de Faraday, permet de suivre l'évolution temporelle de ce signal électrique après une amplification différentielle. Après filtrage et traitement, ce signal est numérisé et analysé à l'aide d'outils de traitement du signal sous l'environnement de Matlab, afin d'identifier les différentes phases d'activité de l'insecte : piqûre, ingestion, digestion... Ce travail de longue haleine a nécessité une première phase d'analyse des signaux, essentiellement fréquentielle. Ensuite nous les avons corrélés aux différents comportements de l'insecte rencontrés ou observés au microscope. Pour certains signaux, nous avons du procéder à des prélèvements et coupes pour lever toute ambiguïté. Le système de mesure est aujourd'hui opérationnel (BUDUCA 1996). Nous travaillons toujours dans le cadre de stage d'étudiants ingénieurs au développement d'une classification automatique des signaux. Le but est d'obtenir une meilleure connaissance du comportement alimentaire des insectes parasites des cultures et vecteurs des viroses in situ. Ces résultats permettront d'orienter les actions en cours au niveau génétique, dans la création variétale des maïs résistants aux viroses.

Toujours avec le CIRAD, j'ai participé à la mesure d'humidité dans le sol en encadrant des étudiants de MPA et un élève ingénieur. Cette mesure est utile au

---

<sup>6</sup> Network Detection Stratospheric Change

<sup>7</sup> Centre International de Recherche en Agronomie et Développement

<sup>8</sup> ElectroPénétroGraphie

bilan hydrique des plantes. Ce programme de recherche entre dans une politique de gestion maîtrisée des ressources en eau menée par le conseil général.

## I.B.2 CREATION DE L'EQUIPE DE RECHERCHE ITS AU SEIN DU LGI

Les instruments de mesure installés en physique de l'atmosphère ont permis au laboratoire de mener une étude sur le suivi du cycle de l'ozone en zone tropicale. Couplé à des observations des satellites, une corrélation a été mise en évidence entre l'augmentation de l'ozone et les feux de brousse en Afrique. Des rétro-trajectoires fournies par Météo France ont permis de valider ces hypothèses (BALDY 1996). La volonté du laboratoire de Physique de l'atmosphère de se concentrer sur les études atmosphériques et de ne pas développer un axe de recherche en instrumentation m'amena à réorienter mes actions.

En 1993, un ingénieur du CNES<sup>9</sup>, Guy Pignolet chargé de mission au transport d'énergie sans fil et Lucien Deschamps, secrétaire général de la SEE<sup>10</sup>, proposent à l'université de La Réunion de travailler sur un programme de recherche de transport d'énergie sans fil (TESF). Cette opération bénéficiant d'un accord de principe du président de l'université de l'époque, j'accepta de travailler sur ce thème. Cette action me permettait de renouer avec une activité de recherche plus proche de ma formation. Ce travail débuta avec une coopération avec l'équipe du Professeur Nagatomo de l'ISAS<sup>11</sup>, sur la mise en œuvre d'un démonstrateur pour le grand public. Cet action se traduisit par une exposition durant six mois de la maquette SPS 2000, développée à l'ISAS par le Dr Y. Naruo, au musée Stella-Matutina.

En 1995, la possibilité de constituer une équipe de recherche au sein du laboratoire de Génie Industriel qui se créait, fixa les grandes orientations de ma recherche actuelle. Ce Laboratoire crée par le Professeur Jean Claude Gatina (60ième section CNU), est aujourd'hui dirigé par le Professeur Patrick Hervé (60ième section CNU). Il possède le statut d'équipe d'accueil n° 2524 et est intégré à la formation doctorale PROMEN<sup>12</sup> de Nancy. Le LGI compte aujourd'hui 13 enseignants-chercheurs et 10 doctorants. Les actions menées autour de la maîtrise

---

<sup>9</sup> Centre National d'Etudes Spatiales, Division prospectives

<sup>10</sup> Société des Electriciens et Electroniciens

<sup>11</sup> Institute of Space and Astronautical Sciences (Japon)

<sup>12</sup> Procédés Mécanique Energie

de l'énergie, en relation avec le milieu local ont conduit à organiser la structure sous forme de trois équipes de recherche.

L'équipe de **génie civil**, qui travaille en relation avec Electricité De France (EDF) et les acteurs du bâtiment et travaux publics (BTP), se concentre sur des actions d'économie d'énergie au niveau de l'habitat. Elle travaille plus particulièrement sur la définition des prescriptions en relation avec les bureaux d'études et les cabinet d'architectes, lors de la construction des nouveaux logements. Cette étude s'est concrétisé par la mise en œuvre par les pouvoirs publics d'un label baptisé ECODOM à l'île de La Réunion. Les actions de recherche menées concourent au développement d'un logiciel permettant de simuler le comportement thermo-aérolique détaillé d'un bâtiment sous des sollicitations externes (météorologiques) et internes (unité de traitement d'air). L'équipe valide expérimentalement leurs modèles à l'aide de campagne de mesure sur des logements in situ. En parallèle, elle réalise des enceintes contrôlées en laboratoire pour compléter la base de données expérimentales.

La seconde équipe, **énergétique et conduite des procédés**, a en charge l'amélioration de la conduite des processus industriels, elle aussi sous l'angle énergétique. Elle mène une démarche de recherche-développement en partenariat avec le Groupe Bourbon dans le cadre d'une convention. Deux ateliers de l'usine sucrière de Bois Rouge ont été choisis pour un travail de modélisation et contrôle. L'atelier d'évaporation requiert un important transfert d'énergie de la centrale thermique vers l'usine. Il a fait l'objet de travaux approfondis: analyse énergétique, étude des transferts thermiques, modélisations dynamiques de connaissance ou à réseaux de neurones, réalisation d'une commande prédictive. Les transferts technologiques, d'une part de bilans énergétiques en ligne et d'autre part d'une commande prédictive à réseaux de neurones sont en cours de réalisation. Sur le deuxième atelier, celui de la cristallisation, l'objectif industriel d'un épuisement optimal de sa mélasse constitue sa contrainte dans la réalisation d'une commande prédictive de ce procédé. Ce travail s'effectue en collaboration avec Alain Shum-Chéong-Sing, maître de conférences en chimie du laboratoire LECN de l'université de La Réunion. L'expérimentation à l'échelle industrielle ou à l'échelle pilote de laboratoire en vue de la validation des modèles constitue un point fort de cette équipe. Afin de compléter les expérimentations effectuées sur site industriel, l'équipe a entrepris la réalisation de deux pilotes: un évaporateur à grimpage monotube et un réacteur chimique. Le groupe a acquis une expérience des systèmes de mesures industriels et des dispositifs portables, un savoir-faire en intégration de chaînes de mesures thermodynamiques en laboratoire ainsi qu'une compétence dans les dispositifs "temps réel".

La troisième équipe de recherche, **instrumentation et traitement du signal**, dont je suis responsable, s'est positionnée sur la propagation d'information et d'énergie. D'une certaine manière, elle reste dans une démarche qui participe aux actions de maîtrise de l'énergie. Le transport d'énergie sans fil (TESF) sous forme d'ondes hyperfréquences est un premier axe de recherche. La prospection de sources d'énergie renouvelables a conduit certains scientifiques du secteur spatial à proposer une solution de collecte l'énergie solaire, de sa transformation en ondes électromagnétiques centimétriques avant son transport sur de très grandes distances vers le sol. Le respect des normes de sécurité en vigueur un transfert énergétique à faible densité de puissance. Il faut, sur les lieux d'utilisation, assurer la réception de l'onde par un réseau d'antennes appropriées qui convertissent l'énergie en courant continu à des fins d'utilisations industrielles ou domestiques. Avant de passer aux structures spatiales, des liaisons point à point terrestres sont nécessaires. Notre équipe a proposé l'étude de cas de "Grand Bassin". Elle porte sur la possibilité de fournir une puissance énergétique utile de 10 kW. Un prototype est à l'étude et en cours de réalisation au laboratoire avec le soutien financier de la municipalité du Tampon.

La propagation et la diffusion d'onde en milieu stratifié constitue le deuxième axe de recherche de notre équipe. La caractérisation des propriétés diélectriques d'un matériau stratifié à partir d'ondes électromagnétiques transmises et réfléchies permet, sous certaines conditions, de définir les propriétés d'un système. Il est possible de déterminer le profil caractéristique d'un milieu semi-infini, stratifié et faiblement inhomogène, à partir de l'onde transmise et réfléchie au niveau de la source. Appliquée à la mesure d'humidité des sols, cette théorie conduit à des résultats probants. L'outil développé est opérationnel et utilisé par une équipe du CIRAD<sup>13</sup>.

Avec l'équipe énergétique et conduite des procédés, le développement d'une technique non intrusive de caractérisation thermique d'un matériau stratifié est une voie de recherche connexe. Un premier objectif est d'utiliser les algorithmes génétiques couplés à des modèles non-linéaires de conduction de la chaleur dans un milieu stratifié afin d'identifier les coefficients de diffusivité dudit matériau. Ce travail présente un intérêt local pour le génie civil dans sa politique de maîtrise de l'énergie. Nous avons à terme comme objectif d'identifier le profil de diffusivité d'un matériau stratifié. Cette information peut servir au diagnostic et au suivi du vieillissement des matériaux composites. Nous avons développé une expérimentation basée sur la technique "flash" afin de valider notre démarche.

---

<sup>13</sup> Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement



D'une manière générale, le laboratoire répond aux sollicitations des industriels locaux et assure un transfert de technologie au niveau de la mesure et du diagnostic. Dans le cadre d'une démarche plus classique des laboratoires universitaires, nous développons des méthodologies nouvelles permettant in fine une meilleure maîtrise de l'énergie. Grâce aux soutiens financiers de l'Etat et des collectivités locales, dans le cadre de programmes structurants, nous avons mis l'accent sur l'équipement de base en mesure et en moyen de calcul. Nous construisons actuellement en laboratoire, des prototypes et des bancs d'essai afin d'intégrer une partie expérimentale conséquente à nos activités de recherche.

## **II. ACTIVITES PEDAGOGIQUE ET ADMINISTRATIVE**

### ***II.A. ACTIVITES D'ENSEIGNEMENTS***

Dès mon intégration à l'université de La Réunion, **l'électronique analogique** constituait l'axe principal de mes enseignements, la partie numérique étant gérée par un professeur agrégé déjà en poste. Cette activité m'occupa à plein temps au cours de mes deux premières années. Le déficit en enseignant du secteur technologique a nécessité la mise en place d'un groupe de chargés d'enseignement pour pallier cet état de fait. Au fil des recrutements, nous sommes aujourd'hui à 2 maîtres de conférences en 63ième section, 2 maîtres de conférences en 61ième section et 2 professeurs agrégés en génie électrique. J'ai eu souvent un rôle moteur dans la mise en place des enseignements et de son environnement pédagogique en électronique. Nous avons bénéficié de l'expérience de plusieurs équipes enseignantes nationales pour orienter nos actions pédagogiques. Afin de faciliter l'intégration de nos étudiants en second cycle au niveau national, nous avons veillé à la bonne adéquation de nos enseignements avec certaines maîtrises EEA.

Mon activité pédagogique cadre parfaitement avec ma section CNU. Je coordonne et assure l'ensemble des enseignements de l'électronique analogique linéaire. Je participe à l'élaboration des contenus de ces enseignements dans les trois cycles universitaires.

En premier cycle, l'accent est mis sur les outils de base nécessaires à l'électronique analogique linéaire : dipôle et quadripôle. À l'aide d'une approche systémique, je présente les fonctions courantes de l'électronique ainsi que leur

modélisation sous de sources contrôlées linéaires. Cette approche me permet d'atteindre l'étude des fonctions de base autour de l'amplificateur opérationnel idéal en premier cycle. L'étude des composants s'effectue en second cycle dans la licence d'ingénierie électrique où je présente les conditions nécessaires à leur bon fonctionnement en régime linéaire. Leur modélisation sous forme de quadripôle linéaire facilite leur intégration dans une chaîne électronique. L'étude des systèmes électriques linéaires est complétée par l'étude des techniques d'amélioration des performances des circuits réels. L'accent est mis sur la contre-réaction. Elle est appliquée en premier lieu aux amplificateurs à base de transistors et ensuite généralisée aux amplificateurs opérationnels.

En parallèle à cet enseignement traditionnel, j'ai développé pour les filières technologiques en second cycle un enseignement de l'électronique basé sur SPICE. Il est présenté comme un outil normalisé de simulation des systèmes électriques. Après avoir travaillé sur les caractéristiques électriques des composants de base de l'électronique, je m'appuie sur les outils d'analyse en mode comportemental, qui permette d'ancrer les notions de systèmes et sous-systèmes. La deuxième étape consiste à intégrer les composants réels sous une forme idéalisée (linéaire généralement). Ce travail permet d'associer les différentes fonctions électroniques souhaitées à des circuits de base. La prise en compte des caractéristiques réelles des composants en utilisant les modèles livrés par les constructeurs permet aux étudiants d'effectuer des confrontations très pertinentes entre leur calcul et la simulation. Cette vision est pleinement profitable aux étudiants lors de leur Travaux d'Etudes et de Recherche (TER) en fin d'année. Grâce à cet outil, l'étudiant dispose plus de temps pour l'analyse paramétrique des circuits. Les notions de contre réaction et de filtrage sont plus facilement assimilés.

Une initiation à l'étude des systèmes non linéaires est présentée en fin de cursus autour des oscillateurs non sinusoïdaux. J'insiste plus particulièrement sur la méthodologie d'analyse de ces systèmes : hypothèses sur l'état initial, recherche des états cohérents du circuit et analyse classique sur un intervalle de temps donné.

En maîtrise de physique et applications (MPA) ainsi qu'en DEA mécanique et énergie, j'ai enseigné les systèmes de mesure pendant plusieurs années. En MPA, l'accent est mis sur le développement d'une chaîne d'acquisition de données autour d'un microprocesseur ou micro-contrôleur. Cet enseignement était très pratique avec un fort volet technologique : développement d'un système à base de microprocesseur, interfaçage du système, normalisation des communications... Il répondait aux exigences des industriels locaux consultés lors de la mise en place de cette filière. L'étudiant devait être apte à concevoir un système de mesure

informatisé lors de son stage de fin d'étude si nécessaire. En DEA, je donne les règles de base à mettre en œuvre avant d'interpréter ou d'insérer les données expérimentales dans un modèle. Sous l'angle stochastique, je présente une technique de classification des chaînes de mesure selon deux critères qui sont la fidélité et la justesse. Ce travail s'effectue autour d'étude de cas ou de dispositifs expérimentaux présents au laboratoire.

Lors de la création du DEUG sciences et technologies pour l'ingénieur, j'ai recentré mes enseignements vers le premier cycle. J'ai pris la responsabilité pédagogique de la deuxième année. Depuis de l'ouverture de l'IUP d'Agroalimentaire, je dispense de nouveaux des cours sur les systèmes de mesure. L'objectif cette fois, est de leur donner un esprit critique sur les systèmes de mesure et de leur permettre en milieu industriel de participer à l'élaboration de son cahier des charges. Ce cours s'efforce de présenter l'ensemble des sous-systèmes nécessaires à la mise en œuvre d'une chaîne de mesure. Après une classification des capteurs selon des critères basés sur leur modélisation électrique, j'aborde les techniques de conditionnement ainsi que les méthodes de linéarisation. Je prête une attention toute particulière à l'étude de la sensibilité globale du système face aux grandeurs d'influence et au mesurande. Pour terminer ce cours, l'aspect numérique est abordé avec la présentation des chaînes de mesure informatisées et des normes de communication les plus répandues.

Avec l'essor des télécommunications, l'université souhaite dispenser une formation professionnelle courte dans ce secteur d'activité. Je me suis positionné sur ce dossier avec le soutien du directeur de l'IUT<sup>14</sup> de Saint Pierre. Pour le moment, je travaille sur l'avant-projet d'un département d'IUT de génie des télécommunications et réseaux (GTR). J'ai en charge l'ouverture de ce nouveau département, qui est programmée pour la rentrée de septembre 2001.

---

<sup>14</sup> Institut Universitaire de Technologie

## **II.B. ACTIVITES COLLECTIVES**

Ma première fonction administrative occupée à l'université de La Réunion, fut celle de directeur de département de physique-mécanique. Cette activité démarra en 1993 et dura 2 ans. Pendant ce mandat électif, j'entrepris un travail de quantification des actions afin de les décentraliser. Différents groupes de travail furent constitués pour finaliser un certain nombre de projets au niveau de l'UFR. Des grands dossiers que le département de physique-mécanique eut à gérer durant cette période, je retiendrai :

- la préparation du contrat quadriennal de l'établissement.
- la mise en place du dossier technique et de l'avant-projet de la nouvelle UFR de Sciences et Technologies.
- la mise en place de la réforme des DEUG et la création du DEUG sciences et technologies pour l'ingénieur.
- la réforme et l'informatisation du mode de gestion financière du département. Ce système a permis, par une plus grande autonomie financière des responsables pédagogiques, d'améliorer les conditions de travail au niveau des salles spécialisées.

Cette expérience m'aida à mieux comprendre le fonctionnement de l'UFR et d'en cerner ses limites. L'idée que je me faisais de l'UFR comme une structure complexe et figée, a disparu au profit d'une structure en attente permanente de projets et d'actions propres à la valoriser.

Je pris part à la fin de ce mandat, à la gestion de la politique scientifique de l'université, en étant membre élu de son conseil scientifique durant cinq années. Cette nouvelle activité m'apparut comme une nécessité afin de ne pas négliger la partie recherche de ma fonction d'enseignant-chercheur. Mis à part quelques structures bien ancrées, la plupart des laboratoires de recherche de l'université de La Réunion étaient embryonnaires. L'absence d'une masse critique, conjuguée à une situation de croissance très forte, ont obligé l'université à se définir une politique de croissance maîtrisée. Il convenait de coordonner le profil pédagogique des nouveaux maîtres de conférences avec le souci d'intégration des nouveaux chercheurs dans les pôles en émergence. C'est dans ce cadre que fut conduit par le DRRT<sup>15</sup>, la mise en place d'un livre blanc de la recherche à La Réunion. Ce travail

---

<sup>15</sup> Directeur Régional à la Recherche et à la Technologie

permet de définir les priorités locales en matière de recherche. Pour la physique les deux champs d'actions retenus furent : la physique atmosphérique et la filière canne à sucre. Dans le même temps, j'intégrais la commission de spécialistes de physique qui regroupe 6 sections CNU (30-37-60-61-62-63).

Depuis la fin de ces deux derniers mandats, je suis membre élu du conseil d'administration de l'université de La Réunion. Dans le cadre de cette fonction, je participe aux travaux de la commission de promotion des maîtres de conférences au niveau local et également représentant du collège des enseignants au conseil d'administration du service commun de la documentation (SCD). Cette fonction élective m'a permis d'avoir une vision plus globale de l'université. La gestion de nos contradictions internes lors de l'élaboration des contrats quadriennaux et des plans Etat-Région, montre toute la difficulté qu'a l'université à asseoir ses structures de recherche et dans le même temps, garantir un niveau d'enseignement pour un nombre d'étudiants croissant.

J'assure depuis deux ans la fonction de chargé de mission auprès du président de l'université en coordonnant et animant une commission transversale. Elle a pour objectif de définir les priorités des créations de postes d'enseignants-chercheurs pour l'établissement. Notre travail s'appuie sur une quantification normée des charges d'enseignement des différents secteurs de l'université. Cette charge est pondérée par le potentiel des différents secteurs. De cette phase, il en ressort les priorités au titre de la pédagogie. Dans un second temps, nous intégrons les priorités de l'établissement au titre de la recherche, définies par le conseil scientifique et celles affichées dans le contrat quadriennal de l'établissement. Du travail de cette commission étalée sur six mois, sort un classement des priorités de création d'emplois, qui est soumis au conseil d'administration de l'université. Depuis cette année, nous effectuons en parallèle un suivi des heures complémentaires de l'université.

En dehors de mon activité d'enseignant-chercheur, je participe à la promotion de mon secteur d'activité au sein d'une association. Je suis membre fondateur et trésorier de cette association. Le Groupe Régional Réunion de la Société des Electriciens et Electroniciens, affiliée à la SEE, regroupe un vingtaine d'adhérents. Chaque année, nous organisons une manifestation sous la forme de journées d'études sur des thèmes d'actualité. Ces manifestations sont animées par des conférenciers locaux et des experts nationaux que nous invitons. Nous abordons des thèmes très ouverts ayant un fort impact local, souvent proposés par les industriels ou EDF.

J'ai été consulté par les collectivités locales pour des dossiers techniques comme récemment sur le réseau de fibres optiques transocéaniques SAFE<sup>16</sup> et le schéma de services collectifs de l'enseignement supérieur et de la recherche pour La Réunion. Depuis peu, je viens d'être nommé membre du Conseil Economique et Social de La Réunion par le préfet, aux titres des personnalités qualifiées.

Ces différentes activités administratives et collectives participent à la construction au niveau personnel d'une certaine idée de ma mission d'universitaire. Fort de cette expérience, je me positionne aujourd'hui avec plus de conviction et d'assurance sur des projets au sein de l'université.

### **III. ACTIVITES D'ENCADREMENT ET DE RECHERCHE**

#### ***III.A. AU NIVEAU DE L'EQUIPE***

Je suis à l'origine de la création de l'équipe de recherche Instrumentation et Traitement du Signal au sein du laboratoire de génie industriel. L'équipe ITS compte aujourd'hui 2 enseignants-chercheurs de la 63ième section, 1 chercheur associé et deux doctorants-moniteurs.

***J'y conduis les orientations scientifiques et expérimentales, les équipements, les partenaires et le financement.***

Notre activité de recherche se décompose suivant deux axes:

- Le développement d'un prototype de transport d'énergie sans fil constitue le travail expérimental le plus important. Le défi technologique du départ laisse aujourd'hui la place à un travail de modélisation et d'optimisation des performances du système.

- L'obtention des caractéristiques d'un milieu inconnu par sondage non-intrusif est le deuxième axe de recherche. L'objectif de ce travail consiste à mettre en œuvre des techniques de traitement des signaux réfléchis ou transmis permettant de

---

<sup>16</sup> South Africa Far East submarine cable network

remonter aux caractéristiques de ces milieux. Ce travail se ramène à un problème d'identification. La mise en œuvre d'une nouvelle classe de méthodes d'optimisation à savoir les algorithmes génétiques, constitue notre originalité.

Depuis septembre 1997, je bénéficie d'une prime d'encadrement doctorale et de recherche. Cette reconnaissance et cet encouragement m'ont permis localement de mieux ancrer les axes de recherche en cours et de faciliter de manière indirecte l'augmentation du nombre de doctorants au sein de l'équipe.

### **III.B. ENCADREMENT D'ETUDIANTS**

Il est nécessaire de préciser que tous les encadrements de recherche que j'ai effectués depuis la création de l'équipe ITS (1995), s'est faite sous la responsabilité successive des Professeurs Jean Claude Gatina et Patrick Hervé (section CNU 60).

Les premiers étudiants que j'ai eus à encadrer dès 1993, étaient issus de la maîtrise de physique et applications. Lors de ces stages d'une durée de deux mois, j'inscrivais leurs actions dans la continuité de mes préoccupations de recherche. C'est dans ce cadre que j'ai supervisé le développement de système de mesure spécifique pour plusieurs laboratoires de recherche locaux. J'ai co-encadré également des élèves ingénieurs et de DAA sur des périodes allant de quatre à six mois. Ces travaux de recherche et de développement ont jeté les bases d'une activité autour de l'électronique bien qu'il n'existait aucun laboratoire de recherche dans ce secteur localement. J'ai également supervisé des étudiants soutenus par des aides de l'ANVAR (Aide aux Jeunes pour l'Innovation). La première action financée par l'ANVAR concernait le développement pour un opérateur local de radio-messageries (LTB<sup>17</sup>) d'un système de suivi de mobile sur l'île de La Réunion à l'aide d'une balise GPS<sup>18</sup> et du système de communication INMARSAT. Le second projet consistait à développer un système de télémessure pour un site industriel. Nous avons développé un système permettant de faire des acquisitions de température et de pression dans un milieu bruité tel qu'une usine sucrière. Le dispositif réalisé permet la transmission sur une distance de l'ordre de 100m de l'ensemble de nos mesures entre le récepteur et l'émetteur.

Suite à un DAA<sup>19</sup> sur la mesure d'humidité dans le sol dont j'ai assuré l'encadrement scientifique au niveau du système de mesure, le CIRAD en

---

<sup>17</sup> La Téléphonie Bourbonnaise

<sup>18</sup> Global Positioning System

<sup>19</sup> Diplôme d'Agronomie Approfondie

collaboration avec l'école nationale supérieure agronomique (ENSA) de Montpellier et le CEMAGREF (Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement), a souhaité poursuivre l'opération dans le cadre d'une thèse. C'est ainsi que Pierre Todoroff a bénéficié d'une bourse de recherche de la Région Réunion en septembre 1995 pour mener à bien ce travail. Dans le cadre d'une politique de maîtrise et de suivi de la consommation en eau à La Réunion, le CIRAD souhaitait disposer d'une technique de mesure de l'humidité dans le sol. Après un tour d'horizon des techniques disponibles, la mesure d'humidité par réflectométrie temporelle nous a semblé la plus pertinente et la plus prometteuse si l'on pouvait remonter à la mesure d'humidité en fonction de la profondeur. C'est autour de cette problématique que j'ai démarré le travail d'encadrement scientifique de la thèse de Pierre Todoroff. Nous avons été sollicité pour participer au réseau de recherche national MEDITE<sup>20</sup> qui se constituait en novembre 1996. En nous appuyant sur une modélisation du milieu de propagation par des lignes de transmission, nous avons développé un modèle capable de reproduire les signaux d'un réflectomètre. Dans un second temps, nous avons obtenu les taux d'humidité du sol en fonction de la profondeur à l'aide d'une technique d'identification.

En collaboration avec Miloud Bessafi et Jean-Pierre Chabriat, j'assure le co-encadrement de la thèse de Richard Lorion. Il bénéficie d'une bourse du ministère de l'enseignement supérieur (bourse MENRT). Son activité consiste à développer une technique de caractérisation des propriétés thermiques des matériaux. Elle présente un intérêt pour deux secteurs économiques : les bâtiments et travaux publics et l'agro-alimentaire. Afin de remonter aux caractéristiques des matériaux, nous avons mis en œuvre une méthode d'optimisation stochastique, les algorithmes génétiques. Cet outil a été utilisé par Pierre Todoroff dans le cadre de sa thèse. Les résultats ont été très concluants pour des matériaux homogènes. J'ai orienté le travail sur l'étude des matériaux stratifiés. Pour l'heure, nous pouvons localiser la position d'un défaut au sein d'un matériau homogène.

J'assure également l'encadrement scientifique de Laurent Chane Kuang Sang, qui bénéficie d'une bourse de recherche de la Région Réunion, en collaboration avec Alain Celeste. Il travaille sur l'amélioration des performances des sources hyperfréquences, plus particulièrement sur le contrôle en fréquence, en amplitude et en phase du magnétron. L'objectif est de mettre en œuvre une stratégie de commande de l'alimentation d'un réseau d'antennes en agissant directement sur la source de chaque magnétron. A l'aide de la technique "Injection Locking Mode", nous avons réussi à verrouiller en fréquence cet oscillateur instable. Nous avons

---

<sup>20</sup> MEsures Diélectriques de la Teneur en Eau.



souhaité adopter une démarche comportementale dans la modélisation du dispositif ainsi réalisé afin de l'asservir également en puissance. Cette recherche entre de la cadre du développement d'un prototype de transport d'énergie sans fil, mais il possède également des intérêts industriels immédiats.

Je participe également à l'encadrement scientifique du travail de thèse de Michel Benne. Il développe un modèle comportemental de l'atelier d'évaporation d'une usine sucrière. J'ai coordonné le développement d'un système de communication de type client-serveur. Ce dispositif, primordial pour l'obtention des données expérimentales industrielles, a été développé sous forme de projet en un mois par l'ensemble des doctorants de l'équipe ITS et de l'équipe ECP en juillet 1998. Nous avons installé sur site ce dispositif serveur-client temps réel baptisé I-MEDIA. Grâce à un module de couplage, nous sommes connectés aux réseaux d'automates de l'usine. Pour l'heure, il nous permet, sans perturber le fonctionnement des ateliers, d'accéder aux données qui nous intéressent et de prédire en temps réel à l'aide de nos modèles les paramètres clés du processus inaccessibles à la mesure. Ces grandeurs sont affichées en temps réel sur les pupitres des opérateurs, ce qui constitue une aide précieuse à la prise de décision. Dans un deuxième temps, le système installé fournira les commandes adéquates aux différents actionneurs d'un atelier. Pour ce travail de commande, il est nécessaire d'effectuer l'identification des coefficients d'échange. Nous avons couplé ce travail avec celui de Richard Lorion. Nous avons utilisé les algorithmes génétiques comme outil d'optimisation sur les plages de fonctionnement étendues non-linéaires du système. Au niveau du laboratoire, un réacteur pilote est en cours de réalisation. Je participe aux choix et développements instrumentaux utiles à l'amélioration du système. J'apporte également mon concours au niveau du traitement de l'information.

#### **IV. SYNTHÈSE**

A l'aide d'un diagramme, je voudrais synthétiser l'ensemble de mes actions depuis mon recrutement à l'université de La Réunion (Tableau 1 et 2). Le bon déroulement de l'ensemble de ces actions a nécessité une disponibilité et une gestion parfois tendue des événements .

Je décomposerai mon parcours en deux phases :

- une **phase d'installation** qui m'a permis d'intégrer pleinement l'Université de La Réunion et de me positionner en recherche.

- une phase de **création et de développement**, au cours de laquelle j'ai mené des actions à plusieurs niveaux qui ont abouti à l'émergence d'une structure de recherche en instrumentation et traitement du signal.

Le groupe de recherche, "**instrumentation et traitement du signal**" a placé son action dans un souci d'ouverture et de partenariat. Pour son intégration à notre environnement immédiat, l'équipe a répondu à des sollicitations qui n'allaient pas forcément dans la direction d'une plus grande unité scientifique. Nous avons accepté l'aspect **pluridisciplinaire et appliqué** de nos thèmes de recherche. Ils s'articulent autour de la transmission d'information et d'énergie suivant deux thèmes.

Le premier thème, **le transport d'énergie sans fil** suit une voie de recherche et de développement originale. Ce concept bien qu'ancien était en quête d'une application terrestre. Nous avons proposé une étude de cas sur l'alimentation électrique d'un site isolé et difficile d'accès : le village de Grand-Bassin.

En premier lieu, autour du développement d'un démonstrateur de table et la réalisation d'un prototype, nous avons voulu démystifier le concept pour le grand public et favoriser de la sorte une plus grande acceptabilité du principe. Pour cela, nous avons organisé deux manifestations locales, « SPS IdR'94 et SPS-IdR'96 » avec la participation des Professeurs Vanke de l'université de Moscou, Itoh de l'université d'Hokaido et Kaya de l'université de Kobe. Notre équipe participe également depuis 1996 aux travaux du comité énergie (power committee de l'IAF) lors des congrès IAF<sup>21</sup> et WPT<sup>22</sup>. Nous avons reçu cette année un prix (Bootstrap Award) de la fondation FINDS<sup>23</sup> pour nos actions de promotion de la TESP autour de l'étude de cas de Grand Bassin. Lors de la remise du prix, l'orateur a souligné l'intérêt de notre démarche pour faciliter la compréhension des enjeux sociaux et politiques liés au développement de futures centrales électriques de l'espace. Notre travail s'intègre dans une vision à très long terme menée par plusieurs groupes de recherche internationaux qui devrait aboutir dans les années 2050 à la mise en orbite d'une station productrice d'énergie pour notre planète : c'est le concept SPS<sup>24</sup>.

En second lieu, nous travaillons en parallèle à l'amélioration des sous-systèmes susceptibles d'avoir des retombées immédiates. Pour l'heure, nous

---

<sup>21</sup> International Astronautical Federation

<sup>22</sup> Wireless Power Transmission

<sup>23</sup> Foundation for the International Non-Governmental Development of Space

<sup>24</sup> Solar Power Satellite

explorons deux pistes. Au niveau de la source hyperfréquence, nous étudions le contrôle en amplitude, fréquence et phase des magnétrons. Ce travail trouve un écho favorable auprès d'un industriel national, la COVIMAG, premier fabricant européen de tubes à vide de puissance, pour le chauffage des plasmas. En ce qui concerne le module de collecte de l'énergie à la réception, nous nous orientons vers une intégration des composants en technologie Si-Ge. Une collaboration est envisagée avec l'équipe du Professeur Alain Fabre du laboratoire IXL de Bordeaux. L'objectif à terme serait d'intégrer ce module dans des sous-ensembles à faible consommation pouvant à même de fonctionner en télé-alimentation.

Le second thème de recherche de l'équipe résulte des sollicitations de notre environnement immédiat. Il correspond à des problèmes **d'identification de paramètres**. Nous avons été amené à travailler en agronomie et en thermique autour des problématiques suivantes :

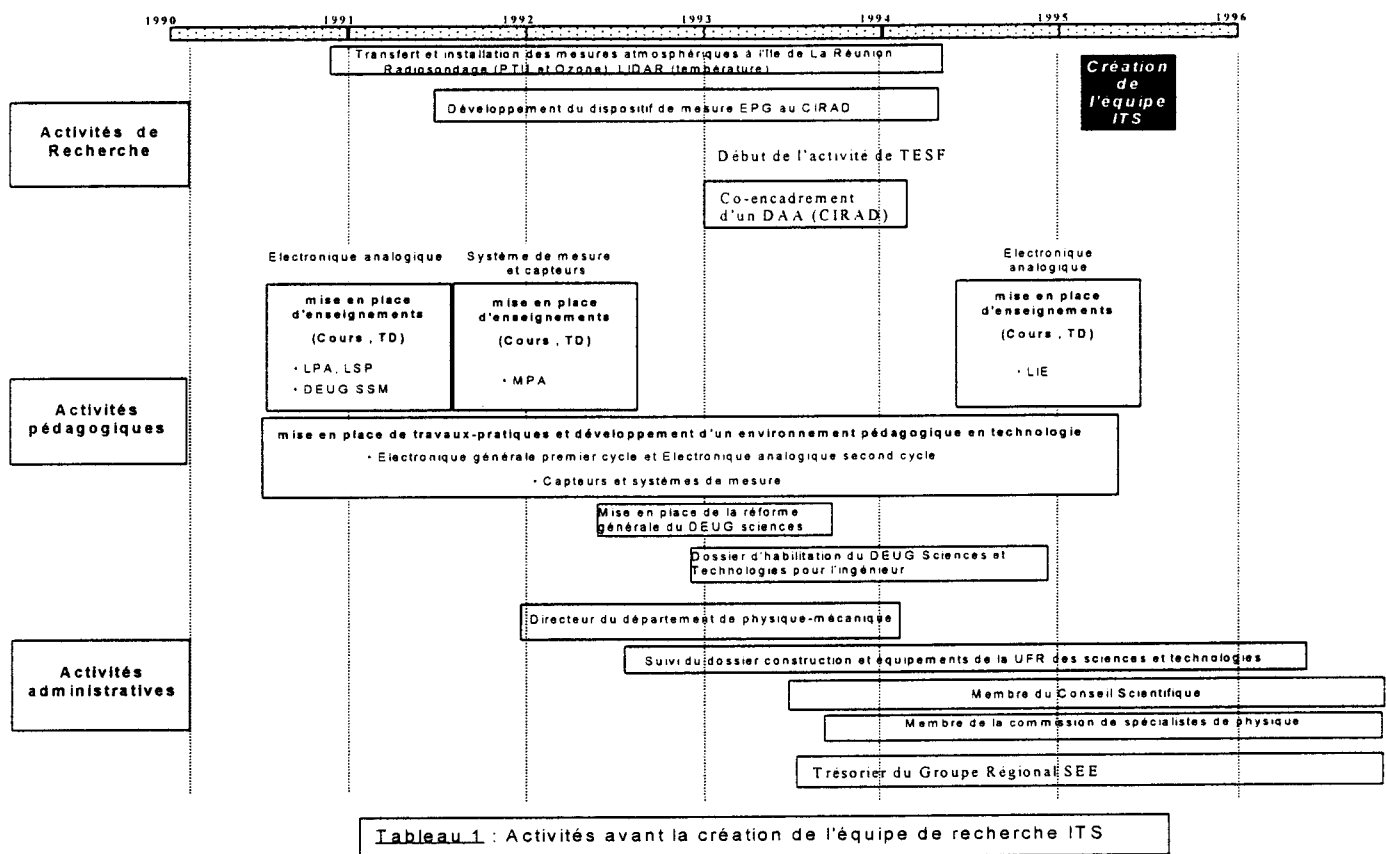
- la mesure d'humidité du sol,
- la caractérisation des paramètres thermo-physiques de matériaux.

A l'aide de sondage de type ondulatoire, nous souhaitons remonter aux caractéristiques de ces milieux en analysant l'information véhiculée par cette onde après interaction. Pour cela, nous avons amélioré ou développé des systèmes de mesure en laboratoire. La mise en place d'outils spécifiques de traitement s'appuie sur une modélisation temporelle de la propagation ou de la diffusion d'une onde dans un milieu stratifié. L'obtention des caractéristiques du milieu par traitement du signal réfléchi ou transmis est effectuée selon deux méthodes. Dans le cas de milieu homogène nous utilisons une méthode déterministe. Pour les milieux stratifiés inhomogènes, nous avons employé une technique d'optimisation stochastique basée sur les algorithmes génétiques. Ce travail, mené en étroite collaboration avec notre environnement local, est avant tout pluridisciplinaire et offre aux sciences pour l'ingénieur un terrain d'application de son savoir-faire avec des retombées économiques immédiates.

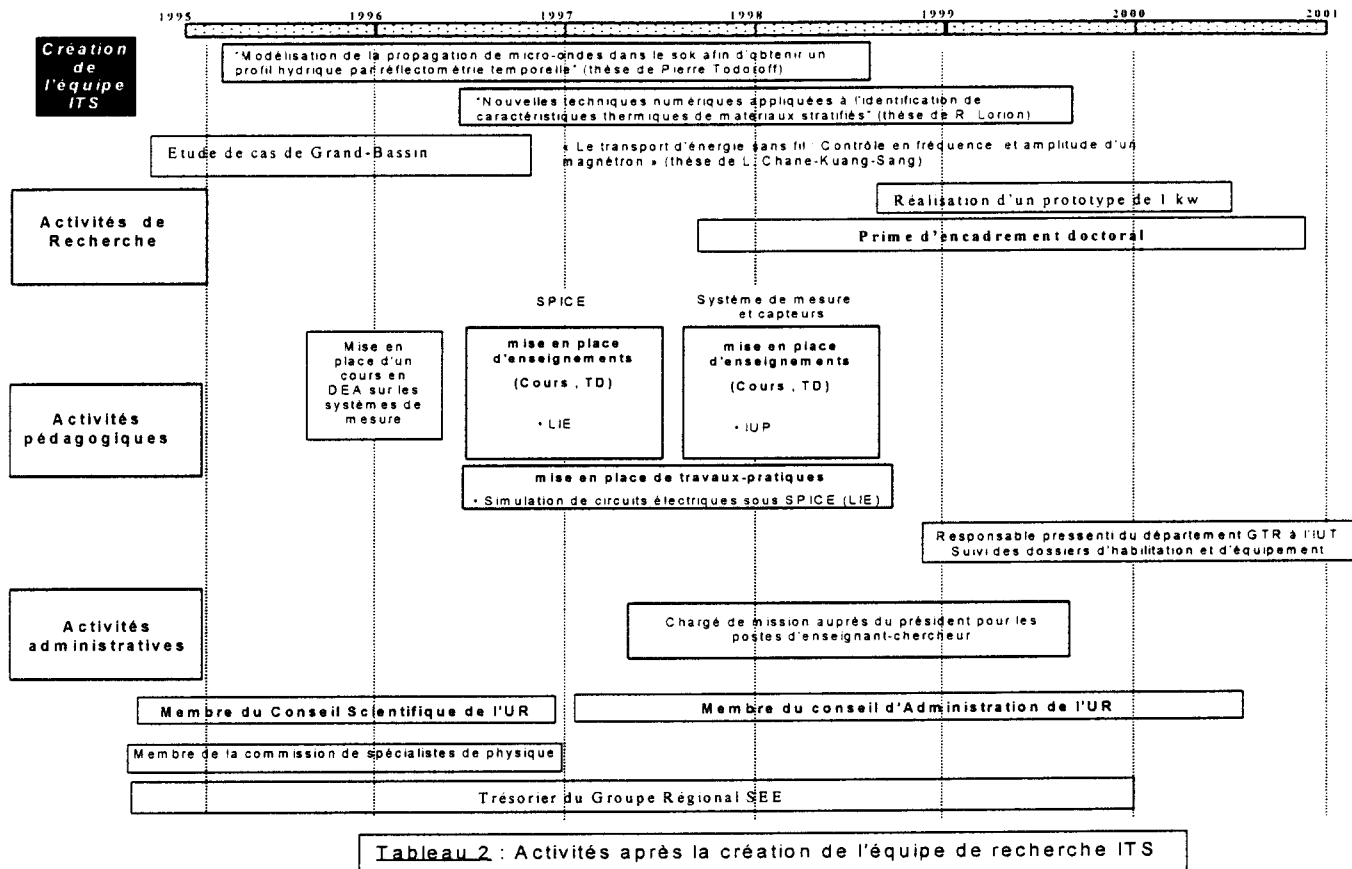
Pierre Todoroff a obtenu le grade de docteur en octobre 1998 avec la mention très honorable et les félicitations du jury. En accord avec le directeur de thèse, j'ai conduit intégralement l'aspect scientifique de son travail. Il en est de même pour Richard Lorion et Laurent Chane-Kuang-Sang, dont je co-dirige leurs travaux depuis 1996. Michel Benne a également obtenu le grade de docteur en juillet 1999 avec la mention très honorable et les félicitations du jury.

Bien que la somme de travail accompli soit importante au niveau pédagogique et administratif, j'ai néanmoins essayé de mener à bien un travail de recherche de

qualité. L'environnement défavorable du départ laisse place aujourd'hui à une structure en plein essor. L'évolution des moyens de communications conjuguée aux puissances de calcul dont nous disposons, éliminent les handicaps majeurs de notre position singulière. Je souhaite inscrire nos actions non seulement au niveau local, mais aussi au niveau national en participant au développement des systèmes de télécommunications. La création prochaine d'un département de génie des Télécommunications à l'IUT de Saint Pierre, conduira à un renforcement de notre potentiel recherche. Je souhaite rapprocher l'énergie et l'information dans leur mode de transport et ainsi développer des systèmes mobiles ou isolés, complètement autonomes.



**Tableau 1 : Activités avant la création de l'équipe de recherche ITS**



**Tableau 2 : Activités après la création de l'équipe de recherche ITS**

---

# **DEUXIEME PARTIE**

## **EXPOSE DETAILLE DES TRAVAUX DE RECHERCHE**

- INTRODUCTION
- CARACTERISATION DE MILIEU A L'AIDE DE TECHNIQUES INVERSEES
- LE TRANSPORT D'ENERGIE SANS FIL
- CONCLUSION ET PERSPECTIVES

## **DEUXIEME PARTIE : EXPOSE DETAILLE DES TRAVAUX DE RECHERCHE**

### **I. INTRODUCTION**

Je considère que mon activité de recherche durant la période de 1990 à 1994 était plus orientée vers l'ingénierie des systèmes que vers une recherche proprement dite. Du fait de la faiblesse du tissu industriel en technologie et de l'absence d'une structure de recherche, il entraînait davantage dans une activité de transfert de technologie. Durant cette période j'ai construit petit à petit un environnement propice à la mise en place d'une activité de recherche en technologie avec l'acquisition de différents matériels de mesure et de développement des circuits imprimés. Aussi je m'attacherais à présenter plus en détail l'activité menée depuis la création de l'équipe de recherche en " Instrumentation et Traitement du Signal " au sein du laboratoire de Génie Industriel dans cette deuxième partie de ce mémoire.

Il est à souligner le fait que la structure démarrait de rien. Ce qui a nécessité un travail difficilement quantifiable de démarches et de contacts afin d'obtenir aussi bien en interne qu'en externe la crédibilité et le soutien de mes projets. Mes actions antérieures sur les systèmes de mesure ont permis un affichage rapide de la partie instrumentation que je revendiquais. Au vu des contacts locaux, il m'est apparu que les projets inventoriés nécessitaient une part non négligeable de traitement du signal. D'où la dénomination de l'équipe de recherche, Instrumentation et Traitement du Signal, dont j'assume la coordination et la responsabilité sous le contrôle du directeur de laboratoire.

Ma volonté d'inscrire mes activités de recherche en forte relation avec mon environnement immédiat, a imposé son aspect pluridisciplinaire et appliqué. Néanmoins pour éviter que nos actions ne relèvent que d'un bureau d'études, j'ai essayé en parallèle d'apporter une originalité et des ouvertures. Ce qui nous a permis d'intégrer des réseaux de recherche nationaux et internationaux. Malgré cette préoccupation, nous avons dû répondre à des sollicitations externes très diversifiées pour tisser des liens. Ce qui peut gêner la clarté de nos actions, comme l'a indiqué l'un des rapporteurs nationaux lors de la négociation du plan quadriennal de l'établissement. Je m'efforce de recentrer notre activité pour la rendre plus cohérente au regard de notre potentiel.

L'acquisition récente des moyens de calculs et des instruments de mesure, nous a permis de mettre en place des plates-formes de développement cohérentes.



Nous avons adopté le standard GPIB<sup>25</sup> pour l'instrumentation de laboratoire et le standard SCXI<sup>26</sup> pour les chaînes d'acquisition intégrées. Ces différents éléments sont pilotés sous un même environnement de programmation objet graphique, Labview®. Le traitement des données s'effectue en complémentarité sous Matlab® et Labview®. Le choix de ces logiciels et plates-formes résulte d'une étude des tendances en instrumentation au niveau international. Ces outils nous autorisent une approche temps réel et surtout nous permettent par l'approche objet d'intégrer nos différents travaux de recherche rapidement. Ainsi les résultats obtenus par chaque doctorant sont immédiatement profitable à l'équipe. Nous avons su également tirer profit de l'augmentation des puissances de calcul des nouveaux ordinateurs pour développer des algorithmes gourmands en temps de calcul tel que les algorithmes génétiques et leur application à des problèmes d'optimisation. Un effort particulier a été consenti par l'université pour l'achat de matériel de mesure en hyperfréquences depuis trois ans. Nous disposons d'un analyseur de spectre et d'un analyseur vectoriel qui nous permettent de travailler en hyperfréquences dans des conditions plus correctes.

Dans cette deuxième partie, je présenterai le travail mené principalement par trois doctorants dont j'ai assuré l'encadrement scientifique en partie ou totalement. J'ai participé à la définition des sujets de thèse qui faisaient suite à des travaux souvent menés par des stagiaires de maîtrise, d'école d'ingénieurs ou de DEA. Le travail de recherche que j'ai conduit avec Pierre Todoroff et Richard Lorion consiste à identifier les caractéristiques d'un milieu à l'aide d'un sondage non intrusif. Je m'efforce par traitement des informations véhiculées par ces ondes après interaction avec le milieu à remonter à ses caractéristiques. Ces deux thèses ont suivi la même démarche. Nous avons dans un premier temps travaillé avec des milieux homogènes et validé un premier modèle avec notre dispositif expérimental. Dans les deux cas, nous avons utilisé un modèle dit de connaissance pour retrouver nos signaux mesurés. Dans un second temps, nous avons étendu notre étude à des milieux stratifiés. A l'aide d'une technique d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques, nous avons pu remonter aux caractéristiques de ces milieux. Des confrontations entre la théorie et l'expérience ont été menées pour valider nos hypothèses d'étude.

Dans le cadre du transport d'énergie sans fil, je présenterai les actions que j'ai conduites avant l'arrivée de Laurent Chane-Kuang-Sang et celles qui sont en cours. Autour de l'étude de cas de Grand-Bassin, je vous donnerai un état de l'art sur le

---

<sup>25</sup> General Purpose Interface Bus

<sup>26</sup> Signal Conditioning eXtensions for Instrumentation

sujet et nos propositions. Nous avons développé des systèmes spécifiques afin de satisfaire un certain nombre de contraintes environnementales. Je terminerai par la présentation du travail mené autour du développement du prototype. Nous avons mis l'accent sur l'unité d'émission du fait que ce travail pouvait trouver un intérêt immédiat autre que le TESH auprès d'un industriel.

## **II. CARACTERISATION DE MILIEU A L'AIDE DES TECHNIQUES DES METHODES INVERSES**

Le besoin d'effectuer des mesures à distance, pour des raisons multiples telles que les milieux hostiles ou inaccessibles, est croissant avec les avancées technologiques au niveau de l'instrumentation. La détermination des caractéristiques physiques d'un objet ou d'un milieu inconnu à l'aide d'une technique non intrusive peut se ramener à l'étude d'un problème inverse. On utilise une excitation de type ondulatoire pour "sonder" ces milieux. De la mesure des ondes réfléchies, transmises ou encore diffractées, on en déduit les propriétés de ce milieu. L'obtention d'une information pertinente s'appuie sur des méthodes différentielles : le signal émis est comparé au signal mesuré. L'information se situe au niveau de la phase, de l'amplitude ou de la fréquence du signal de sortie selon les principes physiques mis en jeu.

Les théories utilisées pour décrire les phénomènes physiques dépendent de la fréquence des ondes utilisées et des dimensions physiques des objets ou milieu que l'on souhaite caractériser. De ces deux considérations, nous obtenons le mode d'interaction entre l'onde et le milieu. Nous avons dans un premier temps modélisé notre système physique de manière à prédire les sorties sous différents stimuli. Une fois le modèle établi, l'obtention des caractéristiques du milieu peut se concevoir de deux manières.

- Si le problème est bien posé, nous pouvons décrire notre problème par un système d'équations qui se ramène à une équation matricielle. L'inversion de matrice est possible avec en général un certain nombre d'hypothèses sur les modèles afin de les régulariser.

- Si le problème est mal-posé ou mal-conditionné, nous pouvons mettre en œuvre une technique d'optimisation de type stochastique. Pour notre part, nous avons utilisé les algorithmes génétiques.

Nous avons appliqué ces deux techniques de caractérisation d'un milieu à deux problèmes :

- la mesure d'humidité dans le sol,
- la caractérisation thermique de matériaux.

Bien que les phénomènes physiques mis en jeu ne soient pas les mêmes, nous avons adopté une démarche scientifique similaire. Dans un premier temps, nous avons développé un modèle de connaissance nous permettant de remonter aux caractéristiques du milieu dans le cas homogène et isotrope à l'aide d'une méthode classique d'inversion. Dans un second temps, nous avons introduit l'anisotropie et la stratification du milieu dans nos modèles. L'inversion du modèle s'appuie alors sur une technique d'optimisation particulière : les algorithmes génétiques.

Cette démarche découle, dans les deux cas, de l'existence d'un système expérimental pouvant caractériser des milieux homogènes. Nous avons étendu cette mesure à des milieux stratifiés en développant un nouveau mode opératoire en laboratoire. Ce qui nous a permis d'effectuer des ajustements entre la théorie et l'expérience, afin de valider pas à pas les hypothèses d'étude.

## **II.A. CARACTERISATION DE LA PERMITTIVITE D'UN MILIEU NATUREL**

### **II.A.1. LA DEMARCHE**

Nous avons été sollicité par le CIRAD pour mener une étude sur mesure de la teneur en eau en fonction de la profondeur. Ce travail s'intègre dans une politique globale de gestion des ressources en eau. L'accès aux profils hydriques du sol est primordial pour connaître l'état de la réserve en eau et les transferts hydriques dans la zone non-saturée.

Au début de ce travail, le CIRAD s'était équipé d'un réflectomètre qui lui fournissait une mesure d'humidité globale du sol. La première démarche adoptée consistait à multiplexer une batterie de sondes disposées à différentes profondeurs horizontalement, de façon à obtenir un profil d'humidité. Cette méthode nécessite une installation spécifique lourde (fosse, terre transportée...) : ce qui constitue un frein à son utilisation. J'ai encadré ce travail lors du Diplôme Agronomique Approfondie de Pierre Todoroff en 1993.

J'ai entrepris avec Malik Mamode la modélisation de la propagation de l'onde dans le sol afin d'aborder le problème sous l'angle des problèmes inverses. Ce travail préliminaire (MAMODE and LAN-SUN-LUK 1996) a permis de jeter les bases théoriques de la thèse de Pierre Todoroff. Nous avons adopté une modélisation du milieu à l'aide des lignes de transmission sans perte afin de pouvoir remonter rapidement à l'humidité du sol. Aussi la principale difficulté apparut rapidement au

niveau expérimental. Nous avons un dispositif de mesure dont les caractéristiques électriques étaient méconnues (absence d'informations techniques du constructeur). Après un an d'effort, nous avons pu valider notre modèle théorique sur des données expérimentales. Un certain nombre de problèmes ont pu être résolu grâce au concours du CEMAGREF, division instrumentation et au LTHE<sup>27</sup> qui avait une plus longue expérience du dispositif de mesure.

Du point de vue théorique, ce travail s'appuie sur la caractérisation de la permittivité électrique d'un milieu que l'on peut relier à l'humidité par une relation d'étalonnage (TOPP 1980). Le sol est modélisé comme un milieu stratifié sans pertes où la propagation des ondes s'effectue sous l'hypothèse T.E.M. Ce qui nous permet de ramener ce problème à celui d'un problème d'inversion à une dimension proche du travail effectué par plusieurs auteurs (LESSELIER 1978), (YANUKA, TOPP et al. 1988).

Ces hypothèses très restrictives étaient nécessaires pour se placer dans un cadre théorique bien maîtrisé. En effet Symes (SYMES 1981) a montré que les problèmes utilisant une stratification douce, dite hypothèse WKB<sup>28</sup>, peuvent être vus comme un problème bien posé. Conscient de ces contraintes, nous avons par la suite intégré des pertes dans notre modèle afin de se placer dans des conditions plus réelles, tout en n'intégrant pas la dispersion des ondes. L'obtention du profil est possible alors par un traitement spécifique d'optimisation.

## II.A.2. LE DISPOSITIF DE MESURE

La mesure de la permittivité par réflectométrie temporelle (TDR) est une méthode ancienne, mais elle se limitait à des milieux homogènes et isotropes. Le dispositif de mesure dérive des testeurs de câbles en haute fréquence (figure 1a). Le TDR fournit une impulsion avec un front très raide (temps de montée 120 ps). Cette dernière est envoyée dans une ligne de transmission constituée d'un coaxial relié au guide d'onde planté dans le sol par l'intermédiaire d'un boîtier d'adaptation d'impédance. Le guide d'onde est constitué d'une paire de tiges de conducteur de diamètre  $d$  et d'écartement  $D$  (figure 1b). Le signal réfléchi arrive à un système d'acquisition et de traitement numérique de données rapide. Cette onde de retour ou réfléchie, trouve son origine dans l'existence de différentes discontinuités rencontrées lors du trajet du signal émis par la source.

---

<sup>27</sup>Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement

<sup>28</sup>Wiener-Kramer-Brillouin



Figure 1a : Le réflectomètre utilisé

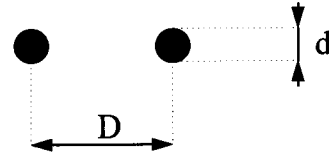


Figure 1b : Guide d'onde bifilaire

L'impédance du guide d'onde  $Z$ , plongé dans un milieu de permittivité relative  $\epsilon_r$ , peut s'écrire sous la forme suivante quand la distance entre les deux conducteurs est très grande devant la section des conducteurs ( $D \gg d$ ) (KRAUS 1984) :

$$Z = \frac{276}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{D}{d} = \frac{Z_{guide}}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Il est à noter que la résolution temporelle du réflectomètre de type TRASE<sup>29</sup> est très bonne : 10 ps. Toutes les 40  $\mu$ s, le système effectue un point de mesure (tension, temps). Après traitement interne, le signal mesuré est représenté sur un graphe temporel par l'appareil. Le TDR nous fournit l'amplitude relative et le temps associés à l'onde en un point (Figure 2). Connaissant la longueur du guide d'onde  $L$ , il ne reste plus qu'à déterminer avec précision le passage de l'onde sur le début et la fin du guide. Pour cela on utilise les phénomènes suivants:

- Le temps de référence début du guide d'onde est donné par l'apparition d'une discontinuité provoquée par le "balun" (adaptateur d'impédance placé à la jonction du coaxial et du guide d'onde enterré) après l'établissement de l'attaque. Soit  $t_0$  ce temps initial.

- La fin du guide d'onde peut être assimilée en première approche à un circuit ouvert. Ce qui va générer une forte discontinuité que l'on associera à  $t_1$ . De cette analyse, on peut établir les relations suivantes.

$$v = \frac{2L}{(t_1 - t_0)} \text{ où } v \text{ est la vitesse de propagation de l'onde dans le sol.}$$

<sup>29</sup> développé par Soil Moisture Equipment Corp.

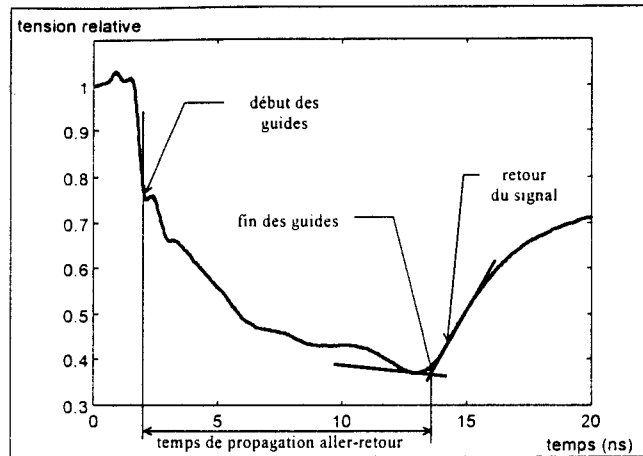


Figure 2 : Le signal mesuré

Sachant que la permittivité du milieu,  $\varepsilon_r = \frac{c_0^2}{v^2}$ , on en déduit  $\varepsilon_r = \frac{c_0^2(t1 - t0)^2}{4L^2}$ .

Dans cette relation  $c_0$  correspond à la vitesse de propagation de la lumière dans le vide. L'humidité est obtenue en utilisant une relation d'étalonnage du type (TOPP 1980) :

$$Hv(en\%) = -5,3 + 2,92\varepsilon_r - 5,510^{-2}\varepsilon_r^2 + 4,310^{-4}\varepsilon_r^3$$

Nous proposons d'étendre cette technique à des milieux linéaires, inhomogènes et isotropes. De ces mêmes signaux de mesure, nous souhaitons remonter au profil d'humidité en fonction de la profondeur.

### II.A.3. LE CALCUL D'HUMIDITE POUR UN MILIEU STRATIFIE SANS PERTE

#### II.A.3.a. Mise en place du modèle

Nous avons élaboré un modèle dit de connaissance après avoir analysé notre dispositif expérimental. Pour cela, nous avons utilisé une méthode plus proche de l'analyse locale de la propagation d'une onde électromagnétique. Elle nous fournit une méthode récursive, appelée "algorithme de déconvolution dynamique", d'identification des différentes strates d'un milieu stratifié. Elle est équivalente à la mise en œuvre d'un modèle de ligne de transmission non uniforme. Cette méthode bien que connue depuis fort longtemps n'a pas reçu un accueil favorable. En effet, un mauvais rapport signal sur bruit du signal mesuré génère un effet catastrophique sur le traitement. D'où l'engouement de la plupart des équipes pour une approche matricielle, plus globale, équivalente à la résolution d'un système d'équations intégral-différentielles dans un domaine transformé.

Néanmoins, suite aux travaux de Symes (SYMES 1981), Bruckstein et Kaithlath (BRUCKSTEIN and KAILATH 1987), montrant la stabilité numérique de cette méthode et de son équivalence du point de vue théorique aux méthodes classiques dans le cas de milieu sans perte, nous avons choisi cette voie de recherche au niveau de l'équipe. En effet, le côté récurrent des équations et la simplicité dans sa mise en œuvre du point de vue algorithmique, nous a poussé à choisir cette vision plus locale des phénomènes. De plus, la possibilité d'effectuer un contrôle dynamique de l'erreur et la simplicité de l'algorithme d'identification permettent d'obtenir des résultats intéressants même sur des mesures bruitées (ARSENE 1983), (BRUCKSTEIN, KOLTRACHT et al. 1986).

Il nous reste à spécifier les propriétés physiques du milieu pour décrire le comportement temporel des ondes électromagnétiques en tout point. Nous considérons notre milieu comme :

- inhomogène selon la direction de propagation,
- isotrope au sein d'une strate,
- sans pertes,
- invariant par translation temporel
- et à réaction locale.

Nous modélisons ce système physique à l'aide des équations de Maxwell sous l'hypothèse d'onde T.E.M.

$$(1) \quad \frac{\partial E(z,t)}{\partial z} = - \mu_0 \mu_r(z) \frac{\partial H(z,t)}{\partial t}$$

$$(2) \quad \frac{\partial H(z,t)}{\partial z} = - \varepsilon_0 \varepsilon_r(z) \frac{\partial E(z,t)}{\partial t}$$

Cette vision est équivalente à celle des lignes de transmission à paramètres localisés  $L(z)$  et  $C(z)$ :

$$(3) \quad \frac{\partial v(z,t)}{\partial z} = - L(z) \frac{\partial i(z,t)}{\partial t}$$

$$(4) \quad \frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = - C(z) \frac{\partial v(z,t)}{\partial t}$$

Nous effectuons une stratification du milieu en  $N$  couches. Les conditions sur les champs aux interfaces, nous amène à introduire un coefficient de réflexion localisé  $\rho(z)$ .

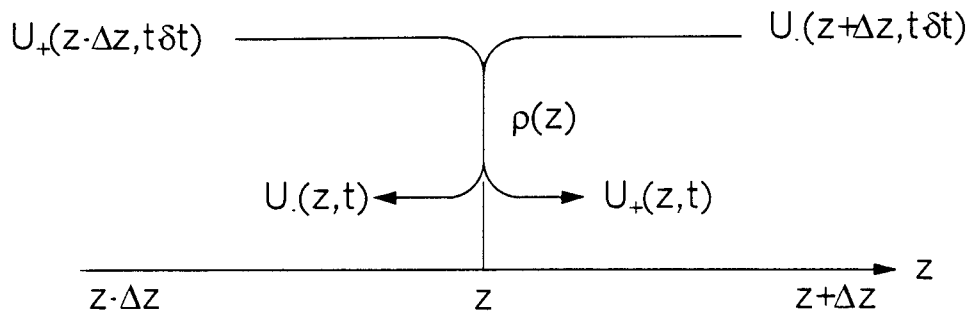


Figure 3: Vision locale de l'onde de tension

$$\text{On a } \rho(z) = \frac{Z(z+\Delta z) \cdot Z(z)}{Z(z+\Delta z) + Z(z)} \text{ où } Z(z) = \sqrt{\frac{L(z)}{C(z)}} \quad (5)$$

Pour résoudre ce système d'équations, il ne nous reste plus qu'à fixer les conditions aux limites du domaine d'étude en  $z = 0$  et  $z = L$ . Le fait que le signal d'excitation soit une impulsion de largeur  $\tau$ , que l'on peut considérer comme un échelon à l'échelle du phénomène traité, nous permet d'élaborer une technique simple de calcul itératif du signal réfléchi ou du signal transmis. Le passage dans le domaine transformé de Laplace, nous permet d'obtenir un système d'équations qui se prête à une représentation sous la forme d'un diagramme de rayons. Le processus de calcul élaboré correspond au remplissage de ce diagramme à tous les pas de temps  $\Theta$  en tenant compte du fait que les strates sont discrétisées de manière que le temps de propagation entre la strate  $j$  et  $j+1$  s'effectue toujours en un temps  $\Theta$  constant. La discrétisation spatiale est donc à pas variable.

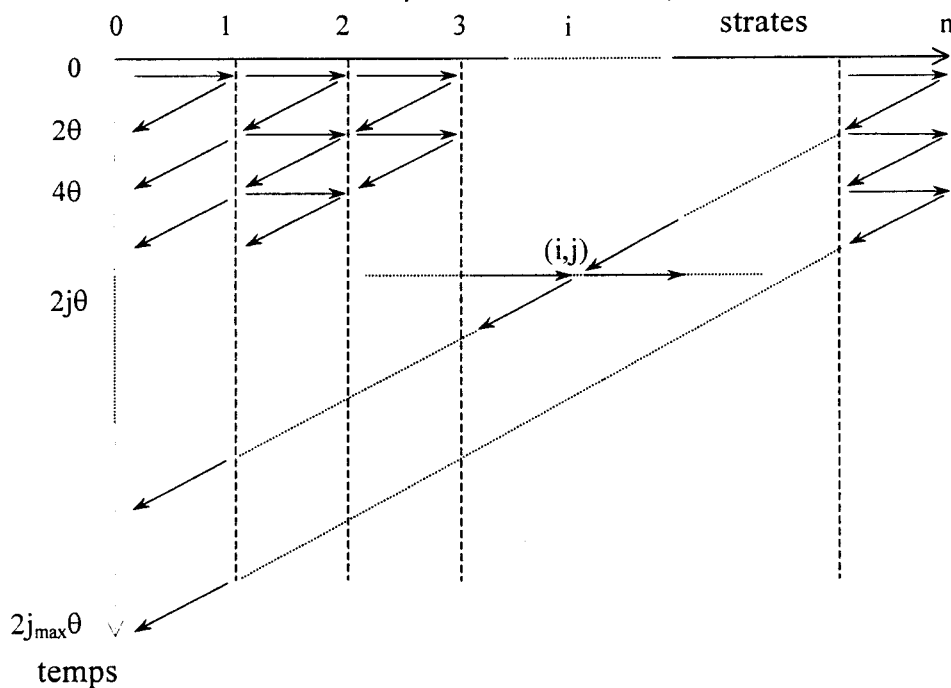


Figure 4 : Diagramme spatio-temporel des ondes transmises et réfléchies



Le signal réfléchi est obtenu en relevant les contributions pour chaque pas de temps  $\Theta$ , le signal à la strate 0. Le signal transmis est donné par les évolutions de la tension à la strate n en fonction du temps.

Pour un milieu donné, nous pouvons mettre en œuvre l'algorithme de calcul synthétisé à la figure 5 pour le calcul du signal réfléchi.

### **II.A.3.b Validation du modèle**

L'adaptation du modèle au dispositif expérimental nous a amené à effectuer un certain nombre de paramétrage à différents niveaux:

- rapport du balun
- impédance du guide d'onde enfoncée dans le sol
- impédance du coaxial
- impédance interne du générateur

Ces valeurs ont été ajusté à notre dispositif de mesure de manière à obtenir des courbes théoriques plus conforme à la démarche expérimentale. Ces ajustement n'enlèvent rien à la validité de la démarche, mais résultent plus d'une absence d'un certain nombre de données techniques liées à notre dispositif de mesure.

Les figures 6a, 6b et 6c montrent que le modèle reproduit assez fidèlement les variations d'amplitude du signal dans les différents cas de figure testés (milieu homogène ou stratifié). Cependant il subsiste quelques différences entre les courbes simulées et les courbes réelles. Ces différences peuvent provenir :

- des imperfections de l'électronique du matériel
- du calage du modèle (imprécision sur l'impédance du câble coaxial, sur le rapport de transformation du balun)
- des phénomènes d'amortissement de l'onde non pris en compte par le modèle, qui se traduisent par une allure plus "arrondie" de la courbe réelle et par des différences au niveau de l'amplitude de la remontée finale de la tension.

Le fait que sur le premier trajet aller-retour de l'onde, nous avons une très bonne concordance des courbes, nous avons entrepris l'inversion de notre modèle.

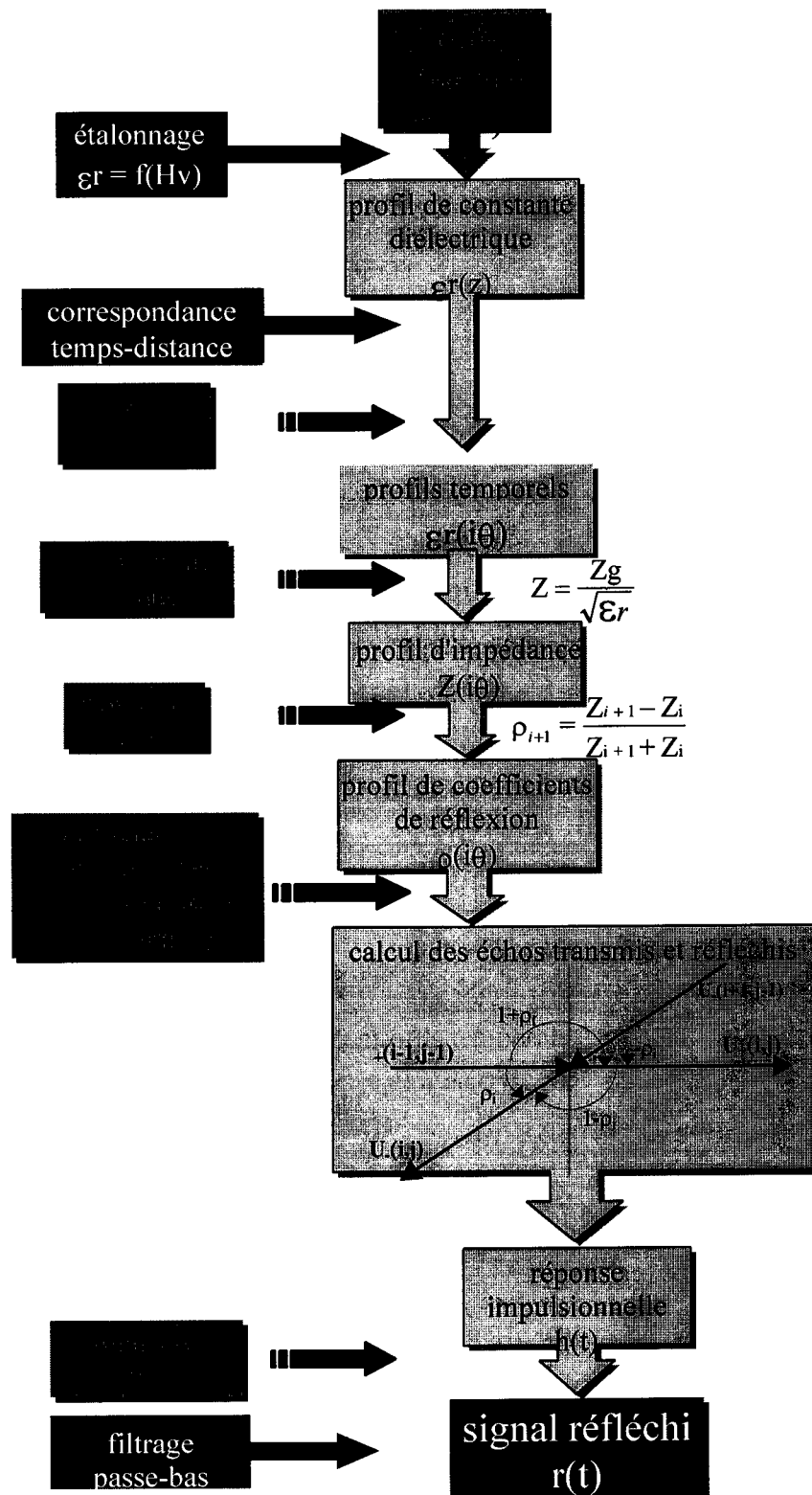


Figure 5: Algorithme mis en œuvre pour le calcul du signal réfléchi.

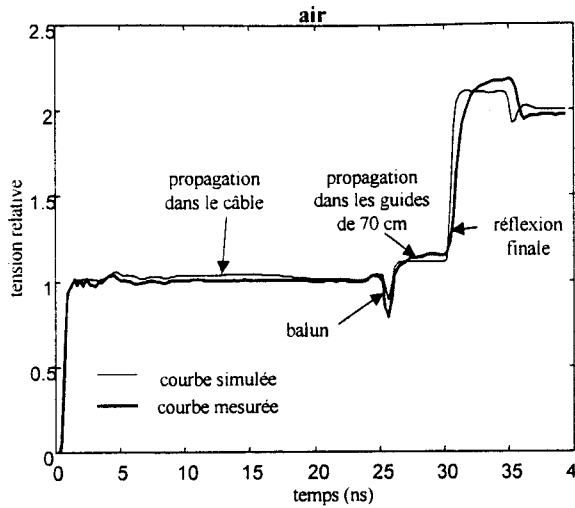


Figure 6a : Exemple d'une mesure dans de l'air avec des guides de 70 cm,  $\epsilon_r(x)=1$

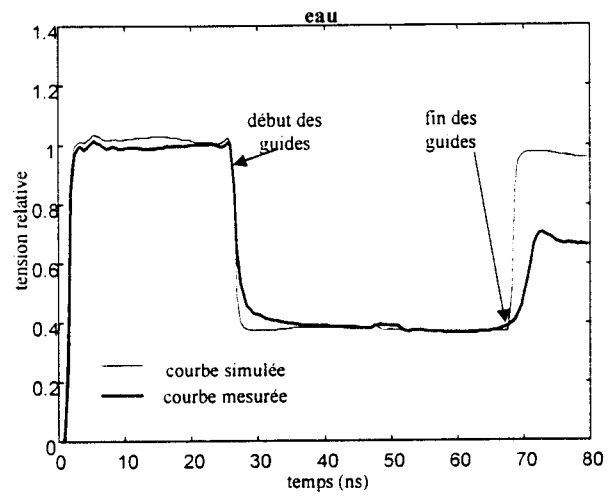


Figure 6b : Exemple de l'eau ordinaire avec des guides de 70 cm,  $\epsilon_r(x)=80$

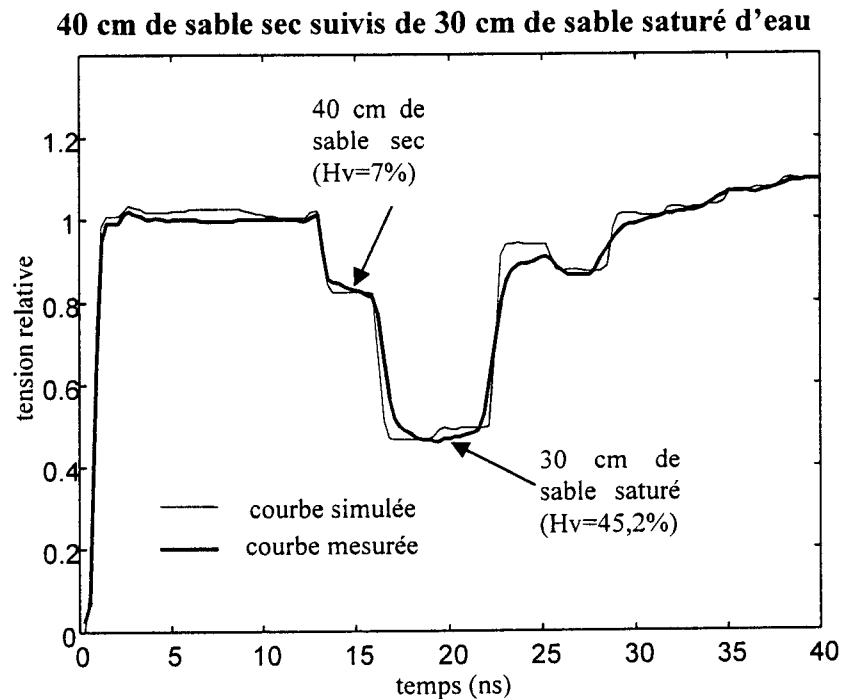


Figure 6c : Exemple de mesures dans un milieu stratifié constitué de 40 cm gravier séché suivi de 30 cm de gravier saturé d'eau.  $\epsilon_r(x)=5$  pour  $0 \text{ cm} < x < 40 \text{ cm}$  et  $\epsilon_r(x)=24.5$  pour  $40 \text{ cm} < x < 70 \text{ cm}$

### II.A.3.c L'identification des caractéristiques

En travaillant sous l'hypothèse des milieux lentement variables (WKB), nous pouvons trouver des solutions analytiques (SANTOS 1997), (MAMODE and LAN-

SUN-LUK 1996) pour remonter à la permittivité. Pour notre part nous avons utilisé une méthode de déconvolution dynamique pour résoudre ce système d'équations. Un filtrage par seuillage permet de limiter l'effet du bruit de mesure sur le calcul de la permittivité (BRUCKSTEIN, KOLTRACHT et al. 1986). L'algorithme mis en œuvre est présenté à la figure 9. Il correspond à une vision de l'algorithme, présenté à la figure 5, pris depuis la sortie. Un exemple de résultats obtenus est présenté à la figure 8 pour un milieu contrôlé en laboratoire (figure 7).

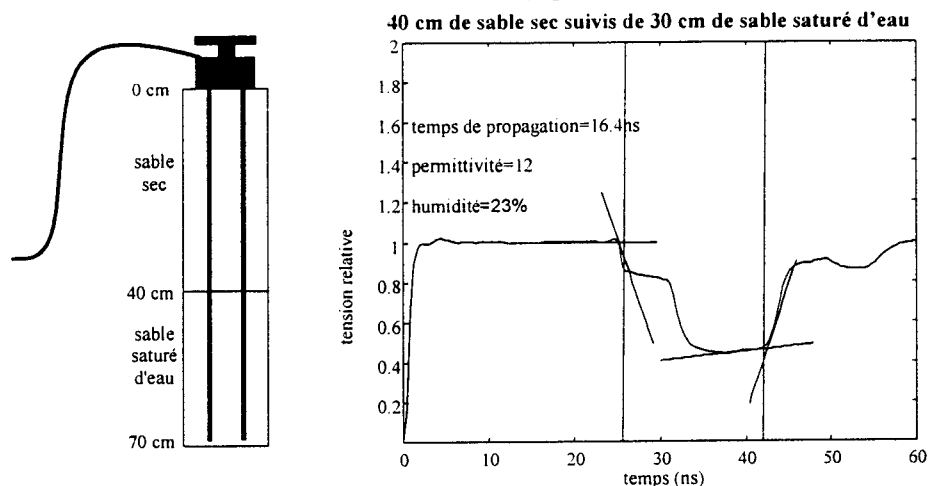


Figure 7 : Courbe de signal réfléchi mesuré dans un milieu stratifié : 40 cm de sable sec suivis de 30 cm de sable saturé d'eau

Nous avons choisi deux milieux extrêmes qui correspondent à une situation classique en agronomie. En surface du sol nous avons une évaporation et en profondeur un stockage de l'humidité au niveau de l'horizon racinaire. L'existence d'un front aussi raide d'humidité est par contre moins courante.

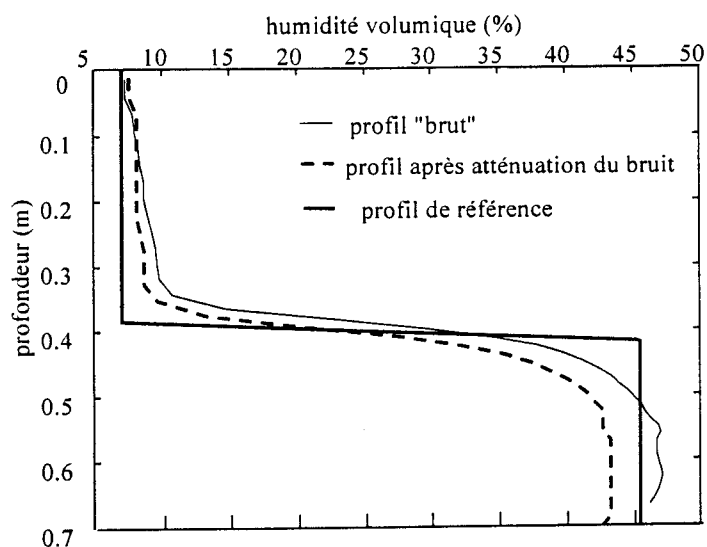


Figure 8 : Inversion de la courbe de signal réfléchi mesurée dans 40 cm de sable sec suivis de 30 cm de sable saturé d'eau, après ajustement du rapport de transformation du balun

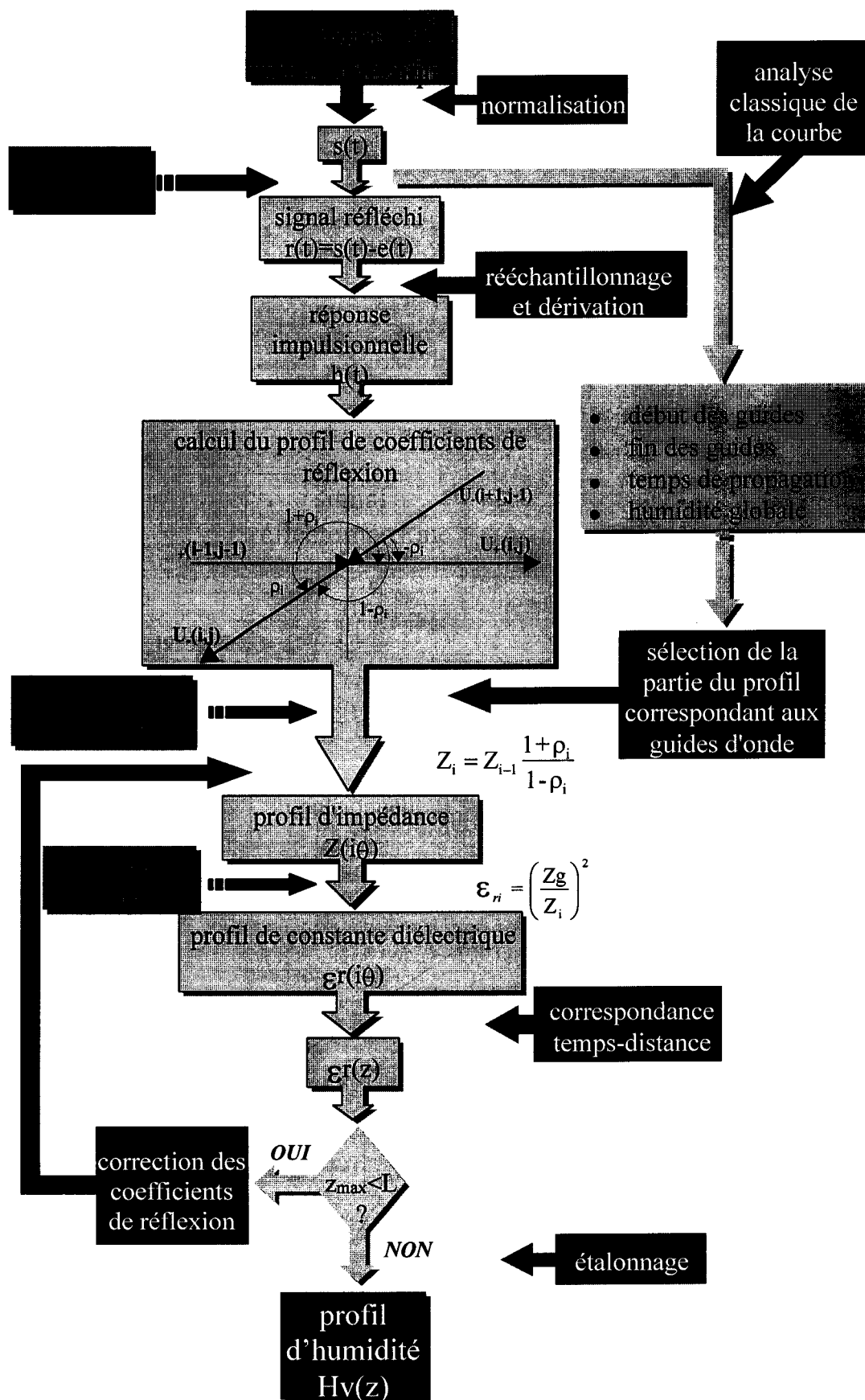


Figure 9 : Calcul du profil d'humidité par une technique de déconvolution dynamique

Nous observons un bon comportement global des outils mis en œuvre. Les problèmes se posent lors de l'apparition d'un front d'humidité. En effet, notre hypothèse de milieu lentement variable n'est plus validée, malgré une discrétisation plus poussée. Un deuxième point est à noter, lors de l'augmentation de l'humidité, l'hypothèse sans perte est mise à défaut si l'eau présente une trop forte teneur en ions. Pour tenir compte davantage des pertes nous avons établi un modèle s'appuyant sur les lignes de transmission avec pertes mais sans distorsion.

## II.A.4. L'IDENTIFICATION DE L'HUMIDITE POUR UN MILIEU AVEC PERTE MAIS SANS DISTORSION

### II.A.4.a. Prise en compte des pertes dans le modèle

A partir du formalisme des lignes de transmission, nous avons intégré les termes R et G, permettant de prendre en compte les pertes du système. Néanmoins pour des difficultés théoriques dues à notre formalisme, nous avons introduit une hypothèse de non distorsion. Les équations locales deviennent:

$$(6) \quad \frac{\partial v(z,t)}{\partial z} = -L(z) \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} - R(z) i(z,t)$$

$$(7) \quad \frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = -C(z) \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} - G(z) v(z,t)$$

Sous la contrainte suivante  $\frac{C(z)}{G(z)} = \frac{L(z)}{R(z)}$ , qui correspond à la condition de non-distorsion, nous obtenons pour une abscisse z, le diagramme suivant :

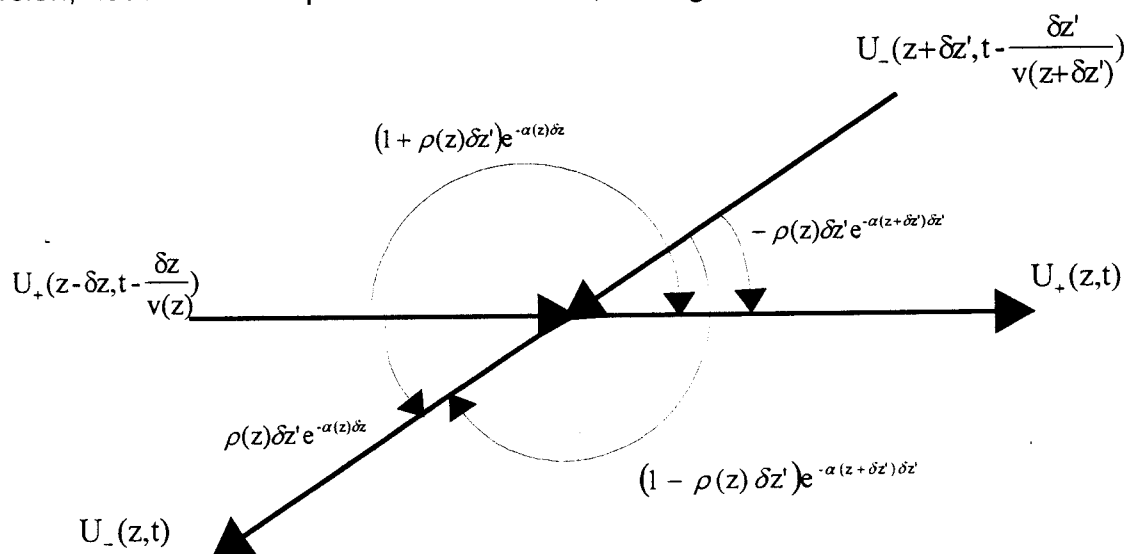


Figure 10 : Diagramme local des rayons pour un z et t donné.

Le paramètre  $\alpha(z)$  intègre l'atténuation de l'onde lors de sa propagation. Nous l'avons considéré indépendant de z lors de l'implémentation du modèle (figure 11).

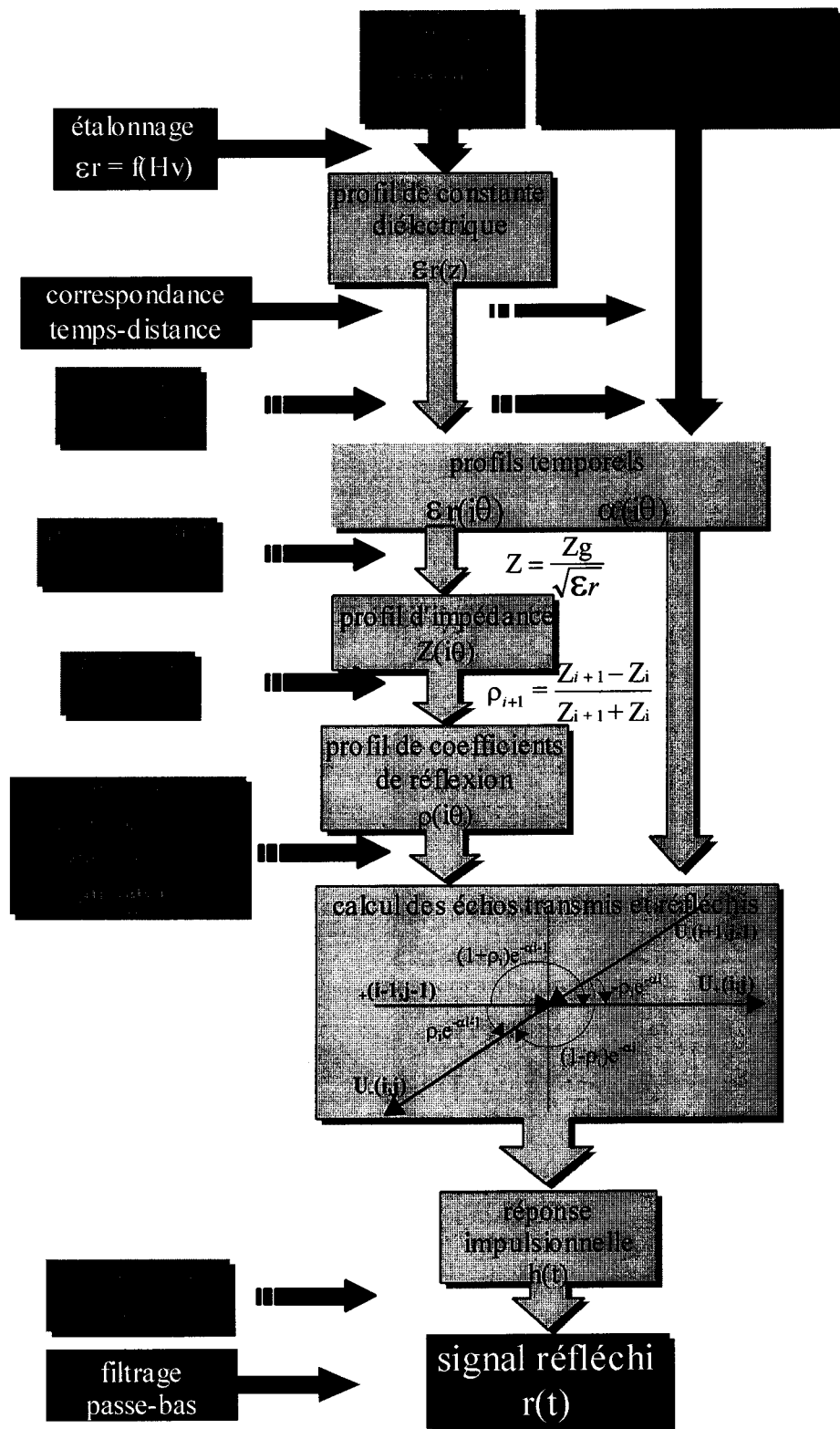


Figure 11: Algorithme mis en œuvre pour le calcul du signal réfléchi.

L'obtention du profil d'humidité ne peut se faire dans ce cas par une déconvolution dynamique. Nous avons recours à une technique d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques. En effet, les tests effectués à l'aide de l'algorithme de Levenberg-Marquard, ont montré leur limite pour un fonctionnement en routine. La convergence de l'algorithme n'est pas systématique et dépend fortement de son initialisation.

#### **II.A.4.b. Méthode d'identification à l'aide des algorithmes génétiques**

Les algorithmes génétiques (GOLBERG 1994) sont une classe d'opérateurs stochastiques dont les bases théoriques commencent à peine à se dessiner. Ils s'appuient sur la biologie génétique et trouve son origine dans la théorie d'évolution de Darwin. La sélection naturelle est équivalente à un problème d'optimisation où chaque espèce animale ou végétale a su s'adapter à sa niche écologique (fonction coût) au fil de l'évolution. Après avoir codé nos variables d'études sous forme des gènes et de chromosomes (figure 12), nous obtenons des individus. Ces individus subissent plusieurs transformations avec un aspect probabiliste pour passer d'une génération à une autre :

- l'opérateur de sélection.
- l'opérateur de croisement.
- l'opérateur de mutation.
- l'opérateur de réinsertion.

L'ensemble de ces actions est mené en quantifiant pour chaque individu son adaptation aux règles du milieu : c'est le "fitness". Le parcours de l'espace de recherche est effectué par plusieurs individus simultanément dans plusieurs directions. Ce qui autorise le développement d'algorithme de type parallèle ou distribué.



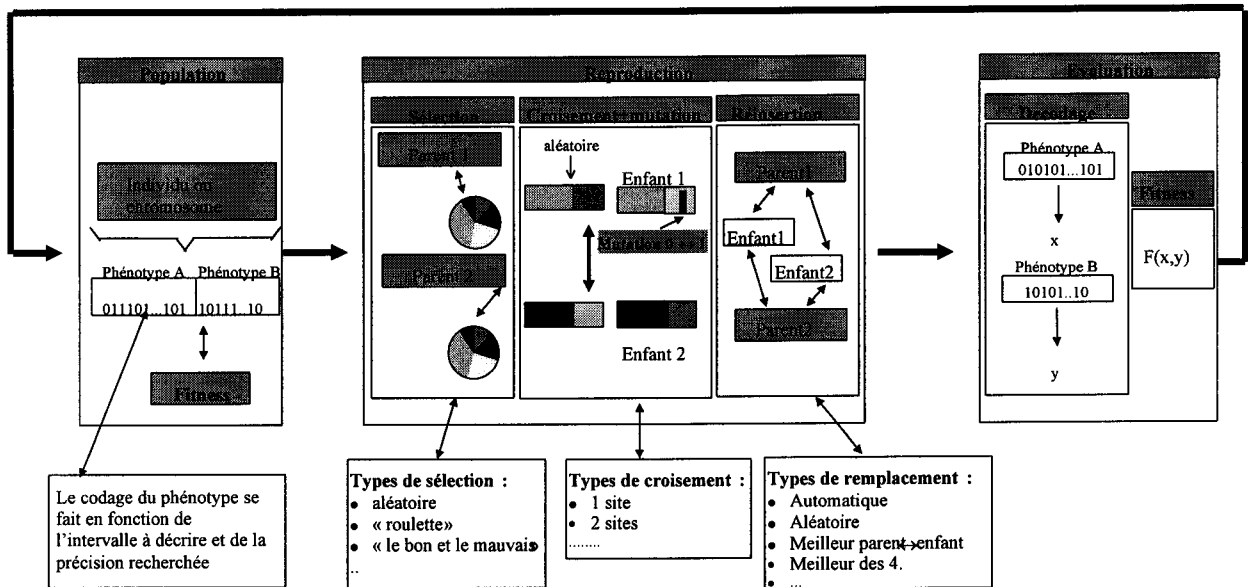


Figure 12 : Description d'un algorithme génétique en binaire.

La démarche d'identification que nous avons adoptée est classique. Nous avons utilisé un critère d'arrêt basé la minimisation de l'erreur quadratique. Les A.G. sont utilisés comme technique d'optimisation.

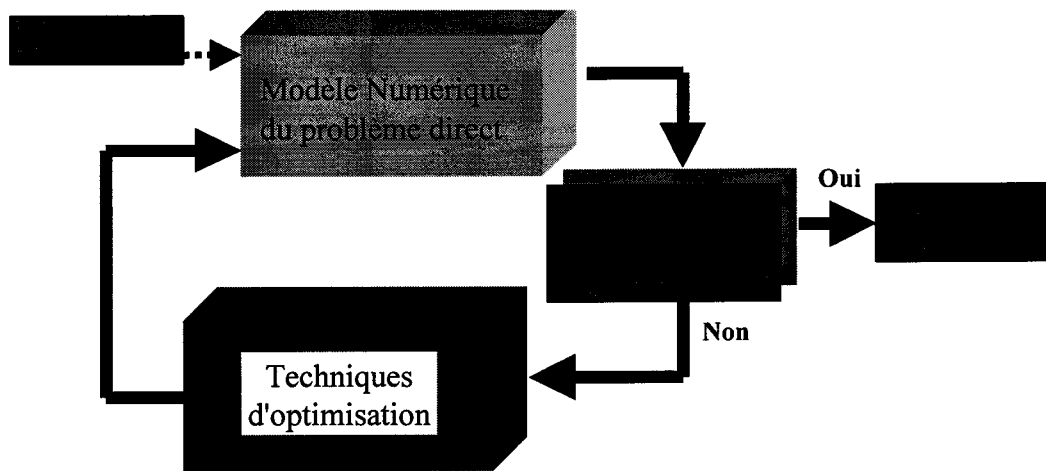


Figure 13 : Schéma du processus itératif d'identification

Les algorithmes génétiques sont utilisés pour éliminer les problèmes de convergence rencontrés lors de l'utilisation des algorithmes de Newton-Gauss ou de Levenberg-Marquardt. En effet, la convergence pour ces deux derniers algorithmes vers la solution optimale dépend fortement de l'initialisation de l'algorithme et du calcul numérique des dérivées premières ou secondes. De plus si les paramètres à identifier sont fortement corrélés, ces algorithmes convergent difficilement vers la solution optimale. Ce problème ne se rencontre pas avec les AG du fait du mode de

parcours de l'espace. En contre partie, ils exigent des temps de calcul qui peuvent vite devenir prohibitif.

### **II.A.4.c. Les résultats obtenus**

L'utilisation de cette technique d'optimisation nous permet de prendre en compte le nouveau paramètre  $\alpha$  et de mieux se rapprocher des conditions expérimentales. Afin de valider cette démarche, nous avons construit un dispositif nous permettant de travailler sur des milieux contrôlés en laboratoire. C'est sur ce dispositif qu'ont été effectués les différents tests. La prise en compte de l'atténuation de l'onde (paramètre  $\alpha$ ) permet au modèle de mieux se rapprocher du signal mesuré. Ces améliorations se situent essentiellement en fin de guide, lors de la comparaison du signal mesuré et du signal simulé (Figure 14).

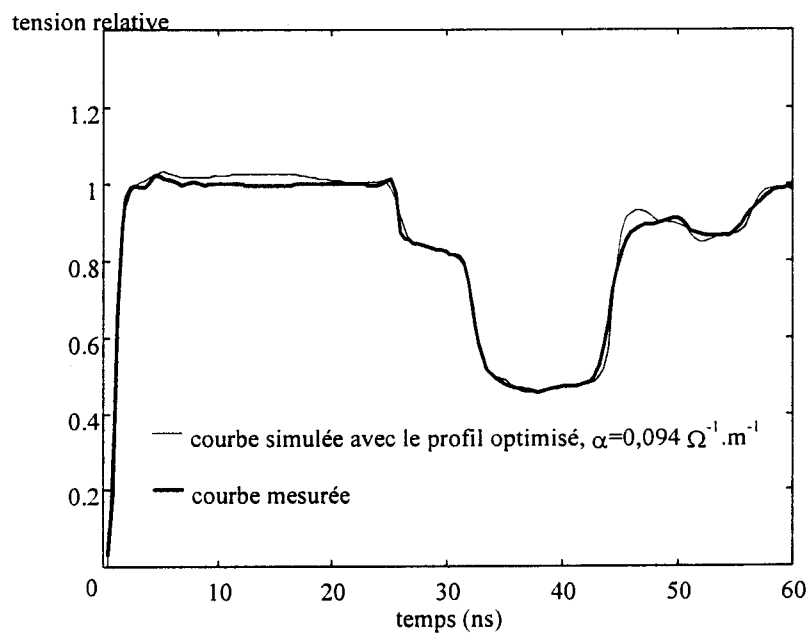


Figure 14 : courbes de signal réfléchi optimisée et courbe mesurée

L'identification des paramètres s'effectue par tranche pour limiter leur nombre et ainsi réduire le temps de calcul. La figure 15 donne un exemple de comparaison entre le profil estimé et le profil calculé par les A.G.

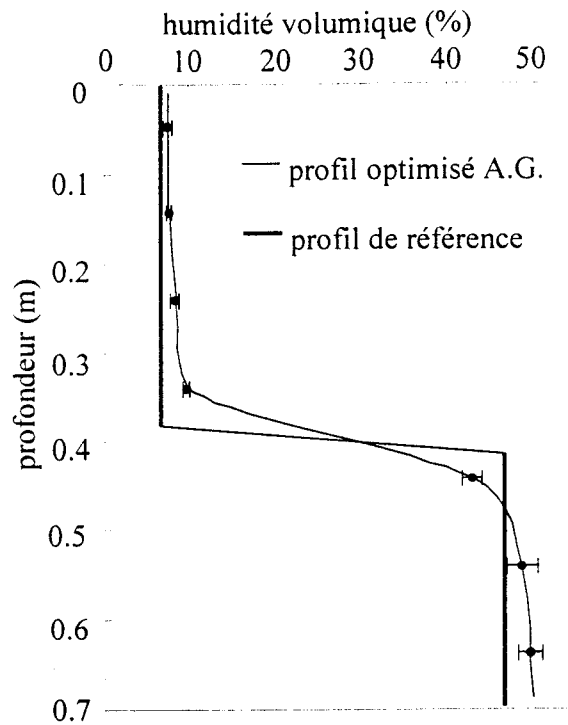


Figure 15 : Profil d'humidité moyen identifié et profil de référence

Notre dernière étape consistait à confronter notre outil à des mesures in-situ. A cet effet, le CIRAD a instrumenté une parcelle de canne à sucre avec deux systèmes en parallèle. Le premier dispositif est constitué d'un réseau de capteur placé horizontalement à différentes profondeurs. Grâce à un multiplexeur en surface, nous obtenons une mesure de l'humidité en fonction de la profondeur pour quelques points. Le second dispositif est constitué d'un guide d'onde d'un mètre de longueur, planté verticalement dans le sol. Nous avons testé notre modèle d'identification de l'humidité en fonction de la profondeur en traitant ces derniers signaux. La comparaison de nos résultats avec les quelques mesures ponctuelles disponibles est satisfaisante à proximité de la surface. Les erreurs augmentent légèrement avec la profondeur. Ce phénomène s'explique par un mauvais rapport signal sur bruit pour les milieux humides (forte atténuation de l'onde).

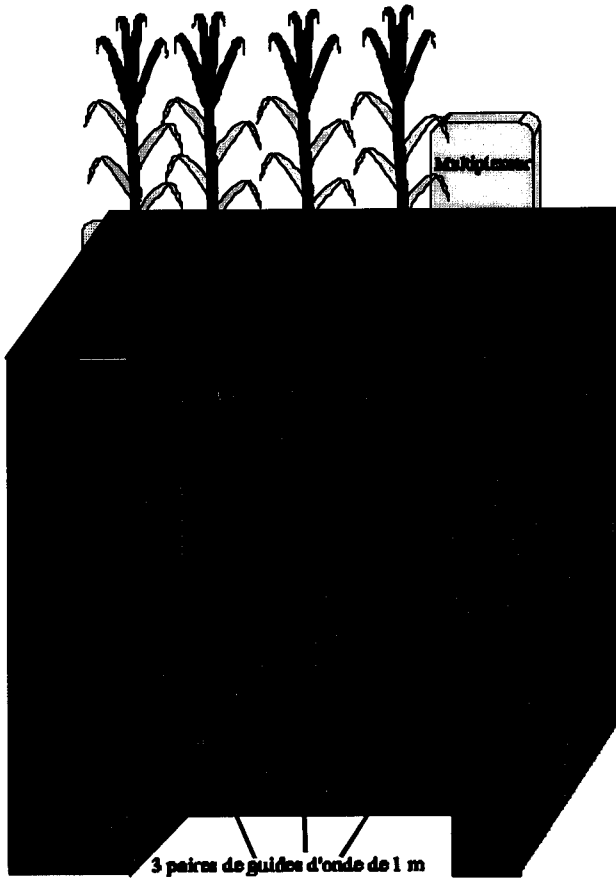


Figure 16 : dispositif expérimental sur site.

Paire de guides gauche

paire de guides centrale

paire de guides droite

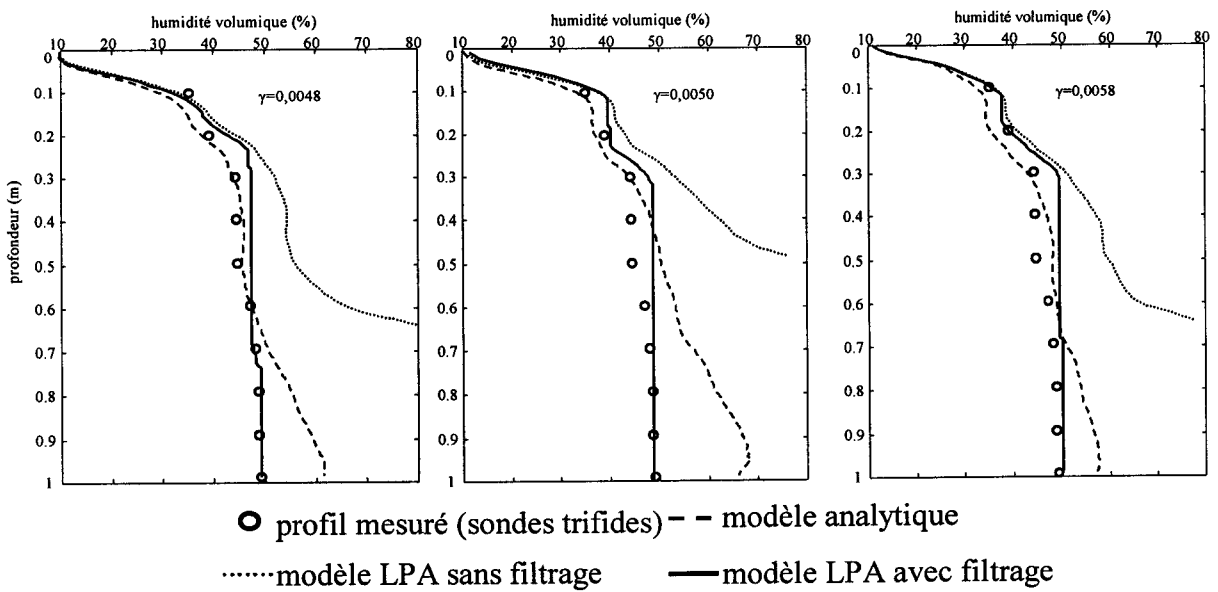


Figure 17 : Exemples de profils hydriques calculés à partir de mesures au champ

## II.A.5. CONCLUSION

Ce travail a fourni des résultats préliminaires intéressants. Pour des milieux contrôlés nous obtenons des erreurs sur l'identification du taux d'humidité inférieures à 5%. Néanmoins pour améliorer la fiabilité de l'outil à des milieux naturels plus hétérogènes, des évolutions sont encore nécessaires tant sur le plan théorique qu'expérimental. En premier lieu le développement d'un modèle avec pertes et distorsion doit être envisagé. Il s'appuierait sur les équations de Maxwell traitées à l'aide du formalisme des différences finies. Disposant des outils d'optimisation de type AG, une démarche inverse est alors possible comme précédemment. Dans un second temps, l'outil devra servir à la définition du cahier des charges d'un nouveau réflectomètre. L'utilisation d'une attaque impulsionnelle, héritage des testeurs de câble n'est peut-être pas la plus adéquate pour ce type de problème. Un travail à fréquence variable ou modulée est plus classique lors de la caractérisation des milieux. Il permettrait en outre de s'appuyer sur le formalisme du régime harmonique et des fonctions de Green pour le traitement des équations de Maxwell.

Ce travail se poursuit dans le cadre d'un post-doctorat basé au CIRAD de Montpellier, par Pierre Todoroff au sein du réseau national MEDITE<sup>30</sup>.

---

<sup>30</sup>Réseau national en hydrologie regroupant: le CIRAD, le CEMAGREF, l'ORSTOM, l'INRIA et des laboratoires universitaires et du CNRS.

## **II.B LA CARACTERISATION DES PARAMETRES PHYSIQUES D'UN MATERIAU**

L'amélioration du confort thermique ainsi qu'une politique de maîtrise de l'énergie dans l'habitat passe par une meilleure connaissance des caractéristiques thermiques des matériaux utilisés. C'est dans ce cadre que nous avons développé au laboratoire des outils tant sur le plan expérimental que sur le plan théorique permettant de remonter à ces paramètres. Nous disposons d'un système de caractérisation de la conductivité et de la diffusivité thermique des matériaux par méthodes photométriques. Ce système développé initialement à L'université de Lyon permet de caractériser des matériaux homogènes et isotropes (figure 18). Nous avons amélioré ce dispositif afin de pouvoir caractériser des matériaux homogènes par strates tout en conservant le côté non intrusif de la technique de mesure.

Ce travail intéresse le secteur du génie civil mais aussi les industries à la recherche d'un moyen de contrôle de la qualité des revêtements, des composites, des matériaux en couches... Dans un souci d'ouverture, nous avons intégré dans notre démarche la possibilité d'effectuer cette mesure en ligne ou in-situ. Dans un premier temps, nous avons travaillé essentiellement sur la détermination de la diffusivité thermique pour valider notre démarche. Par la mise en œuvre d'une technique d'optimisation basée sur les A.G., nous souhaitons identifier simultanément la conductivité et la diffusivité d'un matériau de sa réponse impulsionnelle thermique. En limitant notre matériau à trois strates, nous essaierons de localiser et quantifier des défauts au sein du matériau.

### **II.B.1. LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL**

Le dispositif expérimental comporte deux sous-ensembles indépendants (figure 13). La partie inférieure joue le rôle d'une référence thermique pour la face arrière de l'échantillon à tester. Cette température de référence est assurée par un échangeur relié à un cryostat. Le tout est monté dans une enceinte isolée thermiquement de l'extérieur. La partie supérieure comprend l'élément d'excitation pour la face avant du matériau sous test. Afin d'obtenir une excitation thermique contrôlée, nous avons utilisé deux lampes halogènes commandées électroniquement. Les mesures de température s'effectuent à l'aide de thermocouples reliés à une centrale d'acquisition autonome.

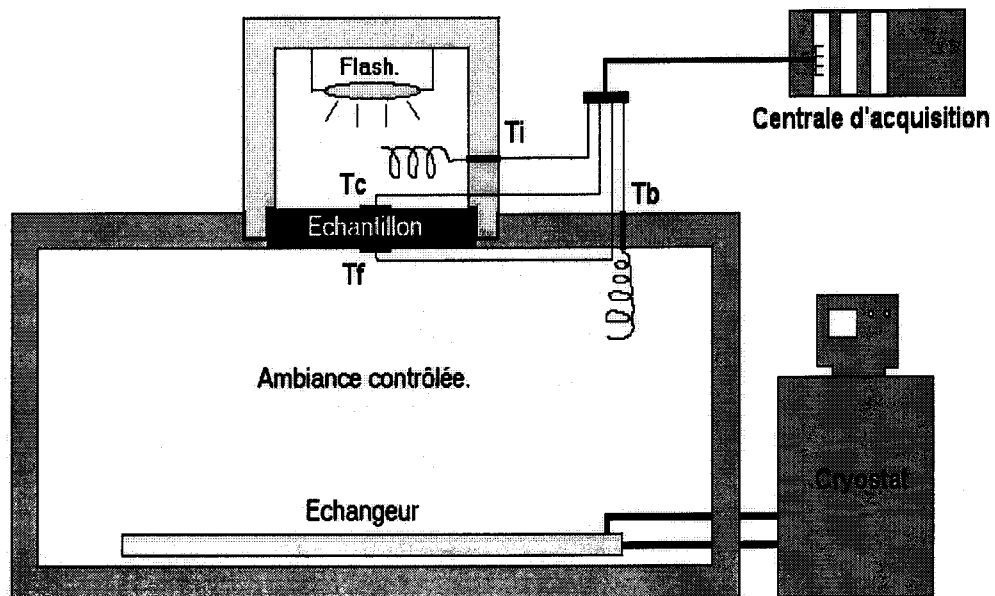


Figure 18a : Schéma du dispositif expérimental

En changeant l'élément supérieur, nous pouvons effectuer deux types de mesure. La première mesure se base sur l'analyse du comportement thermique d'un matériau en régime permanent pour différentes configurations. La conductivité thermique est obtenue par traitement des états permanents du système. La seconde mesure utilise une source lumineuse pour créer une excitation thermique impulsionnelle : c'est la "méthode flash". De ce comportement transitoire de la température, on peut remonter à la diffusivité thermique du matériau. Cette méthode depuis son introduction en 1961 par W.J Parker et al. (PARKER 1961), a connu un développement important du fait de son principe particulièrement simple et de sa mise œuvre aisée. Pour permettre l'étude de matériaux minces et de pouvoir étudier des matériaux stratifiés, nous avons développé un nouveau système d'acquisition. Il s'appuie sur une carte d'acquisition intégré à un ordinateur individuel qui peut gérer un ensemble de cartes relié à un bus standardisé. Nous avons instrumenté le dispositif et développé un programme depuis la plate-forme Labview® afin d'automatiser les deux types de mesure. Nous avons porté une attention particulière à la précision des mesures et à leur immunité aux bruits. Ce qui nous a permis de développer un dispositif flexible qui travaille en milieu ambiant (figure 18b). L'excitation thermique en face avant du matériau est produite par une lampe de type halogène. En jouant sur le temps d'activation de la lampe et la distance de la lampe à l'échantillon à tester, nous contrôlons le flux thermique incident. Des capteurs de température (thermocouples type K) sont installés en face avant et en face arrière. En parallèle, nous mesurons le flux incident ainsi que la température délivrée par notre source à proximité de l'échantillon.

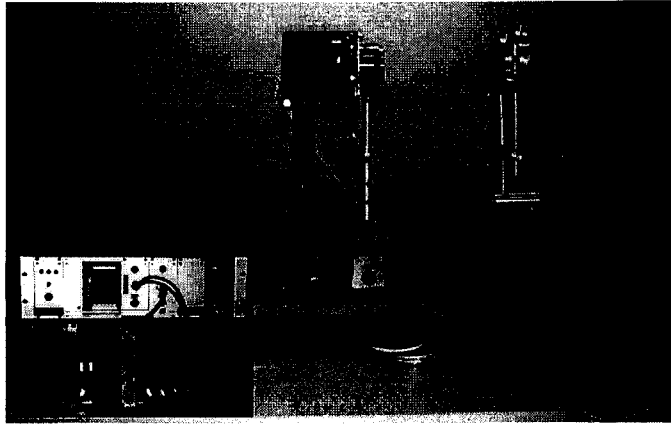


Figure 18b : Schéma du dispositif expérimental développé

L'application et la centrale d'acquisition permettent de suivre des évolutions rapides de températures et d'envisager les mesures sur des plaques minces ou des fluides. Un exemple de thermogrammes de la face avant et de la face arrière est donné à la figure 14 pour du PVC de menuiserie.

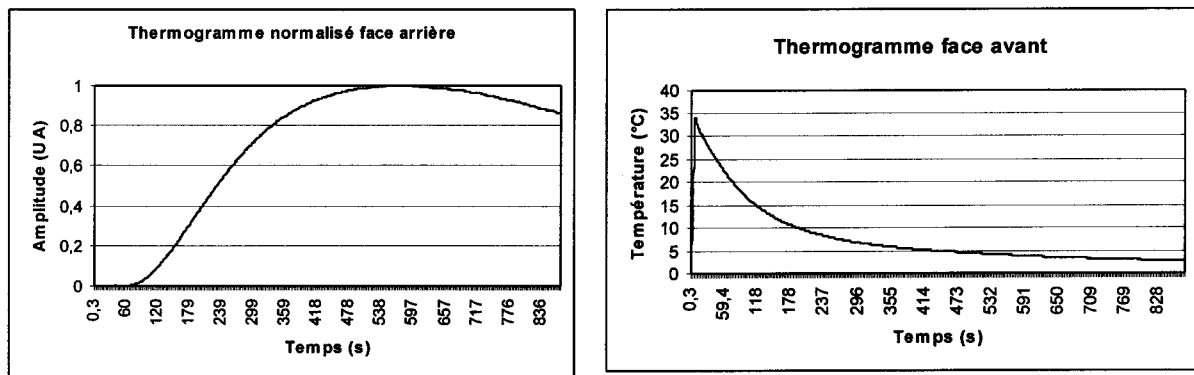


Figure 19 : Thermogrammes des faces avant et arrière mesurés pour des échantillons cylindriques de PVC homogène de diamètre 80 mm et d'épaisseur 8 mm

Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'obtention de la diffusivité des matériaux, plus délicate à mesurer que la conductivité.

## II.B.2. MATERIAU HOMOGENE

### II.B.2.a. Modélisation

Dans le cas des matériaux homogènes, isotropes et de dimension finie, nous pouvons remonter, par traitement analytique des thermogrammes en face arrière, à la diffusivité thermique. En effet dans ces conditions, l'équation de Fourier s'écrit :



$$(8) \quad \rho C \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T(z,t)) \text{ où } \rho C \text{ représente la chaleur massique et}$$

$\lambda$  et la conductivité thermique, devient :

$$(9) \quad \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = a \frac{d^2 T(z,t)}{dz^2} \text{ où } a = \frac{\rho C}{\lambda} \text{ est la diffusivité thermique.}$$

La résolution de cette équation est possible en se fixant les conditions aux limites. Deux modèles ont été testés et validés avec des données expérimentales.

### **Le modèle de Parker**

Le premier modèle présenté initialement par Parker s'appuie sur un nombre d'hypothèses pour obtenir une solution analytique correspondant à une série temporelle. La méthode de Parker impose les hypothèses suivantes :

- le flux est homogène en face avant.
- il existe un comportement adiabatique sur les faces latérales du matériau.
- le matériau est isotrope et homogène, d'où un transfert mono-dimensionnel.
- les phénomènes de convection sont négligeables en face avant et arrière.

Ce qui nous conduit à prendre des coefficients d'échange nuls sur toutes les faces, sauf en face avant où on soumet l'impulsion thermique:

$h_e = 0$ , face arrière

$h_R = 0$ , faces latérales

$h_o \neq 0$ , face avant

Nous prenons un échantillon de forme cylindrique de rayon R et d'épaisseur e. A t=0, nous soumettons la face avant de l'échantillon à une impulsion thermique uniforme  $T_o(t)$  de courte durée. Nous obtenons une variation de température en face arrière régie par l'équation suivante:

$$(10) \quad T(e,t) - T_o(t) = \Theta(e,t) = \frac{Q}{\rho c e} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2}{e} a t\right) \right]$$

Il existe une relation entre la diffusivité a, l'épaisseur du matériau e et la moitié du temps mis par la température de la face arrière pour atteindre sa valeur maximale, lors d'une attaque impulsionnelle (PARKER 1961).

$$(11) \quad a = 1,36967 \frac{e^2}{\pi^2 t_{1/2}}$$

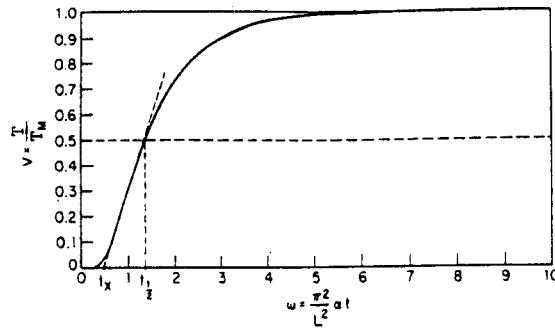


Figure 20 : Thermogramme d'un échantillon parfaitement isolé.

### Le modèle de Degiovanni

La méthode développée par Degiovanni (DEGIOVANNI 1977) est un peu plus précise dans la mesure où elle tient compte des pertes thermiques relatives à chacune des faces de l'échantillon. Le système d'équations travaillant en variables réduites est donné ci-après:

$$(12) \quad z^* = \frac{z}{e} ; t^* = \frac{at}{e^2} (\text{nombre de Fourier}) ;$$

$$(13) \quad r^* = \frac{r}{e} ; R^* = \frac{R}{e} ; Bi_0 = \frac{h_0 e}{\lambda} ; Bi_e = \frac{h_e e}{\lambda} ; Bi_r = \frac{h_r e}{\lambda}$$

$$(14) \quad \begin{cases} \frac{1}{a} \frac{\partial \theta^*}{\partial t^*} = \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial z^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial \theta^*}{\partial r^*} + \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial r^{*2}} & : 0 < z^* < e, 0 \leq r^* < R^*; t^* > 0 \\ \frac{\partial \theta^*}{\partial z^*} - Bi_0 \theta^* = \delta(t) & : z^* = 0; t^* > 0 \\ \frac{\partial \theta^*}{\partial z^*} + Bi_e \theta^* = 0 & : z^* = e; t^* > 0 \\ \frac{\partial \theta^*}{\partial r^*} + Bi_r \theta^* = 0 & : r^* = R^*; t^* > 0 \end{cases}$$

$$\text{et } \theta^* = 0 \text{ à } t^* = 0. \quad (15)$$

La distribution spatio-temporelle de la température est donnée par:

$$(16) \quad \theta^*(z^*, r^*, t^*) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} A_{mp} F_m(z^*) G_p(r^*) \exp(-\nu_{mp} t^*)$$

Elle est obtenue par séparation de variables et en utilisant les fonctions de Green (OSIZIK) avec

$$(17) \quad A_{mp} = \frac{4\eta_m^2 (\eta_m^2 + Bi_e^2)}{(\eta_m^2 + Bi_0^2)(\eta_m^2 + Bi_e^2) + (Bi_0 + Bi_e)(\eta_m^2 + Bi_0 Bi_e)} \frac{Bi_r R^*}{(Bi_r^2 R^{*2} + \gamma_p^2) J_0(\gamma_p)}$$

$$(18) \quad F_m(z^*) = \cos(\eta_m z^*) + \frac{Bi_0}{\eta_m} \sin(\eta_m z^*) \text{ et } G_p(r^*) = J_0(\gamma_p r^* / R^*)$$

$$(19) \quad v_{mp} = \eta_m^2 + \gamma_p^2 / R^*$$

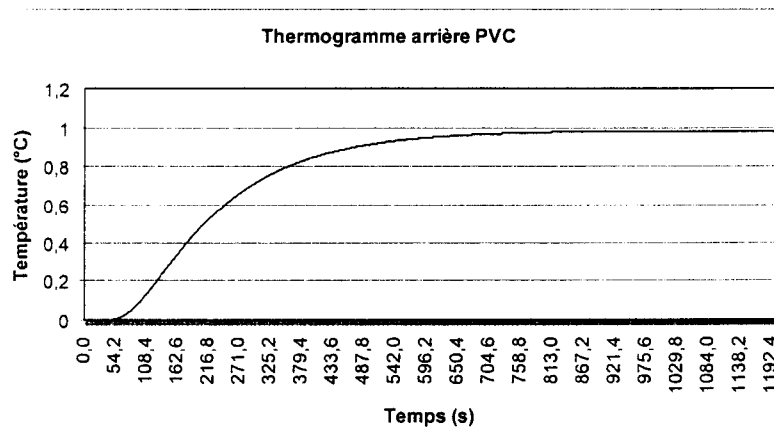
Les coefficients  $A_{mp}$ ,  $v_{mp}$  ainsi que les fonctions  $F_m$  et  $G_p$  font intervenir les différents nombres de Biot et des solutions d'équations transcendantes relatives au système.

$$(20) \quad \tan(\eta) = \frac{\eta(Bi_0 + Bi_e)}{\eta^2 - Bi_0 Bi_e} \quad \text{et} \quad \gamma J_1(\gamma) = Bi_r R^* J_0(\gamma)$$

Trois diffusivités " partielles " sont calculées à partir de trois instants choisis sur la partie ascendante de la courbe. Une pondération est ensuite appliquée sur les résultats précédents pour obtenir la diffusivité du matériau.

### **II.B.2.b. Validation expérimentale**

Un exemple de thermogramme mesuré est donné à la figure 21 ainsi que le calcul de la diffusivité effectué par la méthode de Degiovanni et celle de Parker. Les résultats sont en bon accord avec la valeur de référence (erreur inférieure à 5%) pour du PVC de menuiserie mesurée au LEMTA<sup>31</sup>.



Diffusivité avec la méthode de Parker :

$$a = 1,381 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Diffusivité avec la méthode de Degiovanni :

$$a = 1,387 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Valeur de référence:

$$a = 1,51 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Figure 21 : Thermogramme expérimental obtenu pour un milieu homogène en face arrière

Pour l'identification de la diffusivité, nous avons utilisé un modèle basé sur les hypothèses classiques. Le champ de température est unidimensionnel, l'impulsion est de durée négligeable, les pertes par échange avec le milieu extérieur sont représentées par un coefficient d'échange non nul sur les faces avant et arrière de l'échantillon. Le modèle mathématique permet la prédiction de la réponse du système comme une fonction de la géométrie et des caractéristiques physiques du

<sup>31</sup> Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée

système. L'avantage de ces deux méthodes réside dans leur ancienneté et la rapidité de leur mise en œuvre. Néanmoins, elles se prêtent difficilement à l'étude de matériau stratifié.

### II.B.3. MATERIAU STRATIFIE

Notre volonté d'étudier des matériaux stratifiés, nous a conduit à développer de nouveaux modèles. Nous avons dans un premier temps adopté la méthode la plus utilisée à l'heure actuelle par les thermiciens : la méthode des quadripôles. Elle utilise le passage dans le domaine transformé de Laplace pour résoudre l'équation de diffusion. Nous avons développé un second modèle qui utilise la méthode des différences finies pour résoudre ce système d'équation. Ce travail nous permet d'avoir une meilleure connaissance locale et interne des phénomènes thermiques. De plus notre modèle autorise la prise en compte d'une gamme plus étendue d'excitation thermique par l'utilisation d'un algorithme de transport de flux corrigé (FCT : Flux-corrected transport).

#### II.B.3.a. Modélisation

##### La méthode des quadripôles

Le passage dans le domaine transformé a été également effectué pour résoudre l'équation (9) associée à des conditions aux limites. C'est la méthode dite des quadripôles. Son nom découle de l'analogie électrique que l'on peut rapidement effectuer à l'aide des matrices obtenues dans le domaine transformé. Si nous définissons  $\Theta(z, p) = TL[T(z, t)]$ , la transformée de Laplace de la température  $T(z, t)$ , l'équation de la chaleur devient alors :

$$(21) \quad \frac{d^2\Theta(z, p)}{dz^2} = \frac{p}{a}\Theta(z, p) - \frac{1}{a}T(z, 0)$$

On suppose alors l'équilibre thermique en  $t=0$ ,  $T(z, 0) = 0$ . La transformée de Laplace du flux est :  $\Phi(z, p) = TL[\Phi(z, t)]$ . En utilisant la loi de comportement de Fourier, le système devient alors :

$$(22) \quad \begin{cases} \frac{d^2\Theta(z, p)}{dz^2} = \frac{p}{a}\Theta(z, p) \\ \Phi(z, p) = -\lambda S \frac{d\Theta(z, p)}{dz} \end{cases}$$

En intégrant les conditions aux limites pour un matériau homogène, nous obtenons une écriture matricielle de la forme :

$$(23) \quad \begin{bmatrix} \Theta \\ \Phi \end{bmatrix}_{(z,p)} = \begin{bmatrix} ch(kz) & -\frac{sh(kz)}{\lambda k S} \\ -\lambda k S sh(kz) & ch(kz) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Theta \\ \Phi \end{bmatrix}_{(0,p)}$$

L'expression obtenue ci-dessus, pour une paroi homogène s'étend aisément au cas de parois multicouches homogènes.

$$(24) \quad \begin{bmatrix} \Theta \\ \Phi \end{bmatrix}_{(z,p)} = M_n * M_{n-1} * \dots * M_1 * \begin{bmatrix} \Theta \\ \Phi \end{bmatrix}_{(0,p)}$$

Où  $M_n, M_{n-1}, \dots, M_1$  représentent les quadripôles associés à chaque couche du matériau. Cette modélisation est à ce jour très utilisée, car elle permet la prise en compte l'ensemble des phénomènes associés aux méthodes impulsionnelles. En effet, chaque condition aux limites peut être représentée par un quadripôle, de même que les résistances de contact et les effets bidimensionnels de la diffusion pour les matériaux anisotropes (BATSALE, MAILLET et al. 1994), (DEGIOVANNI and LAURENT 1986). L'avantage de cette technique se situe au niveau de la rapidité d'implémentation et de simulation des modèles. Le signal thermique temporel est obtenu par le calcul numérique d'une transformée inverse de Laplace. Nous avons implémenté l'algorithme proposé par Stefest (STEFEST 1970). Nous adopterons le modèle des quadripôles comme modèle de référence pour nos validations intermodèles des thermogrammes.

### La méthode des différences finies

Nous avons développé un modèle s'appuyant sur les différences finies afin de pouvoir simuler le comportement thermique des matériaux à différents stimuli et de traiter éventuellement des problèmes non linéaires (coefficients non constants dans une strate en fonction de la température). Pour cela nous avons implémenté un modèle pouvant simuler la superposition de trois strates. La figure 22 présente le système modélisé :

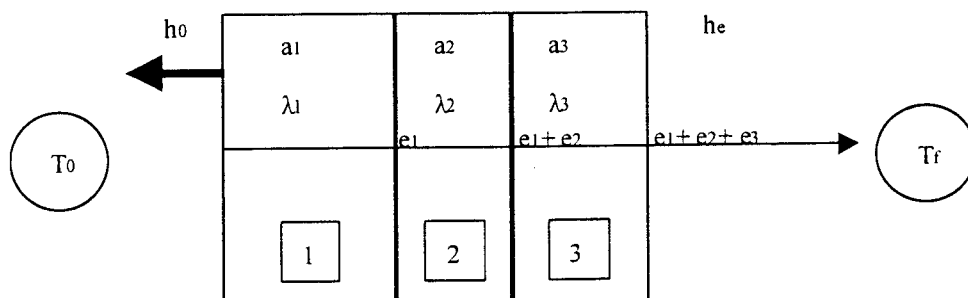


Figure 22 : système étudié

Le problème consiste donc à résoudre le système d'équations suivant :

$$(25) \quad a_j \frac{\partial^2 T_j(z,t)}{\partial z_j^2} = \frac{\partial T_j(z,t)}{\partial t} \quad (\text{pour } j = 1,2,3)$$

Auquel il convient d'associer les conditions initiales (le système est au repos à  $t=0$ ) et les conditions aux limites (conservation du flux thermique aux interfaces) définies par les équations suivantes :

$$(26) \quad \left\{ \begin{array}{l} T(z,0) = 0 \\ T_0 = 0 \\ h_0 [T_1(0,t) - T_0(t)] = \lambda_1 \left( \frac{\partial T_1(z,t)}{\partial z} \right)_{z=0} \\ \lambda_1 \left( \frac{\partial T_1(z,t)}{\partial z} \right)_{z=e_1} = \lambda_2 \left( \frac{\partial T_2(z,t)}{\partial z} \right)_{z=e_1} \\ \lambda_2 \left( \frac{\partial T_2(z,t)}{\partial z} \right)_{z=e_1+e_2} = \lambda_3 \left( \frac{\partial T_3(z,t)}{\partial z} \right)_{z=e_1+e_2} \\ \lambda_3 \left( \frac{\partial T_3(z,t)}{\partial z} \right)_{z=e_1+e_2+e_3} = h_e [T_e - T_3(e_1 + e_2 + e_3, t)] \\ T_1(e_1, t) = T_2(e_1, t) \\ T_2(e_1 + e_2, t) = T_3(e_1 + e_2, t) \end{array} \right.$$

Nous avons adopté une méthode de discrétisation qui limite les problèmes liés aux calculs des dérivées (BORIS, LANDSBERG et al. 1993). La mise en œuvre de la correction du flux transporté (FCT) permet de limiter les effets d'oscillation et erreurs numériques dus à la présence de discontinuités. Elle permet grâce à un pas  $\frac{1}{2}$  avant et arrière en  $z$  et  $t$ , d'assurer la convergence de l'algorithme même en présence de discontinuités (figure 23). Nous avons implémenté ce modèle en technique combinée explicite et implicite pour diminuer le temps de calcul.

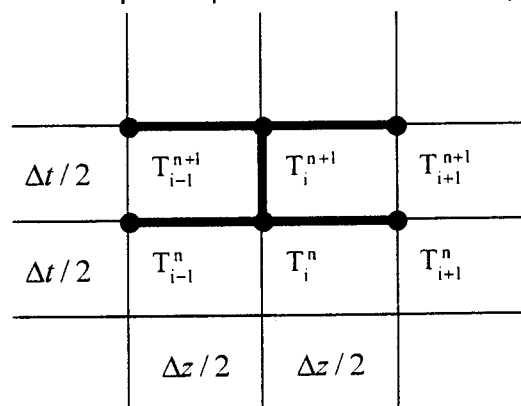


Figure 23 : discrétisation spatio-temporelle utilisée

Nous obtenons comme forme finale des équations :

$$(27) \quad \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = a \left[ \frac{T_{i-1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i+1}^{n+1}}{(\Delta z)^2} + (1-\theta) \frac{T_{i-1}^n - 2T_i^n + T_{i+1}^n}{(\Delta z)^2} \right] \text{ avec les indices } i$$

et  $n$ , respectivement pour le temps et l'espace.

Le facteur  $\theta$  permet de contrôler la stabilité de l'algorithme, en pondérant les deux méthodes combinées. La stabilité du système est assurée pour  $\theta \in [\frac{1}{2}, 1]$ .

### II.B.3.b. Validation des modèles

La validation de ces deux algorithmes a été effectuée en deux étapes. Dans un premier temps, nous avons confronté les thermogrammes obtenus pour un matériau homogène donné avec une mesure expérimentale (figure 24). Dans un second temps, nous avons utilisé la technique d'inversion de Degiovanni pour retrouver la diffusivité du matériau des courbes simulées (Tableau 3).

Le matériau étudié est un acier dont les caractéristiques sont:

- Cylindre de 10cm de diamètre et d'épaisseur  $H=2\text{cm}$

- la conductivité est  $\lambda = 22.7 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{°C}}$

- la capacité calorifique est  $\rho C = 8922 \cdot 410 \frac{\text{J}}{\text{m}^3 \cdot \text{°C}}$

La diffusivité est alors de :  $a = \frac{\lambda}{\rho C} = 6,2055 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

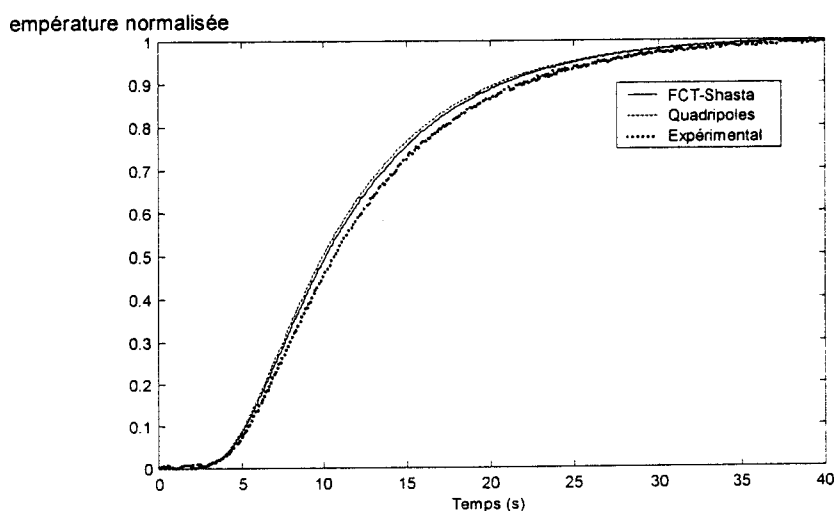


Figure 24 : confrontation modèles - expérience

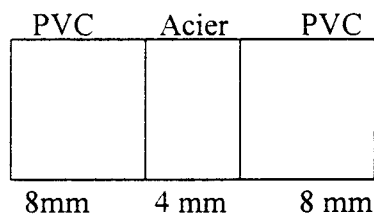
Nous effectuons une inversion de ces 3 courbes à l'aide de la méthode de Degiovanni. Nous constatons que les valeurs de diffusivité obtenues sont en bon accord avec la valeur de référence pour ce matériau homogène (erreur < 5%).

Diffusivité ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )	Méthode des quadripôles		Modèle numérique		Valeur expérimentale	
	Calculé	Erreur	Calculé	Erreur	Calculé	Erreur
Méthode de Degiovanni	6.196e-06	0,15%	6.1451e-06	0,97%	6.0688e-06	2,2%

Tableau 3 : Comparaison intermodèles des résultats



Une dernière vérification des modèles est menée par un matériau stratifié. Nous avons choisi la configuration donnée à la figure 26. Ce matériau stratifié est réalisé en laboratoire et installé sur notre dispositif expérimental de mesure à température ambiante. Le thermogramme en face avant donné par les deux modèles est confronté à une mesure expérimentale (figure (26)). Nous observons une erreur inférieure à 10 % dans la prédiction de la température en face avant par rapport au modèle.



PVC :  $a=1.5e-7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

Acier :  $a=6.2055e-6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

Figure 25 : matériau stratifié étudié

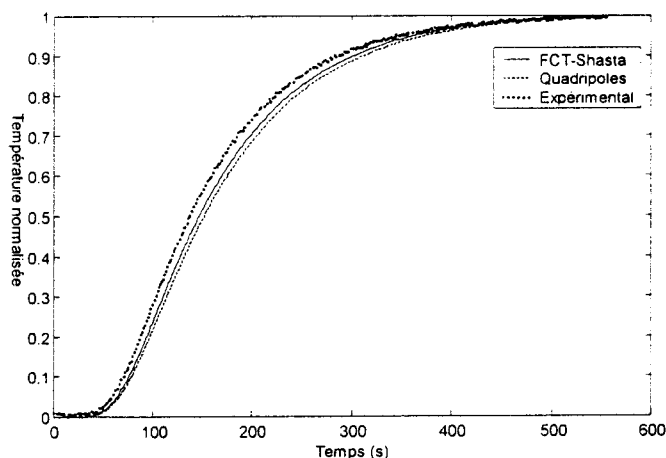


Figure 26 : confrontation modèles - expérience

### II.B.3.c. Identification d'un profil de diffusivité

Notre action vise dans un premier temps à mettre au point un système de localisation des défauts au sein d'un matériau homogène. A terme, notre souhait est d'atteindre l'identification d'un profil de diffusivité thermique de la mesure des températures en face avant et arrière du matériau. Nous avons appliqué la même démarche que dans le cas de la mesure d'humidité. Nous avons travaillé au développement d'un modèle de diffusion de la température en partant de l'équation de diffusion de la chaleur associée à la loi de comportement de Fourier, appliqué à un matériau stratifié. Le modèle numérique implémenté utilise le formalisme des différences finies et assure aux interfaces la continuité du flux et de la température au sein du matériau. La recherche du profil de diffusivité thermique s'effectue par un traitement d'optimisation à l'aide des AG. L'algorithme d'identification retrouve les valeurs des diffusivités des deux matériaux et la position des interfaces, à condition de limiter son parcours de l'espace. Ce qui est équivalent à restreindre les valeurs possibles pour les différents paramètres.

Les difficultés rencontrées sont essentiellement d'ordre physique. Bien que les deux problèmes traités constituent des sondages non intrusifs, les phénomènes physiques sont complètement différents. La diffusion contrairement à la propagation des ondes tend à absorber toutes les discontinuités. On peut considérer la diffusion comme une propagation dégénérée avec beaucoup de distorsion et d'atténuation de l'onde. Par conséquent, nous obtenons un très mauvais rapport signal/bruit surtout en face arrière. Ce qui nous limite sur l'épaisseur des matériaux étudiés et le type de matériau. Une étude en sensibilité de notre modèle, nous a montré que le thermogramme en face avant était plus intéressant pour l'obtention de la diffusivité. Après avoir bruité un signal thermique en face avant, obtenu à l'aide des différences finies, nous avons appliqué notre algorithme d'identification pour remonter au profil de diffusivité. Les résultats théoriques obtenus pour une bi-couche présentés à la figure 27 et 28 sont acceptables. Nous n'avons imposé aucune contrainte forte sur les valeurs de diffusivité à atteindre.

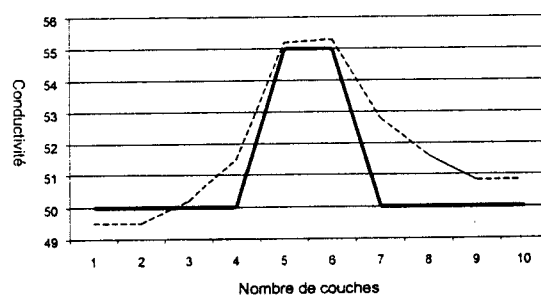
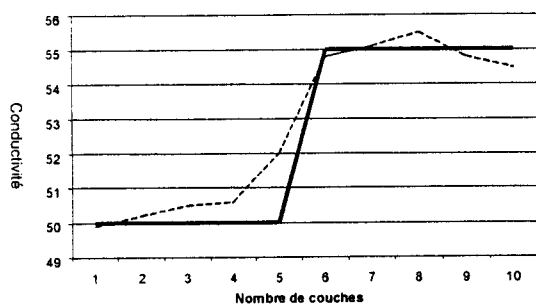


Figure 27 : Profil de conductivité du matériau à 2 couches (--- : profil estimé sur 50 essais) Figure 28 : Profil de conductivité du matériau à 3 couches (--- : profil estimé sur 50 essais).

#### II.B.4. CONCLUSION

Ce travail se poursuit au niveau de l'équipe dans le cadre d'une thèse. Grâce à l'amélioration du dispositif expérimental, nous avons obtenu des résultats conformes à la littérature pour des matériaux homogènes. Dans le cas des matériaux stratifiés, nous avons développé un modèle qui permet de s'affranchir des problèmes de discontinuités aux interfaces (algorithme FCT). Pour l'heure, nous avons obtenu des résultats satisfaisants pour la recherche de profil de diffusivité pour des matériaux constitués de trois strates. Ce résultat nous permet de quantifier la résistance de contact présente à l'interface de deux matériaux. Il nous permet également de localiser la position d'un défaut dans un matériau sain.

Notre modèle nous offre également la possibilité d'effectuer une excitation sinusoïdale. Le régime sinusoïdal forcé transforme l'équation de diffusion en une équation analogue à celle de la propagation. Nous devrions avoir moins de contrainte sur l'épaisseur des matériaux étudiés. Notre étude théorique confirme les résultats présentés par Grossel (GROSSEL 1997). La phase du signal présent en face avant, possède une bonne sensibilité pour notre problème. Nous souhaitons développer un algorithme d'identification s'appuyant sur cette grandeur. Nous nous heurtons sur des difficultés expérimentales pour valider cette approche. Nous avons développé un système expérimental permettant d'effectuer des excitations sinusoïdales de basse fréquence. Nous devons encore améliorer la technique de mesure du déphasage de la température en face avant pour pouvoir identifier la diffusivité. Une fois cette mesure validée, nous démarrerons la recherche d'un profil de diffusivité.

## **II.C. PERSPECTIVES**

Nous avons développé des outils nous permettant de modéliser le comportement de deux milieux face à des excitations de type impulsionnel ou indiciel. Ces modèles autorisent la prise en compte de discontinuités dans le profil de leur caractéristique. Ce travail se ramène à la résolution d'équations différentielles partielles de type parabolique dans le cas de la propagation et elliptique dans le cas de la diffusion. En couplant ce travail à une méthode d'optimisation de type stochastique nous avons pu remonter aux caractéristiques des milieux sondés moyennant un certain nombre d'hypothèses.

Néanmoins, l'interaction de l'onde avec la matière est tellement complexe que la modélisation du système par modèle de connaissance devient rapidement lourde à mettre en œuvre. Dans le cadre du développement d'une instrumentation portable, il semble qu'une modélisation comportementale de type réseaux de neurones, permettrait un développement plus rapide d'un système d'identification en ligne. Conscient des inconvénients et avantages des deux approches, nous utiliserons les modèles de connaissance au laboratoire pour valider les différentes hypothèses et les modèles comportementaux pour l'implémentation dans le dispositif de mesure. Cette démarche s'inscrit dans celle du développement des capteurs logiciels. Elle est commune à l'équipe Energétique et Conduite des procédés.

### III. LE TRANSPORT D'ÉNERGIE SANS FIL

#### III.A. INTRODUCTION

La maîtrise de l'énergie a été depuis toujours intimement liée à l'évolution de l'humanité. Parmi les différentes formes d'énergie exploitées actuellement, le nucléaire et les fossiles prédominent. Depuis la révolution industrielle nous assistons à une utilisation intensive de nos ressources énergétiques de type fossile. Nos réserves actuelles sont estimés à 50 ans pour le pétrole et 100 à 200 ans pour le charbon et gaz naturel. Le nucléaire pose des problèmes de sécurité en amont et en aval de la filière.

Plusieurs pistes de recherche sont étudiées afin d'éviter une crise énergétique pour le prochain siècle. La fission en constitue la piste la plus prometteuse, mais nous nous heurtons à des obstacles techniques délicats (confinement inertiel par champ magnétique intense non résolu, faible rendement ...). L'utilisation des énergies renouvelables à partir du vent, des marées, du soleil, et de la géothermie, est une démarche très intéressante. Néanmoins ces procédés ne peuvent se concevoir que comme système d'appoint ou pour des sites bien particuliers.

En parallèle à cette gestion des ressources se pose le problème d'un développement durable. En effet, la prise de conscience sur le plan international, du réchauffement global de la planète, a généré un ensemble de dispositions réglementaires qui milite pour des formes d'énergie à faible pollution. La politique énergétique nationale suit les recommandations des différents sommets internationaux qui ont abordé la question. La synthèse des dispositions adoptées par l'Etat est disponible sur le site du secrétariat à l'industrie :

[http://www.industrie.gouv.fr/energie/developp/serre/f1e\\_ser.htm](http://www.industrie.gouv.fr/energie/developp/serre/f1e_ser.htm)

C'est dans ce contexte que depuis 25 ans, le concept SPS (Solar Power Satellite) est devenu un sérieux candidat comme système énergétique du prochain siècle. Deux projets clés ont marqué l'histoire très récente des systèmes SPS. Tout d'abord l'étude menée par la NASA de 1976 à 1980 pour le compte du ministère de l'Énergie des États-Unis (DOE). Celle étude qu'on dénomme toujours comme "système de référence" avait pour objectif une fourniture d'une puissance totale de l'ordre de 300 GW, à partir d'un réseau de 60 systèmes géostationnaires de 5 à 10 GW. L'étude ne fut pas suivie de réalisation du fait des coûts exorbitants nécessaires à sa mise en œuvre. En 1992, les japonais se lancent sous l'impulsion de l'ISAS, dans l'étude d'un système délivrant une puissance plus réduite de 100

MW et évoluant à une orbite plus basse (LEO) de 1100 km avec une périodicité de 90 mn : c'est le système SPS 2000.

En parallèle à ces deux projets de référence, des études ont été menées sur les différents sous-systèmes de SPS en Russie, au Japon et aux USA. Elles concernent essentiellement la production des ondes hyperfréquences de puissance avec un bon rendement et la conversion des ondes hyperfréquences en énergie continue. Après la validation du concept de transport de l'énergie sans fil dans les années 60 et 70 (BROWN 1996), la mise en place d'un système permanent est recherchée. Nous avons mené à l'Université de La Réunion, l'étude d'un tel système sur le site de Grand Bassin, dans le cadre d'une étude de cas. Cette démarche se poursuit avec la mise en œuvre d'un système de transport d'énergie sans fil permanent en laboratoire avant de passer à une phase industrielle éventuelle. Les résultats de ce travail peuvent trouver des applications dans toutes situations où la fourniture électrique par câble devient contraignante (milieu hostile, cible mobile ou volante,...)

### **III.B. ETUDE DE CAS DE GRAND BASSIN**

Nous allons nous focaliser à présent sur notre étude de cas de Grand-Bassin. Comme mentionné précédemment, nous travaillons sur une liaison point à point terrestre en espace libre. Le cadre de travail nécessite des contraintes qui ne sont pas forcément applicable à des milieux fermés ou spatiaux. Nous avons choisi des solutions techniques disponibles nécessitant peu d'amélioration ou d'adaptation à notre problème.

#### **III.B.1. PRESENTATION DU CAHIER DES CHARGES DU SYSTEME**

Grand Bassin est un village de montagne de l'île de La Réunion (21° S, 55 °E), qui n'est desservi par aucune route et n'est pas connecté au réseau de distribution d'électricité. Ce haut lieu touristique, installé au fond d'une vallée profonde, abrite trois gîtes pour accueillir les touristes. Depuis quelques années, les habitants réclament une connexion au réseau électrique. Plusieurs pistes ont été explorées:

- Après analyse de la situation, son encaissement pénalise l'installation de système photovoltaïque. Quelques panneaux ont été installés sur les locaux publics et au niveau des gîtes.

- Les cours d'eau présents ne permettent pas la mise en place d'une unité hydroélectrique.

- Le projet le plus réaliste consisterait à fournir l'électricité à l'aide de ligne enterrée. Cette solution n'a pas reçu l'aval des autorités locales qui craignent une détérioration du site.

Au vu de la situation, nous nous sommes positionnés sur ce projet sous la forme d'une étude de cas. Après plusieurs rencontres et visites sur le site de Grand-Bassin, nous avons arrêté le cahier des charges de notre système aux caractéristiques suivantes:

- Fréquence de transport de l'énergie : 2,45 Ghz
- Puissance à délivrer aux trois gîtes: 10 kW.
- Distance entre de transport de l'énergie par onde: 700 m.

Nous avons également mis comme contraintes fondamentales à notre système:

- la sécurité
- et son intégration dans l'environnement.

Pour répondre au premier critère, nous nous sommes basés sur les normes internationales, préconisées pour une exposition permanente aux rayonnements. Nous avons adopté une densité de puissance maximale de 5 mW/cm<sup>2</sup>. Pour le second point, nous avons confié l'intégration des différents sous-ensembles électroniques dans le paysage à des architectes. Ce travail a été mené par un groupe d'étudiants de l'école d'architecture de Paris-Val de Marne sous la direction du Professeur F. Lefèvre.

Le système TESF de Grand-Bassin sera constitué de 3 unités:

- l'unité d'émission (transformation AC/RF)
- l'unité de réception (transformation RF/DC)
- l'unité de conditionnement de l'énergie (transformation DC/AC).

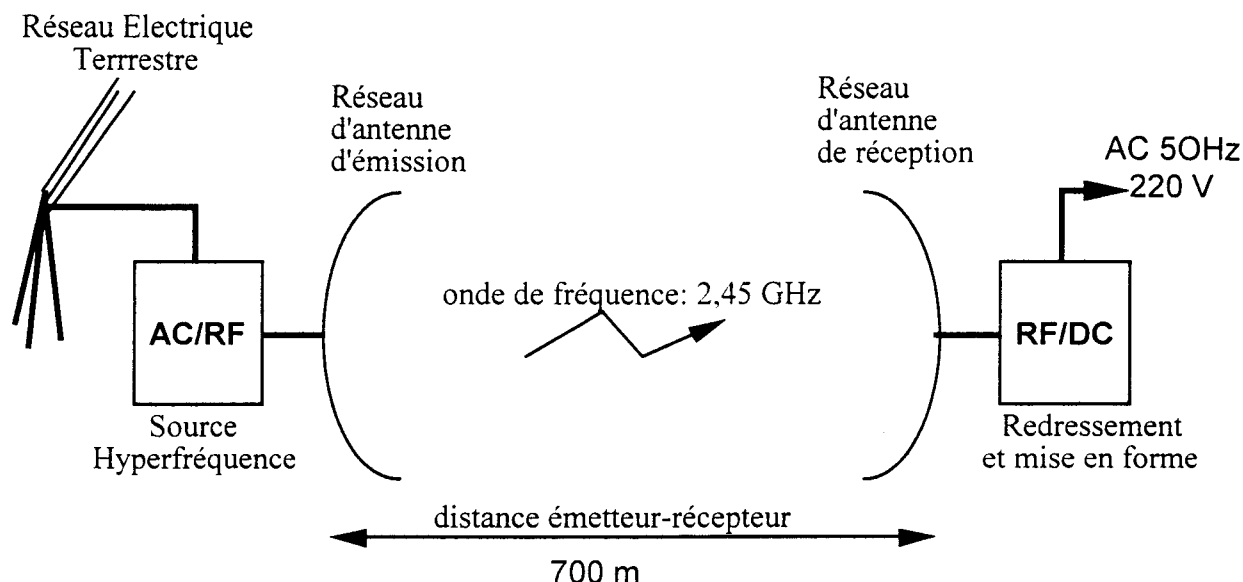


Figure 29: Synoptique d'ensemble de l'étude de cas de Grand Bassin

### III.B.2. L'UNITE D'EMISSION

L'objectif est de transmettre une puissance  $P_e$  sous la forme d'une onde hyperfréquence vers un site distant de 700 m. En utilisant le réseau classique de distribution d'EDF, comme source énergétique de départ, il nous faut assurer la transformation de la puissance électrique du réseau en une onde hyperfréquence de fréquence 2,45 GHz. Le choix de cette fréquence découle des études menées dans le cadre du système de référence. Elle présente l'avantage d'appartenir à une bande réservée aux études expérimentales (ISM<sup>32</sup>) et d'autoriser une bonne propagation en espace libre. L'onde obtenue est ensuite projetée vers le dispositif de réception sous la forme d'un faisceau véhiculant une forte puissance, mais de densité de puissance faible à l'aide d'un réseau d'antenne.

#### III.B.2.a. Le magnétron

Comme source hyperfréquence, notre choix s'est porté sur le magnétron. Il présente l'avantage d'offrir un rendement très élevé par rapport aux klystrons ou circuits actifs intégrés. De plus le magnétron est un oscillateur hyperfréquence susceptible de fournir des puissances importantes en régime continu ou pulsé. Son utilisation dans les fours à micro-ondes a considérablement fait chuter son coût de revient et fait de lui la source hyperfréquence la plus répandue à l'heure actuelle.

<sup>32</sup>ISM: Instrumentation, Scientific, Medical

Le rendement des magnétrons que nous avons choisi, est en moyenne de 80%, si le point de fonctionnement est correctement choisi. Ils peuvent délivrer des puissances de plusieurs kW en continu. Nous avons opté pour l'utilisation de plusieurs magnétrons de moyenne puissance plutôt qu'un seul magnétron de forte puissance. Cette démarche nécessite le contrôle en amplitude et en phase de chaque source. L'alimentation utilisée pour le magnétron autorise un fonctionnement par palier de puissance en sortie. Cette option s'avère très intéressante pour la présente étude où il sera nécessaire d'adapter la puissance émise à la demande énergétique au niveau de l'utilisation. Un signal de retour provenant de l'utilisation pilotera cette commande par palier.

### **III.B.2.b. Antenne à réflecteur parabolique multifocale**

Si l'utilisation d'antennes à réflecteur parabolique conventionnelles (à symétrie de révolution ou à foyer décalés) reste tout à fait possible, cette étude de cas a permis l'introduction d'un type singulier d'antennes. Il s'agit d'antennes à réflecteur parabolique, à foyer décalé. Cependant, au lieu d'utiliser comme cela se fait conventionnellement une seule portion de paraboloïde représentée par une seule focale, le réflecteur est ici découpé en tronçons de paraboloïdes, représentant chacun une focale différente (*figure 30*). L'idée est d'offrir une antenne ayant une surface projetée dans l'axe de l'émission égale à une antenne conventionnelle, mais occupant une profondeur et un espace moindre. Le réflecteur ainsi constitué est réalisé en treillis filaire d'espacement 2 cm, pour permettre une meilleure intégration environnementale et une moindre prise au vent. Ce travail s'est effectué avec une modélisation sommaire du réflecteur. Du fait du fonctionnement à fréquence unique, nous avons adopté une démarche de proche de l'optique géométrique pour calculer les dimensions de notre antenne. Les mesures de puissances rayonnées dans l'axe principal de l'antenne permettent d'estimer le gain de l'antenne à 33 dB dans cette direction.



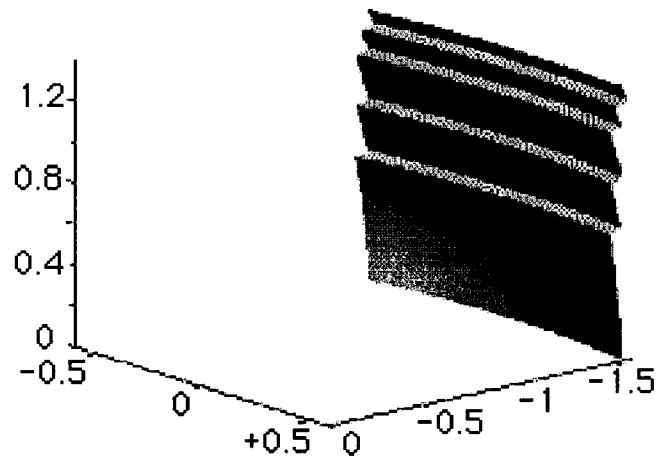


Figure 30: Antenne R.P.M.

La nature artisanale du prototype sur lequel ont été effectuées les mesures, ainsi que l'approche intuitive de sa conception permet dans le futur, d'espérer atteindre des performances bien supérieures.

### III.B.3. L'UNITE DE RECEPTION

L'unité de réception doit répondre à deux objectifs clés: collecter au mieux l'énergie transportée par l'onde et convertir cette énergie sous une forme exploitable (DC et/ou AC basse fréquence).

#### **III.B.3.a. Technologies employées pour les antennes**

Afin de répondre aux contraintes environnementales, notre choix s'est porté sur les antennes filaires. En effet, elles présentent les avantages suivants:

- technologie robuste et bon marché
- transparence du système au rayonnement solaire.

L'antenne H que nous avons adoptée, est un couple de dipôles repliés. Elles ont été mises au point à l'ISAS dans le cadre d'une coopération avec notre équipe (PIGNOLET and LAN-SUN-LUK 1995) . Elle présente l'avantage d'être légère et de fabrication aisée. En réglant l'écartement des deux dipôles, nous avons obtenu une impédance d'entrée de l'ordre de  $50 \Omega$  à 2,45 GHz.

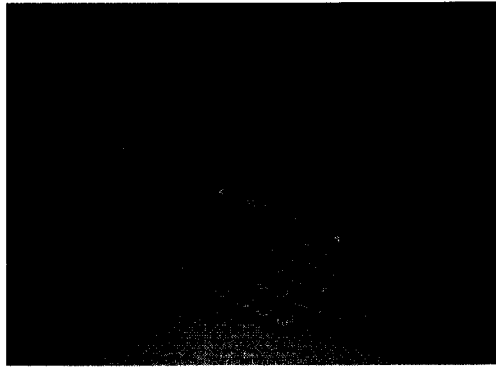


Figure 31: Antenne H.

Il a été montré que le rendement de conversion est fonction de la puissance à l'entrée du module de conversion, ainsi que de la charge. Dans la mesure où la liaison TESH de point à point se doit de respecter les normes de sécurité (faible densité de puissance), tout en assurant un rendement suffisant, nous proposons un regroupement de plusieurs antennes H avant d'attaquer le module de conversion. Les antennes H sont donc groupées en sous réseaux formés par une ligne de 6 éléments en série. La mise en cascade des antennes dipôles H élémentaires se fait par l'intermédiaire d'une ligne bifilaire qui véhicule la puissance micro-onde captée par les dipôles vers les terminaux reliés au module de redressement. L'ensemble dipôles-ligne se trouve à une distance  $\lambda/4$  d'un plan de masse constitué d'une grille métallique d'un maillage de 2 cm par 2 cm. Chaque dipôle est espacé de ses voisins sur une ligne d'une distance égale à  $\lambda$ .

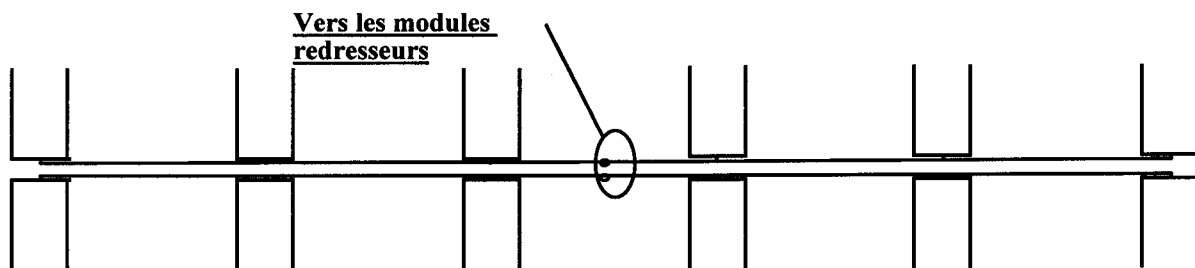


Figure 32: Le réseau de base constitué de 6 antennes de type dipôles H.

Les calculs basés sur la méthode des moments permettent de déterminer les diagrammes de rayonnement et l'impédance au niveau des terminaux pour un sous réseau pris seul. Les résultats théoriques obtenus à l'aide du Logiciel NEC sont représentés sur la *figure 33 et 34*.

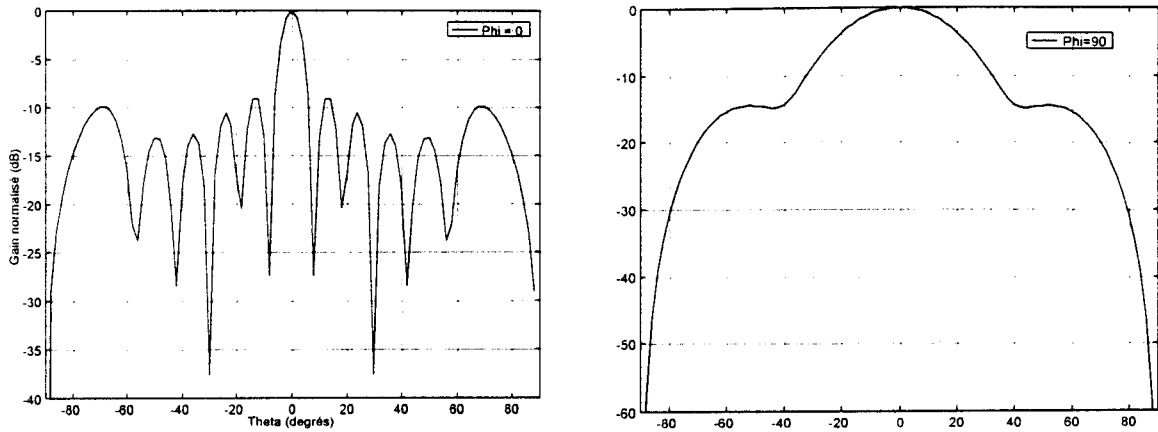


Figure 33 et 34 : Le diagramme de rayonnement pour le plan E et H du sous-réseau de base.

L'impédance du sous réseau est proche de  $50 \Omega$  et la partie réactive reste très faible et peut être annulée par l'utilisation d'un stub sous la forme d'une longueur de ligne à deux fils à l'extrémité du sous réseau. D'autre part, la présence des sous réseaux adjacents n'influence que très peu cette valeur si l'on les espace suffisamment. Nous pouvons encore diminuer le niveau des lobes secondaires en jouant sur le pas du réseau.

### **III.B.3.b. Le circuit de redressement**

Pour effectuer la conversion de l'onde hyperfréquence en courant continu, l'utilisation d'un pont de diode assure le meilleur rendement si le niveau du signal d'entrée est suffisant. Le coût de ces diodes hyperfréquences et leur puissance maximale admissible (AOKI, T. TAGUCHI et al. 1995) constituent une contrainte forte à ce niveau. Nous travaillons avec des diodes schottky de la société NEC, 1SS97 et 1SS98, qui ont un prix de vente très inférieur à ses équivalentes du marché. La puissance maximale autorisée pour cette diode est de l'ordre de 150 mW. Afin de pouvoir supporter des puissances de l'ordre de quelques watts, nous serons amenés à effectuer une mise en parallèle et en série de 16 diodes. La figure 35 propose un exemple de configuration possible.

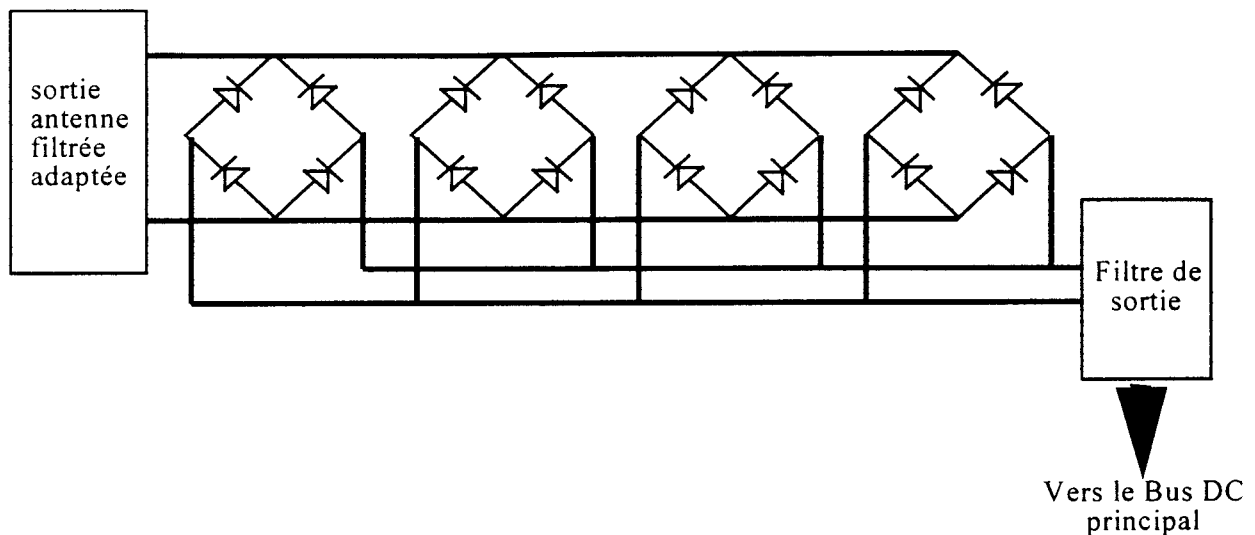


Figure 35 : Une configuration possible des 16 diodes

En assurant l'adaptation d'impédance sur une large bande de fréquence, ainsi qu'un niveau d'attaque correct, différents auteurs (NAHAS 1975), (GUTMANN 1979), (RAZBAN, BOUTHINON et al. 1985) ont présenté des simulations et des réalisations qui permettent d'atteindre des rendements de conversion de l'onde hyperfréquence en courant continu de l'ordre de 80% en moyenne.

### III.B.3.c. Organisation générale du système de redressement

Nous appelons radiopile l'ensemble constitué d'un sous-réseau de base constitué de 6 antennes H reliées à un circuit de redressement. Pour le réseau de radiopile, nous adoptons un espacement entre chaque sous réseau de  $3\lambda/2$ . Nous appelons terminal  $i$ , les 6 antennes en série qui attaquent le circuit de redressement AC/DC  $i$  (figure 36).

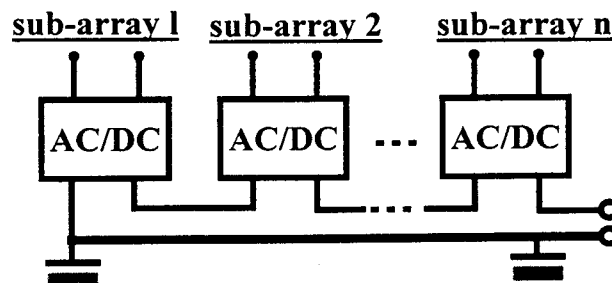


Figure 36 : Le mode de liaison série entre les radiopiles.

### III.B.4. L'UNITE DE CONDITIONNEMENT

La puissance recueillie sous forme continue à la sortie des radiopiles nécessite une mise en forme avant utilisation finale. La charge est constituée par un réseau

classique 220V/ AC /50 Hz/ 10 kVA. Nous devons nous attacher à obtenir le meilleur rendement possible tout au long de cette chaîne de transmission.

L'étude de cas de Grand Bassin pose le problème classique mais toujours intéressant de la gestion de la puissance électrique transmise sur un réseau isolé. En effet toute la puissance consommée (active et réactive) doit pouvoir être produite et acheminée sur le réseau à chaque instant. Nous nous trouvons devant un problème que l'on peut rencontrer dans certaines applications: réseaux militaires, réseaux embarqués: aviation, marine, etc...

Dans le cas présent, le réseau d'utilisation est monophasé<sup>33</sup>,  $S = 10\text{kVA}$ ,  $V = 220\text{V} / \text{AC} - 50\text{Hz}$ . S'agissant d'une charge à usage domestique, la qualité du réseau n'est pas critique, nous admettrons que nous pouvons négliger les harmoniques de tension et de courant.

L'unité de conditionnement de l'énergie doit pouvoir gérer les problèmes techniques suivants:

Premier point:

La source d'énergie en sortie des radiopiles est continue, donc cette puissance ne comporte pas de composante réactive. Le réseau nécessite donc un conditionneur d'énergie réactive qui peut être une machine tournante ou un compensateur statique.

Deuxième point:

La charge peut avoir des variations brusques : le système TESF ne peut en aucun cas répondre directement à ce problème. Le réseau nécessite donc un système de stockage de l'énergie disponible à chaque instant. Ce stock d'énergie peut être réalisé de manière classique par des batteries ou plus ponctuellement par stockage capacitif, inductif, ou cinétique. Il existe actuellement des systèmes de stockage inductif d'une puissance de 3 MVA avec un temps de réponse d'une seconde. En cas de décharge brutale, le système doit pouvoir absorber l'excédant de puissance reçue ce qui élimine certains types de batteries.

Troisième point:

L'énergie issue des radiopiles étant continue, il faut prévoir un convertisseur continu/alternatif statique (onduleur). Ce type de convertisseur est classique et devra seulement être adapté au problème posé. Mais sur un réseau plus puissant se posera le problème de la référence de fréquence ainsi que du taux d'harmoniques acceptable par la charge.

---

<sup>33</sup> Nous utilisons pour les puissances:  $S = |V \cdot I e^{j\varphi}|$ ,  $P = V \cdot I \cos\varphi$ ,  $Q = V \cdot I \cdot \sin\varphi$

### III.B.4.a. Présentation de l'unité de conditionnement de l'énergie

L'étude de cette unité nous a permis de proposer la disposition présentée à la figure 26 pour l'étude de cas de Grand-Bassin.

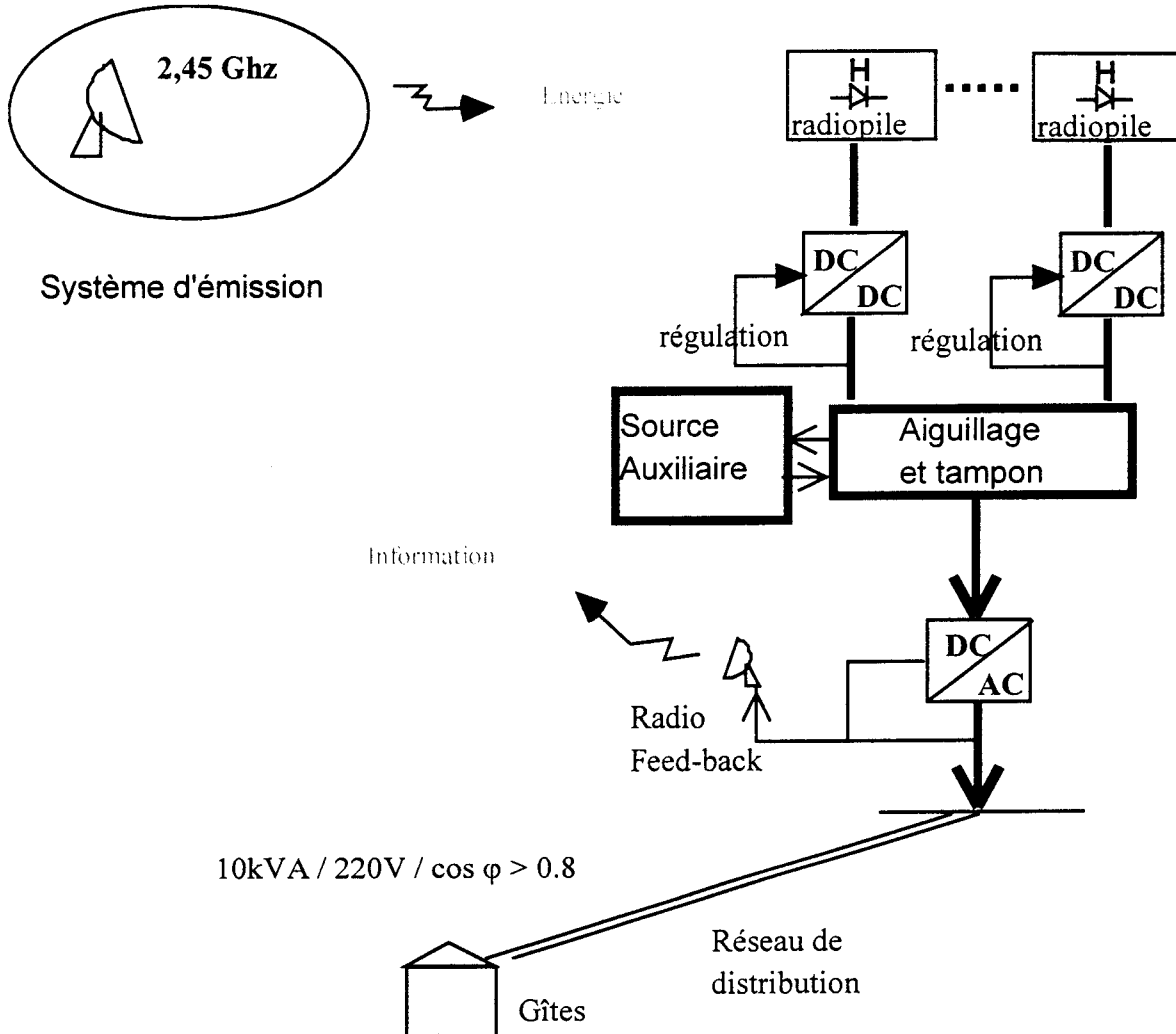


Figure 37 : Unité de conditionnement

Le choix des différentes unités est dicté par la règle de liaison d'une source à une charge. La règle impérative est qu'une source et une charge reliées sont obligatoirement de nature différente à savoir Tension/Courant.

Les radiopiles sont des sources de tension continues (capacitives). Il est donc impossible de les relier directement à des charges capacitatives représentées par les batteries ou l'entrée de l'onduleur. Un convertisseur DC/DC tampon s'impose et celui-ci devra être obligatoirement indirect c'est-à-dire de C (source) vers L (tampon) puis vers C (charge). De préférence, on utilisera un convertisseur isolé. Le choix de la structure du convertisseur n'est pas fixé à ce jour afin de garder plus de liberté dans la réalisation finale.

La sortie du convertisseur et les batteries attaquent un onduleur nécessairement de type tension dont la charge sera obligatoirement inductive. A ce propos, il faut savoir qu'un onduleur est dédié à la charge, c'est-à-dire que cette dernière impose la structure du convertisseur statique, mais surtout que cette dernière n'est pas totalement libre. Ce qui imposera des compensateurs statiques ou des filtres sur un réseau " généralisé ". Le dimensionnement des convertisseurs se fera en prenant en compte les dynamiques en tension/courant à l'entrée et à la sortie du système. Chacun des convertisseurs statiques joue d'autre part un rôle actif dans le contrôle et la protection des éléments du système.

### **III.B.4.b Les différents sous-systèmes**

Nous pouvons décomposer notre unité de conditionnement en trois sous-systèmes, si l'on considère que la source auxiliaire sera des batteries :

- L'onduleur

L'onduleur choisi doit posséder les caractéristiques électriques suivantes:

- Contrôle Tension:  $V = 220 \text{ V / AC}$
- Fréquence 50 Hz
- Sécurité: Courant maximal
- Rendement minimum de 90 %

- Le convertisseur DC/DC

- Contrôle Tension de sortie:  $V = 130 \text{ V / DC}$
- Sécurité: Courant maximal et Tension d'entrée
- Rendement minimum de 85 %

Le convertisseur DC/DC en sortie des radiopiles prend en charge la régulation de la tension de sortie , la sécurité courant vis à vis d'un dépassement ou d'un court-circuit, et la protection des radiopiles vis à vis d' une augmentation accidentelle de la tension redressée. Dans ce cas on peut prévoir une protection" suicide " permettant de décharger les condensateurs de sortie des radiopiles.

- Le système de rétro-pilotage

La sécurité du système complet nécessite plusieurs contrôles, à différents niveaux:

- La sécurité en générale, est prise en charge directement par des circuits spécialisés pour assurer la sauvegarde du système. Son fonctionnement est préétabli et autonome.

- Par contre l'asservissement et la régulation sont pris en charge par un système à base de microprocesseurs.

- En dernier lieu, un signal pilote de contrôle est nécessaire pour le dialogue entre le système d'émission et de réception. C'est à travers ce signal que s'effectuera la commande par pallier de l'émetteur.

### III.B.5. BILAN DE PUISSANCE

Afin de déterminer le nombre d'antennes ainsi que la puissance des sources hyperfréquence à utiliser, nous avons mené une estimation du bilan global d'une liaison TESH. Pour ce faire, nous avons fixé fermement deux contraintes. La première est la densité de puissance au niveau de l'unité de réception située au niveau du village de Grand-Bassin. Compte tenu des normes en vigueur concernant les densités de rayonnements électromagnétiques, il semble impératif pour un tel système de ne pas dépasser la densité de puissance de  $5\text{mW/cm}^2$ . La deuxième contrainte provient de l'objectif que se fixe cette étude de cas, soit la fourniture d'une puissance de 10 kW aux utilisateurs.

L'étude du système de réception permet de déterminer la surface effective de l'antenne de réception, en fonction des technologies d'antennes et de redressement utilisées de l'onde hyperfréquence en courant continu. Cette connaissance jointe à la densité de puissance décrite plus haut et au gain de 33 dB mesuré d'une antenne RPM, permet de déterminer le nombre d'antennes RPM à utiliser, ainsi que la puissance totale des sources micro-ondes nécessaire dans le cas d'une liaison cohérente (MCSPADDEN 1996). Nous avons volontairement sous-évalué les performances de l'unité de redressement (radiopile) pour nous permettre d'avoir une marge de manœuvre en fonction du type de diodes utilisées. Le tableau 4 ci-dessous résume les chiffres obtenus. On peut en outre, déterminer le rendement global de la chaîne. Nous avons veillé à conserver un rendement acceptable au prix d'une augmentation du coût du système.



Puissance délivrée aux usagers : P4 avec un $\cos \varphi > 0,8$	10,48 kW
Puissance à l'entrée du convertisseur DC/AC : P3 (90%)	11,65 kW
Puissance source auxiliaire: P'2	3,25 kW
Puissance à l'entrée de l'aiguilleur: P2	8,4 kW
Puissance totale à l'entrée des convertisseurs DC/DC : P1 (85 %)	9,88 kW
Puissance à l'entrée des radiopiles (80%)	12,3 kW
Puissance en sortie des RPM (90%)	13,7 kW
Puissance totale à l'entrée des magnétrons (80%)	17,15 kW
Rendement total	0,58
Puissance consommée EDF	22,68 kW

Tableau 4

D'après les valeurs obtenues théoriquement pour un sous réseau constitué de 6 antennes de type dipôle H, nous pouvons déterminer le nombre de sous réseau nécessaire à l'obtention d'une puissance de 10 kW à la sortie des radiopiles, si on considère un rendement moyen de 0,8. Le *tableau 5* résume les caractéristiques adoptées pour le système de réception.

Rendement Radiopile	0,8
Puissance reçue : Pr	12,35 kW
Densité de Puissance	5 mW/cm <sup>2</sup>
Surface effective	247 m <sup>2</sup>
Surface effective unitaire	0,046 m <sup>2</sup>
Surface réelle unitaire	0,16 m <sup>2</sup>
Nombre d'éléments	5234
Surface réelle	838,18 m <sup>2</sup>
Puissance par module de redressement	2,32 W
Nombre de diodes	82334

Tableau 5

Nous avons donc besoin de 5146 sous réseaux qui occupent au sol, une surface réelle de l'ordre de 840 m<sup>2</sup>. Ce qui correspond à un cercle de rayon de l'ordre de 17 m.

Pour une attaque correcte des convertisseurs DC/DC, un minimum de tension est requis. Nous avons choisi une valeur de 100 Volts, ce qui nécessite une mise en

série de  $N=10$  radiopiles. Ces mêmes convertisseurs sont prévus pour fonctionner à 2 kW. Nous mettrons en parallèle 100 sous blocs précédents à l'entrée du convertisseur. Pour éviter des problèmes de connectique, une distribution répartie sera effectuée à l'aide d'un bus principal de forte puissance suffisamment isolé. Nous reproduisons cette même configuration à 5 reprises pour disposer de nos 10 kW utile du cahier des charges initial. A l'émission, plusieurs sources hyperfréquences d'une puissance totale de 23 kW s'avèrent nécessaire. Pour projeter cette onde vers le système de réception et redressement, situé à 700 m en contrebas, nous avons choisi 15 antennes RPM, afin de répondre aux normes sur la densité de puissance admise pour une exposition permanente. La chaîne TESH complète ainsi réalisée présente un rendement global de 58 %.

### III.B.6. CONCLUSION SUR L'ETUDE DE CAS

Nous avons étudié un système d'émission dans le cadre de la réalisation d'une liaison TESH servant à la fourniture d'une puissance électrique de 10 kW aux gîtes touristiques de Grand-Bassin. Un nouveau type d'antenne à réflecteur parabolique multifocale a été développé et s'avère prometteur. L'utilisation d'un logiciel de bilan de liaison fournit par l'université du Texas AM, nous a permis d'estimer à 15 le nombre d'antennes de ce type à utiliser, avec une puissance RF de 1 kW par antenne. Le rendement global de la liaison TESH complète (réseau EDF - utilisation) est estimé à 58 % environ.

Pour cette application, les magnétrons semblent mieux adaptés que les klystrons, pour des raisons de coût à l'achat, de coût de maintenance, de rendement (coût de fonctionnement). De plus, nous souhaitons développer un système évolutif pouvant répondre à une croissance de la consommation énergétique.

Nous avons présenté un système qui respecte les deux points primordiaux de notre étude de cas, à savoir:

- une sécurité selon les normes en vigueur dans le cas d'une exposition permanente
- une intégration possible du système dans l'environnement du site.

Ce dernier point géré par un groupe d'étudiants en architecture sous la direction du Professeur F. Lefèvre, nous a permis d'inclure le dispositif de réception dans les structures existantes de type pergolas (treilles de choucho). Pour les antennes d'émission, une structure baptisée "magnétal" est proposée.

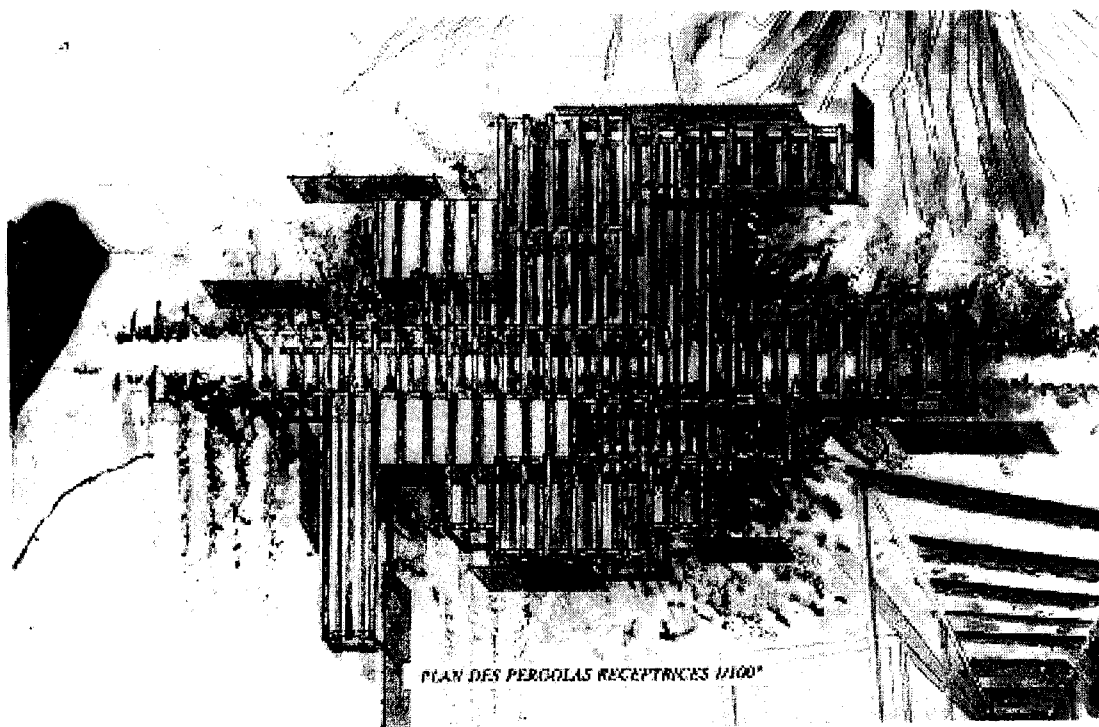


Figure 38 : Système de réception monté sur des Pergolas

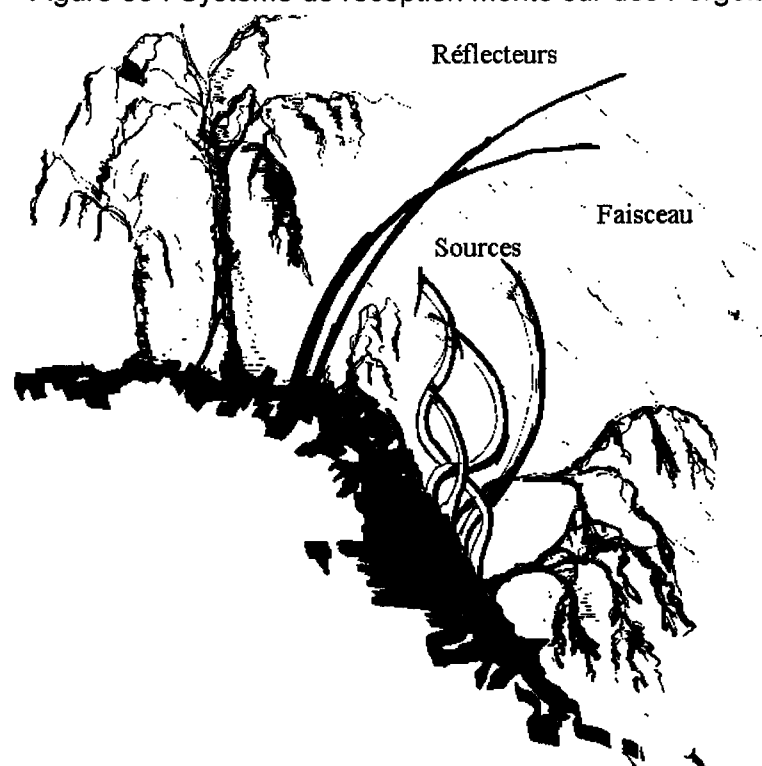


Figure 39: Système d'émission baptisé "Magnétal "

La faisabilité du système TESF dans le cadre de l'étude de cas de Grand Bassin est démontrée. Il reste à opérer les derniers choix stratégiques avant la mise en œuvre des éléments constitutifs et à valider les hypothèses sur deux points:

- le contrôle en fréquence et amplitude du magnétron.
- le développement d'une radiopile intégrée et protégée.

### **III.C. DEVELOPPEMENT D'UN PROTOTYPE**

Cette étude de cas nous a permis de mettre l'accent sur les points forts et les points faibles du système. Avant de passer à une phase industrielle, nous avons effectué une démarche de test en laboratoire des différents sous-systèmes. C'est sous cet angle que nous avons sollicité les collectivités locales pour la construction d'un prototype en laboratoire permettant de transmettre une puissance de 1 kW sur une distance de 50m.

Ces caractéristiques ont été dictées par les infrastructures existantes et d'autre part par l'obtention d'un système potentiellement commercialisable. Tout en définissant un cahier des charges rigide, nous avons opté pour des sous-systèmes interchangeables et à coûts raisonnables. La source sera constituée d'un magnétron capable de délivrer une puissance maximale de 2 kW. Il est à noter que l'on augmente la durée de vie des magnétrons si l'on les fait fonctionner à niveau inférieur à leurs caractéristiques de départ. Nous utiliserons un seul réflecteur RPM en association avec cette source. A la réception, nous aurons un réseau de dipôle H ayant la même configuration que celle présentée dans l'étude de cas précédent. Pour éviter la mise en réseau de plusieurs diodes 1SS97, nous recherchons des diodes schottky pouvant supporter des puissances plus importantes. Une fois la diode choisie, il convient d'effectuer une adaptation de la radiopile en fonction des niveaux de réception de l'onde et des variations de la charge. Ce travail de caractérisation et d'optimisation de ce circuit est nécessaire pour limiter les pertes et surtout celles re-rayonnées aux harmoniques supérieures du signal.

Le système de conditionnement sera ramené à une charge sans dispositif de rétro-pilotage dans un premier temps. Par la suite nous mettrons en œuvre une stratégie de conditionnement et de contrôle de cette énergie, fonction des éléments connectés en bout de chaîne. Ce système devrait nous permettre de valider les éléments clés du dispositif à la réception (radiopile ou CWC<sup>34</sup>) et d'offrir un banc d'essai à l'évolution des caractéristiques des différents éléments en fonctionnement.

---

<sup>34</sup>Cyclotron Wave Converter développé par une équipe russe

### III.D. PERSPECTIVES

Le travail mené à l'université de La Réunion constitue une étape dans la démarche SPS. Sur le plan mondial, on note un regain d'activité de recherche sur la TESH depuis qu'une étude américaine menée par la NASA de 1995 à 1997 (MANKINS, HOWELL et al. 1998), "the fresh look study" a conclu à une viabilité économique des systèmes SPS, à la lumière des progrès techniques réalisés ces 10 dernières années. Une démarche de quantification du potentiel français est menée par le CNES afin de coordonner les actions en cours au niveau national (SPS meeting, mars 1999).

Nous avons décidé de concentrer nos actions de recherche sur deux éléments du système, à savoir:

- le magnétron,
- la radiopile.

En ce qui concerne le magnétron, nous estimons qu'un meilleur contrôle de ses performances (fréquence et amplitude) permettrait à ce composant fiable, à bon rendement et à longue durée de vie de se positionner comme un candidat sérieux pour les applications à forte puissance au regard des performances des circuits actifs à base de transistors. Un contrôle en fréquence est possible en faisant fonctionner le magnétron en pseudo-amplificateur. Le principe est d'injecter dans le magnétron, un signal RF stable de faible niveau. Cette injection ne pouvant se faire que par la sortie, un circulateur ou un coupleur directif est nécessaire afin d'amener le signal de faible niveau vers le magnétron, et l'onde amplifiée de forte puissance vers l'utilisation.

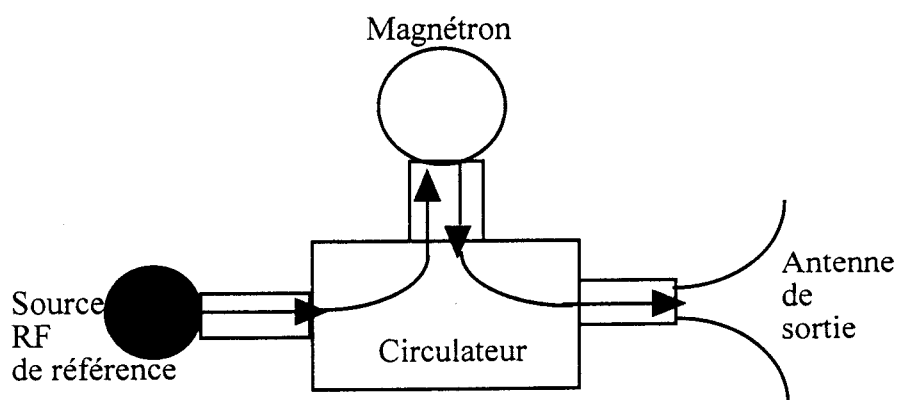


Figure 40 : Schéma de principe du MDA

L'oscillateur libre que représente le magnétron, se verrouille alors sur le signal injecté. L'utilisation d'un système utilisant ce principe pour la TESF a été proposé par W.C. Brown, sous le nom de MDA (Magnetron Directional Amplifier).

Nous souhaitons introduire un nouveau degré de liberté supplémentaire sur le contrôle en modulant le champ magnétique à l'aide d'un électro-aimant. Pour se faire, nous adoptons une démarche de modélisation du magnétron sous l'angle comportemental. L'utilisation d'un réseau de neurones nous permet de reproduire le comportement statique d'un magnétron, c'est-à-dire prévoir son point de fonctionnement, sous l'effet du courant et de la tension d'anode ainsi que du champ magnétique. Nous insérons ce modèle dans une structure de contrôle classique afin d'asservir les performances du magnétron en fréquence et en puissance. A priori la phase du signal de sortie sera celle du signal injecté selon la théorie du verrouillage par injection ("injection locking mode").

Les résultats obtenus lors de cette étude pourront trouver des débouchés industriels immédiats. Nous avons pour cela contacté le principal constructeur français de magnétron, la COVIMAG. Nous avons identifié deux pistes intéressantes: le chauffage des plasmas et le séchage industriel.

Au niveau de la réception, nous avons un problème de rendement lors de la conversion de l'énergie véhiculée par l'onde hyperfréquence en énergie continue. La diode, du fait de son comportement non linéaire, pose problème lors de l'adaptation de son impédance avec celle de l'antenne. Sa modélisation est fonction de la fréquence, mais aussi de l'amplitude des signaux d'attaque. De plus elle génère des harmoniques qu'il convient de canaliser afin d'éviter des rayonnements parasites. Nous souhaitons développer un module de redressement et de filtrage en technologie intégrée. Ce module intégrera également une protection vis à vis des surtensions éventuelles et des variations de la charge. Un projet de thèse en collaboration avec le laboratoire IXL de Bordeaux 1 est envisagé. Nous souhaitons utiliser les avancées de ce laboratoire dans le développement d'inductance active pour les appliquer à notre problème au niveau du filtrage et d'oscillateur piloté.

## CONCLUSION

Dans ce mémoire, j'ai présenté mon activité d'enseignant-chercheur dans la première partie. La deuxième partie fut essentiellement consacrée à la présentation des thèmes de recherche menés principalement au cours de l'encadrement de trois doctorants. Ces actions correspondaient à une reconversion thématique au regard de mon activité de recherche antérieure. Pour m'insérer dans mon environnement immédiat, j'ai accepté l'aspect pluridisciplinaire de ma recherche actuelle. J'ai défendu avec pugnacité l'émergence d'un groupe de recherche en instrumentation et traitement du signal. Depuis la création de l'équipe ITS, j'ai assuré l'encadrement scientifique d'un premier doctorant, qui a obtenu son grade de docteur au mois d'octobre 1998. Bien que le sujet était très appliqué, j'ai souhaité apporter une originalité à cette thèse. Ce travail, mené en collaboration avec des agronomes, a débouché sur la mise à disposition d'un outil informatique. Il fournit le profil de l'humidité d'un signal réfléchi, délivré par un réflectomètre. Deux autres thèses sont en cours au sein de l'équipe. L'identification des caractéristiques thermiques des matériaux a utilisé la même démarche scientifique que pour la mesure d'humidité. Le développement d'un nouveau dispositif expérimental, allié à l'utilisation d'une technique d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques, ouvrent des perspectives intéressantes à ce travail. Les résultats obtenus pourront servir au diagnostic et à la caractérisation thermique de matériaux composites. Enfin, le transport d'énergie sans fil constitue une action particulière. Après avoir validé la faisabilité d'une liaison point à point autour d'une étude de cas, nous réalisons en laboratoire un prototype pouvant délivrer une puissance de 1 kW en bout de chaîne. En se focalisant sur les éléments clés du dispositif, nous avons élaboré une stratégie de recherche à double finalité. Cette démarche nous permet de concilier l'objectif SPS, à horizon lointain avec une demande industrielle immédiate. Dans le cadre d'une thèse, nous travaillons sur le contrôle en fréquence et en puissance d'un magnétron au sein de l'unité d'émission. Les résultats obtenus en laboratoire autorisent un transfert rapide de technologie vers l'industrie. Nous efforçons d'insérer une recherche en télécommunication par le biais de nouvelles collaborations avec des équipes nationales. Dans un premier temps nous souhaitons travailler sur le développement de circuits actifs en vue d'une intégration dans des systèmes de communication « télé-alimentés ».

## LISTES DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1 : Activités avant la création de l'équipe de recherche ITS .....	23
Tableau 2 : Activités après la création de l'équipe de recherche ITS .....	24
Figure 1a : Le réflectomètre utilisé .....	31
Figure 1b : Guide d'onde bifilaire.....	31
Figure 2 : Le signal mesuré.....	32
Figure 3: Vision locale de l'onde de tension.....	34
Figure 4 : Diagramme spatio-temporel des ondes transmises et réfléchies .....	34
Figure 5: Algorithme mis en œuvre pour le calcul du signal réfléchi.....	36
Figure 6a : Exemple d'une mesure dans de l'air avec des guides de 70 cm, $\epsilon_r(x)=1$ .....	37
Figure 6b : Exemple de l'eau ordinaire avec des guides de 70 cm, $\epsilon_r(x)=80$ .....	37
Figure 6c : Exemple de mesures dans un milieu stratifié constitué de 40 cm gravier séché suivi de 30 cm de gravier saturé d'eau. $\epsilon_r(x)=5$ pour $0 \text{ cm} < x < 40 \text{ cm}$ et $\epsilon_r(x)=24.5$ pour $40 \text{ cm} < x < 70 \text{ cm}$ .....	37
Figure 7 : Courbe de signal réfléchi mesuré dans un milieu stratifié : 40 cm de sable sec suivis de 30 cm de sable saturé d'eau.....	38
Figure 8 : Inversion de la courbe de signal réfléchi mesurée dans 40 cm de sable sec suivis de 30 cm de sable saturé d'eau, après ajustement du rapport de transformation du balun .....	38
Figure 9 : Calcul du profil d'humidité par une technique de déconvolution dynamique.....	39
Figure 10 : Diagramme local des rayons pour un z et t donné. ....	40
Figure 11: Algorithme mis en œuvre pour le calcul du signal réfléchi.....	41
Figure 13 : Schéma du processus itératif d'identification .....	43
Figure 14 : courbes de signal réfléchi optimisée et courbe mesurée .....	44
Figure 15 : Profil d'humidité moyen identifié et profil de référence .....	45
Figure 16 : dispositif expérimental sur site. ....	46
Figure 17 : Exemples de profils hydriques calculés à partir de mesures au champ.....	46
Figure 18a : Schéma du dispositif expérimental.....	49
Figure 18b : Schéma du dispositif expérimental développé.....	50
Figure 19 : Thermogrammes des faces avant et arrière mesurés pour des échantillons cylindriques de PVC homogène de diamètre 80 mm et d'épaisseur 8 mm.....	50
Figure 20 : Thermogramme d'un échantillon parfaitement isolé.....	52
Figure 21 : Thermogramme expérimental obtenu pour un milieu homogène en face arrière .....	53
Figure 22 : système étudié.....	55
Figure 23 : discrétisation spatio-temporel utilisé .....	56
Figure 24 : confrontation modèles - expérience .....	58
Tableau 3 : Comparaison intermodèles des résultats.....	58
Figure 25 : matériau stratifié étudié .....	59
Figure 26 : confrontation modèles - expérience .....	59



Figure 27 : Profil de conductivité du matériau à 2 couches (--- : profil estimé sur 50 essais).....	60
Figure 28 : Profil de conductivité du matériau à 3 couches (--- : profil estimé sur 50 essais).....	60
Figure 29: Synoptique d'ensemble de l'étude de cas de Grand Bassin .....	65
Figure 30: Antenne R.P.M. ....	67
Figure 31: Antenne H.....	68
Figure 32: Le réseau de base constitué de 6 antennes de type dipôles H. ....	68
Figure 33 et 34 : Le diagramme de rayonnement pour le plan E et H du sous-réseau de base.....	69
Figure 35 : Une configuration possible des 16 diodes .....	70
Figure 36 : Le mode de liaison série entre les radiopiles. ....	70
Figure 37 : Unité de conditionnement.....	72
Tableau 4.....	75
Tableau 5.....	75
Figure 38 : Système de réception monté sur des Pergolas.....	77
Figure 39: Système d'émission baptisé "Magnétal " .....	77
Figure 40 : Schéma de principe du MDA.....	79

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AOKI, Y., T. TAGUCHI, et al. (1995). High frequency Schottky barrier diode with high breakdown voltage for wireless power transmission to the microcmachines in narrow metal tubes. WPT'95, KOBE, JAPON.

ARSENE, G., Z. CEAUSESCU, FI.-A. POTRA, D. TIMOTIN (1983). "A new algorithm for detecting reflection coefficients in layered media." Annales Geophysicae 1(4-5): 285-290.

BALDY, S., G. ANCELLET, M. BESSAFI, A. BADR, J.D.LAN SUN LUK (1996). "Observations of the vertical distribution of tropospheric ozone at the island of Reunion (southern tropics)." JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH 101(D19): 23,835-23,849.

BATSALE, J. C., D. MAILLET, et al. (1994). "Extension de la méthode des quadripôles thermiques à l'aide de transformations intégrales - calcul du transfert thermique au travers d'un défaut plan bidimensionnel." Int. J. Heat Mass Transfer 37(1): 111-127.

BORIS, J. P., A. M. LANDSBERG, et al. (1993). LCPFCT - Flux-Corrected Transport Algorithm for Solving Generalized Continuity Equations, *Laboratory for Computational Physics and Fluid Dynamics*.

BROWN, W. C. (1996). "The history of wireless power transmission." Solar Energy 56(1): 3-21.

BRUCKSTEIN, A. M. and T. KAILATH (1987). "Inverse scattering for discrete transmission line models." SIAM review 29(3): 359-373.

BRUCKSTEIN, A. M., I. KOLTRACHT, et al. (1986). "Inverse scattering with noisy data." SIAM J. SCI. STAT. COMPUT. 7(4): 1331-1349.

BUDUCA, C., B. RAYNAUD, J.D.LAN SUN LUK, F. MOLINARO (1996). "Electrical penetration graphs from *Peregrinus Maidis* (ashmead) (homoptera: delphacidae) on a susceptible maize hybrid." Entomologica Experimentalis et Applicata 79: 131-139.

DEGIOVANNI, A. (1977). "Diffusivité et méthode flash." Rev. Gen. Therm. Fr.(185): 417-442.

DEGIOVANNI, A. and M. LAURENT (1986). "Une nouvelle technique d'identification de la diffusivité thermique." Rev. Phys. Appl. 21: 229-237.

GOLBERG, D. E. (1994). Algorithmes génétiques, Addison-Wesley France.

GROSSEL, P., F. DEPASSE, N. TRANNOY (1997). "Multicouche thermique et profils thermophysiques continus: l'approche récursive." J. PHYS III FRANCE 7(JANV 97): 13-33.

GUTMANN, R. J. e. a. (1979). "Power combining in an array of microwave power rectifiers." IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques MTT-27(12): 958-968.

KRAUS, J. D. (1984). ELECTROMAGNETICS, Mac Graw-Hill.

LESSELIER, D. (1978). "Determination of index profiles by time domain reflectometry." J. OPTICS (Paris) 9(6): 349-358.

MAMODE, M. and J. D. LAN-SUN-LUK (1996). "On wave propagation in inhomogeneous transmission lines: a time domain approach." soumis à IEEE Transactions on Antennas and Propagation.

MAMODE, M. and J. D. LAN-SUN-LUK (1996). "Time domain analysis of electromagnetic wave propagation in stratified media." Journal of Electromagnetic Waves and Applications 10(6): 747-756.

MANKINS, J. C., J. HOWELL, et al. (1998). NASA's 1998 Space Solar Power Concept

Definition Effort - A Follow-on to the fresh Look Study. IAF-98, Melbourne, Australia.

MCSPADDEN, J. (1996). WEFF. TEXAS, Université du Texas AM.

NAHAS, J. J. (1975). "Modeling and computer simulation of a microwave to DC Energy conversion element." IEEE Transactions on microwave theory and techniques MTT-23(12): 1030- 1035.

OSIZIK, M. N. Heat Conduction.

PARKER, W. J., R. J. JENKINS, C. P. BUTLER, G. L. ABBOTT (1961). "Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity." J. Appl. Phys. 32(9): 1679-1684.

PIGNOLET, G. and J. D. LAN-SUN-LUK (1995). " Design of a low-cost Rectenna for a low-power SPS-2000/WPT demonstration model." The Institute of Space and Astronautical Science Research note.

RAZBAN, T., M. BOUTHINON, et al. (1985). "Microstrip circuit for converting microwave low power to DC energy." IEE Proceedings 132(2): 107-109.

SANTOS, L. A. P. D. (1997). Développement d'une nouvelle méthode de détermination des profils de teneur en eau dans les sols par inversion du signal TDR. L.T.H.E. Grenoble, Université Joseph Fournier: 144.

STEFEST, H. (1970). Numerical Inversion of Laplace Transforms.

SYMES, W. W. (1981). "Stable solution of the inverse reflection problem for a smoothly stratified elastic medium." SIMA J. MATH. ANAL. 12(3): 421-453.

TOPP, G. C., J. L. DAVIS, A. P. ANNAN (1980). "Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines." Water Resources Research 16(3): 574-582.

YANUKA, M., G. C. TOPP, et al. (1988). "Multiple reflection and attenuation of time domain reflectometry pulses: theoretical considerations for applications to soil and water." Water Resources Research 24(7): 939-944.

# **PUBLICATIONS**

## TROISIEME PARTIE : PUBLICATIONS

### Publications liées à mes activités de recherche antérieures à mon recrutement à l'Université de La Réunion

#### Articles revues à comité de lecture

1) KOSSIAVAS G., CROQ F., LAN SUN LUK J.D., PAPIERNIK A.

" Large bandwidth L-Bande radiating element".

AUE: International Journal of Electronics and Communications,

Vol 45, May 1991, N° 3 p. 191-193

#### Articles congrès à comité de lecture

1) CAMBIAGGIO E, DAMIANO J.P., LAN SUN LUK J.D., PAPIERNIK A.

"Antennes microrubans multicouches à éléments rectangulaires décalés".

Journées Nationales Microondes, Nice, 1987.

2) BENKAMOUN M., LAN SUN LUK J.D., PAPIERNIK A.

"Wideband stacked microstrip antennas".

International Symposium ANTEM, Winipeg, Manitoba, Canada, Août 1988.

3) LAN SUN LUK J.D., CROQ F., PAPIERNIK A., PENARD E.

"Antenne microruban alimentée par ouverture ou par coaxial". Journées Internationales de Nice sur les Antennes, JINA 88, Novembre 1988.

4) PAPIERNIK A., CROQ F., LAN SUN LUK J.D.

"Antennes microrubans à large bande alimentées par ouverture".

Journées Nationales Microondes, Montpellier, juin 1989.

5) KOSSIAVAS G., CROQ F., LAN SUN LUK J.D., PAPIERNIK A.

" Large bandwidth stacked printed antennas".

International Symposium on antennas and Propagation, August 1989, Tokyo, Japon.

Rapports

Rapport d'études pour le **CNET** (4 tranches)

Convention N° 866B051

Titre: Etude de micro-antenne à polarisation contrôlée et à large bande.

## **Publications liées à mes activités de recherche à l'Université de La Réunion**

### Articles revues à comité de lecture

1 - Design of a low-cost Rectenna for a low-power SPS-2000/WPT demonstration model.

The Institute of Space and Astronautical Science Research note, N° ISAS RN 573, May 1995

G. PIGNOLET et J.D.LAN SUN LUK.

2 - Observations of the vertical distribution of tropospheric ozone at the island of Reunion (southern tropics).

Journal of Geophysical Research, Vol 101, n° D19, Pages 23,835-23,849, Oct. 30,1996

S. BALDY, G. ANCELLET, M. BESSAFI, A. BADR, J.D.LAN SUN LUK.

3 - Electrical penetration graphs from *Peregrinus Maidis* (ashmead) (homoptera: delphacidae) on a susceptible maize hybrid.

Entomologica Experimentalis et Applicata, 79, pages 131-139, 1996

C. BUDUCA, B. RAYNAUD, J.D.LAN SUN LUK, F. MOLINARO.

4 - Time domain analysis of electromagnetic wave propagation in stratified media

Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Vol. 10, No 6, 747-756, 1996

M. MAMODE & J.D. LAN SUN LUK.

5 - L'utilisation des algorithmes génétiques pour l'identification de profils hydriques de sol à partir de courbes réflectométriques."

Compte Rendu de l'Académie des Sciences, Série II, Sciences de la terre et des planètes, Vol 327,N° 9, p. 607-610, 1998

P. TODOROFF, R. LORION, J.D. LAN SUN LUK



6 - Modelling of evaporation and crystallisation processes in sugar cane industry

*Part 1 : A new approach using neural networks*

International Sugar Journal, Vol 101, N° 1208, Août 99

M. BENNE, B. GRONDIN-PEREZ, D. LAN SUN LUK, J.P. CHABRIAT

7 - Modeling of evaporation and crystallisation processes in sugar cane industry

*Part 2 : Structure and performance of the models*

M. BENNE, B. GRONDIN-PEREZ, D. LAN SUN LUK, J.P. CHABRIAT

*Accepté par International Sugar Journal – publication prévue Septembre 99*

8 - Calculation of soil water content profile from experimental TDR signal trace.

P. TODOROFF, J. D. LAN SUN LUK

*soumis à Water Resources Research Juin 99*

9 – Thermal diffusivity and heat losses identification. An application of real coded genetic algorithm..

R. LORION, J.P. CHABRIAT, J. D. LAN SUN LUK, M. BESSAFI

*soumis à Journal of Heat Mass and Transfer, Sept 99*

Articles congrès à comité de lecture

1- Enhancement performance of rectifier system for wireless power transmission

WPT'95, Kobe, Japan, Oct 95.

J.D. LAN SUN LUK, A. CELESTE, J. P. CHABRIAT, B. GRONDIN, G. PIGNOLET

2- Demonstrating SPS technologies on earth: SPS-IdR studies in Reunion Island

Wireless Power Transmission, WPT'95, Kobe, Japan, Oct 95.

G. PIGNOLET, N. KAYA, J.D. LAN SUN LUK, Y. NARUO, V. VANKE

3 - Results of Grand-Bassin case study in Reunion island: operation design for a 10 kw microwave beam energy transportation system.

47th International Astronautical Congress, IAF\_96\_R.2.08, oct 7-11, 1996, Beijing, China.

G. PIGNOLET, J. HAWKINS, N. KAYA, J. D LAN SUN LUK, F. LEFEVRE, V. LOMAN, Y. NARUO, F. VALETTE, V. VANKE

4 - The Grand-Bassin Case Study: Technical Aspects

SPS'97, Wireless Power Transmission, Août 97, Canada

A. CELESTE, J.D. LAN SUN LUK, J.P. CHABRIAT, P. ROMANACCE, G. PIGNOLET.

5 - Electrical penetration graphs from *Cicadulina mbila* on a susceptible maize hybrid and the fine structure of its stylet pathways.

9 th international Auchenorrhyncha congress, 17-21 fev 1997, Sydney, Australie

REYNAUD B., LETT J.M., GRANIER M., MOLINARO F., MARA Y., GRONDIN M., LAN SUN LUK J. D., PETERSCHMITT M.

6 - Point-To-Point Wireless Power Transportation in Reunion Island

48th International Astronautical Congress, IAF'97, Oct 97, Turin, Italy.

J.D. LAN SUN LUK, A. CELESTE, L. CHANE KUANG SANG, J.C. GATINA, G. PIGNOLET.

7 - Characterization of dielectric properties of stratified media by reflected wave analysis

Tenth International Conference on Antennas and Propagation, 14-17 April 1997, N° 436, Vol. 1, p. 1.483-1.485, Edinburgh, IEE 97.

M. MAMODE, J.D. LAN SUN LUK, P. TODOROFF.

8 - Contribution au calcul de profil hydrique à partir d'une mesure de propagation d'onde dans le sol par réflectométrie temporelle.

Actes du congrès international de l'ARTAS<sup>35</sup>/AFCAS<sup>36</sup>, pp. 383-393, 1997, La Réunion

P. TODOROFF, M. MAMODE, J.P. LUC, J. D. LAN SUN LUK

---

<sup>35</sup> Association Réunionnaise pour le développement de la Technologie Agricole et Sucrière

<sup>36</sup> Association Française de la CAnne à Sucre

9 - Nouvelles technologies de modélisation appliquées au milieu industriel.  
Actes du congrès international de l'ARTAS/AFCAS, pp. 37-53, 1997, La Réunion  
M. BENNE, R. LORION, B. GRONDIN-PEREZ, J.D. LAN-SUN-LUK

10 - Mise en œuvre de capteurs logiciels à l'usine de Bois-Rouge: application à l'estimation en ligne de la sursaturation  
Actes du congrès international de l'ARTAS/AFCAS, pp. 92-102, 1997, La Réunion  
P. LAURET, C. BERNARD, J-D. LAN SUN LUK, J-P. CHABRIAT

11 - Soil water profiles calculation with time domain reflectometry from reflected signal traces.  
16<sup>ième</sup> Congrès mondial de Science du sol, AISS'98, Montpellier Août 98  
P. TODOROFF, P. LANGELLIER, F. MARAUX, P. REVOL, J.D. LAN SUN LUK

12 - Les algorithmes génétiques pour l'identification de la diffusivité thermique. Application à des mesures bruitées.  
Proceedings of Mediterranean Conference on Electronic and Automatic 98, 1998, pp 179-182, MCEA 98, Maroc, Sept. 98  
R. LORION, M. BENNE, J.P. CHABRIAT, J.D. LAN SUN LUK

13 - Neural networks models of evaporation and crystallisation processes in sugarcane industry.  
Actes du XXIII congrès international de l'I.S.S.C.T.<sup>37</sup>, 1999, New-Delhi  
M. BENNE, B. GRONDIN-PEREZ, J.D. LAN SUN LUK, J.P. CHABRIAT

Journées d'études ou conférences sans comité de lecture

1 - Etude de cas: maquette démonstrative de la maison de la forêt.  
Journée Internationales de Transmission Sans Fil à l'île de la Réunion, Déc 1994.  
J.D. LAN SUN LUK, J.P. CHABRIAT, P. ROMANACCE, H. BOYER.

2 - Le dispositif d'émission d'ondes hyperfréquences dans l'étude de cas de Grand Bassin de La Réunion.

Journée d'étude SPS-IdR'96, Nov 96, Réunion

A. CELESTE, J. D. LAN SUN LUK, R. LORION

3 - Le dispositif de réception d'ondes hyperfréquences dans l'étude de cas de Grand Bassin de La Réunion

Journée d'étude SPS-IdR'96, Nov 96, Réunion

J. D. LAN SUN LUK, A. CELESTE, M. BENNE

4 - Analyse du signal TDR dans un milieu multicouche. Application à la détermination de profils hydriques.

Journées d'études sur la mesure des profils de teneur en eau dans les sols à partir de sondes TDR. Montpellier, Nov. 96.

P.TODOROFF, J.D. LAN SUN LUK.

5 - The Grand-Bassin Case Study: A Step In Sustainable Development.

International Space University, May 97, Strasbourg.

A. CELESTE, J.D. LAN SUN LUK, Ph. ROMANACCE, J.P. CHABRIAT, G. PIGNOLET.

6- Les activités de TESH à l'université de La Réunion sur l'étude de cas de Grand-Bassin.

International Strategic Meeting on Space Solar Power, CNES, Paris 23 Mars 1999.

P. HERVE, J. D. LAN SUN LUK

## **Copie des publications les plus significatives**

**1** - Design of a low-cost Rectenna for a low-power SPS-2000/WPT demonstration model.

The Institute of Space and Astronautical Science Research note, N° ISAS RN 573, May 1995

G. PIGNOLET et J.D.LAN SUN LUK.

**2** - Observations of the vertical distribution of tropospheric ozone at the island of Reunion (southern tropics).

Journal of Geophysical Research, Vol 101, n° D19, Pages 23,835-23,849, Oct. 30, 1996

S. BALDY, G. ANCELLET, M. BESSAFI, A. BADR, J.D.LAN SUN LUK.

**3** - Electrical penetration graphs from *Peregrinus Maidis* (ashmead) (homoptera: delphacidae) on a susceptible maize hybrid.

Entomologica Experimentalis et Applicata, 79, pages 131-139, 1996

C. BUDUCA, B. RAYNAUD, J.D.LAN SUN LUK, F. MOLINARO.

**4** - Time domain analysis of electromagnetic wave propagation in stratified media

Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Vol. 10, No 6, 747-756, 1996

M. MAMODE & J.D. LAN SUN LUK.

**5** - L'utilisation des algorithmes génétiques pour l'identification de profils

hydriques de sol à partir de courbes réflectométriques."

Compte Rendu de l'Académie des Sciences, Sciences de la terre et des planètes, 327, 607-610, 1998

P. TODOROFF, R. LORION, J.D. LAN SUN LUK

THE INSTITUTE OF SPACE AND ASTRONAUTICAL SCIENCE  
YOSHINODAI, SAGAMIHARA, KANAGAWA 229

ISAS RESEARCH NOTE

ISAS RN 573

DESIGN OF A LOW-COST RECTENNA  
for a low-power SPS-2000/WPT demonstration model

G. Pigolet<sup>1</sup>, J.D. Lan Sun Luk<sup>2</sup>

July 1995

1. CNES French Space Agency, 2 place Maurice Quentin, 75001 Paris, France /  
Space Power Laboratory, ISAS, 3-1-1, Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 229, Japan
2. Industrial Engineering Laboratory, University of Réunion,  
BP 7151, 97715 Saint Denis Messag Cedex 9, France

**DESIGN OF A LOW-COST RECTENNA**  
**for a low-power SPS-2000/WPT demonstration model**

G. Pignolet

*CNES French Space Agency,  
2 place Maurice Quentin, 75001 Paris, France  
Space Power Laboratory, ISAS,  
3-1-1, Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 229, Japan*

J.D. Lan Sun Luk

*Industrial Engineering Laboratory,  
University of Réunion, BP 7151,  
97715 Saint Denis Messag Cedex 9, France*

**Abstract**

This paper reports on the functional demonstration model of the SPS-2000 system and on the rectenna system which were designed at the Space Power Laboratory of ISAS in 1994. There was a twin combined objective to present to the general public a table demonstration of the complete system and while doing this to contribute to the education of graduate students. The system featured all the steps of power transmission, from simulation of Sun light to end use applications. Low cost was a design constraint for the model, and after some component selection and preliminary experiments, the 1SS97 standard commercial Schottky diode made by NEC was found suitable for the purpose. An original "H"-shaped rectenna device was designed to meet the specific conditions of low power density, and to increase the efficiency of conversion. Four arrays with 24 rectennas each were used to power a-micro-turbo-pump, a small fan, and a 28-LED light system, using a total power of 120 mW. The system was first demonstrated on the 30 July 1994 in Sagamihara at ISAS Open House, and later it was continuously operated in a science museum in Réunion Island from December 1994 till the end of May 1995. Additional measurements were made to characterise the rectenna system, and recommendations were made to improve the designs for future low cost demonstration projects.

## 1. The Functional SPS Demonstration Model

The goal of the functional model was to demonstrate the operation of the SPS-2000 energy system. In turn, the SPS-2000 system itself is intended to be a functional demonstrator of the larger Solar Power Systems which could alleviate the global energy problems expected in the 21st century by tapping energy from Space.

The most abundant and sustainable source of energy for Mankind is the Sun itself. Solar energy is difficult to use directly on Earth, because of its low density, and its lack of regularity due to weather condition and day/night cycles. To avoid these problems, a solution would be to collect solar energy in orbit and to transmit it to the surface of the Earth with a controlled microwave beam.

Electromagnetic waves carry energy from a transmitter to a receiver. Most of the civilian and military technical applications use microwaves at low average levels of transmitted and received power and are mostly concerned with modulation signals, either for detection and analysis of a reflected energy impulse (radar, remote sensing) or for the communication of information on a carrier frequency ( ground or space communication networks, especially with mobiles ).

High levels of energy can also be projected and received. A common household application is the microwave oven, but there are also many microwave heating systems for the industry. There are millions of ovens operating around the planet at the frequency of 2,45 GHz, within one of the ISM wave bands specifically assigned for Industrial, Scientific and Medical uses. For this purpose low cost magnetron transmitters are available on the consumer market. In this case of microwave ovens, the received power is directly dissipated as heat.

There is a possibility of reconversion of microwave energy to electricity for use of the microwave receiver as a secondary source of power. This is done in systems that combine microwave antennas and rectifying devices and which are known as "rectennas". In Russia, electron beam conversion devices have also been considered.

Wireless Power Transmission (WPT) systems by microwaves have been envisioned for energy transportation from Solar Power Satellites to the surface of the Earth, but also from point to point on the Earth itself, or between the ground and high altitude platforms. WPT uses the same frequencies as the ISM band, at 2.45 GHz, or 5.8 GHz and some higher frequencies. The 2.45 GHz frequency is often preferred because transmission losses due to the atmosphere or climatic conditions are negligible, even in case of snow or heavy rains. At the present time (1995), there are still no such systems in practical use, but research projects have been conducted for many years to investigate possible applications in the United States [1] [2], in Japan [3], in the former Soviet Union [4], and in France and Europe [5].



In Japan, the SPS-2000 concept has been conceived as a means to investigate system-level technologies for the development of SPS. With a limited amount of power and limited possibilities, but also a limited cost with respect to the proposed geostationary SPS systems, SPS-2000 could provide a test-bed for utility companies in equatorial regions, and practical applications have been identified, for public lighting and household energy as well as for water or refrigeration management systems.

In order to convey a better understanding of the total system to students as well as the general public, a small demonstration model has been built (Diagram Nr. 1 and Picture Nr. 1) and actually operated, featuring the whole chain of energy transmission, from simulated sun light radiation to solar cell generation of electricity, conversion to microwave, transmission by a high gain antenna, reception and reconversion to dc current by a rectenna array, and eventually to end uses for irrigation, refrigeration and light.

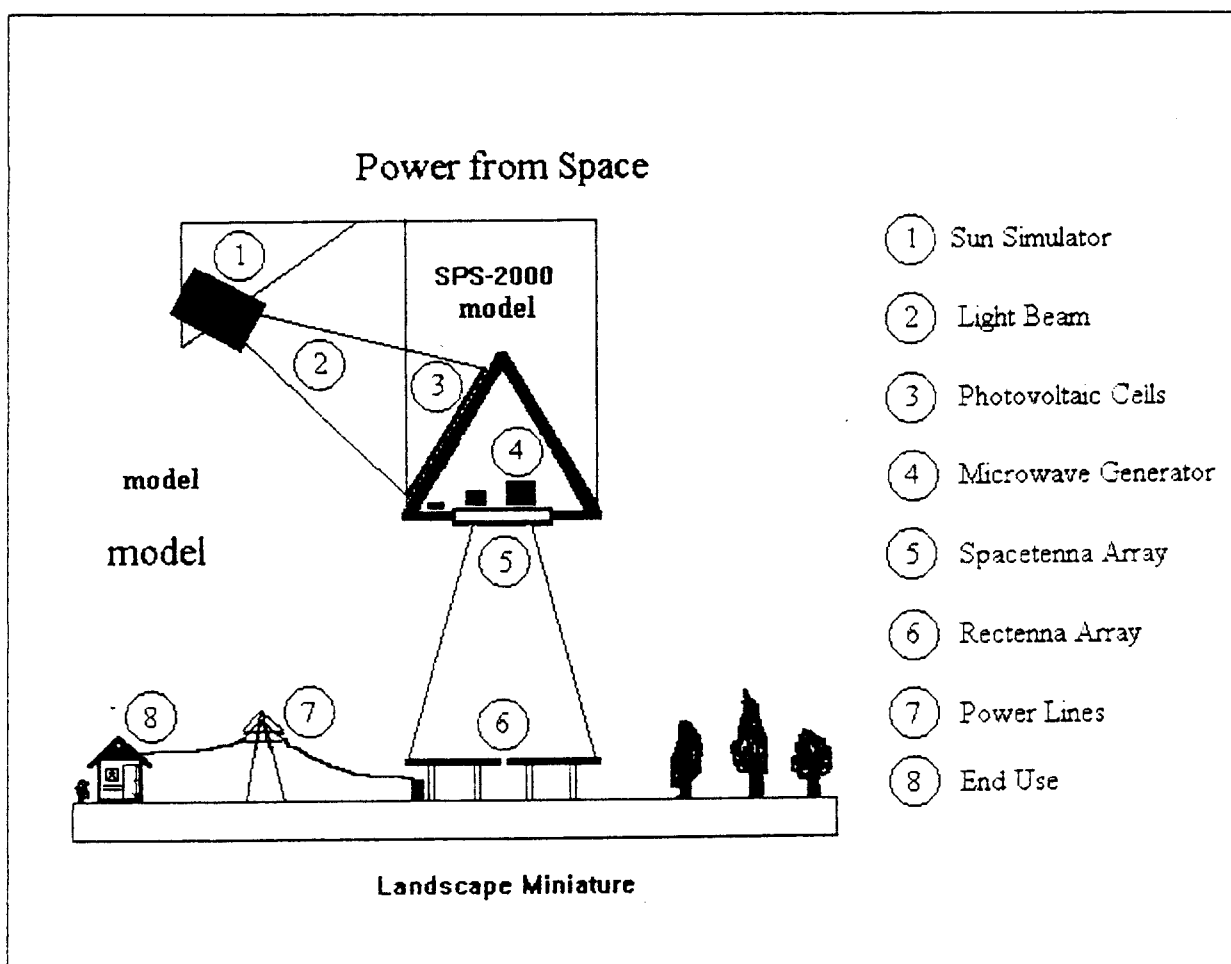
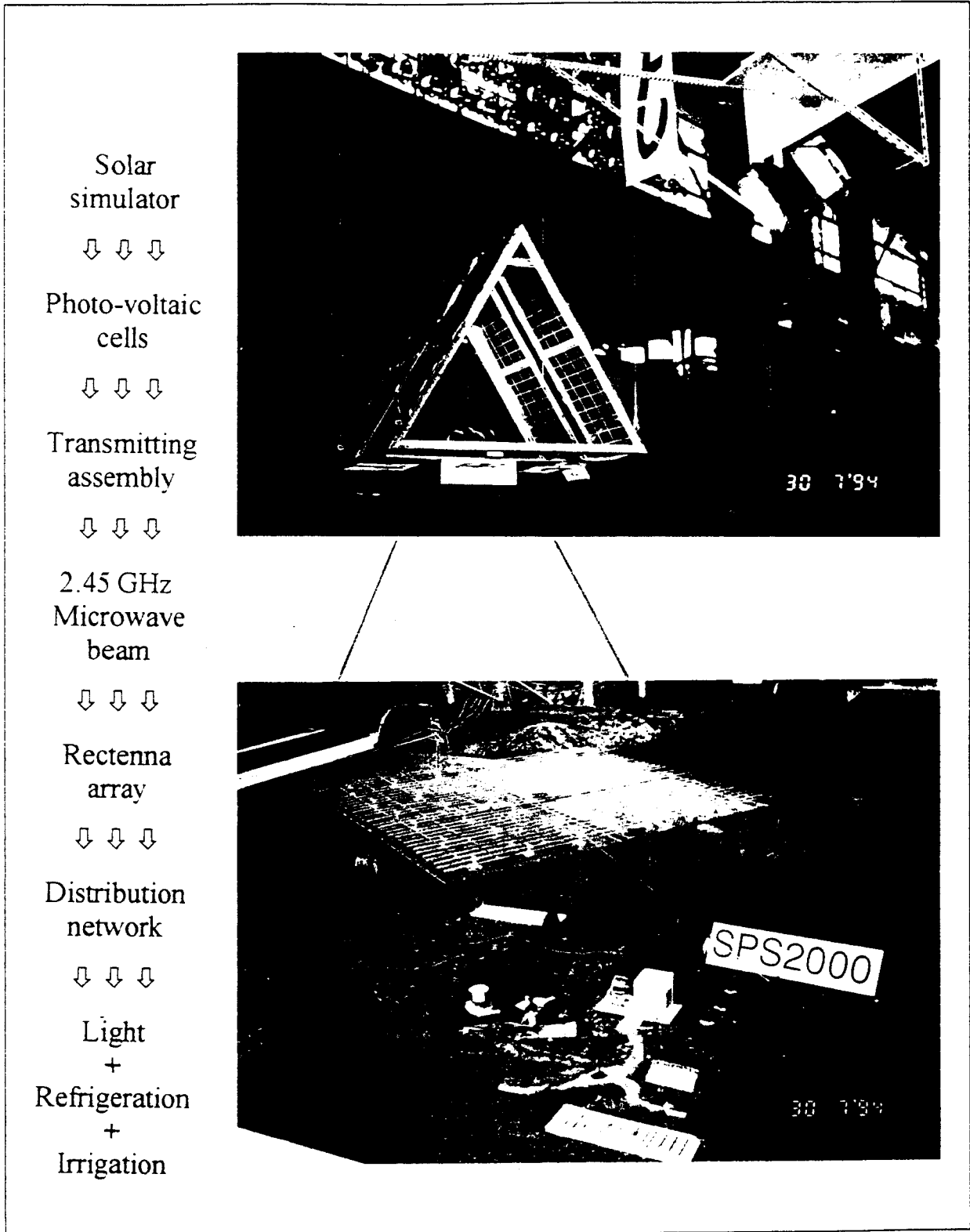


Diagram Nr. 1

System Configuration of the SPS-2000 Functional Demonstration Model



Picture Nr. 1

The SPS-2000 Functional Demonstration Model at ISAS Open House 1994

A specific rectenna (rectifying antenna) system had to be designed to meet the necessary low-cost requirement and the specific low-power density of this project intended for the general public. Three graduate students and two researchers participated in the project. Since the time was limited, and the goal was primarily to present a qualitative global system experiment, more attention was given to the engineering aspects of component and design selection rather than to detailed performance measurements.

## **2. Components and Rectenna Designs for the SPS-2000 Model**

In this case, the purpose of the team was not to carry out scientific research, but to do an engineering research work with operational time and budget constraints. The research was conducted with an organisation following the four classical steps : investigation, selection, fabrication, and integration into the global project.

Most of the designs found in the literature were too complex, and the required components were too expensive for the purpose of a simple, inexpensive demonstration model. Therefore the first efforts of the team were directed to the search of suitable components and simple but efficient enough rectenna designs.

### Schottky diode selection

The overall cost of the system being a key parameter, a search was made to find suitably cheap diodes, since most of the components previously used for rectennas or advertised for use at GHz frequencies were available at costs typically ranging from 3000 to 5000 yen per unit.

A search was made through catalogs, and through the reports of previous research experiments, looking for Schottky diodes. Several low-cost diodes were tested without success, using a 2.45 GHz signal generator and one of the slot antennas which had been built for the microwave transmitting section of the demonstration model. The diodes were connected to simple dipoles placed a few centimeters in front of the transmitting antenna, and output DC voltages measurements were made using simple voltage testers (both coil and electronic types were used).

The NEC 1SS97 mixer diode (Diagram Nr. 2 ), typically available at a cost of 20 yen per unit was eventually found suitable for use at 2.45 GHz. This low unit cost was very interesting, not only because it eventually allowed the construction of a rather large array at a reasonable cost, but also because during the preliminary tests, the diodes could be considered as expendable, allowing for simple and quick setups.

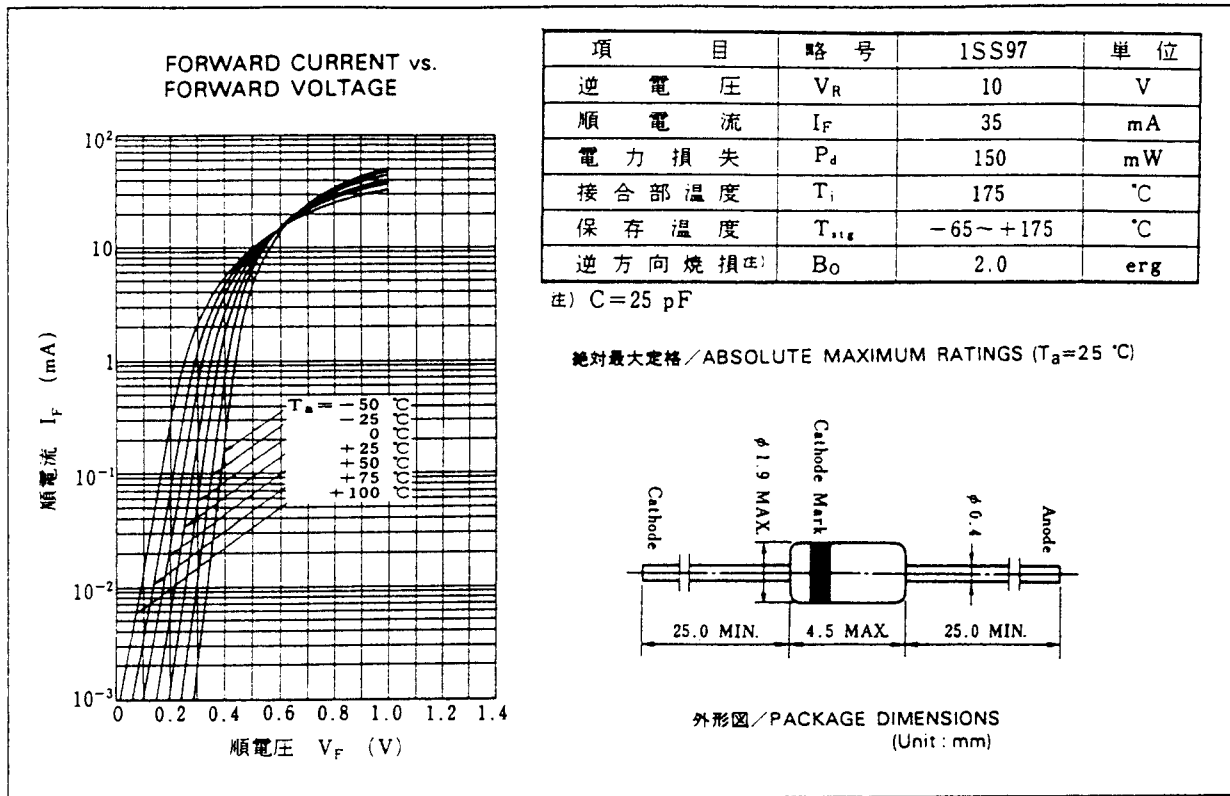


Diagram Nr. 2

General Characteristics of the 1SS97 NEC Schottky Diode

The test bench

After the diode was selected, in order to compare the different rectenna unit designs, a simple test bench was built (Diagram Nr. 3) in the environment of the student laboratory. The purpose of the tests was not to characterize the systems with a high precision, but to make operational verification tests for the specific purpose of the construction of the functional model.

The tests were made using a HP 8350 B Signal Generator, with a 83590A (2-20 GHz) plug-in unit set for CW output at 2.45 GHz. The maximum possible output power was indicated as 20 dBm (0 dBm = 1 mW) but experience showed that above 17 dBm the signal was unstable and unregulated. Therefore all the tests were made using a constant output microwave power of 17 dBm, or 50 mW. This small and safe microwave power was radiated either with the use of a specially built calibrated dipole with a measured gain of 1.5 dB or a single slot antenna of the kind that was to be used for the transmitting array, with a measured gain of approximately 2.5 dB.

The rectenna prototypes were placed on a sliding support, on a graduated bench made of microwave-transparent polystyrene, and tested at various distances from the transmitting antenna (Picture Nr. 2). The measurements were taken on the dc output using a milli-Amp-meter in series and a Voltmeter connected across a resistive load.

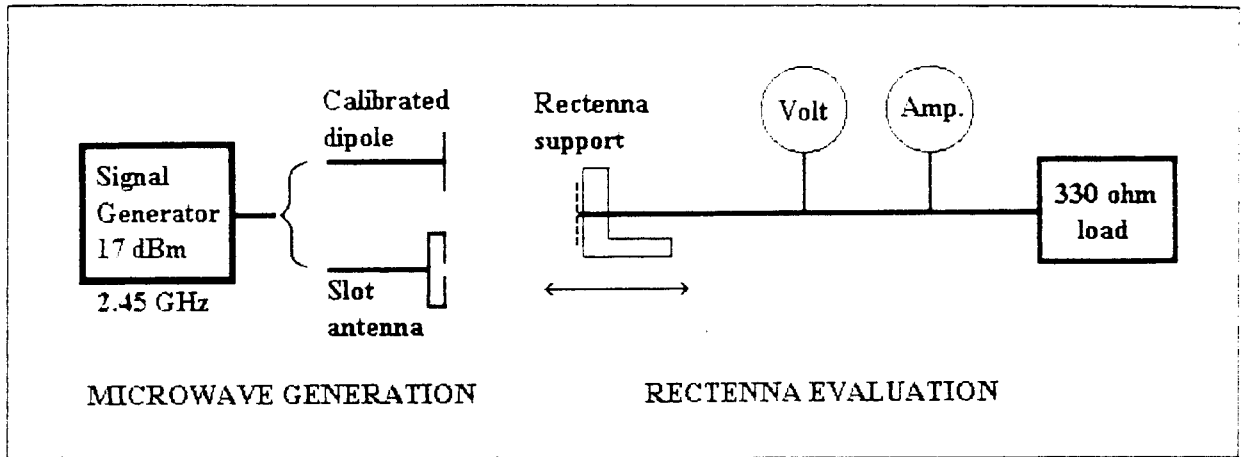
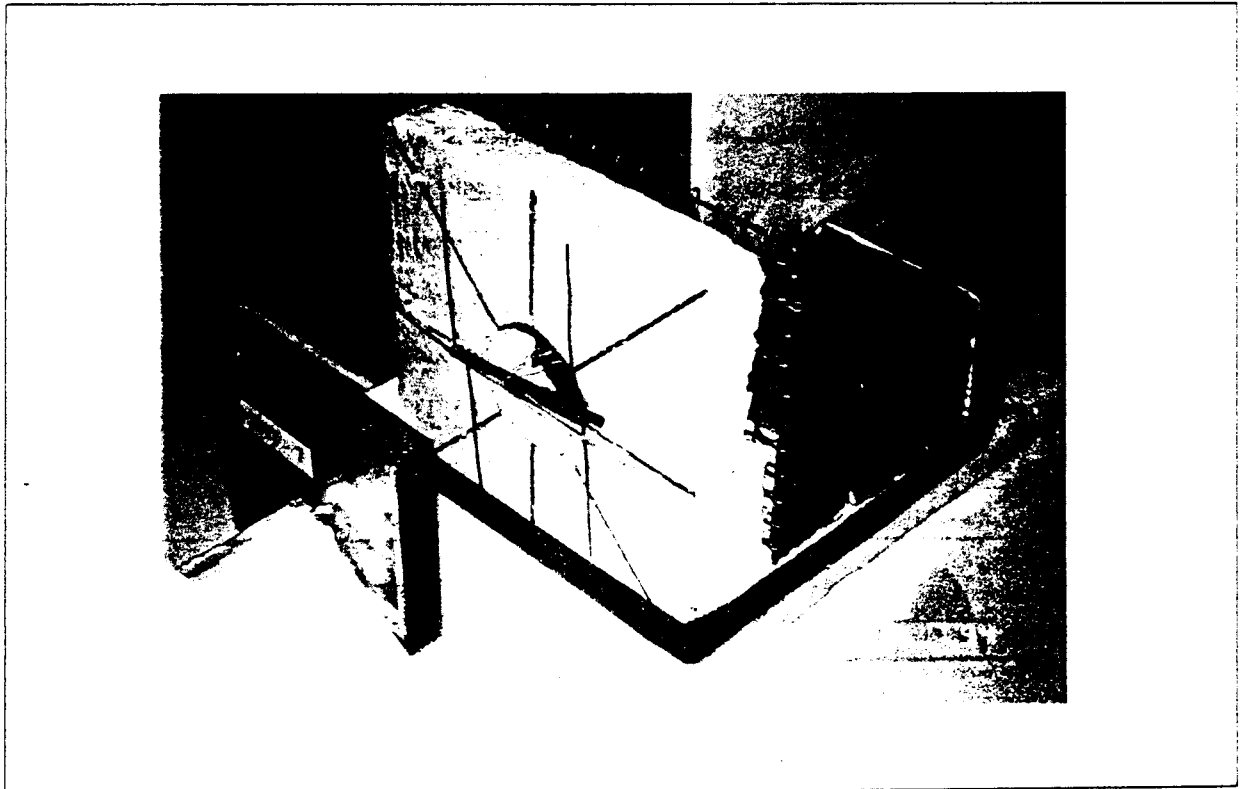


Diagram Nr. 3

Configuration of the Rectenna Operational Test Bench



Picture Nr. 2

Test Bench : the Slot Antenna Transmitter and the Sliding Support for Prototype Rectennas

The preliminary power output tests showed that the output power was not much sensitive to the load resistance over a wide range of values from about 75  $\Omega$  to about 1 k $\Omega$ . Thereafter, the comparative measurements were made using a 300  $\Omega$  resistor load. No measurement of the reactive component was made.

The test bench was located in the center of the room in an ordinary laboratory environment. Care was taken to remove most of the reflecting surfaces within a distance of about 2 meters around the bench but many small uncontrolled reflections could not be avoided. Some fluctuations due to other activities in the laboratory could be noticed during the measurements, but they were negligible with respect to other known causes of errors, such as the large size of the rectenna elements with respect to the short distance between transmitter and rectenna.

Therefore, all the measurements made with the test bench could only be considered as first order indications, not suitable for precise quantitative interpretations, but precise enough to allow a proper selection of suitable designs while keeping procedures, costs and time use to a minimum, which was the goal of the project.

#### Rectenna design tests

Tests were made at a short distance from the radiating antenna ( 15 cm ), using different rectenna shapes and configurations ( Picture Nr. 3 ) taken from the available literature : simple dipole with a single diode [2]; but also simple dipole with a 4-diode full wave bridge; loop dipole with a 2-diode full wave rectification [4]. One other shape derived from the loop antenna design, was experimentally found to give good results with a circle antenna and a 2-diode full wave output rectification. Contrary to initial expectations, the tests showed that the 4-diode bridge and the 2-diode loop designs were not performing as well as the single diode system. This was explained by the fact that the forward voltage bias of full wave rectification systems is twice as high as for a single diode ( Diagram Nr. 4 ), and in the low power conditions of the tests, this accounted for their poorer performance. The circle design performed as well or better than the single diode ( Table Nr. 1 ) but the reasons for this have not been investigated since a new rectenna design was quickly proposed to overcome the forward bias problem.

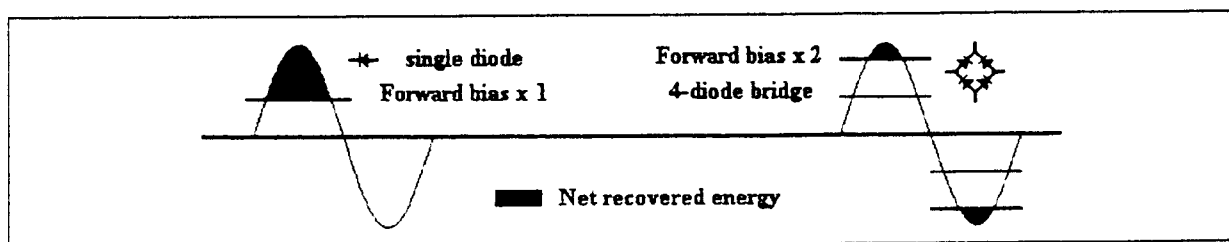
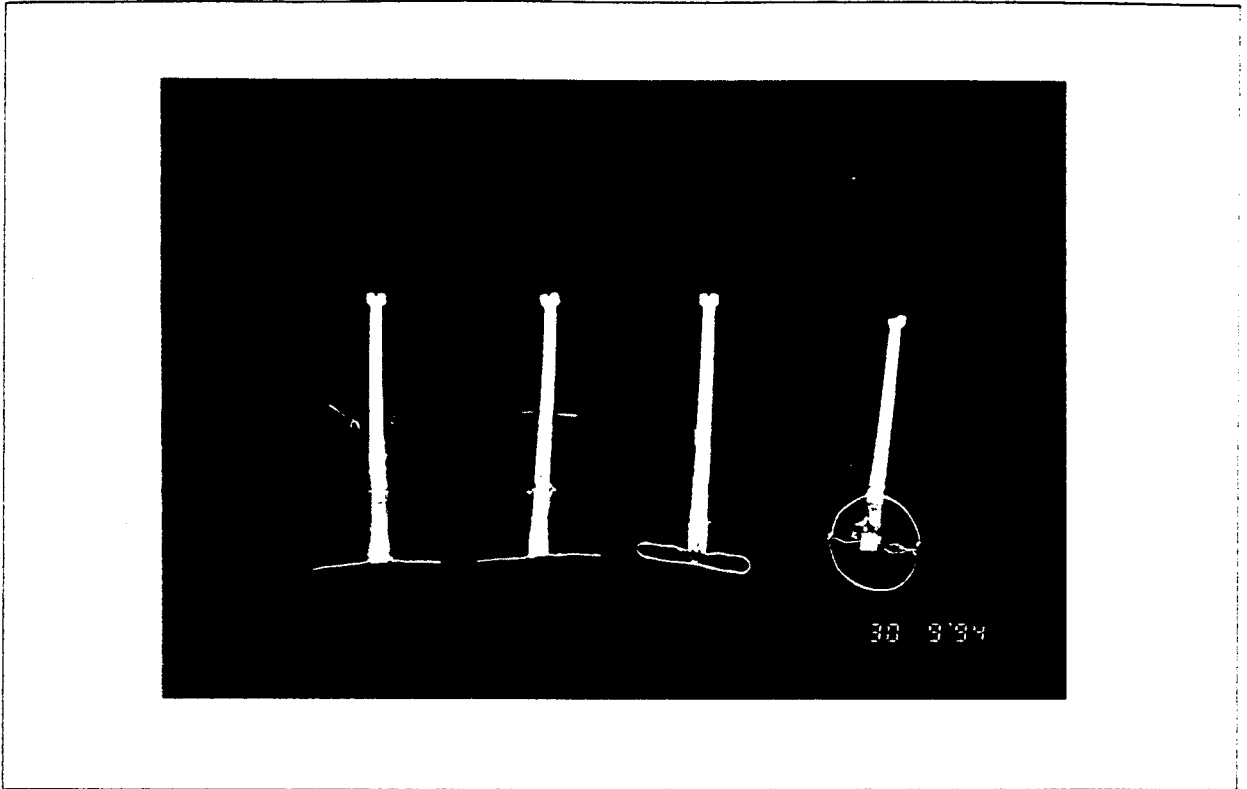


Diagram Nr. 4

Effect of Forward Voltage Bias on Performance of Rectenna



Picture Nr. 3

The 4 Rectenna Designs Selected for the Initial Tests

	Single	Bridge	Loop	Circle
V	0.15	0.07	0.1	0.2
$\mu$ A	150	60	80	180
$\mu$ W	22	4	8	36
dBm	-16	-24	-21	-15

Table Nr. 1

Low-Power Performance of Rectenna Designs for the Initial Tests

### 3. The "H" Type Rectenna Design for Low-Power Conditions

It was clear that the major problem to overcome to operate rectennas in low power conditions is the forward voltage bias of the rectifying diodes. In this specific situation, it lead to the decision to use a single diode for the demonstration rectennas, and to search for a way to increase the voltage available from the receiving antenna before rectification of the high frequency current.

### Cut-off energy threshold

Tests were made to measure the output power as a function of the distance ( Diagram Nr. 5 ), using the slot antenna as a transmitter, and a single diode, single dipole rectenna. For each distance, the diagram shows the total energy received on a calibrated dipole, as measured on the frequency spectrum analyser, and the dc power effectively available from the test rectenna after rectification. The curves show clearly the sharp drop of efficiency when the distance increases and the voltage across the diode decreases, and the eventual termination of operation of the diode. The test bench setup did not allow the direct measurement of the high-frequency voltages on the dipole, but it was interpreted that the cut-off occurred when the r-f voltage dropped below the forward bias voltage of the diode.

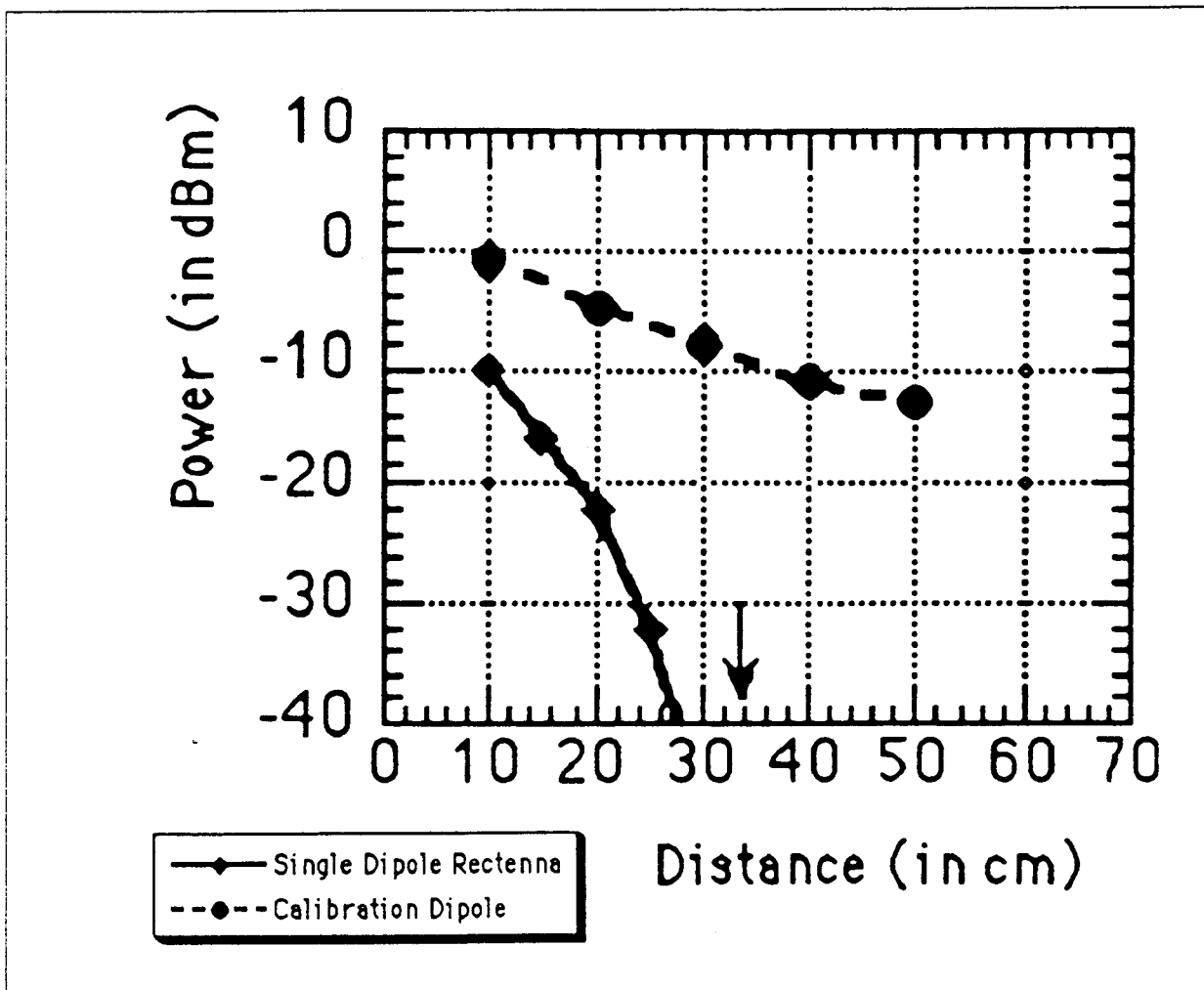


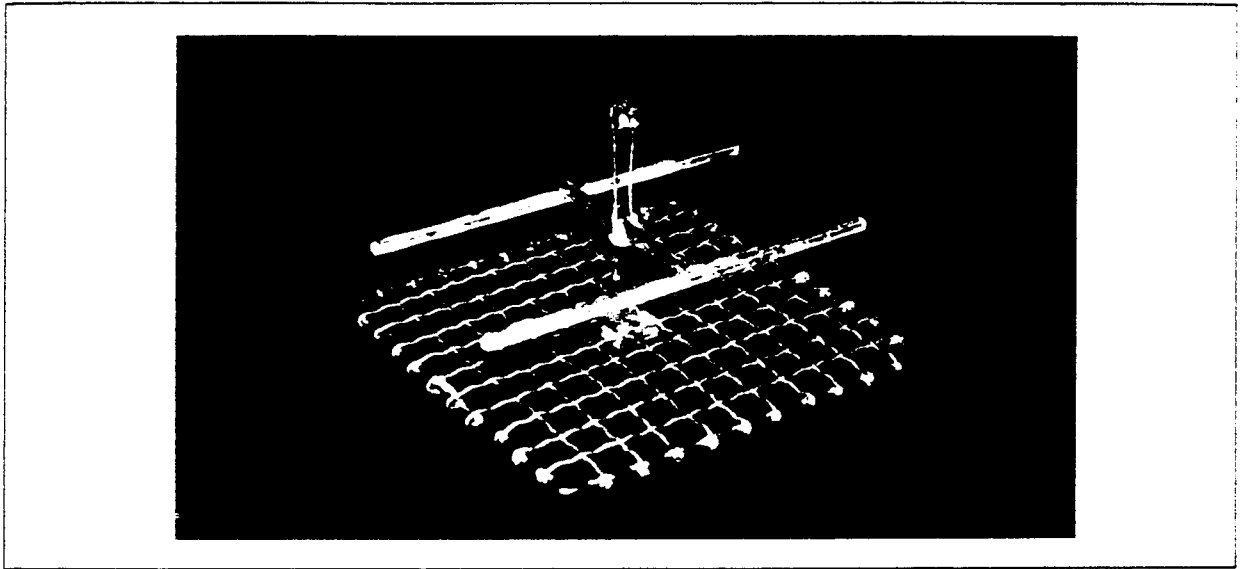
Diagram Nr. 5

Cut-off Threshold of Single Dipole Rectenna



The "H" type design

To increase the voltage available across the diode, a double dipole configuration with a "H" shaped design ( Picture Nr. 4, Diagram Nr. 6 ), associated with a single common diode was found to be much more effective than the single dipole design ( Diagram Nr. 7 ). A similar design is often used in TV broadcasting arrays [6], but it did not appear from the literature that the design had previously been used for rectenna application.



Picture Nr. 4

The "H"-type Rectenna Design, with Grid Reflector

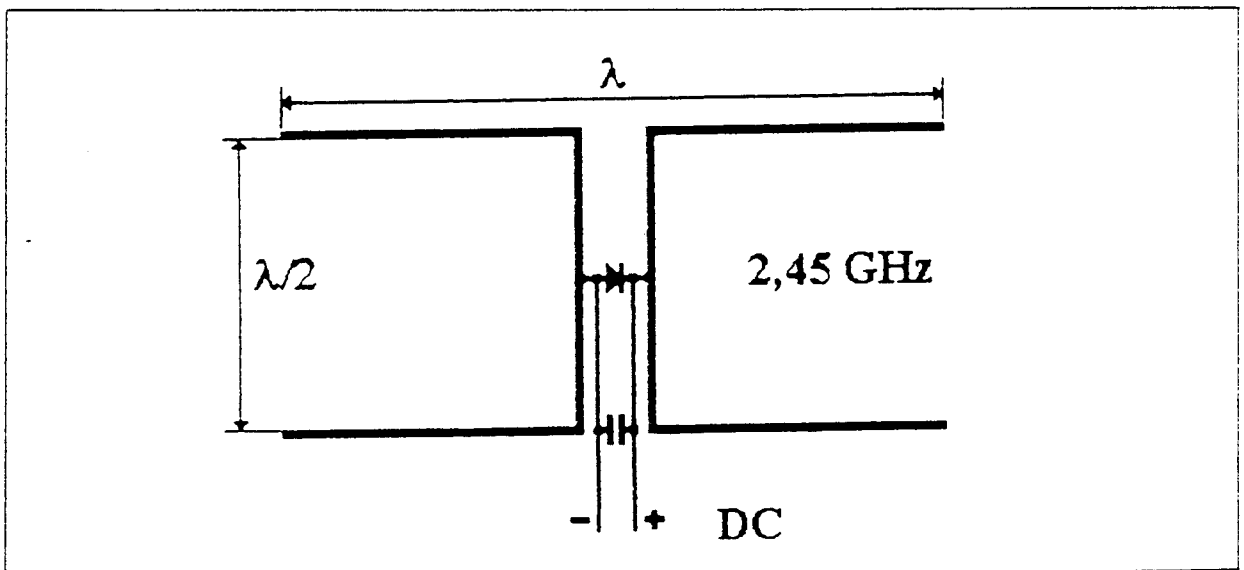


Diagram Nr. 6

Schematic Design of the "H" Type Rectenna

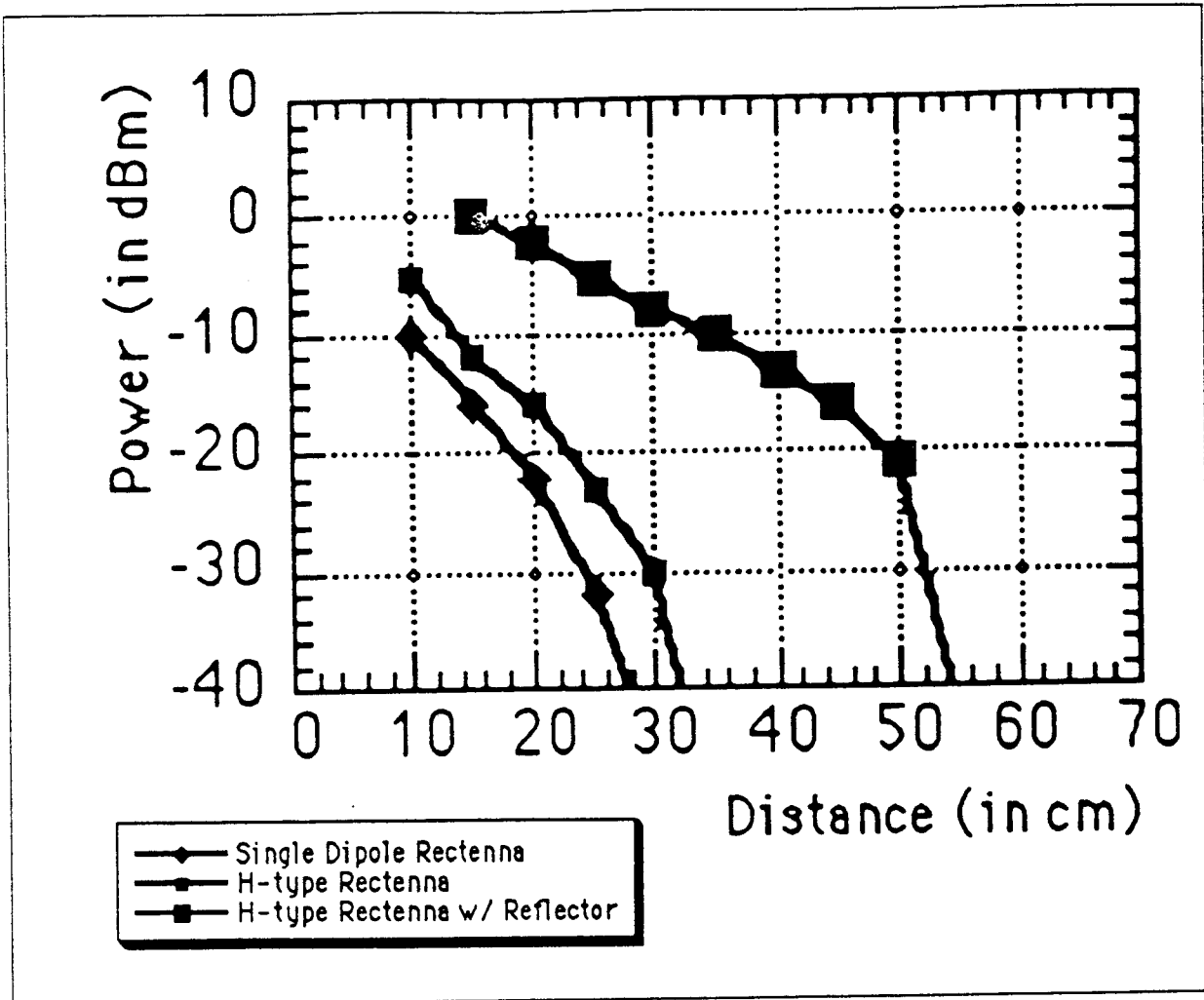


Diagram Nr. 7

Performance Comparison of Single Dipole and "H" type Rectenna

Rectenna material

Tests were made using rectennas made of common copper wire with a 1.2 mm diameter and with silver coated copper wire of the same diameter, with was expected to give better performances at microwave frequencies. The tests have proved contrary to this. The voltages observed were similar with the two kinds of material, but the currents obtained have been consistently about 30% lower with silver coated rectennas than with plain copper rectennas. This difference has not been explained nor further investigated, and the plain copper was selected for the construction of the rectennas.

### Reflectors

The "H" type rectenna offered about a 6 dB improvement over the single dipole rectenna when tested without reflector. By placing wire-mesh reflectors at a distance of  $1/4 \lambda$  behind the rectennas, significantly better results could be achieved, and especially the distance to cut-off point was almost doubled ( Diagram Nr. 7 ). The reflectors were made from commercial household wire-mesh material with a 5 mm pitch.

### R-f termination capacitor

By placing a 20 pF capacitor at a distance of  $1/4 \lambda$  behind the diode, the rf circuit was closed. It was found experimentally that this resulted in an improved sensitivity and/or better adaptation of the system, with a 5-10% increase in the performance of the rectennas. No further analysis was made at this time, and the decision was made to use the capacitor for the construction of the model.

### Rectenna arrays

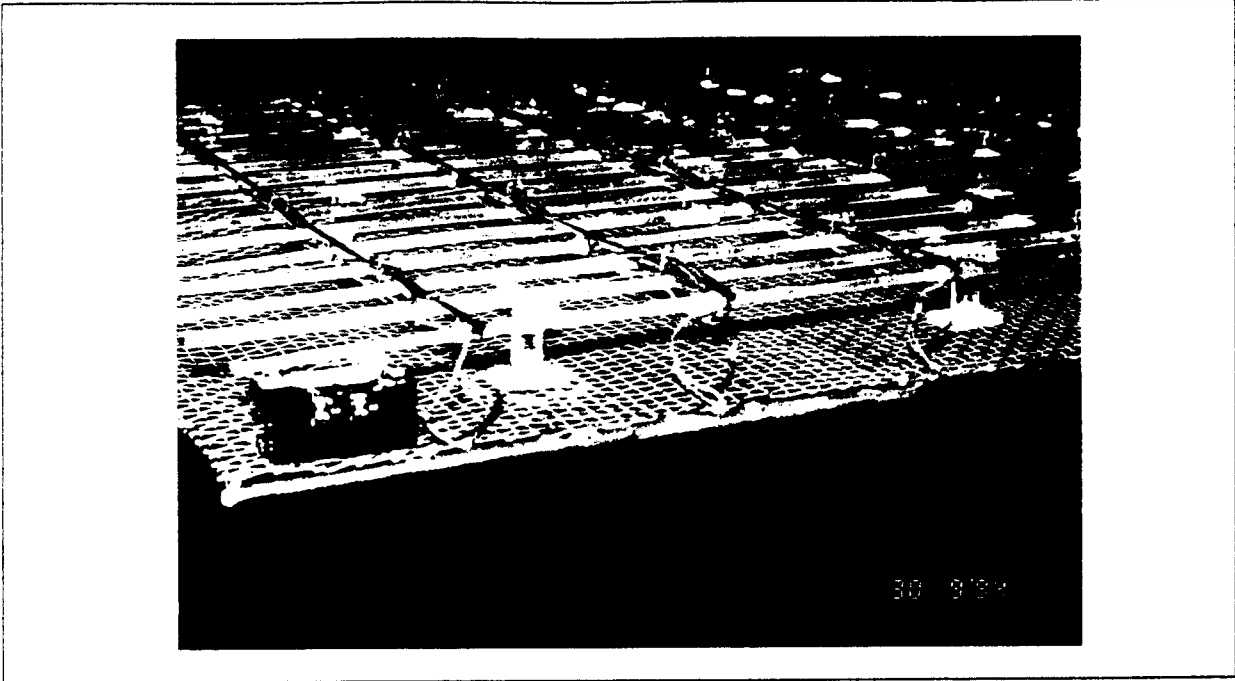
After the preliminary rectenna selection tests were completed, the "H" - type rectennas were retained for the construction of the reception arrays, because of their better performances, but also in reason of the great simplicity of their fabrication.

Assembly jigs were prepared to cut easily the copper wires to proper length, to bend them properly into the proper "H" shape, and to position properly the diode before soldering. 96 elements were prepared for the demonstration model, and 20 additional elements were made for single rectenna demonstration units.

The rectennas for the model were assembled to cover four rectangular arrays of 45 x 50 cm, with 24 elements in each array, all connected in parallel ( Picture Nr. 5 ). The base for each array was a rectangle of wire-mesh reflector, and the "H" elements were attached to a grid of plastic rods, at 3 cm ( $1/4 \lambda$ ) from the reflector.

The single units were assembled in a similar way on a grid and plastic rod support, with a red LED connected to the output for good visualisation. The single units were sensitive enough to be operated with the leak transmission of most household microwave ovens.

The performance measurements for the 24-unit arrays were made using the 1 W transmitter array of 4 slot cavity antennas from the demonstrator, at distances of 1.2 and 1.3 m, with various resistive loads in order to determine the current and power characteristics ( Diagram Nr. 8 ). The power cut-off distance was found to be at 1.5 m away from the transmitter array.



Picture Nr. 5

A 24-Element Rectenna Array

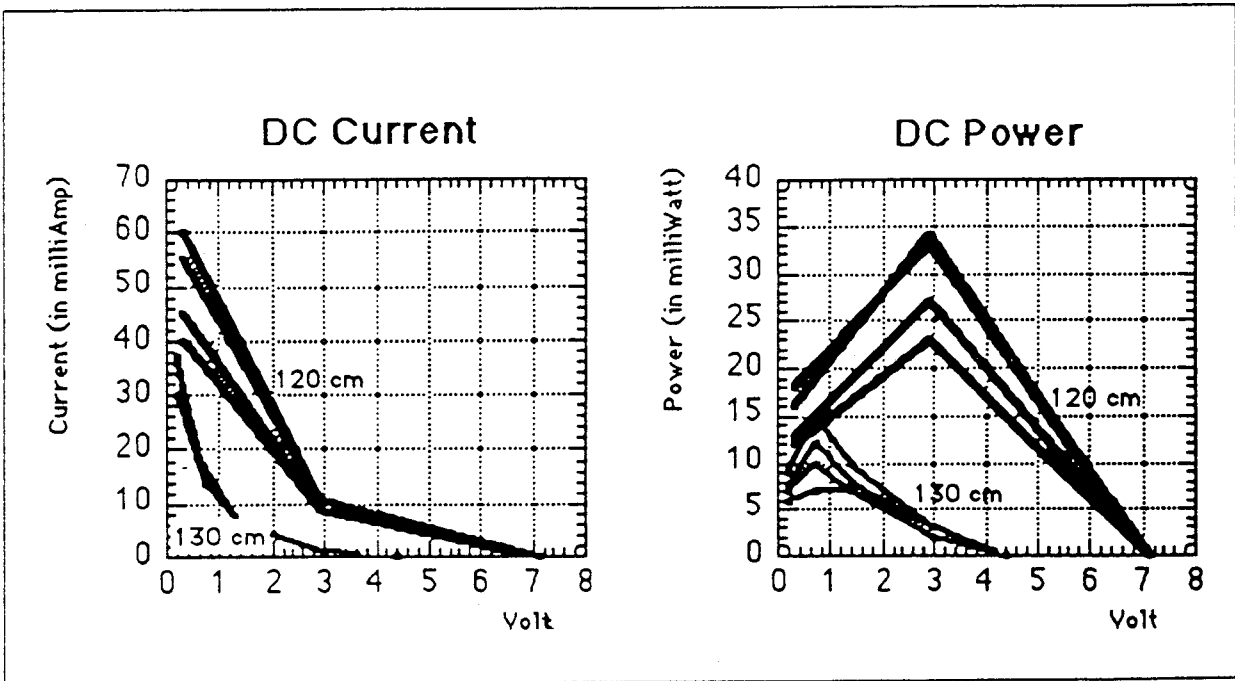


Diagram Nr. 8

DC Current and Power Characteristics of the Rectenna Arrays

### Further Characterisation of the "H" Rectenna

At a later time, further tests were made on one of the single unit elements at the University of Nice in France. It was found that the input impedance of the system was low (some  $20 \Omega$  for the real component), which causes some problems of power matching with standard load circuits ( $50$  or  $75 \Omega$ ). An impedance matching circuit is necessary to avoid parasitic re-radiation at reception.

An observation of the radiation diagram showed an attenuation of the field in the direction normal to the antenna. The mode of connection between the two elementary dipoles (in the center of the two wires) could partly explain the phenomenon. The  $30^\circ$  displacement of the main lobes could be the effect of the separation distance between the two elementary dipoles. The antenna functions best in the H plane ( $\phi = 90^\circ$ ).

With this "H" antenna, a better transmission efficiency can be achieved by tilting the receivers  $30^\circ$  with respect to the direction of the incoming radiation. The measurements of the electromagnetic field, made in a transmission mode, showed that a  $10$  dB improvement might be achieved with respect to previous data.

For the development of future low-cost demonstration models of wireless power transmission, it could be advisable to increase the intensity of the energy field available at the rectenna, in order to allow the operation of full bridge rectifiers ( Diagram Nr. 9 ).

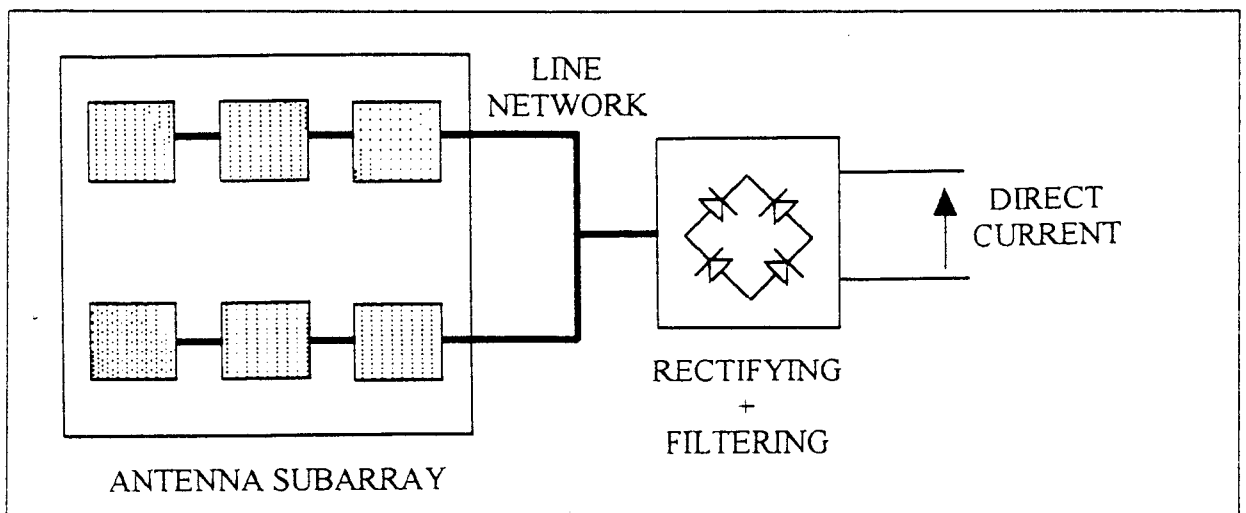


Diagram Nr. 9

Possible Improvement of Efficiency through Power Collection before Rectification

#### 4. The SPS-2000 System Model Demonstrator

The specific purpose of the demonstration was to give a functional presentation of a complete integrated system, rather than to achieve high efficiency as had been the goal of most of the previous experiments.

##### The satellite model

The satellite section of the SPS-2000 model was an equilateral triangular prism with sides of 1 m and a length of also 1 m. It carried actual solar arrays on one side and dummy solar arrays on the other side, and a base plate with the microwave generation and transmission system.

Two 1 kW stage projectors were used to simulate sunlight and illuminate the 0.5 m<sup>2</sup> photo-voltaic array covered with flexible amorphous silicon cells, with the production of a net usable output of about 15 W.

This energy was used to power a 1 mW solid state oscillator at the frequency of 2.45 GHz and a 30 dB solid-state microwave amplifier, in order to feed 1 W of microwave power to a transmitting array of 4 slot resonating cavities. The gain of the transmitting antenna was approximately 10 dB in the direction of transmission.

##### The georama presentation

To give a spectacular and realistic aspect to the presentation, the receiving end of the system was displayed in a 2.6 x 3.2 m landscape miniature built by the students.

The four rectenna arrays were located in the center of the georama, at a distance of 1.2 m below the transmitting array, at the maximum distance compatible with the operation of the end payloads, slightly before the operating point where the performance was beginning to decrease sharply because of the proximity of the cut-off point.

The four arrays were assembled to form three independant circuits connected to the different loads by miniature power lines : array A was connected to the rotary water pump motor actuating the irrigation section; array B was connected to the motor of the fan of the refrigeration section; arrays C and D were connected in series, to feed 28 small red LED, connected in parallel, featuring a light system for a house and public roads ( Picture Nr 6 ).

The two electrical motors were low voltage, low power motors (Solar Tech, type H-158), specially designed for use with solar panels, rated to operate with voltages ranging from 0.4 V to 1.5 V and with currents ranging from 16 to 40 mA.

The pump was representative of water management systems, and the fan was representative of refrigeration systems. Both kinds of systems are especially interesting for SPS-2000 applications, because they are very useful for the economy of equatorial countries, and they can easily accommodate the energy surges delivered by the SPS-2000 system with a minimal need for energy storage

The active demonstration system was first operated for the general public on Saturday 30 July 1994 during the "Open House" presentations at the Institute of Space and Astronautical Science in Sagami-hara, Japan, and more than 6 000 visitors were able to see the demonstration.



Picture Nr. 6

#### End Applications of the System : Water Management, Refrigeration, Lighting

After ISAS Open House, the functional model was shipped to Réunion Island, a remote region of France and Europe located in the Indian Ocean, where it was presented at an international workshop on wireless power transportation case studies [7] on the 15 December 1994. It was displayed for schools and for the general public as the key attraction in an exhibit about past, present and future energy systems at the state agriculture and industry science museum Stella Matutina, from the 22 December 1994 until the 4 June 1995.

## 5. Educational Benefits

One hundred years after Nikolai Tesla's visions of wireless power transmission, almost 30 years after William Brown's historical microwave helicopter experiment and after Peter Glaser's first presented the innovative concept of Solar Power Satellites to answer mankind's energy needs in the 21st century, the concept of wireless power transportation is still far from familiar for a major part of the public and for most of the decision makers, even though they may be aware of the importance of space.

The SPS-2000 active demonstration model is an important step for the recognition of the innovative potential of such programs as point-to-point wireless power transmission on Earth, energy supply to high-altitude, long-endurance aircraft, and space energy programs such as SPS-2000, Solar Power Relays and Solar Power Satellites. A case study for a point-to-point system is now under consideration in Réunion Island [8], and the public exhibition of the functional demonstration model has been very helpful to convey the basic understanding of wireless power transportation to the various partners of the study

Even more important for the long term may be the educational aspects of the functional demonstration model, from the point of view of the students who have worked to build it. It has been long recognized that hands-on, practical activities are essential to gain new understanding. The "H" type low-power, low-cost rectennas have allowed such realizations to be made effectively with limited educational budgets and within a limited time.

The students had to work not only with theory, but also with a real system, real choices, and delivery constraints on a real and original engineering research project, not a textbook one. They had to consider various technology fields, and to invent fabrication methods. They had to experience team work and to write conceptual reports. They had to coordinate their work with the work of other teams.

Because of the difficulties encountered while working at marginal operating conditions near the operating cut-off point of the rectennas, the students had an experimental opportunity to understand readily many of the fundamental aspects of rectenna and rectenna array design for microwave power reception [9] [10].



## 6. Acknowledgments

The authors would like to give their special acknowledgments to Mr. M. Tanaka whose understanding beyond any barriers of language or culture has been essential to the success of this endeavor. They would like to recognize the enthusiasm and the competence of Mr. K. Hajjima, and Mr. A. Nakagawa, and also of Mr. N. Komine, Ms. Y. Sekimoto and Mr. M. Kurosawa, all the students who shared this experience of conducting the experiments and constructing the rectennas and the SPS-2000 model. It should be known that beyond all scientific and technological aspects, their additional mastery in artwork has been a definite key to the success of the presentations.

The authors would like to express their gratitude to Dr. Y. Naruo and Dr. S. Sasaki who coached the development work, and to Prof. M. Nagatomo, Director of the Space Power Department at ISAS, who made this research possible in the first place. They would like also to thank Prof. T. Takano of ISAS, Dr. N. Kaya of the University of Kobe, Dr. K. Itoh and Dr. M. Ohmiya of the University of Hokkaido, Dr. J.P. Chabriat of the University of Réunion, Prof. V. Vanke of Moscow State University, and Mr. M. Zirnheld of ANSTJ, Paris, for their occasional good advice which were very instrumental in the progress of this particular research work.

## 7. References

- [1] Glaser, P. "The Window of Opportunity for Wireless Power Transmission", A.D. Little, Inc., Earth Space Review, Vol.3 Nr.3, pp.9-15, July-Sept. 1994
- [2] Brown, W., Microwave Power Transmission Systems, and Schupp, B., Raytheon, "A Transportronics Solution to the Problem of Interorbital Transportation", 1993.
- [3] Nagatomo, M., Sasaki, S. and Naruo, Y. "SPS-2000 Project Concept". SPS Task Team, ISAS, 1993.
- [4] Vanke, V., "SPS Investigation in the C.I.S. and in Moscow State University", M. S. U., 1993.
- [5] Pignolet, G., Deschamps, L., Chabriat, J.P., "SPS Activities in Europe", JSME SPS Forum, 1994
- [6] Lechevallier, M., "Antennes", ESIEE Engineering School, France, 1987.
- [7] Pignolet, G., "SPS/WPT Case Studies in Réunion Island", Solar Energy Journal, 1995.
- [8] Lan Sun Luk, J.D., Chabriat, J.P., Boyer, H., Romanacce, P., "Case Studies : Forest House WPT Demonstration Model", University of Réunion, 1994.
- [9] Ito, T., Fujino, Y., Fujita, M., CRL, "Fundamental Experiment of a Rectenna Array for Microwave Power Reception", IEICE Transactions on Communications, Vol. E76-B Nr. 12, 1993.
- [10] Tanaka, M., Nakagawa, A., Hajjima, K., Nomine, N., Sekimoto, Y., Kurosawa, M., Pignolet, G., Naruo, Y., "Construction of a Functional Model of SPS-2000 and the Education of Future Engineers". ISAS, 1994.

## Electrical Penetration Graphs from *Peregrinus maidis* on a susceptible maize hybrid

C. Buduca<sup>1</sup>, B. Reynaud<sup>1</sup>, D. Lan Sun Luk<sup>2</sup> & F. Molinaro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CIRAD-CA Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Département des Cultures Annuelles, 97487 Saint Denis Cedex, Ile de la Réunion, France

<sup>2</sup>Laboratoire de Physique, Université de la Réunion, 15 avenue René Cassin, 97715 Saint Denis Cedex 9, Ile de la Réunion, France

Accepted: September 1, 1995

**Key words:** *Zea mays* L. Electrical Penetration Graph, Spectral analysis, Delphacidae, maize mosaic virus, maize stripe virus

### Abstract

The feeding behavior of *Peregrinus maidis* (Ashmead) (Homoptera: Delphacidae), vector of maize mosaic virus (MMV) and maize stripe virus (MStpV) in maize (*Zea mays* L.), has been studied by Electrical Penetration Graph (EPG). The different recordings collected have allowed the temporal distinction of three EPG signal classes. These class 1, class 2 and class 3 signals are correlated through histological sections to the feeding activities of probing, xylem ingestion and phloem ingestion, respectively. Although these signals are described by various statistical parameters, only the median allows significant differentiation between class 2 and class 3 signals, the others varying from one insect to the next. On the other hand, spectral analysis is used to describe the signal classes by associating a characteristic frequency spectrum to each. This study treats the importance of such analysis in characterizing and comparing the signals of various piercing and sucking insects.

### Introduction

*Peregrinus maidis* (Ashmead, 1890) (Homoptera: Delphacidae) is found on all continents, mainly in tropical, subtropical and equatorial areas. It appears to be specific to the Poaceae family. Only species belonging to the sub-family Andropogonoideae allow for its complete development. Maize (*Zea mays* L.) is its principle host, but *P. maidis* is also known as a sorghum pest (Agarwal *et al.*, 1978). It is the only known vector of maize mosaic virus (MMV) and of maize stripe virus (MStpV), both circulative and propagative viruses (Black, 1959).

Electrical recordings of penetration activities have been used to describe fully the feeding behavior of Homopterans (McLean & Kinsey, 1964). The insect is incorporated into an electrical circuit which is completed when the insect probes into a plant. A complex signal originating from the insect is amplified and the patterns within the signal are then correlat-

ed with penetration activities. The technique has been improved over the last decade by the use of a direct current method known as the electrical penetration graph (EPG) (Tjallingii, 1985a). The EPG technique provides a more detailed description of stylet penetration activities. It has been widely used on aphids (Tjallingii, 1978a, b; 1985b; 1987; 1990; Kimmins & Tjallingii, 1985), particularly in studying plant resistance to aphids and other Homopterans (Kimmins, 1989; Montllor & Tjallingii, 1989).

Six characteristic signals describing the feeding activities of *Nilaparvata lugens* (Stål) (Homoptera: Delphacidae) in rice were identified by Kimmins in 1989. It has been observed that certain rice-attacking pests such as *Sogatella furcifera* (Horváth) (Homoptera: Delphacidae) (Khan & Saxena, 1984) and *Nephotettix virescens* (Distant) (Homoptera: Cicadellidae) (Rapusas & Heinrichs, 1990) feed little or not at all in the phloem of certain resistant genotypes. The absence of ingestion or a short time period of ingestion

in the phloem would appear to hinder transmission of rice tungro virus (RTV) by *N. virescens* (Heinrichs & Rapusas, 1984). In order to verify this phenomenon for resistance to maize viruses transmitted by *P. maidis*, it is essential to first analyse its feeding behavior.

In this study the EPG signals of *P. maidis* were rigorously characterized using temporal and spectral analysis. The sheath tracks and corresponding feeding sites were determined through histological sections. This preliminary work will set the ground for later determination of resistance mechanisms in maize genotypes to MMV and MStpV.

## Materials and methods

**Biological material and experimental design.** Adult (brachypterous females of *Peregrinus maidis* aged of 2 to 10 days following imaginal moulting) were taken from a mass rearing colony (Reynaud, 1988) kept on the temperate maize hybrid, Sabrina (France Maïs). The insects were starved for one hour before recordings. Young Sabrina plants were chosen at the 2 to 3 leaf stage, or about 8 to 10 days after sowing. A gold thread measuring  $17.5 \mu\text{m}$  in diameter and 5 cm in length was attached to the insect's prothorax with silver glue (Demetron). The set-up was identical to that used by Tjallingii (1985a). The amplifier used was an EPG giga 4 model (Wageningen Agricultural University, The Netherlands) with high input resistance ( $1\text{G}\Omega$ ). It was linked to a paper recorder (WR 7400, Graphtec) and an AT 486/25 microcomputer running Viewdac (Kheitley) software for acquiring and processing data.

**Signal characterization.** After placing the insect on the seedling, the acquisition system was triggered and the signal emitted by the insect was amplified, then sampled and converted into digital data using the DAS-16 card (Keithley Metrabyte Corporation), the format required for Viewdac processing. The sampling frequency was set at 200 hertz, high enough to characterize the entire band-width of the signal emitted by the insect and to avoid spectral folding.

Recordings of 1 to 3 h were performed with approximately twenty different insects. The signals produced during these recordings were sorted, then described according to various statistical parameters calculated by the Viewdac software. The software's Fourier transform algorithm function was used to trace the spectrum of a given digitised signal slice.

**Histology.** Upon the first signal detection for each insect placement, the leaf segment ( $5 \text{mm}^2$ ) into which the insect probed was removed. This sample was kept for 48 h in a glutaraldehyde 25% and paraformaldehyde 10% solution with a sodium phosphate 0.2 M (pH=7.2) buffer. It was next dehydrated in a series of increasingly concentrated alcohol baths, then embedded in paraffin. Ten samples were performed for each signal chosen. Classified cross sections of  $14 \mu\text{m}$  in thickness were made using a microtome (Wetzlar-Leitz), deparaffined, rehydrated, then stained using safranin-green light differential staining. This stain colours the salivary sheath and vascular bundle tracks in pink, and the parenchyma in green. Cross sections were observed under photon microscope (Zeiss).

## Results

### Electrical penetration graph

**Temporal analysis of signals.** Temporal analysis of signals emitted by *Peregrinus maidis* from different recordings revealed three signal classes (Fig. 1). For the class 2 and class 3 signals, an enlargement is given over one second (200 points) (Fig. 1c, 1d).

The class 1 signal (Fig. 1a) is characteristic of the initial piercing stage. It is preceded by one or more large peaks or drops in high amplitude potential. It is a complex signal which presents a characteristic and repetitive pattern (visible on the enlargement over 6 seconds, Fig. 1b) It consists of moderate oscillations appearing immediately after a peak. Class 1 signals are of short duration, lasting between 12 seconds and 3 min only.

The class 2 signal (Fig. 1a, 1c) is always preceded by a class 1 signal. It is periodic, with a high amplitude of between 600 mV and 1300 mV and may last up to one hour.

The class 3 signal (Fig. 1a, 1d) is generally preceded by a class 1 signal, but does at times follow a class 2 signal. It is a low amplitude signal (between 25 mV and 40 mV), lasting up to several hours.

**Statistical analysis.** Each of the twenty insects studied repeatedly produced class 2 signals (4 to 8 times over 10 min period) and class 3 signals (4 to 8 times over 10 min period). For class 2 signal, the correlation matrix of the main statistical parameters characterizing the amplitude (volts) (Table 1) reveals two representative parameters of the different correlation

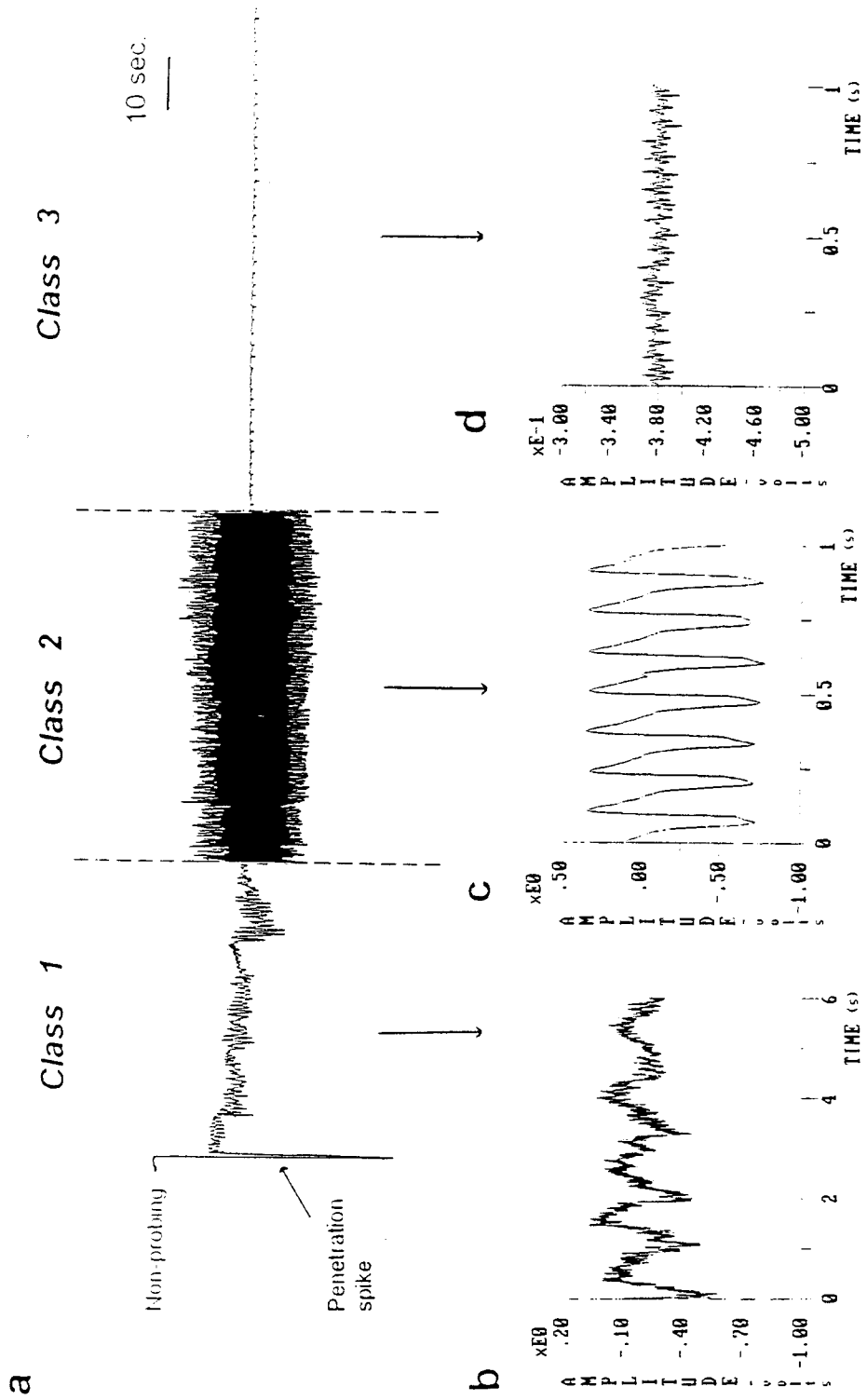


Fig. 1. The different EPG patterns during *Peregrius maidis* probing. a) mounting of the three signal classes obtained on the strip chart; b) enlargement of the characteristic and repetitive pattern of the class 1 signal over 6 seconds (obtained with Viewdac software); c) enlargement of the class 2 signal over 1 second (obtained with Viewdac software); d) enlargement of the class 3 signal over 1 second (obtained with Viewdac software).

Table 1. Correlation matrix between the main statistical parameters characterizing the amplitude (volts) of class 2 signal

Correlations	Minimum	Maximum	Mean	Median	Standard Deviation	Sum of squares	Root Mean Square
Minimum	1.0000**	-0.9196**	-0.0140	-0.5534**	-0.9382**	-0.7043**	-0.9323**
Maximum		1.0000**	0.1587	0.6068**	0.9317**	0.7276**	0.9098**
Mean			1.0000**	0.6562**	0.0817	-0.0292	-0.0216
Median				1.0000**	0.6710**	0.4634**	0.6097**
Standard Deviation					1.0000**	0.7281**	0.9913**
Sum of Squares						1.0000**	0.7365**
Root Mean Square							1.0000**

1-tailed signif: \* 0.01 \*\* 0.001

Table 2. Correlation matrix between the main statistical parameters characterizing the amplitude (volts) of class 3 signal

Correlations	Minimum	Maximum	Mean	Median	Standard Deviation	Sum of squares	Root Mean Square
Minimum	1.0000**	0.6284**	0.9259**	0.9250**	-0.5133**	-0.6755**	-0.9349**
Maximum		1.0000**	0.8583**	0.8580**	0.2339	-0.5012**	-0.8456**
Mean			1.0000**	0.9999**	-0.2097	-0.6771**	-0.9993**
Median				1.0000**	-0.2106	-0.6775**	-0.9992**
Standard Deviation					1.0000**	0.3079**	0.2419
Sum of Squares						1.0000**	0.6791**
Root Mean Square							1.0000**

1-tailed signif: \* 0.01 \*\* 0.001

groups: mean and median (of volts). Since analysis of variance was not possible (probability of Cochran's test  $\leq 0.0001$ ), Kruskal-Wallis tests were performed and revealed one highly significant insect effect for these two parameters, whereas no repetition effect was observed. For class 3 signal, three representative non-correlated parameters were retained (Table 2): sum of squares, standard deviation and root mean square. As for the class 2 signal, Kruskal-Wallis tests revealed one highly significant insect effect for these three parameters, with no repetition effect. The application of a non-parametric rank-sum test on the median values significantly differentiated the class 2 signal from the class 3 signal ( $P \leq 0.0001$  for 1-tailed and 2-tailed tests).

*Spectral analysis.* This analysis was performed on ten signals from each of the three classes. The continuous components were subtracted and the spectra were obtained using the Fourier frequency transformation (FFT). Then the auto power spectra (APS) were computed. The 50 hertz component observed on most of the spectra obtained is an interference frequency originating in the mains supply and in no way modifies the characterization of the signal. This interference frequency was not removed because any type of filtering

would alter a too large portion of the spectrum. Nevertheless, the band frequency between 0 and 40 hertz differed sufficiently between the three signal classes to characterize them.

For the class 1 signal, the APS from the characteristic pattern or series of these patterns demonstrate one important spectral component around 1 hertz (Fig. 2a). The class 2 signal reveals an APS characteristic of a periodic signal which fundamental is situated around 7 hertz (Fig. 2b). The spectra of all ten class 2 signals analysed were identical. For the ten class 3 signals the same spectral characteristics are observed (Fig. 2c) with the main components between 0 and 3 hertz, as well as two characteristic peaks, one around 8 hertz and another around 11 hertz. For this class 3 signal, we have always observed some peaks at highest frequencies (31 hertz and above 50 hertz).

#### Histology

Classified cross sections were performed on ten samples taken during emission of all three signal classes. *Peregrinus maidis* sheaths are thick, 15 to 25  $\mu\text{m}$  in diameter and clearly outlined, and reveal piercing which is perpendicular to the surface of the plant's epidermis. A salivary flange showing the imprint of the

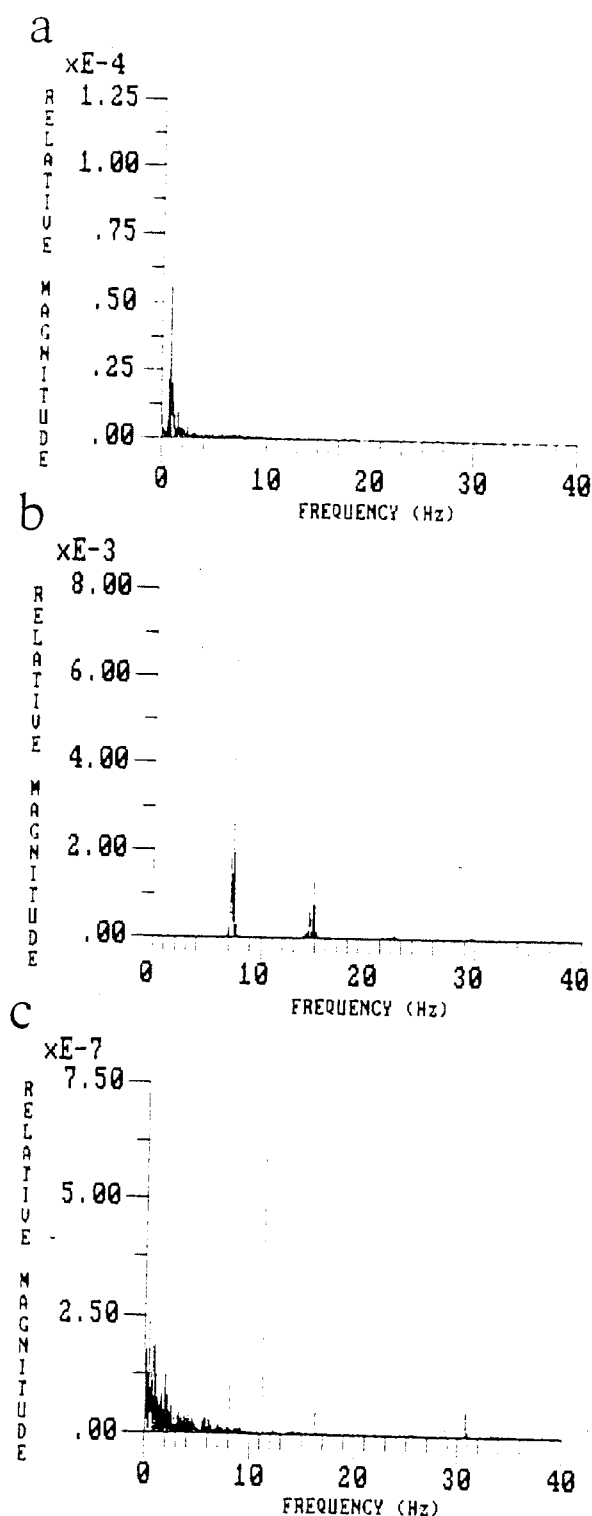


Fig. 2. Spectral analysis of the different EPG patterns. a) frequency spectrum (APS) of the class 1 signal; b) frequency spectrum (APS) of the class 2 signal; c) frequency spectrum (APS) of the class 3 signal.

labial tip may be observed (Fig. 3a). The track may then extend into a different plane, though appearing direct and crossing the cells. The end of the sheath (termination of the thrust of the stylets and of salivation) is identified by a narrower part and ends in a small bulge or terminal stain.

Cross sections performed on several samples taken during the class 1 signal show a simple sheath which terminates in the mesophyll and does not reach the vascular bundles (Fig 3a, 3b). Sheaths may be short or traverse the entire thickness of the leaf, apparently dependant on the class 1 signal duration.

For the class 2 signal, six out of ten samples provided a sheath track which was interpretable. In one of these six samples shown in Fig. 3c, the sheath is subdivided in the upper third and two side branches, one of them terminating in a xylem cell while the other extends into the parenchyma. In the other 5 samples, 3 sections present a sheath with two side branches (as on Fig. 3c), one of them terminating in a xylem cell and the other in parenchyma. In the two other sections, we saw a sheath with three side branches, one ending in a xylem cell and the two others in parenchyma.

For the class 3 signal, three samples out of ten show a clear and complete sheath track. In each of the cross sections, the sheath is divided into two parts, one ending in the phloem, the other extending into the parenchyma (Fig. d).

## Discussion

Histological results were used to correlate the different signal classes 1, 2 and 3 produced by *Peregrinus maidis* with the position of the insect's salivary sheaths in the maize tissues. The class 1 signal appears to correspond to an exploration activity of maize tissues, probing in parenchyma which permits *P. maidis* to quickly locate the deeper vascular bundles. The perforation of the tissue appears to be associated with the peak indicating the beginning of the class 1 signal. The class 2 signal seems to correspond to ingestion in the xylem. The presence of a supplementary branch located in the parenchyma may be explained by the fact that a class 2 signal is always preceded by a class 1 signal. The class 3 signal appears to correspond to ingestion in the phloem. In cross section taken after a class 1-class 3 sequence, the presence of a supplementary branch in the parenchyma may also be explained by the class 1 part. Cross sections performed using samples taken during class 1-class 2-class 3 sequences showed a

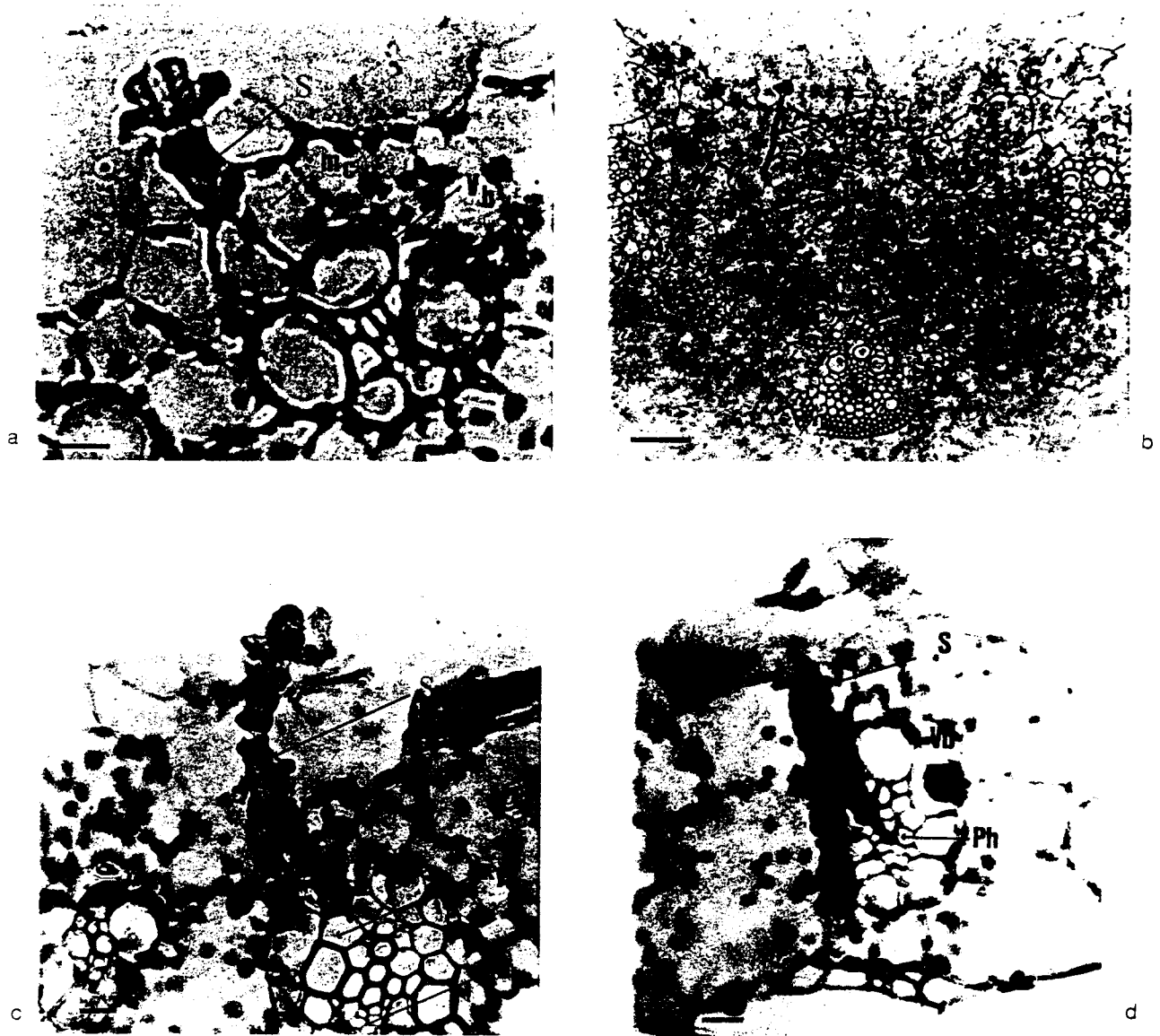


Fig. 3. Cross sections of Sabrina maize leaves containing *Peregrinus maidis* feeding tracks. a) salivary sheath (S) ending in mesophyll, (mc) mesophyll cell, (Vb) vascular bundles. Bar: 20  $\mu\text{m}$ ; b) salivary sheath (S) ending in mesophyll, (mc) mesophyll cell, (Vb) vascular bundles. Bar: 250  $\mu\text{m}$ ; c) salivary sheath (S) with one part ending in a xylem cell (xy) and the other in mesophyll, (ph) phloem cell. Bar: 20  $\mu\text{m}$ ; d) salivary sheath (S) with one part terminating in a phloem cell (ph) and the other in mesophyll. Bar: 20  $\mu\text{m}$ .

sheath with three branches located in the parenchyma, the xylem and the phloem respectively (not shown).

The *P. maidis* sheath is very similar to that of *N. lugens* (Khan & Saxena, 1988) and to that of *Perkinsiella saccharicida* (Kirkaldy) (Homoptera: Delphacidae) (Chang, 1977), but appears finer than that of *N. virescens* (Rapusas & Heinrichs, 1990). It is quite different from sheaths produced by aphids (Miles,

1987) or by scale insects (Calatayud, 1993), which have a smaller diameter and show a track which is more complex, extracellular, intramural and at times intracellular (Spiller *et al.*, 1985). The *P. maidis* sheath does not go around cells as aphid sheaths do, but shows a direct track through cells and spaces. Ultrastructural analysis of this sheath should allow more

precise description of its track and actual cell damage caused.

The class 2 and class 3 signals emitted by *P. maidis* are comparable to the P4 and P5 signals of *N. lugens* correlated respectively to ingestion in the phloem and ingestion in the xylem using a honeydew analysis technique (Kimmins, 1989). Temporal analysis of class 2 and class 3 signals reveal relative amplitude and frequency values which are comparable to those obtained for the P4 and P5 signals. On the other hand, it is impossible to compare *P. maidis* signals with the characteristic signals obtained using alternating current (AC) in rice with *N. lugens* (Khan & Saxena, 1988), *N. virescens* (Rapusas & Heinrichs, 1990) or in maize with several Cicadellidae (Wayadande & Nault, 1993) since the resistance of the amplifier, the sensitivity of the system and the potential provided are too different.

The *P. maidis* signals obtained are, like those of other Delphacidae, very different from those described in Aphididae (Tjallingii, 1985a, 1987) or in Pseudococcidae (Calatayud, 1993) characterized by A, B, C E1, E2, F and G signals. No potential drops (Pd) as described by Tjallingii (1985b) in aphids were observed in *P. maidis*. These Pd correspond to stylet punctures of the plasma membrane and exist only when the electrical integrity of the membrane is maintained. On the other hand, short drops of potential or penetrations spikes are observed at the start of probing, which may correspond to the initiation of stylet penetration in maize tissues towards vascular bundles, immediately followed by another potential drop which is maintained throughout ingestion. These short potential drops have also been observed in *N. lugens* (Spiller, 1990). According to Spiller, they may indicate that the integrity of the cellular membrane and thus the transmembranal potential is destroyed almost immediately following puncture.

Although we could correlate the different signal classes produced by *P. maidis* with the positioning of the insect's sheath in maize tissues, light microscopy presents some limitations because it shows the track only at the tissue level and not at the cellular level. It seems then important to carry out an ultrastructural examination of the stylet pathway of *P. maidis* like the study performed by Spiller (1990) on the stylet tracks of *Nilaparvata lugens*. This ultrastructural examination would also allow a better description of the stylet pathway compared to one obtained by light microscopy and clarify their mode of penetration. We could verify either if their pathway is always intracellular or if it

could be more complex, intramural-extracellular, and verify as well whether penetration associated with the production of saliva really causes damage in cellular membranes. These two elements cannot be observed conclusively in light microscopy.

The periodic nature and the relatively high amplitude which characterize the class 2 signal may be explained by the fact that the muscles activating the pharyngeal pump of *P. maidis* function more intensely during this signal. Indeed, ingestion in the xylem, where hydrostatic pressure is nil or negative, would require a process of active suction (Spiller *et al.*, 1990; Leclant, 1988). The reflux of material absorbed towards the stylets is impossible because there is a 'valve' between the pharyngeal pump and precibarium. This is an innervated system, sensitive to the pressure of the liquid food. It also serves to regulate the flow of liquid during food intake in the tissue with strong hydrostatic pressure, such as the phloem (Backus, 1985).

Temporal analysis results also suggest that *P. maidis* feeds on Sabrina both in the xylem and the phloem, which it accesses after a short probing or penetration period not exceeding 3 or 4 min. This period is much shorter than that shown in Aphididae, and much shorter than that of scale insects which may spend much more time before reaching the conducting vessels (Calatayud, 1993). This may be explained by a possible ingestion of mesophyll cell content by scale insects as is the case in certain Diaspididae (Calatayud, 1993; Foldi, 1990).

Certain Cicadellidae may also feed in the mesophyll, such as *Empoasca fabae* (Backus & Hunter, 1989) or *Eupterix melissae* (Pollard, 1969), which does not appear to be the case with *P. maidis* or with Delphacidae in general.

On the other hand, *P. maidis* appears to show strong preference for the phloem in the temperate maize hybrid Sabrina, much like the delphacids *N. lugens* (Sogawa, 1982), *S. furcifera* (Khan & Saxena, 1984) or the cicadellid *N. virescens* (Rapusas & Heinrichs, 1990) in susceptible rice genotypes. Sabrina, a temperate hybrid, is used as a control plant for susceptibility to viruses transmitted by *Cicadulina mbila* and *P. maidis* in La Réunion (Dintinger *et al.*, 1995).

Statistical analysis performed on class 2 and class 3 signals reveal varying parameters (large standard deviations) due mainly to an insect effect. These parameters thus do not allow precise characterization of each signal. Nevertheless, the non-parametric rank-sum test performed on the median significantly differentiates



the two signal classes. Therefore, the median is the most discriminating parameter.

While the statistical parameters are too variable to characterize each signal class, the spectral analysis performed on class 2 and class 3 signals of *P. maidis* associates a characteristic frequency spectrum to each. This signal processing method has not been usually used on insect signals obtained through EPG or Electronic monitoring. Only Marion-Poll *et al.* (1987) have used Fourier analysis (FFT) in order to separate in the frequency domain, the patterns emitted by *Zyginidia scutellans* on maize. However, these patterns were not enough differentiated by this analysis. Studies involving the feeding behavior of Aphididae (Tjallingii, 1978a) or Delphacidae (Kimmins, 1989) with EPG have permitted the description of signals and identification of associated frequencies only through temporal analysis.

The frequency domain analysis and the time domain analysis are two complementary methods which allow us the understanding of the biological origin of the main frequencies emitted.

When well used, spectral analysis permits us to characterize any signal type provided it presents a sufficient number of points. As it relies on a standardized procedure, it should facilitate the comparison of signals emitted by *P. maidis* on different maize varieties and more generally the comparison between signals emitted by the various piercing and sucking insects. In this study, we have not analysed all the details of the penetration mode of *P. maidis* stylets but we have correlated the sheaths location in different maize tissues (parenchyma, xylem and phloem) with 3 signal classes. We can hence forth identify these different signal classes by a frequency domain analysis and a time domain analysis. We hope then to solve the MMV transmission problem by studying the feeding behavior of *P. maidis* on resistant genotypes. We could observe in this way if the phloem ingestion period performed by *P. maidis* is different between susceptible and resistant plants.

#### Acknowledgments

We thank Dr Ammat (Laboratoire d'Anapathologie - CHR - Saint-Pierre) for allowing us to use his microtome. We acknowledge F. Leclant (ENSAM) and N. Boissot (INRA) for helpful comments on this paper and A. Franck for his help in photograph realisation. Research was conducted during the thesis scholarship program of C. Buduca, supported by le Min-

istère Français de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur and financed partially by an EEC project (STDIII - TS3 CT 920150).

#### References

- Agarwal, R. K., R. S. Verma & G. S. Bhanraj, 1978. Screening of sorghum lines for resistance against shoot by *Peregrinus maidis* (Ashmead) (Homoptera: Delphacidae) JNKW (Jawaharlal Nehru Krishi Vishwa Vidyalaya) Research Journal, 12.
- Backus, E., 1985. Anatomical and sensory mechanisms of leafhopper and planthopper feeding behavior. In: L. R. Nault & J. G. Rodriguez (eds.), *The Leafhoppers and Planthoppers*. Wiley Intersciences Publication, New York, pp. 163-194.
- Backus, E & W. B. Hunter, 1989. Mesophyll feeding by the potato leafhopper *Empoasca fabae* (Homoptera: Cicadellidae): results from electronic monitoring and thin-layer chromatography. *Environmental Entomology* 18: 465-472.
- Black, L. M., 1959. Biological cycles of plant viruses in insect vectors In: F. M. Burnet & W. M. Stanley (eds.), *The Viruses*, Volume 2. Academic Press, New York, pp. 157-187.
- Calatayud, P. A., 1993. Etude des relations nutritionnelles de la cochenille du manioc avec sa plante hôte. Thèse de docteur en sciences. INSA, Lyon, 86 pp.
- Chang, V. S. C., 1977. Feeding activities of the sugarcane leafhopper: identification of electronically recorded waveforms. *Annals of The Entomological Society of America* 71: 31-36.
- Dintinger, J., A. Rodier, B. Reynaud, B. Clerget & J. L. Marchand, 1995. Breeding maize for MSV resistance in Reunion island. In: H. O. Gevers (eds.), *Proceedings of the Eleventh South African Maize Breeding Symposium, March 11-17, Cereda (South Africa)* (in press).
- Foldi, I., 1990. Internal anatomy In: D. Rosen (ed.), *Armored Scale Insects. Their Biology, Natural Enemies and Control*, Volume A. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, pp. 65-80.
- Heinrichs, E. A. & H. R. Rapusas, 1984. Feeding activity of the green leafhopper (GLH) and tungro (RTV) infection. *International Rice Research News letters* 9: 15.
- Khan, Z. R. & R. C. Saxena, 1984. Technique for demonstrating phloem or xylem feeding by leafhoppers (Homoptera: Cicadellidae) and planthoppers (Homoptera: Delphacidae) in rice plant. *Journal of Economic Entomology* 77: 550-552.
- Khan, Z. R. & R. C. Saxena, 1988. Probing behavior of three biotypes of *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae) on different resistant and susceptible rice varieties. *Journal of Economic Entomology* 81: 1338-1345.
- Kimmins, F. M., 1989. Electrical penetration graphs from *Nilaparvata lugens* on resistant and susceptible rice varieties. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 50: 69-79.
- Kimmins, F. M. & W. F. Tjallingii, 1985. Ultrastructure of sieve element penetration by aphid stylets during electrical recording. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 39: 135-141.
- Leclant, F., 1988. Anatomie de l'appareil buccal et du tube digestif chez les hémiptères. Mécanisme de la prise de nourriture. *Ann. ANPP*, N° 2, vol. 1/1, 13-19.
- Marion-Poll, F., Della Giustina, W. & B. Mauchamp, 1987. Changes of electric patterns related to feeding in a mesophyll feeding leafhopper *Zyginidia scutellaris*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 43: 115-124.

- McLean, D. L. & M. G. Kinsey, 1964. A technique for electrically recording of aphid feeding and salivation. *Nature* 202: 1358-1359.
- Miles, P. W., 1987. Feeding processes of Aphidoidea in relation to effect on their food plants. In A. K. Minks & P. Harrewijn (eds.), *Aphids. Their Biology, Natural Enemies and Control*, Volume A. Elsevier Sciences Publishers B.V., Amsterdam, pp. 321-339.
- Montllor, C. B. & W. F. Tjallingii, 1989. Stylet penetration by two aphid species on susceptible and resistant lettuce. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 52: 103-111.
- Pollard, D. G., 1969. Directional control of the stylets in phytophagous Hemiptera. *Proceedings of the Royal Entomological Society of London* 44: 10-17.
- Rapugas, H. R. & E. A. Heinrichs, 1990. Feeding behavior of *Nephotettix virescens* (Homoptera: Cicadellidae) on rice varieties with different levels of resistance. *Environmental Entomology* 19: 594-602.
- Reynaud, B., 1988. Transmission des virus de la striure, du stripe et de la mosaïque du maïs par leur vecteurs *Cicadulina mbila* (Naude, 1924) et *Peregrinus maidis* (Ashmead, 1890) (Homoptera). Approches biologique, génétique et épidémiologique de la relation vecteur-virus-plante. Thèse de docteur en Sciences. USTL, Montpellier, 173 pp.
- Spiller, N. J., 1990. An ultrastructural study of the stylet pathway of the brown planthopper *Nilaparvata lugens*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 54: 191-193.
- Spiller, N. J., F. M. Kimmins & M. Llewellyn, 1985. Fine structure of aphid stylet pathways and its use in host plant resistance studies. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 38: 293-295.
- Spiller, N. J., L. Koenders & W. F. Tjallingii, 1990. Xylem ingestion by aphids - A strategy for maintaining water balance. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 55: 101-104.
- Sogawa, K., 1982. The rice brown planthopper: feeding physiology and host plant interactions. *Annual Review of Entomology* 27: 49-54.
- Tjallingii, W. F., 1978a. Electronic recording of penetration behaviour by aphids. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 24: 521-530.
- Tjallingii, W. F., 1978b. Mechanoreceptors of the aphid labium. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 24: 531-537.
- Tjallingii, W. F., 1985a. Electrical nature of recorded signals during stylet penetration by aphids. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 38: 177-186.
- Tjallingii, W. F., 1985b. Membrane potentials as an indication for plant cell penetration by aphid stylets. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 38: 187-195.
- Tjallingii, W. F., 1987. Stylet penetration activities by aphids: new correlations with electrical penetration graphs In: V. Labeyrie, G. Fabres & D. Lachaise (eds.), *Insects-plants: Proceedings of The Sixth International Symposium on Insect-plant relationships* (Pau). Junk Publishers, Dordrecht, pp. 301-306.
- Tjallingii, W. T., 1990. Continuous recording of stylet penetration activities by aphids In: R. K. Campbell & R. D. Eikenbary (eds.), *Aphids. Plant Genotype Interactions*. Elsevier Science publishers B V, Amsterdam, pp. 89-99.
- Wayadande, A. C. & L. R. Nault, 1993. Leafhopper probing behavior associated with maize chlorotic dwarf virus transmission. *Phytopathology* 83: 522-526.

## Field observations of the vertical distribution of tropospheric ozone at the island of Reunion (southern tropics)

S. Baldy

Laboratoire de Physique de l'Atmosphère, Université de La Réunion, Saint-Denis Messag, France

G. Ancellet

Service d'Aéronomie, Université Paris, Paris

M. Bessafi, A. Badr, and D. Lan Sun Luk

Laboratoire de Physique de l'Atmosphère, Université de La Réunion, Saint-Denis Messag, France

**Abstract.** An analysis of 1 year of tropospheric vertical soundings of ozone at the island of Reunion (21°S, 55°E) is presented. High values of ozone concentration are observed in the troposphere above the inversion level that caps the marine boundary layer (MBL) during the September to November period, concomitant with active biomass burning in the southeastern African continent and Madagascar. Tongues (prominences of higher values) of enhanced ozone are apparent on vertical profiles obtained during this period, and backward trajectories from tongue levels are generally traced back to these zones of intense burning. Profiles of high and almost constant ozone mixing ratio in the whole troposphere above the MBL are also obtained during this season and could not be traced back to a definite origin. Conversely, during January to March, MBL compounds and humidity are convected in the whole troposphere, and tropospheric ozone is very low. The seasonal variation of integrated tropospheric ozone is large, up to 30 Dobson units (DU) and the tropospheric contribution to total columnar ozone could be high, up to 50–55 DU. This seasonal variation is well correlated with total ozone mapping spectrometer (TOMS) data, anticorrelated with integrated water content, and approximately follows, with a small time lag, the seasonal fire activity in the southeastern Africa. Data from Reunion are in accord with equivalent results from Ascension Island (8°S, 15°W), Brazzaville (Congo; 4°S, 15°E) and Natal (Brazil; 6°S, 35°W), corroborate satellite observations, and suggest that the concentration of tropospheric ozone in the tropics is governed by the coupling of photochemical and dynamical processes.

### Introduction

Tropospheric ozone is the main source of OH radicals and contributes to the oxidation of chemical species important for the radiative budget or acidification processes in the lower atmosphere. In addition, ozone is itself a greenhouse gas. Hence ozone plays a role in controlling the climate of the troposphere [Fishman *et al.*, 1979; Ramanathan and Dickinson, 1979]. Fishman and Crutzen [1978] suggested that concentrations of ozone could be largely influenced by human activity and first implicated fossil fuel combustion. More recently, it has been shown that biomass burning also contributes, and that this contribution could be substantial, especially in the tropics [Delany *et al.*, 1985; Crutzen *et al.*, 1985; Logan, 1985; Logan and Kirchhoff, 1986]. Using satellite data, Fishman *et al.* [1986] indicated that the seasonal cycle of total columnar ozone in the tropics is dominated by the seasonal cycle of tropospheric ozone, and they found a strong positive correlation between biomass burning and total ozone at low latitudes. Recent analyses using the total ozone mapping spectrometer (TOMS) minus Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGE) tech-

nique further suggest that biomass burning could, through transport, enhance the tropospheric ozone burden over extended zones [Fishman *et al.*, 1990, 1991; Krishnamurti *et al.*, 1993].

Yet, owing to cloud cover, difficulties in retrieving tropospheric versus stratospheric contribution in total ozone, and insufficient vertical resolution in satellite data, complementary ground-based observations of tropospheric ozone are necessary. Long-term studies from Brazzaville, Congo (4°S, 15°E) and Ascension Island (8°S, 15°W) [Cros *et al.*, 1992] and from Natal, Brazil (6°S, 35°W) [Logan and Kirchhoff, 1986] consistently indicate high tropospheric ozone amounts that coincide with the presence of enhanced widespread biomass burning. Ascension Island ozone profiles further point out that above the marine boundary layer where ozone concentration is low, tropospheric ozone amounts can be very high and comparable to amounts found nearer to burning sites. This finding is consistent with a large zonal contamination of the troposphere by the photochemical production of ozone from biomass burning and could suggest a "mix-then-cook" amplification effect of ozone production concomitant with the convection and transport of ozone precursors [Chatfield and Delany, 1990; Pickering *et al.*, 1992].

Enriched tropospheric ozone layers are also obtained in vertical ground-based soundings from Okaukuejo (19°S, 16°E),

Copyright 1996 by the American Geophysical Union.

Paper number 95JD02929.  
0148-0227/96/95JD-02929\$09.00

Nambia [Diab *et al.*, this issue]. Yet, the possibility of an easterly transport of tropospheric ozone from biomass burning to explain the tropospheric ozone maximum off the coast of Africa [Fishman *et al.*, 1986, 1991] has to be further confirmed. More long-term ground-based studies from marine sites are required to (1) further corroborate satellite data indicating extended tropospheric contamination by ozone from biomass burnings, (2) document by profiles the vertical distribution of these contaminations, (3) estimate the relative importance of stratospheric versus biomass burning inputs of ozone in the troposphere, (4) investigate the low concentration or destruction of ozone in the marine boundary layer, and (5) examine if a mix-then-cook amplification effect could contribute to extending the range of tropospheric ozone contamination from biomass burning.

We present here results from 27 successive and regularly spaced ozone soundings performed at Reunion Island (21°S, 55°E). These data, corresponding to 1 year of observations, suggest substantial tropospheric ozone contributions from biomass burning in the southeastern African continent. Similar to Ascension Island profiles, ozone concentrations in the marine boundary layer (MBL) are much lower and have a seasonal variation different from ozone above the MBL.

This paper is focused on tropospheric ozone: stratospheric vertical distributions obtained during the same soundings will be presented elsewhere.

## Experimental Site and Procedure

### Meteorological Characteristics

Reunion Island is situated in the southwestern part of the Indian Ocean, 7° east of Madagascar and 20° east of the southeastern coast of the African continent. The Reunion climate is typical of an oceanic site dominated by the southern Hadley cell circulation. The low level circulation consists of a southeasterly regime, the trade winds, bounded poleward by the anticyclonic axes of the subtropical highs.

During austral winter the southern hemisphere Hadley cell is very developed and extends well into the northern hemisphere. Trade winds at Reunion are rather high and steady. Larger wind speeds are found equatorward of Reunion, in the core of the trades. Yet, the east African low level jet [Findlater, 1969, 1972, 1977] downstream of Reunion Island contributes to regulate and reinforce the trades. During austral winter the temperate latitude westerlies are strongest and in the upper troposphere extend deep into the tropics [Hastenrath, 1991]. Hence during this season the vertical wind distribution over Reunion is characterized by a wind inversion: low-level easterlies are opposite to upper level westerlies. This wind inversion persists during most of the year, including spring and autumn seasons. In addition, the structure of the lower troposphere over the oceanic trade wind regions is marked by an extensive temperature inversion embedded in the trade wind inversion [Hastenrath, 1991]. Below the inversion level, the potential temperature is lower and the humidity higher, and conversely above. The relative humidity decrease from bottom to top of the inversion is a further measure of inversion intensity.

During austral summer the southern hemisphere Hadley cell is comparatively weak and is confined to a narrow latitude band. The trade wind and temperature inversions pause at Reunion Island, which is now in the vicinity of the anticyclonic

axes. Deep convection develops and transports humidity and boundary layer products throughout the whole troposphere.

### Experimental Procedure

The vertical distribution of ozone, and standard meteorological ambient data, have been measured at Reunion Island since September 1992. One year of tropospheric measurements, starting on September 1, 1992, are presented here. In order to base our observations on an unbiased data sampling, we always used the same launching day, irrespective of weather conditions. The measurements were taken every 2 weeks near 8 UT, late morning local time. Because of technical problems, a few 3-week and 1-week periods between launches occurred. The balloon-borne device used to obtain vertical profiles of atmospheric ozone is the electrochemical concentration cell (ECC) ozonesonde [Komhyr, 1969; Komhyr and Harris, 1971]. The ECC sensor is an iodine/iodide redox cell in which ozone oxidizes iodide ions. An electrical current proportional to the pumped flow rate of ozone in the cell is generated. Ozone partial pressure is calculated from this current, the total flow rate of the pump, and the cell temperature.

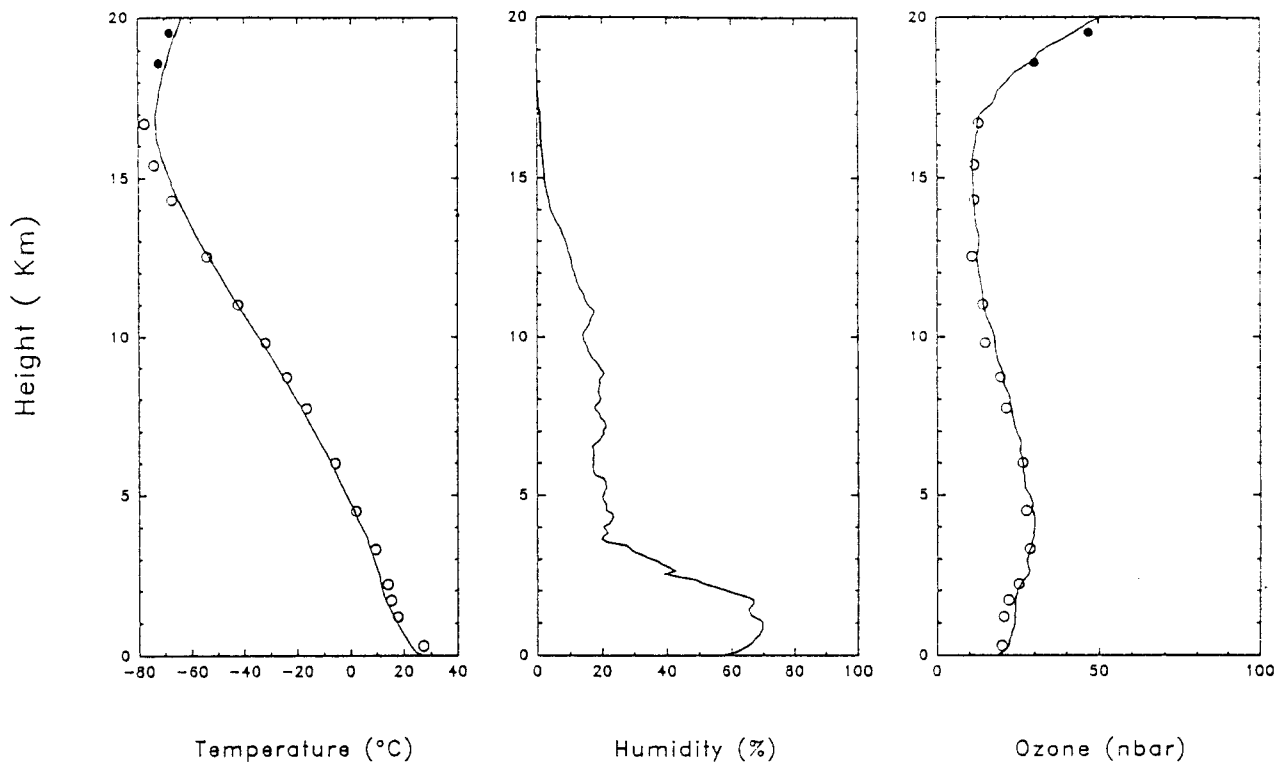
The ozonesonde is coupled to a standard meteorological radiosonde to simultaneously transmit, with ozone data, atmospheric temperature, pressure, and humidity from the ground to the burst altitude of the balloon. The ECC ozonesondes of this study were obtained commercially (Science Pump Corporation) and operated without modifications. The airflow rate and the zero current of the sondes were individually measured before flight, and the ozonesondes were checked in the laboratory against a TSC-1 ozonizer/test unit (Science Pump Corporation).

The relative precision of ECC ozonesonde partial pressure measurements in the troposphere was found to be 6–10% by field tests [Barnes *et al.*, 1985; Hilsenrath *et al.*, 1986]. In accordance with Logan and Kirchoff [1986], ozone concentration profiles are not normalized to concurrent Dobson measurements.

Air mass back trajectories are calculated by the French Meteorology Office (Météo France) using a kinematic trajectory model and data computed by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). These trajectories are determined from ECMWF outcomes by successive horizontal, vertical, and temporal interpolations. The ECMWF global model uses a 1.875° grid and trajectory interpolations run on 12 points by level and by time increment; time grid is 5'. Because trajectories in southern Africa and nearby marine regions are uncertain, we give some estimate of the error in each analysis by running backward trajectories from points shifted from the arrival point by fixed amounts in latitude, longitude, time, and in some cases, altitude.

## Tropospheric Ozone at Reunion Island: Results and Analysis

Average tropospheric profiles of temperature, humidity and ozone are presented in Figure 1. This average is made of 27 successive and regularly spaced ozone soundings launched from September 1, 1992, to August 31, 1993. Normal launching recurrence is 2 weeks. To account for some 3-week and 1-week spans between launches, each profile is weighted by the time interval from the preceding sounding. This weighting procedure allows one to give the same importance to data corre-



**Figure 1.** One-year average tropospheric profiles of temperature, humidity, and ozone from 27 successive soundings launched at Reunion during the period September 1992 to August 1993. Open and solid circles correspond to tropospheric and stratospheric averages obtained from soundings made at Natal (Brazil) from 1978 to 1988 and replotted from *Kirchhoff et al.* [1991]. The ozone measurements were all made with ECC sondes.

sponding to each month period and to obtain a statistical unbiased average for the year.

Since the most comprehensive data set of ozone vertical profiles in the southern tropics is from Natal, Brazil [*Logan and Kirchhoff*, 1986], the present average profiles are compared in Figure 1 to tropospheric (open circles) and stratospheric (solid circles) average profiles from Natal. Natal averages, replotted from *Kirchhoff et al.* [1991], are obtained from 157 soundings extending over the 1978–1988 period. These soundings are not quite uniformly distributed over time. Difficulties in ozonesonde delivery occasioned interruptions of the sounding routine. Yet the number of soundings made during different month periods, given by *Kirchhoff et al.*, indicates that delivery problems are poorly correlated with season and that these averages could be considered as annual averages.

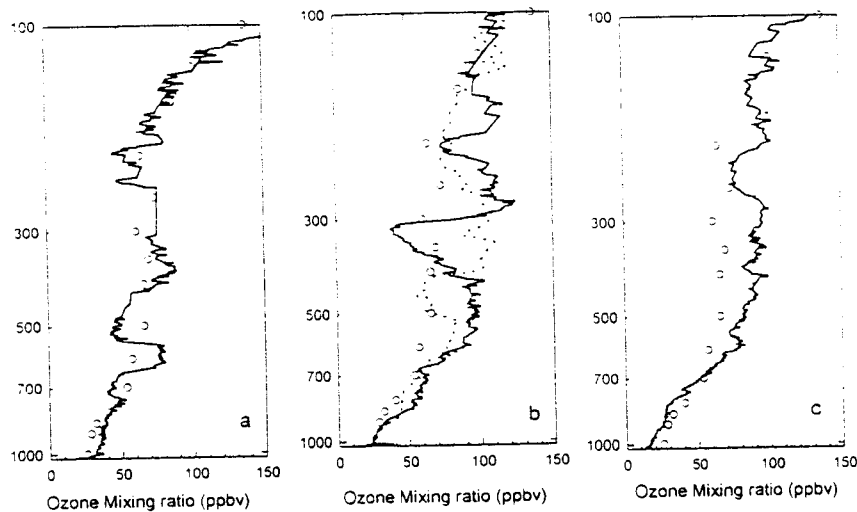
The close matching between the data of these two distant and different sites suggests some similarity for the dynamical and chemical processes controlling the distribution of tropospheric ozone.

Reunion Island is a true marine site as opposed to the more continental situation of Natal. Sea influence is, for example, apparent in the Reunion mean temperature profile. Temperature is cooler in the easterly trade wind boundary layer. The other deviation of the Reunion temperature profile from Natal average, around tropopause level, could result from the more southern position of Reunion. Owing to the seasonal displacement of the intertropical convergence zone (ITCZ) and because Reunion is nearer than Natal to the subtropical frontier, the tropopause height is expected to be more variable at Re-

union. Averaging profiles of slightly different tropopause heights could produce a higher value for the temperature minimum and a smoother variation around this minimum. Alternatively, the smoother temperature profile obtained at Reunion could result from more frequent cross-tropopause exchanges at this tropical marine site.

*Logan and Kirchhoff* [1986] explained the high values of tropospheric ozone found at Natal by the photochemical production of ozone from by-products of biomass burning. These authors noted that Natal could be under direct influence of extensive burning that takes place during the dry season over continental Brazil, to the south and to the west. The close agreement of average tropospheric ozone profiles from Natal and Reunion is consistent with a source of ozone from biomass burning from the African continent for Reunion. Furthermore, since Reunion Island is an isolated marine site rather distant from Africa, this matching further suggests (1) an extensive zonal contamination of the troposphere by the photochemical production of ozone from by-products of biomass burning and (2) some generality of the mechanisms involved in this contamination. A detailed analysis of individual soundings and of the seasonal variation of total tropospheric ozone at Reunion follows.

It should be additionally noted, on the average ozone profile from Reunion, that the ozone concentration decreases in the boundary layer. Sea level concentration (18.5 ppbv) is lower than concentrations obtained in the middle troposphere. This concentration is comparable to the sea level values obtained during cruises in the Indian Ocean [*Johnson et al.*, 1990] and



**Figure 2.** September to November (southern spring) case study of ozone vertical profiles at Reunion: (a) September 1, (b) October 6, and (c) November 12, 1992. Open circles correspond to ozone averages from Natal restricted to the September to November period, replotted from *Kirchhoff et al.* [1991]. The dashed line in Figure 2b corresponds to the October 19, 1990, sounding from Brazzaville, Congo [*Cros et al.*, 1992].

the Atlantic Ocean [*Smit et al.*, 1989] at Reunion latitude. This concentration is also similar to Natal ground level average, and to Cape Grim [*Ayers et al.*, 1992] and Cape Point [*Scheel et al.*, 1990] surface averages representative of southern marine sites. The decrease of ozone concentration in the boundary layer at Reunion is also consistent with measurements obtained at Ascension Island [*Cros et al.*, 1992]. As previously noted by *Cros et al.*, and corroborated here, surface measurements in a marine environment could be misleading for characterizing ozone tropospheric levels and anthropogenic influence.

During the trade wind regime, Reunion is generally subjected to westerly winds in the middle and upper troposphere above the inversion level and to easterlies below. Since the ozone lifetime in the MBL is only 2–5 days [*Fishman et al.*, 1991] and since large expanses of sea are present to the east and to the south of Reunion, ozone from biomass burning is expected to reach Reunion from above the inversion level and the west. Hence burning activity that could first influence Reunion is expected to be situated in southeastern Africa.

Temporal and spatial distribution of savanna fires over the southern African continent during 1992 is given by *Justice et al.* [this issue] using NOAA advanced very high resolution radiometer data. These results indicate that the peak fire frequency during 1992 in southeastern Africa is September and that burning drops off substantially by October. In addition, the forward trajectory analysis from fires during October 1–15, 1992, given by *Thompson et al.* [this issue (b)] suggests that fires in southeastern Africa could effectively influence the Reunion zone during this period. These results are also corroborated by the *Cahoon et al.* [1992] study of biomass burning over the African continent, based on nighttime low-light satellite imagery of the Defense Meteorological Satellite Program and 1986–1987 reference years.

Since these studies suggest that Reunion could be influenced by burning emission during September–October, we will first consider characteristic soundings corresponding to this period.

The vertical profile of ozone in the troposphere over Reunion on September 1, 1992, is shown in Figure 2a. Open circles in this figure are tropospheric ozone averages obtained

from 58 soundings during the September to November period at Natal and replotted from *Kirchhoff et al.* [1991] for reference. It is to be noted first that the tropospheric ozone content at Reunion is large on this date and that the matching of the Reunion profile with Natal averages is quite good on the whole. Since *Kirchhoff et al.* [1991] and *Logan and Kirchhoff* [1986] suggested that the large concentrations of ozone in the troposphere obtained at Natal during this period partly result from a contamination from biomass burning, and since the Reunion values are rather close, the September 1 profile from Reunion could also be influenced by biomass burning. Furthermore, a sharp-edged tongue (prominence of higher values) of enhanced ozone at the 600 mbar level is quite visible on this profile. Since turbulence is expected to rapidly smooth any sharp vertical variation of concentration of a mixed substance (here ozone) [*Monin and Yaglom*, 1973], this sharp-edged tongue suggests a contamination of the troposphere by a nearby source of ozone.

Back trajectory computations could give some information on the origin of air masses obtained at Reunion for different levels. Yet, as pointed out by *Pickering et al.* [1994], owing mainly to the scarcity of observations around the south African continent, a large uncertainty is associated with any air trajectory in this zone. The *Pickering et al.* analysis was for the South Atlantic region where observations are extremely scarce. Relatively more observations are available to the east of Reunion, and trajectory calculations should be rather more accurate in this region. *Pickering et al.* [1994] recommended trajectory computations from clusters of points, shifted by fixed amounts from the arrival point, to estimate the uncertainty in the analysis. Following the *Pickering et al.* [1994] recommendation, we ran back trajectories from a cluster of points based on an arrival point at Reunion corresponding to the 600 mbar level and September 1, 1992. The cluster includes this arrival point and points shifted by  $1^\circ$  to the east and to the south, plus the same points for the level corresponding to a pressure 100 mbar lower. Five days of back trajectories from this cluster are presented in Figures 3a and 3b; trajectories are determined from ECMWF outcomes as mentioned above. These trajectories

suggest that air at the 600 mbar level at Reunion was over Madagascar 2–3 days earlier. Since burning is generally very active during September at Madagascar [Cahoon *et al.*, 1992], these backward trajectories suggest that the sharp-edged ozone tongue observed at the 600 mbar level could originate from biomass burning occurring at Madagascar. However, these back trajectories were over southeastern Africa 4–5 days before the sounding, and the observed tongue of ozone could result from fires and biomass burning by-products from this more distant region. The 500-mbar-level back trajectories suggest a slightly different history for air at this level, possibly less contaminated by burning by-products, which is consistent with an ozone drop from the 600-mbar-level concentration to the 500-mbar-level value.

Larger and smoother tongues of enhanced ozone are apparent on the ozone profile corresponding to the October 6 sounding, presented in Figure 2b. Open circles in this figure are tropospheric ozone averages from Natal for the September to November period, as indicated above, and the dashed curve corresponds to the October 19, 1990, sounding from Brazzaville replotted from Cros *et al.* [1992]. Brazzaville ozone sounding is presented by Cros *et al.* as a typical profile influenced by a nearby burning of biomass. First, it should be noted that high ozone concentration in the troposphere could be obtained at Reunion Island. This concentration is actually above the average ozone concentration during the Natal period of ozone maximum. Tongues of higher values of ozone clearly suggest tropospheric sources and a contamination by biomass burning. Although Reunion Island is rather distant from extensive biomass burning sources, this profile from Reunion is quite similar to the Brazzaville profile, with maxima comparable or higher than Brazzaville maxima. Like Brazzaville, the contamination occurs in the middle and upper troposphere. In the upper troposphere, enhanced ozone values are higher at Reunion.

The rather regular appearance and high values of these ozone offsets suggest more mixing of the corresponding air masses in comparison with the sharp tongue on September 1 (Figure 2a). This mixing could result from convection of air masses after contamination and/or from transport.

Two different large tongues of enhanced ozone separated by a deep minimum are apparent in the October 6 ozone profile. The maximum of the lower tongue corresponds approximately to the 500 mbar level and the upper tongue is around the 250 mbar level. Hence cluster backward trajectories from air parcels present at the 500 mbar and 250 mbar levels at Reunion on the date of the sounding are computed and are presented in Figures 3c and 3d. The cluster backward trajectories from the 500-mbar tongue indicate that part of this ozone could originate from southeastern Africa 4–5 days earlier. Since burning activity is widespread in this region during September to November [Cahoon *et al.*, 1992] and since Justice *et al.* [this issue] directly confirm this fire activity for 1992, this result suggests that the photochemical production of ozone from biomass burning in southeastern Africa may contribute to high values of tropospheric ozone obtained at Reunion. Though the high level of ozone concentration and the rather smooth appearance of the profile for the 500-mbar tongue are actually consistent with a contribution from this region, these trajectories indicate that contamination from fires at Madagascar is also possible.

Cluster backward trajectories from the 250 mbar level suggest that the origin of the ozone tongue at this level could be more intricate. Although the dispersion of the cluster is more

pronounced, these back trajectories do not really point to the fire activity in southeastern Africa but turn to the east. Because ozone originating from only one given zone of burning is not likely to form distinct tongues of ozone excess in a vertical profile, this back tracing of 500-mbar and 250-mbar tongues to different origins is feasible. Yet, the 250-mbar tongue could not be firmly related to a definite origin. Some fire activity followed by deep convection and a long-range transport could produce this tongue. A stratospheric injection, though not likely in the latitudes pointed out by the backward trajectories, cannot be excluded.

A more unexpected example of a vertical profile with a large and rather smooth tongue of enhanced ozone, corresponding to the November 17 sounding, is presented in Figure 2c. The Natal ozone average profile from the September to November period is again given for reference, with circles, in this figure. Cluster backward trajectories of air parcels at the 500 mbar level, presented in Figure 4a, indicate that velocities are very weak and a large uncertainty is associated with these trajectories. Yet, a very slow transport from southeastern Africa at this level is not to be rejected.

As apparent on cluster back trajectories from the 250 mbar level, presented in Figure 4b, a transport of ozone, or ozone precursors, above the 500 mbar level is more feasible. These trajectories suggest that the air at these higher levels was over southeastern Africa 2 days earlier. Yet, the Justice *et al.* [this issue] fire study indicates that biomass burning in southeastern Africa declined rapidly during October 1992 and was quite low by the end of this month. Hence, a low or very low level of biomass burning is expected during November in this region, and the observation of enhanced ozone during this month at Reunion should be further discussed.

Chatfield and Delany [1990] and Pickering *et al.* [1992, this issue] recently suggested that convection could largely enhance ozone production from biomass fires. Provided some fires are present and this convection enhancement mechanism is effective, ozone production intensity should be governed mainly by convection. Owing to the ITCZ approach during October and November, convection is expected to increase in southeastern Africa and to greatly augment the efficiency of ozone production from biomass burning. The large tongue of ozone observed in the November 16 sounding at Reunion could result from this convection enhancement mechanism. Yet the possibility of long-range transport from other locations, like southeastern Asia or India, cannot be excluded.

A somewhat different and quite interesting situation at Reunion Island, typical during trade wind activity, is presented in Figures 5 and 6. This situation, though more complex, could provide some additional insight into photochemical production and transport of ozone from biomass burning by-products and is worth analyzing in more detail. Hence temperature, humidity, and saturated static energy profiles are given together with ozone profiles in these figures. Figures 5 and 6 correspond respectively to soundings launched on September 29 and October 20, 1992, at Reunion. Open circles in these figures are reference tropospheric ozone averages from Natal for the September to November period, as in previous figures, and the dashed curve in Figure 6 is the vertical profile of ozone from Okaukuejo, South Africa (19°11'S, 15°55'E), corresponding to the October 5, 1992, sounding, and replotted from Diab *et al.* [this issue].

During trade wind activity, the April to November period at Reunion, prevailing trade winds at low level are coming from

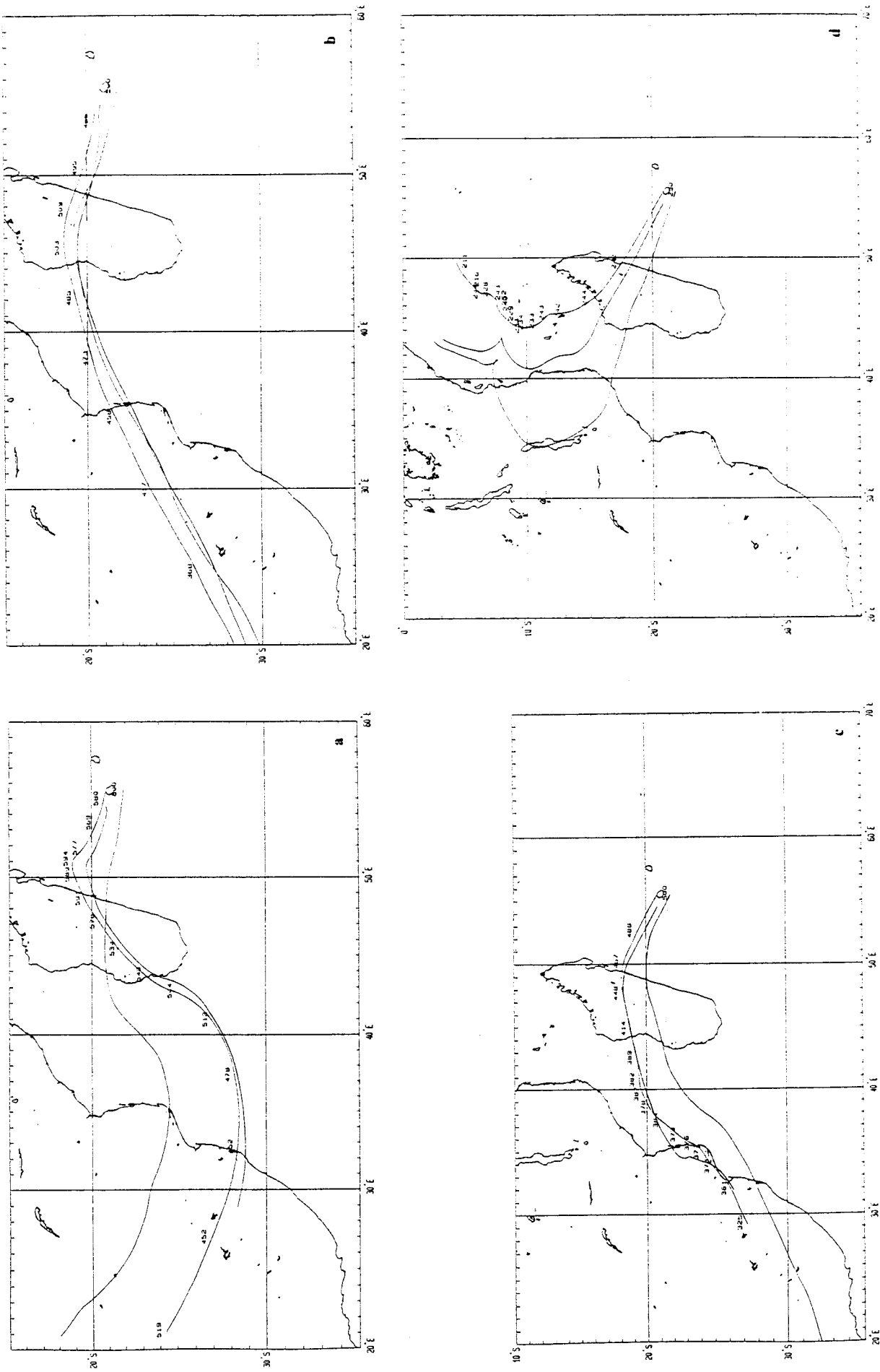


Figure 3. (opposite) Cluster backward trajectories ending at Reunion Island on September 1, 1992, at (a) 600 mbar and (b) 500 mbar levels, and on October 6, 1992, at (c) 500 mbar and (d) 250 mbar. Each cluster includes the arrival point and points shifted by 1° to the east and to the south. Pressures correspond to the arrival point trajectory and are plotted every 8 hours. Computations run for 5 days and use ECMWF data as indicated in the text.



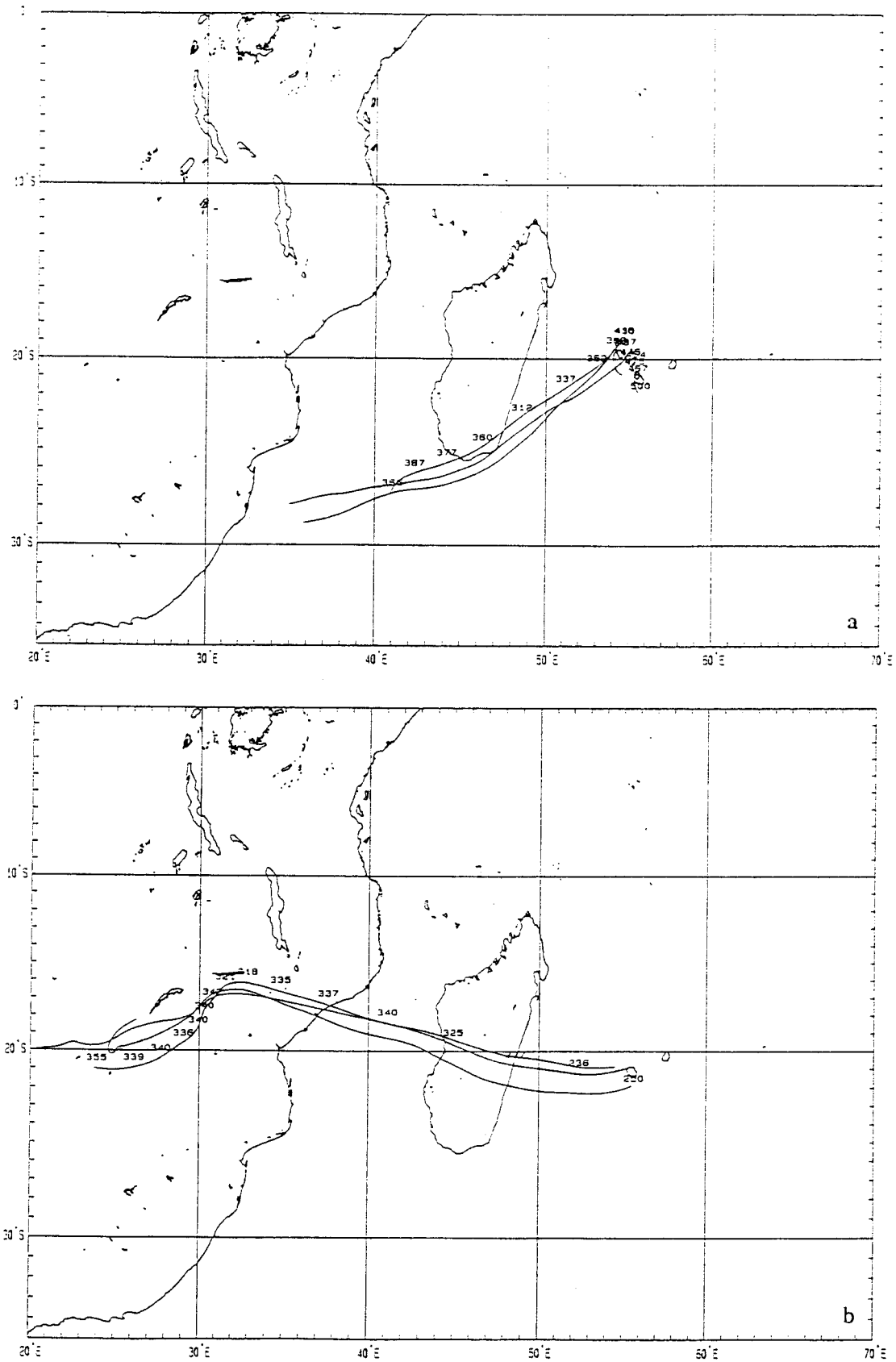
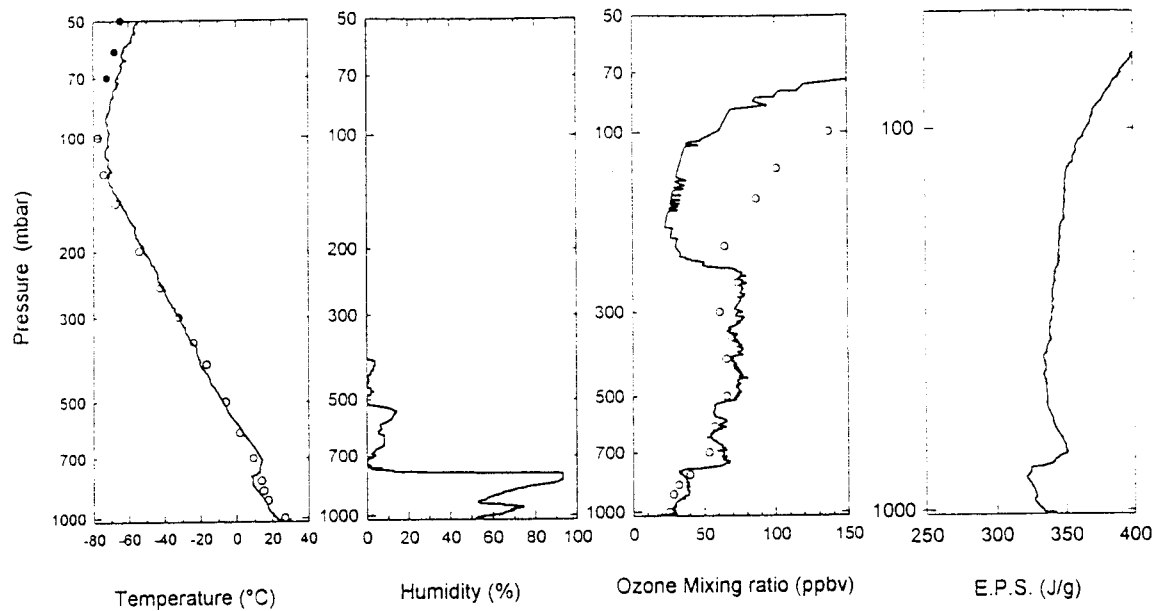


Figure 4. As in Figure 3 but for the November 17, 1992, sounding. Cluster backward trajectories correspond to (a) 500 mbar and (b) 250 mbar levels.



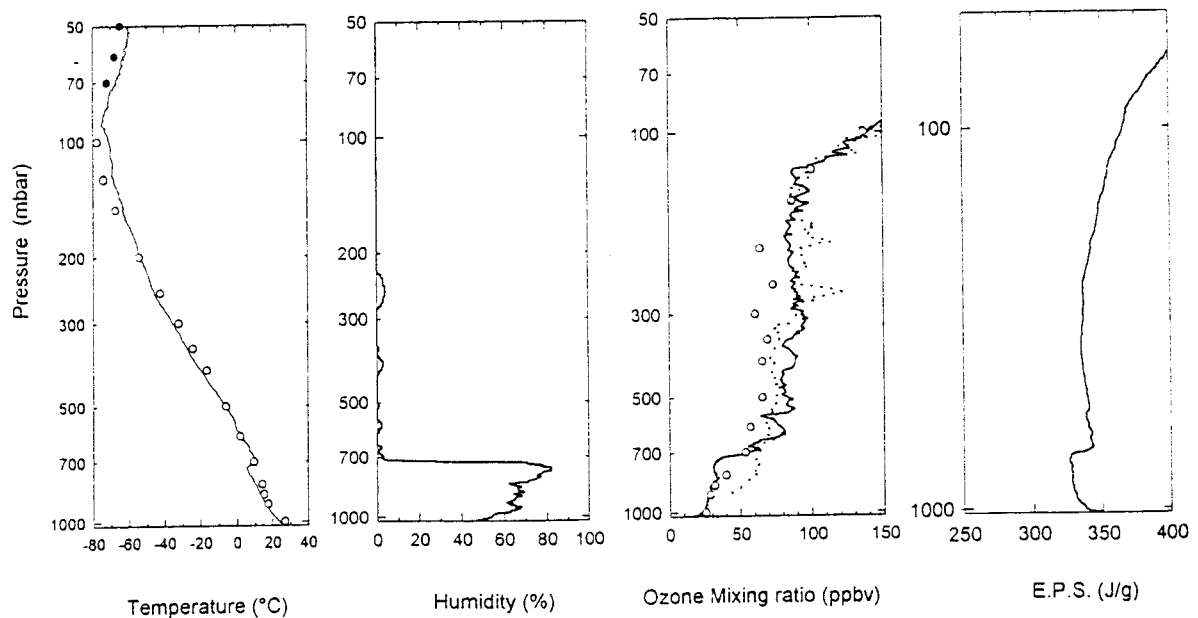
**Figure 5.** September 29, 1992, additional case study, including vertical profiles of temperature, humidity, ozone, and saturated static energy at Reunion. The saturated static energy is a stability parameter defined as the potential energy of a hypothetically saturated air parcel. Open and solid circles are defined as in Figure 2.

the east and the southeast. These southeastern trade winds are restrained to a boundary layer, roughly 3 km thick, capped by a strong temperature inversion. Above this boundary layer, trade winds are inverted, i.e., come from the west. Effects of this trade wind activity are clearly visible on temperature and humidity profiles in Figures 5 and 6. Because a large expanse of sea stands to the southeast of Reunion Island, the boundary layer is a pure MBL. Because of sea influence, temperature is cooler in this layer, and humidity is very high below the 750–700 mbar level.

As apparent on saturated static energy profiles, although convection could mix the MBL, this layer is clearly isolated from the above levels. This isolation is corroborated by the

upward shift of temperature variation and a very rapid dropping of humidity above the inversion level. In addition, static energy profiles suggest a mixing of the above inversion layer up to the 200 mbar level.

It can be noticed first from ozone profiles in Figures 5 and 6 that in the MBL the ozone mixing ratio is rather low. The MBL ozone values are actually comparable to the sea level value at Reunion latitude from a shipboard study [Smit *et al.*, 1989], to the Natal ground level average for the September to November period [Kirchhoff *et al.*, 1991] and to Cape Grim data corresponding to this period [Ayers *et al.*, 1992]. Prevailing winds in the MBL are easterly, the MBL is quite isolated from mid-tropospheric contamination, and tropospheric ozone sources to



**Figure 6.** As in Figure 5 but for the October 20, 1992, sounding.

the east are very distant. Hence, since the lifetime of ozone in the MBL is only 2–5 days [Fishman *et al.*, 1991], an ozone level typical of a remote marine zone is expected.

In accordance with a strong separation of the MBL from the middle troposphere, the ozone mixing ratio sharply increases to a maximum with the crossing of the inversion level. Then, although the partial pressure of ozone decreases rather rapidly with altitude, the mixing ratio increases slowly. For example, the mixing ratio corresponding to the October 20 sounding is 80 ppbv at 620 mbar, increases slightly to 91 ppbv at 300 mbar, and is nearly the same (88 ppbv) at the 200 mbar level. The September 29 ozone profile (Figure 5) is quite similar, with yet a slightly more rapid increase of the mixing ratio: this ratio is 65 ppbv at the 750 mbar level and increases regularly up to 80 ppbv at the 250 mbar level. These persistently high ozone mixing ratios in the middle troposphere could result from mixing. The saturated static energy profiles and the shearing of the flows, associated with the velocity's dropping to zero at the trade wind inversion level, actually suggest a mixing. Hence ozone (or ozone precursors) could be mixed in the middle troposphere during transport; this mixing could also occur just after or during ozone formation. Since the middle troposphere is strongly isolated from the MBL, where a rapid destruction of ozone is expected, a long transport of ozone and hence more mixing are possible. The lifetime of ozone in the middle troposphere is estimated at 15–30 days by Thompson *et al.* [this issue (a)]. In addition, it should be noticed on the ozone and humidity profiles of the September 29 sounding (Figure 5) that above the inversion level, humidity maxima correspond exactly to ozone minima. This anticorrelation suggests some contribution of humidity to the destruction of ozone, through chemical reactions associated with water vapor or compounds present with humidity. Anticorrelation of  $O_3$  and  $H_2O$  was noted by Carroll *et al.* [1990] over the Pacific Ocean, is apparent in Paluch *et al.*'s [1992] observations, and is discussed by Thompson [1994]. Evidence for a contribution of water vapor to the photochemical lifetime of ozone in remote marine zones is also given by Ayers *et al.* [1992].

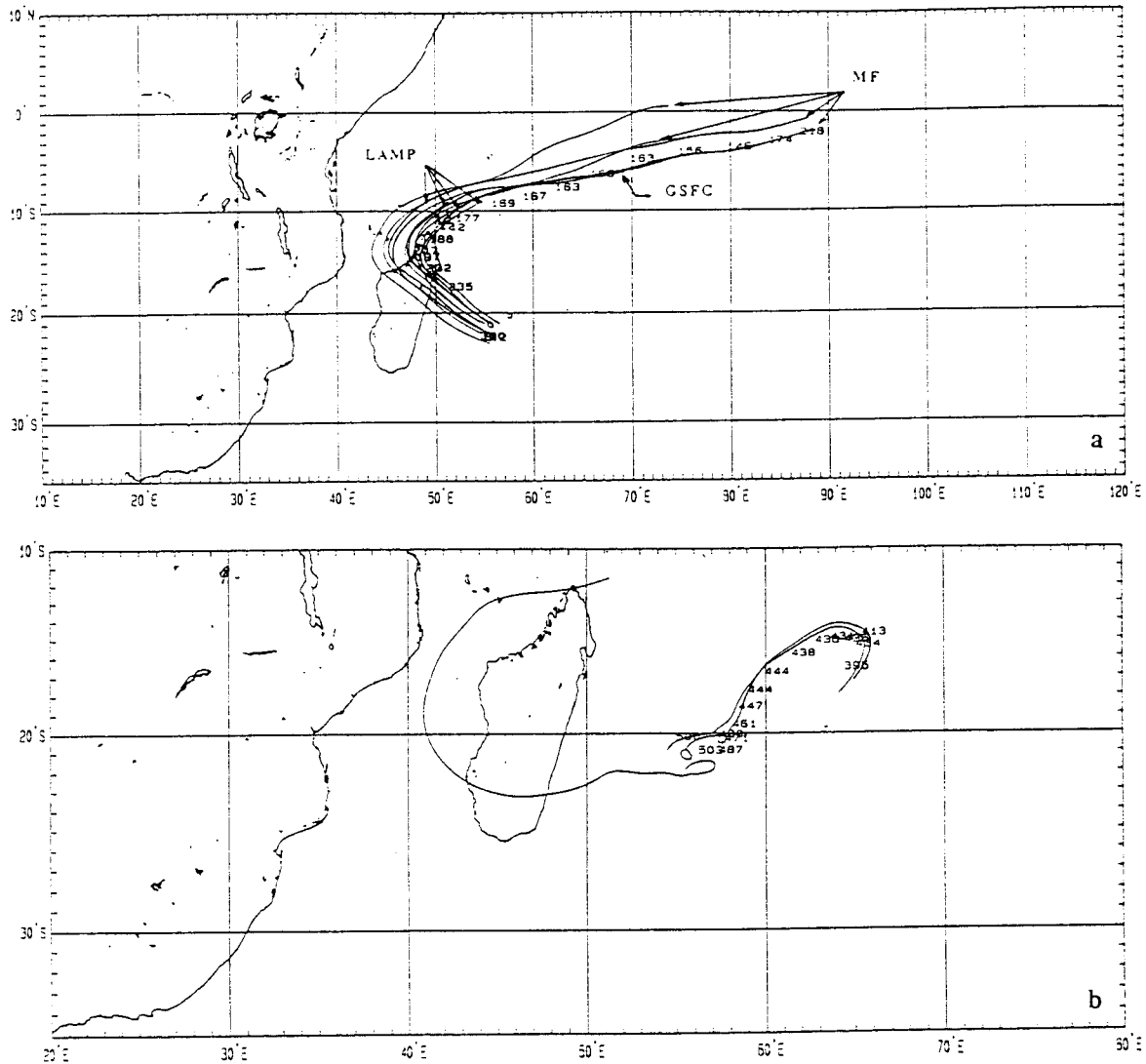
The Okaukuejo ozone profile (Figure 6) is quite similar to the October 20 profile from Reunion. Yet the ozone mixing ratio varies more with altitude at Okaukuejo than at Reunion and suggests less mixing in the former site, which is probably nearer to ozone sources originating from fires.

When freshly emitted biomass burning by-products are quickly uplifted to the free troposphere by deep convection, transport of these by-products and ozone is likely to be observable at upper levels of the middle troposphere. Wind velocities are usually large at these altitudes, and compounds that could rapidly eliminate burning by-products generally have a reduced concentration. The relative maxima of the ozone mixing ratio, at 250 mbar in the present ozone profiles from Reunion, imply efficient transport at this level. Hence, we first consider the 250 mbar level for backward trajectory analyses. Since the maximum of ozone mixing ratio at this level is better defined for the September 29 sounding, we choose this sounding as a case study for trajectory analyses. Cluster backward trajectories from 250 mbar level and this sounding date are presented in Figure 7a. These trajectories include first the cluster backward trajectories calculated, as in the previous case studies, by the French Meteorology Office using a kinematic trajectory model and ECMWF data. This first cluster includes backward trajectories from the arrival point and points shifted by  $1^\circ$  to the east and to the south, plotted with continuous lines and corre-

sponding to the MF symbol. We also plotted for comparison, with respectively LAMP and GSFC symbols, isentropic trajectories using ECMWF input from Y. Pointin (Laboratoire de Météorologie Physique, France, personal communication, 1994) and D. McNamara (Laboratory for Atmospheres, NASA Goddard Space Flight Center, personal communication, 1994). These different trajectory analyses agree well with each other and are compatible with the uncertainty suggested by the cluster dispersion. Quite surprisingly, these trajectories turn to the north and then to the east, suggesting that the air at this level is not coming directly from the nearest biomass burning zone (southeastern Africa) at the sounding date. The trajectories cross Madagascar. Yet, the high level of the ozone mixing ratio, the large vertical extension of the contamination, and the strong mixing of ozone in the whole troposphere above the MBL are not actually consistent with an ozone origin from some nearby biomass burning at Madagascar; the travel time from this place, indicated by trajectory computations, is only 1–2 days. Hence the trajectory analysis could not relate the different ozone contaminations observed in the September 29 sounding to a well-defined origin. The almost constant mixing ratio found in the whole middle troposphere is consistent with an extensive mixing of ozone, or ozone precursors, by turbulence during transport and suggests a long transport. The close correspondence between rather small humidity swells above the 700 mbar level and low ozone values in this profile are also consistent with a progressive elimination by humidity, and other compounds possibly associated with the humidity tracer, of some ozone during a long transport. From backward trajectories a contribution from southeastern Asia could still be conjectured.

Cluster back trajectories from the 500 mbar level, corresponding to the same sounding and presented in Figure 7b, corroborate this analysis. Owing to lower velocities at this level, displacements are less rapid, and trajectory accuracy is much lower. Yet, these back trajectories do not relate the observed ozone contamination to southeastern Africa and roughly point to the direction followed by the backward trajectories at the 250 mbar level.

To contrast with the austral spring season and trade wind situation, profiles corresponding to the February 23 sounding are presented in Figure 8. During the December to March period, summer at Reunion, trade winds weaken, and a deep convection develops, leading to a high humidity content in the whole troposphere. Temperature, humidity, and saturated static energy profiles in Figure 8 illustrate this regime. Open circles plotted with the ozone profile are tropospheric ozone averages from 40 soundings launched during the March to May period at Natal and replotted from Kirchhoff *et al.* [1991] for reference. During this period, ozone concentration in the troposphere is minimum at Natal. The tropospheric ozone content at Reunion is also very low at this date, and the matching of the Reunion profile with Natal averages is quite good on the whole. Natal averages are slightly over the Reunion ozone profile in the 700–500 mbar layer. Yet, in contrast with the Reunion typical profile, the Natal average profile is composed of many soundings over a rather long period, and occasional very long range contaminations leading to ozone maxima are possible. Sea level ozone concentration (14.5 ppbv) is similar to ocean values obtained at Samoa ( $14^\circ S$ ,  $171^\circ W$ ) [Oltmans, 1981; Piotrowicz *et al.*, 1991] and during a cruise south of the ITCZ in the Pacific Ocean [Piotrowicz *et al.*, 1991]. This sea level concentration is also comparable to sea values obtained at the



**Figure 7.** Cluster backward trajectories ending at Reunion on September 29, 1992, at (a) 250 mbar and (b) 500 mbar levels and using ECMWF outcomes. These trajectories include: 5-day kinematics trajectories from the French Meteorology Office (MF), and for the 250 mbar level (Figure 7a) 3-day isentropic trajectories from the Laboratoire de Météorologie Physique (LAMP) and a 4-day isentropic trajectory from the Laboratory for Atmospheres (Goddard Space Flight Center, GSFC). Pressures correspond to the MF trajectory arriving exactly at Reunion.

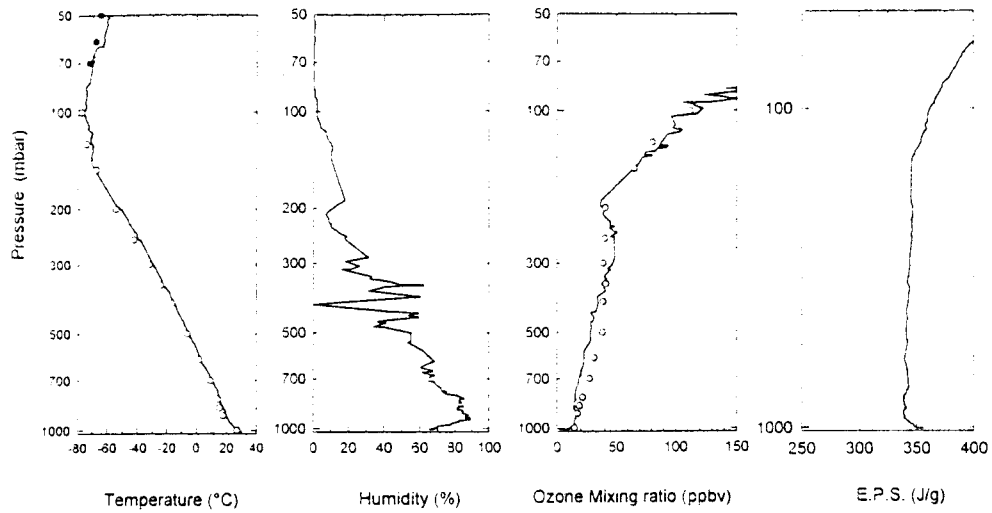
latitude of Reunion by *Johnson et al.* [1990] and *Smit et al.* [1989] during cruises in the Indian Ocean and the Atlantic Ocean.

To generalize the preceding inferences derived from case studies typical of situations occurring during each significant season, the seasonal variation of column-integrated tropospheric ozone over Reunion is presented in Figure 9. Integration is from the surface to 16.5 km, an altitude always below the tropopause. For reference, the average seasonal variation of the troposphere column amount at Natal between the surface and 200 mbar is replotted from *Kirchhoff et al.* [1991] with open circles. This seasonal variation from Natal is an average obtained from 157 ECC ozonesondes launched in the period 1978–1988. We also replotted, in the same figure, Ascension Island and Brazzaville seasonal variations of integrated tropospheric ozone amounts from *Cros et al.* [1992] with solid tri-

angles and squares, respectively. These seasonal variations correspond to the June 1990 to May 1991 period.

It should first be noted that the amplitude of the seasonal cycle of tropospheric ozone at Reunion is strong: Tropospheric ozone variation, beyond the nonburning season, is up to 30 Dobson units (DU). The highest tropospheric integrals are found during the September to mid-December period. During this period the tropospheric contribution to total columnar ozone is large, up to 50–55 DU. This seasonal variation complements the previous case studies of typical profiles and is consistent with an important biomass burning contribution to tropospheric ozone during the September to November period.

This cycle is very similar to the Natal cycle. Yet, because Natal integration is only between the surface and 200 mbar, the contribution from the upper part of a tropospheric ozone pro-

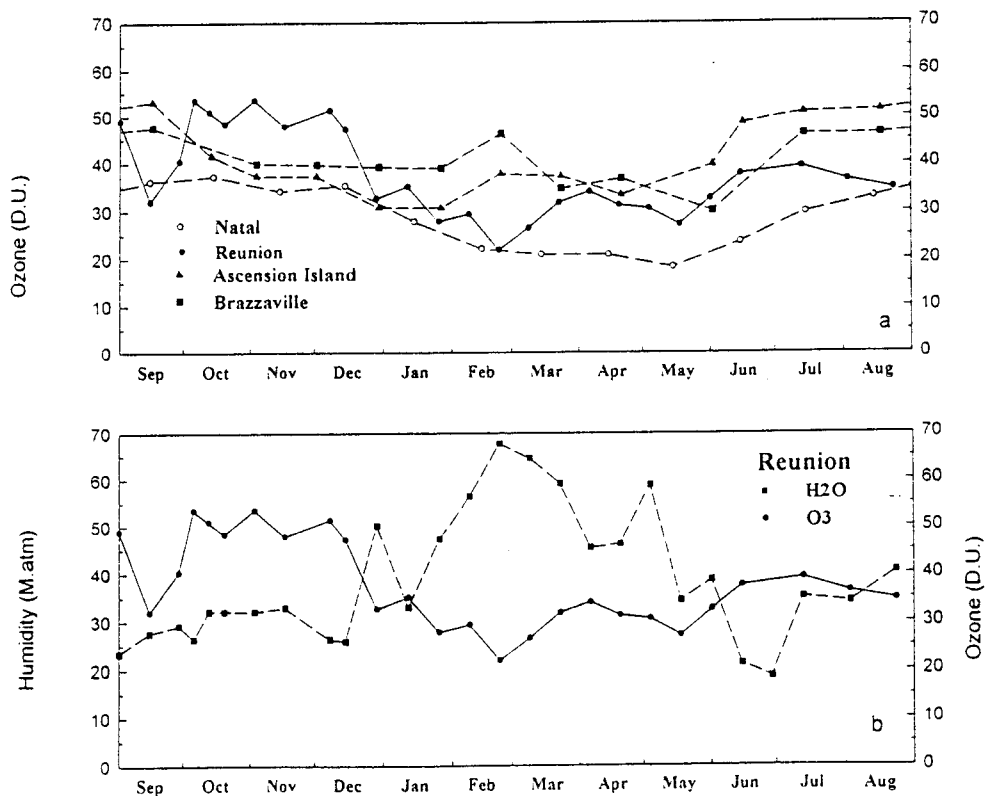


**Figure 8.** Southern summer characteristic profiles of temperature, humidity, ozone, and saturated static energy obtained at Reunion on February 23, 1993. Open circles are tropospheric ozone averages from Natal for the March to May period, replotted from *Kirchhoff et al.* [1991].

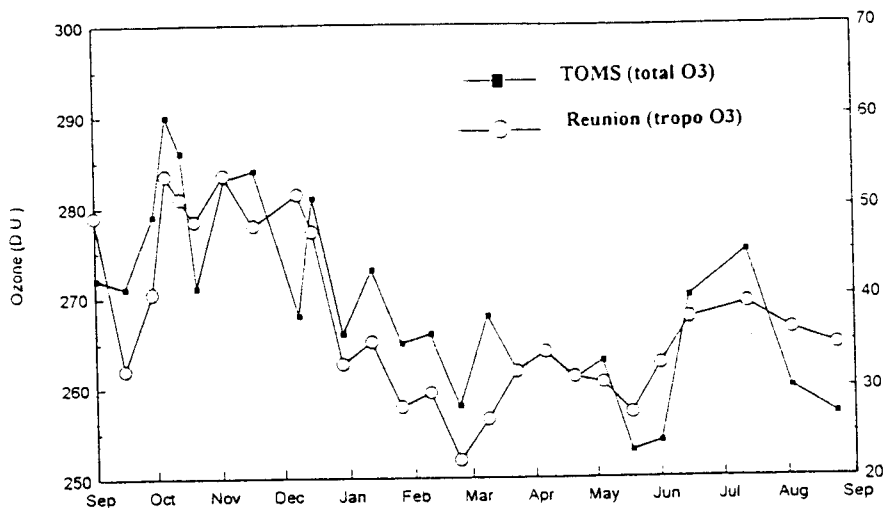
file is not included in Natal data, and these data are generally lower. In addition, averaging over 10 years smooths the Natal cycle and suppresses fluctuations present in the Reunion cycle. Tropospheric ozone fluctuations during the September to December period at Reunion could result from changes in burning activity and transport efficiency from burning zones, and

sporadic fires could also produce some fluctuations in reduced burning periods.

The amplitude of the seasonal cycle of tropospheric ozone at Ascension Island and the value of the maximum at this site are comparable to the corresponding values at Reunion. Yet, the Reunion cycle is back shifted by 2–3 months from the Ascen-



**Figure 9.** (a) Seasonal variation of integrated tropospheric ozone over Reunion and (b) comparison of this variation with the variation of integrated water. Integration is from the surface (24 m) to 16.5 km. Seasonal variations of integrated tropospheric ozone from Natal [*Kirchhoff et al.*, 1991], Brazzaville, and Ascension Island [*Cros et al.*, 1992] are replotted for comparison in Figure 9a. Integration for Natal data is from the surface to 200 mbar.



**Figure 10.** Comparison of seasonal variations of total O<sub>3</sub> column and integrated tropospheric O<sub>3</sub> over Reunion. Total O<sub>3</sub> is taken from gridded version 6.0 archived TOMS data.

sion Island or Brazzaville cycles. This different timing of these cycles is likely to result from the spatial and temporal distribution of fire emissions. From July to October, savanna burning in Africa increases in the eastern countries and wanes in western and interior nations, south of the equator [Cahoon *et al.*, 1992]. We also note, in contrast to Ascension Island and Brazzaville data, that a secondary peak is difficult to characterize in the Reunion cycle. In addition, integrated tropospheric ozone amounts are more variable at Reunion. These fluctuations could result from a greater variability of ozone content of air masses arriving at Reunion. Yet, it should be noted that Ascension Island and Brazzaville data, unlike Reunion data, are monthly averages and that this averaging is expected to actually smooth these cycles. In addition, Reunion is at a higher southern latitude than Natal, Ascension Island, and Brazzaville. Owing to this more southern position, different transport mechanisms are possible. More years of soundings are needed to derive an accurate cycle of tropospheric ozone at Reunion and to arrive at more definite conclusions on these comparisons.

Finally, it should be noted that the seasonal cycle of tropospheric ozone at Reunion Island is nearly consistent with the seasonal fire activity in southeastern Africa [Justice *et al.*, this issue; Cahoon *et al.*, 1992]. The Reunion cycle is actually a little late with respect to fire activity. Justice *et al.*'s [this issue] results, corroborated by Thompson *et al.*'s [this issue (a)] observations, indicate that fire activity over southeastern Africa is maximum during September and drops off during October. The maximum of tropospheric ozone observed at Reunion is in October–November, 1 or 2 months later. This small time lag will be discussed in the following section.

To further investigate humidity influence on tropospheric ozone, the seasonal variation of integrated water content between ground level and 16.5 km is also given in Figure 9b. Ozone and humidity variations are clearly anticorrelated. This anticorrelation is higher during the fire period (September–November) and during the ozone elimination in the free troposphere by summer convection of water vapor and MBL compounds (December–March). Because higher amounts of tropospheric ozone are available to water vapor destruction during these periods, a higher anticorrelation is indeed ex-

pected. This anticorrelation of integrated amounts with season corroborates the anticorrelation with altitude between water vapor and ozone noted on individual profiles.

The integrated tropospheric ozone amounts obtained at Reunion for the reference period (September 1992 to August 1993) are compared in Figure 10, using solid circles, with total ozone mapping spectrometer (TOMS) total ozone data (version 6.0 archive) for the same period, plotted as solid squares. Correlation between these data is quite good, as shown by the high (0.77) correlation coefficient obtained between integrated tropospheric ozone and the TOMS data. This is comparable to a 0.70 correlation coefficient obtained between integrated tropospheric ozone and TOMS ozone at Brazzaville by Cros *et al.* [1992]. This good correlation corroborates the proposition by Fishman *et al.* [1990] and Cros *et al.* [1992] that TOMS total ozone could be a good alternative for measuring the variations of the amount of ozone in the troposphere at low latitudes.

## Discussion and Conclusion

Data from Reunion contribute to the intensive study of tropical tropospheric ozone during the International Global Atmospheric Chemistry (IGAC)/Southern African Fire Atmosphere Research Initiative (SAFARI-92) campaigns and document the finding of a troposphere with persistent layers of high O<sub>3</sub> over extended regions influenced by biomass burning [Thompson *et al.*, 1996].

High values of tropospheric ozone are observed in ozone vertical profiles from soundings made at Reunion during the September to November period of 1992. This period corresponds to the active biomass burning period in the southeastern African continent and Madagascar. Moreover, during this period (southern spring), characteristic tongues of enhanced ozone are apparent in ozone profiles in layers influenced by westerlies, above the inversion level. Backward trajectories from air parcels taken at the levels of these maxima generally trace back this enhanced ozone to southeastern Africa and Madagascar. Conversely, during the January to March period (southern summer), trade winds cease, southern Africa biomass burning is no longer active, humidity which induces the destruction of ozone photochemically is transported upward by

deep convection, and tropospheric ozone is minimum. During autumn (April to June), the trade winds are again blowing, but southern Africa fire activity is reduced, and the rather low level of tropospheric ozone during this season could be considered as further evidence for biomass burning influence.

These case studies are generalized by the seasonal variation of total tropospheric ozone that approximately follows the seasonal fire activity in southeastern Africa and Madagascar. Moreover, tropospheric ozone profiles and the seasonal cycle of tropospheric ozone at Reunion are quite similar to equivalent results from Brazzaville [Cros *et al.*, 1992] or from Natal [Logan and Kirchhoff, 1986; Kirchhoff *et al.*, 1991], measurement sites that are nearer to zones of extensive fire activity.

The present results further corroborate observations from satellite platforms [Fishman *et al.*, 1986; Krishnamurti *et al.*, 1993] and the comprehensive data set of in situ ozone measurements during the IGAC/SAFARI-92 campaigns [Thompson *et al.*, 1996] that suggest that the tropospheric ozone maxima in the southern tropical Atlantic and Indian Oceans result from transport of by-products from biomass burning in Africa and South America.

Yet, additional observations on the present results should be noted. First, the tropospheric ozone obtained at Reunion could be quite unexpectedly high. Although the Brazzaville October 19, 1990, profile is supposed to be a typical profile influenced by a nearby biomass burning [Cros *et al.*, 1992], the October 6 sounding from Reunion, when compared to the Brazzaville profile in Figure 2b, is similar to the Brazzaville profile, with maxima even higher than the Brazzaville maxima. Likewise, tropospheric ozone in the October 20, 1992, profile from Reunion, when compared to the October 5, 1992, profile from Okaukuejo in Figure 6, is very high and comparable to Okaukuejo values. Yet, it should be noted that the island of Reunion is rather distant from extensive biomass burning sources.

In addition, the tropospheric ozone contamination at Reunion concerns middle and rather high levels in the troposphere. In comparison with the Brazzaville profile in Figure 2b, we observe that enhanced ozone values in the upper part of the troposphere are higher at Reunion than at Brazzaville. Hence the mechanism producing such ozone is expected to involve four basic processes: (1) the releasing of biomass burning by-products by extensive fires, (2) the uplift of these by-products by a deep convection, (3) the photochemical production of ozone from biomass burning by-products, and (4) the horizontal transport of these products and ozone from burning sites. It is clear [Chatfield and Delany, 1990; Pickering *et al.*, 1992] that the final outcome, an elevated tropospheric ozone concentration at some location (here Reunion), highly depends on the serial order and the respective embedding of these basic processes.

The sequence 1-3-2-4 corresponds to a classical scheme, the cook-then-mix scheme in Chatfield and Delany's [1990] parlance, and is something like the plume transport and dispersion of a contaminant. Yet, this scheme does not represent the present data very well. Wind shear and turbulence are expected to disperse ozone, horizontally and vertically, during transport, and ozone concentration should be noticeably lower at a distance than next to biomass burning places, and much lower at more distant sites. Here, on individual profiles or on seasonal variation of integrated tropospheric ozone (Figure 9a), we observe quite the opposite, in agreement with the finding by Cros *et al.* [1992] of comparable or higher tropo-

spheric ozone contents at Ascension Island than at Brazzaville. Hence some ozone production from burning by-products should occur after the deep convection process, and the 1-2-3-(4 + 3) mechanism is more likely.

Case studies of large tongues of enhanced tropospheric ozone during late September, October, and November at Reunion (Figures 2, 4, and 5) are still consistent with this mechanism. During this period, owing to the ITCZ approach, a deep convection that could enhance biomass burning effects is possible. In addition, this mechanism could make sense of the time lag of the seasonal maximum of integrated tropospheric ozone (Figure 9) with respect to fire activity in the region that is more likely to influence Reunion, i.e., southeastern Africa [Justice *et al.*, this issue]. Indeed, in the context of this mechanism, efficient fires for ozone contamination at a distance are not actually the most extensive fires, but fires combined with some intense convection. Since in the (southern) tropics convection develops with the ITCZ approach during late (southern) spring, the ozone contamination should be time shifted with respect to fire activity. Because of early precipitation, the ITCZ approach should reduce fire activity but increase convection and should augment ozone production. Hence ozone contamination from biomass burning is expected to lag with fire activity.

In addition, owing to the capping of the MBL by a strong temperature inversion over the tropical oceans during extended periods, burning by-products are rather isolated from the MBL compounds, and destruction of ozone, or ozone precursors, should be slow.

Ozone mixing ratios obtained at Reunion in the MBL are generally much lower than in the free troposphere. However, these MBL mixing ratios are consistent with sea level mixing ratios obtained at Samoa, with shipboard data at remote locations, and with mixing ratios from marine sites. Reunion data follow quite closely the seasonal cycle of surface ozone at Cape Grim [Ayers *et al.*, 1992], which is characteristic of a baseline (clean) marine site (Table 1). This result is consistent with a strong photochemical control of ozone concentration in the MBL, i.e., a regulation of ozone over an equilibrium concentration by MBL compounds [Ayers *et al.*, 1992; Sievering *et al.*, 1992].

Furthermore, we observed in ozone profiles supposedly contaminated by ozone incursions from biomass burning that humidity maxima correspond exactly to ozone minima. In addition, the comparison of the seasonal cycles of integrated tropospheric ozone and of integrated water content indicates that ozone and humidity are anticorrelated. During the January to March period (austral summer), as deep convection develops and lifts water vapor and MBL compounds up into the free troposphere, we obtain (Figure 8) very flat profiles of tropospheric ozone. Here convection is helping to destroy ozone in a way that is antisymmetric to the mix-then-cook ozone-enhancing scheme of Chatfield and Delany [1990].

More insight in the tropospheric ozone distribution at low latitudes is then likely to stem from further observations from satellite platforms, more measurements over isolated marine sites in the tropics, and improvements in the theoretical modeling of tropospheric dynamical processes and of the photochemistry of ozone.

**Acknowledgments.** This work was supported by the French Ministère de l'Éducation Nationale, by the CNRS/INSU for sounding op-

**Table 1.** Comparison of Ozone Concentration in the Marine Boundary Layer at Reunion and Cape Grim (Australia, 41°S)

	Marine Boundary Layer Ozone Concentration, ppvb						
	Sept. 1, 1992	Sept. 29, 1992	Oct. 6, 1992	Oct. 20, 1992	Nov. 17, 1992	Feb. 23, 1993	June 29, 1993
Reunion	33	28.5	25	25	23	14.5	27
Cape Grim	31	29	28	27	22	17	31

Reunion data correspond to nearly constant portions of ozone profiles in the MBL; i.e., data corresponding to launching values and enhanced ozone tongues were skipped over. Cape Grim concentrations, obtained from Ayers *et al.* [1992], are taken at 100 m altitude on the seaward edge of Cape Grim station and correspond to ocean clean air masses; i.e., these data were selected according to wind direction and particle concentration criteria to define baseline periods of clean oceanic air.

erations, and by the Conseil Régional de La Réunion. For continuous interest and support, we are grateful to Jean Leveau, Director of the Laboratoire de Physique de l'Atmosphère, and also to Gérard Mégie, Director of the Institut Pierre Simon Laplace. We especially thank Anne Thompson for helpful comments about an early draft. The Météo France Office is acknowledged for most of the mass trajectory data and we are indebted to ORSTOM-La Réunion staff for help in plotting these data. We also thank Yves Pointin of Laboratoire de Météorologie Physique and Donna McNamara of NASA Goddard Space Flight Center for kindly providing trajectory computations. The support of Gérard Legoff and the collaboration of the Direction de Réunion de Météo France were very valuable to the success of the sounding program. We also appreciate the help of Jean-François Folio and Fred Hoareau for the computer work and the instrument preparation.

## References

- Ayers, G. P., S. A. Penkett, R. W. Gillett, B. Bandy, I. E. Galbally, C. P. Meyer, C. M. Elsworth, S. T. Bentley, and B. W. Forgan. Evidence for photochemical control of ozone concentrations in unpolluted marine air. *Nature*, 360, 446–449, 1992.
- Barnes, R. A., A. R. Bandy, and A. L. Torres. Electrochemical concentration cell ozonesonde accuracy and precision. *J. Geophys. Res.*, 90, 7881–7888, 1985.
- Cahoon, D. R., Jr. B. J. Stocks, J. S. Levine, W. R. Cofer III, and K. P. O'Neill. Seasonal distribution of African savanna fires. *Nature*, 359, 812–815, 1992.
- Carroll, M. A., et al. Aircraft measurements of NO<sub>x</sub> over the eastern Pacific and continental United States and implications for ozone production. *J. Geophys. Res.*, 95, 10,205–10,233, 1990.
- Chatfield, R. B., and A. C. Delany. Convection links biomass burning to increased tropical ozone: However, models will tend to overpredict O<sub>3</sub>. *J. Geophys. Res.*, 95, 18,473–18,488, 1990.
- Cros, B., D. Nganga, A. Minga, J. Fishman, and V. Brackett. Distribution of tropospheric ozone at Brazzaville, Congo, determined from ozonesonde measurements. *J. Geophys. Res.*, 97, 12,869–12,875, 1992.
- Crutzen, P. J., A. C. Delany, J. Greenberg, P. Haagenson, L. Heidt, R. Lueb, W. Pollack, W. Seiler, A. Wartburg, and P. Zimmerman. Tropospheric chemical composition measurements in Brazil during the dry season. *J. Atmos. Chem.*, 2, 233–256, 1985.
- Delany, A. C., P. Haagenson, S. Walters, A. F. Wartburg, and P. J. Crutzen. Photochemically produced ozone in the emission from large-scale tropical vegetation fires. *J. Geophys. Res.*, 90, 2425–2429, 1985.
- Diab, R. D., A. M. Thompson, M. Zuncel, G. J. R. Coetzee, J. B. Combrink, G. E. Bodeker, J. Fishman, F. Sokolic, D. P. McNamara, C. B. Archer, and D. Nganga. Vertical ozone distribution over southern Africa and adjacent oceans during SAFARI-92. *J. Geophys. Res.*, this issue.
- Findlater, J. A major low-level air current near the Indian Ocean during the northern summer. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 95, 362–380, 1969.
- Findlater, J. Aerial exploration of the low-level cross equatorial current over eastern Africa. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 98, 274–289, 1972.
- Findlater, J. Observational aspect of the low-level cross equatorial jet stream of the western Indian Ocean. *Pure Appl. Geophys.*, 115, 1251–1262, 1977.
- Fishman, J., and P. J. Crutzen. The origin of ozone in the troposphere. *Nature*, 274, 855–857, 1978.
- Fishman, J., V. Ramanathan, P. J. Crutzen, and S. C. Liu. Tropospheric ozone and climate. *Nature*, 282, 818–820, 1979.
- Fishman, J., P. Minnis, and H. G. Reichle Jr. Use of satellite data to study tropospheric ozone in the tropics. *J. Geophys. Res.*, 91, 14,451–14,465, 1986.
- Fishman, J., C. E. Watson, J. C. Larsen, and J. A. Logan. The distribution of tropospheric ozone determined from satellite data. *J. Geophys. Res.*, 95, 3599–3617, 1990.
- Fishman, J., K. Fakhruzzaman, B. Cros, and D. Nganga. Identification of widespread pollution in the southern hemisphere deduced from satellite analyses. *Science*, 252, 1693–1696, 1991.
- Hastenrath, S. Climate dynamics of the tropics. Kluwer Acad., 1991.
- Hilsenrath, E., et al. Results from the balloon ozone intercomparison campaign (BOIC). *J. Geophys. Res.*, 91, 13,137–13,152, 1986.
- Johnson, J. E., R. H. Gammon, J. Larsen, T. S. Bates, S. J. Oltmans, and J. Carl Farmer. Ozone in the marine boundary layer over the Pacific and Indian oceans: Latitudinal gradients and diurnal cycles. *J. Geophys. Res.*, 95, 11,847–11,856, 1990.
- Justice, C. O., J. D. Kendall, P. R. Dowty, and R. J. Scholes. Satellite remote sensing of fires during the SAFARI campaign using NOAA advanced very high resolution radiometer data. *J. Geophys. Res.*, this issue.
- Kirchhoff, J. H., R. A. Barnes, and A. L. Torres. Ozone climatology at Natal, Brazil, from in situ ozonesonde data. *J. Geophys. Res.*, 96, 10,899–10,909, 1991.
- Komhyr, W. D. Electrochemical concentration cells for gas analysis. *Ann. Geophys.*, 25, 203–210, 1969.
- Komhyr, W. D., and T. B. Harris. Development of an ECC ozonesonde. *NOAA Tech. Rep. ERL 200-APCL18*, 54 pp., Natl. Oceanic and Atmos. Admin., Silver Spring, Md., 1971.
- Krishnamurti, T. N., H. E. Fuelberg, M. C. Sinha, D. Oosterhof, E. L. Bensman, and V. B. Kumar. The meteorological environment of the tropospheric ozone maximum over the tropical South Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 98, 10,621–10,641, 1993.
- Logan, J. A. Tropospheric ozone: Seasonal behavior, trends, and anthropogenic influence. *J. Geophys. Res.*, 90, 10,463–10,482, 1985.
- Logan, J. A., and J. H. Kirchhoff. Seasonal variations of tropospheric ozone at Natal, Brazil. *J. Geophys. Res.*, 91, 7875–7881, 1986.
- Monin, A. S., and A. M. Yaglom. *Statistical Fluid Mechanics: Mechanics of Turbulence*, vol. 1. MIT Press, Cambridge, Mass., 1973.
- Oltmans, S. J. Surface ozone measurements in clean air. *J. Geophys. Res.*, 86, 1174–1180, 1981.
- Paluch, I. R., D. H. Lenschow, J. G. Hudson, and R. Pearson Jr. Transport and mixing processes in the lower troposphere over the ocean. *J. Geophys. Res.*, 97, 7527–7542, 1992.
- Pickering, K. E., A. M. Thompson, J. R. Scala, W.-K. Tao, R. R. Dickerson, and J. Simpson. Free tropospheric ozone production following entrainment of urban plumes into deep convection. *J. Geophys. Res.*, 97, 17,985–18,000, 1992.
- Pickering, K. E., A. M. Thompson, D. P. McNamara, and M. R. Schoeberl. An intercomparison of isentropic trajectories over the South Atlantic. *Mon. Weather Rev.*, 122, 864–879, 1994.



- Pickering, K. E., et al., Convective transport of biomass burning emissions over Brazil during TRACE A, *J. Geophys. Res.*, this issue.
- Piotrowicz, S. R., H. F. Bezdek, G. R. Harvey, M. Springer-Young, and K. J. Hanson, On the ozone minimum over the equatorial Pacific Ocean, *J. Geophys. Res.*, **96**, 18,679–18,687, 1991.
- Ramanathan, V., and R. E. Dickinson, The role of stratospheric ozone in the zonal and seasonal radiation energy balance of Earth troposphere system, *J. Atmos. Sci.*, **36**, 1084–1104, 1979.
- Scheel, H. E., E. G. Brunke, and W. Seiler, Trace gas measurements at the monitoring station Cape Point, South Africa, between 1978 and 1988, *J. Atmos. Chem.*, **11**, 191–210, 1990.
- Sievering, H., J. Boatman, E. Gorman, Y. Kim, L. Anderson, G. Ennis, M. Luria, and S. Pandis, Removal of sulphur from the marine boundary layer by ozone oxidation in sea-salt aerosols, *Nature*, **360**, 571–573, 1992.
- Smit, H. G. J., D. Kley, S. McKeen, A. Volz, and S. Gilge, The latitudinal and vertical distribution of tropospheric ozone over the Atlantic Ocean in the southern and northern hemispheres, in *Ozone in the Atmosphere*, edited by R. D. Bojkov, and P. Fabians, pp. 419–422, A. Deepak, 1989.
- Thompson, A. M., Oxidants in the unpolluted marine atmosphere, in *Environmental Oxidants*, edited by J. O. Nriagu and M. S. Simmons, pp. 31–61, John Wiley, New York, 1994.
- Thompson, A. M., K. E. Pickering, D. P. McNamara, M. R. Schoeberl, R. D. Hudson, J. H. Kim, E. V. Browell, V. W. J. H. Kirchhoff, and D. Nganga, Where did tropospheric ozone over southern Africa and the tropical Atlantic come from in October 1992?: Insights from TOMS, GTE, TRACE A, and SAFARI-92, *J. Geophys. Res.*, this issue (a).
- Thompson, A. M., K. E. Pickering, D. P. McNamara, M. R. Schoeberl, R. D. Hudson, J. H. Kim, E. V. Browell, J. Fishman, V. W. J. H. Kirchhoff, D. Nganga, Where did tropospheric ozone over southern Africa and the tropical Atlantic come from in October 1992? Insights from TOMS, GTE, TRACE A and SAFARI-92, *J. Geophys. Res.*, this issue (b).
- Thompson, A. M., T. Zenker, G. E. Bodeker, and D. P. McNamara, Ozone over southern Africa: Patterns and influences, in *Fire in Southern African Savannas: Ecological and Atmospheric Perspectives*, edited by J. A. Lindsay, M. O. Andreae, P. D. Tyson, and B. Van Wilgen, Witwatersrand, Johannesburg, South Africa, in press, 1996.
- G. Ancellet, Service d'Aéronomie, Université Paris, 6 Jussieu, 75230 Paris, France.
- A. Badr, S. Baldy, M. Bessaï, and D. Lan Sun Luk, Laboratoire de Physique de l'Atmosphère Université de La Réunion, 97715 Saint-Denis Messag Cedex 9, France.

(Received July 14, 1994; revised April 19, 1995; accepted April 19, 1995.)

## Time domain analysis of electromagnetic wave propagation in stratified media

M. Mamode and J. D. Lan Sun Luk

Laboratoire de Génie Industriel  
Faculté des Sciences - Université de la Réunion  
15, av. R. Cassin, BP 7151, 97715 Saint-Denis Messag Cedex 9  
Réunion, France

**Abstract**—We investigate the plane-wave solution of Maxwell's equations for a stratified medium characterized by a slowly varying index  $n(z)$ . The study is carried out in the time domain. We show that the transmitted wave from a source generates reflected wavelets which are propagated in the opposite direction. The reflected wave may be interpreted as the propagation medium response to the source excitation. The medium is thus characterized by a transfer function and an impulse response exclusively dependent on the propagation velocity. Conversely, knowing the impulse response makes estimating the index  $n(z)$  possible.

### I. INTRODUCTION

We study the propagation of a plane electromagnetic wave in the direction  $\bar{e}_z$  through an inhomogeneous non-magnetic and non-conductive medium which is stratified along this direction. This semi-infinite medium  $z \geq 0$  may be characterized by the magnetic permeability  $\mu_0$  and the permittivity  $\varepsilon(z) = \varepsilon_0 n^2(z)$  where the refractive index  $n(z)$  is a real function that we suppose to be differentiable and slowly varying with regard to the  $z$ -coordinate. This classical problem has already been widely studied by several authors and is of considerable importance in various fields of physics. Thus, the same description, by strict analogy, appears in optics [1], in acoustics [2], in geophysics [3] or in transmission line theory [4].

In this paper, our study is fundamentally close to H. Bremmer's [5]. But, contrary to his approach and those of several others who deal with the same problem [2,6], we use in this paper a time domain description of electromagnetic fields instead of the usual harmonic formulation. If a transmitted (or refracted) wave is propagated in the medium in the direction of increasing  $z$ , a reflected wave appears in the opposite direction on account of the inhomogeneity of the medium. At each point  $z > 0$  of the medium, the transmitted and reflected fields can be expressed, in a simple manner, in terms of the field at  $z = +0$ . We may consider the propagation medium as a linear system characterized whether in transmission or in reflection, for given  $z > 0$ , by an impulse response or, in terms of the Laplace transform, a transfer function dependent only upon  $n(z)$ .

In addition, we show that the knowledge only of the reflection impulse response at  $z = +0$  is sufficient to calculate the index profile  $n(z)$  for  $z \geq 0$ .

## II. BASIC DIFFERENTIAL EQUATIONS

For a perfectly dielectric medium, Maxwell's equations reduce to [7]

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\mu_0 \vec{H}) \quad (1)$$

$$\nabla \times (\mu_0 \vec{H}) = \frac{n^2(z)}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2)$$

$c$  being the vacuum velocity of light.

We consider plane wave solutions propagated along the  $z$ -axis. The electromagnetic field is written as follows

$$\mu_0 \vec{H} = \frac{n(z)}{c} \vec{s} \times \vec{E}, \quad \vec{s} = \pm \vec{e}_z, \quad \vec{E} = \vec{E}(z, t), \quad \vec{H} = \vec{H}(z, t) \quad (3)$$

and we assume that the electric field is polarized in the  $xy$ -plane i.e.  $\vec{e}_z \cdot \vec{E}(z, t) = 0$ .

We distinguish waves propagated in the direction of increasing  $z$  and decreasing  $z$  with the subscript  $+$  and  $-$  respectively. In what follows, we shall consider a plane wave arriving from a homogeneous space  $z \leq 0$  with an uniform refractive index  $n_0 = n(0)$  traveling in the direction of increasing  $z$  till it enters into the stratified medium. Therefore, considering the medium with varying refractive index, we look for solutions in the following form which describe upwards and downwards traveling modes

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_+(z, t) + \vec{E}_-(z, t) \quad (4)$$

and, according to (3),

$$\mu_0 \vec{H}(z, t) = \frac{n(z)}{c} \vec{e}_z \times (\vec{E}_+(z, t) - \vec{E}_-(z, t)) \quad (5)$$

$\vec{E}_+(z, t)$  thus refers to up-going or transmitted waves and  $\vec{E}_-(z, t)$  to down-going or reflected waves. From the point of view of the energy, we may consider that the flow of electromagnetic energy across any  $xy$ -plane can be decomposed into an up-going flow and a down-going one, expressed by the Poynting vector

$$\vec{S} = \frac{c}{4\pi} \vec{E} \times \vec{H} = \frac{n(z)}{4\pi\mu_0} (\vec{E}_+^2(z, t) - \vec{E}_-^2(z, t)) \vec{e}_z \quad (6)$$

We now substitute the expressions (4) and (5) into Maxwell's equations (1) and (2) and we obtain after simplification

$$\frac{\partial \vec{E}_+(z, t)}{\partial z} + \frac{\partial \vec{E}_-(z, t)}{\partial z} = -\frac{n(z)}{c} \left( \frac{\partial \vec{E}_+(z, t)}{\partial t} - \frac{\partial \vec{E}_-(z, t)}{\partial t} \right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{c} \frac{dn}{dz} (\vec{E}_+(z, t) - \vec{E}_-(z, t)) + \frac{n(z)}{c} \left( \frac{\partial \vec{E}_+(z, t)}{\partial z} - \frac{\partial \vec{E}_-(z, t)}{\partial z} \right) \\ = -\frac{n^2(z)}{c^2} \left( \frac{\partial \vec{E}_+(z, t)}{\partial t} + \frac{\partial \vec{E}_-(z, t)}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

These expressions show clearly that the variations of fields  $\vec{E}_+$  and  $\vec{E}_-$  are connected on account of the inhomogeneity of the medium. It is even more evident if we write these equations (7) and (8) like this

$$\frac{\partial \vec{E}_+(z, t)}{\partial z} + \frac{n(z)}{c} \frac{\partial \vec{E}_+(z, t)}{\partial t} = - \frac{1}{2n(z)} \frac{dn}{dz} \left( \vec{E}_-(z, t) - \vec{E}_+(z, t) \right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \vec{E}_-(z, t)}{\partial z} - \frac{n(z)}{c} \frac{\partial \vec{E}_-(z, t)}{\partial t} = + \frac{1}{2n(z)} \frac{dn}{dz} \left( \vec{E}_+(z, t) - \vec{E}_-(z, t) \right) \quad (10)$$

For a homogeneous medium ( $n(z) = n_0$ ), the preceding equations effectively give the usual independent solutions,  $\vec{f}$  and  $\vec{g}$  being two arbitrary fields,

$$\vec{E}_+(z, t) = \vec{f} \left( t - \frac{n_0}{c} z \right), \quad \vec{E}_-(z, t) = \vec{g} \left( t + \frac{n_0}{c} z \right) \quad (11)$$

which are really related to an up-going wave for one, and a down-going wave for the other. These waves are necessarily generated by two independent sources located, for instance, at  $z = -\infty$  and  $z = +\infty$ . In our case, with no source at  $z = +\infty$ ,  $\vec{g}$  is really null. Consequently, the plane wave is entirely transmitted, without deformation, from  $z = 0$  to  $z = +\infty$ . On the other hand, for a stratified medium ( $dn/dz \neq 0$ ), we shall see in Sec.IV that the transmitted wave, throughout the propagation, continuously generates down-going wavelets. Thus, in a continuous and permanent manner, a reflection phenomenon occurs in the medium. Since the medium is supposed to be slowly varying, we shall make the assumption that the reflected wave amplitude is small compared with the transmitted one. This assumption is the so-called WKB approximation [2,5].

Finally, we note as a consequence of the isotropy in the  $xy$ -plane that the equations (9) and (10) exhibit the same variations for each Cartesian component of the field along  $\vec{e}_x$  or  $\vec{e}_y$ . Hence, in the following we may denote either component by the same symbol :  $E_{\pm}$ .

### III. SOLUTION FOR A SLOWLY VARIABLE STRATIFIED MEDIUM

As mentioned earlier, we assume here that the amplitude  $E_-$  is small compared to  $E_+$ . Therefore, the equations to be solved are the following when  $E_-$  is considered negligible with respect to  $E_+$  in (9)

$$\frac{\partial E_+(z, t)}{\partial z} + \frac{n(z)}{c} \frac{\partial E_+(z, t)}{\partial t} = - \frac{1}{2n(z)} \frac{dn}{dz} E_+(z, t) \quad (12)$$

$$\frac{\partial E_-(z, t)}{\partial z} - \frac{n(z)}{c} \frac{\partial E_-(z, t)}{\partial t} = + \frac{1}{2n(z)} \frac{dn}{dz} (E_+(z, t) - E_-(z, t)) \quad (13)$$

As a consequence, this simplification allows the direct solution of Eq. (12). By the Laplace transform with respect to the time  $t$ , and assuming that the time-dependent quantities  $E_+(z, t)$ ,  $E_-(z, t)$  may be causal distributions, the equations (12) and (13) are reduced to [8]

$$\frac{\partial \widehat{E}_+(z, p)}{\partial z} + \widehat{E}_+(z, p) \left( \frac{n(z)}{c} p + \frac{1}{2n(z)} \frac{dn}{dz} \right) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial \widehat{E}_-(z, p)}{\partial z} - \widehat{E}_-(z, p) \left( \frac{n(z)}{c} p - \frac{1}{2n(z)} \frac{dn}{dz} \right) = + \frac{1}{2n(z)} \frac{dn}{dz} \widehat{E}_-(z, p) \quad (15)$$

After a straightforward calculation, it can be shown that Eq. (14) has a solution of the form

$$\widehat{E}_+(z, p) = \widehat{E}_+(0, p) \widehat{H}_T(z, p) \quad (16)$$

where we have set

$$\widehat{H}_T(z, p) = \sqrt{\frac{n(0)}{n(z)}} e^{-p\tau(z)} \quad (17)$$

and

$$\tau(z) = \frac{1}{c} \int_0^z n(u) du, \quad z \geq 0 \quad (18)$$

Substituting (16) in (15), we obtain in the same way the solution of Eq. (15) written as

$$\widehat{E}_-(z, p) = \widehat{E}_+(0, p) \widehat{H}_R(z, p) \quad (19)$$

where

$$\widehat{H}_R(z, p) = \sqrt{\frac{n(0)}{n(z)}} e^{+p\tau(z)} \int_z^{+\infty} -\frac{1}{2n(\xi)} \frac{dn}{d\xi} e^{-2p\tau(\xi)} d\xi \quad (20)$$

provided that no source exists at  $z = +\infty$  i.e.  $\widehat{E}_-(+\infty, p) = 0$ .

Note that the results (19) and (20) show that the assumption of  $E_-$  being small compared to  $E_+$  holds only if  $|\widehat{H}_R(z, p)|$  is small for any  $z$ , i.e. if  $|dn/d\xi|$  is small everywhere which is effectively the case when the medium is only weakly stratified.

#### IV. TRANSFER FUNCTION AND IMPULSE RESPONSE OF THE MEDIUM

The preceding solutions (16) and (19) are expressed in a convenient factorized form exhibiting separately the contributions of the field and those of the medium to the propagation phenomena. Moreover, they clearly show that the transmitted and the reflected waves may be interpreted as the responses of the medium to an electromagnetic excitation at  $z = +0$  described by the electric field  $\vec{E}_+(+0, t)$ . In this point of view, the propagation medium, at every coordinate  $z$ , may be regarded like a linear system characterized by a transfer function for transmission:  $\widehat{H}_T(z, p)$ , and an equivalent one for reflection:  $\widehat{H}_R(z, p)$ . Their inverse Laplace transforms define then, as usual, the medium impulse response [8].

Hence, the impulse response for transmission may be written, at the coordinate  $z$ , as

$$H_T(z, t) = \sqrt{\frac{n(0)}{n(z)}} \delta(t - \tau(z)) \quad (21)$$

where  $\tau(z)$  is given by (18) and  $\delta$  denotes the Dirac distribution. Therefore the transmitted field may be expressed by

$$\vec{E}_+(z, t) = H_T(z, t) * \vec{E}_+(+0, t) = \sqrt{\frac{n(0)}{n(z)}} \vec{E}_+(+0, t - \tau(z)) \quad (22)$$

where the symbol  $\star$  denotes a convolution product. This result shows that, in such a slowly varying medium, the transmitted wave maintains all the features of a progressive wave. It is propagated in the direction of increasing  $z$  with a varying velocity  $c/n(z)$ . The quantity  $\tau(z)$ , therefore, represents the travel time from the origin to the coordinate  $z$ . On the other hand, its amplitude is varying with the  $z$ -coordinate: precisely, as  $1/\sqrt{n(z)}$  for the electric vector  $\vec{E}_+(z, t)$  and as  $\sqrt{n(z)}$  for the magnetic vector thus preserving the Poynting vector (see Eq. (6)) as expected. Thus, the energy content is shifted from the electric field to the magnetic field.

Concerning the impulse response for reflection  $H_R(z, t)$ , in order to simplify our purpose, we consider the peculiar case where the reflected wave is observed at the origin  $z = +0$ . The corresponding transfer function then becomes

$$\hat{H}_R(+0, p) = \int_0^{+\infty} -\frac{1}{2n(\xi)} \frac{dn}{d\xi} e^{-2p\tau(\xi)} d\xi \quad (23)$$

We deduce easily the impulse response for reflection

$$H_R(+0, t) = \int_0^{+\infty} -\frac{1}{2n(\xi)} \frac{dn}{d\xi} \delta(t - 2\tau(\xi)) d\xi \quad (24)$$

and we shall use subsequently the convention:  $H_R(+0, t) = h_R(t)$ . Since

$$\delta(t - 2\tau(\xi)) = \frac{1}{2} \frac{1}{\left(\frac{d\tau}{d\xi}\right)} \delta\left(\xi - \tau^{-1}\left(\frac{t}{2}\right)\right) \quad (25)$$

is valid for any increasing function  $\tau(\xi)$ , with in our case  $\frac{d\tau}{d\xi} = \frac{n(\xi)}{c}$ , the expression (24) gives after simplification

$$h_R(t) = \frac{1}{4} H(t) \left( \frac{d}{d\xi} \frac{c}{n} \right)_{\xi=\tau^{-1}\left(\frac{t}{2}\right)} \quad (26)$$

where  $H(t)$  is the Heaviside distribution.

This result shows that, for any instant  $t$ , one observes at the origin  $z = +0$  the contribution of the reflection which occurred at the point  $z = \xi = \tau^{-1}(t/2)$ . The wave which is transmitted from  $z = 0$  to  $z = \xi$ , and the reflected wavelet generated at this last point, have traveled through the same path, each one in the opposite direction, during the same duration  $t/2$  with the apparent velocity  $2\xi/t$ . On the other hand, the formula (26) expresses clearly that only the wavelet reflected at  $z = \xi$  is observed at the origin at  $t = 2\tau(\xi)$ . The waves reflected at any point  $z < \xi$  which could, after any number of successive reflections and transmissions in the medium, contribute to the observation of the down-going wave at the instant  $t$ , are totally neglected (c.f. Figure 1). As a matter of fact, it is only the consequence of our assumption made in Sec. III and, precisely, the idea formulated by the WKB approximation [5].

Furthermore, we note that the impulse response for reflection  $h_R(t)$  is completely expressed with the derivative of the propagation velocity  $c/n$ , the variable  $t$  being connected to the coordinate  $\xi$  by (18). Under these conditions, the reflected wave observed at  $z = +0$ , characterized by the electric field  $\vec{E}_-(+0, t)$

and interpreted as the response of the medium to the excitation  $\bar{E}_-(+0, t)$ , is given by the convolution product

$$\bar{E}_-(+0, t) = \frac{1}{4} H(t) \left( \frac{d}{dz} \frac{c}{n} \right)_{z=\tau^{-1}(t/2)} * \bar{E}_+(+0, t) \quad (27)$$

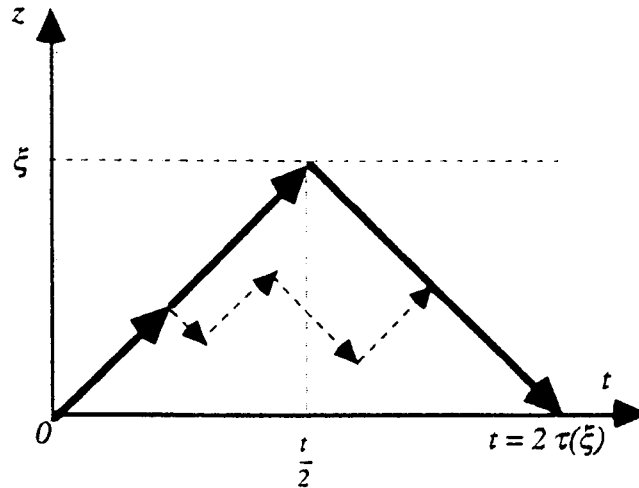


Figure 1. The wave observed at an instant  $t$  directly originates in the reflection of the transmitted wave at point  $\xi = \tau^{-1}(t/2)$ . Other additional contributions such as the dashed ray are neglected.

#### V. AN EXAMPLE OF THE REFLECTION IMPULSE RESPONSE

The preceding theory may be illustrated by the stratified medium with the refractive index

$$n(z) = 1 + \varsigma e^{-z/H}, \quad z \geq 0 \quad (28)$$

$\varsigma \ll 1$  and  $H$  have constant positive value. Such a model is frequently used in investigating electromagnetic propagation through the atmosphere. In some cases, one considers for convenience the standard atmosphere as a perfect dielectric, stratified with the altitude  $z$ . Incidentally, on limiting oneself to radio wavelengths, the standard values used for  $\varsigma$  and  $H$ , for  $3 \text{ km} \leq z \leq 8 \text{ km}$ , are [9]

$$\varsigma = 3.1510^{-4}, \quad H = 7.36 \text{ km}^{-1}$$

According to (18) and (26), we have

$$\tau(z) = \frac{1}{c} \left( z + \varsigma H (1 - e^{-z/H}) \right) = \frac{t}{2} \quad (29)$$

and

$$h_R(t) = \frac{\varsigma c}{4H} \frac{e^{-z/H}}{(1 + \varsigma e^{-z/H})^2} \quad (30)$$

with  $z = \tau^{-1}(t/2)$ . Thus, on keeping only the first-order term in  $\varsigma$ , the impulse response may be approximately written as

$$h_R(t) = \frac{\varsigma c}{4H} e^{-ct/2H} H(t) \quad (31)$$

The corresponding transfer function, to the same order of approximation, is then

$$\widehat{H}_R(+0, p) = \frac{\zeta c}{4H} \frac{1}{p + c/2H} \quad (32)$$

an expression that we should be able to obtain directly from (23). Thus, we may conclude that such a standard atmosphere behaves towards the reflected wave, observed at  $z = +0$ , like a low-pass filter with a cut-off frequency defined by

$$\nu_c = \frac{c}{4\pi H} \quad (33)$$

numerically in the region of 3 kHz. This is undoubtedly a very small value in consideration of the high frequencies that are typical of most electromagnetic phenomena. On the other hand, in the case of high frequency waves ( $\nu \gg \nu_c$ ), the propagation medium can be regarded like an integrator system for the emitted wave [10]. Accordingly, we can also write for such waves

$$\vec{E}_-(+0, t) \approx \frac{\zeta c}{4H} H(t) * \vec{E}_+(+0, t) = \frac{\zeta c}{4H} \int_0^t \vec{E}_+(+0, u) du \quad (34)$$

## VI. DETERMINATION OF THE REFRACTIVE INDEX FROM THE REFLECTION IMPULSE RESPONSE

The preceding example suggests how instructive the inverse question of determining the refractive index  $n(z)$  from a given response  $h_R(t)$  may be. For immediate purposes, we shall write down an expression of  $n(z)$  from  $h_R(t)$ . According to (26), we have by integration

$$\int_0^t h_R(t') dt' = \frac{1}{4} \int_0^t \left( \frac{d}{d\xi} \left( \frac{c}{n} \right) \right)_{\xi=\tau^{-1}(t'/2)} dt', \quad t \geq 0 \quad (35)$$

or, using in the last integral the new variable  $\xi = \tau^{-1}(t'/2)$  and setting  $t = 2\tau(z)$

$$\int_0^t h_R(t') dt' = \frac{1}{2} \int_0^z \frac{d}{d\xi} \left( \frac{c}{n} \right) \frac{n(\xi)}{c} d\xi = \ln \left( \sqrt{\frac{n(0)}{n(z)}} \right) \quad (36)$$

We have finally the desired formula

$$n(z) = n(0) \exp \left( -2 \int_0^{2\tau(z)} h_R(t') dt' \right) \quad (37)$$

By way of a first application, let us assume that the propagation medium behaves like an ideal integrator whose impulse response is known and is written as

$$h_R(t) = \alpha H(t), \quad \alpha \text{ constant} \quad (38)$$

Let us point out that such a filter does not satisfy the stability condition and cannot be physically realisable [10]. Nevertheless, this simple example, although physically unrealistic, enables us to illustrate the calculation.

From (36) and (18), it is easy to show that the expected index  $n(z)$  is the solution of the following integral equation

$$\ln \frac{n(z)}{n(0)} = -\frac{4\alpha}{c} \int_0^z n(u) du \quad (39)$$



Therefore we obtain without any difficulties the hyperbolic solution

$$n(z) = \frac{n(0)}{1 + \frac{\alpha}{c} n(0)z}, \quad z \geq 0 \quad (40)$$

to be compared with Bremmer's example discussed in [5].

Returning to the general case, the determination of the function  $n(z)$  from the given response  $h_R(t)$  with the aid of formulas (37) and (18) is not as direct as the preceding calculation. In these conditions, we propose, in order to calculate the index  $n(z)$ , the following general method of successive approximations. First, we set, for convenience

$$F(t) = n(0) \exp \left\{ -2 \int_0^t h_R(t') dt' \right\} \quad (41)$$

Thus, the function  $n(z)$  should be the limit of the sequence of functions  $n_k(z)$  defined by

$$n_0(z) = n(0), \quad n_k(z) = F \left( \frac{2}{c} \int_0^z n_{k-1}(u) du \right), \quad k \geq 1 \quad (42)$$

The problem of investigating the convergence of this sequence is not considered in this paper. Just as an informative example, if we use for  $\varsigma$  and  $H$  the numerical values given in Sec.V and taking:  $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$ , the impulse response (31) becomes

$$h_R(t) = 3.21e^{-2.03 \cdot 10^4 t}, \quad t \text{ in seconds} \quad (43)$$

and

$$n(0) = 1.000315 \quad (44)$$

The implementation of the recurrent formula (42) gives, after some calculations, successive solutions. The first four solutions appear as

$$\begin{cases} n_1(z) = 1.000 \exp(0.000315 e^{-0.136z}) \\ n_2(z) = 1.000 \exp \left( 0.560 e^{0.9997 Ei(0.000315 e^{-0.316z})} \right) \\ n_3(z) = n_1(z) \\ n_4(z) = n_2(z) \end{cases}$$

$Ei(\cdot)$  being the Exponential Integral function [8] and  $z$  being expressed in kilometers. These solutions are close to each other and little different from the expected limit  $n(z)$  given by (28) (c.f. Figure 2). Moreover, the sequence seems to be periodic but such a property remains to be proved.

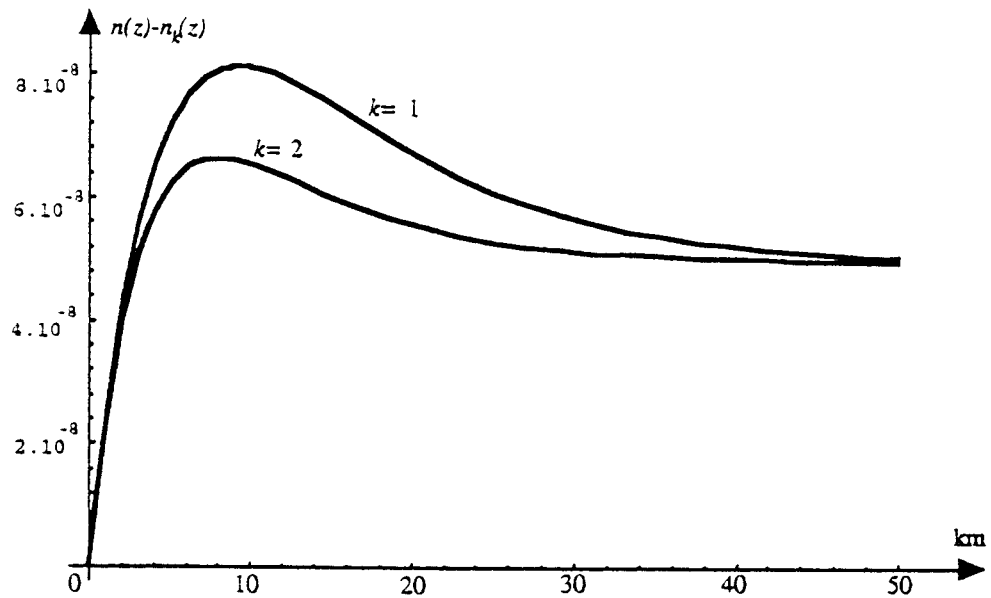


Figure 2. Difference between the computed solutions  $n_k(z)$  ( $k = 1, 2$ ) and the limit  $n(z)$ .

## VII. CONCLUSION

The investigation of the plane-wave solution of Maxwell's equations for a slowly varying stratified medium has shown all the advantages we can derive from the time domain approach. Whether in transmission or in reflection, the medium behaves like a linear filter characterized by an impulse response or a transfer function dependent only upon the refractive index  $n(z)$ . Such a study has an evident interest for impulsive wave propagation just as for steady-state or harmonic waves. We have limited ourselves to the case of a slowly varying semi-infinite medium and used for this purpose the WKB approximation. Our study requires to be extended to the general case, in particular to the case of discontinuous media.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank M. Bessafi and J. P. Chabriat for fruitful discussions.

## REFERENCES

1. Born, M., and E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press, 6th ed., 1980.
2. Brekhovskikh, L. M., and O. A. Godin, *Acoustics of Layered Media I*, Springer-Verlag, 1990.
3. Aminzadeh, F., and J. F. Mendel, "On the Bremmer series decomposition: equivalence between two different approaches," *Geophysical Prospecting*, Vol. 28, 71-84, 1980.
4. Kraus, J. D., *Electromagnetics*, MacGraw-Hill, 3rd ed., 1984.
5. Bremmer, H., "The W.K.B. approximation as the first term of a geometric-optical series," *Comm. Pure Appl. Math.*, Vol. 4, 105-115, 1951.

6. Gray, S. H., "On the convergence of the time-domain Bremmer series," *Wave Motion*, Vol. 5, 249–255, 1983.
7. Scharf, G., *From Electrostatics to Optics*, Springer-Verlag, 1994.
8. Abramowitz, M., and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, Dover Publications, 1972.
9. Sauvageot, H., "Radarmétéorologie," *Coll. Techn. Sci. Télécom.*, 29–31, Eyrolles, 1982.
10. Papoulis, A., *Signal Analysis*, MacGraw-Hill, 1977.

Malik Mamode was born in Paris, France in 1954. He received in 1981 the Ph.D. in Signal Processing from the Institute National Polytechnique of Grenoble, France. Currently, he is an Assistant Professor in the Department of Physics at the University of La Réunion. His research interests include waves propagation, information theory and applied mathematics.

Jean Daniel Lan Sun Luk was born in Réunion Island, on November 11, 1963. He received the Ph.D. in Electronics from the University of Nice, France. Under contract with CNET (France Télécom Research and Development Centre), he worked on microstrip antennas. Since 1990, he has been an Assistant Professor in the Department of Physics at the University of La Réunion. His research interests are in the area of wave propagation and measuring systems.

# L'utilisation des algorithmes génétiques pour l'identification de profils hydriques de sol à partir de courbes réflectométriques

*Genetic algorithms for the identification of soil water content profiles from time-domain reflectometry traces*

Pierre Todoroff<sup>a,b\*</sup>, Richard Lorion<sup>a</sup>, Jean-Daniel Lan Sun Luk<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire de génie industriel, université de La Réunion, BP 7151, 97715 Saint-Denis (messag.), La Réunion, France

<sup>b</sup> Cirad, ligne Paradis, 97410 Saint-Pierre, La Réunion, France

**Abstract**—We developed a unidimensional microwave propagation model in a stratified medium. It calculates, from a given soil water content profile, the reflected signal trace one would measure by time-domain reflectometry along a transmission line inserted in the soil. We identify the soil water content profile corresponding to a measured reflected signal trace using an identification technique based on optimisation of the model parameters by a genetic algorithm. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

**time domain reflectometry / TDR / soil water content profile / modeling / optimisation / genetic algorithm**

**Résumé** — Nous avons développé un modèle unidimensionnel de propagation de micro-ondes en milieu stratifié. Il permet de calculer, pour un profil hydrique de sol donné, le signal réfléchi que l'on mesurerait par réflectométrie temporelle le long d'une ligne de transmission enfoncée dans le sol. Nous identifions alors le profil hydrique du sol correspondant à une courbe de signal réfléchi, mesurée grâce à une technique d'identification basée sur l'optimisation des paramètres du modèle par un algorithme génétique. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

**réflectométrie temporelle / TDR / profil hydrique de sol / modélisation / optimisation / algorithme génétique**

## 1. Introduction

La connaissance précise de la consommation hydrique des plantes est essentielle pour une gestion adaptée de l'irrigation et le calage de modèles de bilans hydriques de plus en plus fins. Pour cela, il est nécessaire de connaître la répartition de la teneur en eau du sol dans l'horizon racinaire. La technique électromagnétique de mesure d'humidité du sol par réflectométrie dans le domaine temporel (TDR : *Time Domain Reflectometry*) est une méthode récemment adoptée en agronomie, qui se montre très performante pour des mesures ponctuelles (Cassel et al., 1994). Elle est basée sur l'émission d'un signal hyperfréquence, le long de guides d'ondes enfoncés dans

le sol. L'analyse du signal réfléchi en milieu homogène permet de déterminer la permittivité globale du sol, via la vitesse de propagation de l'onde, et l'humidité volumique par une relation d'étalonnage.

L'utilisation de cette technique pour mesurer des profils hydriques de sol se rapproche alors des situations que l'on rencontre dans de nombreux autres domaines, où l'on a recours à des sondages pour accéder aux caractéristiques internes des matériaux stratifiés : en géophysique, pour l'étude des structures géologiques profondes (méthodes sismiques ou acoustiques), en électronique, pour la caractérisation de composants en série (méthode similaire de réflectométrie dans le domaine temporel), etc. Le calcul des profils (géologiques, d'impédance...) passe alors par

Note présentée par Jean-Paul Poirier.

Note remise le 2 juin 1998, acceptée après révision le 5 octobre 1998.

\* E-mail : todoroff@dcirad.ir

l'inversion de la courbe de réponse temporelle du milieu (méthodes dites d'*inverse scattering*). Mais cette technique est extrêmement sensible au bruit de mesure.

Nous présentons dans cet article une autre voie, moins sensible, de calcul de profil (hydrique dans notre cas), basée sur l'optimisation par algorithmes génétiques des paramètres d'un modèle de simulation de courbes réflectométriques. Cette méthode est générale et peut être facilement adaptée à l'optimisation d'autres modèles similaires de propagation d'ondes en milieu hétérogène.

## 2. Le modèle de simulation de courbes réflectométriques

Il s'agit de simuler les courbes de signal réfléchi enregistrées par un réflectomètre. Pour cela, nous avons considéré le sol comme un milieu stratifié perpendiculairement aux guides et développé un modèle de propagation d'ondes à une dimension, le long d'une ligne composée de segments de différentes valeurs d'humidité  $W_v$ .

### Principes

Une relation d'étalonnage permet de déterminer la permittivité équivalente  $\epsilon_r$  à partir de l'humidité volumique  $W_v$  du milieu. On en déduit l'impédance  $Z$  de la ligne :

$$Z(x) = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r(x)}} \quad (1)$$

( $Z_0$  : impédance caractéristique de la ligne, constante fonction de sa géométrie).

On suppose que les caractéristiques diélectriques  $\epsilon_r(x)$  du milieu de propagation sont lentement variables. On définit alors un coefficient de réflexion à la limite entre deux strates  $i$  et  $i+1$  d'impédances différentes :

$$\rho_i = \frac{Z_{i+1} - Z_i}{Z_{i+1} + Z_i} \quad (2)$$

Ce coefficient détermine la répartition onde transmise/onde réfléchi lorsque le signal émis rencontre une variation d'impédance (voir *figure 1*).

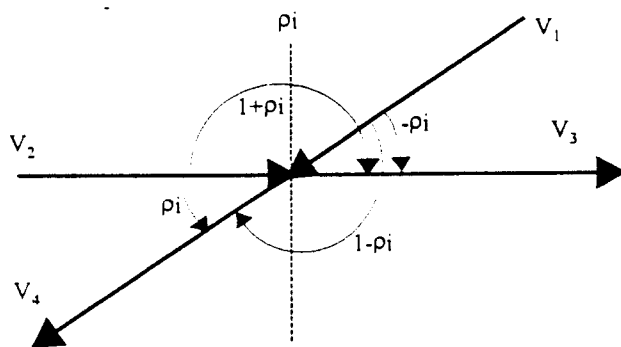


Figure 1. Répartition des ondes réfléchies et transmises en présence d'une discontinuité d'impédance.

Reflected and transmitted waves on an impedance discontinuity.

On a :

$$V_3 = (1 + \rho_i) V_2 - \rho_i V_1 \quad (3a)$$

$$V_4 = \rho_i V_2 + (1 - \rho_i) V_1 \quad (3b)$$

( $V_i$  : tensions des signaux incidents, transmis et réfléchis).

On peut donc, par itérations successives, appliquer les équations (3a) et (3b) pour chaque strate et construire le diagramme de la *figure 2*, qui représente la tension de la ligne au cours du temps et en tout point (d'après Yanuka et al., 1988).

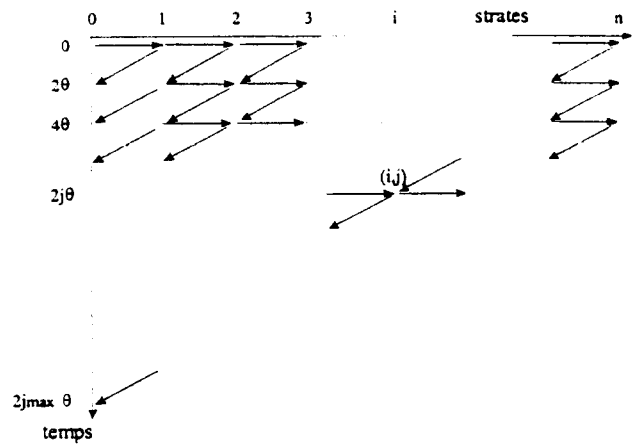


Figure 2. Diagramme des échos réfléchis et transmis le long de la ligne au cours du temps.

Temporal reflected and transmitted echoes diagram along a transmission line.

Si l'on introduit dans ce schéma, au niveau de la strate 1 (début de la ligne) et au temps 0, une amplitude de valeur 1, la colonne de gauche des échos réfléchis revenant à l'appareil représente la réponse impulsionnelle de la ligne à un Dirac. La convolution de cette réponse impulsionnelle avec l'impulsion émise par le réflectomètre (tension en échelon mesurée sur l'appareil) fournit le signal réfléchi que mesurerait l'appareil sur la ligne considérée.

Les principales étapes de calcul du modèle sont donc :

- la définition d'une distribution d'humidité décrivant le milieu stratifié ;
- la détermination du profil de coefficients de réflexion correspondant, via l'équation d'étalonnage (équation dite universelle de Topp et al., 1980) et les équations (1) et (2) ;
- le calcul de la réponse impulsionnelle, telle qu'elle est présentée sur la *figure 2* ;
- le calcul de la courbe de signal réfléchi par convolution avec l'impulsion.

## 3. Recherche du profil optimal

Il s'agit de trouver le vecteur, de paramètres  $\vec{W}_v = [W_{v1}, W_{v2}, \dots, W_{vn}]$ , qui permet d'obtenir la meilleure superposition entre la courbe de signal réfléchi simulée  $C_s$  et la courbe mesurée  $C_M$ . On peut alors se ramener à un problème de minimisation non linéaire, en définissant le critère suivant :

$$J(\vec{W}_v) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (C_M^k - C_r^k)^2 \quad (4)$$

$k$  : indice des points de la courbe,  $N$  : nombre de points de la courbe.

Les paramètres obtenus sont alors une bonne approximation des valeurs réelles des caractéristiques recherchées.

Nous présentons maintenant la minimisation de ce critère à partir d'un algorithme génétique.

### Les algorithmes génétiques

Cette classe d'algorithmes est basée sur un ensemble de mécanismes qui reproduisent le processus de l'évolution naturelle. Les algorithmes génétiques font vivre une population d'individus. Chaque individu est un vecteur de paramètres représentant des solutions potentielles au problème posé. Ils sont différents les uns des autres, de par leurs gènes et leur valeur d'adaptation (*fitness*).

L'initialisation de ce type d'optimisation se fait à partir d'une population et non un seul vecteur de paramètres. Cette population initiale peut être créée aléatoirement.

Les règles d'évolution s'articulent ensuite autour de trois opérateurs génétiques :

- la sélection a pour rôle de choisir des individus dans la population courante à partir de leur *fitness* ;
- le croisement permet, à partir de deux individus parents, d'obtenir deux enfants, en y propageant certaines des caractéristiques génétiques des parents ;
- la mutation engendre de nouveaux individus en changeant certains gènes de façon aléatoire ; le but est de parcourir chaque recoin de l'espace de recherche.

L'évaluation permet de quantifier l'adaptation de chaque individu au problème posé et de lui attribuer une note qui servira par la suite de critère de sélection (voir *figure 3*).

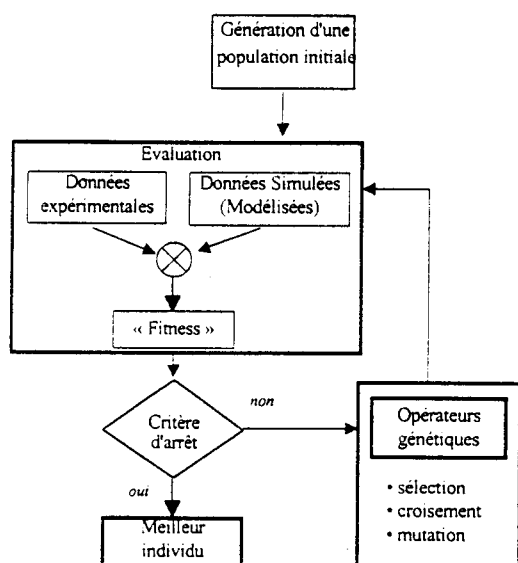


Figure 3. Fonctionnement d'un algorithme génétique.

A genetic algorithm.

Les algorithmes génétiques sont donc des outils simples à mettre en œuvre d'un point de vue algorithmique. Nous utilisons comme opérateur de croisement, le BLX- $\alpha$ , développé par Eshelman (Hoffmeister et Back, 1992) et comme méthode de sélection celle de Boltzman (Renders, 1995).

Pour garantir une répartition identique des probabilités de sélection d'une génération à l'autre, nous utilisons une réattribution de la valeur d'adaptation suivant une loi de type  $f(x) = x^2$ . Cette loi introduit un élitisme, qui augmente la probabilité de reproduction des meilleurs individus, et donc la vitesse de convergence.

Selon la théorie des « schèmes » (Goldberg, 1994), les individus présentant les meilleures valeurs d'adaptation ont une probabilité de sélection plus importante. L'augmentation de la moyenne d'adaptation de la population permet de porter un ou plusieurs individus vers l'optimum global.

### 4. Résultats

Nous présentons maintenant les résultats à partir d'un exemple de mesure effectuée dans une colonne de sable constituée d'une strate de 40 cm de sable sec ( $W_v = 8\%$ ), sur une strate de 30 cm de sable saturé d'eau ( $W_v = 44,4\%$ ).

La courbe de signal réfléchi est enregistrée avec un réflectomètre connecté à des guides d'onde (deux tiges métalliques parallèles, de longueur 70 cm, de diamètre 0,8 cm, écartées de 5 cm), enfoncées verticalement depuis le haut de la colonne (voir *figure 4*).

Nous avons paramétré le modèle avec sept strates de 10 cm chacune, et défini une population génétique de 50 individus (50 profils hydriques testés par génération). L'optimisation a été lancée sur 50 générations et répétée 10 fois pour l'analyse statistique.

Elle a abouti au profil présenté sur la *figure 5*. On remarque alors que le profil calculé est le même que le profil estimé, aux écarts types d'optimisation près (calculés sur

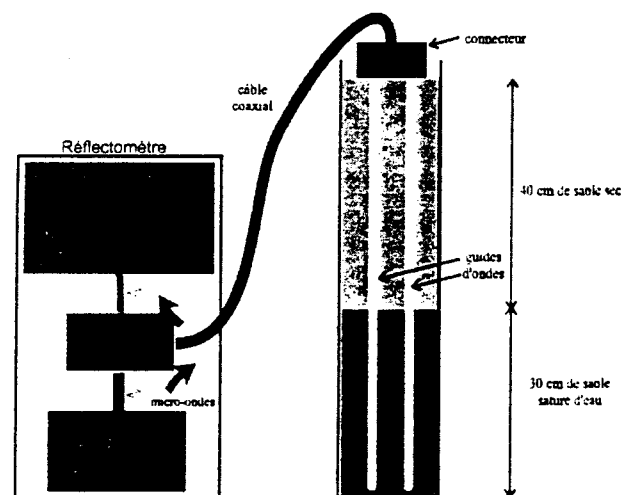


Figure 4. Dispositif expérimental.

Experimental setup.

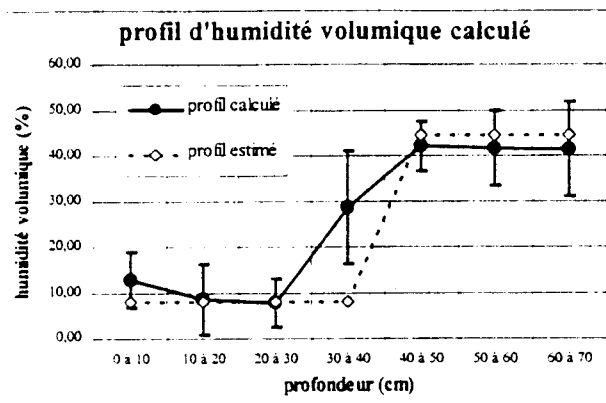


Figure 5. Comparaison entre le profil d'humidité calculé et le profil estimé.

Comparison between the calculated and the estimated soil water content profiles.

les dix optimisations), sauf en ce qui concerne la 4<sup>e</sup> strate (30–40 cm), correspondant à la discontinuité d'humidité. On peut expliquer cette erreur par la présence d'une forte discontinuité du milieu entre la 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> strate. En effet, la validité du modèle implémenté impose au milieu d'être lentement variable. Malgré tout, les résultats obtenus après optimisation sont très satisfaisants. Pour diminuer cette erreur, il faudrait décrire le milieu par un nombre plus élevé de strates. On « approxime » alors mieux cette discontinuité, ce qui devrait diminuer l'erreur au voisinage de ce point. Cependant, ce choix est conditionné par le temps de calcul nécessaire à l'inversion.

La courbe de réflexion moyenne obtenue sur les dix cycles d'optimisation est très proche de la courbe mesurée (voir figure 6), ce qui valide, d'une part, le profil d'humidité obtenu et, d'autre part, le modèle de simulation des courbes réflectométriques. On remarque, cependant, que la courbe simulée s'écarte de la courbe mesurée après la fin des guides. Ceci est dû à des phénomènes de perte de signal dans le milieu, phénomènes non pris en compte par le modèle.

L'erreur quadratique moyenne  $J(\vec{W}_v)$ , calculée entre les points correspondants à l'arrivée du signal au début des guides, jusqu'à sa réflexion finale en fin de guides, atteint une valeur inférieure à  $10^{-1}$ .

**Remerciements.** Ce travail a été financé grâce au soutien du Fonds social européen (FSE) et de la région Réunion.

## 6. Références

Cassel D.K., Kachanoski R.G. et Topp G.C. 1994. Practical considerations for using a TDR cable test, *Soil Technol.*, 7, 113–126  
 Goldberg D.E. 1994. *Algorithmes génétiques, exploration, optimisation et apprentissage automatique*, Addison Wesley, 417 p.  
 Hoffmeister F. et Bäck T. 1992. Genetic algorithms and evolution strategies: similarities and differences, University of Dortmund, System analysis research group, Technical report No. SYS-1/92, 97 p.

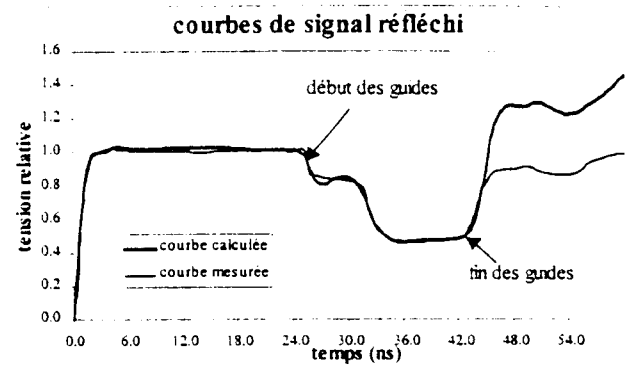


Figure 6. Comparaison entre les courbes réflectométriques calculée et mesurée.

Comparison between calculated and measured reflected signal traces.

Cette erreur finale très faible démontre la robustesse et la performance de cet algorithme pour faire converger les solutions vers le minimum global.

## 5. Conclusion

Le modèle de simulation de courbes réflectométriques est valide. Il permet de reproduire, de manière particulièrement réaliste, les courbes mesurées. L'algorithme génétique se montre bien adapté à l'optimisation de paramètres corrélés, tels que ceux de notre modèle. En effet, nous sommes parvenus à inverser une courbe de signal réfléchi, sans connaissance a priori du profil hydrique à atteindre et avec un nombre important de paramètres à optimiser, ce qui autorise une précision spatiale satisfaisante. Les algorithmes génétiques réclament en contrepartie un grand nombre d'évaluations du modèle, impliquant des temps de calculs conséquents. Sur un tel problème, une méthode d'optimisation classique (Levenberg–Marquardt) serait peut être plus rapide, mais convergerait vers une solution sous-optimale (minimum local). La convergence des algorithmes génétiques pourrait être accélérée dans notre cas par une initialisation du vecteur de paramètres à optimiser, basée sur une connaissance a priori du milieu (estimation préalable du profil hydrique).

Notons, par ailleurs, qu'une meilleure précision du profil hydrique identifié pourrait être obtenue par une amélioration du modèle, tenant compte, par exemple, des pertes de signal dans un milieu dispersif.

Renders J.M. 1995. *Algorithmes génétiques et réseaux de neurones*, Hermès, 334 p.

Topp G.C., Davis J.L. et Annan A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, 16 (3), 574–582.

Yanuka M., Jopp G.C., Zegelin S. et Zebchuk W.D. 1988. Multiple reflection and attenuation of time-domain reflectometry pulses: theoretical considerations for applications to soil and water, *Water Resour. Res.*, 24 (7), 939–944