

**ALGERIAN**



**J**

**ournal**

**O**

**f**

**T**

**echnology**



**B,C,D**

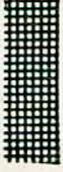
**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE PUBLICATION**



ISSN 111-357X

1993

N°9



**ALGERIAN**



**J**

**ournal**

**O**

**f**

**T**

**echnology**

**B,C,D**

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE PUBLICATION**

*ISSN 111-357X*

**1993**

**N°9**

Responsable de la Publication : B. TILIOUINE

Directeur de la Rédaction : A. ZERGUERRAS

Comité de Rédaction :

Division A

Section Génie-Civil

P. Y. Bard-LCPC-Paris et Université J. Fourier-France

E. Flavigny-IMG-EHMG-Grenoble-France

B. Tiliouine-ENP-Alger-Algérie

A. Charif Université de Batna-Algérie

M. Berrah-ENP-Alger-Algérie

Section Mines

J.F. Thimus-UCL-Belgique

S. Guerrak Directeur au Ministère Industrie et Mines-Algérie

A. Ait-Yahiatène-ENP-Alger-Algérie

Section Hydraulique

P. Foray-INPG-France

C. Thirriot-INPT (ENSEE IHT)-Toulouse-France

Y. Zech-UCL-Belgique

M. Besbes-ENIT-Tunis-Tunisie

A. Kettab-ENP-Alger-Algérie

Division B

Section Electronique

H. Baudran-INPT-Toulouse-France

G. Dubost-Université de Rennes I-France

A. Vander Vorst - UCL-Belgique

B. Sansal - USTHB - Alger - Algérie

A. Chekima - ENP - Alger - Algérie

A. Farah - ENP - Alger - Algérie

A. Zerguerras - ENP - Alger - Algérie

Section Electrotechnique

A. Beroual - ENP - Alger - Algérie

E.H. Zaïm - ENP - Alger - Algérie

A. Boubekour - ENP - Alger - Algérie

A. Bensenouci - ENP - Alger - Algérie

Section Automatique

N.K. M'Sirdi - LRP-Paris 6 - France

F. Boudjemaa - ENP - Alger - Algérie

M.F. Chigara - ENP - Alger - Algérie

M.S. Ait-Cheikh-ENP- Alger - Algérie

Section Mécanique

B. Necib - Université de Constantine - Alger - Algérie

S. Rechak - ENP - Alger - Algérie

### Section Energétique

M.A. Att-Ali - ENP - Alger - Algérie  
A. Gahmousse - ENP - Alger - Algérie

### Section Génie-Industriel

A. Keramane - Ministre de l'Industrie et des Mines - Algérie  
M. Boumahrat Ex-Ministre Formation Professionnelle - Algérie  
A. Ouabdesselam Ex-Directeur ENP - Alger - Algérie  
N. Aboun - ENP - Alger - Algérie  
O. Belmokhtar - ENP - Alger - Algérie  
H. Benchérif - ENP - Alger - Algérie  
Z. Haddad Zahir - ENP - Alger - Algérie  
L. Kerbache - ESC - Rennes - France

### Division C

#### Section Physique

T. Mohamed-Brahim USTHB - Alger - Algérie  
A. Bouabdallah - USTHB - Alger - Algérie  
M. Benchaala - USTHB - Alger - Algérie  
A. Kacher - ENP - Alger - Algérie

#### Section Matériaux

M. Bendaoud - USTHB - Alger - Algérie

#### Section Métallurgie

D. Treheux - Ecole Centrale de Lyon - France  
B. Bouzabata - Université de Annaba - Alger - Algérie  
N. Mesrati - ENP - Alger - Algérie

### Division D

#### Section Chimie et Génie-Chimique

J.M. Bessière - ENSC - Montpellier - France  
R. Leenaerts - UCL - Belgique  
D. Benachour - Université F. Abbas - Sétif - Algérie  
Z. Derriche - USTO - Oran - Algérie  
R. Belabbes - ENP - Alger - Algérie  
S.E. Chitour - ENP - Alger - Algérie

#### Section Environnement

A. Gaïd - USTHB - Alger - Algérie  
R. Kerbachi - ENP - Alger - Algérie  
A. Amameria - ENP - Alger - Algérie  
N. Mameri - ENP - Alger - Algérie

## TABLE DES MATIERES

Comité de Rédaction .....	I
Avant Propos .....	III
The effect of the balun in modelling waveguide to microstrip junctions in the range 18 26 GHz	
T. KEZAI and A. VANDER VORST, fellow I.E.E.F. ....	01
Optimization of energy transfer : Implanted and external power supplies	
M. MEHENNI, A. FARAH .....	11
Etude du coefficient de couplage entre lignes stratifiées	
A. ZERGUERRAS, R. AKSAS .....	21
Amplificateur à fréquence intermédiaire pour la T.V.D.S.	
A. OUCAR, R. AKSAS .....	33
Contribution sur une approche numérique de réseaux micro-ondes à n poles	
L. DEKAR, Z. GRABOWSKI, M. TRABELSI .....	57
Synthèse d'un régulateur optimal pour les machines outils à très haute précision	
R. SEHAB, V. LYSSOV .....	79
Courants et charges des streamers dans les diélectriques liquides en géométrie pointe plan sous tension de choc de foudre	
H. MDULAI, A. BEROUAL .....	105
Contribution to the study and the regeneration of insulated mineral oil	
S.E. CHITOUR, F. MOHALLEBI .....	117
Contribution à l'étude de la régénération des huiles usagées moteur	
S.E. CHITOUR, F. MOHALLEBI, T. GUENDOZI .....	137
Contribution à l'étude de la pollution de l'Oued Réghaia (Algérie) par les métaux lourds	
J. ARRAR, R. BELABBES .....	157
Recommandations aux auteurs .....	179

## AVANT PROPOS

Les périodiques scientifiques et techniques de référence internationale couvrant la recherche parviennent en Algérie en nombre insuffisant comparativement à un pays développé ou même un pays en voie de développement. La demande potentielle est loin d'être satisfaite.

En production locale, pour les sciences exactes et technologiques, on dénombre tout au plus une dizaine de titres, dont entre autres les revues suivantes :

- " Algerian Journal Of Technology " ou " AJOT " dont le numéro un est sorti en juillet 1986 et le numéro 8 en janvier 1992.
- " Technolgies avancées " ou T.A. dont les numéros 1 et 2 sont sortis en juin et décembre 1991.
- " Journal de la Société Algérienne de Chimie " ou J.S.A.C. dont les numéros 1 et 2 sont sortis en 1991.
- " Revue de l'Université de Constantine " ou R.U.C. dont les numéros 1 et 2 " Sciences et technologies " sont sortis en juin 1990 et juin 1991.
- " Algérie Equipement " Revue Technique de l'Ecole Nationale des Travaux Publics dont le numéro 5 est paru en juillet 1992.

Evidemment il existe d'autres revues et périodiques couvrant les recherches en médecine, en chirurgie, en sciences humaines (sociologie, droit, économie, finances ...). Cependant leur nombre tourne autour d'une dizaine de titres ou tout au plus une vingtaine.

Au niveau Maghrébin les annales de l'E.N.I.T. de Tunis, une revue de technologie (n.2 paru en juillet 1988) améliorent leur position à chaque sortie.

Les revues issues des pays arabes se font de plus en plus nombreuses, on peut citer :

- L'"Arabian Journal for Sciences & Engineering ".
- Le " Journal of the University of Kuwait Sciences ".
- Le "Journal Of Building Research-Irak-Baghdad".
- Le " Egyptien Journal Of Genetics ".
- L' " Egyptien Journal Of Microbiology ".
- L' "Arab Banks ".
- L' "Arab Defense Journal ".
- L' "Arab Oil ".
- L' "Arab Water World ".
- La Revue "ARABICA" et bien d'autres.

La valorisation de la recherche ne peut pas se passer du besoin de publier dans les revues et périodiques spécialisées. La répartition des lieux d'origine de cette presse est très inégale, elle se situe à 95% dans les pays développés (i.e. USA, Canada, Europe + CEI, Japon, Australie, ...) ;

moins d'un pour cent est issu des pays du tiers monde.

Depuis que l'Ecole Nationale Polytechnique s'est vue habilitée à diriger et à encadrer des Thèses de Doctorat d'Etat, elle éprouve le besoin d'éditer un périodique pour valoriser sa production. Ce qu'elle fit au milieu des années Quatre vingt, les conseils scientifiques des départements y jouant le rôle de Comité de lecture et de Rédaction. Depuis 1991, la sélection des articles à publier devint bien plus sévère. La priorité est faite aux travaux de thèses de Doctorat d'Etat et aux recherches contractuelles. Les Conseils Scientifiques sont remplacés par des Comités de Rédaction et de Lecture moins anonymes et plus responsables. Depuis 1992, la revue AJOT possède son numéro indicatif ISSN.

La revue AJOT tendra vers un régime normal de fonctionnement où au moins la moitié de ses articles seront rédigés en langue anglaise dans le but évident d'élargir l'audience internationale auprès des chercheurs. Quand on connaît la masse des périodiques de référence internationale, se placer sur ce marché à partir de l'Algérie ne sera pas une tâche aisée.

Surtout lorsque l'on sait que le groupe d'IEEE, par exemple, dispose de plus de 350 000 adhérents à travers le monde, avec une organisation complexe et bien huilée. Il est établi que pour une spécialité donnée, la productivité n'est conséquente qu'au delà de la masse critique de 100 chercheurs. Afin d'atteindre et de dépasser un tel seuil, il faut travailler sous une organisation soignée, avec des projets en coopération avec le secteur productif, ou avec d'autres équipes de recherches nationales ou étrangères. La multiplication et l'extension des accords de coopération restent l'un des rares moyens permettant d'entreprendre des recherches que l'on ne pourrait faire seul faute de ressources.

La revue présente paraîtra dans l'immédiat en deux séries, puis ultérieurement en quatre séries spécialisées, ce qui lui permettra une plus grande homogénéité et une meilleure diffusion.

Il existe 26 000 titres de périodiques, toutes qualités confondues, de par le monde. Chaque année voit l'édition de plus de mille titres nouveaux, issus soit d'une création, soit d'un changement d'appellation. Un nombre un peu moindre de titres anciens disparaît aussi dans le même temps.

De ce total, les acquisitions annuelles de l'Algérie n'atteignent pas les 3000 titres. La diffusion des résultats de la recherche par les périodiques participe à l'avancée de la Science et de la Technologie. De plus la qualité et la densité des informations ainsi transmises ont un effet direct sur la cadence de celle-ci. Il faut s'attendre à des retombées négatives sur les principaux facteurs économiques quand un pays n'est pas en mesure d'assurer cette avancée à une cadence au delà d'un certain seuil minimal.

De ce point de vue, il est donc nécessaire d'accroître à la fois le nombre et la qualité des acquisitions de périodiques importés ainsi que ceux des titres édités dans le pays. Il y a lieu d'élargir en même temps le champ des projets de recherche pouvant se faire en coopération entre diverses institutions nationales ou régionales.

Ainsi par une meilleure diffusion des résultats de la recherche, la revue AJOT souhaite contribuer aux progrès de la Science et de la Technologie dans le pays, tout en se dotant des caractéristiques les plus proches d'un périodique à référence internationale. Ses colonnes sont ouvertes aux publications de toute origine géographique, en provenance de simple individu ou de Société Savante désirant réaliser ses "Proceedings" ou tous autres actes de Conférence, Symposium, Colloque, etc ... d'intérêt commun.

Il reste à espérer que ceux qui contribueront au développement de cette revue, seront nombreux et en constante progression que ce soit en tant qu'auteur d'articles, ou simple lecteur abonné ou en tant que Société Savante sponsorisatrice ou cosponsorisatrice, Association d'Anciens Elèves, Fondation ou Organisme d'Etat. La Rédaction saisit cette occasion pour adresser ses vifs remerciements à tous les Auteurs qui ont bien voulu confier leurs publications à la revue AJOT, sans oublier ceux qui ont passé commande d'abonnement.

Ahmed Zerguerras

# The effect of the balun in modelling waveguide-to-microstrip junctions in the range 18-26GHz

*T.Kezai, member IEEE, and A.Vander Vorst, fellow IEEE  
Microwaves U.C.L  
B-1348 Louvain-La-Neuve, Belgium*

## Abstract

*Waveguide-to-microstrip junctions are of a great interest in microwave integrated circuits and systems. A problem of resonance is however associated with those structures. This phenomenon has been described and modeled only for a transition with a cylindrical cavity resonator. We are developing an experimental study of the structure with a coplanar balun. Our measurements are proving and evaluating the balun effect on the resonance frequency, the bandpass and the insertion losses of the transition. The effect of the lateral slots in the guide is also discussed.*

## 1. Introduction

At microwaves, and in particular at frequencies above 18GHz, the introduction of the waveguide-to-microstrip junction by Van Heuven [1] raised much interest as interfaces for integrated circuits and systems. Other versions have been proposed, including polarisation capabilities for active components [2][3][4]. Unfortunately, resonances are present in that type of junctions [5]. They result from an electromagnetic coupling between the resonant part of the structure and the microstrip line.

An interesting analysis of that phenomenon in the junction with a cylindrical cavity has been published in [5]. The authors have proposed a model based on a cylindrical resonant cavity, hence predicting the resonance frequency. This model, however, may not be extended to junctions with a coplanar balun, due to its influence on the electrical characterisation of the junction. This difficulty is the central part of the study and measurements reported here.

## 2. Structure

The element of interest is a waveguide coupled to a planar circuit in its E-plane. The substrate has a dielectric constant equal to 2.56, and a thickness equal to 0.254 mm. The design, calculations, drawing, and cutting has been made by the software PENELOPE, developed in our laboratory. It is a microwaves and a near-millimeter waves CAD/CAM program designed as an educational tool [6]. The software is part of whole, by which passive and active circuits can be designed, printed and tested in planar technology ( microstrips, finlines and coplanar structures ) at frequencies up to 40GHz.

The measurements have been done with a vector analyzer WILTRON 360. We have selected, as calibration method, the offset short error correction, which is ideally suited for structures where opens are difficult

to implement. The major limitation of that correction is that the bandwidth is restricted to a maximum frequency ratio of 9:1. In our case, we have only 1.44 as ratio frequency. The optimum short offset used in the calibration is  $1/4$  wavelength at 22 GHz (midband frequency), and the troughline has a zero length. Therefore the transmission error has been better than 0.02 dB over all band. Two series of measurements have been made in this study, where respectively the characteristic lengths  $L_1$  and  $L_2$  of the structure have been changed ( Fig.1), modifying the relative length of the coplanar balun. Hence, the effect of the balun has been evaluated. It showed that it is not sufficient to use only a cylindrical cavity as a model.

### 3. Experimental results

In a first series of measurements, the length  $L_1$  of the balun has been given two different values. The reverse transmission, measured in those two cases ( respectively Fig.2a and Fig.2b ) shows a significant change in resonance frequency -from 21.8 to 23.2GHz- as well as a significant change in the frequency range between two successive resonant peaks.

The experimental circuit was not designed in view of optimizing matching. The insertion loss, however, of a symmetric structure composed of two junctions separated by a length of 2cm of microstrip line, was found quite attractive (Table I) : it is of the order of 2.5dB over

the whole frequency range, from 18 to 26GHz, as is illustrated by Fig.3a, which confirms the wideband characteristic of the transition.

<i>Frequency range (GHz)</i>	<i>Maximum attenuation (dB)</i>
18.0 - 26.0	2.8
18.0 - 20.8	2.1
18.5 - 19.8	1.6

The fluctuations of the reverse transmission in the frequency range are largely due to the interferences created by the lateral slots of the waveguide. The number of propagating modes in the loaded part of the guide is determined by the location of the slots in the E-plane of the guide on one hand, and by the size of those slots on the other hand. Their respective phase velocities being different from that of the TE<sub>10</sub> mode, beats are obtained, hence energy transfer [1][7]. Optimizing the depth of the slots reduces the peaks of attenuation and flattens the reflection throughout the band, as is shown on Fig.4, where an improvement of 7dB is illustrated by the dotted curve with respect to the solid line. Fig.5a represents the influence of the length L<sub>1</sub> of the balun on the resonance frequency. The measured curve shows how important the effect of the length of the balun is on the resonance frequency, with differences of the order of 20 % between the model based exclusively on a cylindrical cavity [2] and our measurements. We have observed that the length of the

balun affects the attenuation, the resonance frequency, and the bandwidth as well.

Fig.5b shows the results of our measurements as a function of the length  $L_2$  of the section immediately preceding the balun, as compared with the data obtained from [2]. We have made two series of measurements of the peaks limiting the frequency range respectively on the low frequency side and on the high frequency side. Curve 1, for the low frequency limits, is quite sensitive to the length  $L_2$  and is close to curve 2, obtained from [2]. Curve 3, on the other hand, is less sensitive to  $L_2$  and shows a significant difference with the curve 2. This is due to the combined effect of the coupling and of the balun.

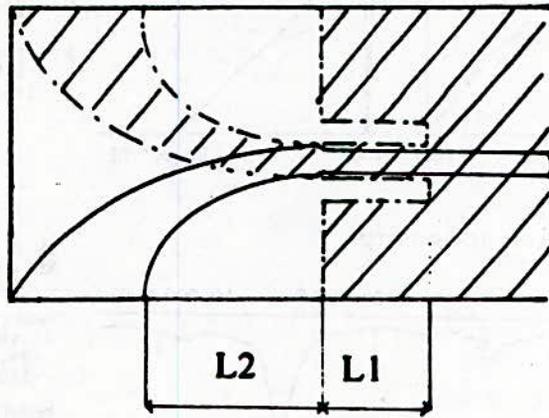
#### 4. Conclusion

It has been demonstrated that the lengths  $L_1$  (balun) and  $L_2$  (cavity) in a waveguide-to-microstrip junction, has a significant influence on the resonance frequency, the bandwidth, and the attenuation. The demonstration is based on measurements made on a guide loaded with a microstrip line coupled with a waveguide through two identical junctions. Hence, modelling such junctions with only a cylindrical cavity does not describe adequately the device. The balun has to be taken into account. We are presently looking at an evaluation of the resonant parts of the

structure by finline resonators, even for the slots of a DC block in the case of active devices.

### *References*

- [1] J.H.C Van Heuven, "A new integrated waveguide-microstrip transition," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.24, pp. 144-147, 1976.
- [2] G.Begeman, "An X-band balanced finline mixer," IEEE Trans.Microwave Theory Tech., vol. 26, pp. 1007-1011, 1978.
- [3] T.E. Koscica , " Wide-band ground-plane DC block and bias feed," IEEE Trans.Microwave Theory Tech., vol. 38, pp. 805-806, 1990
- [4] J.R.Hoefer, "An integrated 18.75/37.5GHz FET frequency doubler," IEEE MTT-S Digest, pp. 815, 1988.
- [5] G.E.Ponchak and A.V.Downey, "New model for broadband waveguide-microstrip transition design," Microwave, J., pp 333-343, May 1988.
- [6] D. Vanhoenacker,A.Baudhuin,I.Huynen,T.Kezai,T.Sakalis and P.Delhaise,A.Vander Vorst, "PENELOPE:a micro-and near mm-waves CAD/CAM software designed as an educational tool," Proc. 20th European Microwave Conf., 1990, pp.723-726.
- [7] K.Tomiyasu and J.J Bolus, "Characteristics of a new serrated choke,," IRE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 4, pp 33-36, 1956.



**Fig. 1** K-band waveguide-to-microstrip junction

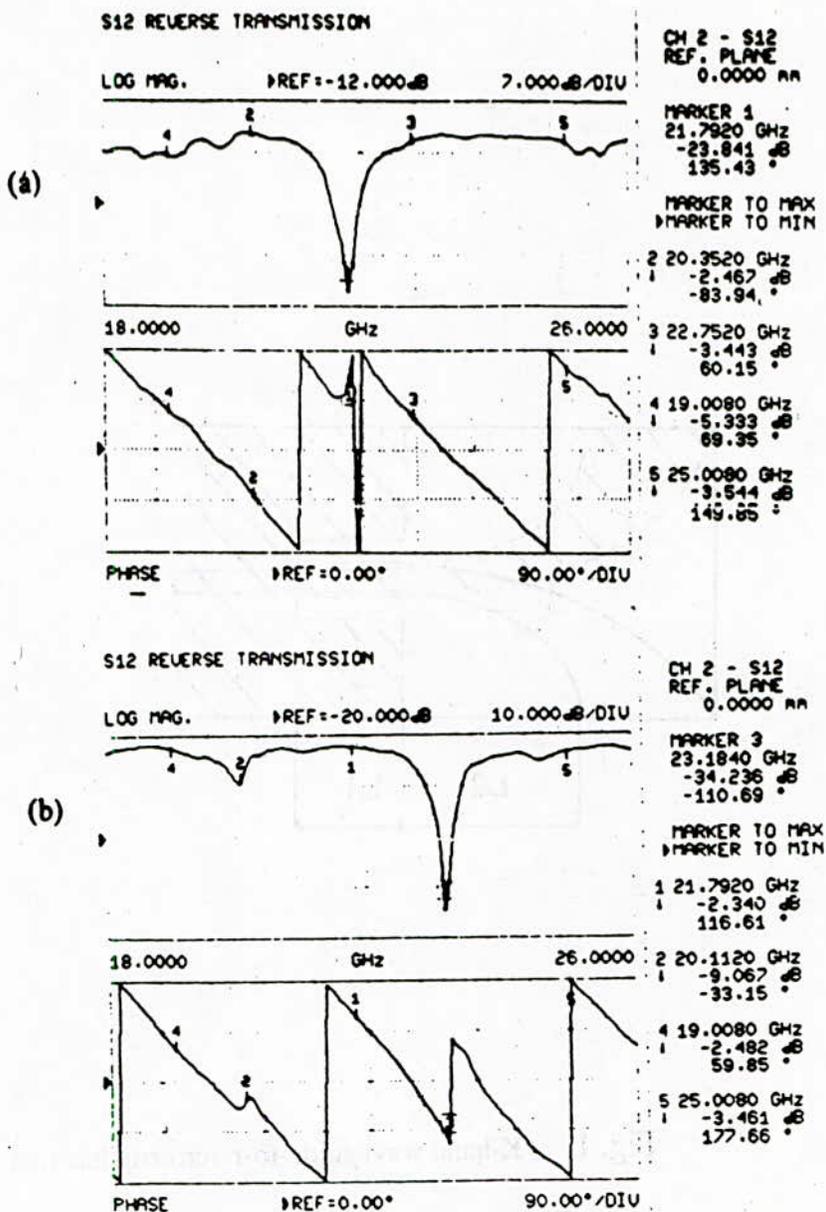
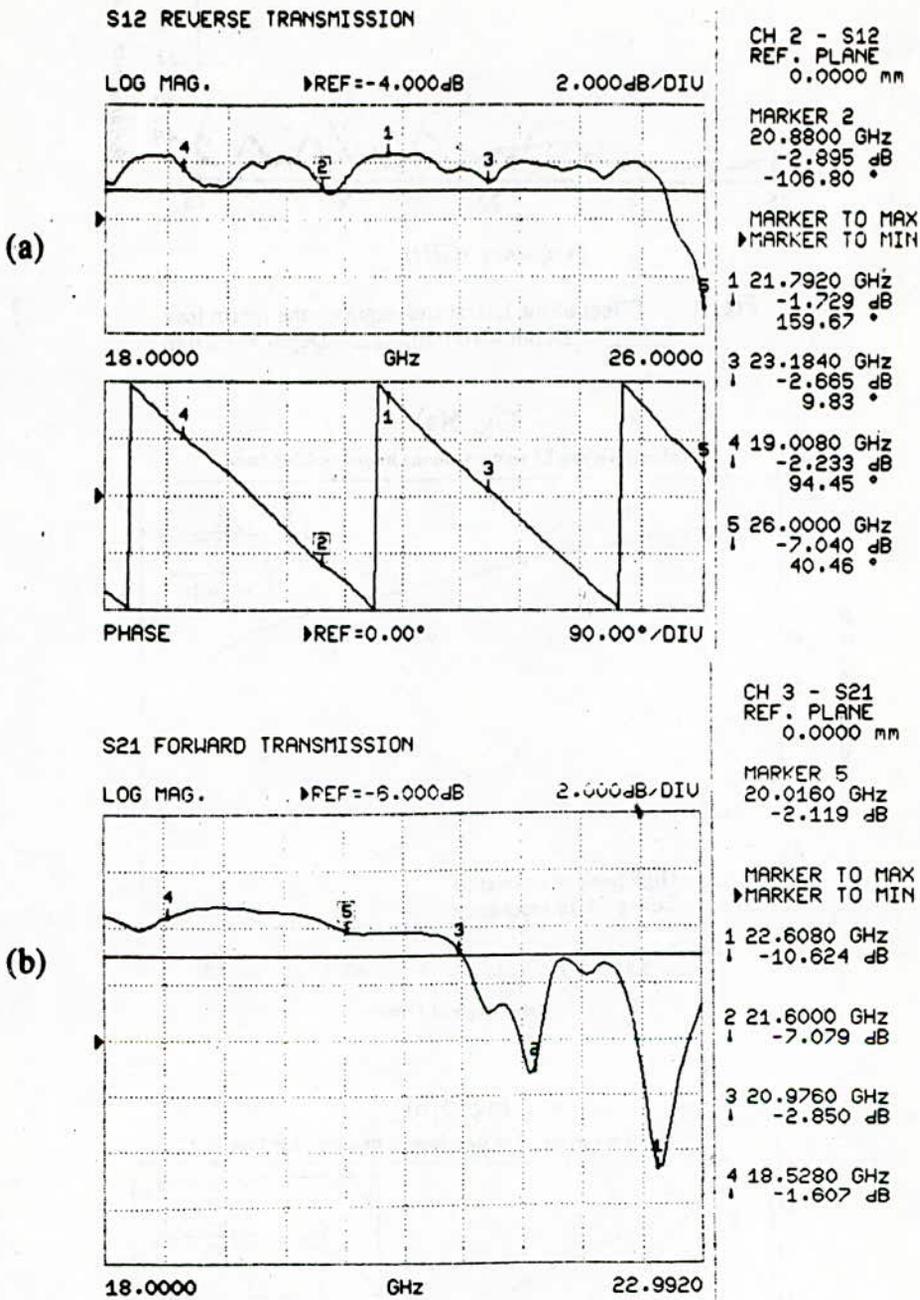


Fig. 2 Reverse transmission for two junctions  
 $\epsilon_r = 2.56$ , thickness = 0.254 mm.

(a):  $L_1 = 3$  mm,  $L_2 = 9.5$  mm

(b):  $L_1 = 2$  mm,  $L_2 = 9.5$  mm



**Fig.3** Transmission loss of two different junctions  
 (a): L1 = 5mm, L2 = 4mm.  
 (b): L1 = mm, L2 = mm

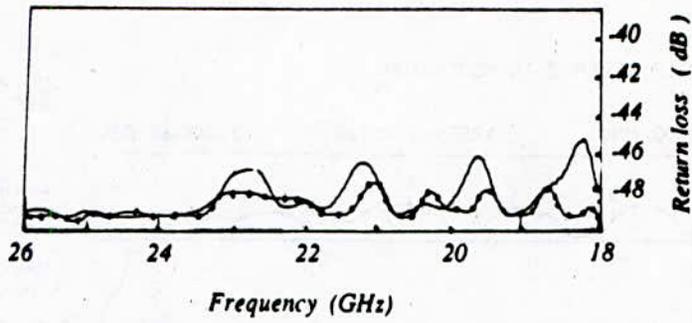


Fig. 4 Effect of the lateral slot depth on the return loss  
 — Depth = 10 mm, - - - Depth = 7.2 mm

Fig. 5(a)

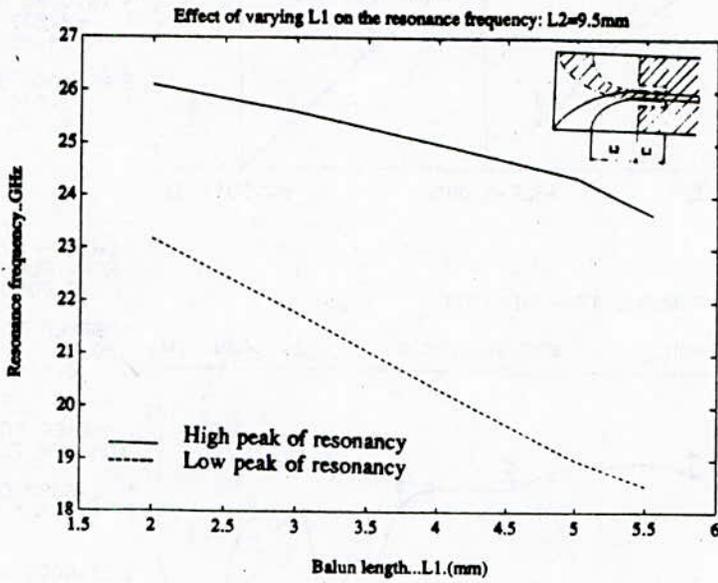
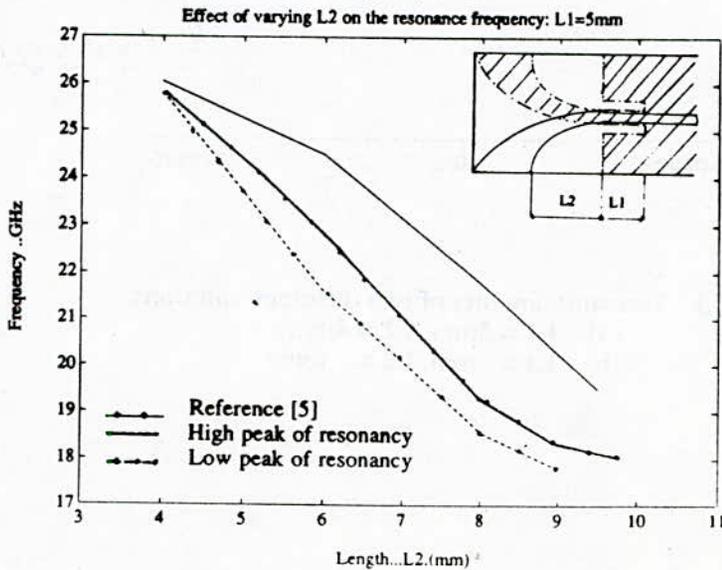


Fig. 5(b)



# **Optimization of Energy Transfer : Implanted and External Power Supplies**

**M. MEHENNI, A. FARAH**

## **Abstract**

Human studies with miniature implanted transducers need more and more very precise bio-telemetry chains. Those systems involve a lot of difficulties regarding, among other things, energy consumption, space requirements and packaging.

To design bio-telemetry systems, it is necessary to follow a methodology dedicated to the optimization of every element of the chain. The purpose of this paper is to present the study of one of the most important parts of the system : implanted power supplies. The paper also deals with a new kind of alternative : possibility of external power supply.

## **Introduction**

The purpose of this paper is to show that the implanted transducers [1,2,3] and bio-telemetry has been very innovative, regarding the originality of the applications, the fundamental nature of the studies about problems of sensors and telemetry in general, and the possibilities of implanted transducers and bio-telemetries in particular [4,5]. The fundamental studies concern, among others, the optimization of different parts of the telemetry systems (Fig . 1). It constitutes a true methodology which is then exploited in many applications. One major point has been to optimize the power supply for electronics of the transducer and the emitter.

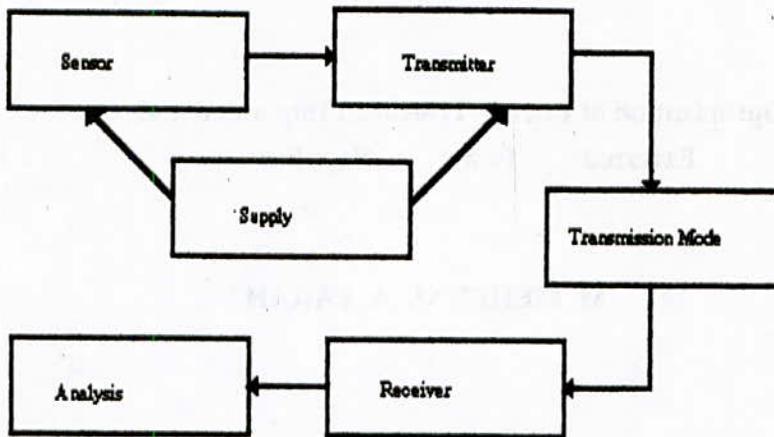


Figure 1 : Block diagramm of telemetry chain

### General problems of implanted power supplies

In external medical system, the power batteries can be replaced without any problem. For implanted systems, however, replacement requires an additional surgical operation, except for the special case of short term implants. If the telemetered system has to remain in the patient's body for a long time, it is necessary to consider several parameters which determine the choice of the supply type. These parameters are:

- \* Massic energy: stored energy according to the battery weight.
- \* Volumic energy: stored energy according to the space occupied by the battery.
- \* Discharge time.
- \* Storage capability: for batteries that are not used very often, but over an extended time
- \* Temperature limits: very important for system sterilization.
- \* Battery voltage: determining the number of batteries.
- \* Reliability: life time of the battery must at least equal the required function time of the telemetry.
- \* Imperviousness: When the battery has lost its energy, the electrolytic gel will tend towards liquid state and induces risks of leakage.

Figure 2 shows a list of different types of classical batteries. According to the above considerations, we notice that the choice of a non-rechargeable power supply is very difficult. The mercury batteries or silver oxide batteries are very satisfactory for low power systems and short life times ( 2 or 3 years ). They are essentially used for their

low cost, reliability and disposability.

	Unit	Zn-Hg	Zn-Ag	Li-Cu	Li-MnO <sub>2</sub>	Li-ThCl
Volt	V	1,35	1,55	1,5	3	3,65
Massic Energy	Wh/Kg	80	110	500	400	600
Volumic Energy	Wh/l	400	400	700	650	900
Discharge Time	hours	>20	>30	>1000	>1000	>5
Temp. Limits	°C	0/60	0/60	-55/150	-20/50	-20/70
Storage Capab.	Years	3	2	10	10	10

Figure 2 : Battery parameters

### External power supply

As the power supply appears the most critical component of the telemetry chain, the remaining parts have to be optimized according to the possible supply parameters. To extend the capability of bio-telemetry systems, it would appear to be important to design implanted systems with an external power supply, even if measurements are only taken, occasionally as described above. For this purpose the best suited mechanism of power transfer is a magnetic field, produced by an external coil and collected by an internally implanted small coil of a size that does not exceed that of a classical battery.

### Principles

The magnetic field is generated by an external coil, placed at the level of the hip and fastened by a belt. This external coil must not be too big, otherwise it will hamper the patient's mobility. The distance between the external and internal coils is about 4 cm for a normal patient, if the receiving coil is placed inside the prosthesis. As the internal coil will produce an AC-voltage, the received signal has to be rectified, smoothed and

regulated. All electronic components required for this procedure have to be minimal in size. Figure 3 shows the principle of this external power supply.

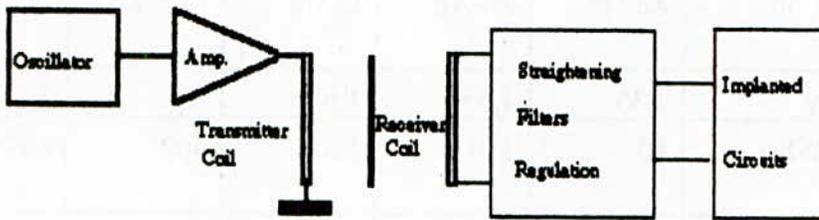


Figure 3 : Block diagramm of External power supply

It is necessary to model the energy transfer between the two coils, according to their shapes, to their distance, to the wiring modes and to the energy required by the implanted system. That is to say it is essential to study the design of the coils and the shape of the input signal of the external coil to optimize the transfer. If we consider " $\eta$ " the power efficiency defined by :

$$\eta = \frac{P_0}{P_1} = \frac{R R_2 Q_1 k^2 Q_2^3}{(R+R_2Q_2^2) [ R_2Q_2^2 + (1+Q_1Q_2k^2) R ]}$$

where :

- $P_0$  the required power of the implanted system
- $P_1$  the incident power.
- $k$  the coupling factor
- $Q_1$  the primary quality factor
- $Q_2$  the secondary quality factor
- $R$  the equivalent load resistance in alternating current
- $R_2$  the series resistance of secondary coil

The theoretical optimization of energy transfer by adjusting the different parameters seems very hard. As we know the power requirement of the implanted system, the equivalent resistance of the implanted device and the "shape" of the secondary coil, we can determine the optimal efficiency of the power transfer and therefore calculate the values of the primary and secondary coils. The first optimization must be applied to

determine the maximum coupling factor and the second optimization will be applied to efficiency.

## OPTIMIZATION METHOD

The non linear optimization method COMET [6] is used to resolve the general problem the non linear programming follow :

to minimize  $f(x)$ , where  $x$  represents a vector at ' n ' component, with the constraints follow :

$$h_i(x) = 0 \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, m$$

$$g_i(x) > 0 \quad \text{for } i = m+1, \dots, p$$

where  $f(x)$  is the objectif function,  $h_i(x)$  is the  $i^{\text{eme}}$  equality constraint and  $g_i(x)$  is the  $i^{\text{eme}}$  inequality constraint.

The algorithm transforms the problem with constraints in series of the problems without constraints by using the "P" function follows :

$$P(x,t) = \text{Min} \{ 0, [t-f(x)] \}^2 + \sum_{i=1}^m h_i^2(x) + \sum_{i=m+1}^p \text{Min}[0, g_i(x)]^2$$

where 't' is a truncature level.

The FLETCHER method is used to minimize without constraint the "P" function. The FLETCHER algorithm was modified to accept the derivated numerical approximations. The result will be most precise if we give the expressions of the objectif function.

The user must fix the variables number, the maximum variables accepted by the programm is 100, the maximum number of the equality constraint is 20 and the maximum number of the inequality constraints is 40. In addition, we must provide the variation range for each variable and the initial values for each one. The tolerance value on the regard of constraints at the optimum must be given, the default value is  $5 \cdot 10^{-5}$ ;

the parameter value of the convergence criterion for researches without constraints, the default value is fixed at  $10^{-6}$  and ponderation coefficient value for the "P" function at the first optimization without constraint, the default value is 0,002.

The COMET program can also find the maximum of a given function. For this, we must multiply by (-1) the objectif function.

One application of this optimization program, we have choice the shape of transmitter and receiver coils because they are the essential constraints. For the given values of transmitter coil ( $d_1/l_1=10$ ) and receiver coil ( $d_2/l_2 = 4$ ). The distance between the transmitter and receiver coils is fixed for our application at  $D=4$  cm.

First, we must applied the COMET program to find the maximum value of the coupling factor with the radius of the transmitter and receiver coils. We find :

$$k_{\max} \approx 0,02$$

$$\text{with } d_1 \approx 6,1 \text{ cm and } d_2 \approx 1,8 \text{ cm}$$

The second optimization is applied to efficiency ( $\eta$ ) : The power across the load resistance ( $R_o = 2R$ ) and the emitter power. As the expression of the efficiency is function

$$\eta = f(Q_1, Q_2, k, R_2)$$

For a fixed value of load resistance, the results of the optimization are determined as follow.

$$Q_1 \approx 36 ; Q_2 \approx 33 ; k_{\max} \approx 0,02 ; R_2 \approx 2,2 \Omega$$

## **DETERMINATION OF THE DEVICE ELEMENTS**

The last parameter is the frequency of the magnetic field. The optimal resonance frequency is about 3 MHz . At this frequency we give the results shown by

figure 4. The parameter  $V_0$  is the voltage across a load of the implanted system at a distance  $D$  from an external coil.

The element values are resumed in table 1 :

Parameter	Calculated value
$L_1 = \frac{R_p}{Q_{L1} \omega_0}$	0,22      mH
$C_1 = \frac{1}{L_1 \omega_0^2}$	13,2      nF
$L_2 = \frac{Q_2 R_2}{\omega_0}$	3,8      mH
$C_2 = \frac{1}{L_2 \omega_0^2}$	732      pF
$R_p = h \frac{V_{gmax}^2}{2 P_0}$	121 $\Omega$
$Q_{L1} = \frac{Q_1}{1 + \frac{R Q_1 Q_2 k^2}{R + R_2 Q_2^2}}$	29,6
$n_1 = \sqrt{\frac{L_1}{d_1 F_1}}$	2      spires
$n_2 = \sqrt{\frac{L_2}{d_2 F_2}}$	12      spires

Table 1 : Element values of external power

## Misalignment effect of coil on efficiency

In the misalignment case (translation and rotation) of a coil with a respect another, the maximum values of coupling factor are calculated[7]. These effects that we can find them in practical cases.

### a) Translation effect

With the values precedently found, a translation distance  $\Delta=0,5$  cm and for a distance  $D = 4$  cm, the maximum value of coupling factor is determined [7]:

$$k_{\max} \approx 0,0013$$

This result gives the optimum value of efficiency :

$$\eta_{\text{opt}} \approx 4,5 \%$$

### b) Rotation effect

With the values precedently found, a rotation of  $\alpha = 10^\circ$  and for a distance  $D = 4$  cm, the maximum value of coupling factor is determined [7]:

$$k_{\max} \approx 0,006$$

This result gives the optimum value of efficiency :

$$\eta_{\text{opt}} \approx 0,8 \%$$

### c) Experimental results

The results obtained in experimental case are shown by the figure 4.

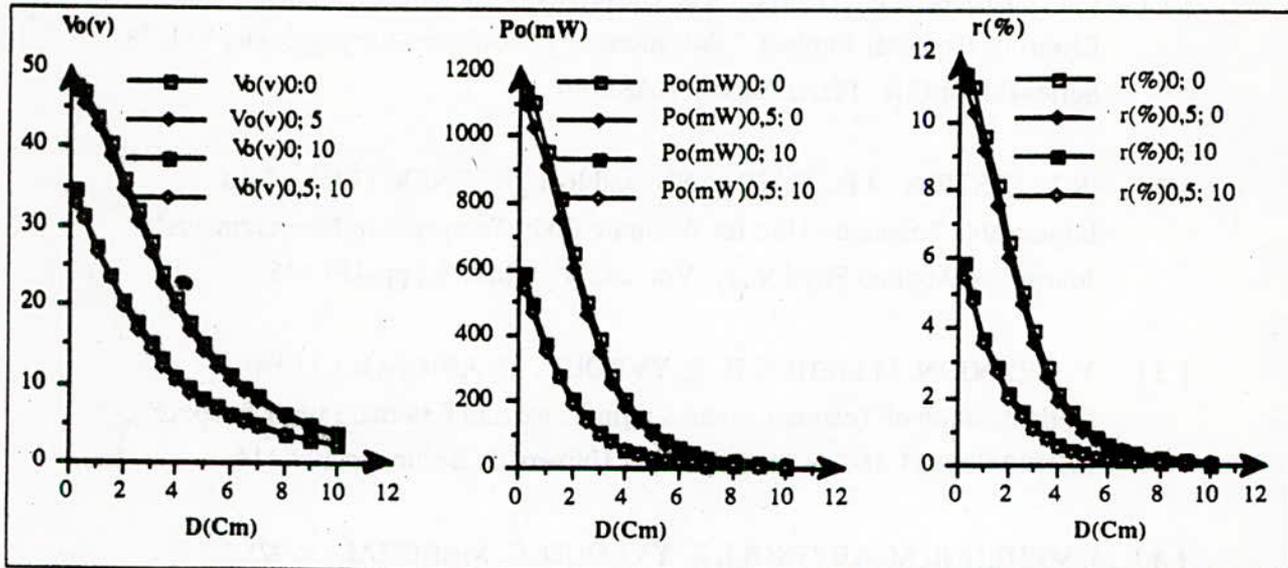


Figure 4 : Voltage  $V_0(D)$  , Power  $P_0(D)$  and efficiency  $r(D)$  in free space for a  $P_1 = 10W$

### Conclusion

The problem of the power supply for implanted systems is far from being entirely solved. Nevertheless, it is evident that the most interesting supply type is the external magnetic field. When we need a safe power source for long-term occasional measurements, the magnetic power transfer is a satisfying solution. It allows for more features within the implanted biotelemetry system, as the energy is not limited by classical battery storage.

## REFERENCES

- [ 1 ] G.M., CLARK et al. , (1987), " The University of Melbourne-Nucleus Multi-Electrode Cochlear Implant ", Advances in Otho-Rhino-Laryngologic, Vol. 38, Series Editor C.R. Pfaltz, Basel, KARGER
- [ 2 ] R.J., EPSTEIN, J.R., HAUMANN and R.B., KEENER, (1968), " An Implantable Telemetry Unit for Accurate Body Temperature Measurements", Journal of Applied Physiology, Vol. 24, N° 3, March , pp 439-445
- [ 3 ] Y. GRANJON, M.MEHENNI, E. YVROUD, M. ABIGNOLI (1990), " Optiumization of Telemetry chains : Implaned and External Power Supplies ", ISBN 3-927433-45-5 Publisher : Freie Universität Berlin, pp 109-114.
- [ 4 ] M. MEHENNI, M. ABIGNOLI, E. YVROUD, C. MARCHAL (1992), " Alimentation par champ électromagnétique externe pour télémessure : conception d'un banc expérimental " RBM 14-2 Mai 1992.
- [ 5 ] W.H. KO, S.P. LIANG, D.F. FUNG CLIFF, (1977), " Design of Radio-Frequency Powered Coils for Implant Instruments", Medical and Biol. & Comput. , 15, pp 634-640.
- [ 6 ] R.L., STAHA, (1973), " Constrained Optimization Via Moving Exterior Truncations ", Ph.D Thesis, The University of Texas at Austin.
- [ 7 ] M., SOMA, D.C., GALBRAITH, R.L., WHITHE, (1987), " Radio-Frequency Coils in Implantable Devices : Misalignment Analysis and Design Procedure", IEEE Trans. on Biomed. End., Vol. BME-34, N°4, April, pp 276-282.

ETUDE DU COEFFICIENT DE COUPLAGE  
ENTRE LIGNES STRATIFIEES

Par \*A. Zerguerras et R. Aksas.\*\*

**ملخص:**

إلى يومنا هذا، يعتبر تحليل، الصوائيات المكونة من ميكروشرايط على عدة طبقات ذات أشكال مختلفة العاملة في حال التشبه T.E.M ناقصا لنموذج لإيجاد عامل تزويج خطين موضوعين على بعضهما النموذج المدروس هنا يعطي نتائج مرضية إلى حد الخمسة بالمئة من النتائج التطبيقية.

**RESUME:**

L'étude des A.P.M multicouches de forme quelconque en mode quasi-T.E.M souffrait jusqu'à ce jour de l'absence d'une modélisation du coefficient de couplage entre la ligne constituée par l'antenne et le plan de masse et la ligne constituée par l'antenne et le directeur. Le modèle proposé ici à cet effet donne des résultats en bon accord avec les mesures à mieux de 5%.

**ABSTRACT:**

Until this day, the analysis of Arbitrarily Shaped microstrip antennas, in quasi T.E.M mode has been lacking an appropriate model for the coupling coefficient between two stacked lines. The proposed model in this study leads to results that agree with experimental results up to 5% difference.

\* Maitre de conférence E.N.P Département Electronique.

\*\* Chargé de cours E.N.P Département Electronique.

# Etude du coefficient de couplage entre lignes superposées

par A. ZERGUERRAS et R. AKSAS

## Résumé:

L'étude des antennes plaques microrubans (A.P.M.) multicouches de forme quelconque, en mode quasi-TEM, souffrait jusqu'à ce jour de l'absence d'une modélisation du coefficient de couplage, entre la ligne constituée par l'antenne et le plan de masse et la ligne formée par le directeur et l'antenne. Le modèle, proposé dans cet article, prend en considération d'une part, le ratio d'ouverture couplant les deux lignes et d'autre part, la répartition de l'énergie incidente entre ces deux lignes couplées et l'espace libre. Les résultats obtenus corroborent les mesures expérimentales à mieux de 5 %.

## Introduction:

Ce travail tente une modélisation simple du coefficient de couplage entre lignes microrubans stratifiées que l'on rencontre dans les antennes plaques microrubans (A.P.M) dotées d'un ou plusieurs éléments parasites (directeurs).

Le coefficient de couplage considéré dépend de deux facteurs fondamentaux; le premier est lié aux ouvertures qui assurent le couplage, le second répartit l'énergie incidente entre les deux lignes couplées et l'espace libre. Ce dernier facteur découle de l'analyse des lignes couplées dissymétriques [1] et [6]. Quant au premier facteur, il a été traité dans [2].

## 1. Lignes couplées dissymétriques

Considérons une paire de lignes couplées uniformément par circuits distribués. Le conducteur de la ligne  $i$  ( $i=1,2$ ) et son diélectrique possèdent respectivement une impédance et une admittance linéiques de la forme:

$$Z_i = R_i + jL_i \omega \qquad Y_i = G_i + jC_i \omega$$

Entre les impédances  $Z_1$  et  $Z_2$  et les admittances  $Y_1$  et  $Y_2$ , nous aurons, respectivement, l'impédance et l'admittance mutuelles:

$$Z_m = R_m + jL_m \omega \qquad Y_m = G_m + jC_m \omega$$

De plus, chacune des admittances  $Y_i$  est reliée au sol par l'admittance:

$$Y_i' = G_i' + jC_i' \omega \cong jC_i' \omega \quad (\text{cas de l'air ou d'un bon diélectrique}).$$

Au niveau de l'abscisse  $z$ , la matrice des tensions et des courants des lignes 1 et 2, ainsi que celles de ses premières dérivées s'écrivent:

$$[P] = [V \ I] = [V_1 \ V_2 \ I_1 \ I_2] \quad (1)$$

$$\frac{d[P]}{dz} = -[A]^{1/2} \begin{bmatrix} 0 & [Z_c] \\ [Z_c]^{-1} & 0 \end{bmatrix} [P] \quad (2)$$

$$\frac{d^2[P]}{dz^2} = [A] [P] \quad (3)$$

$$[Z_c]^2 = [Z] [Y]^{-1} \quad [A] = [Z] [Y] \quad (4)$$

$$[Z] \cong j\omega \begin{bmatrix} L_1 & L_m \\ L_m & L_2 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [Y] \cong j\omega \begin{bmatrix} C_1 & -C_m \\ -C_m & C_2 \end{bmatrix} \quad \text{ou} \quad \begin{cases} C_1 = C_1' + C_m \\ C_2 = C_2' + C_m \end{cases} \quad (5)$$

en négligeant les pertes ohmiques et diélectriques.

Les circuits (Fig.1) permettent la mesure des capacitances. Quant aux circuits équivalents (Fig.2), ils donnent les matrices capacitance et inductance pour le modèle de la ligne généralisée.

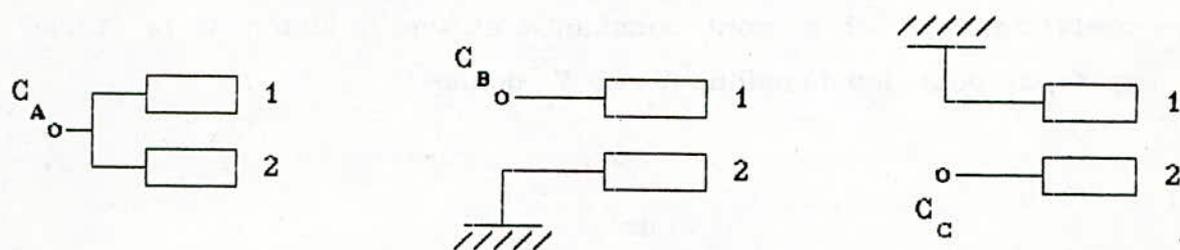


Fig.1: Circuits de mesures des capacitances

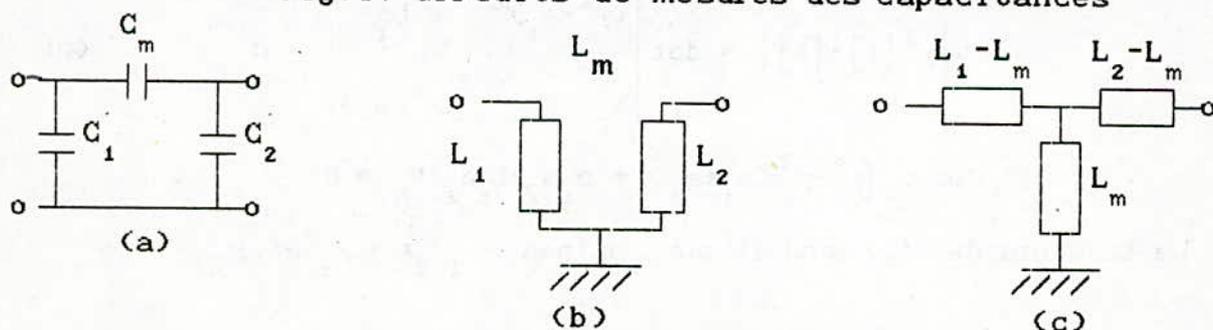


Fig.2: Circuits équivalents

Dans le modèle en  $\Pi$ , les trois capacitances  $C_A, C_B$  et  $C_C$  sont reliées aux trois capacitances cherchées  $C_1, C_2$  et  $C_m$  par les relations:

$$C_A = C_1 + C_2 - 2C_m; \quad C_B = C_1; \quad C_C = C_2; \quad 2C_m = C_B + C_C - C_A \quad (6)$$

Dans le cas des lignes homogènes, la matrice inductance  $[L]$  se déduit de la matrice capacitance  $[C]$ , car dans cette situation :

$$L_i C_i v^2 = 1 \quad (i=1,2) \quad \text{et} \quad K_{ho} = K_L = L_m (L_1 L_2)^{-1/2} = K_C = C_m (C_1 C_2)^{-1/2} \quad (7)$$

Pour des lignes hétérogènes, le calcul des capacitances ne change pas, par contre, celui des inductances nécessite le passage à une ligne homogène de même géométrie. Ce qui revient à remplacer tous les diélectriques par de l'air, et reprendre les calculs donnant  $C_A, C_B, C_C, C_1,$

$C_2, L_1, L_2$  et  $K_{ho}$ . Dans ces conditions, les coefficients  $K$  et  $K_C$  peuvent être différents.

L'équation des télégraphistes (3) donne:

$$\left\{ \frac{d}{dz^2} - [A] \right\} [V] = 0 \quad \text{avec: } [A] = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$a_i = Y_i Z_i - Y_m Z_m \cong -\omega^2 [L_i C_i - L_m C_m] \quad (i = 1, 2)$$

$$b_i = -Y_m Z_i + Y_j Z_m \cong -\omega^2 [C_j L_m - L_i C_m] \quad \begin{cases} i = 1, j = 2 \\ i = 2, j = 1 \end{cases}$$

Les coefficients  $a_i$  et  $b_i$  sont constants et une solution de la forme  $V_0 \exp(-\gamma z)$  pour les tensions  $V_1$  et  $V_2$  donne :

$$\frac{d^2}{dz^2} = \gamma^2 \quad (9)$$

Ainsi, (8) est une équation aux valeurs propres dont les modes na-

$$\det \left| \gamma^2 [I] - [A] \right| = \det \begin{vmatrix} (\gamma^2 - a_1) & b_1 \\ b_2 & (\gamma^2 - a_2) \end{vmatrix} = 0 \quad (10)$$

$$\text{Soit } [\gamma^4 - \gamma^2(a_1 + a_2) + a_1 a_2 - b_1 b_2] V_0 = 0 \quad (11)$$

La solution de (11) conduit aux racines :  $\gamma_{1,2} = \pm \gamma_c$  et  $\gamma_{3,4} = \pm \gamma_\pi$

$$\text{Où : } \gamma_{c,\pi}^2 = 0.5(a_1 + a_2) \pm 0.5 [(a_1 - a_2)^2 + 4b_1 b_2]^{1/2} \quad (12)$$

Le signe (+) pour les modes en phase  $c$  et le signe (-) pour les modes antiphases  $\pi$ . Les constantes de propagation  $\gamma_c$  et  $\gamma_\pi$  se réduisent respectivement aux modes pair et impair des lignes symétriques.

Nous avons donc :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\gamma^2 - a_1}{b_1} = \frac{b_2}{\gamma^2 - a_2} \quad (13)$$

ou encore:

$$R_c = (V_2/V_1)_{\gamma=\pm\gamma_c} = (1/2b_1) [(a_2 - a_1) + ((a_2 - a_1)^2 + 4b_1 b_2)^{1/2}] \quad (14)$$

$$R_\pi = (V_2/V_1)_{\gamma=\pm\gamma_\pi} = (1/2b_1) [(a_2 - a_1) - ((a_2 - a_1)^2 + 4b_1 b_2)^{1/2}] \quad (15)$$

Ainsi  $R_c$  est réel positif et  $R_\pi$  réel négatif. Les vitesses d'ondes étant  $v = jw/\gamma_\pm$

### Exemple de lignes couplées assymétriques:

Le coaxial double co-centré (Fig.3).

Supposons le diélectrique homogène. Les 3 capacitances mesurées suivant la procédure précédente donnent:

$$C_A = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_{r2}}{\log(r_o/r_2)} \quad (\text{absence du cylindre de rayon } r_1) \quad (16)$$

$$C_B = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_{r1}}{\log(r_2/r_1)} = C_1 \quad (\text{absence du cylindre de rayon } r_o) \quad (17)$$

$$C_c = C_A + C_B = C_2 \quad (\text{en prenant la ligne externe comme terre}) \quad (18)$$

Le conducteur (1) n'est donc jamais vu directement par la terre, et  $C_B$  restera toujours différent de  $C_c$ ; ainsi:

$$C_m = \frac{C_1 + C_2 - C_A}{2} = C_B = C_1 \quad (19)$$

Puisque le conducteur interne (1) est complètement isolé de la terre par le conducteur (2) intermédiaire, il vient pour le coefficient de couplage des deux lignes adjacentes:

$$k_{12} = C_m (C_1 C_2)^{-1/2} = (1 + C_A/C_B)^{-1/2} \quad (20.a)$$

Soit:

$$k_{12} = \left[ 1 + \frac{\epsilon_{r2} \log(r_2/r_1)}{\epsilon_{r1} \log(r_o/r_2)} \right]^{-1/2} \quad (20.b)$$

dont la variation en fonction de  $r_2/r_1$  est donnée par la figure 4.

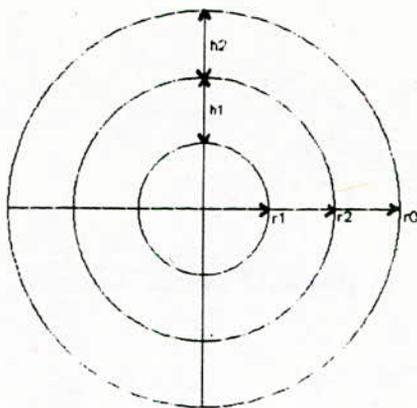


Fig.3: coaxial double co-centré.

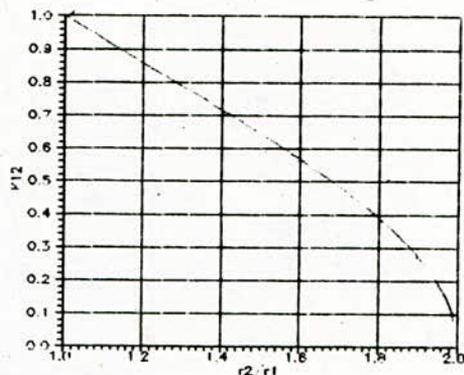


Fig.4: variation de  $K_{12}$  en fonction de  $(r_2/r_1)$   
(dans le cas  $r_1=1, r_0=2, \epsilon_{r1}=\epsilon_{r2}$ )

L'analyse précédente du couplage entre les deux lignes du coaxial double co-centré ne fait pas allusion à sa longueur  $l$ , donc à son ratio d'ouverture. La ligne  $i$  présente un ratio d'ouverture:

$$\rho_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot (r^2 - r_i^2)}{2 \cdot \pi \cdot (r^2 - r_i^2) + 2 \cdot \pi \cdot l \cdot (r + r_i)} = \frac{1}{1 + l/H_i} \quad ; \begin{matrix} i = 2 & ; & r = r_0 \\ i = 1 & ; & r = r_2 \end{matrix}$$

D'où  $\rho_{12} = (\rho_1 \cdot \rho_2)^{1/2}$  pour le ratio d'ouverture couplant ces deux lignes, ce qui donne pour le coefficient de couplage final:

$$K_{12} = k_{12} \cdot \rho_{12} = \left\{ \left( 1 + \frac{\epsilon_{r2} H_1}{\epsilon_{r1} H_2} \right) \left( 1 + \frac{l}{H_1} \right) \left( 1 + \frac{l}{H_2} \right) \right\}^{-1/2} \quad (21)$$

## II. Coefficient de couplage de deux lignes superposées

On peut l'évaluer de deux manières, l'une globale, l'autre linéique. Pour exemple, on prendra l'antenne plaque microruban disque avec un directeur disque co-centré (Fig.5).

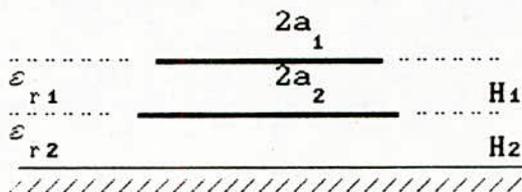


Fig.5: A.P.M disque avec directeur.

## II.1. Approche globale

L'antenne microruban est un disque de rayon  $a_2$  sur un substrat d'épaisseur  $H$  et de permittivité  $\epsilon_{r2}$ , l'élément parasite est un disque de rayon  $a_1$  sur un substrat d'épaisseur  $H_1$  et de permittivité  $\epsilon_{r1}$ . On a pour les ratios d'ouverture:

$$\rho_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_i \cdot H_i}{2 \cdot \pi \cdot a_i \cdot H_i + 2 \cdot \pi \cdot a_i^2} = \frac{1}{1 + \frac{a_i}{H_i}} \quad (i = 1, 2)$$

et  $\rho_{12} = \sqrt{\rho_1 \cdot \rho_2}$ . Le couplage globale est alors:

$$K_{12} = \left\{ \left[ 1 + \frac{\epsilon_{r2} \cdot H_1}{\epsilon_{r1} \cdot H_2} \right] \left[ 1 + \frac{a_2}{H_2} \right] \left[ 1 + \frac{a_1}{H_1} \right] \right\}^{-1/2} \quad (22)$$

## II.2 Approche linéique:

En vertu de [2], au niveau du  $n^{\text{ième}}$  tronçon, la ligne  $i$  présente un ratio d'ouverture:

$$\rho_{in} = (1 + W_{in} / H_i)^{-1} \quad (i = 1, 2)$$

d'où:  $\rho_{12n} = \sqrt{\rho_{1n} \cdot \rho_{2n}}$  et un un coefficient de couplage donné par:

$$K_{12n} = k_{12} \cdot \rho_{12n} = \left\{ \left[ 1 + \frac{\epsilon_{r2} \cdot H_1}{\epsilon_{r1} \cdot H_2} \right] \left[ 1 + \frac{W_{2n}}{H_2} \right] \left[ 1 + \frac{W_{1n}}{H_1} \right] \right\}^{-1/2} \quad (23)$$

La relation (23) en présence de courbures ou de biaisage des extrémités ouvertes doit être corrigée; sinon l'ouverture verrait son aire sous-estimée.

Par exemple dans le cas du disque, le découpage conduirait à une ouverture de surface globale  $\bar{s} = 4 a H$ , alors que la surface réelle de l'ouverture est  $s = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot H$ .

Ainsi le coefficient de couplage de (23), une fois corrigé, serait:

$$K_{12nc} = \left\{ \left[ 1 + \frac{\epsilon_{r2} \cdot H_1}{\epsilon_{r1} \cdot H_2} \right] \left[ 1 + \frac{2W_{2n}}{\pi H_2} \right] \left[ 1 + \frac{2W_{1n}}{\pi H_1} \right] \right\}^{-1/2} \quad (24.a)$$

Pour un triangle équilatéral  $s / \bar{s} = 2/\sqrt{3}$  et

$$K_{12nc} = \left\{ \left( 1 + \frac{\varepsilon_{r2} H_1}{\varepsilon_{r1} H_2} \right) \left( 1 + \frac{\sqrt{3} W_{2n}}{2H_2} \right) \left( 1 + \frac{\sqrt{3} W_{1n}}{2H_1} \right) \right\}^{-1/2} \quad (24.b)$$

Considérons (24. a) pour le cas  $\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2}$ ;  $H_1 = H_2 = H = 1.6$  mm;  
 $a_1 = a_2 = a = 6.84$  mm ; il vient pour le coefficient de couplage moyen:

$$\bar{K}_{12c} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_{12nc} \# 0.145 \quad (25.a)$$

et si l'on veut éviter la sommation

$$\bar{K}_{12c} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot (1 + 2\sqrt{2}a/\pi H)} \# 0.1458 \quad (25.b)$$

Ainsi (25.b) donne un résultat de 8.8% supérieur à celui donné par la relation (22), alors que (25.a) et (25.b) donnent pratiquement des résultats identiques. Quant à celle non corrigée, elle conduit à:

$$\bar{K}_{12} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot (1 + a\sqrt{2}/H)} \# 0.1004 \quad (25.c)$$

qui est de 25% inférieur à celui de (22)

Les relations (22), (25.a), (25.b) et (25.c) appliquées à l'A.P.M disque munie d'un directeur disque co-centré, tel que  $\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2}$ ,  $a_1 = a_2 = 6.84$  mm donnent le tableau (1) ci-dessous:

cas	$K_{12}$			
	(22)	(25.a)	(25.b)	(25.c)
$H_1 = H_2 = H = 1.6$ mm	0.134	0.145	0.1458	0.1004
$H_1 = 2 \cdot H_2 = 3.2$ mm	0.142	0.151	0.1533	0.1084
$H_1 = H_2/2 = 1.6$ mm	0.201	0.214	0.2168	0.1533

épaisseurs de substrat

### L'adjonction d'un second directeur

L'introduction d'un second directeur donne [2] un coefficient de couplage entre deux lignes  $i$  et  $j$ , au niveau du tronçon élémentaire d'ordre  $n$ :

$$\frac{1}{K_{ijn}} = \sum_{p=i}^{j-1} \frac{1}{K_{p,p+1,n}} \quad \text{avec } i < j$$

soit 
$$\frac{1}{K_{13n}} = \frac{1}{K_{12n}} + \frac{1}{K_{23n}} \quad \text{avec } K_{ijn} = \rho_{ijn} k_{ijn}$$

### Analyse de la configuration du lieu de l'impédance d'entrée.

En présence du directeur, une structure viable présente toujours un point double I sur le lieu de l'impédance d'entrée de l'A.P.M quand la fréquence varie au voisinage de la résonance. Si  $R_{M1}$  et  $R_{M2}$  sont les deux premiers maxima de la partie réelle de l'impédance d'entrée, le point double I se localisera (tab.2) selon leur rapport relatif.

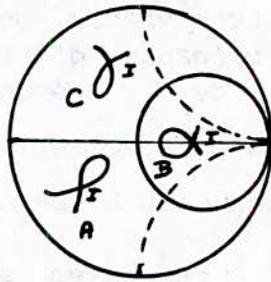
L'indice 1 caractérisera les données relatives au directeur, et l'indice 2 celles de l'antenne plaque dans le tableau (2) comparatif ci-dessous:

R	H	a	$\epsilon_r$
$R_{M1} \# R_{M2}$ I est sur l'axe réel ou proche	$H_1 \# H_2$	$a_1 \# a_2$	$\epsilon_{r1} \# \epsilon_{r2}$
$R_{M1} > R_{M2}$ I est sur espace capa- citif	$H_1 \# H_2$ $H_1 \# H_2$ $H_1 < H_2$	$a_1 < a_2$ $a_1 \# a_2$ $a_1 \# a_2$	$\epsilon_{r1} \# \epsilon_{r2}$ $\epsilon_{r1} < \epsilon_{r2}$ $\epsilon_{r1} \# \epsilon_{r2}$
$R_{M1} < R_{M2}$ I sur espace inductif	$H_1 \# H_2$ $H_1 \# H_2$ $H_1 > H_2$	$a_1 > a_2$ $a_1 \# a_2$ $a_1 \# a_2$	$\epsilon_{r1} \# \epsilon_{r2}$ $\epsilon_{r1} > \epsilon_{r2}$ $\epsilon_{r1} \# \epsilon_{r2}$

Tab. 2: Critère du point double I

Une combinaison adéquate des dimensions de la structure et des permittivités diélectriques, permet de placer le point double I sur (ou voisin de) l'axe réel de l'abaque de smith, plus exactement à droite du point d'adaptation (1,0), si l'on choisit judicieusement l'impédance de normalisation.

Notre modélisation satisfait complètement le critère du point double en ce qui concerne sa localisation (tableau 2), ce qui est en bon accord [7] avec l'allure de la courbe de la figure 6.



Si  $f_{r1}$ ,  $f_{r2}$ , et  $f_{rm1}$  représentent la première et la seconde résonance, et la première anti-résonance respectivement, il vient avec  $\bar{f} = (f_{r1} + f_{r2})/2$  :

- . Cas A :  $f_{r1} < \bar{f} < f_{rm1} < f_{r2}$
- . Cas B :  $f_{r1} < \bar{f} = f_{rm1} < f_{r2}$
- . Cas C :  $f_{r1} < f_{rm1} < \bar{f} < f_{r2}$

Fig.6: Critère du point double (allure des courbes)

Pour un même coefficient de couplage, la dimension de la boucle diminue quand  $f_{rm1}$  s'éloigne de  $f$  en direction de  $f_{r1}$  ou de  $f_{r2}$  et elle est maximale pour  $f_{rm1} = \bar{f}$  (cas B).

### Conclusion:

dans [2] est donc confirmée par la présente, plus complète, évaluant directement le coefficient de couplage quelque soit la géométrie de l'A.P.M. Les résultats expérimentaux de [3] et [7] corroborent qualitativement et quantitativement cette approche.

## R E F E R E N C E S

- [1]. Vi Jai Tripathi : "Asymmetric Coupled Transmission Lines in an inhomogenous medium ", I. E. E. E Trans. Microwave Theory Tech. , vol. MTT-23, pp. 734-739, Sept. 1975
- [2]. A. ZERGUERRAS et R. AKSAS " Modélisation d'antennes imprimées multicouches de forme quelconque en mode quasi-T.E.M " Algerian Journal of Technology no.8, 1992, pp. 1 - 34.
- [3]. A ZERGUERRAS. " Contribution à l'étude d'antennes plaques de forme quelconque multicouches à large bande., application à l'antenne circulaire avec directeur " Thèse de doctorat ès sciences soutenue le 13.05.1990 à l'E.N.P(Alger).
- [4]. LEO YOUNG, Editor, "Microwave filter using parallel coupled lines" ARTECH HOUSE , DEDHAM, MASS, 1972.
- [5]. LEO YOUNG Editor , "Parallel Coupled Lines and Directional couplers" ARTECH HOUSE, 1972 .
- [6] .K.C GUPTA RAMESH GARG et J.J BAHL " Microstrip Lines and slot-lines" ARTECH HOUSE, 1979 . (pages 303 à 361 chapitre 8).
- [7] .J., BENNEGUEOUCHE, "Antennes imprimées multicouches à éléments rayonnants en forme de disque: Applications aux structures bibandes" Thèse de doctorat soutenue le 11/12/1991 à l'Université de NICE.



AMPLIFICATEUR A FREQUENCE INTERMEDIAIRE  
POUR LA T.V.D.S

PAR A.OUCHAR\* R.AKSAS.

ملخص:

إنطلاقاً من الشروط المفروضة على الطابق الأخير لجهاز استقبال المد التلفزيوني المباشر عن طريق القمر الاصطناعي (ت.م.ت.ا)، سمحت هذه الدراسة الإبتكارية بإنجاز مضخم ميكرو موجي ذو تواتر وسطي يمتاز بتضخيم ثابت لكل تواترات الحزمة المختارة. إن الطرق المتخذة والبرامج المنجزة سمحوا لنا بإنتقاء العناصر الفضلى الغير فعالة المرافقة لترانزستور التثاني القطب المستعمل في هذه الدراسة. وخلاصة لكل هذا وجدنا أن النتائج التجريبية المتحصل عليها تتوافق مع المواصفات الدولية المعمول بها في ت.م.ت.ا.

Résumé :

A partir des contraintes imposées au dernier étage du récepteur T.V.D.S, nous avons conçu et réalisé un amplificateur F.I à gain constant dans la bande désirée.

Les méthodes développées et les logiciels élaborés nous ont permis de retenir les structures passives optimums associées au transistor bipolaire adopté. L'amplificateur F.I ainsi réalisé a été mesuré et testé ses caractéristiques sont conformes aux exigences normalisées de la T.V.D.S.

Abstract:

A broadband microwave I.F amplifier has been designed and realised to receive the direct broadcast satellite (D.B.S) signal with a constant gain in the desired bandwidth.

The developed methods and programs allow us to retain the optimum passive structure associated with the chosen bipolar transistor. The I.F amplifier has been realised and tested and its characteristics agree with standards of D.B.S.

\* Cet article entre dans le cadre d'une thèse de Magister

## Introduction

La conception et la réalisation des dispositifs micro-ondes destinés à la réception des signaux émis par Satellite de Télévision (T.V.D.S), est l'un des thèmes essentiels du projet de recherche engagé par le laboratoire de télécommunication du département d'électronique de l'Ecole Nationale Polytechnique.

Dans cette optique, un préamplificateur et un mélangeur micro-ondes [1,2] ont été déjà réalisés. Pour compléter la chaîne de réception à faible bruit (low-noise-bloc ou L.N.B), nous avons conçu et réalisé un amplificateur micro-onde à fréquence intermédiaire F.I (voisine de 1.1 GHz) en tenant compte d'une part, des exigences internationales [3] imposées et, d'autre part des réalisations en amont.

Pour ce type de dispositif, une étude rigoureuse du rapport signal/bruit n'est pas indispensable; par contre, le produit gain-bande passante constitue le paramètre prépondérant.

Le caractère grand public du L.N.B nous permet d'adopter le transistor bipolaire BFR 91 auquel sont associés des réseaux passifs conçus par des méthodes adaptées aux exigences imposées par le cahier de charge.

Dans une première étape, nous avons traité la théorie des multipôles et de l'adaptation à large bande, afin de ressortir les critères de stabilité et de faisabilité.

Nous avons ensuite développé deux méthodes de synthèse des structures passives, applicables selon la nature des données. Des logiciels, élaborés pour le calcul des éléments de ces réseaux, nous ont permis la réalisation de l'amplificateur par CAO.

### 1- Amplificateur micro-onde

#### 1-1 Généralités

L'amplificateur FI situé à la sortie du LNB (Fig.1) est destiné à travailler dans la gamme de fréquence 0.95 - 1.35 Ghz. Par conséquent, les contraintes qui lui sont imposées sont une

est assurée si et seulement si les conditions [4] du théorème d'adaptation à large bande sont satisfaites.

### 2-1-1 Modèles entrée/sortie du transistor

Des résultats expérimentaux [6], révèlent que les transistors bipolaires (à effet de champ) peuvent être modélisés par de simples réseaux RC série et parallèle ( et éventuellement une inductance ). L'erreur commise en adoptant une telle approximation [7] n'excède pas 2 %.

Selon les contraintes imposées, L'adoption d'un schéma équivalent RC série en entrée et RC parallèle en sortie, justifie d'une part, les expressions des paramètres S [8] du transistor en puce et, donne d'autre part, des résultats acceptables lors de l'application de la théorie d'adaptation à large bande.

### 2-1-2 synthèse des réseaux associés

La connaissance de l'impédance de charge  $Z_l(s)$  (impédance d'entrée ou de sortie du transistor) permet la normalisation de l'impédance  $Z_{Zl}(s)$  (Fig.2) vue à la sortie du réseau d'entrée  $N_i$ , et donne le coefficient  $S_{ZZ}(s)$  défini par :

$$S_{ZZ}(s) = \frac{Z_{Zl}(s) - Z_l^*(s)}{Z_{Zl}(s) + Z_l(s)} \quad (1)$$

Le problème consiste à déterminer l'impédance  $Z_{Zl}(s)$  nécessaire à la synthèse du réseau passif d'entrée  $N_i$ . Les données à fournir au logiciel, sont la réponse en fréquence désirée pour le réseau  $N_i$  (Tchebeytchev, Butterworth, elliptique ) et, l'impédance d'entrée  $Z_l(s)$ . Le théorème d'adaptation [9] à large bande nous impose d'introduire une série de fonctions auxiliaires dont la plus importante, la fonction "passe-tout" ,réalisée par les pôles si à partie réelle positive de  $Z_l(-s)$  définie par:

est assurée si et seulement si les conditions [4] du théorème d'adaptation à large bande sont satisfaites.

#### 2-1-1 Modèles entrée/sortie du transistor

Des résultats expérimentaux [6], révèlent que les transistors bipolaires (à effet de champ) peuvent être modélisés par de simples réseaux RC série et parallèle ( et éventuellement une inductance ). L'erreur commise en adoptant une telle approximation [7] n'excède pas 2 %.

Selon les contraintes imposées, L'adoption d'un schéma équivalent RC série en entrée et RC parallèle en sortie, justifie d'une part, les expressions des paramètres S [8] du transistor en puce et, donne d'autre part, des résultats acceptables lors de l'application de la théorie d'adaptation à large bande.

#### 2-1-2 synthèse des réseaux associés

La connaissance de l'impédance de charge  $Z_l(s)$  (impédance d'entrée ou de sortie du transistor) permet la normalisation de l'impédance  $Z_{2i}(s)$  (Fig.2) vue à la sortie du réseau d'entrée  $N_i$ , et donne le coefficient  $S_{22}(s)$  défini par :

$$S_{22}(s) = \frac{Z_{2i}(s) - Z_l^*(s)}{Z_{2i}(s) + Z_l(s)} \quad (1)$$

Le problème consiste à déterminer l'impédance  $Z_{2i}(s)$  nécessaire à la synthèse du réseau passif d'entrée  $N_i$ . Les données à fournir au logiciel, sont la réponse en fréquence désirée pour le réseau  $N_i$  (Tchebeytchev, Butterworth, elliptique ) et, l'impédance d'entrée  $Z_l(s)$ . Le théorème d'adaptation [9] à large bande nous impose d'introduire une série de fonctions auxiliaires dont la plus importante, la fonction "passe-tout" , réalisée par les pôles  $s_i$  à partie réelle positive de  $Z_l(-s)$  définie par :

$$B(s) = \frac{\prod_{k=1}^n (s - \sigma_k)}{\prod_{l=1}^m (s + \sigma_l)}$$

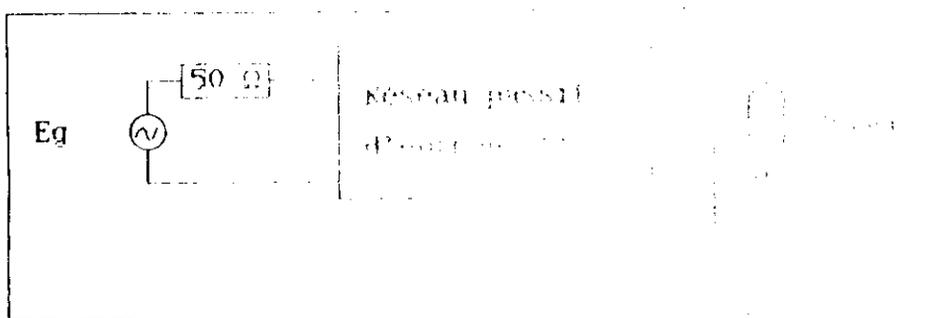


Fig.2.13a

Fig.2.13b

Cette fonction de transfert est l'expression du coefficient de réflexion  $Z(s)$  (voir la figure 2.13a) :

$$Z(s) = \frac{V_1(s)}{V_2(s)} = \frac{V_1(s)}{V_1(s) + V_2(s)}$$

Les relations entre  $Z(s)$  et l'impédance  $ZZ(s)$  sont :

$$ZZ(s) = \frac{2.B(s).Z(s)}{B(s) + Z(s)}$$

Un travail analogue conduit à l'expression de l'impédance  $ZZ_0(s)$  vue à l'entrée du réseau :

$$ZZ_0(s) = \frac{2.B(s).Z_0(s)}{B(s) + Z_0(s)}$$

$Z(s), B(s), \rho(s)$  étant respectivement l'impédance, la fonction de transfert et le coefficient de réflexion

du transistor, la fonction passe-tout réalisée par les poles à partie réelle positive de  $Z'(s)$ , le coefficient de réflexion à phase minimum .

En introduisant dans le logiciel les spécifications des réseaux , les fréquences basse et haute (  $F_L, F_h$  ) de la bande désirée, les impédances d'entrée et de sortie du transistor, nous obtenons les éléments LC constituant les réseaux  $N_i$  et  $N_o$ , leur réponses en fréquence, les taux d'ondes stationnaires (T.O.S) en entrée et à la sortie de l'amplificateur ainsi que son gain en dB.

### 2-1-3 Résultats obtenus

#### a- Réseau d'entrée $N_i$

Le réseau (Fig.3) obtenu à l'entrée de l'amplificateur est de type passe-bande, les éléments LC constituant ce réseau ont pour valeurs :

- $L1 = 9.95 \text{ nH}$
- $C1 = 6.49 \text{ pF}$
- $L2 = 3.04 \text{ nH}$
- $C2 = 5.083 \text{ Pf}$

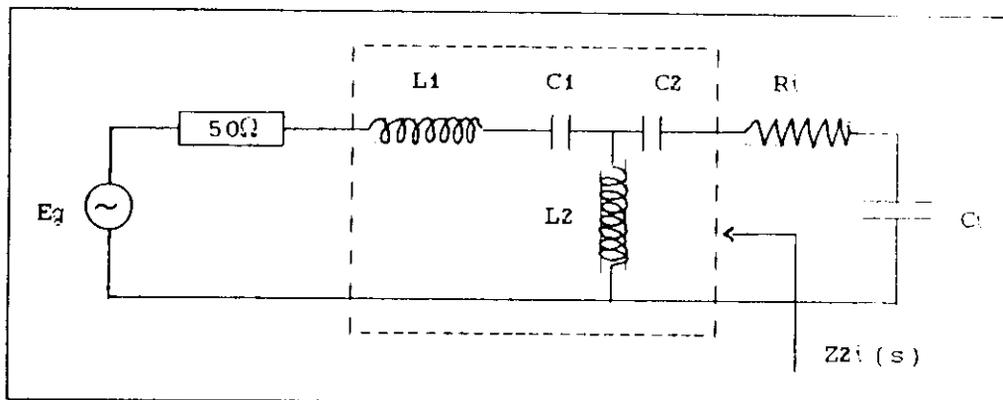


Fig.3 :Réseau d'entrée  $N_i$ .

Les éléments série  $R_0, C_0$  représentent le modèle retenu pour l'impédance d'entrée du transistor. La réponse (Fig.4) en

fréquence de ce réseau est bien de type passe bande. L'impédance d'entrée de l'amplificateur( du réseau Ni ) nous permet de calculer et de représenter (Fig.5) le taux d'onde T.O.S au même accès (entrée).

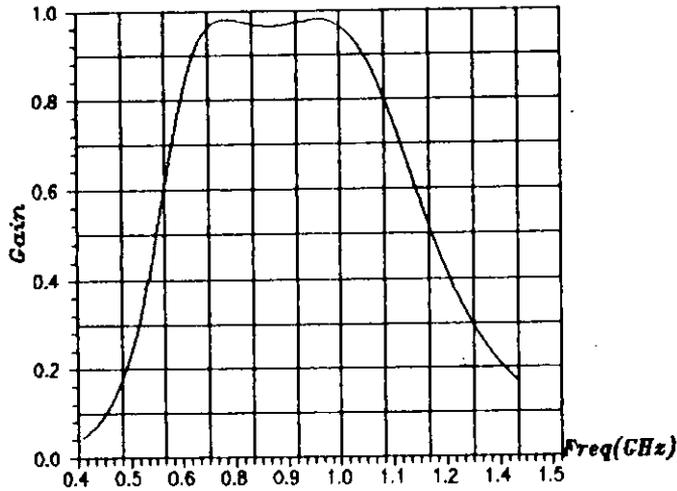


Fig.4 :Réponse en fréquence du réseau Ni

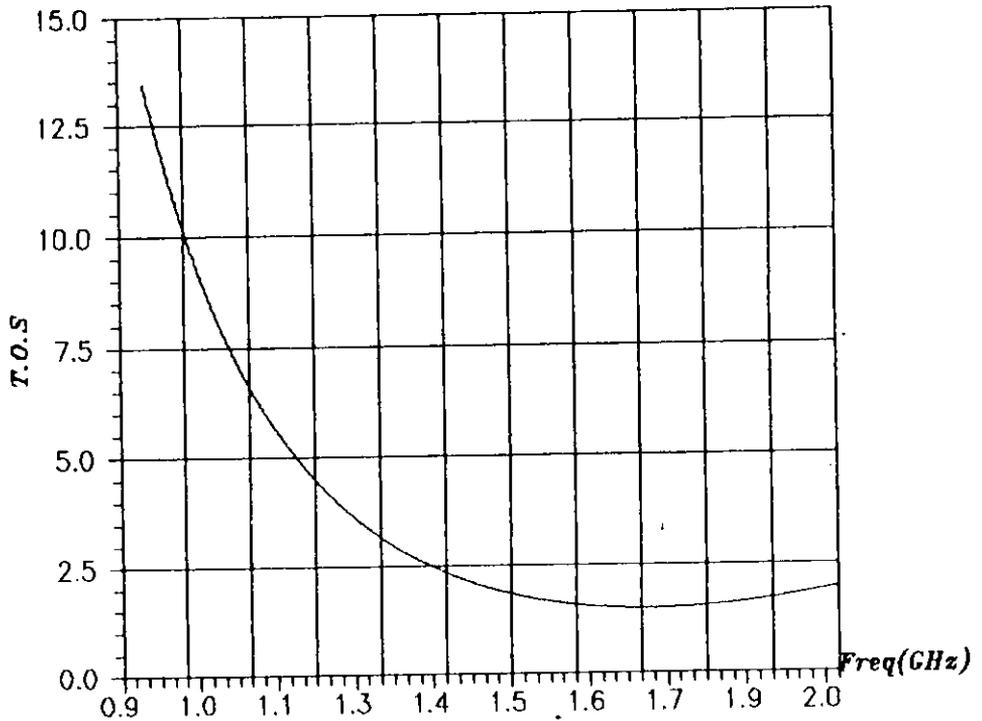


Fig.5 :T.O.S à l'entrée de l'amplificateur

b- Réseau de sortie No

Les éléments constituant le Réseau de sortie No (Fig.6) de l'amplificateur ont pour valeurs :

$$L3 = 1.257 \text{ nH}$$

$$L4 = 3.010 \text{ nH}$$

$$L5 = 22.26 \text{ nH}$$

$$L6 = 2.05 \text{ nH}$$

$$C3 = 0.848 \text{ pF}$$

$$C4 = 9.6 \text{ Pf}$$

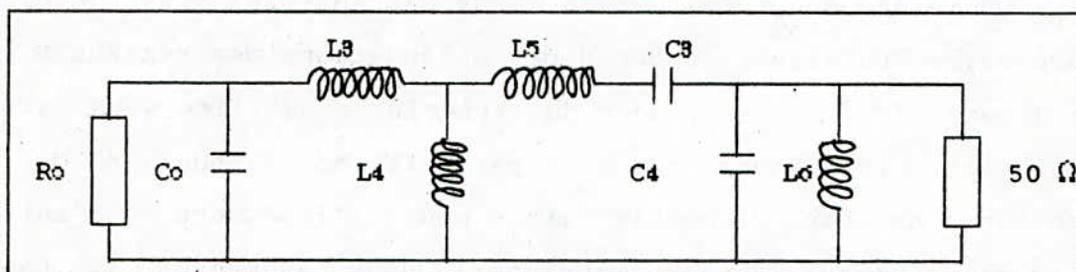


Fig.6 : Réseau de sortie No.

Nous avons représenté la réponse en fréquence (Fig.7) du réseau de sortie No, et l'impédance de sortie  $Z_{out}(s)$  vue à la sortie du réseau No, nous donne le T.O.S (Fig.8) à la sortie de l'amplificateur.

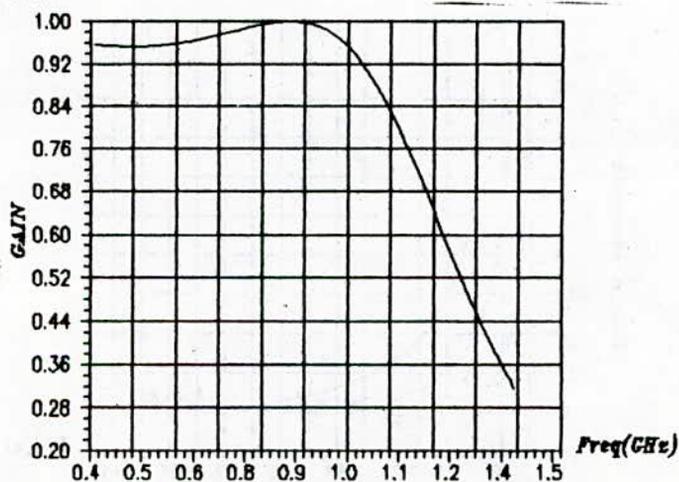


Fig.7 : Réponse en fréquence du réseau No.

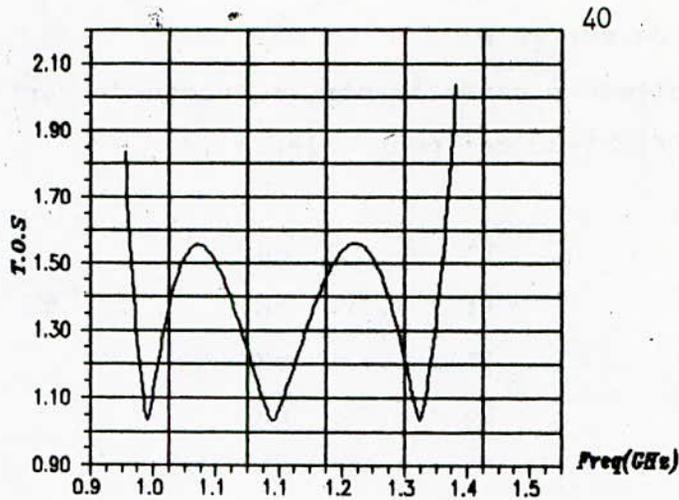


Fig.8 :T.O.S à la sortie de l'amplificateur

Une étude du produit gain-bande passante [6] s'est avérée nécessaire. En effet, le choix des atténuations des réseaux  $N_i$  et  $N_o$  dépend de la charge, donc du transistor utilisé. Nous avons représenté (Fig.9) la bande passante en fonction de la constante de temps du modèle retenu pour l'impédance d'entrée ( ou de sortie ) du transistor. Pour augmenter la bande passante, il faut prendre des valeurs élevées de la constante de temps de l'impédance d'entrée du transistor ou des valeurs assez élevées de l'atténuation du réseau  $N_i$ . Par contre, la constante de temps de l'impédance de sortie doit être faible. Cette étude donne donc une information supplémentaire quant au choix du transistor à utiliser [6] dans ce type d'amplificateur.

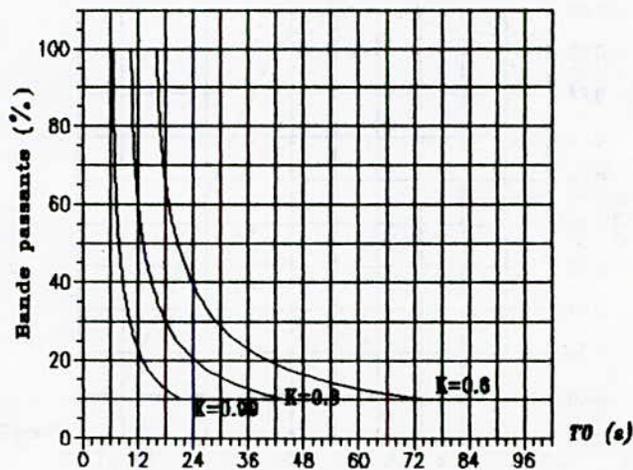


Fig.9 :bande passante en fonction de la constante de temps

c- Amplificateur à constante localisées

Les réseaux passifs  $N_i$  et  $N_o$  étant déterminés, l'amplificateur F.I (Fig.10) ainsi réalisé répond aux contraintes imposées. Le gain (Fig.11) transducique de l'amplificateur est pratiquement constant ( 9 dB environ ) dans la bande désirée.

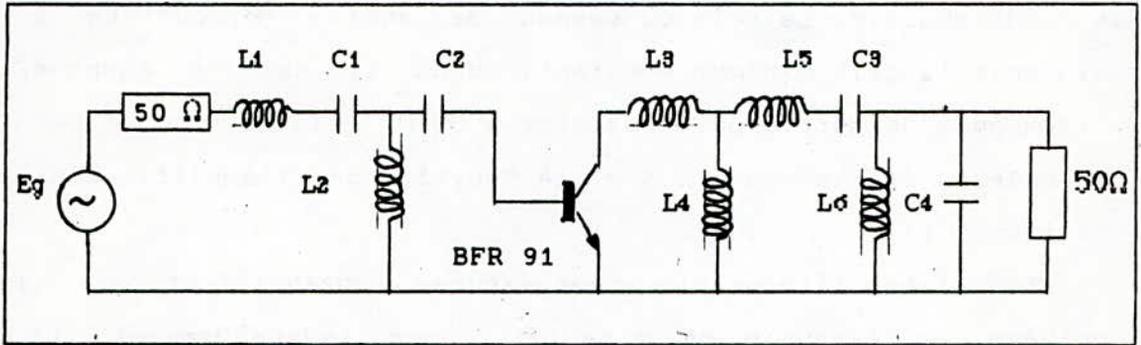


Fig.10 : Amplificateur F.I à constantes Localisées.

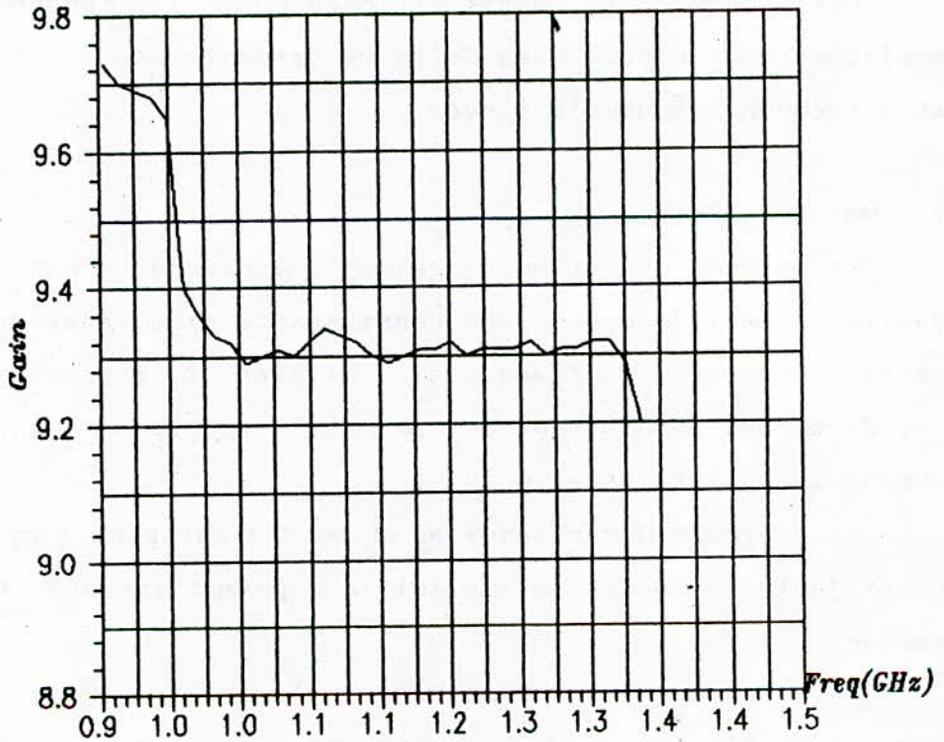


Fig.11 : Gain transducique de l'amplificateur

#### 2-1-4 -Interprétation des résultats

Le gain intrinsèque du transistor subit une atténuation de 6dB par octave lorsque la fréquence augmente. Le rôle du réseau d'entrée  $N_i$  est de désadapter l'impédance d'entrée du transistor aux fréquences basses extérieures à la bande de travail ( $F < F_L$ ). Le T.O.S à l'entrée est ainsi très élevé (Fig.5) et commence à se stabiliser à des valeurs nettement faibles à l'intérieur de la bande choisie. Le rôle du réseau de sortie  $N_o$ , consiste à maintenir le gain minimum constant, donc il sert à adapter l'impédance de sortie du transistor à  $50 \Omega$ , cela se traduit par des valeurs faibles du T.O.S à la sortie de l'amplificateur (environ 1.1).

L'unilatéralité pratiquement assurée ( $S_{12} \approx 0$ ), fait que la synthèse des réseaux  $N_i$  et  $N_o$  se fait donc indépendamment l'un de l'autre. L'impédance de sortie de l'amplificateur est faible ce qui permet le transfert maximum de puissance à la charge.

Cette méthode est ainsi efficace pour la conception des amplificateurs micro-ondes de bande passante dépassant l'octave et à fréquence minimale élevée.

#### 2-2 Méthode numérique

La méthode numérique appelée " approche aux fréquences réelle " [10,11] suppose une connaissance rigoureuse des paramètres mesurés  $S_{ij}$  du transistor à utiliser. Elle présente l'intérêt de ne pas supposer prédéterminé le modèle du transistor, ni aucune autre spécification.

La synthèse des réseaux  $N_i$  et  $N_o$  devient plus simple avec un choix judicieux de la valeur initiale permettant une convergence rapide.

En associant à cette méthode un logiciel d'optimisation, que nous avons élaboré, nous obtenons des réseaux passifs optimums ne nécessitant aucune autre correction.

## 2-2-1 Principe de la méthode

La résistance ( conductance ) de l'impédance à synthétiser est supposée minimum [10], alors la réactance (susceptance) peut être déduite en appliquant la transformée de Hilbert. Cette impédance s'écrit sous la forme :

$$Z_q(\omega) = R_q(\omega) + j X_q(\omega) \quad (7)$$

L'originalité de cette méthode consiste à représenter  $R_q(\omega)$  sous forme d'une combinaison linéaire de pentes  $r_k$  inconnues :

$$R_q(\omega) = r_0 + \sum_{k=1}^n r_k \cdot a_k(\omega) \quad (8)$$

Les fonctions  $a_k(\omega)$  sont définies par :

$$a_k(\omega) = \begin{cases} 1 & \omega > \omega_k \\ 0 & \omega < \omega_{k-1} \\ (\omega - \omega_{k-1}) / (\omega_k - \omega_{k-1}) & \omega_{k-1} < \omega < \omega_k \end{cases} \quad (9)$$

Les excursions résistives  $r_k$ , doivent vérifier la relation :

$$\sum_{k=0}^n r_k = 0 \quad (10)$$

Le gain de l'amplificateur s'écrit alors :

$$G(\omega)^2 = \frac{4 \cdot R_q(\omega) \cdot R_l(\omega)}{(R_q(\omega) + R_l(\omega))^2 + (X_q(\omega) + X_l(\omega))^2} \quad (11)$$

Le problème consiste à minimiser l'erreur quadratique :

$$E = \sum_{i=1}^n (G(r, \omega_i) - G_0(\omega_i))^2 \quad (12)$$

$G_0(\omega_i)$  étant la valeur du gain désiré pour le réseau d'entrée (sortie) aux fréquences  $\omega_i$ . Nous avons utilisé la méthode de Gauss-Newton [11] pour l'obtention d'un incrément optimum  $\bar{r}$  assurant une erreur minimum pour un nombre d'itérations donné. Nous avons alors élaboré un logiciel d'optimisation permettant d'avoir l'incrément  $\bar{r}$ , les valeurs de l'impédance à synthétiser ainsi que le gain optimum.

Ce logiciel fait appel aux données suivantes :

- nombre de fréquences pour lesquelles l'impédance d'entrée (sortie) est connue;
- les valeurs mesurées de cette impédance;
- l'atténuation désirée aux différentes fréquences;
- la valeur initiale de l'incrément  $\bar{r}$  dépendant du changement de pentes ;
- la résistance à la fréquence  $\omega = 0$ ;
- le nombre d'itérations ;
- le pas de déplacement de fréquence  $\omega_n$  ;
- nombre de déplacements.

## 2-2-2 Résultats obtenus

### a- Réseau d'entrée $N_1$

le paramètre  $S_{11}$  mesuré du transistor permet la détermination de son impédance (admittance) d'entrée. Les résultats obtenus pour ce réseau ( Tab.1) montre que l'erreur maximum entre l'impédance optimum et l'impédance synthétisée est de l'ordre de 1.8 % .

F (GHz)	Zzi optimum		Zzi après syn.		atténuat- ion dési.	atténuat- ion optim.
	R(Ω)	X(Ω)	R(Ω)	X(Ω)		
0.5	168.6	-16.2	168.7	-16.33	0.650	0.596
0.6	153.2	-86.36	153.1	-86.53	0.690	0.561
0.7	99.67	-112.7	99.5	-112.8	0.700	0.721
0.8	61.25	-105.3	61.11	-105.3	0.750	0.807
0.9	40.84	-91.17	40.47	-91.09	0.850	0.861
1.0	30.45	-78.44	30.37	-78.35	0.930	0.929
1.1	25.46	-68.28	25.39	-68.17	0.950	0.913
1.2	23.86	-60.61	23.80	-60.47	0.989	0.907
1.3	24.85	-55.84	24.83	-55.65	0.989	0.886
1.4	27.17	-55.79	27.26	-55.54	0.989	0.709

Tableau.1 : Impédance  $Zz_i(s)$  après optimisation et synthèse .

L'impédance  $Zz_i(s)$  obtenue après divisions successives s'écrit :

$$Zz_i(s) = \frac{1}{C_1s + \frac{1}{L_2s + \frac{1}{C_3s + \frac{1}{L_4s + 50}}}} \quad (13)$$

Les éléments LC ont pour valeurs :

$$C_1 = 2.291 \text{ pF}$$

$$L_2 = 20.207 \text{ nH}$$

$$C_3 = 1.487 \text{ pF}$$

$$L_4 = 11.5 \text{ nH}$$

Le réseau  $N_i$  ainsi obtenu (Fig.12) nous permet de

déterminer l'impédance d'entrée et le T.O.S (Fig.13) de l'amplificateur.

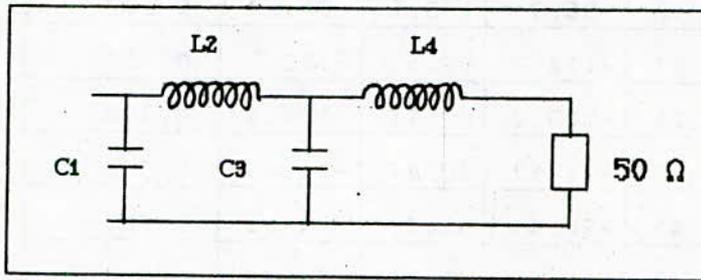


Fig.12 :Réseau d'entrée Ni.

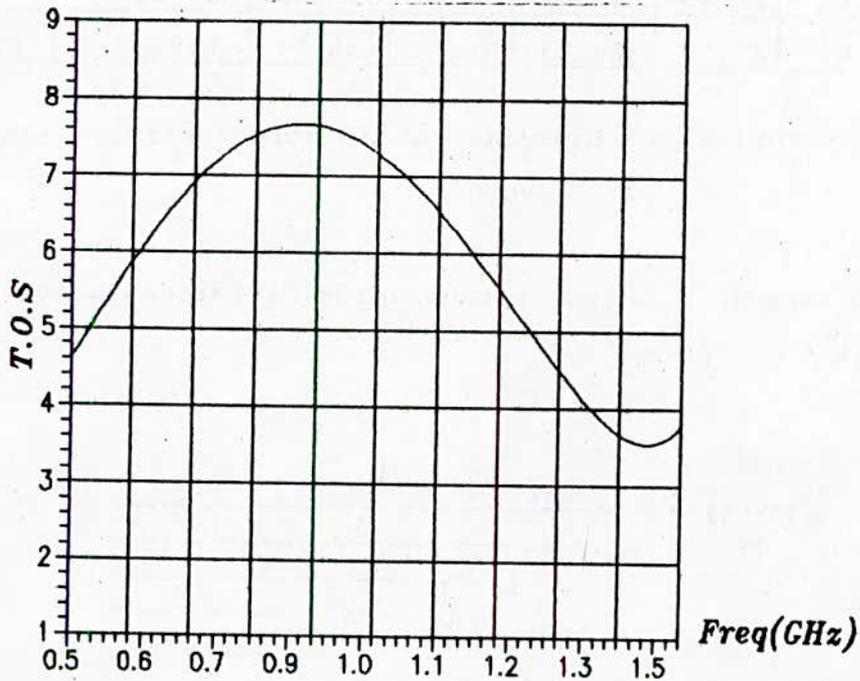


Fig.13 :T.O.S à l'entrée de l'amplificateur

b- Réseau de sortie No

L'impédance  $Z_{2o}(s)$  optimum vue à l'entrée du réseau No et celle obtenue après synthèse (Tab.2) sont pratiquement égales (erreur max.1.1% ).

F (GHz)	Zzo Opt.		Zzo syn.		Atténuation désirée	Atténuation optimum
	R(Ω)	X(Ω)	R(Ω)	X(Ω)		
0.5	49.08	-10.75	49.29	-10.66	0.989	0.745
0.6	47.04	-13.19	47.28	-13.15	0.989	0.751
0.7	44.59	-13.89	44.83	-13.91	0.989	0.740
0.8	42.96	-12.58	43.19	-12.65	0.989	0.711
0.9	43.56	-9.4	43.79	-9.55	0.989	0.665
1.0	48.38	-5.1	48.60	-5.2	0.989	0.647
1.1	61.44	-1.8	61.66	-2.0	0.989	0.616
1.2	88.87	-12.36	89.04	-12.65	0.989	0.566
1.3	98.73	-68.56	98.69	-68.81	0.989	0.479
1.4	44.38	-93.74	44.38	-93.86	0.989	0.128

Tableau.2 : Impédance vue à l'entrée du réseau No  
après optimisation et synthèse.

L'impédance  $Zzo(s)$  après synthèse s'écrit :

$$Zzo(s) = \frac{1}{Cs + \frac{1}{Ls + \frac{1}{C7s + \frac{1}{Ls + 50}}}} \quad (14)$$

Le réseau No (Fig.14) nous permet de déterminer l'impédance de sortie et d'en déduire le T.O.S (Fig.15) à la sortie de l'amplificateur .

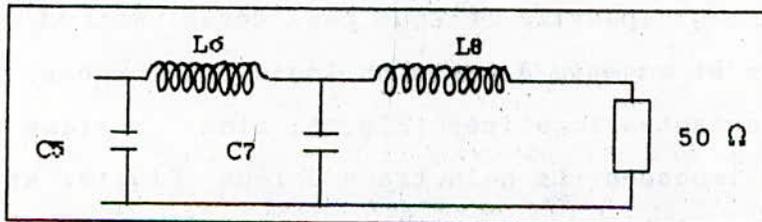


Fig.14 : Réseau de sortie No

Les éléments LC du réseau No ont pour valeurs :

$C5 = 3.063 \text{ pF}$   
 $L6 = 9.593 \text{ nH}$   
 $C7 = 4.322 \text{ pF}$   
 $L8 = 5.665 \text{ nH}$

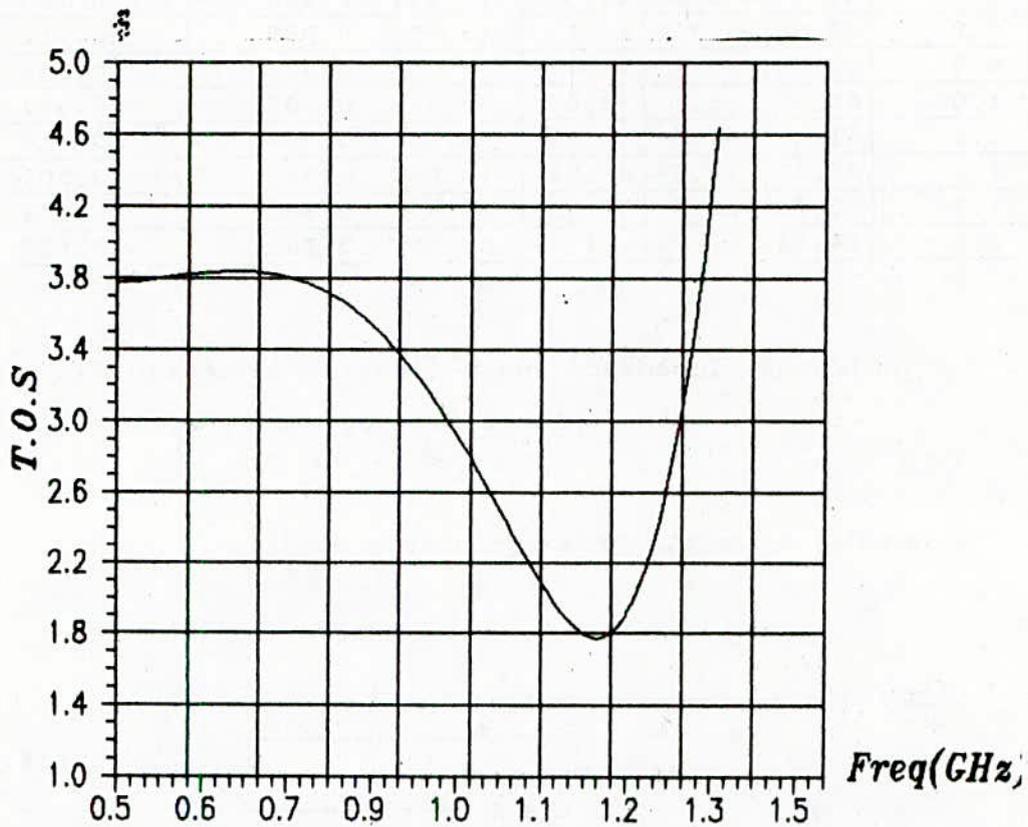


Fig.15 :T.O.S à la sortie de l'amplificateur

c- Amplificateur à constantes localisées

Les réseaux passifs obtenus par cette méthode itérative sont simples et adaptés à la technologie microruban. L'amplificateur à constantes localisées (Fig.16) ainsi réalisé répond aux contraintes imposées. Le gain transducique (Fig.17) est constant et nettement amélioré après optimisation.

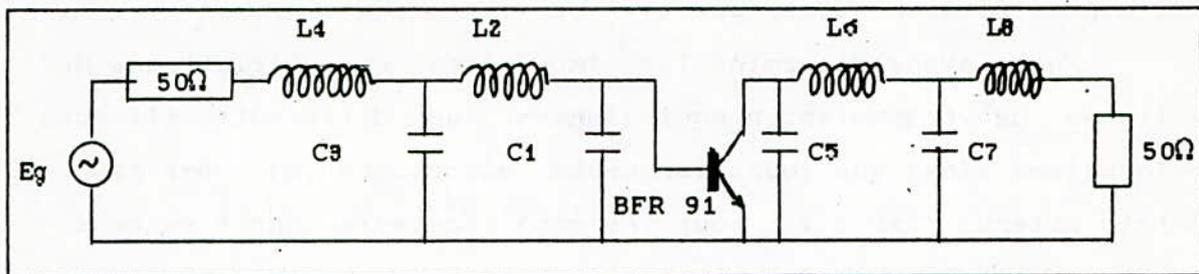


Fig.16 :Amplificateur à constantes

Localisées.

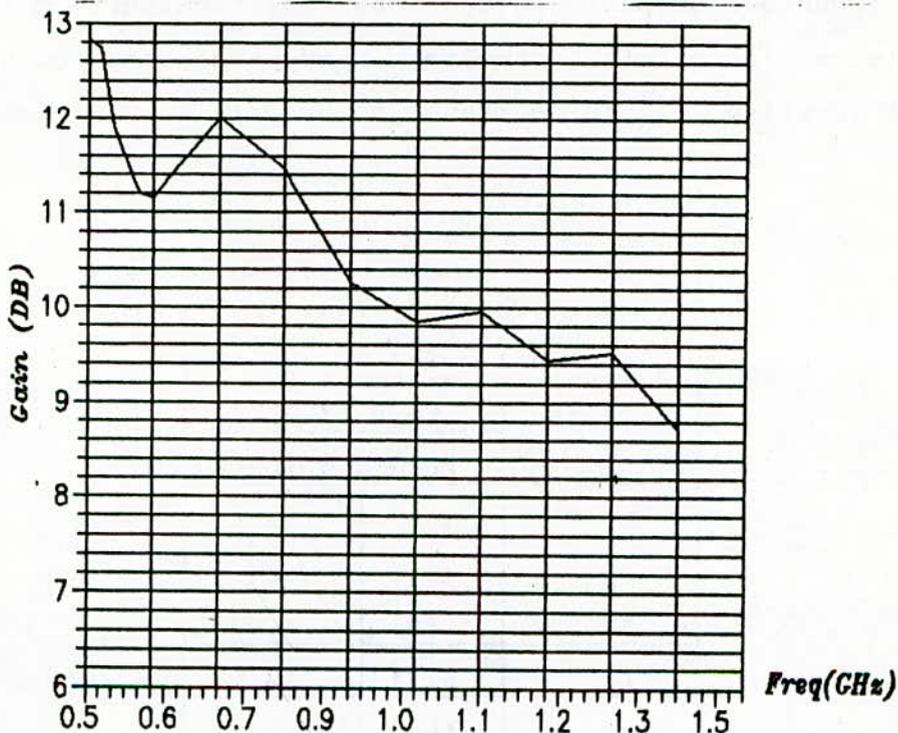


Fig.17 :Gain transducive de l'amplificateur

### 2-2-3 Interprétation des résultats

La méthode numérique permet d'obtenir des structures symétriques simples ( cellules LC ). Le T.O.S à l'entrée de l'amplificateur (Fig.13) est amélioré ce qui se traduit par une hausse sensible (Fig.17) du gain. Ce gain n'est pas altéré par l'accentuation du T.O.S (Fig.15) à la sortie de l'amplificateur.

Cette méthode nous a donc permis d'obtenir un gain maximum constant dans la bande de travail.

### 2-3 Amplificateur distribué

Nous avons déterminé les impédances caractéristiques des lignes de transmission équivalentes aux différents éléments localisés ainsi que leurs longueurs électrique ( $\theta$ ). Les résultats obtenus (Tab.3,4) pour les amplificateurs conçus successivement par la méthode analytique et Numérique, permettent, en utilisant la ligne microruban ( RT/ duroid 5880), la réalisation par la technique de photogravure des amplificateurs distribués équivalents. L'erreur [10] commise en adoptant ces équivalences élément localisé - ligne de transmission doit être minimum .

Méthode analytique		
Elément localisé	Elément réparti	
	$Z_c(\Omega)$	$\theta$ (Deg.)
L1	150	23.6
L2	45.9	30
L3	150	4.93
L4	61.1	23
L5	150	62.17
L6	126.3	60
C4	20	18

Tableau .3 : Eléments de l'amplificateur distribué

Les capacités séries C1, C2 et C3 ne peuvent être remplacées par des lignes de transmission , ce qui nous a conduit à les choisir de telle sorte qu'elles soient adaptées à la ligne microruban ( condensateurs en chip ). Les lignes équivalentes aux inductances L2, L4 et L6 doivent être court circuitées.

Méthode numérique		
Elément localisé	Elément réparti	
	Zc (Ω)	θ (Deg)
L2	150	53.13
L4	150	27.19
C1	19	17.0
C3	17	19.0
C5	20	23.0
C7	20	37.0
L6	150	22.39
L8	150	13.0

Tableau.4:Eléments de l'amplificateur distribué.

L'inconvénient majeur de la conception des amplificateurs distribués (Fig.18) par la méthode analytique, réside dans le fait que sa réalisation n'est pas tellement adaptée à la ligne microruban. En effet la réalisation des capacités série en structure microruban n'est pas aisée.

La méthode numérique présente l'avantage d'éviter ces difficultés en adoptant lors de la synthèse uniquement des cellules LC; ainsi toutes les capacités seront shuntées et on les remplacera par des lignes ouvertes d'impédance aussi faible que possible.

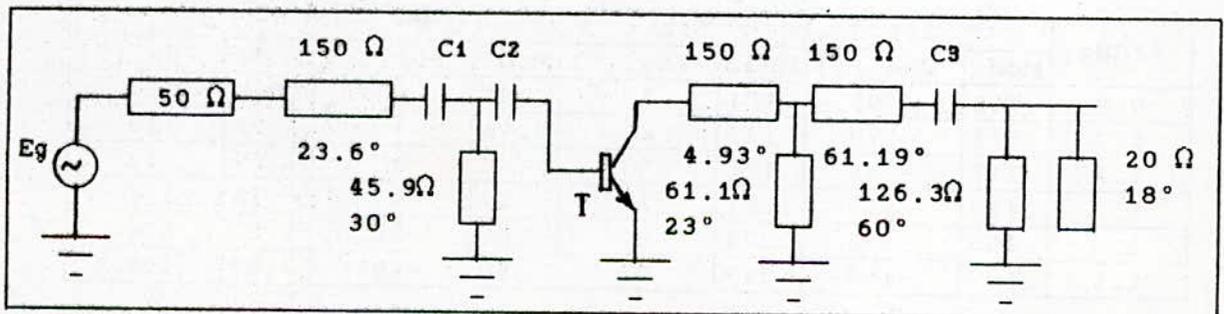


Fig.18 : Amplificateur distribué conçu par la méthode analytique.

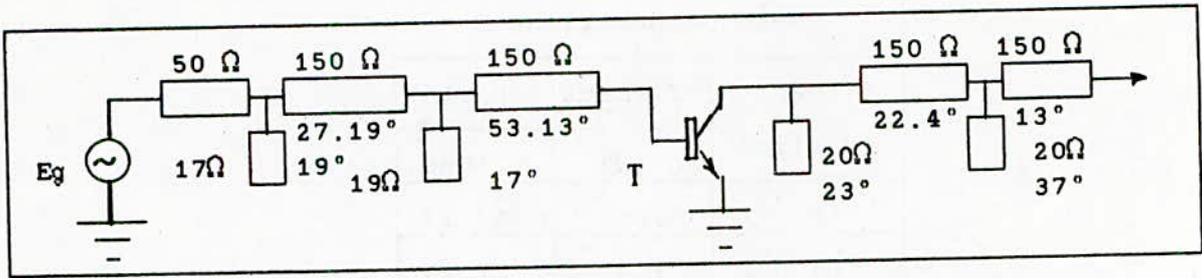


Fig.19 : Amplificateur distribué conçu par la méthode numérique.

### 3- Réalisation

L'amplificateur (Fig.20) a été réalisé sur duroid 5880 en technologie distribuée à partir de la méthode analytique. Les mesures expérimentales (Tab.5) ont été obtenues à l'aide d'un analyseur de réseau HP 8089 à visu polaire pourvu d'un système de polarisation autonome.

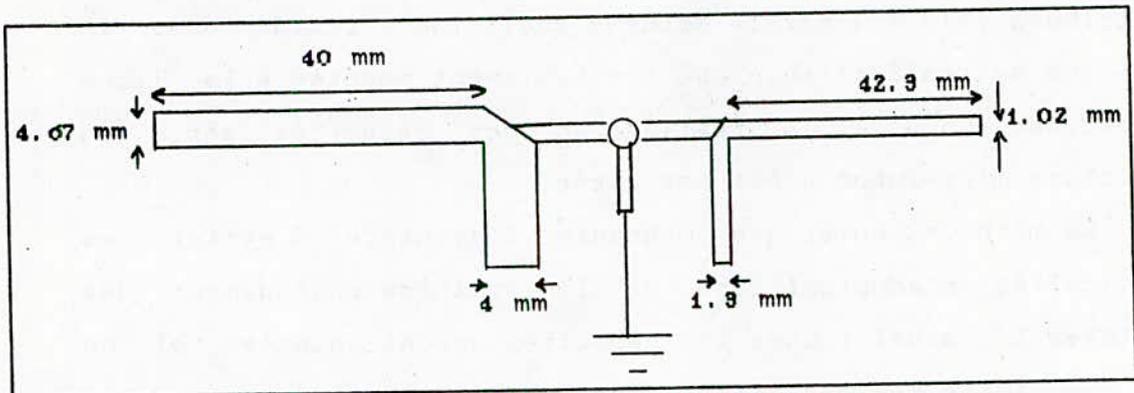


Fig.20 : Amplificateur F.I en technologie distribuée.

F (GHz)	S11		S12		S22		S21	
	Mod.	Pha. (°)						
0.9	.114	- 95	.101	40	.61	-50	10.7	120
1.0	.112	-170	.112	45	.74	-40	9.75	113
1.1	.117	- 80	.115	65	.64	-30	9.65	113
1.2	.119	- 40	.211	75	.57	-47	6.75	114
1.3	.209	-100	.224	80	.67	-30	3.17	110
1.4	.107	-150	.317	92	.66	-180	3.09	109

Tableau 5 : Résultats expérimentaux.

#### 4- Interprétation des résultats

Les moyens (consommables) dont nous disposions ne nous ont pas permis de réaliser un amplificateur selon les résultats précis obtenus à partir de la méthode numérique. C'est la raison pour laquelle nous constatons une désadaptation en sortie se traduisant par une dégradation du gain. De plus, la non linéarité de phase peut engendrer des harmoniques indésirables. Cependant, ces résultats sont acceptables pour une réalisation grand public.

#### Conclusion

Les amplificateurs conçus par les deux méthodes que nous avons présentées ont des performances répondant aux normes internationales de la T.V.D.S, en l'occurrence, un gain constant (de l'ordre de 9 dB) dans la bande désirée, un T.O.S à l'entrée élevé ( désadaptation désirée ), un T.O.S à la sortie faible (voisin de 1) donc une impédance de sortie adaptée à la charge.

D'un point de vu théorique la méthode analytique utilise des expressions simples ce qui permet un gain en temps de calcul. Cependant elle nécessite la connaissance du modèle électrique du transistor utilisé et présente également l'inconvénient de fournir des structures associés difficiles à réaliser en technologie distribuée. Toutefois son utilisation pour la réalisation d'amplificateurs travaillant jusqu'à 2 GHz, donne des résultats performants.

La méthode numérique nécessite à la fois un temps de calcul plus long dépendant du choix de la valeur initiale qui doit être judicieux et, des mesures récentes des paramètres  $S_{ij}$  du transistor pour un certain nombre de fréquences. Par contre la connaissance au préalable d'un modèle du transistor n'est pas exigée. Couplée à un un programme d'optimisation, elle permet l'amélioration du circuit aboutissant à un produit fini nécessitant aucune correction. Elle présente également, l'avantage

d'obtenir des structures planaires simples à réaliser en technologie distribuée et, des amplificateurs performants travaillant jusqu'à 12 Ghz.

Les mesures expérimentales obtenues peuvent être améliorées d'une part avec un choix plus judicieux du point de repos du transistor et, d'autre part, à l'aide de réseaux passifs LC symétriques réalisés en technologie localisée ou distribuée .

#### B I B L I O G R A P H I E

- [1] Trabelsi .M  
" Amplificateur micro-onde à faible bruit pour la T.V.D.S."  
thèse de magister, E.N.P juin 1988.
- [2] Yagoub.M.C.E  
" Mélangeur micro-onde en bande X pour la T.V.D.S."  
thèse de magister, E.N.P decembre 1987.
- [3] U.I.T.  
" Actes finals de la C.A.M.R pour la radiodiffusion par satellite ." C.A.M.R / RS 77, Geneve, 1977
- [4] Tri.T.HA  
" Solid state microwave amplifier design ", John Wiley and Sons, New York 1981.
- [5] Vendelin.G.D  
" Design of amplifiers and oscillators by the S parameter method ." John Wiley and Sons, New York, 1982.
- [6] Walter H.KU, Wendell C., Petersen  
" Optimum gain-bandwidth limitations of transistor amplifiers as reactively constrained active two-port network."  
IEEE Transactions on circuits and systems, juin 1985.
- [7] Soares, R., Graffeuil, J., Obregon, J.  
"Application des transistors à effet de champ en arséniure

de Gallium ", Eyrolles, Paris, 1984.

[8] Gupta.K.C,Ramesh Garg,Rakesh Chadha

" Computer aided design of microwave circuits ."

Artech House, 1981.

[9] Wai-Kai Chen

" Theory and design of broadband matching networks."

Pergamon Press, Oxford, New York, 1976.

[10] Pieter L.D.Abrie

" The design of impedance matching network for radio-Frequency and microwave amplifiers." ,Artech House, 1985

[11] Herbert J.Carlin and James J.Komiak

" A new method of broadband equalization applied to microwave amplifiers ."

IEEE M T T, Vol 27, N°2, fevrier 1979.

CONTRIBUTION SUR UNE APPROCHE NUMERIQUE DE RESEAUX

MICRO ONDES A N POLES

Par L., DEKAR \*, K., Z., GRABOWSKI , M., TRABELSI

ملخص:

البرنامج الذي حددناه يُمكن من تحليل ودراسة الدارات الخطية للأمواج الميكرونية. هذه الدارات تحتوي على مجمل المركبات (المحلية، الموزعة، الفعالة). هذا البرنامج يحسب المصفوفة التفرق للدارة الامواج الموجودة في مدخل ومخرج كل مركب ويمكن له أيضًا أن يحسب حساسيات الدارة بالنسبة لثباته واحدة أو أكثر.

**ABSTRACT :**

Computer-aided analysis is perhaps the most developed and the most widely used aspect of C.A.D. For this purpose, a microwave circuit analysis program M.C.A.P we have produced, calculates S-matrix of the overall circuit in terms of the S-parameters of constituent components (lumped, distributed, passive and active) of the circuit and compute the waves at all the components ports in the network. Another aspect of M.C.A.P, is the evaluation of circuit sensitivities.

**RESUME :**

Dans une C.A.O, la partie la plus développée et la plus utilisée est le programme d'analyse. Notre travail a consisté à la mise au point d'un logiciel d'analyse de réseaux micro ondes linéaires, dénommé P.A.C.M (Programme d'Analyse de Circuits Micro ondes) qui inclue la quasi majorité des composants utilisés (localisés, répartis, passifs et actifs) en considérant les principaux supports de transmission tels que la stripline et la microstripline. Notre programme calcule la matrice de dispersion du réseau, les ondes normalisées aux portes de chaque composant individuel et évalue les sensibilités du circuit.

\* : cet article entre dans le cadre d'une thèse de magister soutenue le 27 janvier 1992 à l'ENP

## TABLEAU DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

### SYMBOLES :

- $a_i$  : Onde incidente la  $i^{\text{ème}}$  porte du réseau
- $b_i$  : Onde réfléchie la  $i^{\text{ème}}$  porte du réseau
- $c_g$  : Onde générée par la source
- $\alpha_i, \beta_i$  : Ondes incidente et réfléchie la  $i^{\text{ème}}$  porte du réseau adjoint
- [a] : Vecteur ondes incidentes
- [b] : Vecteur ondes réfléchies
- [c] : Vecteur ondes générées
- [S] : Matrice de dispersion
- [ $\Gamma$ ] : Matrice connexion  $\Gamma$
- [W] : Matrice de dispersion avec connexion
- F : Fréquence
- FI, FF, dF : Fréquence initiale, fréquence finale, pas
- $\phi$  : Paramètre (résistance, capacité, impédance, etc..)

### Abréviations :

- C.A.O : Conception à l'Aide de l'Ordinateur
- P.A.C.M : Programme d'Analyse de Circuits Microondes
- S.P.C : Sous-Programme qui calcul la matrice Connexion
- S.P.S : Sous-Programme qui calcul la matrice de dispersion
- S.P.DIAG : Sous-Programme qui déplace les ' 1 ' sur la diagonale
- S.P.REOR : Sous-Programme qui réordonne la matrice
- S.P.DECLU : Sous-Programme qui évalue les éléments des matrices triangulaires L et U
- S.P.FBS : Sous-Programme qui détermine la solution
- LIBRAIRIE 1 : Sous-programmes qui évaluent les matrices-S de 28 types de composants
- LIBRAIRIE 2 : Sous-programmes qui évaluent les dérivées des matrices-S de 10 types de composants
- S.P.DERIVEE : Sous-programme qui évalue les sensibilités

## I - INTRODUCTION :

Le but de notre étude porte sur la mise au point d'un programme d'analyse de circuits microondes .

L'intérêt d'un tel travail est lié à la nécessité d'utiliser en télécommunications des composants électroniques pour lesquels la structure est souvent complexe dans cette gamme de fréquences .

La procédure classique de conception d'un circuit microonde consiste à calculer ses dimensions , puis à réaliser un prototype de circuit qui est testé dans la gamme de fréquences envisagée . Une optimisation peut être faite en introduisant dans le circuit des obstacles calibrés (stubs , fentes ou iris) pour y modifier des impédances .

Cependant , en plus du cot très souvent excessif de tels bancs d'expérimentation , cette méthode empirique perd de son efficacité lorsque les systèmes sont complexes . En effet , des mesures directes sur le circuit deviennent très difficiles , voir impossible et nécessite alors la réalisation de plusieurs prototypes successifs avant d'aboutir au circuit désiré . C'est par des techniques de conception par ordinateur (C.A.O) que la conception de tels réseaux a pu se faire , notamment pour les circuits intégrés .

Historiquement , la C.A.O a été utilisée pour la première fois en microondes lors de la conception de circuits hybrides . La conception de tels circuits est très complexe du fait de la grande diversité de composants (passifs et actifs) et de la recherche d'une caractérisation aussi précise que possible de ces composants . Le problème est de chercher la meilleure approche mathématique de l'étude des circuits microondes et donc , de choisir la représentation la plus appropriée de ces circuits.

Ainsi , une procédure de conception liée aux techniques de simulation consiste à utiliser les caractéristiques des composants et d'ajuster analytiquement les paramètres afin d'aboutir à la performance désirée ; pour ensuite passer à la fabrication d'un prototype . Et si la

simulation est bonne , souvent un seul circuit d'essai , voire deux au maximum sont suffisants pour atteindre la configuration du circuit final .

Dans cet esprit , nous nous sommes fixés comme objectif de concevoir un logiciel se basant sur une méthode qui soit la plus générale , c'est à dire capable d'analyser n'importe quel réseau : Comme support de caractérisation des éléments nous sommes intéressés à la matrice de dispersion car elle est plus pratique pour les réseaux dont les éléments ne sont pas en cascade et les mesures des paramètres S des composants actifs ne nécessitent pas de court-circuit ou circuit ouvert comme pour les matrices Z,Y ou ABCD [ 1,2,3 ] .

L'analyse d'un réseau microonde peut se faire à l'aide de trois méthodes , qui sont la méthode de ' la matrice [W] ' , la méthode de ' séparation des portes ' et la méthode des ' sous-réseaux ' [ 4,5,6 ] .

## II - METHODES D 'ANALYSE D 'UN RESEAU MICRO-ONDE :

### II.1 - Méthode de la Matrice W :

Considérons le réseau de la figure 1 , constitué de N multiportes supposés non connectés et quâtresdes générateurs indépendants . Les relations entre les ondes incidentes  $a_j$  et réfléchies  $b_j$  du 1<sup>me</sup> composant ayant k portes sont :

$$b_j = S_{1j} \cdot a_j \quad ( 1 )$$

avec ,  $i= 1, \dots, N$  et  $j= 1, \dots, k$

Pour un générateur indépendant la relation entre  $b_g$  et  $a_g$  sera :

$$b_g = S_g \cdot a_g + c_g \quad ( 2 )$$

avec ,

$$S_g = \frac{Z_g - Z_r}{Z_g + Z_r} \quad ( 3 )$$

et ,

$$c_g = \frac{\sqrt{\operatorname{Re}(Z_r)}}{Z_g + Z_r} \quad (4)$$

Où ,  $Z_g$  est l'impédance interne du générateur et  $Z_r$  est l'impédance de référence.

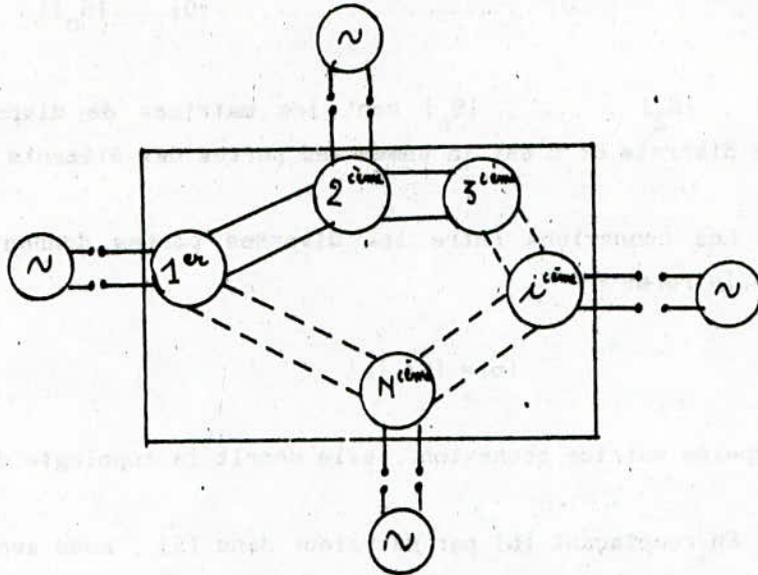


Fig 1 : Réseau microonde constitué de N multiportes

Si un réseau comporte des multiportes et des générateurs les vecteurs d'ondes normalisées sont définies par :

$$[b] = [\Gamma] \cdot [a] + [c] \quad (5)$$

avec ,

$$[b] = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} ; [a] = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} ; [c] = \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_m \end{bmatrix}$$

et ,

$$[S] = \begin{bmatrix} [S_1] & [0] & [0] & \dots & [0] \\ [0] & [S_2] & [0] & \dots & [0] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [0] & \dots & [0] & \dots & [S_n] \end{bmatrix} \quad (6)$$

Où ,  $[S_1]$  ,  $[S_2]$  , ... ,  $[S_n]$  sont les matrices de dispersion des n composants discrets et m est la somme des portes des éléments du réseau .

Les connexions entre les diverses portes donnent lieu à un système de la forme :

$$[b] = [\Gamma] \cdot [a] \quad (7)$$

$[\Gamma]$  est appelée matrice connexion , elle décrit la topologie du circuit .

En remplaçant  $[b]$  par sa valeur dans (5) , nous avons :

$$[W] \cdot [a] = [c] \quad (8)$$

Où ,

$$[W] = [\Gamma] - [S]$$

La matrice  $[W]$  est appelée matrice de dispersion avec connexion .

Les éléments diagonaux de la matrice  $[W]$  sont des valeurs opposées aux coefficients de réflexion . Ceux hors de diagonale sont de valeurs opposées aux coefficients de transmission , aux '1' (éléments de la matrice connexion) et tous les autres éléments sont des zéros .

Par ailleurs , les structures nulles et non nulles de  $[W]$  dépendent uniquement de la topologie du réseau ; elles ne subissent pas l'influence des caractéristiques des composants ou de la fréquence .

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de déterminer toutes les ondes en chaque porte des composants, ceci est essentiel pour l'analyse des sensibilités. Mais en revanche si le nombre d'éléments du circuit est élevé, la dimension de [W] devient très grande et le temps de calcul requis pour la résolution du système (8) sera relativement important.

## II.2 - Méthode avec Séparation des Portes :

C'est une méthode qui est utilisée pour déterminer la matrice S d'un réseau composé de N multiportes connectées arbitrairement, n'ayant pas de générateurs. Si le réseau possède un ou plusieurs générateurs, ceux-ci sont considérés comme extérieurs au réseau principal ayant i portes internes et e portes externes.

Les relations entre les vecteurs d'ondes normalisées sont données par :

$$[b] = [S].[a] \quad (9)$$

[S] est donnée par (6)

La séparation des ondes aux i portes connectées de celles qui se présentent aux e portes non connectées, se traduit mathématiquement par l'échange des lignes et des colonnes de l'équation (9). Celles-ci s'écrivent alors :

$$\begin{vmatrix} [b_e] \\ [b_i] \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} [S_{ee}] & [S_{ei}] \\ [S_{ie}] & [S_{ii}] \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} [a_e] \\ [a_i] \end{vmatrix} \quad (10)$$

Où,  $[a_e]$ ,  $[b_e]$  et  $[a_i]$ ,  $[b_i]$  sont respectivement, les vecteurs d'ondes incidentes et réfléchies aux e portes externes et aux i portes internes.  $[S_{ee}]$ ,  $[S_{ei}]$ ,  $[S_{ie}]$  et  $[S_{ii}]$  sont les sous-matrices de [S].

Les contraintes imposées aux connexions des portes internes s'expriment par :

$$[b_1] = [\Gamma]. [a_1] \quad (11)$$

Et , en substituant (11) dans (10) , nous obtenons :

$$[b_e] = [S]. [a_e] \quad (12)$$

avec ,

$$[S] = [S_{ee}] + [S_{e1}]. ([\Gamma] - [S_{11}])^{-1}. [S_{1e}] \quad (13)$$

Les propriétés de la matrice  $([\Gamma] - [S_{11}])$  sont similaires à celles de  $[W]$  , énoncées dans la première méthode . La dimension de la matrice  $[S]$  est  $e.e$  et le temps de calcul requis pour évaluer  $[S]$  est proportionnel au nombre d'opérations [ 4 et 5 ] qui est :

$$N = e^2.i + e.i^2 + \beta.i^3 \quad (14)$$

Où ,  $\beta$  est une constante proche de '1' , elle dépend de l'algorithme utilisé pour l'inversion de la matrice  $([\Gamma] - [S_{11}])$  .

### II.3 - Méthode des Sous-Réseaux :

Lorsqu'un réseau possède beaucoup de portes internes le temps de calcul est alors élevé . Celui-ci peut être réduit si le réseau principal est décomposé en sous-réseaux . Ainsi , les matrices  $S$  des sous-réseaux sont calculées séparément puis leur combinaison permet d'obtenir la matrice de dispersion du réseau .

Une optimisation de cette méthode est obtenue si les multiportes sont connectés deux à deux . En effet , les opérations arithmétiques se font sur des matrices de faibles dimensions ; donc le temps de calcul est considérablement réduit .

L'inconvénient pour cette méthode réside dans le fait que

seulés les ondes aux portes externes sont évaluées . Or , dans l'élaboration d'un programme C.A.O , il est souvent impératif de pouvoir agir sur les valeurs des composants internes afin d'approcher les fonctions désirées . Cette démarche n'est possible qu'avec la connaissance des ondes en chaque porte . Aussi , malgré le temps de calcul relativement long nous avons adopté la première méthode .

#### II.4 - Calcul des sensibilités :

La sensibilité d'une fonction est la dérivée partielle de la fonction par rapport à un paramètre  $\phi$  ; elle nous renseigne sur la manière dont les variations de ce paramètre affectent la fonction du réseau .

La méthode d'analyse des sensibilités que nous avons utilisée dans le programme est la méthode du 'CIRCUIT ADJOINT' [ 7, 8 ] , car elle est plus pratique pour l'évaluation des sensibilités d'une onde par rapport à plusieurs paramètres .

Dans cette méthode nous considérons deux circuits , le circuit à analyser et un second circuit fictif (appelé circuit adjoint) caractérisés respectivement , par les ondes  $a_1$  ,  $b_1$  et  $\alpha_1$  ,  $\beta_1$  . Le circuit adjoint est tel que :

- Sa matrice connexion est égale à celle du réseau à analyser ( c'est à dire même topologie ) .
- Les ondes incidentes et réfléchies des deux circuits vérifient la relation suivante :

$$\sum_{i=1}^{i=n} ( a_i \cdot \beta_i - b_i \cdot \alpha_i ) = 0 \quad ( 15 )$$

Où , n est le nombre de portes des deux réseaux .

- Si la valeur de  $\phi$  est changée , alors les ondes  $a_j$  et  $b_j$  à la  $j^{i\text{me}}$  porte subissent respectivement , des variations  $da_j$  et

$db_j$  . L'expression précédente s'écrit :

$$\sum_{j=1}^{j=n} ( (a_j + da_j) \cdot \beta_j - (b_j + db_j) \cdot \alpha_j ) = 0 \quad (16)$$

En soustrayant (15) de (16) , il vient :

$$\sum_{j=1}^{j=n} ( da_j \cdot \beta_j - db_j \cdot \alpha_j ) = 0 \quad (17)$$

Si le réseau contient  $i$  portes internes et  $e$  portes externes et si les portes externes sont adaptées ; alors la somme des sensibilités ,  $G$  , des ondes réfléchies aux portes externes est définie par :

$$G = [\alpha_k] \cdot \frac{\partial [S_k]^t}{\partial \phi} \cdot [a_k] = [\alpha_e]^t \cdot \frac{\partial [b_e]}{\partial \phi} \quad (18)$$

Où ,  $[S_k]$  est la matrice de dispersion du  $k^{i\text{ème}}$  composant .

$$G = \frac{\partial b_1}{\partial \phi} + \dots + \frac{\partial b_e}{\partial \phi}$$

Enfin , si nous voulons déterminer la sensibilité d'une variable  $b_r$  , il suffit de prendre tous les éléments de  $[\alpha_e]$  nuls , sauf le  $r^{i\text{ème}}$  élément qui sera égale à 1 . Ainsi , nous obtenons :

$$G = \frac{\partial b_r}{\partial \phi} = \sum_{k=1}^{k=1} [\alpha_k]^t \cdot \frac{\partial [S_k]}{\partial \phi} \cdot [a_k] \quad (19)$$

Cette relation peut être généralisée dans le cas des sensibilités par rapport à plusieurs paramètres .

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial b_r}{\partial \phi_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial b_r}{\partial \phi_n} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{k=1}^{k=1} [\alpha_k] \cdot \frac{\partial [S_k]}{\partial \phi_1} \cdot [a_k] \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^{k=1} [\alpha_k] \cdot \frac{\partial [S_k]}{\partial \phi_n} \cdot [a_k] \end{vmatrix} \quad ( 20 )$$

### III - STRUCTURE DU PROGRAMME P.A.C.M :

Le Programme d'Analyse de Circuits Microondes ( P.A.C.M) que nous avons élaboré permet d'analyser un réseau microonde linéaire ayant une topologie arbitraire avec des éléments localisés , distribués et / ou actifs . Il tient compte également , de circuits intégrés microstrip ( microbande) et stripline (microbande inversée) , ainsi que certaines discontinuités (trou, fente, coude ect...) inhérentes à ce type de supports de transmission .

Il possède un bon interface avec l'utilisateur de par sa facilité à introduire les données . Il est écrit en langage FORTRAN et a été testé sur ordinateur VAX/750 .

En sortie , il affiche les paramètres principaux du réseau tels que , la fréquence , les caractéristiques de chaque composant , la description des connexions , la matrice de dispersion , les ondes incidentes et réfléchies en chaque porte . Enfin , une étude des sensibilités peut être entreprise à la demande de l'utilisateur .

Le programme P.A.C.M dont l'algorithme est représenté sur la figure 2 , est décomposé en trois parties .

- La première contient les sous-programmes qui calculent la matrice de dispersion et la matrice connexion .

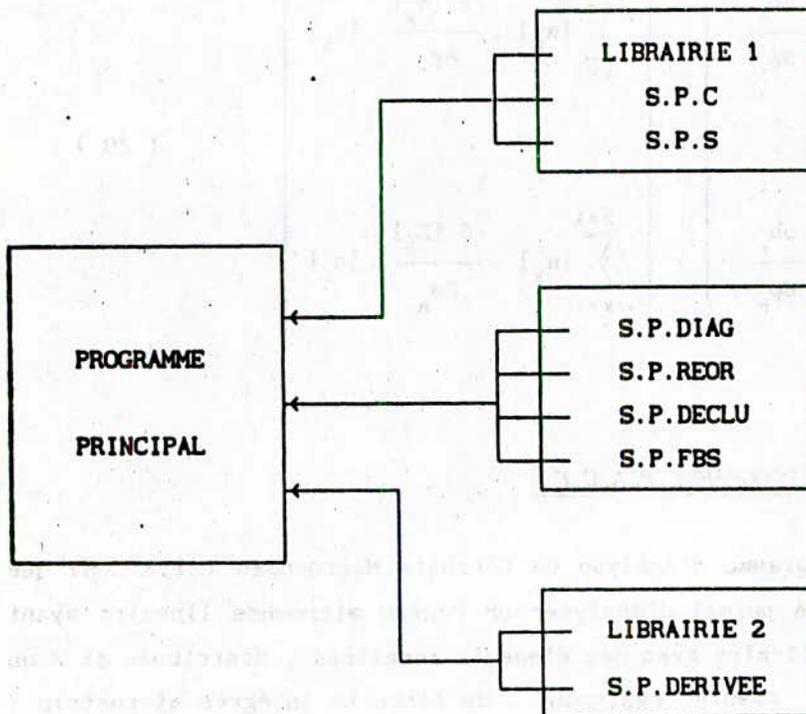


Fig 2 : Schéma synoptique du programme P.A.C.M.

- La deuxième consacrée à la résolution du système d'équations linéaires donné par la relation (8), est basée sur la méthode de décomposition LU utilisant les techniques de matrices creuses [4]. Elle est constituée de quatre procédures :

- L'examen de la structure non nulle de la matrice [W] matrice [W] (seuls les éléments non nuls sont mémorisés) .
- L'ordonnement des lignes et colonnes de [W], afin que le nombre d'éléments créés au cours de la décomposition LU soit minimum et que le nombre d'opérations soit le plus petit .
- La génération d'un code qui exécute uniquement les opérations arithmétiques sur des opérands non nulles .

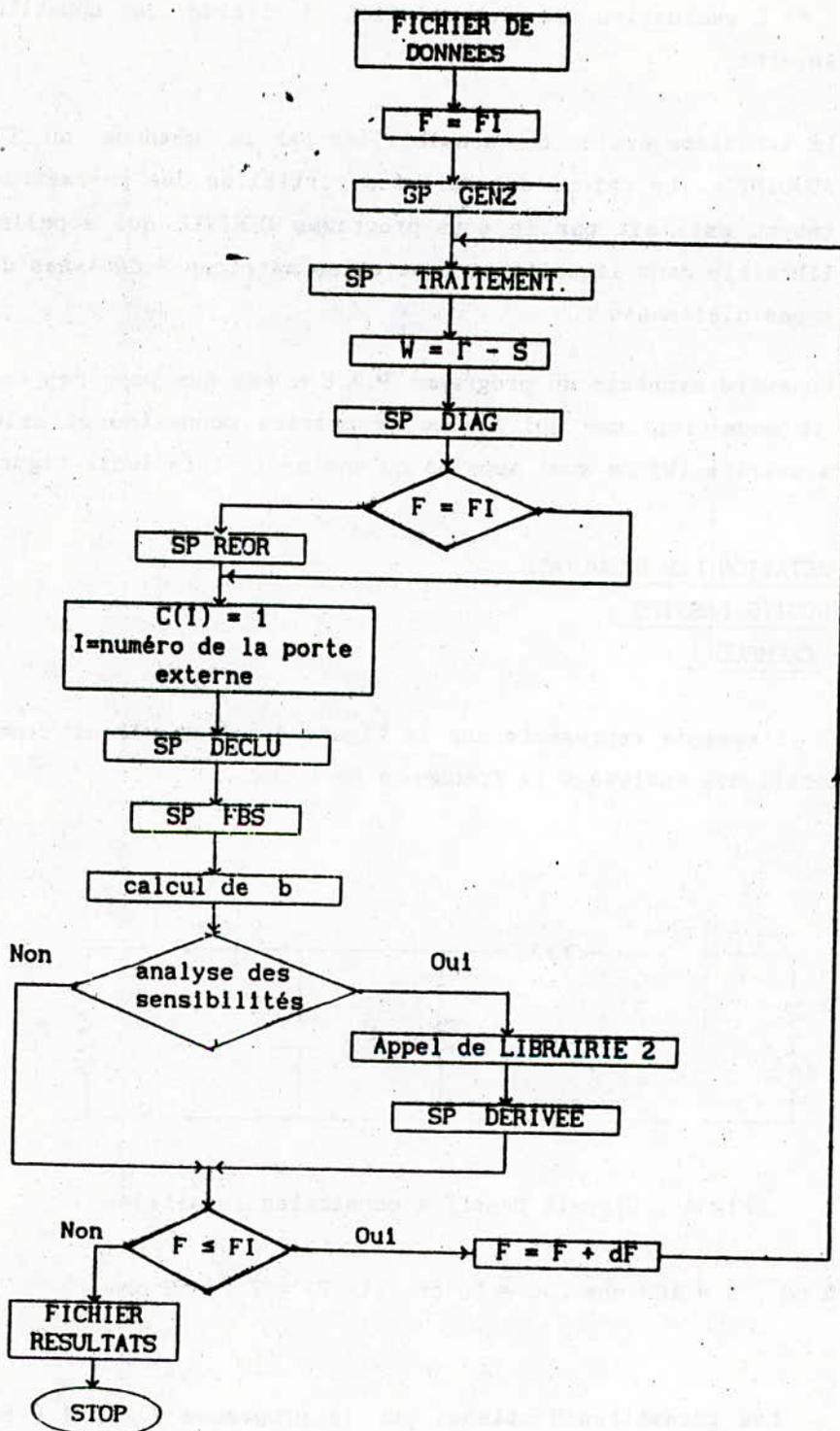


Fig 3 : Algorithme du programme P.A.C.M

\* L'évaluation de la solution à l'aide de substitutions directe et inverse .

- La troisième évalue les sensibilités par la 'méthode du CIRCUIT ADJOINT' . Le calcul des dérivées partielles des paramètres-S du réseau est fait par le sous-programme DERIVEE qui appelle une librairie dans laquelle se trouve les matrices-S dérivées de dix types d'éléments .

Un autre avantage du programme P.A.C.M est que pour des analyses répétées , le sous-programme qui évalue la matrice connexion et celui qui réordonne la matrice [W] ne sont appelés qu'une seule fois (voir figure 3) .

#### IV - INTERPRETATION DES RESULTATS :

##### IV.2 - CIRCUITS PASSIFS :

##### IV.2.1 - EXEMPLE 1 :

L'exemple représenté sur la Figure 4 est un circuit passif à constantes localisées analysé à la fréquence de 1 GHz .

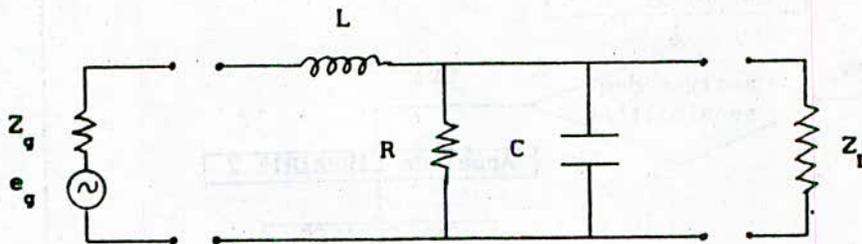


Fig 4 : Circuit passif à constantes localisées

Où ,  $L = 25$  nH ,  $R = 100$  ohm ,  $C = 50$  pF et  $Z_L = Z_g = 50$  ohm

Les paramètres-S obtenus par le programme P.A.C.M (  $S_{cal}$  ) et ceux donnés dans la référence [ 12 ] (  $S_{ref}$  ) sont comparés sur le tableau 1 nous noterons une erreur maximale de 0.0008 .

			MODULE
$S_{11}$	$S_{11cal}$	$0.80818 + j 0.58698$	0.99885
	$S_{11ref}$	$0.80849 + j 0.58720$	0.99923
	$\frac{ S_{11cal}  -  S_{11ref} }{ S_{11ref} }$		0.00038
$S_{12}$	$S_{12cal}$	$-0.03588 - j 0.01564$	0.039135
	$S_{12ref}$	$-0.03589 - j 0.01560$	0.039132
	$\frac{ S_{12cal}  -  S_{12ref} }{ S_{12ref} }$		0.00002
$S_{21}$	$S_{21cal}$	$-0.03588 - j 0.01564$	0.039135
	$S_{21ref}$	$-0.03589 - j 0.01560$	0.039132
	$\frac{ S_{21cal}  -  S_{21ref} }{ S_{21ref} }$		0.00002
$S_{22}$	$S_{22cal}$	$-0.98675 - j 0.12834$	0.99506
	$S_{22ref}$	$-0.98787 - j 0.12608$	0.99588
	$\frac{ S_{22cal}  -  S_{22ref} }{ S_{22ref} }$		0.0008

TABLEAU 1

IV.2.2 - EXEMPLE 2 :

L'exemple de la figure 5 concerne un réseau passif à constantes réparties dont les éléments ne sont pas connectés en cascade . L'analyse a été faite pour les fréquences allant de 1 GHZ à 1.5 GHZ .

la comparaison des résultats (voir tableau 2) avec ceux de la référence [11] fait ressortir une erreur maximale de 0.0058 pour le T.O.S et de 0.0115 pour les pertes de transmission .

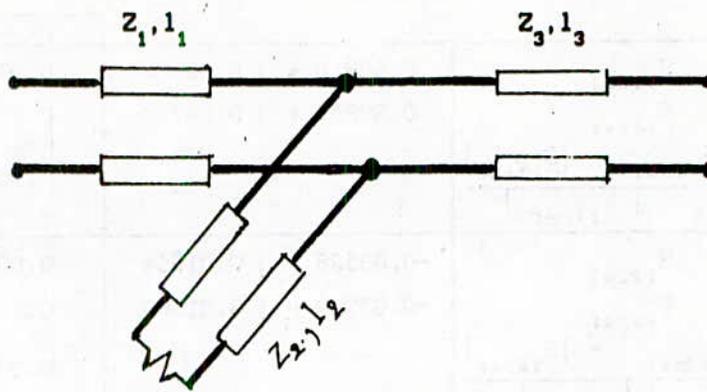


Fig 5 : Réseau passif à constantes réparties

avec ,  $Z_1 = 30 \text{ Ohm}$  ,  $Z_2 = 70 \text{ Ohm}$  ,  $Z_3 = 60 \text{ Ohm}$  ,  $R = 50 \text{ Ohm}$  et  $l_1 = l_2 = l_3 = \lambda/4$

Freq	Paramètres-S	T.O.S	Pertes de transmission (dB/deg)
1	$S_{11} = -0.31530 - j 0.12688$ $S_{12} = -0.58293 - j 0.40864$ $S_{21} = -0.63749 - j 0.44962$ $S_{22} = 0.53224 + j 0.39196$	$TOS_c = 2.029$ $TOS_r = 2.041$ $\frac{\Delta TOS}{TOS_r} = 0.0058$	$TL_c = 2.95 / -215.03^\circ$ $TL_r = 2.96 / -214.8^\circ$ $\frac{\Delta TL}{TL_r} = 0.0033$
1.1	$S_{11} = -0.36471 - j 0.08785$ $S_{12} = -0.65867 - j 0.25097$ $S_{21} = -0.71882 - j 0.27394$ $S_{22} = 0.63343 + j 0.25219$	$TOS_c = 2.200$ $TOS_r = 2.205$ $\frac{\Delta TOS}{TOS_r} = 0.0022$	$TL_c = 3.039 / -200.85^\circ$ $TL_r = 3.066 / -200.7^\circ$ $\frac{\Delta TL}{TL_r} = 0.0088$
1.2	$S_{11} = -0.3919 - j 0.03131$ $S_{12} = -0.6957 - j 0.0845$ $S_{21} = -0.7574 - j 0.0917$ $S_{22} = 0.6864 + j 0.0869$	$TOS_c = 2.295$ $TOS_r = 2.294$ $\frac{\Delta TOS}{TOS_r} = 0.0004$	$TL_c = 3.086 / -186.9^\circ$ $TL_r = 3.122 / -186.9^\circ$ $\frac{\Delta TL}{TL_r} = 0.0115$

1.3	$S_{11} = -0.3919 + j 0.03131$ $S_{12} = -0.69579 + j 0.0845$ $S_{21} = -0.75748 + j 0.09178$ $S_{22} = 0.68647 - j 0.08690$	$TOS_o = 2.295$ $TOS_r = 2.294$ $\frac{\Delta TOS}{TOS_r} = 0.0004$	$TL_o = 3.086 / -173.7^\circ$ $TL_r = 3.122 / -173.1^\circ$ $\frac{\Delta TL}{TL_r} = 0.0115$
1.4	$S_{11} = -0.36471 + j 0.08785$ $S_{12} = -0.65867 + j 0.25097$ $S_{21} = -0.71882 + j 0.27394$ $S_{22} = 0.63343 - j 0.25219$	$TOS_o = 2.2007$ $TOS_r = 2.205$ $\frac{\Delta TOS}{TOS_r} = 0.0022$	$TL_o = 3.038 / -159.15^\circ$ $TL_r = 3.066 / -159.3^\circ$ $\frac{\Delta TL}{TL_r} = 0.0091$
1.5	$S_{11} = -0.31530 + j 0.12688$ $S_{12} = -0.58293 + j 0.40864$ $S_{21} = -0.63749 + j 0.44962$ $S_{22} = 0.53224 - j 0.39196$	$TOS_o = 2.029$ $TOS_r = 2.041$ $\frac{\Delta TOS}{TOS_r} = 0.0058$	$TL_o = 2.951 / -144.97^\circ$ $TL_r = 2.967 / -145.2^\circ$ $\frac{\Delta TL}{TL_r} = 0.0054$

TABLEAU 2

#### IV.3 - CIRCUITS ACTIFS :

##### IV.3.1 - EXEMPLE 3 :

Le circuit actif à constantes localisées représenté sur la figure 6 a été analysé à la fréquence de 2 GHz . Le transistor utilisé est un HP 35876E ayant les paramètres-S suivants

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= 0.51 / 180^\circ & S_{12} &= 0.059 / 36^\circ \\
 S_{21} &= 3.41 / 62^\circ & S_{22} &= 0.52 / -51^\circ
 \end{aligned}$$

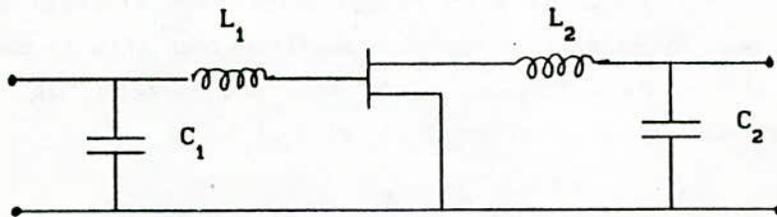


Fig 6 : Circuit actif à constantes localisées

Où ,  $C_1 = 3.84 \text{ pF}$  ,  $L_1 = 1.18 \text{ nH}$  ,  $L_2 = 8.63 \text{ nH}$  et  $C_2 = 1.35 \text{ pF}$

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 3 .

	Module
$S_{11\text{cal}} = -0.0011 + j 0.0005$	0.0012
$S_{11\text{ref}} = -0.00094 + j 0.00035$	0.001
$\Delta  S_{11}  =$	0.0002
$S_{12\text{cal}} = -0.0349 - j 0.08842$	0.09508
$S_{12\text{ref}} = -0.0348 - j 0.08838$	0.095
$\Delta  S_{12}  =$	0.00008
$S_{21\text{cal}} = 0.4293 - j 5.4829$	5.4997
$S_{21\text{ref}} = 0.4322 - j 5.492$	5.509
$\Delta  S_{21}  =$	0.0093
$S_{22\text{cal}} = -0.00063 + j 0.0005$	0.0008
$S_{22\text{ref}} = -0.00066 + j 0.00074$	0.001
$\Delta  S_{22}  =$	0.0002
$VSWR_{11\text{cal}} = 1.0032$ $VSWR_{11\text{ref}} = 1.002$	$\frac{\Delta VSWR}{VSWR} = 0.001$
$VSWR_{22\text{cal}} = 1.0014$ $VSWR_{22\text{ref}} = 1.002$	$\frac{\Delta VSWR}{VSWR} = 0.0005$

TABLEAU 3

#### IV.3.2 - EXEMPLE 4:

Pour l'analyse d'un réseau actif avec éléments à constantes réparties , nous avons pris le cas d'un amplificateur (Fig 7) constitué d'un transistor FET en AsGa (2N6680) , de deux tronçons de lignes ( $Z_1, l_1$  et  $Z_2, l_2$ ) et de deux lignes ouvertes ( $Z_3, l_3$  et  $Z_4, l_4$ ) .

Les résultats de l'analyse sont donnés dans le tableau 4 et une comparaison avec ceux de la référence [ 10 ] a permis l'évaluation d'une erreur relative maximale de l'ordre de 0.34 .

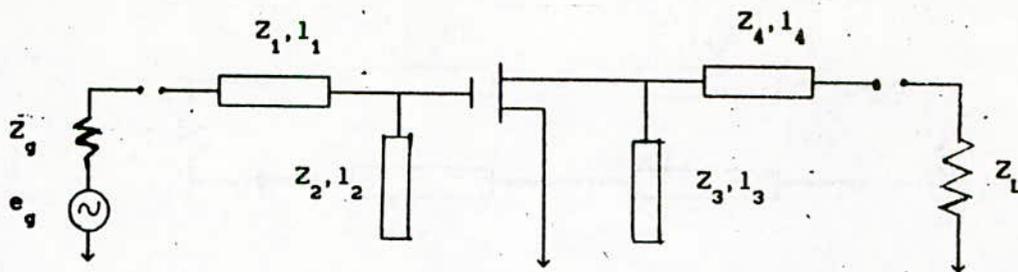


Fig 7 : Circuit actif à constantes réparties

avec ,  $Z_1=29.92 \text{ Ohm}$  ,  $Z_2=26.55 \text{ Ohm}$  ,  $Z_3=43.45 \text{ Ohm}$  ,  $Z_4=65.69 \text{ Ohm}$  ,  $Z_g=Z_L=50 \text{ Ohm}$  ,  $l_1=l_4=1.25 \text{ cm}$  et  $l_2=l_3=1.875 \text{ cm}$  . Les paramètres-S du transistor mesurés à la fréquence de 6 GHz sont :

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= 0.641 / -171.3^\circ & , & & S_{12} &= 0.057 / 16.3^\circ \\
 S_{21} &= 2.058 / 28.5^\circ & , & & S_{22} &= 0.572 / 95.7^\circ
 \end{aligned}$$

Coeff de Reflexion ( coté source )	Coeff de Reflexion ( coté charge )	Gain ( )
$\Gamma_{S_{cal}} = 0.622 / 160.6^\circ$	$\Gamma_{L_{cal}} = 0.634 / 108^\circ$	$G_{cal} = 9.85$
$\Gamma_{S_{ref}} = 0.614 / 160^\circ$	$\Gamma_{L_{ref}} = 0.627 / 106^\circ$	$G_{ref} = 10.5$
$\frac{\Delta\Gamma_S}{\Gamma_{S_{ref}}} = 0.013$	$\frac{\Delta\Gamma_L}{\Gamma_{L_{ref}}} = 0.011$	$\frac{\Delta G_{ref}}{G_{ref}} = 0.062$

TABLEAU 4

#### IV.4 - ANALYSE DES SENSIBILITES D'UN CIRCUIT PASSIF :

Pour l'étude des sensibilités , nous avons pris un transformateur quart d'onde à deux sections ( Fig 8 ) , analysé à la fréquence de 1 GHz .

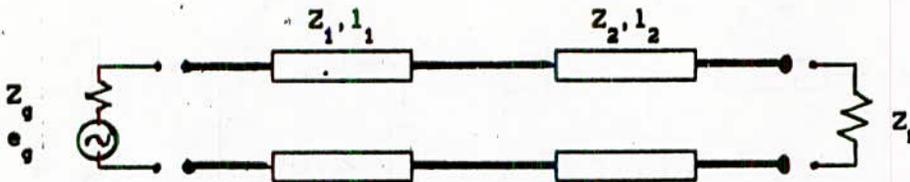


Fig 8 : Transformateur quart d'onde à deux sections

avec ,  $Z_1=59.46 \text{ Ohm}$  ,  $Z_2=84.09 \text{ Ohm}$  ,  $Z_g=50 \text{ Ohm}$  ,  $Z_L=100 \text{ Ohm}$  ,  $l_1=l_2=\lambda/4$

Les sensibilités de  $S_{11}$  par rapport à  $Z_1$  et  $Z_2$  ont été évaluées et comparées à ceux de la référence [ 1 ] dans le tableau 5 .

$S_1 = \frac{\partial S_{11}}{\partial Z_1}$	calculé : 0.01614 référence : 0.01664	$\Delta S_1 = 0.0005$
$S_2 = \frac{\partial S_{11}}{\partial Z_2}$	calculé : 0.01163 référence : 0.01182	$\Delta S_2 = 0.0019$

TABLEAU 5

#### IV.5 - INTERPRETATION DES RESULTATS :

Pour mieux apprécier le faible écart entre les résultats obtenus par le programme P.A.C.M et ceux donnés par certains auteurs , il est important de noter que le rôle de la méthode d'analyse est essentiel .

En effet , dans la méthode utilisée l'évaluation de la matrice de dispersion se fait à partir des ondes normalisées alors que dans la plupart des autres méthodes la connaissance de ces ondes n'est pas indispensable . Il est donc évident qu'en comparaison à ces méthodes , la méthode employée nécessite un plus grand nombre d'opérations arithmétiques ce qui implique une erreur de calcul plus importante .

Par ailleurs , nous ne devons pas omettre de tenir compte de l'erreur de troncature qui est propre à chaque type de microordinateur .

## V - CONCLUSION :

Le but de ce travail était d'élaborer un programme qui permet l'analyse de circuits microondes pour être ensuite utilisé dans un logiciel de conception assisté par ordinateur (C.A.O) . Il était souhaitable que ce programme d'analyse inclut la quasi majorité des composants (passifs et actifs) et les principaux supports de transmission .

Cette méthode est essentiellement basée sur la résolution d'un système d'équations linéaires dont la dimension , égale au nombre de portes des composants du circuit , est le principal inconvénient . En effet , pour un réseau complexe cette dimension peut devenir très grande ce qui implique un long temps de calcul .

Pour minimiser ce temps , nous avons adopté la méthode de factorisation LU utilisant les techniques de matrices creuses . Ces techniques sont basées sur la création d'un ensemble de tableaux qui permettent :

- de mémoriser uniquement les éléments non nuls ,
- de faciliter les opérations de réordonnement de la matrice afin que le nombre d'éléments créés soit minimum ,
- et d'utiliser un indexage triangulaire pour diminuer le temps de recherche pour le calcul des éléments des matrices L et U et l'évaluation des ondes incidentes .

En outre , le sous-programme de résolution a été structuré en trois sous-programmes (le premier réordonne la matrice , le deuxième calcule les éléments des matrices L et U et le troisième évalue la solution du système) afin que pour dans le cas d'analyses multiples , seuls les deuxième et troisième sous-programmes sont appelés .

En résumé , nous avons démontré au cours de ce travail les avantages du programme P.A.C.M pour être introduit dans un logiciel de C.A.O afin de mettre à la disposition des chercheurs du laboratoire télécommunications un outil informatique aussi complet qu'utile .

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] K.C. GUPTA , R. GARG , R. CHADHA  
'Computer Aided Design of microwaves circuits'  
ARTECH HOUSE, INC - 1981 .
- [2] J. DOBROWOLSKI  
'Méthodes de conception de circuits microondes assisté par ordinateur'  
Ed 1'Ecole Polytechnique de VARSOVIE - 1978 .
- [3] K. KUROKAWA  
'Power waves and the scattering matrix'  
IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, pp 194-202, March 1965 .
- [4] V.A MONACO , P. TIBERIO  
'Computer Aided Analysis of microwave circuits'  
IEEE Trans on Microwave Theory and Tech , Vol MTT-22 , N°3 , pp 249-263 ,  
March 1974 .
- [5] M. SABLATASH , R. SEVIORA  
'Sensitivity invariants for scattering matrices'  
IEEE Trans on Circuit Theory, pp 282-284, March 1971 .
- [6] V.A MONACO , P. TIBERIO  
'On linear network scattering matrix sensitivities'  
ALTA FREQ, Vol 39, pp 193-195, Feb 1970 .
- [7] F. BONFATTI , V.A MONACO , P. TIBERIO  
'Microwave Circuit Analysis by sparse matrix techniques'  
IEEE Trans on Microwave Theory and Tech , Vol MTT-22 , N°3 , pp 264-269 ,  
March 1974 .
- [8] R.D BERRY  
'An optimal ordering of electronic circuit equations for a sparse matrix  
solution'  
IEEE Trans Circuit Theory, Vol CT-48, pp 40-50, Jan 1971 .
- [9] E. SANCHEZ-SINENCIO , T.N TRICK  
'CADMIC - Computer Aided Design of microwave integrated circuits'  
IEEE Trans Microwave Theory and Tech , Vol MTT-22 , pp 309-316 .  
March 1974 .
- [10] HEWLETT PACKARD  
'Diode and Transistor Designer's Catalog' - 1980 .
- [11] P.E GREEN  
'General Purpose Programs for the Frequency Domain Analysis of Microwave  
Circuits'  
IEEE Trans on Microwave Theory and Tech, Vol MTT-17, N° 8, pp 507-513,  
August 1969 .
- [12] LOGICIEL TEKTRONIX ENGINEERING 4052-4054

SYNTHESE D'UN REGULATEUR OPTIMAL  
POUR LES MACHINES OUTILS A TRES HAUTE PRECISION

SEHAB Rabia \* - LYSSOV Vladimr

ملخص

\*\*\*\*\*

إن الهدف من هذه الدراسة هو إيجاد معيّل أفضل لمكانات أدوات دقتها مرتفعة. يعمل هذا المعيّل على تثبيت ميزات النظام الانتقالي لجملتين ذات تحكم آلي. تم تصميم هذا المعيّل بتطبيق المبدأ الأصغر لبونترياغين. إن إدخال هذا المعيّل في الماكنة له دوراً كبيراً في تحسين وتمديد دقة قياسها.

\*\*\*\*\*

RESUME

\*\*\*\*\*

Cette étude a pour objet la synthèse d'un régulateur optimal pour des machines-outils à très haute précision. Le régulateur déterminé stabilise les performances dynamiques optimales de deux correcteurs à commande automatique existants déjà dans la machine. Basé sur le principe du minimum de Pontriaguine, le système conçu permet d'obtenir des performances et une fiabilité plus importantes

\*\*\*\*\*

ABSTRACT

\*\*\*\*\*

The objective of this work is the synthesis of an optimal regulator for high precision machine-tool. The regulator stabilizes the performances of the optimal dynamics of two automatics systems which already exist in the machine. The application of the minimum's principle of Pontriaguine allows the conception of this regulator. This one allows an important reliability of the machine-tool.

\*\*\*\*\*

\* : Resume d'une Thèse de Magister soutenue le 29 Janvier 1991.

## NOTATIONS

- $K_1$  : Gain de l'amplificateur hydraulique (Kgf/cm<sup>2</sup>.v)  
 $K_I$  : Gain de la poche d'huile ( $\mu\text{m.cm}^2/\text{s.Kgf}$ )  
 $K_p$  : Gain du phénomène d'échappement de l'huile sous l'action de la charge ( $\mu\text{m/Kgf.s}$ )  
 $N$  : Charge (pièce à contrôler (Kgf, N)).  
 $n$  : Indice des variables de l'équation de la trajectoire de commutation optimale dans le cas où  $U_c = U_2$ .  
 $Pe$  : Pression d'entrée (Kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $p$  : Indice des variables de l'équation de la trajectoire de commutation optimale dans le cas où  $U_c = U_1$ .  
 $T$  : Constante de temps de l'amplificateur hydraulique (s)  
 $t_1$  : Durée de la tension de commande  $U_1$  (s)  
 $t_2$  : Durée de la tension de commande  $U_2$  (s)  
 $t_r$  : Durée du régime transitoire (s)  
 $U_1$  : Tension de commande positive de l'amplificateur hydraulique (v)  
 $U_2$  : Tension de commande négative de l'amplificateur hydraulique (v)  
 $x_c$  : La valeur consigne ( $\mu\text{m}$ )  
 $x$  : La grandeur de sortie ( $\mu\text{m}$ )  
 $y$  : La vitesse de la grandeur de sortie ( $\mu\text{m/s}$ )  
 $z(t)$  : Fonction de différence  
 $\tau_1$  : Temps de retard de la réponse (s)

## Introduction générale

De nos jours, la technologie demande des performances de plus en plus importantes et des tolérances de précision de plus en plus réduites. En mécanique de précision où les intervalles de tolérances sont réduits à quelques microns, les machines-outils traditionnelles et les robots d'usinage ne peuvent assurer ces critères .

L'introduction des machines-outils équipées de systèmes à commande automatique semblent répondre aux besoins présents et réduire de beaucoup les effets d'imprécision /1/ tels que :

- Les forces de frottement variables des éléments conjugués de la machine-outil.
- Les déformations élastiques des éléments de la machine-outil

Les systèmes correcteurs introduits au niveau du type de la machine-outil étudiée sont des systèmes hydrauliques à commande automatique /2/.

- Le premier stabilise la couche d'huile introduite entre les glissières de la table d'usinage et celles du bâti.
- Le deuxième compense les déformations élastiques du bâti sous l'action du poids propre de charges importantes.

Malgré leurs performances, ces correcteurs présentent des contraintes de fonctionnement conduisant à une fiabilité réduite /2/. Ces contraintes se résument à :

- Un temps de réponse important.
- Une commande non symétrique de l'amplificateur hydraulique utilisé dans les deux correcteurs.
- Une limitation à la vitesse de variation de la grandeur de sortie.

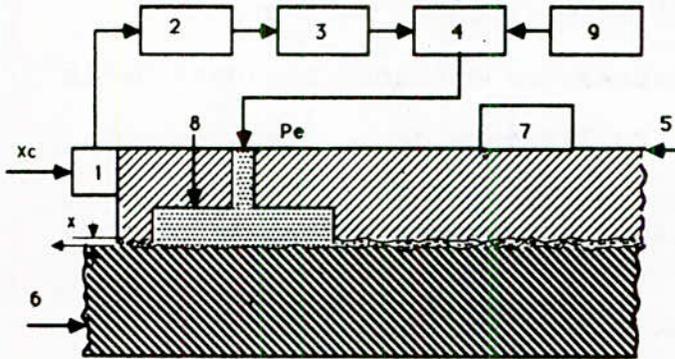
L'objet de cette étude basée sur les systèmes définis précédemment, consiste à déterminer les domaines de performances dynamiques optimales ( durée du régime transitoire et écart dynamique ) de ces derniers. Cette étude est basée sur le principe du minimum de Pontriaguine /3/ où les contraintes sont prises en considération. Elle nous permet :

- de trouver une méthodologie de synthèse d'un régulateur optimal assurant d'une façon continue la stabilisation de la couche d'huile et la compensation des déformations du bâti sous l'action de charges importantes .
- de proposer une conception améliorée des différents éléments constituant les systèmes correcteurs étudiés.
- de recommander la réalisation d'un système de commande avec un équipement simplifié.

L'insertion du régulateur optimal dans la machine-outil nous permet alors d'obtenir la précision d'usinage désirée, une amélioration de la qualité de production et surtout une augmentation de la fiabilité de la machine-outil /4/.

### I- Système de stabilisation de la couche d'huile :

Ce système est constitué de quatre structures identiques. Chaque structure, représentée par la figure 1, possède une poche d'huile disposée dans un des quatre coins de la table d'usinage.



- 1 : Capteur de distance, comparateur et dispositif de commande
- 2 : Amplificateur électronique intermédiaire
- 3 : Préamplificateur hydraulique
- 4 : Préamplificateur de puissance hydraulique
- 5 : Table d'usinage
- 6 : Bâti de la table
- 7 : Charge
- 8 : Poche d'huile
- 9 : Réservoir d'huile

Fig. 1

Vue en coupe de la structure hydraulique en boucle fermée

#### I-1 Principe de fonctionnement :

Une couche d'huile de 2 à 3  $\mu\text{m}$  est introduite entre les glissières de la table d'usinage et celles du bâti /2/, /4/. Sous l'action du poids de charges importantes, cette couche d'huile diminue et se déstabilise. Cette instabilité est due au retard dans la réponse.

#### I-2 Etude en boucle ouverte :

Dans le cas de la commande en temps minimal /3/, /5/, le principe du minimum de Pontriaguine nécessite l'utilisation d'un relais. La structure hydraulique avec ce dernier est donnée par le schéma de la Fig.2 .

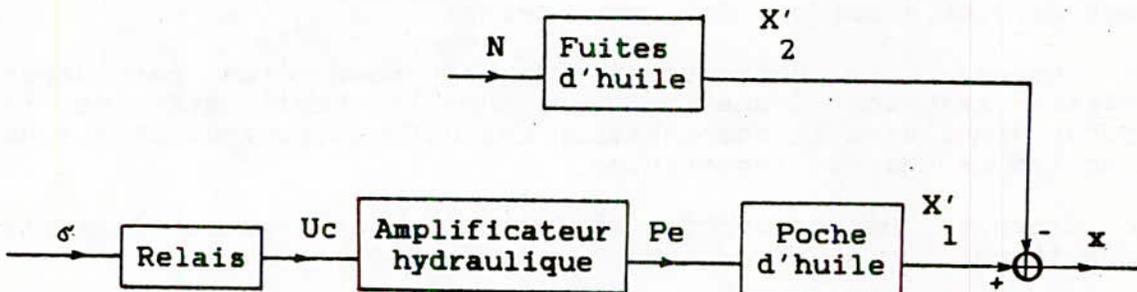


Fig.2 : Représentation d'une structure hydraulique en boucle ouverte

Avec :

- $\sigma$  : Loi de commande optimale du relais
- $U_c$  : Tension de commande de l'amplificateur hydraulique
- $P_e$  : Pression d'huile appliquée à l'entrée de la poche d'huile
- $X'_1$  : Epaisseur de la couche d'huile à vide
- $X'_2$  : Epaisseur de la couche d'huile échappée sous l'action de la charge (déplacement vertical de la table d'usinage sous l'action du poids de la charge).
- $x$  : Epaisseur de la couche d'huile en présence de la charge et de la tension de commande

La représentation des différents éléments de la structure hydraulique par des fonctions de transfert est faite avec l'hypothèse que certaines constantes de temps relativement faibles sont négligées [2]. Celles-ci sont exprimées en fonction de la masse et de l'inductance relativement faibles et de la rigidité et de la résistance relativement importantes des éléments. La structure hydraulique peut être alors représentée par le schéma fonctionnel de la Fig.3

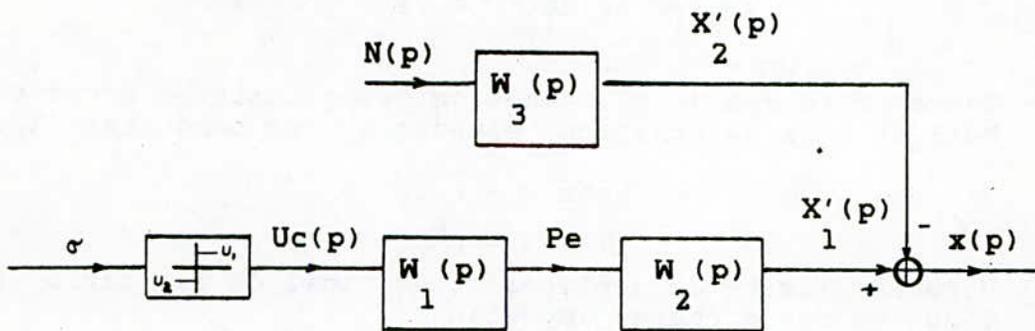


Fig.3 : Schéma fonctionnel de la structure hydraulique

Avec :

$W_1(p)$  : Fonction de transfert de l'amplificateur hydraulique ayant pour expression :

$$W_1(p) = \frac{K_1}{T_1 p + 1}$$

$W_2(p)$  : Fonction de transfert de la poche d'huile ayant pour expression :

$$W_2(p) = \frac{K_2}{p} e^{-\tau p}$$

W<sub>3</sub> (p) : Fonction de transfert des perturbations ayant pour expression :

$$W_3(p) = \frac{K}{p}$$

Les valeurs de ces différents paramètres qui sont déterminées aussi bien expérimentalement que par les calculs /2/ sont données par :

K	=	.02	Kgf/cm <sup>2</sup> .v
K <sub>1</sub>	=	1	µm.cm <sup>2</sup> /s.Kgf
K <sub>I</sub>	=	.002	µm/Kgf.s
N <sub>P</sub>	varie de	300 à 500	Kgf
T	varie de	.1 à .4	s
τ	varie de	.4 à .7	s

τ : Temps de retard dû à l'adhésion des glissières entre table-bâti et à la déformation élastique des conduites /2/.

$$Y_{max} = - \frac{K \cdot N}{p}$$

Y<sub>max</sub>: Vitesse limite du déplacement vertical de la table sous l'action de la charge importante.

La tension de commande U<sub>c</sub> de l'amplificateur hydraulique est limitée à 20 v. Cette tension a deux valeurs, une positive U<sub>1</sub> et une autre négative U<sub>2</sub>. U<sub>c</sub> choisie varie de 0 à 15 v pour U<sub>1</sub> et de 0 à -5 v pour U<sub>2</sub>. Ces valeurs sont spécifiées par le constructeur /2. (Fig.4). La caractéristique statique de l'amplificateur hydraulique choisie dépend de la pression à fixer pour une charge limite donnée. Avec cette pression le contact métallique entre les surfaces des glissières de la table et du bâti est toujours conservé.

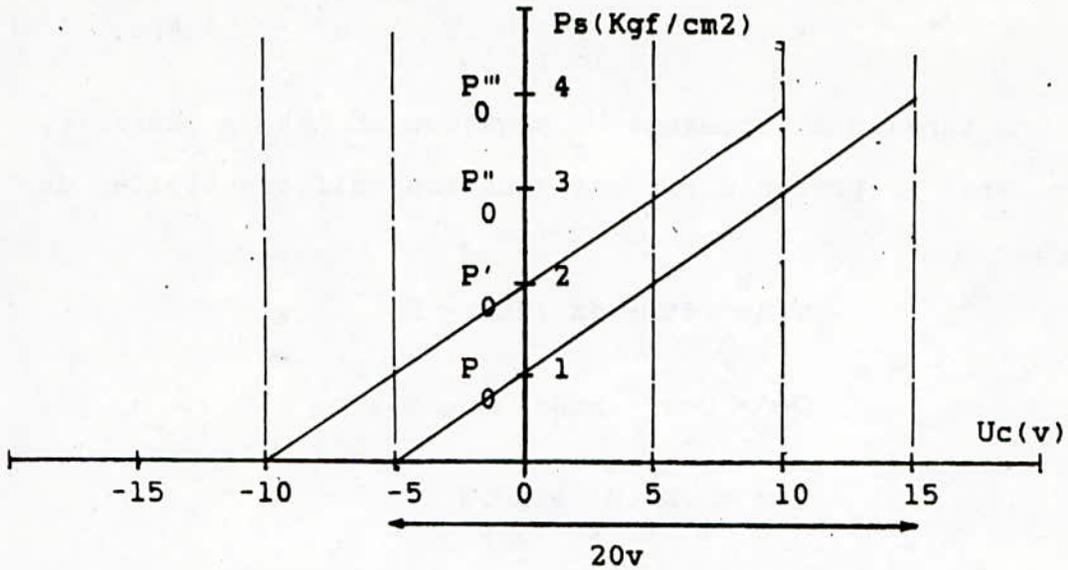


Fig.4 : Caractéristiques statiques de l'amplificateur hydraulique

En appliquant le principe du minimum de Pontriaguine, nous déterminons la commande optimale. Cette dernière donne un écart dynamique et une durée du régime transitoire minimaux.

### I-3 Modèle de réglage sans l'élément de retard :

Pour une tension de commande  $U$  positive appliquée sur un intervalle de temps  $\Delta t$  à définir, la représentation du système de réglage sans  $\tau$  est donnée par l'équation différentielle suivante :

$$T \frac{dx}{dt} + x = A \quad (1)$$

avec  $U_c = U$  pour  $0 \leq t \leq t_1$

et  $A = K_I \cdot U - K_p \cdot N$

Sa résolution, en prenant  $y = y(0) = -K_p \cdot N$  et  $x = x(0) = 0$  comme conditions initiales, nous conduit à une solution de la forme :

$$y(t) = \frac{dx}{dt} = K_I \cdot U \cdot (1 - e^{-t/T}) - K_p \cdot N \quad (2)$$

$$x_1(t) = -K_1 \cdot K_I \cdot U \cdot T \cdot (1 - e^{-t/T}) + A \cdot t \quad (3)$$

Pour une tension de commande  $U$  négative et  $\Delta t_2$  à définir, le modèle sera représenté par une équation différentielle de la forme :

$$T \cdot \frac{dx_2}{dt} + x_2 = B \quad (4)$$

avec  $U_c = U_2$  pour  $0 \leq t \leq t_2$

et  $B = K_1 \cdot K_I \cdot U_2 + K_p \cdot N$

La résolution de cette deuxième équation avec des conditions aux limites données à  $t = t_1$

$$x_1(t_1) = x_1(0) = x_{11}$$

$$y_1(t_1) = y_1(0) = y_{11}$$

nous conduit à une solution de la forme :

$$y_2(t) = \frac{dx_2}{dt} = (y_{11} - B) \cdot e^{-t/T} + B \quad (5)$$

$$x_2(t) = (y_{11} - B) \cdot T \cdot (1 - e^{-t/T}) + B \cdot t + x_{11} \quad (6)$$

Pour déterminer  $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$  nous considérons la relation caractérisant l'état stable du processus de la couche d'huile à l'instant final  $t = t_2$

$$x_2(t_2) = y_2(t_2) = 0$$

$$y_2(t_2) = 0 \Rightarrow t_2 = T \cdot \ln(1 - y_{11}/B) \stackrel{\Delta}{=} f(t_2) \quad (7)$$

$$x_2(t_2) = 0 \Leftrightarrow z(t_2) = 0 \text{ et } t_2 \text{ devient une}$$

variable

$$z(t) = B - \left( (B - y) \cdot T / f(t) \right) \cdot (1 - e^{-f(t_1)/T}) - x / f(t) \quad (8)$$

Pour une charge de 300 Kgf, la convergence de  $z(t)$  a été obtenue sur un intervalle d'une seconde. Cette solution est déduite en linéarisant  $z(t)$  sur un intervalle de temps très court. De  $t$  calculé, nous déterminons  $t$  et  $t_r$ , où  $t_r = t + t$ .

La tension de commande minimale, nécessaire pour compenser l'effet de la charge durant le régime transitoire doit vérifier la condition suivante :

$$U_{lmin} > \frac{K \cdot N}{K \cdot K \cdot I}$$

La tension négative et suffisante pour remettre le système à son état stable a été prise de la première caractéristique statique de la Fig.4 .

L'étude de l'évolution de la couche d'huile durant le régime transitoire (Fig.6) et dans l'espace de phase (Fig.7) est faite pour deux tensions de commande dont une,  $U$ , est variable (Fig.5) et l'autre,  $U$ , est constante et égale  $-5v$ . La trajectoire de commutation optimale est étudiée dans le plan de phase (Fig.7). Cette trajectoire a pour équations :

$$x_p = -T \cdot (y_p + A \cdot \ln|y_p - A| - A \cdot \ln|A|)$$

$$\text{avec } U_c = U_1$$

$$x_n = -T \cdot (y_n - B \cdot \ln|y_n + B| + B \cdot \ln|B|)$$

$$\text{avec } U_c = U_2$$

Nous constatons dans ces courbes que la durée du régime transitoire diminue avec l'augmentation de la tension de commande. Par ailleurs,  $t$  diminue tandis-que  $t$  augmente.

L'énergie emmagasinée dans la structure hydraulique quand la tension de commande augmente justifie cette évolution. Le retour à l'état stable nécessite une tension de commande négative qui sera appliquée pendant un temps  $t$ .

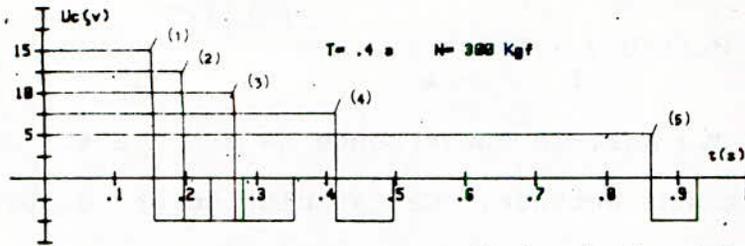


Fig. 5 : Evolution de la commande durant le régime transitoire

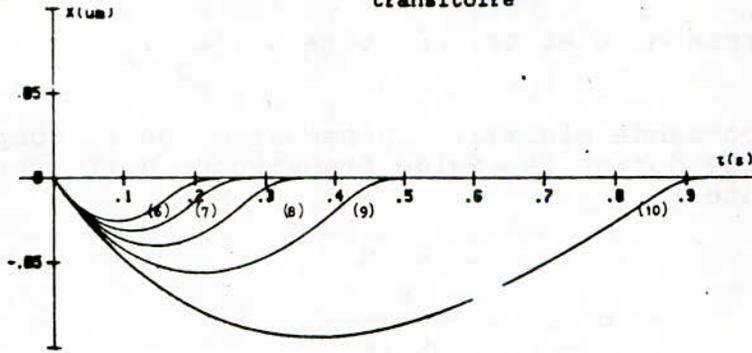


Fig. 6 : Evolution de l'épaisseur de la couche d'huile durant le régime transitoire

- (1) - (6):  $U_1 = 15 \text{ v}, U_2 = -5 \text{ v}$
- (2) - (7):  $U_1 = 12.5 \text{ v}, U_2 = -5 \text{ v}$
- (3) - (8):  $U_1 = 10 \text{ v}, U_2 = -5 \text{ v}$
- (4) - (9):  $U_1 = 7.5 \text{ v}, U_2 = -5 \text{ v}$
- (5) - (10):  $U_1 = 5 \text{ v}, U_2 = -5 \text{ v}$

- (1) : Entrée.
- (6) : Sortie.

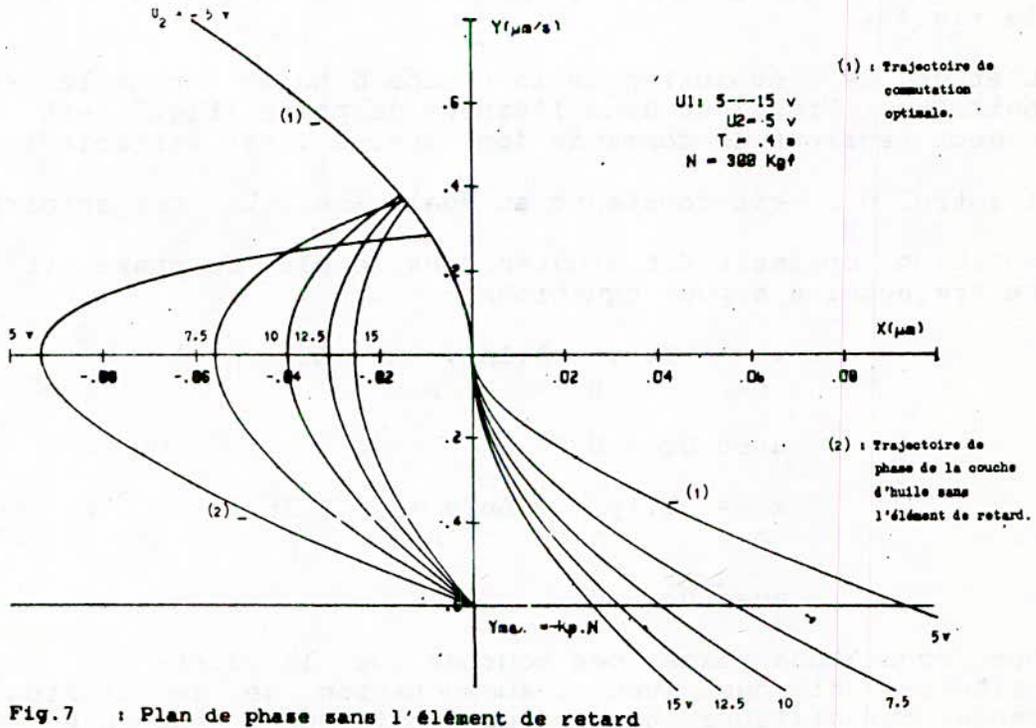


Fig. 7 : Plan de phase sans l'élément de retard

La courbe  $tr=f(X_{max})$  (Fig.8) détermine le domaine de performances dynamiques optimales du modèle de réglage sans l'élément de retard. Ce domaine sera pris comme référence permettant d'améliorer la conception du système étudié, en particulier, ses paramètres physiques.

#### I-4 Modèle de réglage avec l'élément de retard:

Pour le modèle de réglage avec retard, nous utilisons la même méthodologie de calcul avec des conditions initiales différentes du cas précédemment étudié.

à  $t = \tau$ :

$$x_0 = x(0) = -K \cdot N \cdot \tau \quad \text{et} \quad y_0 = y(0) = -K \cdot N$$

$$\text{Pour } U_c = U_1 \quad \text{et} \quad 0 \leq t \leq t_1 + \tau$$

$$y_1(t) = dx_1/dt = K \cdot K \cdot U_1 \cdot (1 - e^{-t/T}) - K \cdot N \quad (9)$$

$$x_1(t) = -K \cdot K \cdot U_1 \cdot T \cdot (1 - e^{-t/T}) - K \cdot N \cdot t + x_0 \quad (10)$$

$$\text{Pour } U_c = U_2 \quad \text{et} \quad 0 \leq t \leq t_2 + \tau$$

$$y_2(t) = dx_2/dt = (y_1(t_1 + \tau) - B) \cdot e^{-t/T} + B \quad (11)$$

$$x_2(t) = (y_1(t_1 + \tau) - B) \cdot T \cdot (1 - e^{-t/T}) + B \cdot t + x_1(t_1 + \tau) \quad (12)$$

Avec des paramètres identiques à ceux vu précédemment, nous étudions l'évolution de la couche d'huile dans l'espace de phase et durant le régime transitoire (Fig.9,10). Nous traçons ensuite l'écart dynamique maximum et la durée du régime transitoire en fonction de la tension de commande  $U_1$  (Fig.11(a),12(a)).

Nous remarquons alors que la couche d'huile est instable, que l'écart dynamique maximum est élevé par rapport à la référence et que la durée du régime transitoire est importante.

Pour réduire ces paramètres, nous déclenchons le relais avant d'atteindre la trajectoire de commutation optimale d'un temps  $\tau$ . Ce dernier s'effectue grâce à une nouvelle trajectoire qui tient compte de la vitesse limite et du temps de retard  $\tau$  (Fig.13). Cette trajectoire est appelée trajectoire de compensation du temps de retard. Elle a pour équations :

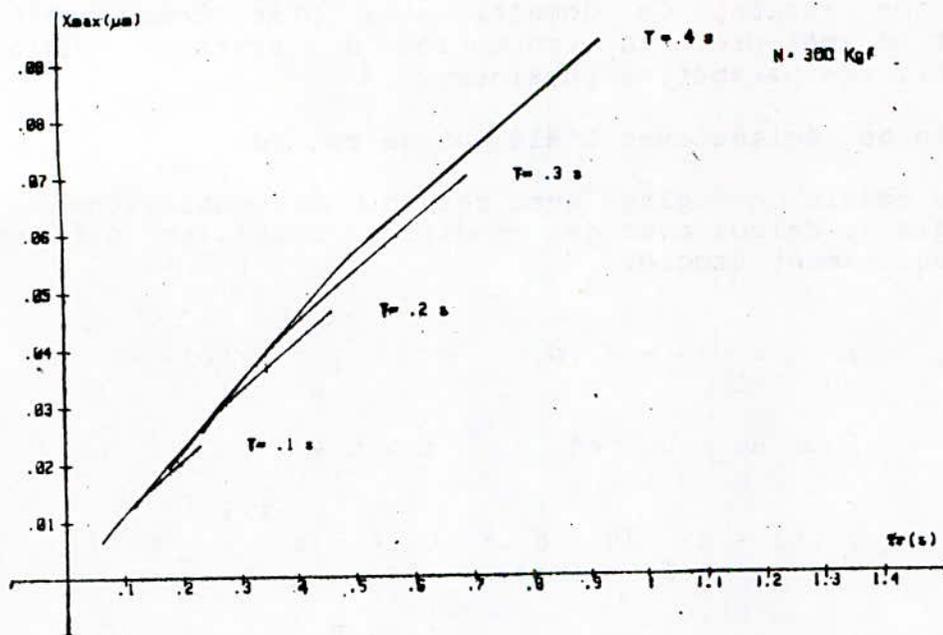
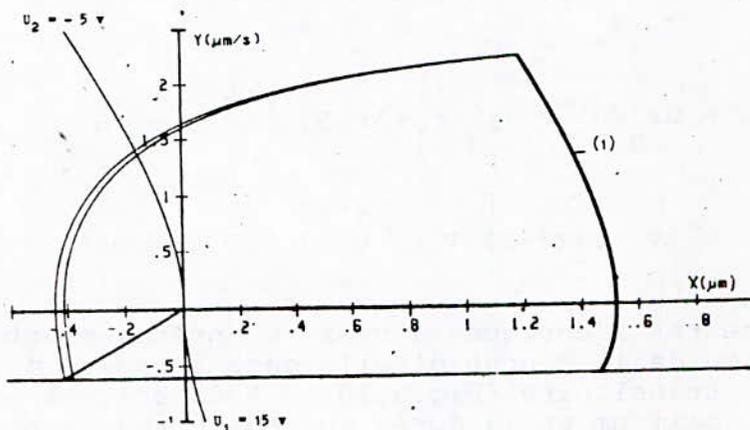
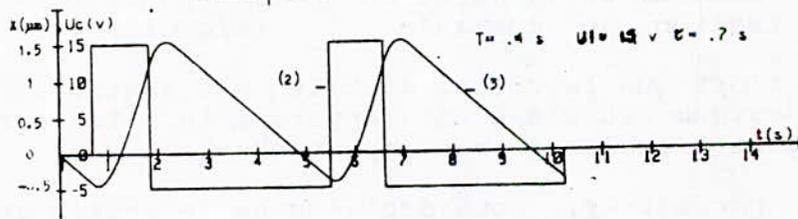


Fig.8 : Evolution de l'écart dynamique maximum en fonction de la durée du régime transitoire



(1) : Trajectoire de phase de la couche d'huile sans compensation du temps de retard.

Fig.9



(2) : Entrée.

(3) : Sortie.

Fig.10

Fig.9 : Plan de phase avec l'élément de retard

Fig.10 : Evolution de la commande et l'épaisseur de la couche d'huile durant le régime transitoire

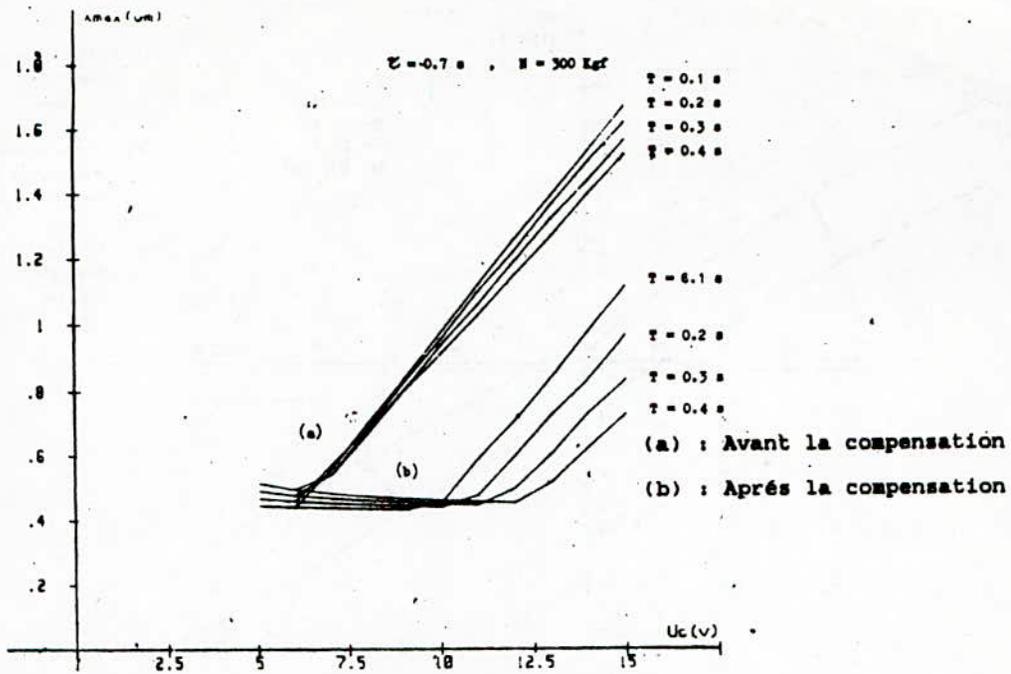


Fig.11 : Evolution de l'écart dynamique maximum en fonction de la tension de commande U

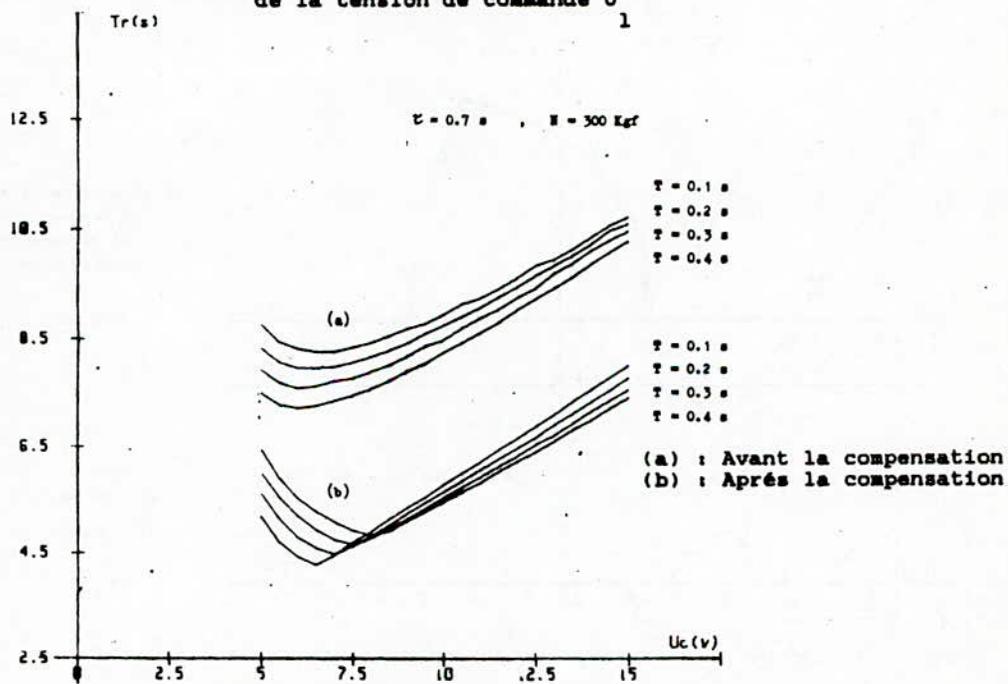


Fig.12 : Evolution de la durée du régime transitoire en fonction de la tension de commande U

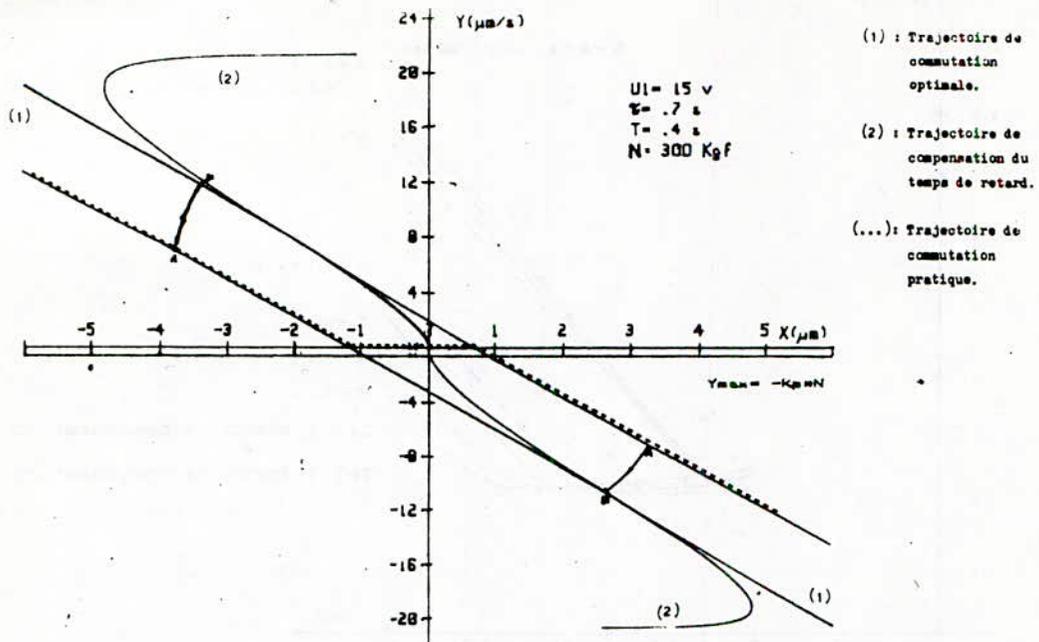


Fig.13 : Trajectoires de commutation

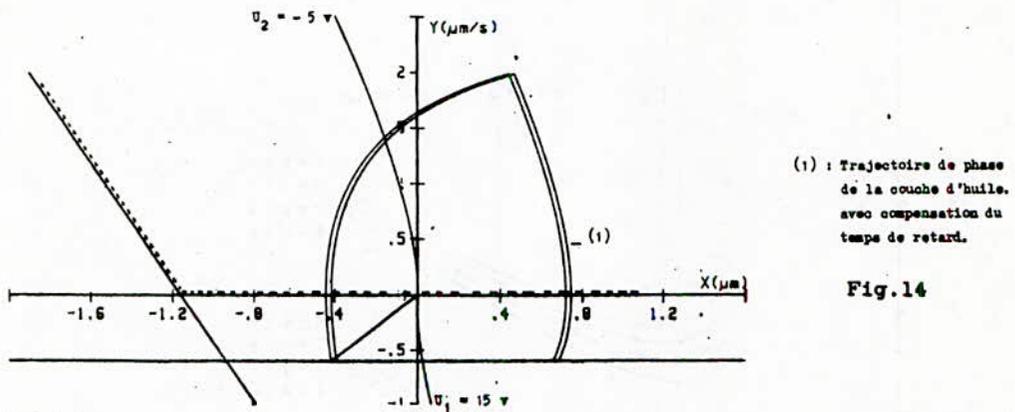


Fig.14

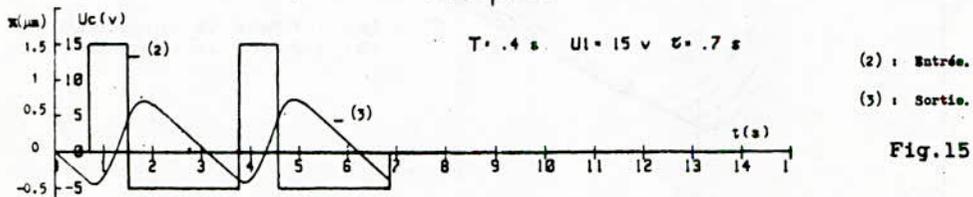


Fig.15

Fig.14 : Plan de phase avec compensation du temps de retard

Fig.15 : Evolution de la commande et l'épaisseur de la couche d'huile durant le régime transitoire

$$x_p = -T \cdot (y_p + A \cdot \ln |y_p - A| + A \cdot \ln |(y_p - A) \cdot e^{-z/T} - B \cdot \ln |(y_p - A) \cdot e^{-z/T} + A + B| + B \cdot \ln |B|)$$

avec  $U_c = U_1$

$$x_n = -T \cdot (y_n - B \cdot \ln |y_n + B| + B \cdot \ln |(y_n + B) \cdot e^{-z/T} + A \cdot \ln |(y_n + B) \cdot e^{-z/T} - B - A| - A \cdot \ln |A|)$$

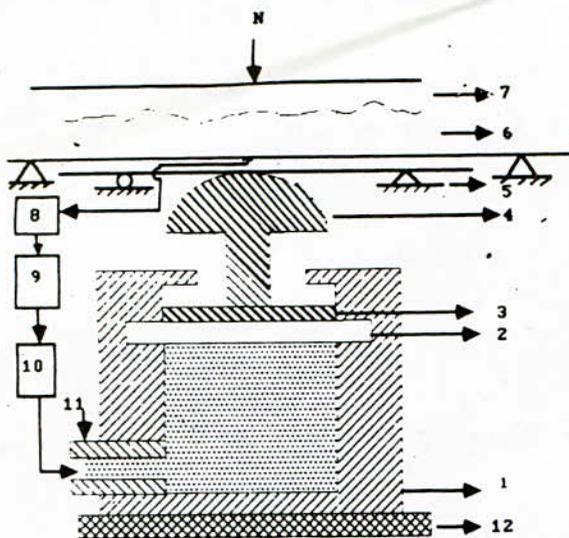
avec  $U_c = U_2$

En pratique, cette trajectoire sera choisie d'après la Fig.13. Lorsque la tension de commande augmente et dépasse une certaine valeur pour un temps de retard et une vitesse limite donnés, le déclenchement du relais ne peut se réaliser faute d'intersection entre la trajectoire de phase et celle de la compensation.

Avec les mêmes paramètres, nous étudions l'évolution de la couche d'huile aussi bien dans l'espace de phase que durant le régime transitoire (Fig.14,15). L'évolution de la couche d'huile dans le temps et dans l'espace de phase avant et après la compensation du temps de retard montre que l'écart dynamique et la durée du régime transitoire ont diminué presque de moitié (Fig.11(b),12(b)). De plus, nous remarquons qu'il existe une tension de commande optimale pour laquelle la durée du régime transitoire et l'écart dynamique ont des valeurs minimales. Dans cette étude, nous nous intéressons surtout à l'écart dynamique minimal. La tension de commande optimale dépend de  $z$ ,  $T$ , et de la charge. Par exemple, pour une charge de 300 Kgf la tension de commande optimale déterminée est en moyenne de 6.5 v pour une constante de temps variant de .1 à .4 s. Pour déterminer d'autres valeurs de tensions de commande optimales, il suffit de modifier la charge dans l'algorithme de calcul.

## II- Système de compensation des déformations du bâti:

Ce système est constitué de plusieurs structures identiques liées à un réservoir d'huile commun. Ces structures sont disposées dans différentes parties de la surface intérieure du bâti /2/. Une d'elles peut être représentée par le schéma de la Fig.16 .



- 1 : Cylindre
- 2 : Membrane
- 3 : Centre de rigidité
- 4 : Poussoir
- 5 : Appui
- 6 : Bâti
- 7 : Table
- 8 : Capteur de distance et dispositif de commande
- 9 : Amplificateur électronique intermédiaire
- 10 : Amplificateur hydraulique
- 11 : Conduite d'huile
- 12 : Local

Fig.16

Vue en coupe de la structure hydraulique en boucle fermée

### II-1 Principe de fonctionnement :

Sous l'action de la pression d'entrée  $P_e$  provenant de l'amplificateur hydraulique, le cylindre agit par pression sur la membrane (3) en déplaçant le poussoir(4) vers le haut. Ce dernier compense les déformations dues à l'action du poids propre de la charge.

Dans le cas de la commande en temps minimal, le principe du minimum de Pontriaguine nécessite l'introduction d'un relais pour commander un processus /5/ /6/. Le schéma de la structure hydraulique avec le relais peut être représenté en boucle ouverte par le schéma de la Fig.17 .

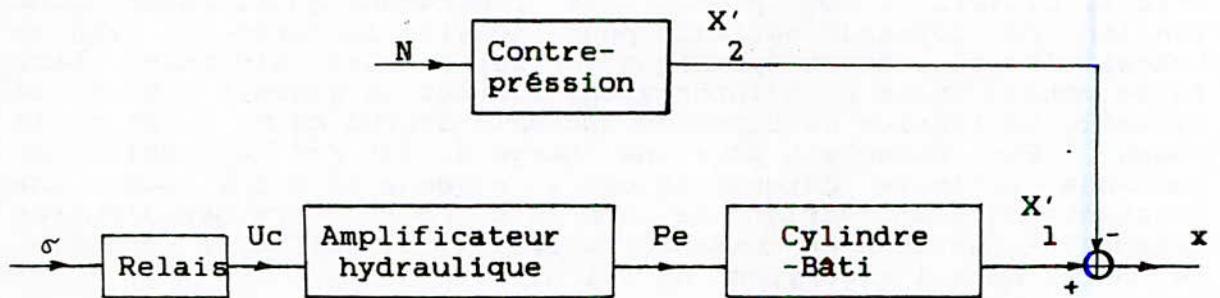


Fig.17 : Représentation de la structure hydraulique en boucle ouverte

Avec :

- $\sigma$  : loi de commande optimale
- $U_c$  : Tension de commande de l'amplificateur hydraulique
- $P_e$  : Pression d'entrée appliquée au cylindre

- $X'_1$  : Composante de déformation sous l'action de  $P_e$   
 $X'_2$  : Composante de déformation sous l'action de la charge  
 $x$  : Composante de déformation totale en présence de la charge et de la tension de commande

Sur ce schéma,  $\sigma$  est la loi de commande optimale. Pour obtenir cette loi ainsi que la trajectoire de commutation optimale, nous analysons la structure donnée par le schéma de la Fig.17 .

La représentation des différents éléments de la structure hydrauliques par des fonctions de transfert est faite avec l'hypothèse que certaines constantes de temps sont négligées /7/. Celles-ci sont exprimées en fonction de la masse faible et de la rigidité importante des éléments. La structure hydraulique peut être alors donnée par le schéma fonctionnel de la Fig.18 .

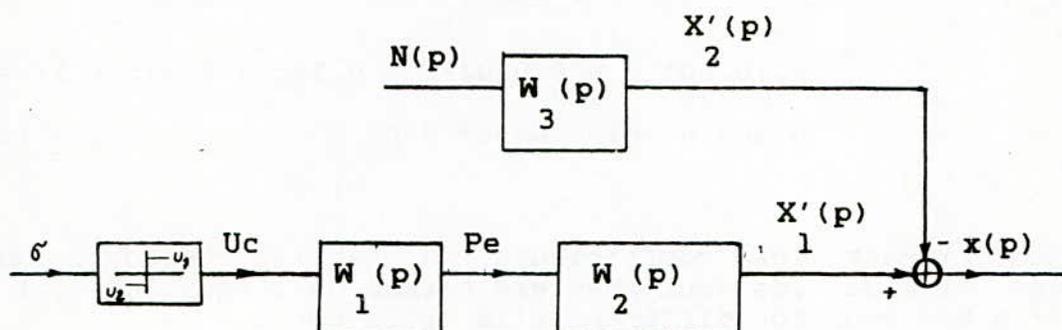


Fig.18 :Schéma fonctionnel de la structure hydraulique en boucle ouverte

Avec :

$W_1(p)$  : Fonction de transfert de l'amplificateur hydraulique ayant pour expression :

$$W_1(p) = \frac{3.3}{.001p + .17p + 1}$$

$W_2(p)$  : Fonction de transfert du cylindre -bâti ayant pour expression :

$$W_2(p) = \frac{.08}{.62p + 1} e^{-\tau p}$$

$\tau$  : Temps de retard dû à la déformation élastique des conduites. Expérimentalement /2/, /7/, il varie entre .04 et .07s .

$W_3(p)$  : Fonction de transfert des contre-pressions ayant pour expression :

$$W_3(p) = \frac{.00068}{.18p + 1}$$

## II-2 Modèle de réglage sans l'élément de retard :

La déformation totale est :

$$x(p) = X_1'(p) - X_2'(p) \quad (13)$$

$$x(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot U_c(p) - W_3(p) \cdot N(p) \quad (14)$$

donne :

$$x \cdot (0.0011p^4 + 0.00027p^3 + 0.18p^2 + 0.97p + 1) = 0.264 \cdot U_c(p) - 0.00068 \cdot N(p) \quad (15)$$

En négligeant les coefficients de faibles valeurs, nous pouvons éliminer les deux premiers termes de l'équation (15) et aboutir à une équation différentielle de la forme :

$$0.18 \frac{dx^2}{dt^2} + 0.97 \frac{dx}{dt} + x = 0.264 \cdot U_c - 0.00068 \cdot N \quad (16)$$

avec  $U_c = U_1$  pour  $0 \leq t \leq t_1$

et  $A = 0.264 \cdot U_1 - 0.00068 \cdot N$

La résolution de l'équation différentielle (16) avec les conditions initiales :

$$X_2'(0) = x(0) = 0$$

$$Y_2'(0) = y(0) = -A/.18$$

nous conduit à une solution de la forme :

$$x_1(t) = C_1 e^{-A_1 t} + C_2 e^{-A_2 t} + A \quad (17)$$

$$y_1(t) = dx_1/dt = -A_1 C_1 e^{-A_1 t} - A_2 C_2 e^{-A_2 t} \quad (18)$$

Avec :

$$A_1 = 1.39 \quad \text{et} \quad A_2 = 4$$

$$C_1 = -A_2 A_1 / (A_2 - A_1) \quad \text{et} \quad C_2 = -(-A_1 A_2) / (A_2 - A_1)$$

Pour  $U_2 = U_2$  et  $0 \leq t \leq t_2$

Nous posons :

$$B = 0.0264 U_2 + 0.00068 N$$

La résolution de l'équation différentielle (16) avec les conditions aux limites données à  $t = t_1$

$$\begin{aligned} x_1(t) &= x_1(0) \\ y_1(t) &= y_1(0) \end{aligned}$$

nous conduit à une résolution de la forme :

$$x_2(t) = C_3 e^{-A_1 t} + C_4 e^{-A_2 t} - B \quad (19)$$

$$dx_2/dt = y_2(t) = -A_1 C_3 e^{-A_1 t} - A_2 C_4 e^{-A_2 t} \quad (20)$$

Avec :

$$C_3 = \frac{(-y_1 + A_1(x_1 + B))}{A_1 - A_2} \quad \text{et} \quad C_4 = \frac{(y_1 + A_2(x_1 + B))}{A_1 - A_2}$$

Pour déterminer les durées  $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$  nous considérons la relation caractérisant l'état stable du processus de compensation des déformations élastiques du bâti à l'instant final  $t = t_2$

$$x_2(t) = y_2(t) = 0$$

$$y_2(t) = 0 \Rightarrow$$

$$t_1 \triangleq f(t) = (1/(A_2 - A_1)) \cdot \ln | (-A_2 \cdot C_4(t) / A_1 \cdot C_3(t)) | \quad (21)$$

$$x_2(t) = 0 \Leftrightarrow z_1(t) = 0$$

$t_1$  devient une variable

$$z_1(t) = B_3 \cdot (C_3(t)) \cdot e^{-A_1 \cdot f(t)} - C_4(t) \cdot e^{-A_2 \cdot f(t)} \quad (22)$$

La fonction  $z_1(t)$  converge pour une seule solution. Cette dernière est déduite en linéarisant  $z_1(t)$  sur un intervalle de temps petit. De  $t_1$  calculé, nous déterminons  $t_2$  et  $tr = t_1 + t_2$ .

La tension de commande minimale et suffisante pour compenser l'effet de la charge doit vérifier la condition suivante :

$$U_{lmin} > \frac{0.00068.N}{0.264}$$

La tolérance des constantes de temps ( $T_1, T_2$ ) est de  $\pm 15\%$  /2/.

Pour deux tensions de commande, dont l'une  $U_1$ , est variable et l'autre  $U_2$ , constante et égale -5v. (Fig.19), nous étudions

l'évolution de la déformation élastique du bâti aussi bien durant le régime transitoire (Fig.20) que dans l'espace de phase (Fig.21). Nous traçons ensuite l'écart dynamique maximum en fonction de la durée du régime transitoire (Fig.22). L'obtention de la loi de commande ( $\sigma$ ) se réalise au niveau de l'intersection de la trajectoire de phase avec celle de la commutation optimale qui est définie par les équations suivante:

$$\left| \left( y_p + (1/T_1) \cdot (x_p - A_1) \right) / \left( (-1/T_1) \cdot A_1 \right) \right|^b = \left| \left( y_p + (1/T_2) \cdot (x_p - A_2) \right) / \left( (-1/T_2) \cdot A_2 \right) \right|^a$$

avec  $U_c = U_1$

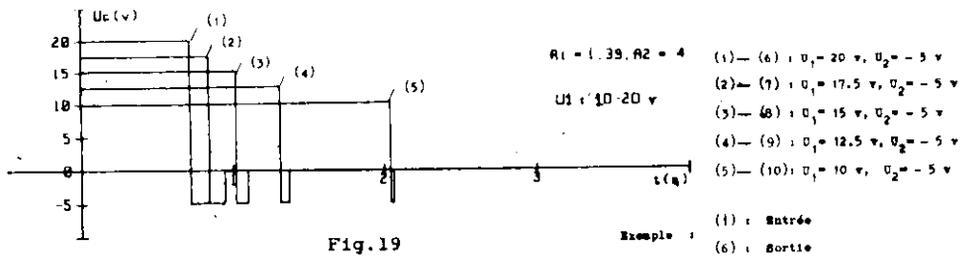


Fig.19

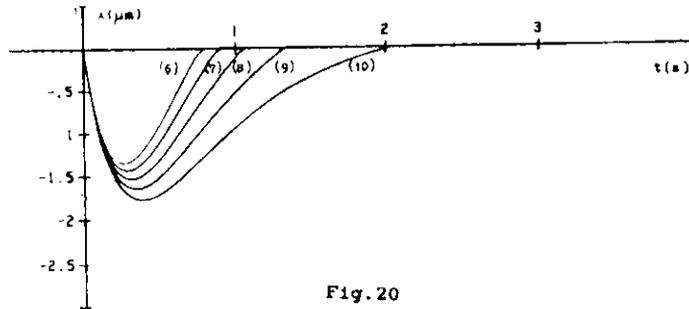


Fig.20

Fig.19 : Evolution de la commande durant le régime transitoire

Fig.20 : Evolution de la déformation élastique du bâti durant le régime transitoire

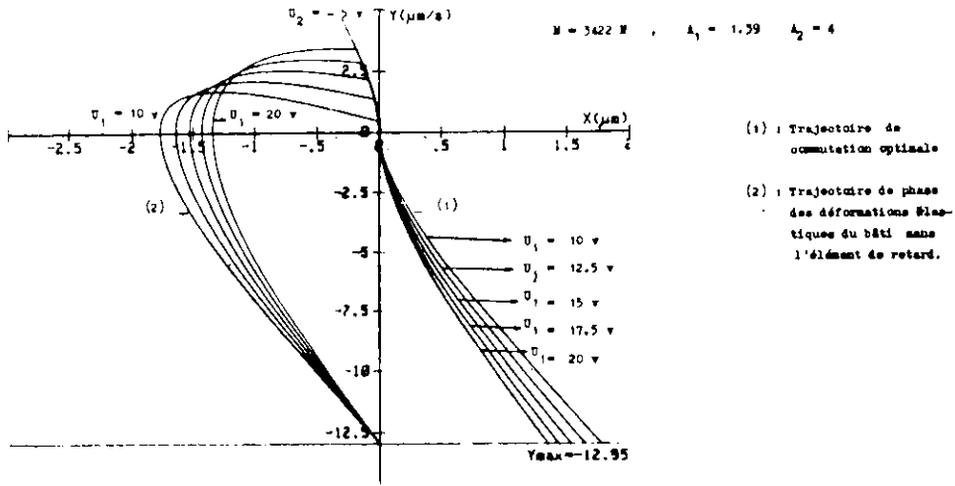


Fig.21 : Plan de phase sans l'élément de retard

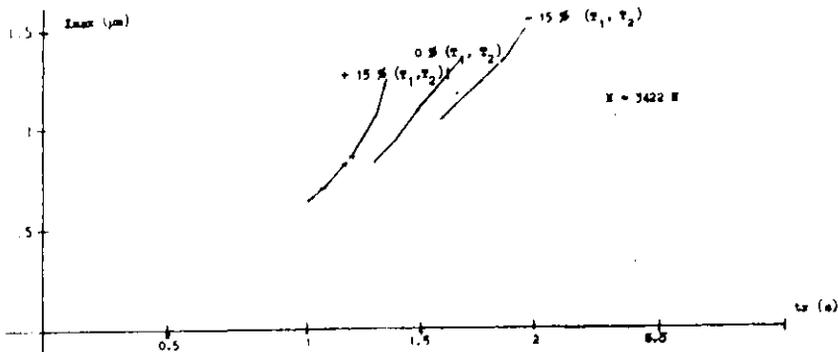


Fig.22 : Evolution de l'écart dynamique maximum en fonction de la durée du régime transitoire

$$\left| \left( \frac{y_n + (1/T)_1 \cdot (x_n - B)}{(-1/T)_1 \cdot B} \right)^b = \left| \left( \frac{y_n + (1/T)_2 \cdot (x_n - B)}{(-1/T)_2 \cdot B} \right)^a \right|$$

Avec

$$U_c = U_2$$

$$b = \frac{(-1/T)_1}{(1/T)_1 - (1/T)_2}$$

$$a = \frac{(-1/T)_2}{(1/T)_1 - (1/T)_2}$$

### II-3 Modèle de réglage avec élément de retard :

Pour le modèle de réglage avec retard, nous suivons la même méthodologie de calcul avec des conditions initiales différentes du cas précédemment étudié .

à  $t = \tau$  :

$$X'(\tau) = x(0) = x_0, \quad Y'(\tau) = y(0) = y_0$$

Pour

$$U_c = U_1 \quad \text{et} \quad 0 \leq t \leq t_1 + \tau$$

$$x(t) = C_1 \cdot e^{-A_1 \cdot t} + C_2 \cdot e^{-A_2 \cdot t} + A \quad (23)$$

$$y(t) = -A \cdot C_1 \cdot e^{-A_1 \cdot t} - A \cdot C_2 \cdot e^{-A_2 \cdot t} \quad (24)$$

Avec :

$$C_1 = \frac{(y_0 - A) \cdot (A - x_0)}{(A - A_1)}$$

$$C_2 = \frac{(-A - x_0 - y_0 + A \cdot A_1)}{(A - A_2)}$$

Pour

$$U_c = U_2 \quad \text{et} \quad 0 \leq t \leq t_2 + \tau$$

Avec les conditions aux limites données à  $t = t_1 + \tau$

$$x(t_1 + \tau) = x(0) = x_0$$

$$y(t_1 + \tau) = y(0) = y_0$$

Nous obtenons :

$$x_2(t) = C_3 \cdot e^{-A_1 \cdot t} + C_4 \cdot e^{-A_2 \cdot t} - B \quad (25)$$

$$y_2(t) = -A_1 \cdot C_3 \cdot e^{-A_1 \cdot t} - A_2 \cdot C_4 \cdot e^{-A_2 \cdot t} \quad (26)$$

Avec :

$$C_3 = \frac{x_1 + (A_1 \cdot x_1 + y_1 + B \cdot A_1) / (A_1 - A_2) + B}{A_1 - A_2}$$

$$C_4 = \frac{(y_1 + A_2 \cdot x_1 + B \cdot A_2) / (A_1 - A_2)}{A_1 - A_2}$$

Avec des paramètres identiques à ceux vu précédemment, nous étudions l'évolution de la déformation totale dans l'espace de phase (Fig.23) et durant le régime transitoire (Fig.24). Nous traçons ensuite les courbes de l'évolution de la durée du régime transitoire et de l'écart dynamique maximum en fonction de la tension de commande U (Fig.25,26).

1

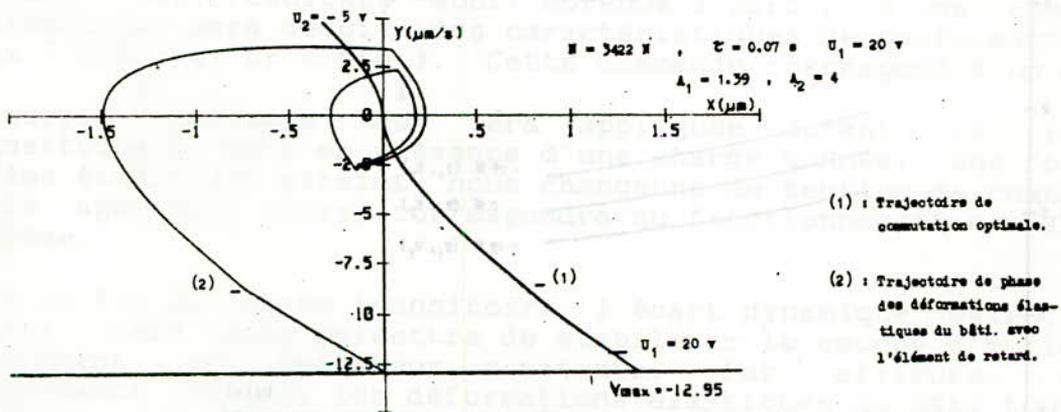


Fig.23

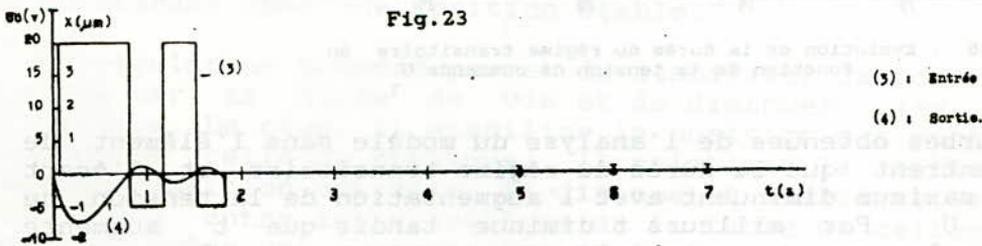


Fig.24

Fig.23 : Plan de phase avec l'élément de retard

Fig.24 : Evolution de la commande et la déformation élastique du bâti durant le régime transitoire

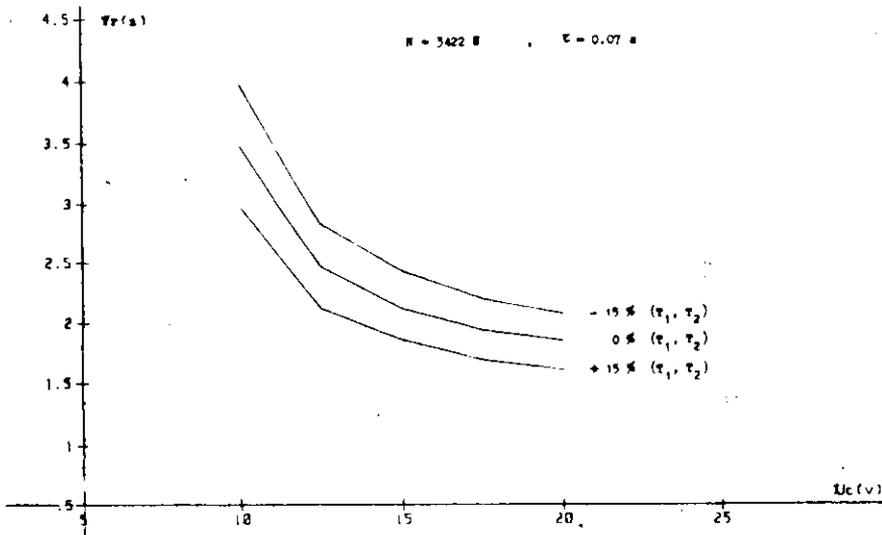


Fig.25 : Evolution de l'écart dynamique maximum en fonction de la tension de commande U

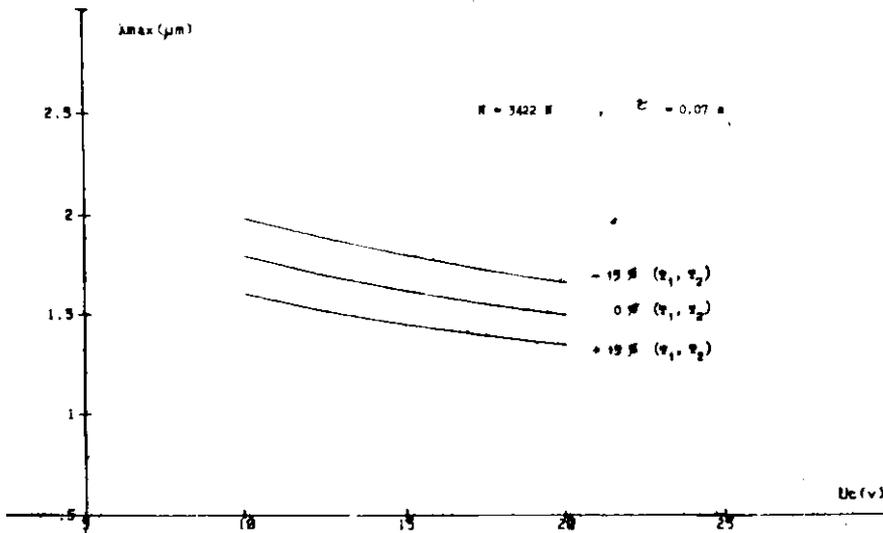


Fig.26 : Evolution de la durée du régime transitoire en fonction de la tension de commande U

Les courbes obtenues de l'analyse du modèle sans l'élément de retard montrent que la durée du régime transitoire et l'écart dynamique maximum diminuent avec l'augmentation de la tension de commande  $U$ . Par ailleurs  $t$  diminue tandis que  $t$  augmente légèrement.

L'énergie emmagasinée dans la structure hydraulique, quand la tension de commande augmente, justifie cette évolution. Le retour à l'état stable en compensant bien sûr l'effet de la charge, nécessite de plus en plus du temps lorsque la tension de commande  $U$  est appliquée à l'amplificateur hydraulique.

La courbe  $tr = f(X_{max})$  (Fig.22) représente le domaine de performances dynamiques optimales pour une charge donnée. Nous pouvons alors le prendre comme une référence permettant d'améliorer la conception des éléments constituant la structure. Pour la modification, nous agissons sur les masses et les rigidités, paramètres des constantes de temps.

Les courbes du modèle avec retard montrent bien qu'il est inutile de compenser le temps de retard du moment que les déformations tendent à disparaître à la fin du régime transitoire. La tension de commande optimale à choisir pour une charge donnée est celle qui donne un écart dynamique minimal.

### Conclusion générale:

Pour maintenir les performances dynamiques stables pour les deux systèmes, nous proposons un régulateur numérique avec deux interfaces.

Dans le calculateur, nous introduisons les équations des lois de commande optimale correspondant respectivement à  $U_1$  et  $U_2$ . Le calcul de ces lois se fait pendant le temps de retard pour obtenir la synchronisation entre le temps réel du processus et le temps de leurs calcul.

L'étude du modèle de réglage des deux processus montre aussi que nous pouvons déterminer avec une charge importante et des contraintes réelles, les performances dynamiques optimales en particulier la durée du régime transitoire et l'écart dynamique minimal. Ces résultats sont obtenus à partir d'une commande optimale qui sera déduite des caractéristiques de performances  $X_{max} = f(U_1)$  et  $t_r = f(U_1)$ . Cette commande correspond à un excès d'énergie optimale qui sera appliquée durant le régime transitoire et ceci en présence d'une charge donnée. Une fois le régime établi est atteint, nous changeons de tension de commande. Celle appliquée alors, correspondra au fonctionnement normal du système.

A la fin du régime transitoire, l'écart dynamique devient plus faible. Ceci nous permettra de stabiliser la couche d'huile en maintenant son épaisseur constante. Par ailleurs, cette performance réduira les déformations élastiques du bâti tout en le maintenant dans une position stable.

Le régulateur proposé permet de stabiliser la position du bâti d'augmenter sa durée de vie et de diminuer les usures des glissières. De plus, il stabilise la position des montants et par conséquent celle du portique. Il maintient la table d'usinage dans une position optimale, il diminue et stabilise les forces de frottement entre les glissières de la table et celles du bâti. Ceci entraîne une augmentation de la fiabilité de la machine et un bon contrôle des états de surfaces et de la rugosité des pièces.

La méthodologie de calcul suivie dans cette étude peut être généralisée à tout autre système ayant un modèle mathématique similaire à ceux déjà étudiés et avec le même type de contraintes.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

/1/ MORRIS .N.M

La commande automatique dans l'industrie  
Principes fondamentaux - technique de base  
Edition Masson et Cie Paris 1971

/2/ Лисор В.

"Исследование системы автоматического управления контактным  
сближением направляющих скольжения с учётом многосвязности  
объекта регулирования (ползуна)".

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических  
наук по специальности № 05.254 - Автоматическое управление и  
регулирование. 150 стр., 1971.

/3/ NASLIN .P

Théorie de la commande et conduite optimale  
Edition Dunod 1973

/4/ GELBERG.B ; PEKLIS.G

Réparation de l'équipement industriel  
Edition MIR 1981  
Traduit en français en 1987

/5/ FELDBAUM .A

Principes théoriques des systèmes asservis optimaux  
Edition MIR 1972

/6/ NASLIN .P

Introduction à la théorie de la commande optimale  
Edition Dunod 1983

/7/ Галицкий С.Я.

Исследование системы автоматического управления положением  
корпусных деталей станков с учётом многосвязности объекта  
(на примере станины).

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических  
наук 1975г. Куйбышев.

# COURANTS ET CHARGES DES STREAMERS DANS LES DIELECTRIQUES LIQUIDES EN GEOMETRIE POINTE - PLAN SOUS TENSION DE CHOC DE Foudre

H. MOULAI et A. BEROUAL

Département de Génie Electrique  
Ecole Nationale Polytechnique d'Alger  
10, avenue Hassen Badi, El-Harrach, Alger

ملخص

لقد أنجزنا جهازا يسمح بتصوير " الشجيرات " التي تسبق  
الفرقعة الكهربائية في العوازل السائلة في نظام رأس ابرة-مستوي تحت توتر الصدمة  
الضوئية ، وقد سمح هذا بالتأكد أن الحالة الفيزيائية لتلك الشجيرات غازية و متبوعة بإرسال  
ضوئي. ان التيار و الحمولة الكهربائية لهذه الشجيرات تكبر مع مدى التوتر أو /  
و الشابت العزلي أو/ و انخفاض المسافة بين القطبين أو/و انخفاض قطر انحناء  
رأس الأبرة .

## RESUME

Un dispositif expérimental permettant la visualisation des streamers dans les diélectriques liquides en géométrie pointe-plan sous tension de choc de foudre a été mis au point. Il nous a permis de confirmer que le streamer est de nature gazeuse et qu'il est accompagné d'une émission lumineuse. Les courants et la charge des streamers augmentent avec l'amplitude de la tension et/ou la permittivité diélectrique du liquide et/ou la diminution de l'intervalle inter-électrodes et/ou la diminution du rayon de courbure de la pointe.

## ABSTRACT

An experimental set-up, allowing to visualize the streamer in dielectric liquids in a point-plane electrode geometry, under lightning impulse voltage has been realised. This permit us to confirm the gaseous nature of the streamer and to observe the light it emits. The current and the electrical charge of the streamers increase with the voltage and/or the dielectric permittivity of the liquid and/or the decrease in the electrode gap and/or the diminution of the curvature radius of the point.

## INTRODUCTION

Depuis une vingtaine d'années, des progrès considérables ont été accomplis sur la compréhension des mécanismes de conduction dans les liquides /1,2,3/ et l'étude des phénomènes qui précèdent le claquage, s'est développée de façon systématique /4-7/.

Actuellement, on considère que le claquage d'un liquide est précédé de l'apparition sur une électrode, puis du développement d'une perturbation appelée "streamer" (zone ionisée revêtant la forme d'une arborescence) qui, altère l'indice de réfraction et émet de la lumière.

Ceci n'est pas une découverte récente, puisqu'en 1933, Washburn /8/ et en 1945 Komelkov /9/, rapportaient déjà de telles observations. Liao et Anderson en 1953 /10/ mesurèrent les vitesses de streamers et les courants associés dans l'huile, dans un système d'électrodes pointe-plan. Cependant, des résultats contradictoires ont été rapportés en particulier ceux relatifs à l'amplitude et à la forme des courants /10-15/.

Le but de ce travail est de présenter les résultats d'une étude concernant ces courants ainsi que la charge des streamers sous tension de choc de foudre dans un système pointe-plan, en fonction de plusieurs paramètres tels l'amplitude de la tension, le rayon de courbure de la pointe, l'intervalle interélectrode, la permittivité du liquide et la polarité de la pointe.

## TECHNIQUE EXPERIMENTALE

Le dispositif expérimental est représenté sur la figure 1; il est constitué d'un générateur de choc de foudre normalisé (600 kV, 4 kJ, 1,2/50  $\mu$ s), d'une cellule d'essai et d'un système de mesure.

La cellule d'essai est constituée d'un corps en téflon; elle comporte deux hublots en pyrex de 10 mm de diamètre permettant la visualisation des phénomènes pouvant se produire dans l'intervalle interélectrode, une électrode plane en duralumin et d'une électrode pointe en acier dur (rayon de courbure variable de 1  $\mu$ m à 120  $\mu$ m). Les électrodes pointes sont obtenues par corrosion électrochimique d'un fil en acier dur de 1 mm de diamètre.

Le courant est mesuré à travers une résistance non inductive de 50 ohms placée en série avec la cellule d'essai (I est déduit de la tension aux bornes de cette résistance).

Deux diodes rapides montées en tête bêche et en parallèle avec la résistance de mesure permettent de protéger l'entrée de l'oscilloscope. La charge finale du streamer Q est obtenue à partir de la tension  $U_c$  aux bornes d'une capacité C connectée en série avec la cellule ( $Q = C.U_c$ ). La capacité de mesure est sélectionnée parmi un ensemble de capacités commutables comprises entre 100 pF et 100  $\mu$ F.

Une barrière isolante en plexiglass de 1 mm d'épaisseur, placée sur l'électrode plane, permet d'éviter l'établissement éventuel d'une décharge disruptive

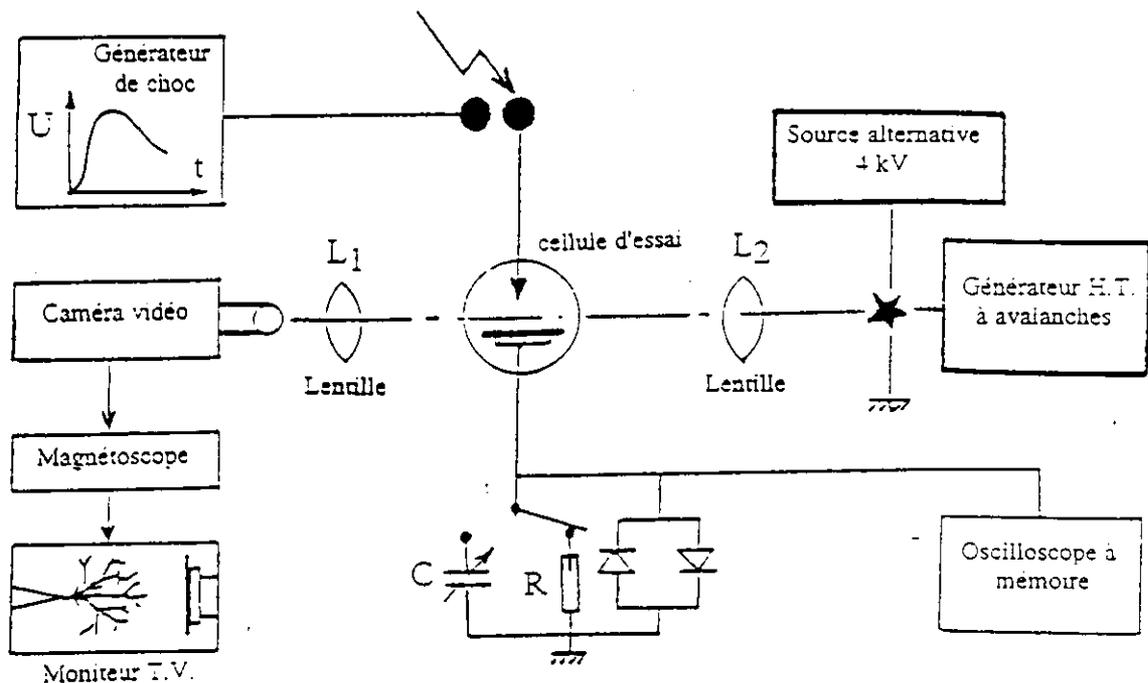


Fig.1 Dispositif expérimental de visualisation et de mesure du courant et de la charge du streamer.

entre les électrodes et donc d'éviter d'éventuelles destructions de l'appareillage de mesure.

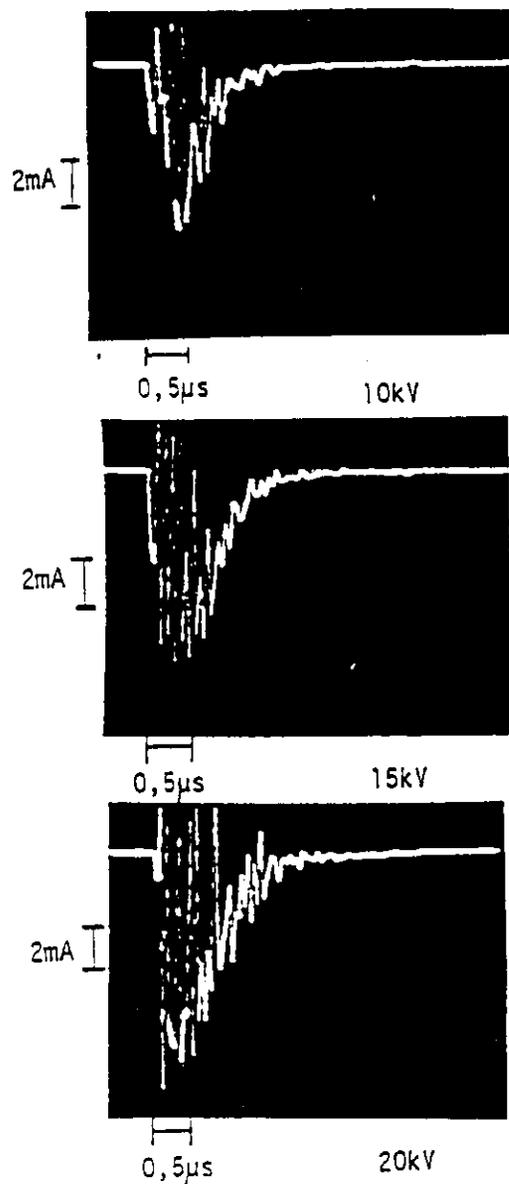
Les formes du courant et de la charge du streamer sont enregistrées sur un oscilloscope à mémoire ( de type Tektronix 468).

Les liquides testés sont principalement: l'huile de transformateur ( $\epsilon_r = 2,1$ ), le n-hexane ( $\epsilon_r = 1,89$ ), le trichloréthylène ( $\epsilon_r = 3,42$ ), l'iodobenzène ( $\epsilon_r = 4,49$ ) et le toluène ( $\epsilon_r = 2,38$ ).

## RESULTATS EXPERIMENTAUX

### Courants des streamers:

La forme et l'amplitude des courants dépendent de plusieurs paramètres. La figures 2 donne des exemples d'oscillogrammes de courants dans l'iodobenzène dans des conditions bien déterminées de tension et d'écartement entre électrodes. Nous remarquons que ces courants sont constitués de plusieurs pics dont la durée est de l'ordre de 50 ns (ceci correspond à la limite de la bande passante de l'oscilloscope). Le nombre de pics de courants augmente avec la tension.



**Fig.2** Influence de la tension sur les courants dans l'iodobenzène en pointe négative pour  $d=5$  mm et  $r_p = 10$  µm.

Dans l'huile de transformateur, l'enveloppe de ces pics de courants est plus régulière lorsque la pointe est anode que lorsqu'elle est cathode. Cependant, les temps de transit (temps mis par le courant pour atteindre son maximum) sont pratiquement les mêmes dans les deux polarités; ce qui suggère que les vitesses des streamers positif et négatif sont du même ordre dans l'huile de transformateur. Un résultat analogue a été obtenu par ailleurs sous créneau de tension /16/ et sous tension alternative /17/.

D'autre part, les courants des streamers diminuent lorsque le rayon de courbure  $r_p$  de la pointe augmente (fig.3) et/ou l'intervalle interélectrode augmente (fig.4). Il apparait donc que le champ électrique joue un rôle important dans la propagation des streamers.

Dans les liquides étudiés, la forme des courants est pratiquement la même. Cependant, l'amplitude de ces courants semble augmenter de façon proportionnelle avec la permittivité diélectrique du liquide (fig.5) quoique la gamme des permittivités considérées soit réduite.

### Charge de streamers

Comme pour les courants, la charge finale des streamers augmente avec la tension (fig.6) et/ou la permittivité du liquide et/ou la diminution de l'intervalle interélectrode dans tous les liquides étudiés (fig.7). Pour un intervalle  $L$  donné, la variation de la charge en fonction de la tension est pratiquement linéaire (fig.6).

D'autre part comme les oscillogrammes de courant comportent des pics, ceux de la charge comportent quant à eux des paliers (fig.8), indiquant que la propagation des streamers s'effectue par sauts. Le temps entre chaque saut (palier) diminue avec l'augmentation de la tension et/ou la diminution de  $r_p$  et/ou la diminution de  $L$  et/ou l'augmentation de  $\epsilon$ . Plus ces paliers deviennent courts, plus la propagation devient continue et donc la vitesse augmente. Ceci a été largement développé par ailleurs /18/.

## DISCUSSION

D'après les résultats rapportés dans la littérature /7,19/, les streamers lents - en forme de buisson - peuvent être assimilés à une sphère conductrice (concentrique ou tangente à la pointe) et les streamers rapides - filamenteux - à un canal conducteur se développant de la pointe vers le plan. Les observations par effet Kerr faites par Kelly et Hebner /20/ confirment le fait que le streamer est conducteur.

Nous allons essayer de discuter nos résultats expérimentaux à la lumière de ces modèles.

### Modèle de la sphère

En supposant que le streamer est un conducteur parfait se déplaçant avec une vitesse  $v(t)$  et que la capacité du condensateur streamer - plan est fonction du temps, le courant et la charge auront respectivement pour expression (pour une sphère concentrique à la pointe) /7/:

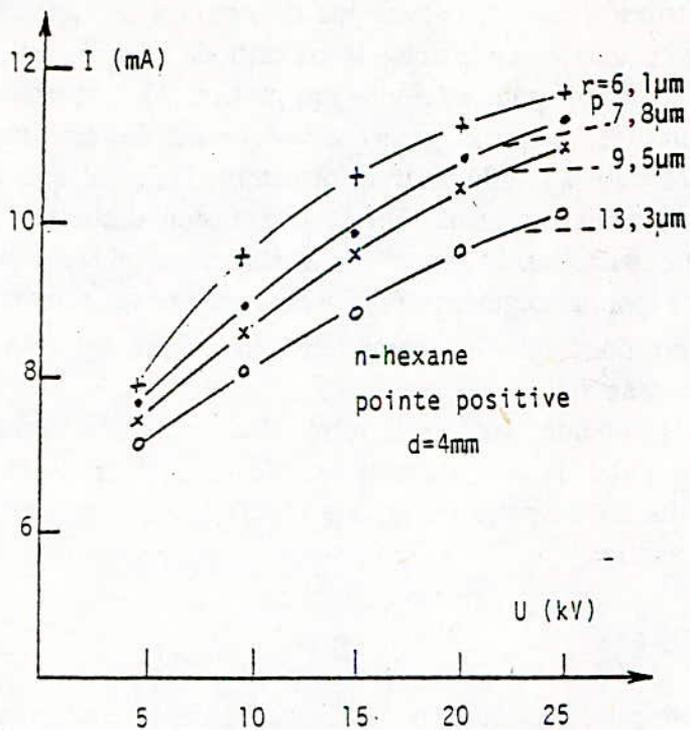


Fig.3 Variation du courant de streamer en fonction de la tension pour différents rayons de courbure de la pointe.

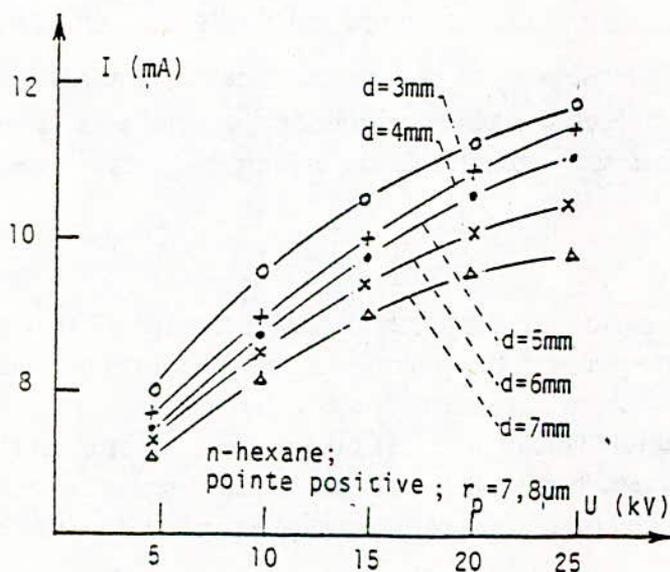


Fig.4 Variation du courant de streamer en fonction de la tension pour différentes distances interélectrode.

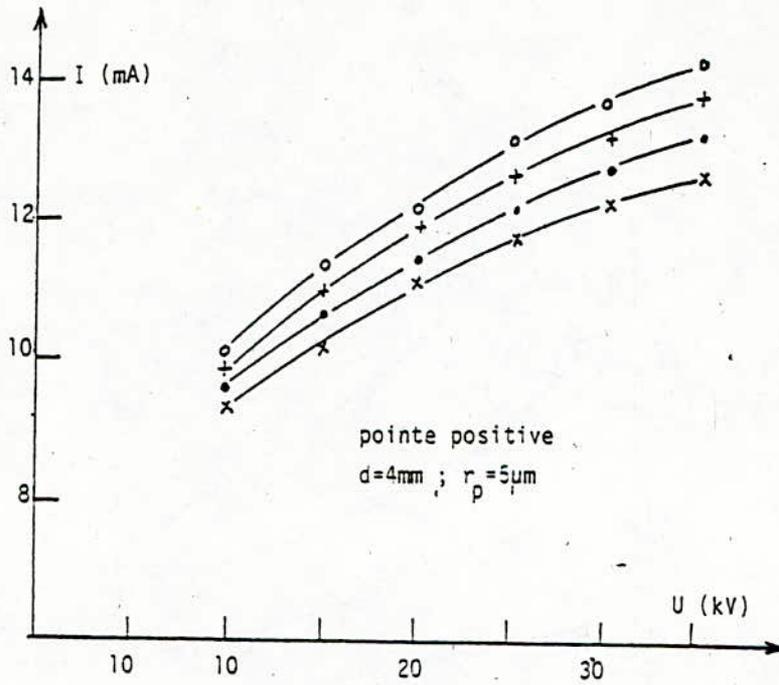


Fig.5 Influence de la permittivité diélectrique du liquide sur le courant de streamer:  
 (o) Iodobenzène, (+) Trichloroéthylène,  
 (●) Toluène, (x) n-Hexane.

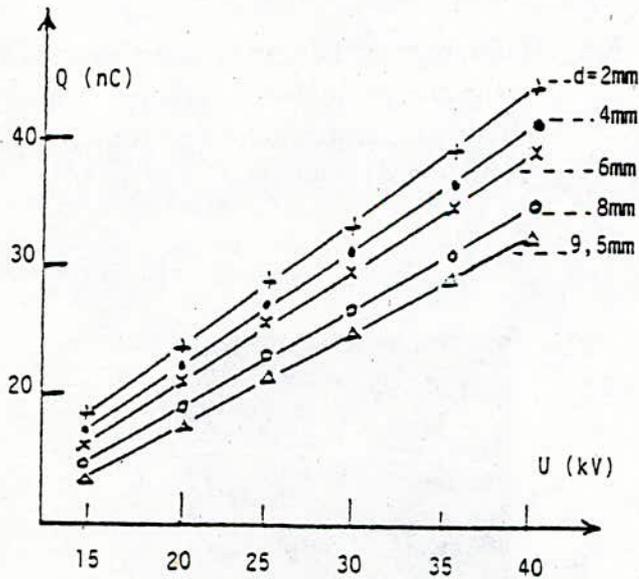
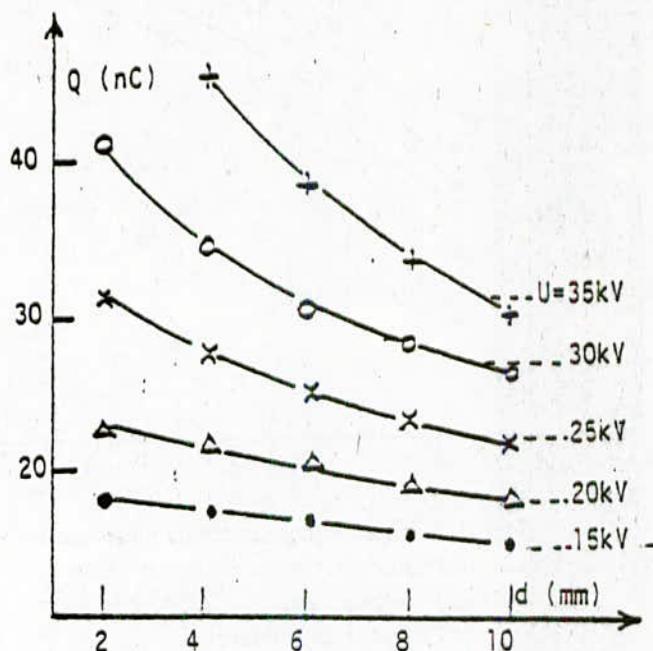
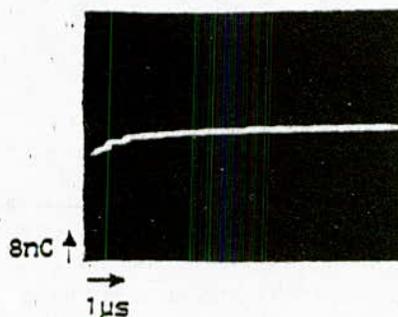


Fig.6 Influence de la tension sur la charge finale du streamer dans l'huile de transformateur pour  $r_p=5\mu\text{m}$  en pointe positive pour différents intervalles interélectrodes.



**Fig.7** Influence de la distance interélectrode sur la charge finale du streamer dans l'huile de transformateur en pointe positive pour  $r_p = 5 \mu\text{m}$ .



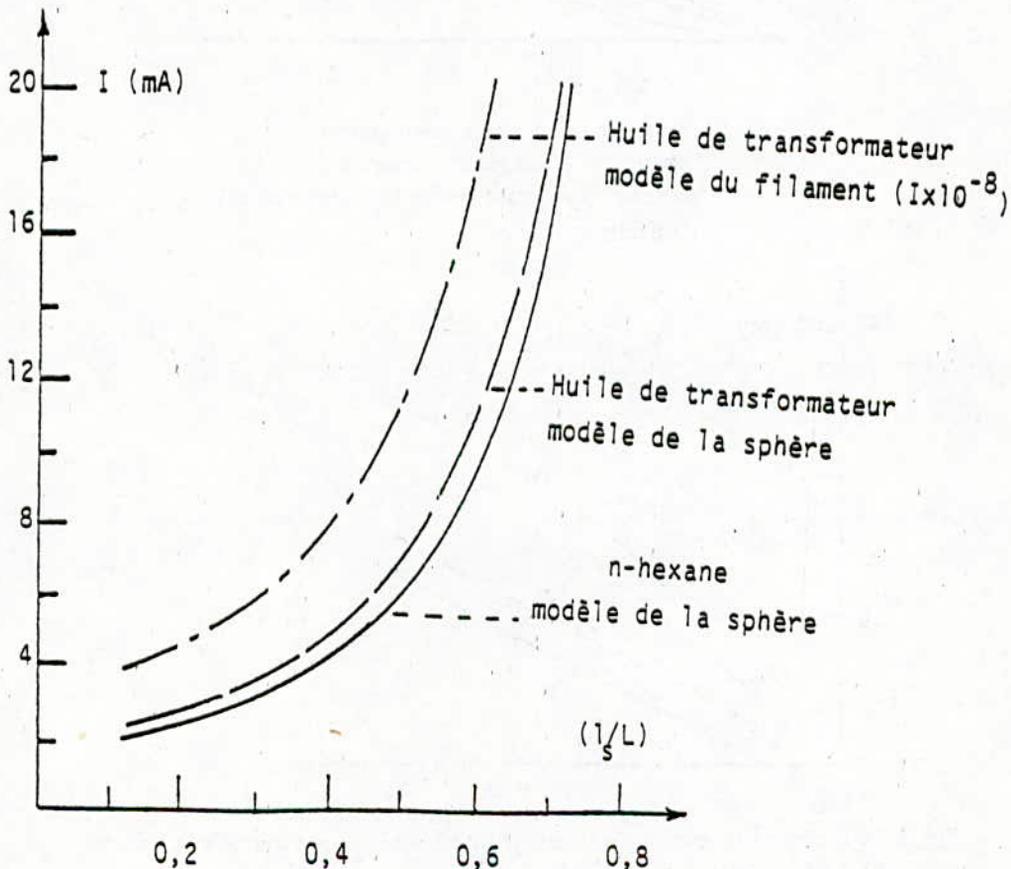
**Fig.8** Oscillogrammes de la charge du streamer dans l'huile de transformateur en pointe positive:  $d = 4 \text{ mm}$ ,  $r_p = 5 \mu\text{m}$ ,  $U = 35 \text{ kV}$ .

$$I_s(t) = 4 \pi \varepsilon v(t) U / (1-x)^2$$

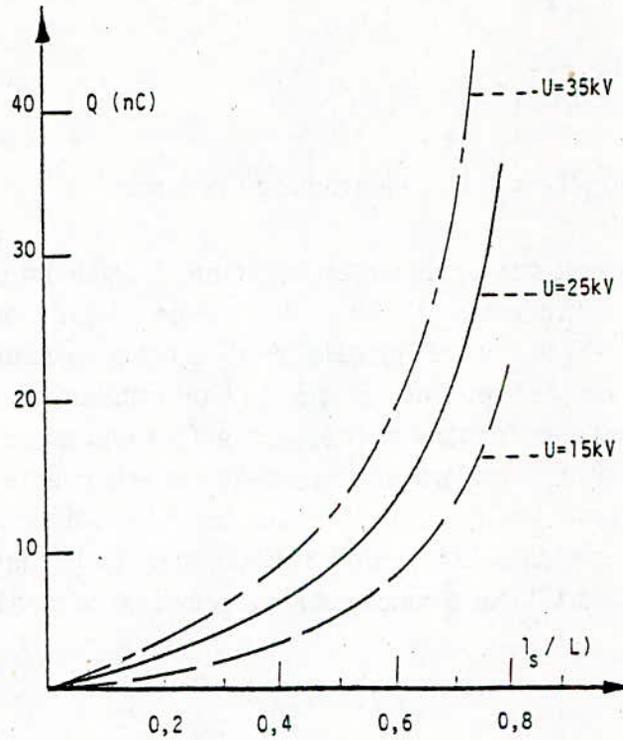
$$Q_s(t) = 4 \pi \varepsilon L U (x+m) / (1-x)$$

avec  $x = l_s/L$ ;  $m = r_p/L \ll 1$ ;  $l_s$  - longueur du streamer

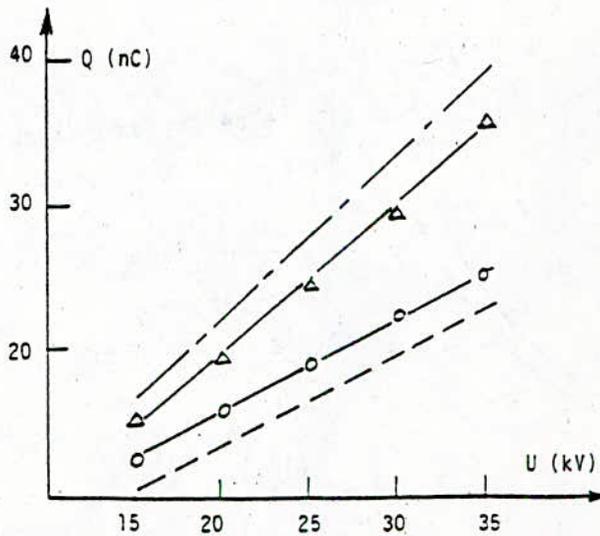
En supposant que la vitesse est constante, les valeurs des courants obtenus dans l'huile de transformateur sont du même ordre que celle obtenues expérimentalement (fig.9). Si ce modèle rend compte également de la distance interélectrode et de la tension, il ne prévoit nullement les pics observés expérimentalement et donc le mode de propagation (par saut ou de façon continu). Quant à la charge, si on considère un angle solide inférieur à  $4\pi$  puisque c'est le cas expérimentalement (soit  $4\pi/10$ ), nous obtenons des valeurs du même ordre que celles mesurées (fig.10). Cependant, la variation expérimentale de la charge en fonction de la tension n'est pas toujours linéaire comme cela est prévu par le modèle (fig.11).



**Fig.9** Variation du courant théorique en fonction de la longueur réduite du streamer ( $l_s/d$ ):  
 $d = 6 \text{ mm}$ ,  $r_p = 5 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $U = 20 \text{ kV}$ .



**Fig.10** Variation de la charge théorique en fonction de la longueur réduite du streamer ( $l_s/d$ ) dans l'huile de transformateur:  $d=6\text{ mm}$ ,  $r_p=5\text{ }\mu\text{m}$ .



**Fig.11** Influence de la tension sur la charge du streamer pour  $d=6\text{ mm}$  et  $r_p=5\text{ }\mu\text{m}$ .  
 (- -) trichloroéthylène (courbe théorique selon le modèle de la sphère);  
 ( $\Delta$ ) trichloroéthylène (courbe expérimentale);  
 ( $\circ$ ) n-hexane (courbe expérimentale);  
 (- · -) n-hexane ( courbe théorique selon le modèle de la sphère).

## Modèle du filament

Le streamer sous forme filamentaire est assimilé à un canal conducteur cylindrique, dont l'extrémité hémisphérique conserve un rayon constant  $r_p$  lors de son évolution de la pointe vers le plan. Le courant et la charge d'un tel système (front du streamer - plan), en utilisant l'approximation sphérique, auront respectivement pour expression:

$$I_f(t) = 4 \pi \varepsilon U v(t) m^2 / (1-x)^2$$

$$Q_f(t) = 4 \pi \varepsilon U r_p (1 + r_p / (L - l_s))$$

Les courants obtenus sont de loin inférieurs à ceux obtenus expérimentalement: soit  $10^6$  fois environ plus faibles (fig.9).

Quant à la charge, elle reste pratiquement constante (d'après ce modèle), sauf lorsque le streamer arrive pratiquement sur l'électrode plane; ce qui ne concorde nullement avec les enregistrements expérimentaux où la charge croît rapidement avec l'avancée du streamer. Pour des valeurs typiques ( $U=25$  kV,  $r_p=5$   $\mu$ m et  $L=12$  mm), la charge obtenue est d'environ 1000 fois plus faible que celle mesurée. Ceci s'explique par le fait que ce modèle suppose que seule la tête du streamer est conductrice. Par conséquent, il vient à l'évidence d'admettre l'existence d'une zone importante conductrice dans l'environnement du streamer.

En ce qui concerne le mode de propagation, ce modèle comme le précédent, ne donne aucune information puisque l'image des pics de courants observés expérimentalement, n'est nullement prévue. Cependant, ils répondent à la variation linéaire observée du courant avec la permittivité du liquide.

## CONCLUSION

Il ressort de notre étude que les courants de streamers obtenus dans un système d'électrodes pointe-plan sous tension de choc de foudre sont constitués de pics discrets très brefs, et ce dans les deux polarités. Dans l'huile de transformateur, les courants de streamers positifs et négatifs sont similaires ; ce qui indiquerait que les vitesses de propagation pour les deux polarités sont du même ordre. L'amplitude des courants et de la charge des streamers sont d'autant plus importantes que la tension est élevée et/ou la distance interélectrode est faible et/ou le rayon de courbure de la pointe est faible et/ou la permittivité du liquide est grande.

## REFERENCES

/1/ W.F. Schmidt: IEEE Trans. Electr. Insul., EI-19, 5, 1984, p.398.

- /2/ T.J. Lewis: Proc. of the 8th Int. Conf. Cond. Breakd. Dielectric Liquids, Pavia, 1984, p. 131.
- /3/ K. Yoshino: IEEE Trans. Electr. Insul., EI-15, 3, 1980, p.186.
- /4/ J.D. Devins, S.J. Rzad and R.J. Schwabe: J. Appl. Phys., 52, 1981, p.4531.
- /5/ E.O. Forster: IEEE Trans. Electr. Insul., EI-15, 3, 1980, p.182.
- /6/ S. Sakamoto and H. Yamada: IEEE Trans. Electr. Insul., EI-15, 3, 1980, p.177.
- /7/ A. Bérroual and R. Tobazéon: IEEE Trans. Electr. Insul., EI-21, 4, 1986, p.613.
- /8/ H.W. Washburn: Physics, New York, 4, 1933, p.29
- /9/ V.S.Komelkov: C.R. Académie des Sciences de l'URSS, Moscou, 48, 1945, 4, p.268.
- /10/ T.W. Liao and J.G. Anderson: Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs, 72, Pt.1, 1953, p.641.
- /11/ A. Bérroual and R. Tobazéon: C.R. Académie des Sciences, Paris, t.303, 4, 1986, p.279.
- /12/ A. Bérroual and R. Tobazéon: IEEE Ann. Rep. CEIDP, NAS-NRC, Buffalo, USA, 1985, I-4.
- /13/ H. Yamashita and H. Amano: J. Electrostatics, 12, 1982, p.253.
- /14/ M.C.Hanna, J.E. Thomson and T.S. Sudarshan: IEEE Ann. Rep., CEIDP, 1983, p.245.
- /15/ H. Yamada and T. Sato: IEEE Trans. Electr. Insul., EI-20, 2, 1985, p.261.
- /16/ A. Bérroual: Archiwum Elektrotechniki, (accepted).
- /17/ O. Lesaint: Thèse de doctorat, Grenoble 1987.
- /18/ A. Bérroual: Archiwum Elektrotechniki, (accepted).
- /19/ W.G. Chadband and G.T. Wright: Brit. J. Appl. Phys., 16, 1965, p.305.
- /20/ E.F. Kelley and R.E. Hebner: J; Appl. Phys., 52, 1981, p.191.

**CONTRIBUTION TO THE STUDY AND THE  
REGENERATION OF INSULATED MINERAL OIL**

S.E. CHITOUR F. MOHALLEBI

Lab.of valorisation of fossiles energy

Departement of chemical engineering

Ecole Nationale Polytechnique,

10,Avenue Pasteur- Algiers, 10 ième

A. LABBAGI

University collège - Chlef.

**Abstract :** The aim of this work consists of the study of one of the processes of the regeneration of insulated mineral oil. This oil when used in this way is commonly called "earth-acid process". This oil has undergone different treatments like the attack of acid, adsorption, percolation and the drying up, so to determine the optimum parameters that govern the best conditions of the discoloration of the treated oil, this was based on the results of the optic density (transmission). Finally, various analyses were carried out after each stage of the oil treatment to follow the evaluation of physico-chemical and particularly electric oil properties.

الموضوع : اسهام في دراسة زيوت المحولات الكهربائية المستعملة قصد اعادة تكريرها.

الملخص: يهدف هذا العمل الى دراسة احدى طرق اعادة تكرير زيوت المحولات الكهربائية المستعملة والمسماة (حمض - ترية) لهذا الغرض عرضنا الزيت المستعمل لعدة فحوص ومن بينها، التأثير بالحوامض، تمرير على المتونيت (تربة)، الرش ثم الجف، وذلك لتعيين العوامل الفضليات الضامنة لأحسن شروط نزع التلون من الزيت المفحوص اعتمادا على نتائج الكثافة الضوئية. أخيرا عدة تحاليل أجريت بعد كل فحص للزيت لهدف متابعة تغير الخصائص الفيزيائية و الكيميائية وخاصة كهربائية.

**Sujet:** Contribution à l'étude et à la régénération des huiles minérales isolantes.

**Résumé:** Le but de cette recherche consiste en l'étude d'un des procédés de régénération des huiles minérales isolantes usagées, appelé procédé acide-terre. Pour ce faire, nous avons fait subir à l'huile usagée les différents traitements à savoir l'attaque acide, l'adsorption, filtration et le séchage, afin de déterminer les paramètres optimas régissant les meilleures conditions de décoloration de l'huile ainsi traité, en se basant sur les résultats de la densité optique (transmission). Enfin divers analyses ont été effectuées après chaque étape de traitement de l'huile, dans le but de suivre l'évolution de ses propriétés physico-chimiques et particulièrement électriques.

## INTRODUCTION

The elimination of used oil poses a practical problem of great importance. In fact, their quantity represents nearly half of the new used oil quantity [1]. The great consumption of these products and the different constraints that they present have obliged certain countries to regenerate them after deterioration or their growing old. The regeneration of used oil because of their reutilization is a controversial subject and has been for numerous years, but after the crisis of energy, this solution is more and more adopted.

This regeneration is a problem that should be treated in relation with the needs, the resources and the capacities of country. Actually, it is a compromise between: the protection of environment, the economy and the technique which decide of choice of the process of regeneration. In our study, we have used the process earth-acid which is done in two stages: Acid treatment and earth treatment.

## **I. GENERAL PROCEEDING OF REGENERATION :**

The regeneration, the only solution of the problem of the used oil consists of the elimination of the different contaminations. Different physical and chemical means are used so as to realize these operations. In general, the regeneration of the used oil has two stages:

- The elimination of the contaminations,
- The finish.

The pre-treatments of oil are the cause of the diversity of the proceedings of regeneration .The latter are numerous, they differ from each other in the nature of the means which are to be used to assure the impurities elimination [1].

In this process, we realize the elimination of the contaminations with the acid precipitation. This treatment ( $H_2SO_4$ ) leads to the coagulation of carbonized suspensions and to the sulphide of oxidized products. After acid attack oil undergoes a treatment called the finish in which clay with great specific surface is used.

## **II. PHYSICO-CHEMICAL AND THE USED ELECTRIC INSULATED MINERAL OIL:**

A new insulated mineral oil or used is generally characterized by a certain number of analyses ( Table 1 ). The latter are carried out first over new oil then used (worn) oil after each type of treatment in order to improve them to the norms of transformer's functioning.

proprieties	values		norms
	new oil	used oil	
cinematic viscosity (cst) at of : 20°C 50°C 100°C	20.5	30.5	ASTM D 445
	07.5	10.5	
	02.74	03.1	
density of 20°C	0.8663	0.8700	ASTM D 1298
the lightning point (°C)	153	170	ASTM D 92
the fire point (°C) in V.O	164	178	ASTM D 92
the flow point (°C)	-41	-38	ASTM D 97
tenor in water (% V)	0	0.002	ASTM D 95
tenor in sediments (% p)	0	0.2	ASTM D 473
conradson residu	0	0.3	ASTM D 189
intrafacial tension (N/m) at 25°C	0.0438	0.0424	ISO 6395
colour	1.5	4.5	ASTM D 1500
the sign of acidity(mgKOH/g of oil)	0.022	0.123	ASTM D 974
aniline point	80	85	ASTM D 611
tension of bang (KV)	> 60	>18	NFC-27-101UTE
electric rigidity (KV/cm)	>270	>85	NFC-27-101UTE
factor of dielectric dissipation (tgδ) at 90°C	0.0048	0.096	NFC-27-210VDE
capacity (P.F)	124.45	134	NFC-27-210VDE
dielectric constancy	2.07	2.23	by calcul
the sign of viscosity	90	73	ASTM D 2270

*Table 1. Characteristics of the new and used (worn) insulated mineral oil .*

## INTERPRETATION OF RESULTS :

The comparison of the results of the analysis of the used insulated mineral oil before any treatment of new oil, reveals :

- any elevation of acidity and the dissipation factor ( $\text{tg}\delta$ ) of the worn out oil, this elevation is probably due to the presence of diverse contaminations such as acid and the polar compounds in the worn out oil,

- a decrease of the electric rigidity of the worn out insulated mineral oil is due to the presence of humidity ( $\text{H}_2\text{O}$ ) and impurities (small particles such as dust, carbonized particles, resins ....),

- a decrease of the intrafacial tension (superficial tension) is due to the presence of a layer saturated with water which has been produced during oil oxidation,

- the elevation of the lightning point and the fire point, is due to the presence of light hydrocarbons,

- an account of these revelations, our work consists of contributing to the elimination of different contaminations existing in the worn out oil so as to ameliorate the physico-chemical performances and more particularly electric such as: the  $\text{tg}\delta$  and the bang tension which are the most important parameters for a regeneration.

### III.ACID TREATMENT :

The acid is a sulfuric concentrated at 98 % .The treatment with the help of the latter leads to the flocculation of carbonized suspensions and to the oxidized products without provoking oil attack.

Our aim in this stage is to optimise the quantity of the used sulphuric acid .In fact,in order to follow or continue the influence of acid on the worn out oil, a mistake of other criteria of the evolution of acid attack efficiency on oil ,we refer to the colour and more precisely the sign of acidity.

The increase of the acidity sign is baneful for the oil quality,of and it increases the dielectric dissipation factor ( $\text{tg}\delta$ ) which should not surpass  $5 \cdot 10^{-3}$  according to the used norm.

#### III.1 OPTIMISATION OF THE QUANTITY OF SULPHURIC ACID :

We consider as cited above the evolution of acid sign. these tests are done at a temperature of 25°C.The acidity analysis is done according the norm ASTM D 974 .

the quantity of sulphuric acid in ( % v )	0	1	2	3	4	5
acidity sign (mg KOH/g oil )	0.123	0.08	0.06	0.03	0.07	0.15

*Table 2. Variation of the acidity sign in function with volumic percentage acid/oil.*

The results of table 2.reveals, for a volumic percentage of 3 % acid-oil,we obtain a minimal value of acid sign according to the norm ,for a new insulated oil,this latter is inferior or equal to  $3 \cdot 10^{-2}$ .

### III.2 OIL ANALYSIS AFTER THE ATTACK OF ACID :

After the optimisation of the necessary acid quantity to eliminate the impurities found in the worn out oil, Oil has been retreated by the quantity that we have optimised .

properties	values		
	new oil	worn out oil	acidified
cinematic viscosity (cst) at : 20°C	20.5	30.5	19.74
50°C	07.5	10.5	06.0
100°C	02.74	03.1	02.25
density at 20°C	0.8663	0.8700	0.8690
the lightning point (°C)	153	170	163
the fire point (°C) in V.D	164	178	163
the flow point (°C)	- 41	- 38	- 32
tenor in water (% V)	0	0.002	0.001
tenor in sediment (% p)	0	0.2	0
interfacial tension (N/m) at 25°C	0.0438	0.0424	0.0430
colour	1.5	4.5	2.5
acidity sign (mg KOH/g oil )	0.022	0.123	0.03
the bang tension (KV)	>60	>18	>50
electric rigidity (KV/cm)	>270	>85	>230
dielectric dissipation factor tgδ at 90°C	0.0048	0.0960	0.0617
capacity (P.F)	124.45	134.0	124.0

*Table 3. Characteristic values of the worn out insulated mineral oil after acid attack*

## INTERPRETATION OF RESULTS :

According to the results of the used insulated mineral oil analysis which has undergone an acid treatment (table 3), we state a clear improvement of physico-chemical and electric characteristics. The principal parameters to control the oil efficiency are :

- the viscosity at 20°C; this undergoes a decrease during the acid treatment (from 30 to 19.47 cst ) which is explained by the removal of solid or carbonized particles such as resins, asphalts ...

- acidity sign; it passes from 0.123 to 0.03 mg of KOH/g of oil, this decrease is due to the acid action on the different contaminations existing such as oxidized products, and organic acid.

- interfacial tension ; the light increase of this one is (from 0.0424 to 0.043 N/m) to 25°C, this is due to the water decrease because with 0.5at 1% of sulphuric acid it is necessary to dry oil [3] and the rest of concentrated acid which plays a solvent role for the resins, asphalts and oxidized hydrocarbons.

- the bang tension; the increase of 18 to 50 KV is due to the decrease of solid particles like dust, oxidized bodies (corps) and water which play the role of a conductor in oil which is the object of bang.

- the dielectric dissipation factor ( $\text{tg}\delta$ ) has undergone an increase of 0.096 to 0.0617. This is due to the decrease of polar molecules which have reacted with the sulfuric acid, because the existence of the latter increases the  $\text{tg}\delta$  which is baneful for oil (the norm which indicates that  $\text{tg}\delta < 0.005$

### III.3 EARTH TREATMENT :

At the unrefi state, the most important natural adsorbants have weak capacities. To improve this propriety, we undergo to the adsorbants chemical and thermic treatments (acid). The adsorbant according to our choice is a clay of two origins : Maghnia and Mostaganem. To these bentonits, we have done two types of treatments : treatment by two acids  $H_2SO_4$  and  $HCl$  is a thermic treatment.

#### III.3.1 CHEMICAL ACTIVATION :

In order to do this, we have used sulfuric acids at 98 % and chlorhydric acids at 37 % as activation in the concentrations of 5 and 10 % in mass. This activation is maintained at a temperature of  $90^\circ C$  during 6 hours [4].

The bentonit samples are filtered after on buckner, and washed wit distilled water till the totality of ions ( $Cl^-$  or  $SO_4^{2-}$ ) introduced by two acid treatments ( $H_2SO_4$  and  $HCl$ ) are eliminated, which we verify respectively by the reactives  $BaCl_2$  and  $AgNO_3$ .

The activation of treated clays by chemical ways is due to the development of pores by fixation of  $H^+$  [5].

#### III.3.2 THERMIC ACTIVATION :

We have undergone to the two samples of clay a thermic treatment at  $250^\circ C$  in a dryingroom with a speed of drying up at  $50^\circ C/h$ . The duration of treatment hase been fixed at 6 hours [4].

### III.3.3 DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE OPTIMUM ADSORPTION

The parameters that we have optimised are :

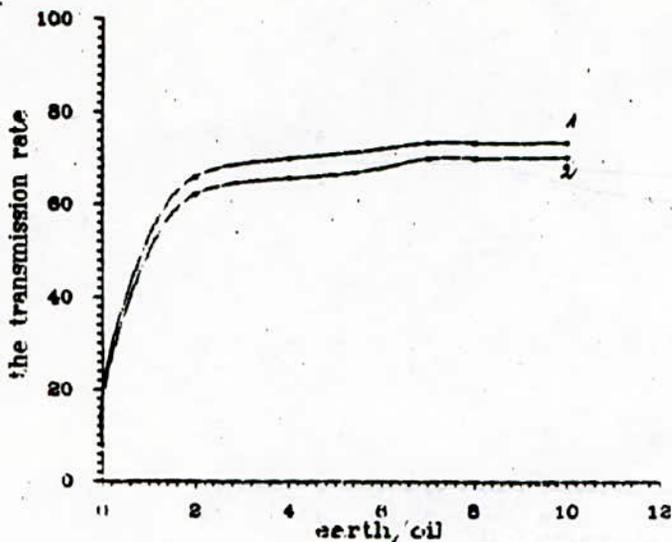
- the quality or type of bentonit (and also the percentage earth /oil ),
- the time of earth - oil contact,
- the temperature of earth -oil contact.

The oil discolouring by the two types of (bentonits) natural and pushed on by a thermic way, we state that there was not a great difference between them. The discolouring power always remains limited because of the lack of active site; therefore, we must use a great quantity to eliminate all impurities, because we have to optimise the earth quantity. For this, we have done a chemical activation of the bentonit in order to increase the discolouring power (adsorption power) which is translated by a decrease of earth quantity.

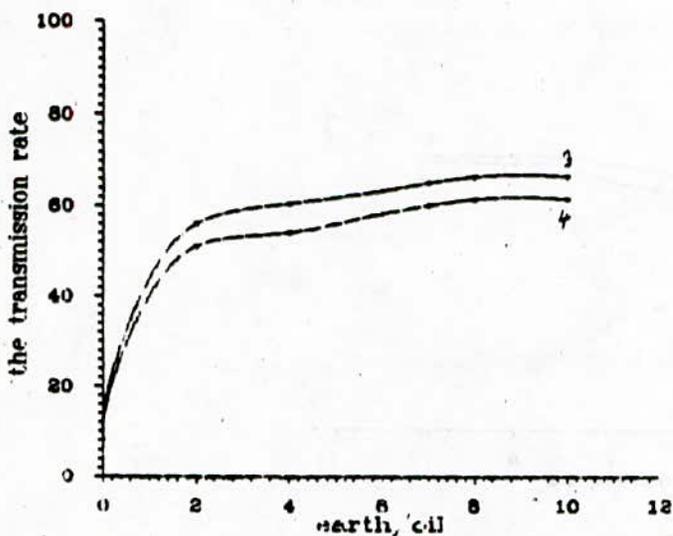
According to the found results for the two of activated bentonits by HCl and  $H_2SO_4$  at 5 % and 10 % . We state that there is an increase of the rate of transmission and it becomes constant at a certain percentage of (earth / oil).

See graphs 1,2,3 and 4 .

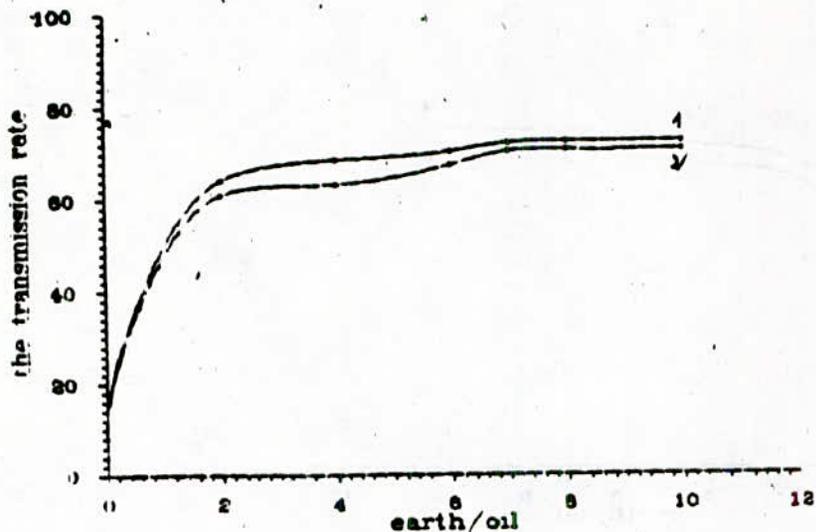
This increase is due to the elimination of impurities and bodies, and it becomes constant at a percentage earth/oil of 7 % in weight . Likewise we see a small split between the two curves of earth type of earth , which is explained like this by the destruction of the active sites which favour the adsorption.



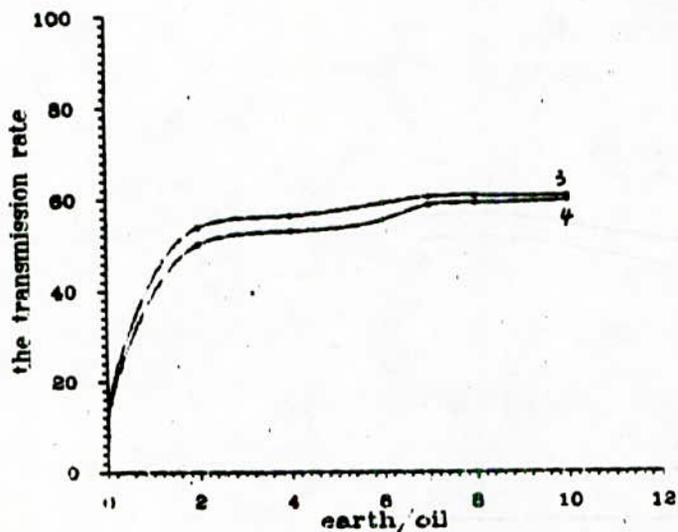
Graph 1. Variation of the transmission rate in function with the percentage earth/oil (bentonit of Magnhia activated).  
by HCl, 1- activated at 5 %, 2- activated at 10 %.



Graph. 2. Variation Of the transmission rate in function with the percentage earth/oil (bentonit of Mostaganem activated).  
by HCl, 3- activated at 5 %, 4-activated at 10%.



Graph.3. - Variation of the transmission rate in function with the percentage earth/oil (bentonite Maghnia activated. by  $H_2SO_4$  ; 1-activated at 5 %, 2-activated at 10%).



Graph 4. Variation of the transmission rate in function with the percentage earth/oil (bentonite Mostaganem activated. by  $H_2SO_4$  , 3-activated at 5 %, 4-activated at 10 %).

### **INTERPRETATION :**

From our results we can deduce :

-the thermic activation does not lead to good discolouring earths.

-the acid activation improves the adsorbant power of bentonites.

-the bentonites activation because of an acid excess is baneful to the adsorbant power, as we can see on the graphs 1,2,3 and 4 ,the activated bentonit by acid at 5 % is letter than the one treated by acid at 10 % .Moreover, an excess of acid destroy the activity of bentonit.

-we conclude that bentonit which has the highest transmission rate is of Maghnia which is treated by chlorhydric acid at 5 % .

-likewise we deduce the optimal earth quantity which corresponds to the percentage of 7 % in weight.

-the adsorbant power of the natural bentonit is limited,where we have to use an important earth quantity to respond to the question.

### **III.3.4 CONTACT TEMPERATURE DETERMINATION :**

According to our results,we state that when we increase the temperature,the transmission rate increases at a temperature of 70 °C ( graph 5 ) and decreases.The (graph 5) increase of temperature unfavours the adsorption.We can consider that the temperature of contact is of 70 °C,it corresponds to the maximal transmission rate.

### III.3.5 CONTACT TIME DETERMINATION :

Our results of analyses ( graph 6 ) show that the transmission rate increases in function with contact time till the duration of 20 mn and more than this,we can notice an increase of the latter which will be explained by the phenomenon of desorption,table 4.

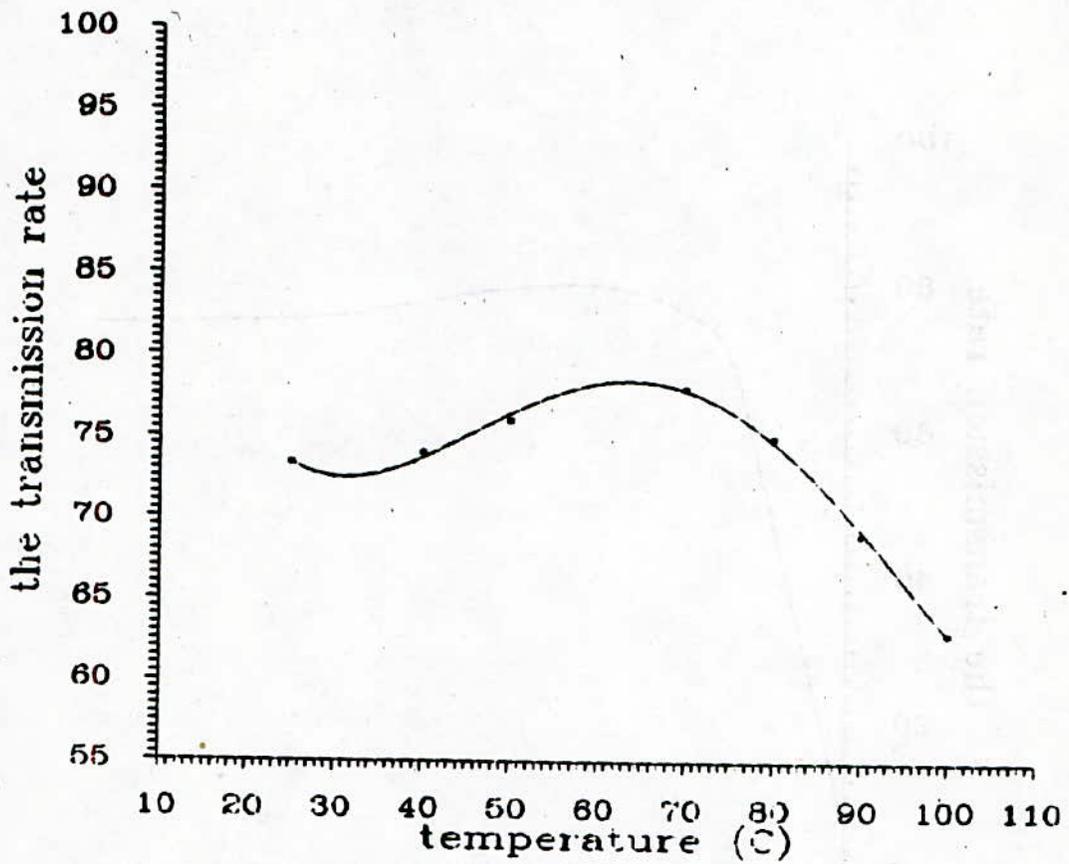
the type of bentonit treatment	acid activation (HCl to 5 %)
relation earth / oil	7 %
time of contact oil-bentonit	20 mn
contact temperature oil-bentonit	70 °C

*Table 4. Recapitulation of parameters optimas*

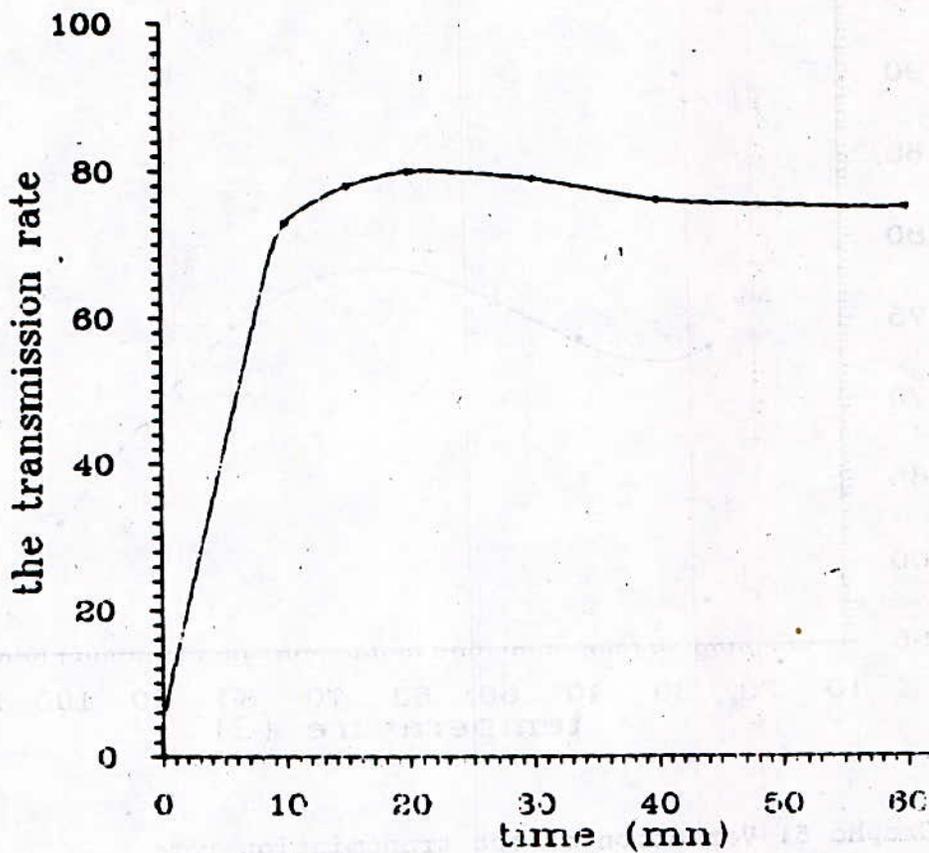
### IV.OIL ANALYSIS AFTER EARTH TREATMENT :

After the determination of the parameters optimas,we apply them to the earth treatment stage in order to continue the improvement of the physico-chimical and electric proprieties of the insulated oil ( after acid treatment ).

The oil analyses treated are regrouped in the table 5.



Graphc 5. Variation of the transmission rate  
in function with the contact temperature



Graph.6. Variation of the transmission rate in function with the contact time.

properties	values			
	new oil	worn out oil	acidified oil	earth treated oil
cinematic viscosity (cst)				
at : 20°C	20.5	30.5	19.74	21.77
50°C	07.5	10.5	06.0	07.26
100°C	02.74	03.1	02.25	02.60
density at 20°C	0.8663	0.8700	0.8690	0.8660
the lightning point (°C)	153	170	163	155
the fire point (°C) in V.O	164	178	170	165
tenor in water ( % V )	0	0.002	0.001	0
interfacial tension (N/m) at 25°C	0.0438	0.0424	0.0430	0.0440
colour	1.5	4.5	2.5	1.5
acidity sign ( mg KOH / g oil )	0.022	0.123	0.03	0.025
tenor in sediment ( % p )	0	0.2	0	0
the bang tension ( KV )	>60	>18	>50	>55
electric rigidity ( KV/cm )	>27	>85	>230	>253
dielectric dissipation factor (tgδ) at 90°C	0.0048	0.0960	0.0617	0.0043
capacity ( P.F )	124.45	134.00	124.00	130.00

*Table 5. Characteristics of insulated mineral oil after earth treatment*

### **INTERPRETATION OF RESULTS :**

After earth treatment, we have improved the electric and physico-chemical parameters of the insulated oil ( table 5 ), which are neighbours of the used norms for the insulated mineral oil in service.

We can conclude, according to these characterized values, that the effect of earth is very marked on the discolouring of oil, the adsorption of organic acids and polar bodies (molecules). This explains the improvement of colour observed and the decrease of the  $tg\delta$  of 0.0617 at 0.0043 which is inferior to 0.005 according to the norm. It is the same for the viscosity and the bang tension.

## CONCLUSION

In this work, we have studied the insulated mineral oil regeneration by adsorption on the Algerian bentonite.

This acid treatment aims at eliminating the impurities which exist in the used oil. For this we have optimised the concentrated sulfuric acid quantity at 98 %. This is based on the acidity sign which varies in function with the factor of dielectric dissipation ( $\text{tg}\delta$ ) which is the most important.

The earth treatment serves at the discolouring of the used oil (after acid attack), in this stage we have done an optimisation for the parameters: type of earth, contact time and contact temperature earth-oil. In order to determine them we have based ourselves on the optic density (transmission)..

The acid-earth process has a disadvantage, indeed during the acid treatment quantities of acid mud result from this, they will affect the environment which is from 3 to 5 % according to our studies so as to preserve or safeguard the environment from pollution which is due to the throwings up of the used (or worn out) oil.

## BIBLIOGRAPHY

- 1- P.BOND  
"Aspects technico-économique de régénération des huiles usées"  
Séminaire Sonatrach ORAN 14 - 15 Déc.(1981)
- 2- D.P.PANDYA  
"Status of recycling of used lubricating and transformer oils"  
Chemical age of india vol. 1085 -1090 (1975)
- 3- P.WUITHIER  
"Le pétrole raffinage et génie chimique"  
Tome I Ed. technip.paris (1971)
- 4- F.D.OVACHARENKO  
"Propriétés hydrophyles des argiles et minéraux argileux"  
A.N. USSR ,KIEV (1961)
- 5- N.K.NADIROV  
"Bases théoriques de l'activation et mécanisme de l'action  
des sorbants naturelles dans le processus de décoloration  
des huiles végétales" MOSCOU (1973) P .339
- 6- NF C 27-210 "Mesure de la permittivité relative et le facteur  
de dissipation diélectrique " Avril (1979).

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA REGENERATION  
DES HUILES USAGEES MOTEUR.

S.E.CHITOUR - F.MOHELLEBI.  
T.GUENDOUZI.

Laboratoire de valorisation des énergies fossiles.  
Département de Génie Chimique.  
Ecole Nationale Polytechnique.  
10 Avenue Pasteur, El-Harrach, Alger.

ملخص

في إطار إعادة استعمال زيت المحرك المستعملة، هذا البحث يقترح مساهمة لدراسة احد الطرق المستعملة في إعادة تكرير زيوت المحركات، الا وهي طريقة (حمض -- ترسة) .  
ولهذا استعملنا عدة وسائل منها: تمرير اول على التربة، استخراج الماء والهيدروكربونات الخفيفة، تأخير بالحامض، تعامل واخيرا تمرير ثاني على التربة .  
وفي الاخير خضعت هذه الزيت الى عملية التقطير الفراغي، وتحليل الأقسام الناجمة عن هذه العملية حاولنا تصنيف الأقسام المستخرجة بالنسبة الى الأقسام بترولية معروفة .

REBUME:

Dans le cadre de la récupération des huiles moteur usagées, ce travail contribue à l'étude d'un des procédés de régénération qui est le procédé acide-terre.

Nous avons fait subir à l'huile usée les différentes étapes de traitement à savoir: un premier passage à la terre, le dé-essencielment et la déshydratation, l'attaque acide, la neutralisation et un deuxième passage à la terre.

Pour parfaire à la purification et à l'évaluation de l'huile traitée, nous lui avons fait subir une distillation sous vide. L'analyse des fractions issues de cette dernière a permis de les situer du point de vue des caractéristiques vis à vis des coupes pétrolières (essence, gas oil, fuel).

ABSTRACT:

This work is the study of the processes of regeneration of used oils engine wich is commonly called acid-clay.

For this prupose, the used oil is puted through different treatments: The first passing up on the bentonite, deshydratation and elimination of light hydrocarbon, acid attak, neutralization and the second passing up on the bentonite.

Finally, the treated oil is subjected to a vacum distillation, and the analysis of the fractions originating from the latter has permitted to situate them relatively to the petroleum fractions, in order to optimize their utilisation.

## INTRODUCTION

La régénération des huiles usées est considérée dans de nombreux pays comme une forme d'économie d'énergie et comme un moyen de recyclage des produits.

Si elles ne sont pas traitées, ces huiles usagées constituent un rejet très polluant. Les additifs qu'elles contiennent peuvent présenter une toxicité non négligeable vis à vis des organismes vivants.

Les huiles usagées lorsqu'elles sont récupérables et valorisables peuvent être reraffinées en huile de base ou réutilisées comme combustibles (source d'énergie).

Certaines huiles trop polluées, ne permettant aucune valorisation, sont destinées à l'incinération (1).

Dependant, le contrôle et la protection de l'environnement ainsi que la notion de conservation des ressources ont fait que la législation, dans de nombreux pays, conduit au principe de la réutilisation des huiles usées (2).

La régénération, seule façon de résoudre le problème des huiles usées, consiste en l'élimination des différents contaminants. Différents moyens physiques et chimiques sont mis en oeuvre pour réaliser ces opérations.

D'une façon générale, la régénération des huiles usées comporte deux étapes:

- L'élimination des contaminants.
- La finition.

### I. ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE DE L'HUILE USAGÉE ET DE L'HUILE NEUVE:

Cette analyse consiste en la détermination des caractéristiques principales de ces huiles.

Ces paramètres permettant d'évaluer l'efficacité du processus de régénération choisi.

Les essais réalisés correspondent aux spécifications ASTM.

Les résultats obtenus sont groupés dans le tableau N° 2.

Analyses	Normes
Densité (d <sub>4</sub> <sup>20</sup> )	ASTMD 1298
Viscosité à 40° C (cst)	ASTMD 445
Viscosité à 100° C (cst)	ASTMD 445
Indice de viscosité	ASTMD 2270
Viscosité Engler à 40°C	CONVERSION
Point à l'air (°C)	ASTMD 92
Point de feu (°C)	ASTMD 92
Point d'écoulement (°C)	ASTMD 97
Point d'aniline (°C)	NF07 -021
Carbone Conradson (% P)	ASTMD 189
Teneur en eau (% V)	ASTMD 95
Teneur en sédiment (% P)	ASTMD 473
Pouvoir calorifique (cal/g)	ASTMD 240
T.A.N. (Mg KOH/g)	ASTMD 664
T.B.N. (Mg KOH /g)	ASTMD 2896
Teneur en chlore (PPM)	ASTMD 240
Couleur	ASTMD 1500
Teneur en soufre (% P)	ASTMD 129
Cendres sulfatées (% P)	ASTMD 874

Tableau N° 1: Identification des différents essais selon les normes utilisées.

Analyses	Huiles neuve (HN)	Huile usée (HU)
Densité (d <sub>4</sub> <sup>20</sup> )	0,8800	0,8963
Viscosité à 40° C (cst)	138,00	135,5
Viscosité à 100° C (cst)	19,21	16,76
Indice de viscosité	132	119
Viscosité Engler à 40°C	18,17	17,78
Point éclair (°C)	244	240
Point de feu (°C)	282	266
Point d'écoulement (°C)	- 21	-22
Point d'aniline (°C)	116	98
Carbone Conradson (% P)	0	2,8
Teneur en eau (% V)	0	0,56
Teneur en sédiment (% P)	0	0,65
Pouvoir calorifique (cal/g)	10785,9	10526,2
T.A.N. (Mg KOH/g)	2,4	3,25
T.B.N. (Mg KOH /g)	6,7	3,29
Teneur en chlore (PPM)	428	2722
Couleur	4,5	011>8
Teneur en soufre (% P)	0	0,55
Cendres sulfatées (% P)	0,801	0,995
Indice de réfraction	1,4886	--
Dilution (% V)	--	1,5

Tableau N°2: Détermination des caractéristiques principales selon les normes pour l'huile neuve et l'huile usagée, Catégorie SAE 20 W 50.

## Commentaire:

Si nous devons comparer les principales propriétés de l'huile neuve et de l'huile usée, nous constatons les points suivants:

### \* DENSITE:

L'augmentation de la densité peut provenir vraisemblablement d'une présence d'eau dans le carter du moteur ainsi que la contribution certaine du carbone conradson provenant du cracking de l'huile.

### \* VISCOSITE:

La chute de viscosité peut être d'ue à la la présence de carburant dans l'huile (fuite dans le circuit d'essence avec introduction directe du combustible dans le carter) et peut être aussi d'eau.

Elle peut cependant être vraisemblablement d'ue aussi au cracking des hydrocarbures en chaîne courte de faible viscosité.

### \* TENEUR EN CARBONE (3):

Cette augmentation de la teneur en carbone, en dehors d'un cracking très sévère d'ue à une mauvaise carburation, une mauvaise injection ou à un défaut d'étanchéité de segmentation (en particulier, pendant le rodage de la voiture).

### \* TENEUR EN SEDIMENT:

La teneur en sédiment peut provenir de différents contaminants ( eau, essence, usure des métaux).

### \* POINT D'ANILINE:

L'abaissement du point d'aniline pourrait provenir d'une aromatisation secondaire des paraffines et surtout des naphènes, ce qui conduirait avec la désalkylation des aromatiques à un abaissement du point d'aniline.

### \* TENEUR EN SOUFRE ET CENDRES SULFATEES:

Elles Pourraient provenir du passage de l'essence dans le carter. La teneur en soufre de l'essence est relativement importante.

## II. CARACTERISATION PAR DIVERSES METHODES DES PRODUITS HYDROCARBONES ET AUTRES CONTENUS DANS L'HUILE USEE:

Nous avons procédé au fractionnement de l'huile usagée par deux types de distillation.

- La distillation fractionnée atmosphérique.
- La distillation sous vide.

### 1. LA DISTILLATION FRACTIONNEE ATMOSPHERIQUE:

Cette distillation a été menée dans les conditions suivantes:

- Volume de la charge en huile usée: 500 ml
- Domaine de température : 62 + 320° C .

Le graphique de la figure 1 montre les variations de ces caractéristiques en fonction de la température d'ébullition.

### 2. DISTILLATION SOUS VIDE:

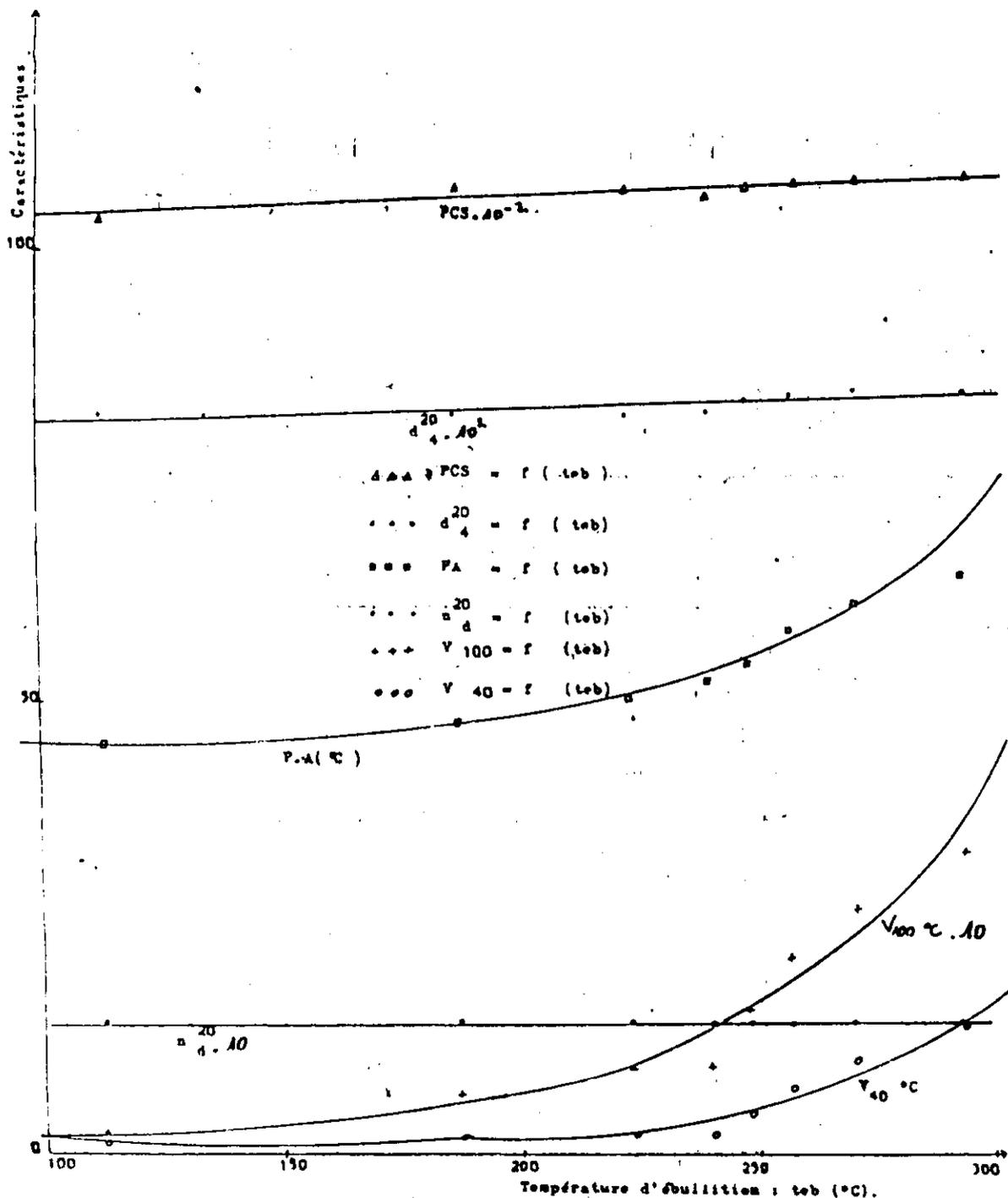
La fraction N°10 (résidu) issue de la distillation fractionnée atmosphérique de l'huile usée va subir une distillation sous vide.

Les conditions opératoires sont les suivantes:

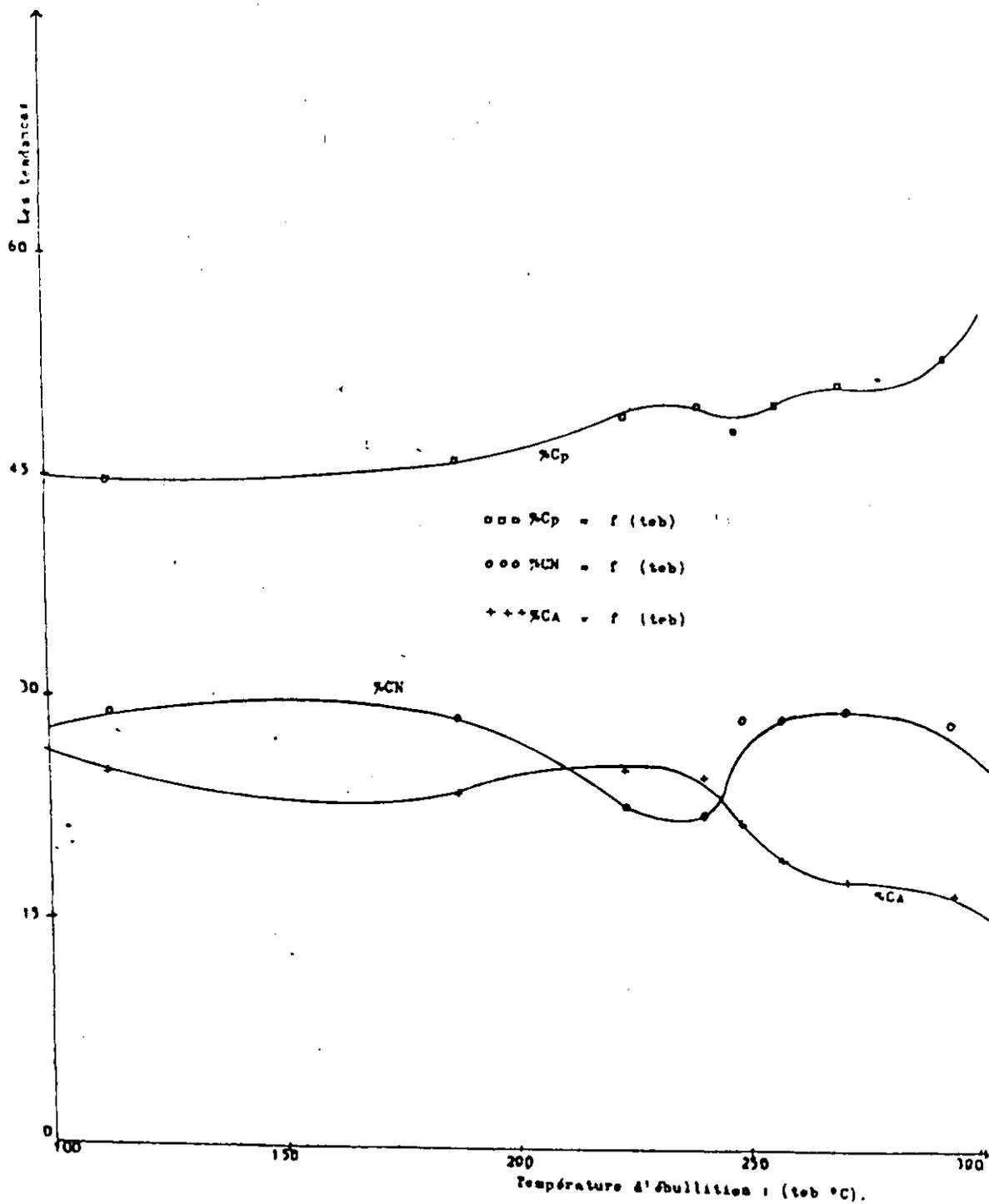
- Volume de la charge en huile usée : 207 ml
- Domaine de température sous vide : 114 + 290°C
- Domaine de pression : 7 mbar

A la fin de l'expérience, dix fractions ont été recueillies.

Les résultats des analyses sont présentés dans le tableau N° 1.



**Fig 1** : Variation des différentes caractéristiques en fonction de la température d'ébullition des fractions issues de la distillation fractionnée atmosphérique de l'huile usée.



**Fig 2** : Variation des tendances des différentes fractions issues de la distillation fractionnée atmosphérique de l'huile usée en fonction de la température d'ébullition.  
( Méthode n. d. PA ).

FRACTION N°	$\gamma_d^{20}$	$d_4^{20}$	PA (°C)	$V^{(cat)}_{40^\circ C}$	$V^{(cat)}_{100^\circ C}$	P.C.S (cal/g)	Teb (°C)	M.M(g)
1	1,4813	0,8624	83	7,01	2,35	10903	320	249
2	1,4884	0,8695	87	7,24	2,72	10947	384	330
3	1,4915	0,8736	90	10,10	3,98	10972	394	344
4	1,4968	0,8812	94	16,20	5,24	10997	406,5	362
5	1,5001	0,8865	95	32,30	8,02	11100	417,5	378
6	1,5016	0,8897	96	60,40	8,45	11210	428	396
7	1,5028	0,8976	97	66,60	8,71	11392	442	421
8	1,5087	0,9058	99	74,50	8,93	11477	456	445
9	1,5100	0,9101	101	89,01	9,70	11587	466	465
10	Résidu sous vide							

**Tableau N° 3:** Caractéristiques des différentes fractions issues de la distillation sous vide de l'huile usée.

**Commentaire:**

Le P.A augmente de plus en plus, cela veut dire que les fractions sont de moins en moins aromatiques purs, le pouvoir calorifique augmente, ainsi que la viscosité.

### III. REGENERATION DE L'HUILE USAGEE TYPE MOTEUR APRES 5000 Km DE FONCTIONNEMENT PAR LE PROCEDURE ACIDE-TERRE:

Le procédé acide-terre, qui est utilisé pour la régénération de l'huile usée se résume par les étapes suivantes:

On a l'huile usagée.

1. Premier passage à la terre.
2. Dé-essencement et Déshydratation.
3. Acidification.
4. Neutralisation.
5. Deuxième passage à la terre.
6. Distillation sous vide.

#### 1. Premier passage à la terre:

L'huile usagée (SAE 20 W 50) a subi un premier passage à la terre. Les conditions opératoires choisies sont les suivantes:

- Volume d'huile usagée : 1 l
- Temps de contact : huile usagée - bentonite : 2 heures.
- Masse de bentonite naturelle : 50 g
- Température de contact : huile usagée - bentonite: 30° C.
- Agitation continue : 300 t/mn.

L'huile usagée, après centrifugation, décantation et filtration , conserve toujours sa couleur noire.

Nous avons déterminé les caractéristiques les plus importantes de cette huile usagée conformément aux normes standards d'analyses.

Les résultats obtenus sont groupés dans le tableaux N° 4.

ANALYSES	RESULTATS		
	HUILE NEUVE (HN)	HUILE USAGÉE DE DEPART (HU)	HUILE DECOLOREE PAR LA BENTONITE NATURELLE (HT <sub>1</sub> )
Densité ( $d_u^{20}$ )	0,8800	0,8963	0,8963
Viscosité à 40° C (cst)	138,00	135,5	133,5
Viscosité à 100° C (cst)	19,21	16,76	15,52
Indice de viscosité	132	119	115
Viscosité Engler à 40°C	18,17	17,78	17,51
Point éclair (°C)	244	240	236
Point de feu (°C)	282	266	258
Point d'écoulement (°C)	-21	-22	-18
Point d'aniline (°C)	116	98	96
Carbone conradson (% P)	0	2,8	3,3
Teneur en eau (% V)	0	0,56	0,46
Teneur en sédiment (% P)	0	0,65	0,55
P.C.S. (cal/g)	10785,9	10526,2	10535,5
T.A.N. (Mg KOH/g)	2,4	3,25	2,35
T.B.N. (Mg KOH/g)	6,7	3,29	2,49
Teneur en chlore (PPM)	428	2722	2250

Tableau N° 4: Résultats des caractéristiques de l'huile usagée après un premier passage à la terre (HT<sub>1</sub>)

Commentaire:

On remarque que la densité n'a pratiquement pas varié, les autres propriétés ont varié dans de faibles proportions à noter cependant l'anomalie du carbone conradson qui augmente après traitement.

2. Dé-essencement et Déshydratation :

Cette phase consiste à éliminer l'eau et les hydrocarbures légers se trouvant dans l'huile.

L'élimination d'eau se fait par le passage de l'huile usagée sur un desséchant qui est le chlorure de calcium (CaCl<sub>2</sub>) à 15 % massique.

Après filtration, l'huile recueillie a subi un chauffage rapide pendant un temps  $t = 10$  mn sous une température de  $150^{\circ} \text{C}$ , cette dernière peut être suffisante pour éliminer les hydrocarbures légers et l'eau restante.

L'huile ainsi traitée a été analysée.

Les résultats sont groupés dans le tableau N° 5.

ANALYSES	RESULTATS			
	HUILE NEUVE (HN)	HUILE USEE (HU)	HUILE TRAITEE 1 (HT <sub>1</sub> )	HUILE TRAITEE 2 (HT <sub>2</sub> )
Densité $d_4^{20}$	0,8800	0,8963	0,8963	0,8958
Viscosité à $40^{\circ}\text{C}$ (cst)	138,00	135,5	133,5	132,3
Viscosité à $100^{\circ}\text{C}$ (cst)	19,21	16,76	15,52	14,77
Indice de viscosité	132	119	115	110
Viscosité Engler à $40^{\circ}\text{C}$	18,17	17,78	17,51	17,38
Point éclair ( $^{\circ}\text{C}$ )	244	240	236	232
Point de feu ( $^{\circ}\text{C}$ )	282	266	258	256
Point d'écoulement ( $^{\circ}\text{C}$ )	-21	-22	-18	-17
Point d'aniline ( $^{\circ}\text{C}$ )	116	98	96	95
Carbone conradson (% P)	0	2,8	3,3	3,35
Teneur en eau (% V)	0	0,56	0,46	0,20
Teneur en sédiment (% P)	0	0,65	0,55	0,52
P.C.S. (cal/g)	10785,9	10526,2	10535,5	10576,8
T.A.N. (Mg KcH/g)	2,4	3,25	2,35	2,25
T.B.N. (Mg KcH/g)	6,7	3,29	2,49	2,54
Teneur en chlore (PPM)	428	2722	2250	2225

Tableau N° 5: Evolution des différentes caractéristiques de l'huile déshydratée et dé-essenciée (HT<sub>2</sub>).

#### Commentaire:

Les propriétés ont toutes varié, notamment la teneur en eau et en sédiments, et on constate que le carbone conradson a encore augmenté ainsi que la T.B.N.

### 3. Le traitement acide:

C'est l'une des étapes les plus importantes du procédé.

Le traitement à l'acide sulfurique 98% conduit à la floculation des suspensions carbonées et à la sulfonation des produits oxydés, sans pour cela provoquer une attaque de l'huile elle-même.

Les paramètres optimums pour le traitement acide sont les suivants:

- Volume d'huile dé-essenciée et déshydratée: 100 ml
- Volume d'acide sulfurique : 20 ml
- Température de contact : 60° C
- Temps de contact : 40 mn
- Agitation continue : 500 t/mn

Avec ces conditions optimums, nous avons procédé à un traitement à l'acide sulfurique 98% de l'huile dé-essenciée et déshydratée.

Après décantation et séparation de l'huile des boues acides, une partie de l'huile a été analysée, l'autre partie va subir une neutralisation.

Les résultats des analyses sont présentés dans le tableau N° 4 .

ANALYSES	RESULTATS				
	(HN)	(HU)	(HT <sub>1</sub> )	(HT <sub>2</sub> )	(HT <sub>3</sub> )
Densité d <sub>4</sub> <sup>20</sup>	0,8800	0,8963	0,8963	0,8958	0,8892
Viscosité à 40°C (cst)	138,00	135,5	133,5	132,3	132,1
Viscosité à 100°C (cst)	19,21	16,76	15,52	14,77	15,6
Indice de viscosité	132	119	115	110	116
Viscosité Engler à 40°C	18,17	17,78	17,51	17,38	17,38
Point éclair (°C)	244	240	236	232	238
Point de feu (°C)	282	266	258	256	252
Point d'écoulement (°C)	-21	-22	-18	-17	-16
Point d'aniline (°C)	116	98	96	95	110
Carbone conradson (% P)	0	2,8	3,3	3,35	0,24
Teneur en eau (% V)	0	0,56	0,46	0,20	0,01
Teneur en sédiment (% P)	0	0,65	0,55	0,52	0,42
P.C.S. (cal/g)	10785,9	10526,2	10535,5	10576,8	10595,7
T.A.N. (Mg KOH/g)	2,4	3,25	2,35	2,25	2,22
T.B.N. (Mg KOH/g)	6,7	3,29	2,49	2,54	0,15
Teneur en chlore (PPM)	428	2722	2250	2225	1213

Tableau N° 6 : Caractéristiques de l'huile usagée SAE 20 W 50 après l'attaque acide (HT<sub>3</sub>).

Commentaire:

C'est le traitement le plus caractéristique puisque le carbone conradson a été réduit considérablement (92%) et le point d'aniline a augmenté aussi, le T.A.N. rejoint celui de départ et T.B.N. a été pratiquement annulé (traitement acide).

4. La neutralisation :

Après le traitement acide, l'huile contient encore probablement des acides de différentes sortes. La neutralisation a pour but de les transformer en sels.

Les conditions opératoires choisies sont les suivantes:

- Volume d'huile à neutraliser : 500 ml
- Volume de la solution de chaux (3 N): 200 ml
- Température de contact : 80°C
- Agitation continue : 300 t/mn.

Après centrifugation, décantation et filtration, une partie de l'huile va être analysée, l'autre partie va subir un deuxième passage à la terre.

Les résultats de l'analyse de l'huile neutralisée sont groupés dans le tableau N°7.

ANALYSES	RESULTATS					
	(HN)	(HU)	(HT <sub>1</sub> )	(HT <sub>2</sub> )	(HT <sub>3</sub> )	(HT <sub>4</sub> )
Densité d <sub>4</sub> <sup>20</sup>	0,8800	0,8963	0,8963	0,8958	0,8892	0,8896
Viscosité à 40°C (cst)	138,00	135,5	133,5	132,3	132,1	131,5
Viscosité à 100°C (cst)	19,21	16,76	15,52	14,77	15,6	15,5
Indice de viscosité	132	119	115	110	116	116
Viscosité Engler à 40° C	18,17	17,78	17,51	17,38	17,38	17,25
Point éclair (°C)	244	240	236	232	238	224
Point de feu (°C)	282	266	258	256	252	237
Point d'écoulement (°C)	-21	-22	-18	-17	-16	-15
Point d'aniline (°C)	116	98	96	95	110	112
Carbone conradson (% P)	0	2,8	3,3	3,35	0,24	0,28
Teneur en eau (% V)	0	0,56	0,46	0,20	0,01	0,015
Teneur en sédiment (% P)	0	0,65	0,55	0,52	0,42	0,48
P.C.S. (cal/g)	10785,9	10526,2	10535,5	10576,8	10595,7	10622,5
T.A.N. (Mg KoH/g)	2,4	3,25	2,35	2,25	2,22	0
T.B.N. (Mg KoH/g)	6,7	3,29	2,49	2,54	0,15	0
Teneur en chlore (PPM)	428	2722	2250	2225	1213	1200

Tableau N° 7 : caractéristiques principales de l'huile neutralisée (HT<sub>4</sub>)

### Commentaire:

La neutralisation a permis d'annuler le TAN et le TBN et de réduire les autres propriétés (eau, carbone Conradson). Le point d'aniline a été amélioré ainsi que l'indice de viscosité.

### 5. Le deuxième passage à la terre ou traitement de finition:

Les paramètres optimums pour la décoloration de l'huile neutralisée par la bentonite activée sont:

- Qualité de la terre: torba activée par HCl 5%
- Quantité de la terre : 10g
- Volume d'huile neutralisée: 200 ml
- Température de contact huile-terre: 80°C
- Temps de contact huile-terre: 60 mn
- Agitation continue : 500 t/mn.

Avec les conditions optimums citées plus haut et qui ont été déterminées après des séries d'expériences, nous avons procédé à un passage de l'huile neutralisée sur une terre activée.

Après filtration, une partie de l'huile recueillie va être analysée, l'autre partie va subir une distillation sous vide.

Les résultats de l'analyse sont donnés par le tableau N° 8.

ANALYSES	RESULTATS						
	(HN)	(HU)	(HT <sub>1</sub> )	(HT <sub>2</sub> )	(HT <sub>3</sub> )	(HT <sub>4</sub> )	(HT <sub>5</sub> )
Densité d <sub>4</sub> <sup>20</sup>	0,8800	0,8963	0,8963	0,8958	0,8892	0,8896	0,8892
Viscosité à 40°C (cst)	138,00	135,5	133,5	132,3	132,1	131,5	132,5
Viscosité à 100°C (cst)	19,21	16,76	15,52	14,77	15,6	15,5	15,7
Indice de viscosité	132	119	115	110	116	116	117
Viscosité Engler à 40°C	18,17	17,78	17,51	17,38	17,38	17,25	17,51
Point éclair (°C)	244	240	236	232	238	224	235
Point de feu (°C)	282	266	258	256	252	237	264
P. d'écoulement (°C)	-21	-22	-18	-17	-16	-15	-21
P.d'aniline (°C)	116	98	96	95	110	112	109
C.conradson (% P)	0	2,8	3,3	3,35	0,24	0,28	0,92
Teneur en eau (% V)	0	0,56	0,46	0,20	0,01	0,015	0,01
T.en sédiment (% P)	0	0,65	0,55	0,52	0,42	0,48	0,22
P.C.S.(cal/g)	10785,9	10526,2	10535,5	10576,8	10595,7	10622,5	10675,8
T.A.N. (Mg KOH/g)	2,4	3,25	2,35	2,25	2,22	0	0
T.B.N. (Mg KOH/g)	6,7	3,29	2,49	2,54	0,15	0	0
Teneur en chlore (PPM)	428	2722	2250	2225	1213	1200	998

Tableau N° 8: Caractéristiques principales de l'huile après le deuxième passage à la terre (HT<sub>5</sub>) = (HR) et l'évolution des différentes caractéristiques de l'huile ayant subi le traitement par le procédé acide-terre.

Commentaire:

Après avoir subi les différents traitements (premier passage à la terre, dé-essencement et déshydratation, acidification, neutralisation et le deuxième passage à la terre), l'huile usagée SAE 20 W 50 (5000 Km) a été purifiée considérablement du fait que ses caractéristiques de départ ont été améliorées le long des différents traitements.

On a une augmentation du carbone Conradson qui peut résulter des dépôts des résidus du cracking de l'huile et aussi de la détérioration de certains additifs (5).

Tous les autres paramètres sont améliorés dans des proportions notables et ceci montre que l'utilisation de la terre dans l'élimination des impuretés et de l'eau est nécessaire.

#### 6. DISTILLATION SOUS VIDE DE L'HUILE REGENEREE (HR):

Après le traitement de finition, on a procédé à une distillation sous vide de l'huile régénérée.

Les conditions opératoires choisies sont les suivantes:

- Volume de la charge en huile régénérée: 200 ml
- Domaine de température : 58 + 276° C
- Domaine de pression : 7 mbar.

A la fin de l'expérience, dix fractions ont été recueillies.

Les résultats des analyses sont présentés dans le tableau N° 9 .

FRACTION N°	$n_d^{20}$	$d_4^{20}$	PA (°C)	$V_{40}^{(cal)}$	$V_{100}^{(cal)}$	P.C.S (cal/g)	Teb (°C)	M.M(g)
1	1,4536	0,8101	41	6,8	1,2	10858	275	212
2	1,4562	0,8151	44	7,0	1,2	10785	370	325
3	1,4664	0,8298	47	9,5	3,7	10274	386	346
4	1,4700	0,8340	51	15,3	5,1	10262	397,5	362
5	1,4710	0,8416	53	30,1	7,2	10345	409	380
6	1,4762	0,8476	56	57,6	7,3	10445	420	397
7	1,4793	0,8524	61	63,4	8,6	10592	430,5	414
8	1,4825	0,8585	65	72,1	8,9	10589	442	434
9	1,4864	0,8656	76	81,2	9,3	10560	451	450
10	Résidu sous vide							

Tableau N° 9 : Caractéristiques des différentes fractions issues de la distillation sous vide de l'huile régénérée.

### CONCLUSION:

L'objet de ce travail, consistait à étudier le procédé acide-terre dans la régénération des huiles usagées moteur et ainsi pouvoir contribuer à l'élaboration d'un modèle d'étude.

Nous nous sommes intéressés à la détermination des caractéristiques physico-chimiques de l'huile usagée et d'après les résultats obtenus, nous avons pu déduire le degré de détérioration des différentes propriétés comparativement aux propriétés d'une huile neuve.

Au cours de l'évolution des différentes caractéristiques de l'huile ayant subie le traitement par le procédé acide-terre, il a fallu faire appel aux caractéristiques les plus importantes de l'huile usagée et les comparer à chaque fois à celles de l'huile déjà traitée (dans une phase précédente) et de l'huile neuve références qui sont déjà connues.

A la dernière étape (distillation sous vide), nous pouvons avancer qu'il y a eu une nette amélioration des paramètres de l'huile usagée et ainsi retrouver les propriétés des huiles de base.

Enfin, l'étude de l'étape de valorisation de l'huile régénérée, nous a permis d'élargir la plage d'utilisation des mélanges, huile neuve - huile régénérée et gas oil - huile régénérée..

Donc, on peut conclure que les différentes analyses physico-chimiques, nous ont permis de suivre l'évolution de l'huile usagée.

## BIBLIOGRAPHIE

- (1) - PETROLINVEST.  
"Procédé moderne pour la régénération des huiles usées".  
Entreprise d'engineering et d'études, SARAJEVO.  
YOUgosLAVIE, 1981.
- (2) - P. AUDIBERT, P. TRAMBODZE.  
" Les huiles usagées sources de matières premières et  
d'énergie".  
Publication IFP, Information chimie N° 145  
Juin 1976.
- (3) - I.F.P.  
" Méthodes rapides d'analyses des huiles usagées".  
Collection colloques et séminaires  
Edition technip, 1971.
- (4) - P. WUITHIER.  
" Le pétrole raffinage et génie chimique". Tome I et II.  
Edition Technip, PARIS 1971.
- (5) - A.SCHILLING.  
" Les huiles pour moteurs et le graissage des moteurs".  
Tome I et II.  
Edition Technip - PARIS 1962.
- (6) - P.BOND.  
" Aspects technico-économiques de la régénération des huiles  
usées".  
Séminaire Sonatrach, Oran 14 et 15 Décembre 1981.
- (7) - M.L.VHISMAN, J.W.GOEST ZINGER and F.O.COTTON.  
" Waste lubricating oil research: and investigation of  
several re-refining methods".  
Bu, Mines RI 7884, 1974.
- (8) - J.RICHARD, F.ROUX.  
" Les lubrifiants" , Technique d'ingénieur,  
B 590, 1978.
- (9) - " Méthodes d'essais des lubrifiants".  
Département raffinage.  
CERHYD, Février 1987.
- (10) - S.E. CHITOUR.  
" Raffinage du pétrole". Tome I et II.  
Office des publications universitaires, Alger, 1983.
- (11) - Revue de l'I.F.P.  
Art " L'usure et polissage des cylindres moteurs".  
N° Mai/Juin 1979.

# CONTRIBUTION À L'ETUDE DE LA POLLUTION DE L'OUED REGHAIA (ALGERIE) PAR LES METAUX LOURDS

J. ARRAR\* & R. BELABBES

Département Génie Chimique Ecole Nationale Polytechnique

## ملخص

هذا العمل يهتم بتقدير وتتبع درجة تلوث الرواسب بالمعادن الثقيلة الراسمة و الرامدة لأثر التلوث بواد رغايا. اعتمدت الدراسة أولا على التداخلات الأساسية لأهم الشوارد الموجبة المكونة للرواسب على معايرة المعادن بالامتصاص الذري. هذه الدراسة اتبعت بتحديد نسبة المعادن، مما سمح لنا بتتبع تطور النفايات والتعرف على سلوكها، ومن ناحية أخرى التنبؤ على أخطار التلوث الناتج عن الرواسب، ومن جهة أخرى تأثير مختلف العوامل المميزة للرواسب على محتوى المعادن الثقيلة السالفة الذكر قد وضعت

## Abstract

The aim of this study is to evaluate the pollution of Oued Reghaia's sediments, by heavy metals.

First, we have estimated the major interferences of the various cations present in sediment, during the atomic absorption analysis of heavy metals.

The determination of heavy metals in various samples of the sediment has permitted to better estimate the nature, evolution and behaviour of the wastes. This in turn led us to appreciate the potential hazards of these sediments for the environment.

More over, the influence of various characteristics of the sediment on its heavy metals content has been investigated.

## Résumé

Ce travail s'est intéressé à l'évaluation et suivi du degré de contamination, des sédiments de l'oued Réghaia, par les métaux lourds, traceurs et vecteurs de pollution.

L'étude a d'abord porté sur les principales interférences de cations majeurs constitutifs du sédiment sur le dosage des métaux lourds, par absorption atomique. Celle-ci s'est poursuivie par la localisation des teneurs métalliques. Ceci a permis d'une part, de suivre l'évolution des rejets, et de définir leur comportement et d'autre part, de prévoir les risques de pollutions potentielles créés par le sédiment. Par ailleurs, l'influence des différents paramètres caractéristiques du sédiment sur les teneurs en métaux lourds, a été précisée.

\* Ce travail fait partie de la thèse de Magister soutenue le 26 Mai 1992

## INTRODUCTION

Les contrôles périodiques des teneurs en métaux toxiques ou indésirables, dans le milieu aquatique, deviennent une nécessité, eu égard aux risques croissants de pollution des cours d'eau.

L'analyse des métaux lourds dans l'eau et par conséquent, l'évaluation de la pollution s'avèrent peu probants. En effet, des fluctuations importantes peuvent être enregistrées, en raison des déversements incontrôlés et de sources diverses. Ajoutons à cela, le fait que les prélèvements sont souvent effectués de manière aléatoire et qu'il existe des risques de contamination. Par contre, le dosage de ces métaux dans les sédiments, offre de plus larges possibilités, quant à leur détection et au suivi de ce type de pollution. En effet, cette détection nécessite une comparaison avec des états de référence et/ou des échantillons de sédiments profonds provenant de la même zone d'étude et correspondant à l'ère pré-industrielle.

Aussi, la présente étude s'est intéressée au dosage des métaux dans les sédiments totaux de l'oued Réghaïa, opération préalable à toute évaluation dans la dite zone. Elle permettra probablement de:

- localiser les zones de rejets, déterminer leur impact et suivre leur évolution; les couches de sédiments superposés reflétant l'histoire de ses dépôts et des métaux qui leur ont été associés.

- contribuer à la réalisation de la carte géochimique de la région, à partir de la détermination des teneurs métalliques naturelles.

Par ailleurs, la charge métallique, d'origine naturelle (érosion, lessivage du bassin versant) ou due à l'activité humaine (retombées atmosphériques, rejets divers), peut avoir des possibilités de remobilisation. Aussi, dans ce contexte, en plus de l'analyse totale indispensable au départ de toute recherche de pollution, l'analyse fractionnée des diverses phases adsorbées et résiduelles a été menée. En effet, dans les conditions naturelles, ce sont les fractions solubilisables qui sont surtout à redouter.

Enfin l'étude des sédiments pourra fortement améliorer notre connaissance des problèmes de la pollution par les métaux. Toutefois, elle ne permet pas de répondre à toutes les questions posées; les teneurs en éléments métalliques mesurées sur les sédiments étant rarement comparables entre elles.

En effet, elles varient souvent pour un même flux de pollution, en fonction des caractéristiques du sédiment notamment la granulométrie, la matière organique et la nature minéralogique.

## I- DESCRIPTION DU SITE ET METHODOLOGIE D'ANALYSE

L'oued Réghaïa est un petit cours d'eau situé dans la commune du même nom, il prend sa source de la nappe phréatique de la plaine de la Mitidja et est alimenté par cinq oueds: oued Biar, oued Aine, oued Moussa, oued Bouroba et oued Sapinière. Il traverse, dans une vallée assez encaissée, les collines Sahéliennes de Réghaïa, pour aller se jeter dans le lac de Réghaïa, 6 400 m plus loin. L'oued se déploie sur une largeur de 0,4 à 2,5 m et sa profondeur varie de 0,4 à 3,0 m [1]. Le cours inférieur de l'oued se caractérise, au-delà du pont de la RN24, par des zones marécageuses s'étendant de part et d'autre de l'estuaire de l'oued.

L'oued reçoit depuis relativement peu de temps, les effluents à forte charge de la zone industrielle et ceux, non identifiés, des entreprises industrielles et des ouvrages communautaires, situés sur le bassin versant ou le long des cours d'eau tributaires.

### I-1- SITUATION DES POINTS DE PRELEVEMENTS

Les prélèvements ont été positionnés de manière à appréhender tant, les apports endogènes en amont que, ceux exogènes situés sur le bassin versant, à partir du collecteur principal de la RN5. Pour cela, nous avons effectué douze prélèvements dont cinq, par carottage (1,2,3,4 et5) et le reste à la benne. Les carottes non remaniées ont été découpées en tranches épaisses de 2 cm jusqu'à 10cm, de 5 cm jusqu'à 30 cm puis de 10 cm jusqu'au fond de la carotte. Dans le cas des prélèvements à la benne, seuls les dix premiers centimètres ont été récupérés, en éliminant les parties de sédiments restées au contact des mâchoires.

Les divers points de prélèvements sont représentés sur la figure-1.

Légende:

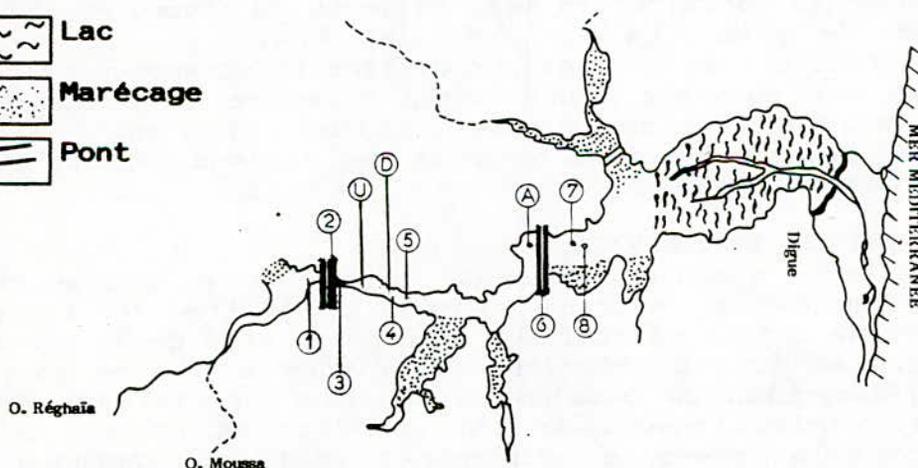
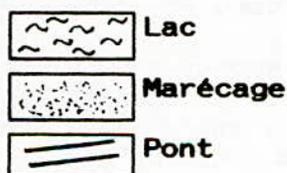


Figure-1: Situation des points de prélèvements dans l'oued Réghaïa

Ces différents points de prélèvements se répartissent, par rapport au collecteur principal P situé au niveau du pont de la RN5 et considéré comme côté de référence 0m, comme suit:

point 1- à 100m en amont de P,

points 2 et 2'- à 50m en aval de P,

point 3- en aval du 1er collecteur urbain U1, à 350m en aval de P,

point U- au niveau du 2ème collecteur urbain, à 519m en aval de P,

point D- au niveau du 3ème collecteur urbain, à 901m en aval de P,

point 4- à 1075m en aval de P,

point 5- à 1175m en aval de P,  
point A- à 2378m en aval de P,  
point 6- au niveau du pont de la RN24, à 2475m en aval de P,  
points 7 et 8- en amont du lac et à 3308m et 3412m en aval de P,

## I-2 METHODOLOGIE D'ANALYSE

Dans le cadre de cette étude, nous avons déterminé, pour les points de prélèvement 1, 3 et 5, et sur chaque tranche de carotte de sédiments:

-la granulométrie [2], par tamisage jusqu'à 50 $\mu$ m, en phase humide, et par sédimentométrie à l'aide de la pipette de Robinson.

-le carbone organique total (C.O.T.) par oxydation et par pyrolyse [3].

Le dosage des métaux portant sur les fractions inférieures à 630 $\mu$ m séchées et broyées, a été réalisé par absorption atomique et par émission atomique (torche à plasma). Les échantillons précalcinés à 450°C, en présence de nitrate d'ammonium, subissent alors une minéralisation totale par attaque chloro-nitrique avant d'être analysés. Quant aux minéralisations sélectives, elles ont été menées sur les phases adsorbée et résiduelle, par la méthode de Meguellati [4].

## II- CONTRIBUTION A L'ETUDE DES INTERFERENCES

Les solutions de sédiments minéralisés, fortement concentrées en acides et en sels minéraux, sont donc sujettes à des interférences de matrice. A ce titre, la connaissance des teneurs en éléments majeurs, plus sensibles aux variations minéralogiques qu'aux apports exogènes, est indispensable, lors de l'interprétation des résultats de dosage. Aussi, présentons-nous l'étude systématique des interférences provoquées par les éléments majeurs, éléments constitutifs des sédiments de l'oued Réghaïa, en l'occurrence Fe<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> et Al<sup>3+</sup>. Plusieurs séries d'essais menés sur différentes tranches et coupes de carottes ont consisté d'une part, à mettre en évidence les effets de matrice liés aux éléments majeurs et d'autre part, à observer les principales interférences des cations majeurs sur le dosage des métaux toxiques.

### II-1- EFFETS DE MATRICE

Une solution exempte d'éléments majeurs n'est pas sujette à des interférences de matrice, comme l'illustre le tableau-I représentant le dosage relatif aux tranches 3 et 6 de la carotte 2 de surface. Les écarts observés, inférieurs à 5%, ne sont pas élevés à l'exception du cadmium où l'erreur atteint les 25% en raison des faibles teneurs de l'échantillon en Cd.

Par contre, la présence d'éléments majeurs engendre des inhibitions importantes et variables, selon le métal étudié. Les effets de matrice dépendent à priori de la composition de la solution de sédiment analysé.

### II-2- PRINCIPALES INTERFERENCES DES ELEMENTS MAJEURS SUR LE DOSAGE DES METAUX LOURDS

Au cours d'essais basés sur l'addition individuelle d'éléments majeurs à des doses croissantes, à des solutions synthétiques et de sédiments, notre but était d'une part, de définir l'effet d'interférence de chacun d'eux sur le dosage des métaux potentiellement toxiques et d'autre part, d'en évaluer l'effet global.

Tableau-I: Effets de matrice dus aux milieux représentatifs d'échantillons de sédiments.

- milieu Rz-3 exempt d'éléments majeurs

Métaux	Pb	Cu	Ni	Zn	Cd	Ag	Cr
C <sub>t</sub> mg/kg	400	145	85	815	4	21	1280
C <sub>m</sub> mg/kg	390	143	81	801	3	20	1279
Δ %	-3	-1	-5	-2	-25	-5	0

- milieu Rz-3 minéralisé

Métaux	Pb	Cu	Ni	Zn	Cd	Ag	Cr
C <sub>t</sub> mg/kg	400	145	85	815	4	21	1280
C <sub>m</sub> mg/kg	250	112	38	796	In.	20	966
Δ %	-37	-23	-55	-3	-100	-3	-24

- milieu Rz-6 minéralisé

Métaux	Pb	Cu	Ni	Zn	Cd	Ag	Cr
C <sub>t</sub> mg/kg	500	75	135	280	2	15	500
C <sub>m</sub> mg/kg	313	57	50	193	In.	13	378
Δ %	-37	-24	-63	-31	-100	-13	-24

Légende: C<sub>t</sub>: concentration théorique  
C<sub>m</sub>: concentration mesurée  
Δ<sup>m</sup>: écart  $\Delta = (C_m - C_t) / C_t$

Les variations enregistrées que nous avons résumées dans le tableau-II et sur la figure-2, font apparaître une grande variabilité de comportement des métaux lourds.

Tableau-II: Principales interférences dues aux éléments majeurs.

Eléments majeurs		Fe	Na	Ca	K	Mg	Al	Effet global de la matrice
M	Pb	+	--	-	-	0	-	--
	Cu	--	-	*-	*-	*-	*-	--
T	Ni	+	*+	*-	*-	*-	-	+
A	Cd	--	--	--	--	--	--	--
U	Cr	-	*+	-	-	0	-	--
X	Ag	--	+	+	+	++	0	++

Légende 0 : Aucune interférence  
+/- : Exaltation /Inhibition, de 5 à 20%  
+/-/--: Exaltation /Inhibition, supérieure à 20%  
\* : Exaltation ou inhibition inférieure à 5%

L'élément interférant peut tout aussi bien engendrer des écarts négatifs, nuls ou positifs sur les résultats de dosage, selon que l'on considère tel métal ou tel autre.

- 1 ..... Al
- 2 ..... Ca
- 3 ..... Fe
- 4 ..... Pb
- 5 ..... Mg
- 6 ..... Ni

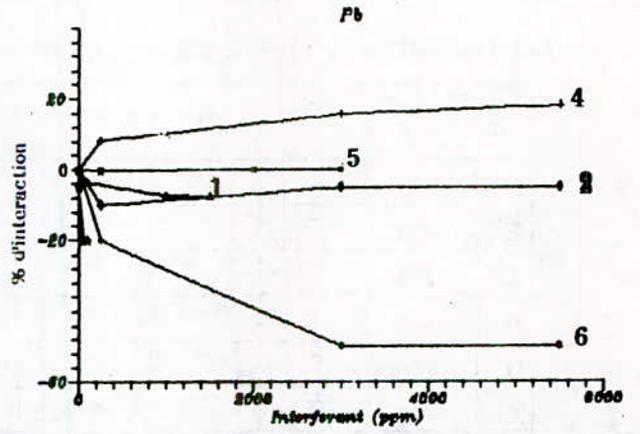
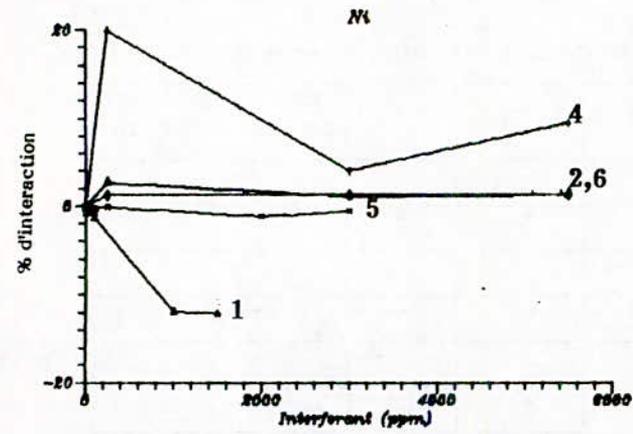
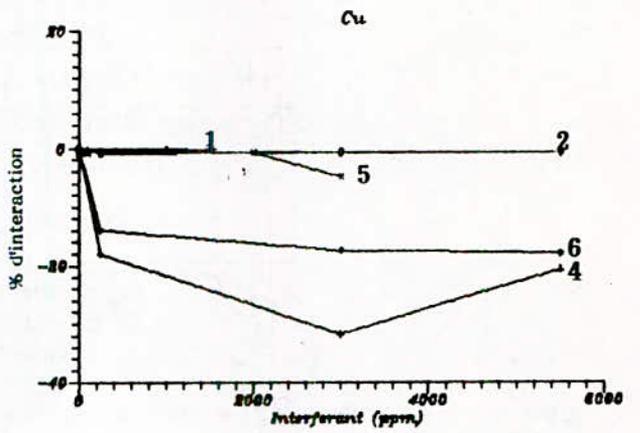
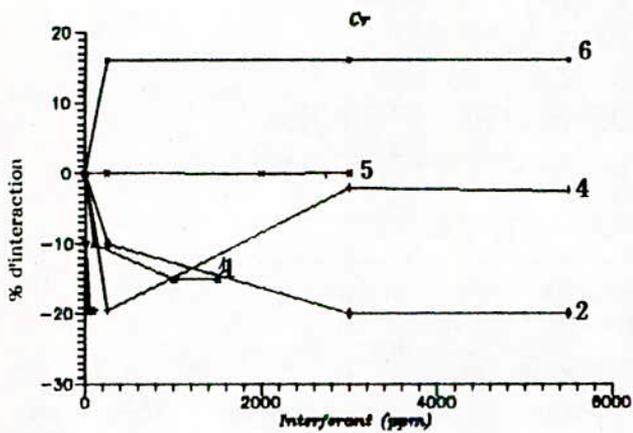
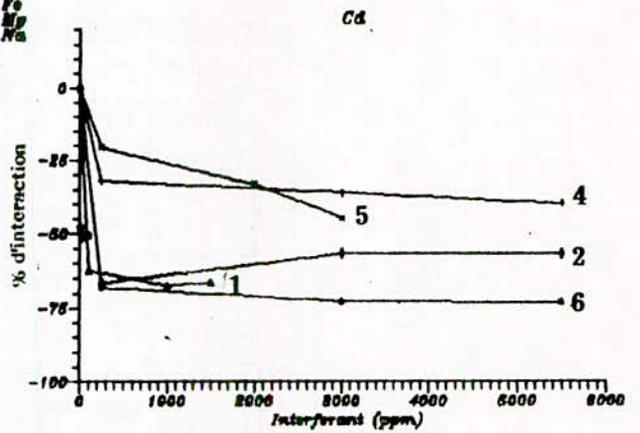
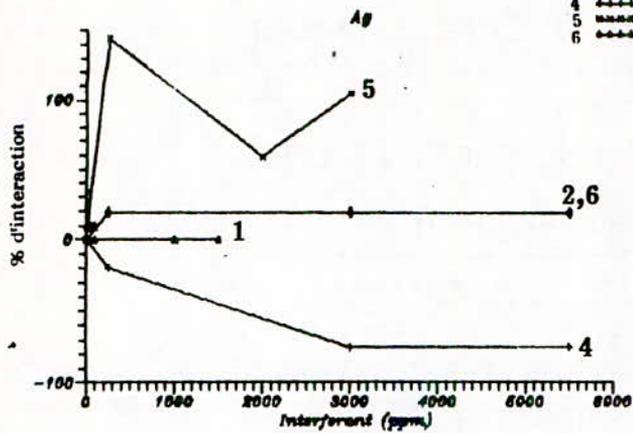


Figure-2: Interférences d'éléments majeurs sur le dosage des métaux lourds de solutions synthétiques

Malgré quelques contradictions avec les observations faites par Pinta, Montiel et Legret [5,6 et 7], les résultats obtenus confirment que certaines interférences demeurent importantes. Certains écarts tendent à se stabiliser au-delà d'une concentration seuil qui varie suivant le métal étudié. D'autre part, l'effet global des interactions des cations majeurs diminue l'absorption de l'ensemble des métaux toxiques, à l'exception du nickel et de l'argent.

### II-3- Application et influence de la composition du milieu

Le problème majeur rencontré, lors de cette étude, est la très grande diversité des solutions de sédiments, liée à la nature chimique et minéralogique des composés métalliques. Nous avons tenté à partir de deux solutions de sédiments prélevés au point 2, de comparer les variations enregistrées, exprimées en pourcentage d'interaction, qui accompagnent l'introduction d'un élément majeur. Les principales observations issues des résultats de l'analyse sont reportées dans le tableau-III.

Tableau-III: Evaluation des interactions que produit l'addition d'éléments majeurs aux sédiments minéralisés du point 2.

Eléments majeurs	Fe		Na		Ca		K		Mg		Al		Effet global de matrice				
	s	σ	s	σ	s	σ	s	σ	s	σ	s	σ	s	σ			
M E T A U X	Pb	-	-	--	--	+	+	--	--	+	+	*+	*+	--	--		
	Cu	--	--	*-	*-	*+	*-	0	*-	0	*-	*-	*-	*-	--	--	
	Ni	-	-	+	+	+	+	*+	0	*-	*-	--	-	-	-	*-	
	Zn	-	--	++	++	++	++	+	++	++	++	*-	*-	++	++	++	++
	Cd	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	++	++	--	--	--	--
	Cr	-	--	+	+	-	-	-	-	*-	0	-	-	-	-	--	--
	Ag	--	--	++	++	++	++	+	++	++	++	0	0	++	++	++	++

Il est intéressant de noter que pour des sédiments différents, les comportements demeurent sensiblement identiques. La seule différence notable réside dans l'interaction de l'aluminium sur le cadmium. En effet,

- le fer réduit l'absorption de tous les métaux étudiés;
- le sodium inhibe le plomb, le cadmium; il réduit légèrement l'absorption du cuivre et majore l'absorption du chrome, du nickel, de l'argent et du zinc;
- le calcium ne possède aucune action sur le cuivre; les concentrations de zinc, d'argent, de plomb et de nickel sont majorées, ce qui n'est pas le cas du cadmium et du chrome;
- le potassium inhibe le cadmium, le plomb et le chrome. Il n'a pas d'effet sur le nickel et le cuivre, mais exalte l'argent et le zinc;
- le magnésium n'a pas d'effet sur le chrome, le cuivre et le nickel; cependant il exalte le zinc, l'argent et le plomb, et inhibe le cadmium;
- l'aluminium diminue modérément l'absorption du chrome et du nickel. Il n'a pratiquement, sinon pas, d'action sur l'argent, le zinc, le cuivre et le plomb, mais exalte considérablement le cadmium.

D'autre part, l'effet global de matrice similaire pour les deux solutions, diminue fréquemment l'absorption des métaux tels que Pb, Cu, Cd, Cr et augmente

considérablement l'absorption du zinc et de l'argent. Notons également que l'analyse des résultats des phénomènes d'interférence, obtenus sur des solutions synthétiques et de sédiments révèle beaucoup de différences. Ceci semble provenir de la différence d'absorption d'un même élément, lorsque ce dernier est dans un milieu "simple" ou un milieu "complexe". En effet, les éléments interférants sont tous plus ou moins sensibles aux interactions des éléments constitutifs du sédiment notamment, les cations majeurs.

Ceci a été particulièrement mis en évidence par des séries d'essais effectués par des permutations circulaires, d'addition d'éléments majeurs. A titre indicatif, il faut remarquer que:

- l'absorption du nickel varie peu;
- l'effet d'inhibition du sodium sur le plomb est tout à fait comparable à celui du potassium, mais encore plus accentué;
- le magnésium majore considérablement la concentration de l'argent, mais en présence d'autres cations majeurs, l'absorption de l'argent diminue dans l'ordre suivant Na, Ca et K.
- le potassium réduit l'absorption du chrome (20% par excès) mais la présence de calcium supprime totalement cet effet.

Tout au plus, nous retiendrons que les interférences diminuent très souvent l'absorption des métaux, à l'exception de celle de l'argent qui par contre, est exaltée. On assiste à une superposition d'effets opposés qui laisse donc penser à une compétition de ces effets d'interférences dans certaines situations, et à une addition, dans d'autres. Les teneurs métalliques déterminées par absorption atomique, à l'exception du zinc, seront évaluées par défaut.

### III- COMPORTEMENT DES METAUX DANS L'OUED

Cette étape devrait nous permettre d'apprécier le degré de pollution métallique de l'oued et de suivre tant son évolution au cours du temps, par la connaissance des profils verticaux, que son évolution longitudinale, en tenant compte des teneurs naturelles.

#### III-1- EVOLUTION AU COURS DU TEMPS

Sur la figure-3, nous avons reporté les profils verticaux en métaux associées aux sédiments, des points de prélèvement respectifs 1, 3 et 5.

Un premier examen de ces profils verticaux montre que le point de prélèvement 1 peut être considéré comme le niveau zéro de pollution, eu égard aux faibles teneurs métalliques rencontrées.

En outre, nous remarquons que les teneurs métalliques dans les sédiments de surface sont très élevées et ce, quel que soit le métal étudié. Par ailleurs, il est à noter que les profils métalliques au niveau de chaque point de prélèvement, présentent tous la même allure générale, à l'exception de celui du manganèse. En effet, son profil se singularise par des pics très marqués, dans le cas de la carotte 3.

Toujours à propos de ces profils, les remarques suivantes peuvent être portées:

-Les taux de pollution sont très variables, depuis des pollutions faibles d'origine non localisée en amont du collecteur principal P, jusqu'à des situations dramatiques d'origine parfaitement connue et localisée, générées par la zone

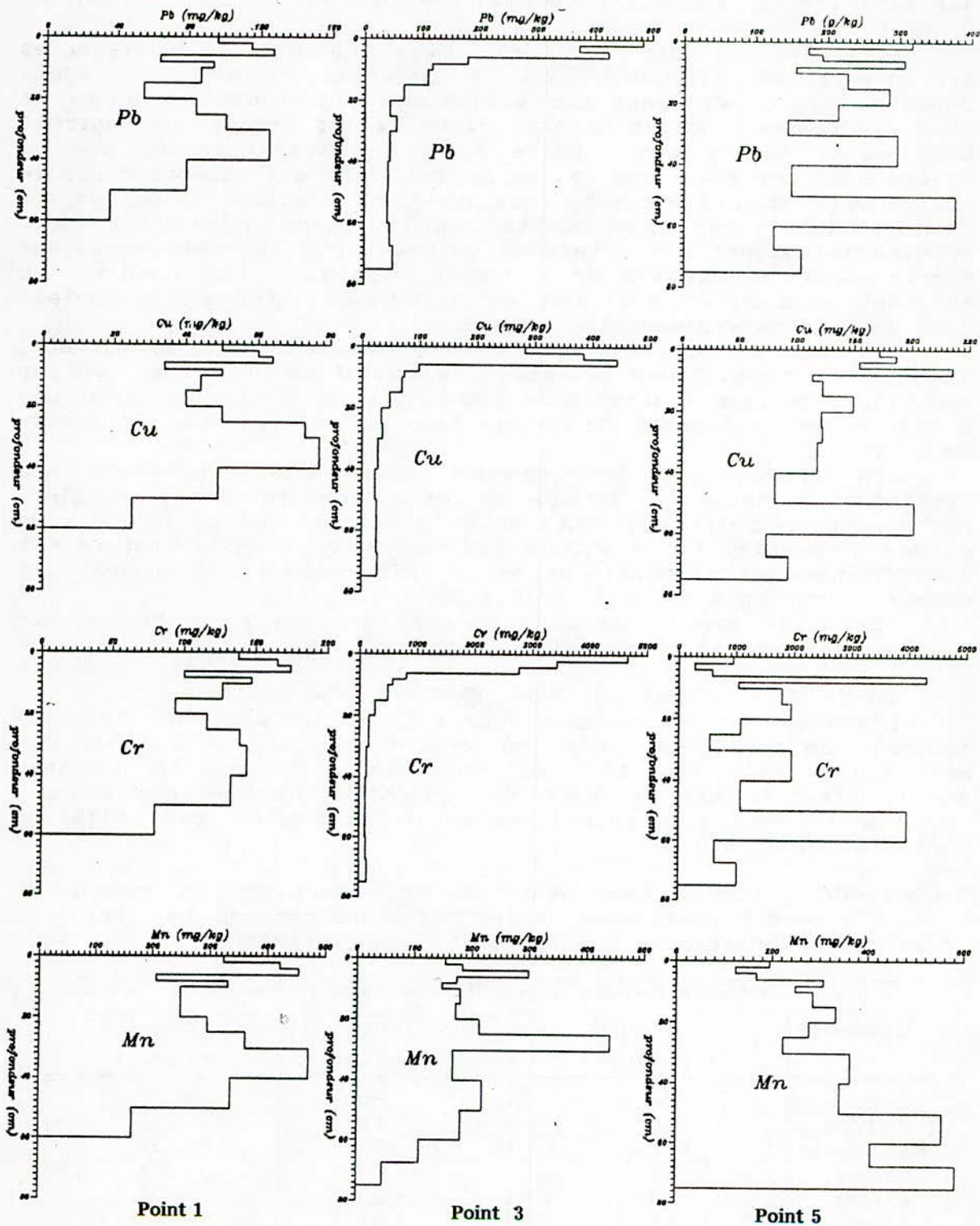


Figure 3 : Profils verticaux en métaux associés aux sédiments des points de prélèvement 1, 3, 5.

industrielle et les bassins versants situés en aval du collecteur principal.

-L'évolution des teneurs métalliques, à différentes profondeurs correspondant donc à diverses époques de rejets déposés, met en évidence des variations significatives entre le fond et le sommet de la carotte 3. De telles variations montrent bien qu'il existe des apports récents comparativement à ceux naturels observés au fond de la carotte. Ce n'est cependant pas le cas au point de prélèvement 5, ce qui est d'autant plus grave. Pour tenter d'expliquer cette contradiction apparente, deux hypothèses peuvent être avancées. D'une part, les métaux peuvent migrer dans la colonne de sédiment déposé et de l'autre, ce sédiment peut avoir subi des perturbations intenses de surface donc un taux de sédimentation élevé.

-Il apparaît clairement que pour les sédiments de surface, les teneurs métalliques reflètent la pollution actuelle. Pour un même flux, cette pollution sera d'autant plus importante qu'il n'y a pas de renouvellement ou de dilution du sédiment par le bassin versant.

-En profondeur, les teneurs métalliques reflètent une contamination naturelle lorsque celles-ci sont faibles et stables. Par contre un profil en dents de scie traduit une pollution plus ou moins récente. En effet, le sédiment plus ou moins saturé est très fréquemment renouvelé et de ce fait, mémorise à nouveau les métaux lourds et s'enrichit en M.E.S.

-Enfin il semblerait exister une tendance à la baisse des rejets de cuivre et de nickel.

### III-2- DETERMINATION DES TENEURS NATURELLES

L'évaluation des métaux lourds dans le sédiment présente souvent, un caractère global où sont dosés tout à la fois, des métaux d'origine naturelle et ceux dus à l'activité humaine. Aussi, n'est-il pas étonnant de rencontrer parfois des teneurs importantes sans pour autant parler de pollution, car celles-ci sont d'origine naturelle.

Tableau-IV: Comparaison des teneurs naturelles en métaux de l'oued Réghaïa avec celles des standards mondiaux [8].

\* selon Martin et coll., 1979 et \*\* selon Turekian et coll., 1961

Eléments	Teneurs naturelles de l'oued (mg/kg)	Standards mondiaux des roches	
		argileuses *	totales **
		(mg/kg)	(mg/kg)
Chrome	94	90	71
Cuivre	24	45	32
Manganèse	177	850	720
Nickel	64	68	49
Plomb	38	20	16
Zinc	81	95	127

Les teneurs naturelles ont été déterminées à partir des couches profondes des carottes 1 et 3. Par contre, n'ayant pas atteint le substrat argileux, la carotte 5 n'a pu servir à cette détermination. Dans le cas de l'oued Réghaïa, les teneurs naturelles estimées ont été reportées dans le tableau-IV, où sont indiqués, également, les standards mondiaux des roches argileuses et totales.

A l'examen de ce tableau, il nous est apparu préférable, en toute rigueur, de comparer les taux de polluants dans un sédiment à ceux du même sédiment "non pollué" du bassin versant considéré, plutôt qu'à un standard mondial.

Ainsi, les quantités de métaux provenant de l'activité humaine peuvent être estimées par simple différence. Par ailleurs, l'évaluation du degré de contamination d'un sédiment peut se faire à l'aide d'un facteur de contamination F exprimé par le rapport teneurs en surface/standard régional.

Aussi, dans le tableau-V, avons-nous reporté les valeurs de F observées pour chacun des métaux lourds en considérant, comme standard régional, nos valeurs de teneurs naturelles.

Tableau-V: Facteurs de contamination F des sédiments de l'oued Réghaïa par comparaison avec les teneurs naturelles régionales.

Teneurs mg/kg Eléments	Naturelle	Valeur max.	F	Valeur max.	F	Valeur max.	F	Valeur max.	F
		Aval / 1		Aval / 3		Aval / 5		Aval / 6	
Cr	94	165	1,76	4650	49,5	4302	45,7	3737	397
Cu	24	77	3,20	442	18,4	235	9,8	182	75
Mn	177	471	2,66	440	2,5	584	3,3	164	0,9
Ni	64	91	1,40	308	4,8	163	2,5	128	2
Pb	38	127	3,30	483	12,7	377	9,9	265	7
Zn	81	249	3,10	7245	89,4	3303	40,8	5489	677

L'examen de ce tableau montre la contamination excessive des sédiments par certains métaux tels le zinc et le chrome, et à un degré moindre par le cuivre et le plomb. En effet, dans le cas du chrome par exemple, nous constatons pour les couches de surface un facteur de contamination variant entre 40 et 50. Il en est de même pour le zinc où les couches de surface peuvent atteindre des facteurs voisins de 90. Il est donc évident qu'il existe là une très forte pollution qu'il est grand temps de réduire ou d'enrayer.

### III-3- EVOLUTION LONGITUDINALE

Le but principal de cette étude est de voir d'une part, la zone d'impact des rejets de la ville de Réghaïa à prédominance industrielle et d'autre part, s'il existe de nouveaux rejets suffisamment importants pour altérer davantage la qualité du milieu.

A cet effet, nous avons déterminé les teneurs métalliques retenues dans la vase. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau-VI et reportés sur la figure-4 (a et b).

Nous constatons ainsi que l'oued Réghaïa est fortement pollué dans sa portion comprise entre le collecteur principal P et l'entrée du lac, portion d'une distance de plus de 3 km. De plus, soumis à des influences diverses, il accuse des points d'accumulation de pollution.

Les dépôts métalliques augmentent fortement après le collecteur principal, puis diminuent, avant de croître de nouveau en aval des collecteurs urbains.

Tableau-VI: Profil longitudinal des teneurs en métaux lourds dans la vase de l'oued Réghaïa

Point de prélèvement	1	2	3	U	D	4	5	A	6	7	8
Elément											
Cr	145	2970	2443	6052	3204	1630	2724	4984	3737	676	356
Cu	51	148	256	160	135	173	146	165	182	65	115
Ni	80	131	186	/	/	123	104	/	127	/	/
Pb	88	308	315	244	378	263	290	311	265	110	110
Zn	180	1620	2490	1379	1202	1344	3191	6363	5489	530	742

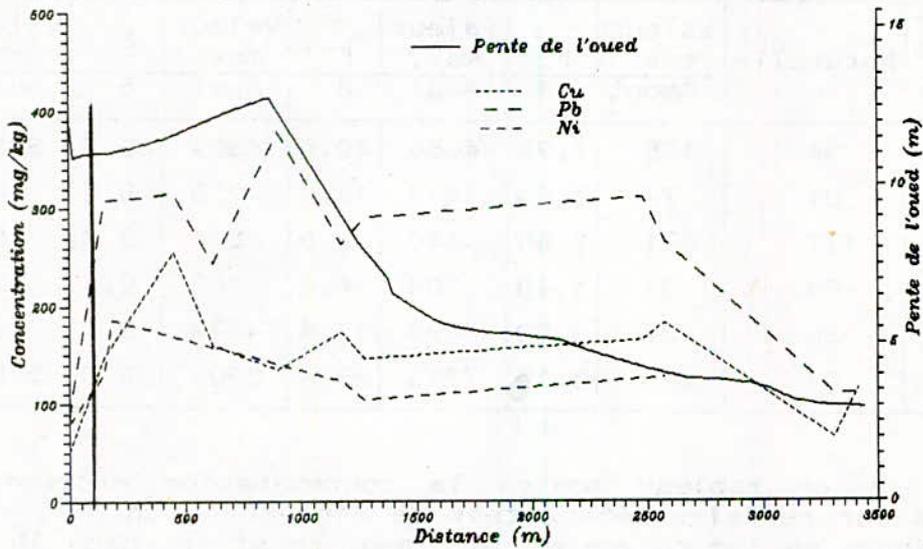


Figure-4a Evolution longitudinale des teneurs en cuivre, nickel et plomb dans l'oued Réghaïa

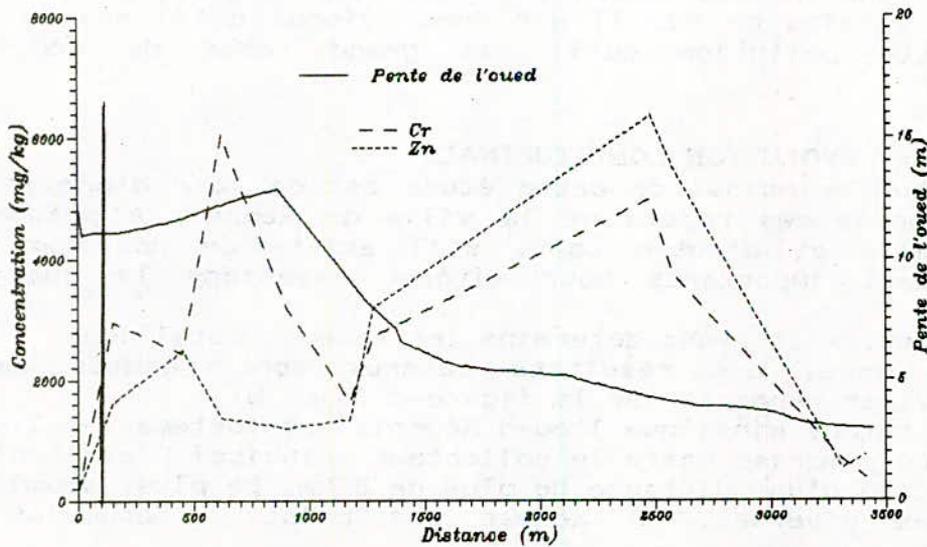


Figure-4b Evolution longitudinale des teneurs en chrome et zinc dans l'oued Réghaïa

Toutefois, il est difficile d'admettre que des variations telles que celles observées pour le plomb entre le premier et le troisième collecteur urbain distants d'environ 550 m, et pour le chrome de part et d'autre du deuxième collecteur urbain, soit sur une distance comprise entre 455 et 625 m, soient représentatives d'un phénomène réel.

Par ailleurs, il semble exister une tendance à la baisse des dépôts métalliques, à l'entrée du lac de Réghaïa, due probablement aux faibles pentes du lit de l'oued et aux rejets urbains. En effet, l'hydrodynamique de l'oued très faible et constante, ainsi que la présence de rejets à caractère urbain en aval du collecteur principal, laissent déjà prévoir une zone d'impact relativement limitée avec ce maximum de dépôts et cet effet de dilution élevé.

#### IV- CONTAMINATION DES EAUX DE SURFACE PAR UN SEDIMENT POLLUE

Quelle que soit son origine naturelle ou anthropogène, le stock métallique associé au sédiment peut avoir une possibilité de remobilisation en relation avec d'éventuelles modifications mécaniques, physico-chimiques ou biochimiques du milieu, et par voie de conséquence, créer un risque de pollution potentielle du milieu aqueux.

A cet effet, et pour une meilleure estimation de la charge polluante que véhiculent les différents rejets ou apports anthropogènes, nous avons appliqué le schéma de minéralisations sélectives, à quelques échantillons de sédiments de l'oued Réghaïa. Nous nous sommes limités à évaluer d'une part, le relargage potentiel des métaux, lié au phénomène de désorption et d'autre part, la charge métallique résiduelle associée à la phase silicatée.

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau-VII où sont reportées également les quantités totales précédemment déterminées.

Au niveau des métaux échangeables, nous observons une nette différence entre les valeurs obtenues de part et d'autre du collecteur principal P. Ainsi, en amont du collecteur principal, dans les tranches de surface, les quantités de cuivre, de chrome, de nickel, de zinc et de plomb sous forme échangeable sont insignifiantes, par contre, au-delà, elles deviennent considérables suite aux nombreux apports anthropogènes.

Aussi, y-a-t-il lieu de noter que des pourcentages élevés en métaux échangeables liés à la phase adsorbée, peuvent engendrer des modifications significatives des nouvelles couches de sédiment et du milieu aqueux. En effet, comme nous le verrons par ailleurs, ces métaux intimement liés à la matière organique, peuvent provoquer un relargage potentiel global d'autant plus important que la désorption et la destruction des complexes organo-métalliques, sont importantes.

S'agissant des teneurs métalliques résiduelles, nous remarquons tout d'abord, qu'elles sont sensiblement constantes dans les sédiments profonds, avoisinant parfois même le standard régional, par contre celles-ci augmentent dans les couches de surface et ce, indépendamment des facteurs d'enrichissement.

Ces augmentations peuvent provenir à priori d'une attaque insuffisante, lors des quatre premières phases de la minéralisation sélective. En effet, si les apports métalliques sont en quantité importante, une infime partie de ces derniers n'étant pas attaquée, constituerait une quantité de métal non négligeable à additionner à celle de la phase silicatée. Prenons l'exemple du cuivre dans la tranche 3 de l'échantillon 3. En admettant que sa teneur résiduelle soit celle du standard (20mg/kg), la valeur

trouvée de 38 mg/kg signifierait que 18mg/kg, soit 4,3% des quatre autres phases de la minéralisation, n'ont pas été attaqués.

Tableau-VII: Résultats de dosage des métaux lourds associés aux sédiments de l'oued Réghafa et liés aux phases adsorbée et silicatée.

Métal	Echantillons							Teneur (*) moy.	Standard (**) (**)	
	R1-8	R1-12	R2-1	R3-8	R3-12	R5-8	R5-12			
CHROME	Total (mg/kg)	138	80	1390	2763	108	578	3959	95	94
	(mg/kg)	91	73	127	103	89	93	86		
	Résiduel %	65,9	91,3	9,1	3,7	82,4	16,1	2,2		
	(mg/kg)	5	In.	278	453	3	120	946	29	24
	Adsorbé %	3,6	0	20,0	16,4	2,8	20,8	23,9		
CUIVRE	Total (mg/kg)	50	25	205	442	26	154	202	61	64
	(mg/kg)	29	20	30	38	20	36	31		
	Résiduel %	58,0	80,0	14,6	8,6	76,9	23,4	15,3		
NIQUEL	(mg/kg)	1	In.	49	11	In.	32	54	36	38
	Adsorbé %	2,0	0	23,9	26,2	0	20,8	26,7		
PLOMB	Total (mg/kg)	89	59	153	308	71	95	163	63	81
	(mg/kg)	62	58	58	69	59	64	58		
	Résiduel %	69,7	98,3	37,9	22,4	83,1	67,4	35,6		
	(mg/kg)	4	In.	42	75	In.	12	44	7,3	0
	Adsorbé %	4,5	0	27,5	24,4	0	12,6	27,0		
ZINC	Total (mg/kg)	127	36	474	423	40	192	377	4,5	23,0
	(mg/kg)	41	29	31	28	28	54	41		
	Résiduel %	32,3	80,6	6,5	6,6	70,0	28,1	10,9		
	(mg/kg)	10	1	185	162	12	55	150	23,5	23,5
	Adsorbé %	7,9	3,4	39,0	38,3	30,0	28,6	39,8		
ZINC	Total (mg/kg)	247	64	1244	2041	110	744	2340	63	81
	(mg/kg)	63	58	67	64	57	59	74		
	Résiduel %	25,5	90,6	5,4	3,1	51,8	7,9	3,2		
	(mg/kg)	18	In.	279	451	5	171	550	7,3	0
	Adsorbé %	7,3	0	22,4	22,1	4,5	23,0	23,5		

\*: Teneur moyenne associée à la phase silicatée;

\*\* : Standard régional déterminé précédemment dans le cas de l'oued Réghafa

Il n'est malheureusement pas possible d'en dire autant lorsque ces apports métalliques sont moins importants. En effet, ce serait alors une quantité importante des quatre premières phases qui n'aurait pas été attaquée. Ces quantités peuvent atteindre jusqu'à 30% dans le cas du cuivre dans la tranche 3 de l'échantillon 1. Si ce point est vérifié, ce serait une critique fondamentale au schéma de minéralisations sélectives préconisé par Meguellati [4]. En outre, de telles augmentations observées peuvent être également reliées à des différences relatives à la texture du sédiment. Même si cela semble peu probable, il ne nous est pas possible de négliger cette hypothèse, en l'absence de données minéralogiques.

Au vu de ces résultats, nous pourrions admettre pour la suite

de notre étude, que les rejets humains ne se localisent pas dans la phase silicatée. Aussi, pouvons-nous, dans ces conditions, évaluer les apports métalliques anthropogènes en retranchant la teneur totale observée. A cet effet, nous avons regroupé dans le tableau-VIII, les apports anthropogènes relatifs à quelques métaux, tout en indiquant le pourcentage de chacun d'eux associé à la phase adsorbée et susceptible de repasser en solution.

Tableau-VIII: Apports métalliques "anthropogènes" et sous forme adsorbée dans l'oued de Réghaïa.

Echantillon		R <sub>1-3</sub>	R <sub>2-1</sub>	R <sub>3-3</sub>	R <sub>5-3</sub>	R <sub>5-12</sub>	% moyen d'adsorption *
Cr	Anthropogène (mg/kg)	57	1309	2682	497	3878	22
	(mg/kg)	5	278	453	120	946	
	Adsorbé %	8,8	21,2	16,9	24,1	24,4	
Cu	Anthropogène (mg/kg)	30	185	422	134	182	27
	(mg/kg)	1	49	116	32	54	
	Adsorbé %	3,3	26,	27,5	23,9	29,7	
Ni	Anthropogène (mg/kg)	31	95	250	37	105	37
	(mg/kg)	4	42	75	12	44	
	Adsorbé %	12,9	44,2	30,0	32,4	41,9	
Pb	Anthropogène (mg/kg)	99	446	395	164	349	40
	(mg/kg)	10	185	162	55	150	
	Adsorbé %	10,1	41,5	41,0	33,5	43,0	
Zn	Anthropogène (mg/kg)	189	1186	1983	686	2282	24
	(mg/kg)	18	279	451	171	550	
	Adsorbé %	9,5	23,5	22,7	24,9	24,1	

\* : à l'exception du point 1.

A l'aide de ce tableau-VIII, nous pouvons donc prévoir, en fonction des modifications physico-chimiques (pH, T, fermentation,...) qui interviendraient sur le site, les éléments métalliques susceptibles de repasser en milieu aqueux. C'est ainsi que dans nos conditions d'essais, les métaux susceptibles préférentiellement de repasser en solution, se présentent dans l'ordre suivant: Pb, Ni, Cu, Zn et Cr; cet ordre pouvant être modifié.

Pb > Ni >> Cu > Zn > Cr  
40% 37% 27% 24% 22%

En conclusion, l'application du schéma de minéralisations sélectives met en évidence une pollution alarmante. Elle permet également d'évaluer le risque maximal de pollution des eaux de surface de Réghaïa, qu'engendrerait une désorption. De ce fait, il est aussi, essentiel d'évaluer la quantité des métaux associés à la matière organique et de déduire le relargage potentiel global des métaux dans l'oued Réghaïa.

Par ailleurs, les teneurs résiduelles déterminées à partir des couches profondes constituent une bonne approche à la détermination des teneurs naturelles. Elles seront toujours évaluées par défaut, en raison de l'exclusion des oxydes, hydroxydes et carbonates d'origine naturelle, comme constatées dans le tableau-IX ci-dessous.

Tableau-IX: Comparaison des teneurs naturelles et résiduelles

Eléments	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Teneurs résiduelles mg/kg	81	20	58	28	58
Teneurs naturelles mg/kg	94	24	64	38	81

#### V- DISCUSSION DES DONNEES RECUEILLIES

Les teneurs métalliques observées sur le site de Réghaïa, sont de façon générale difficilement comparables entre elles. Aussi dans de pareils cas, il est impossible de tirer une interprétation correcte des résultats sans connaître d'autres paramètres caractéristiques du sédiment, entre autres, la granulométrie et la teneur en matières organiques ou carbone organique total (C.O.T.), principaux paramètres régissant les teneurs métalliques.

Les principaux résultats obtenus en regard des teneurs métalliques et reportés dans le tableau-X suscitent les remarques suivantes. L'on constate:

- de fortes baisses des teneurs métalliques correspondant à des échantillons sableux dont le pourcentage de particules supérieures à 50 µm varie entre 55 et 79%;

- une nette relation entre l'enrichissement métallique et les sédiments relativement fins dont le pourcentage de particules inférieures à 50µm varie entre 54% et 84%. Aussi, nous remarquons, dans le cas des deux échantillons de sédiment R<sub>5-4</sub> et R<sub>a-1</sub> présentant tous deux la même teneur globale (76,4%) en fines (< 50µm), les teneurs varient respectivement de 4302 à 4650 mg/kg pour le chrome, de 235 à 282 mg/kg pour le cuivre, de 133 à 150 mg/kg pour le nickel et de 377 à 483 mg/kg pour le plomb. Cette légère augmentation des teneurs métalliques serait probablement liée à la différence notable des teneurs en C.O.T. et en pourcentage de limon fin.

#### V-1 DETERMINATION DE L'ORIGINE DES METAUX

Pour tenter de cerner l'origine des différents métaux associés aux sédiments de l'oued Réghaïa, nous avons établi des corrélations graphiques et mathématiques reliant les éléments métalliques deux à deux, soit au total dix couples.

L'examen des corrélations graphiques reportées sur la figure-5, met en évidence ce qui suit:

- Une bonne linéarité entre le cuivre et le nickel est observée.

- Hormis les points R<sub>a-2</sub> et R<sub>a-3</sub>, pour lesquels les teneurs métalliques excessives, notamment en nickel, reflètent une pollution intense accidentelle, l'allure des variations inter-métaux est sensiblement linéaire. Toutefois, aux teneurs élevées, la dispersion des points est telle que la linéarité n'est plus respectée. Aussi, les courbes établies ne peuvent être utilisées que dans un domaine restreint de teneurs.

- Une bonne corrélation est également observée entre le plomb et le nickel.

Tableau-X: Résultats des analyses granulométrique, du carbone organique total (C.O.T.) et des teneurs métalliques correspondantes aux différents points de prélèvements.

Echantillon	Granulométrie %				C.O.T %	Métaux (mg/kg)				
	Sable	Limons		Argile		Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		grossier	fin							
R1-1	68,7	11,2	9,9	15,8	9,08	198	50	76	96	181
R1-2	50,2	16,9	15,1	17,8	2,79	165	60	84	115	249
R1-3	49,5	28,6	15,1	17,8	9,17	174	64	89	127	247
R1-4	52,4	30,0	19,1	4,5	2,02	100	84	64	64	108
R1-5	66,7	9,6	10,9	12,8	1,64	147	50	87	94	162
R1-6	65,4	5,2	22,7	6,7	2,21	127	44	80	87	162
R1-7	57,5	2,0	16,1	24,4	1,89	94	40	64	55	80
R1-8	58,8	22,6	6,7	11,9	9,89	116	50	76	84	104
R1-9	49,5	11,0	31,2	8,9	9,19	199	79	91	101	182
R1-10	39,8	34,0	11,9	14,9	4,04	144	77	92	125	209
R1-11	50,1	28,9	10,8	10,2	2,51	199	49	87	79	147
R1-12	77,8	2,9	9,9	10,6	0,80	80	25	59	36	64
R3-1	29,6	45,4	6,0	25,0	16,79	4650	282	150	489	7245
R3-2	92,1	30,9	19,5	24,1	17,78	3425	384	251	372	2161
R3-3	21,2	29,7	36,2	12,9	12,00	2769	442	308	429	2041
R3-4	31,1	30,6	22,5	15,8	9,09	807	98	118	179	597
R3-5	56,6	9,1	9,0	25,9	2,51	568	72	105	117	408
R3-6	55,9	7,8	19,1	29,2	2,07	489	69	119	109	329
R3-7	56,8	10,1	10,5	22,6	1,42	269	48	89	67	178
R3-8	62,9	9,2	7,2	10,7	1,19	159	39	71	44	154
R3-9	52,1	6,0	22,7	19,2	1,09	164	35	84	55	121
R3-10	62,6	6,5	7,6	29,9	0,80	122	28	72	44	90
R3-11	79,5	6,7	11,9	8,5	0,50	106	29	68	41	97
R3-12	75,7	2,9	14,9	6,5	0,57	108	26	71	40	110
R3-13	76,4	1,0	6,8	15,2	0,96	111	26	74	44	97
R3-14	70,9	7,7	14,1	7,9	0,56	132	28	84	49	79
R5-1	26,7	29,0	26,2	18,1	17,90	995	171	105	317	1815
R5-2	78,7	2,9	5,2	19,2	9,09	268	186	89	179	429
R5-3	45,4	19,7	10,4	24,5	9,62	578	154	95	192	744
R5-4	29,6	10,2	41,7	24,5	8,74	4902	295	199	906	3909
R5-5	90,7	40,8	7,9	21,2	4,04	1099	119	109	155	929
R5-6	41,2	29,9	16,0	19,5	5,48	1787	122	109	227	2049
R5-7	39,8	16,7	20,9	22,6	8,79	1959	149	122	285	1968
R5-8	39,1	31,7	19,4	15,8	6,28	1074	121	105	214	870
R5-9	59,2	9,8	19,6	11,4	9,60	595	122	104	144	486
R5-10	45,7	16,9	29,9	19,5	7,08	1959	118	121	296	1080
R5-11	28,9	39,9	21,9	9,9	9,79	1072	81	126	149	682
R5-12	21,7	27,6	30,4	20,9	12,27	3959	202	169	377	2940
R5-13	30,9	37,2	5,8	26,1	2,10	628	74	97	125	516
R5-14	15,8	48,5	15,2	20,5	9,68	1016	99	101	169	509
R6	49,5	24,4	21,9	10,2	14,19	3797	182	128	265	5489

-Dans les cas du chrome-nickel et zinc-nickel, les corrélations en forme de S traduisent un enrichissement plus lent en nickel qu'en chrome et en zinc.

En raison de la quasi linéarité observée et afin de faciliter l'évaluation de la pollution, nous présentons ci-dessous les corrélations mathématiques.

Cr= 1,33 Zn - 55,39	r= 0,94
Cu= 1,80 Ni - 80,03	r= 0,91
Cr= 10,20 Pb - 745,19	r= 0,90
Cu= 0,74 Pb - 13,41	r= 0,89

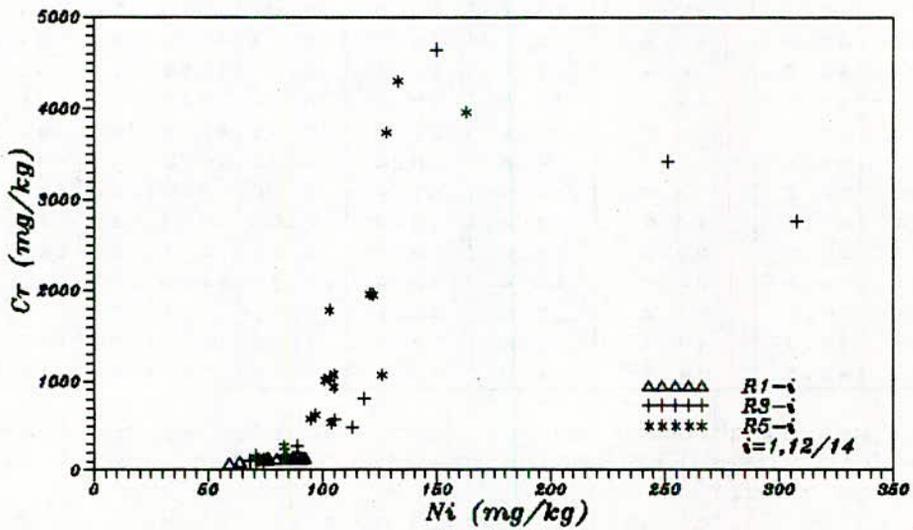
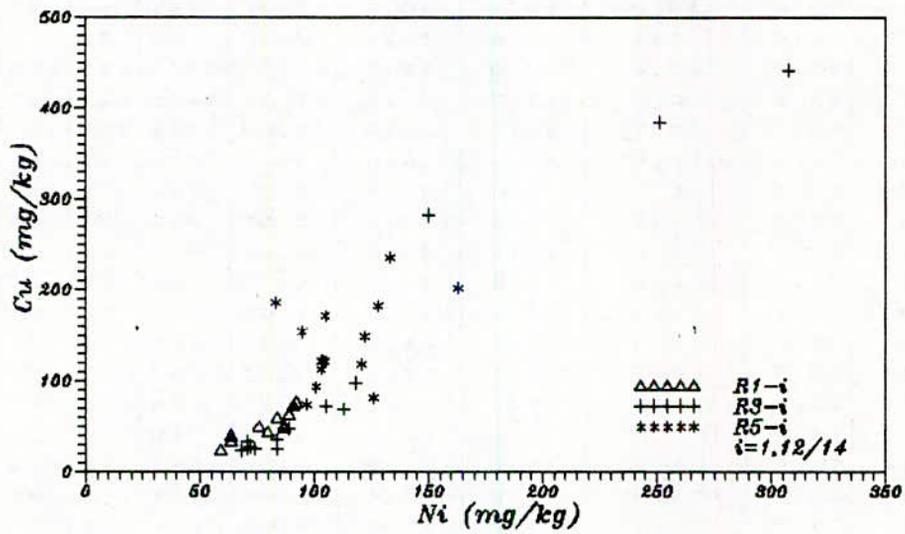
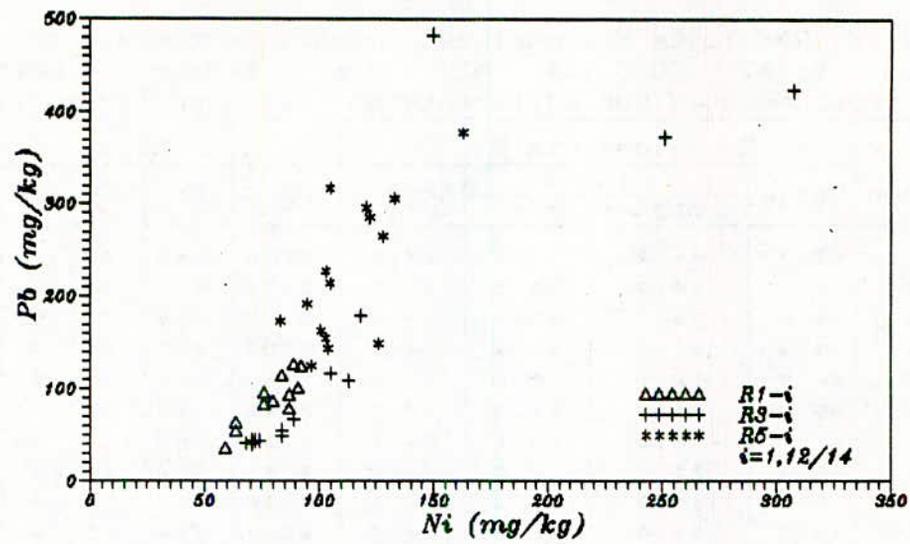


Figure - 5 : Corrélation inter-métaux dans l'Oued Réghaïa

Pb= 0,11 Zn - 84,59	r= 0,89
Cu= 0,09 Zn - 45,79	r= 0,77
Pb= 1,82 Ni - 23,27	r= 0,7
Cr= 18,6 Ni - 990,73	r= 0,70

Ceci semble traduire:

- une origine identique des rejets en cuivre et nickel ainsi qu'en plomb, avec toutefois pour ce dernier, un appauvrissement correspondant aux échantillons Ra-2 et Ra-3;
- une même origine en chrome et zinc avec un enrichissement beaucoup plus rapide que celui du nickel.

Ces observations sont à comparer également à celles que l'on peut faire, à l'aide de corrélations métal-caractéristiques du sédiment. Aussi, nous avons établi les corrélations reliant les métaux lourds aux paramètres mesurés, caractéristiques du sédiment, à savoir granulométrie et C.O.T., que nous avons reportés sur le tableau-XI.

tableau-XI: Comparaison des relations métal-caractéristiques du sédiment (particules < 50µm, C.O.T.)

Elément	Relations avec la granulométrie	Relations avec le C.O.T
Cr	47,2 % < 50µm - 1507,4 r = 0,68	222,2 % C.O.T - 80,9 r = 0,83
Cu	3,2 % < 50µm - 61,8 r = 0,61	16,1 % C.O.T + 26,6 r = 0,84
Ni	1,6 % < 50µm + 22,1 r = 0,61	6,8 % C.O.T + 72,3 r = 0,71
Pb	4,8 % < 50µm - 89,2 r = 0,73	21,8 % C.O.T + 52,9 r = 0,91
Zn	42,0 % < 50µm - 1339,2 r = 0,58	243,5 % C.O.T - 240,8 r = 0,80

Il est intéressant de noter que les métaux sont mieux corrélés avec le paramètre descriptif de la matière organique qu'avec la granulométrie. Ceci implique que la granulométrie n'est que faiblement représentative des composantes des échantillons ayant un fort pouvoir de piégeage des métaux. En revanche, la matière organique évaluée notamment par son C.O.T., possède un pouvoir de rétention nettement supérieur à celui des alumino-silicates ou des fines particules et ce, malgré son faible critère d'inertie vis-à-vis des conditions physico-chimiques du milieu.

Afin d'approfondir la connaissance des relations d'interdépendance, nous avons développé d'autres corrélations mettant en jeu les métaux lourds dosés et les deux paramètres réducteurs en l'occurrence matière organique et particules fines inférieures à 50µm. Ces corrélations sont les suivantes:

Cr=187,94 %C.O.T.+14,71 %<50µm-668,93	r=0,84
Cu=14,83 %C.O.T.+0,59 %<50µm+2,89	r=0,84
Ni=5,21 %C.O.T.+0,68 %<50µm+45,11	r=0,74
Pb=18,24 %C.O.T.+1,55 %<50µm-927	r=0,93
Zn=242,37 %C.O.T.+0,50 %<50µm-0,64	r=0,80

Il faut également noter, qu'en appliquant ce calcul à une granulométrie de particules inférieures à 20µm, nous aboutissons à des coefficients de régression identiques.

Ces résultats montrent la grande similitude des coefficients de régression obtenus à partir des corrélations métal-C.O.T. et celles reliant métal-C.O.T. et fines.

Cette similitude met donc en évidence que la matière organique reste le composant prépondérant vis-à-vis du piègeage des métaux, et que les particules fines créent vraisemblablement des conditions de milieu favorables à la conservation de la matière organique.

D'autre part, il ressort de cette similitude que toutes les particules fines se trouvent étroitement liées à la matière organique pour former des complexes absorbants.

Enfin, nous remarquons que l'introduction du paramètre granulométrique dans la corrélation, n'améliore guère le résultat.

Il apparaît donc que le seul paramètre C.O.T. permet d'évaluer convenablement les teneurs en métaux lourds dans le sédiment.

Ce type d'extrapolation (par détermination du C.O.T. et en fonction des corrélations optimales: métal-C.O.T. et intermétaux), dans le cadre de l'analyse et/ou du contrôle des métaux associés aux sédiments de l'oued Réghaïa, présente un grand intérêt.

## CONCLUSION

Au cours de cette étude, nous avons essayé de montrer l'intérêt que présente le suivi des éléments métalliques associés au sédiments, traceurs et vecteurs de la pollution. Toutefois, il faut remarquer que le problème des interférences est actuellement loin d'être résolu, les résultats étant difficilement comparables entre eux. En effet, pour des rapports interférents /métaux dosés représentatifs de ceux que l'on rencontre habituellement dans les sédiments, des écarts importants sont observés, selon que l'on fait appel à un support artificiel "simple" ou à un substrat réel "complexe". Pour s'affranchir des interférences dues aux éléments majeurs présents dans les sédiments, il y a lieu de multiplier considérablement les essais en vue d'affiner l'analyse par absorption atomique. Les teneurs métalliques ainsi déterminées, à l'exception du zinc, seront évaluées par défaut.

Il en résulte qu'en fonction de la répartition granulométrique et de la matière organique, les sédiments enregistrent de fortes variations des teneurs métalliques, pour un même flux de pollution. Bien qu'il soit généralement admis que la fraction fine est le support privilégié de la pollution, cette remarque ne semble pas aussi évidente dans le cas des composés métalliques.

L'analyse graphique des différentes corrélations permet de comparer les résultats et de mettre en évidence des points particuliers. Par ailleurs, les corrélations établies ont montré que le seul paramètre C.O.T. permet d'évaluer de manière satisfaisante, les teneurs en métaux lourds dans les sédiments de Réghaïa. Aussi, ce type d'extrapolation (par détermination du C.O.T. et en fonction des corrélations optimales: métal-C.O.T. et inter- métaux) peut présenter un grand intérêt.

Le sédiment en piégeant les métaux, épure l'eau de surface. Toutefois, sous certaines conditions naturelles du milieu

(physico-chimiques, hydrodynamiques,...), les métaux non liés à la structure du sédiment peuvent repasser en solution.

Le problème des métaux lourds est fort préoccupant pour l'avenir de l'oued Réghaïa. En effet, leur dissémination dans l'environnement représente un phénomène permanent et leur fixation ne peut jamais être considérée comme totalement définitive. Aussi, il conviendrait probablement d'accentuer les études sur la remobilisation des métaux et le seuil de toxicité directe des sédiments, car il n'existe pas actuellement, à notre connaissance, d'échelle de pollution métallique des sédiments, comme il en existe pour l'eau.

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]- MARAIS DE REGHAIA "PLAN ANTI-POLLUTION", Ministère de l'hydraulique, de l'environnement et des forêts, 1985.
- [2]- GRANULOMETRIE, ed. Association française de normalisation (afnor), X11-681, 1990.
- [3]- J. JORET, Tribune Cebedeau, volume 40, n°518, pp 31-35, G7690, G7981, 1987
- [4]- N. MEGUELLATI ,Journal français d'hydrologie, fasc.3, n°39, pp 275-287, 1982.
- [5]- M. PINTA, SPECTOMETRIE D'ABSORPTION ATOMIQUE, deuxième édition, Masson, 1980
- [6]- A. MONTIEL, Analysis, n°1-2, pp 1-13, 1981.
- [7]- M. LEGRET, Environmental Technology letters, volume 3, pp 157-166 ,1981.
- [8]- U. FÖRSTNER, Environmental Geology, volume 3, pp 49-58, 1979.

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

L'Algerian Journal of Technology (AJOT) publie des articles originaux de travaux de recherche relevant de son domaine scientifique et technologique. Les sujets traités concernent la théorie, la conception, les applications et le développement dans le cadre des disciplines couvertes par les séries A, B, C et D. Les contributions paraîtront sous forme:

1. d'articles présentant un apport significatif en recherche, développement, ou applications de concepts (moins de 20 pages)
2. de notes techniques et correspondances courtes, commentant ou corrigeant des articles antérieurs publiés dans l'AJOT (moins de 10 pages)
3. de Synthèses ou Monographies (moins de 40 pages)
4. de Comptes Rendus de Conférences, Colloque, Symposium, Séminaires regroupés dans un numéro spécial de l'AJOT

La soumission d'un manuscrit signifie qu'il n'est pas déjà protégé par un Copyright, qu'il n'a pas été publié, ou soumis ou accepté pour publication ailleurs.

Les manuscrits doivent être écrits, de préférence, en Anglais. L'AJOT tendra en régime normal à n'accepter les manuscrits en Arabe ou en Français qu'à concurrence de 50% au maximum de son contenu global.

Tous les manuscrits doivent être aussi concis que possible. L'Editeur se réserve le droit de refuser de considérer les articles dont la pagination dépasse la limite maximale autorisée. En cas d'acceptation les dépassements seront facturés aux auteurs.

## A. PROCEDURE DE SOUMISSION D'UN MANUSCRIT

1. Tous les manuscrits seront soumis en 5 exemplaires complets, l'un d'eux étant l'original. Ceci est requis pour permettre au Comité de Lecture d'oeuvrer rapidement.
2. Les auteurs dont les articles sont acceptés, s'ils ne l'ont pas déjà fait, doivent fournir une brève biographie (moins de 100 mots) et 2 photographies de passeport.
3. Les manuscrits seront transmis avec 2 copies de la lettre demande de publication. Cette lettre donnera votre adresse préférée pour la correspondance et, si possible, le numéro de téléphone et/ou du télex. Informer le Rédacteur en Chef de tout changement d'adresse en temps utile.

## B. COPYRIGHT

Par son règlement intérieur, l'AJOT, pour compenser son apport d'éditeur, s'adjudge la moitié des droits de ses auteurs. A cet effet, la lettre demande de publication doit comporter l'accord signé des auteurs sur ce règlement.

## C. PRESENTATION DU MANUSCRIT

1. Les manuscrits seront dactylographiés sur du bon papier blanc de format A4 (21x29.7 cm), au recto seulement avec une marge de 3 cm relativement à chaque bord; la revue se présentant en format 27x19 cm avec une impression recto-verso.
2. On portera sur la première feuille:
  - le titre de l'article (sans symboles) aussi condensé que possible
  - les noms des auteurs (en nombre limité, éviter les articles de plus de 3 auteurs) seront précédés de leurs prénoms. Un Astérisque marquera le nom de l'auteur auquel sera adressée toute correspondance relative à l'article
  - les noms et adresses des Laboratoires concernés
  - les mots clés conformément aux normes admises par les banques de données
  - les résumés dans les 3 langues: Arabe, Anglais et Français, dans cet ordre (300 mots au maximum pour les articles originaux ou de Synthèse, 75 mots au maximum pour les notes techniques et correspondances, et sans équations, références, ou notes de remerciements)
3. Fournir une introduction qui indique un état du sujet et la contribution de l'article.
4. Indiquer éventuellement les avantages, limitations, et applications possibles en Conclusion.
5. Les références bibliographiques numérotés entre crochets, placées à la fin de l'article préciseront dans l'ordre:
  - les noms de tous les auteurs précédés des initiales de leurs prénoms,
  - le titre de l'article,
  - l'abréviation du titre du périodique, dans le cas d'un livre, donner le nom de l'Editeur,
  - les nombres de pages inclusifs (ou chapitre) à la suite de l'indication du Volume, le Mois et l'Année.

6. Les équations doivent être numérotées dans le texte en chiffres arabes (entre parenthèses) et on évitera l'emploi simultané des indices.
7. Les références dans le texte apparaîtront par numéro entre crochets placé éventuellement après le nom d'un ou deux auteurs au maximum.
8. La liste des références sera frappée en double interlignes à la fin du texte dans l'ordre de leur citation dans le texte.
9. La nomenclature et les abréviations doivent être représentées dans un glossaire en fin de texte après la liste de référence.
10. Le système d'unité international sera employé même si la pratique particulière nécessite l'emploi d'un autre système d'unités. L'équivalence dans le système international (SI) devra apparaître entre parenthèses.
11. L'impression de la frappe de couleur noire doit être bien contrastée. Se méfier des imprimantes d'ordinateurs donnant l'impression grise difficile à reproduire.
12. Les caractères de frappe choisis ne doivent être ni trop serrés ni trop grêles. Les lettres et signes auront une hauteur d'au moins 2 mm. Eviter les caractères et les symboles trop gras.
13. Pour les titres de paragraphe, utiliser des capitales ou des caractères gras, non soulignés. Les titres d'alinéas seront soulignés.
14. Tous les titres de paragraphes ou d'alinéas commencent à partir de la marge gauche de la feuille.
15. L'espacement de l'écriture sera de 60 à 70 signes par ligne 150 mm par ligne; celui des inter-lignes sera choisi de telle sorte qu'il ait environ 35 lignes par page.

#### D. COURBES, TABLEAUX ET PHOTOS

1. Il est dans l'intérêt des auteurs de soumettre des illustrations de qualité professionnelle. L'AJOT n'a pas de service d'art et de dessin à offrir.
2. Les dessins originaux seront faits à l'encre de chine noire sur calque blanc. La taille maximum est limitée à 21x13 cm. Les impressions sur papier glacé des illustrations sont aussi acceptables.
3. Toutes les inscriptions doivent être assez grandes pour pouvoir demeurer lisibles après réduction au quart de la dimension originale. Il est interdit de porter à même les figures, les inscriptions ou autres commentaires.
4. Numéroté très légèrement au crayon noir chaque figure de l'illustration originale. Aucune légende ne doit apparaître sur les figures.
5. Fournir dans une feuille séparée le listing de toutes les légendes, dans un style soigné pour la composition.

6. Les photographies des auteurs devraient mesurer entre 3 et 9 cm dans leurs plus grande dimension. Le format des photographies, en générale, peut aller depuis celui d'identité passeport au format 21x13 cm.
7. La numérotation des figures et des photographies est commune. Une liste doit être fournie à part avec leurs titres.
8. Toutes les figures doivent être présentées dans le texte aux emplacements souhaités.
9. Les tableaux seront numérotés à part des figures, et doivent être présentés dans le texte aux emplacements qui leur sont destinés.

#### E. TIRAGE A PART

Quand cela est possible, il sera alloué 30 tirés à part sans couvertures aux auteurs. Dans ce cas, le paiement des frais correspondants doit être acquitté des acceptations du manuscrit conformément au devis de l'imprimeur.

#### F. ADRESSAGE DES ARTICLES

Les articles manuscrits conformes à ces recommandations doivent être adressés à:

Mr. le Rédacteur en Chef de la Revue AJOT  
Ecole Nationale Polytechnique  
B.P. No. 182, Hassan Badi  
El-Harrach, Algiers 16200  
Algeria

TEL: 76-59-29  
76-53-01/03

TELEX: 64.147 ENP/DZ

FAX: 213-2-76-09-66

Je désire souscrire un abonnement annuel au Journal Of Technology

Nom : .....

Adresse : .....

Abonnement Annuel <sup>(1)</sup>  
Prix promotionnel

80DA ALGERIE  
90FF ETRANGER  
15 \$ US

Je joins mon règlement à la demande  
au compte C.C.P. N. 16196-58

Signature

Agent Comptable  
Ecole Nationale Polytechnique  
B.P. N. 182  
H. Badi El-Harrach

(1) Frais d'envoi en sus

Je désire souscrire un abonnement annuel au Journal Of Technology

Nom : .....

Adresse : .....

Abonnement Annuel <sup>(1)</sup>  
Prix promotionnel

80DA ALGERIE  
90FF ETRANGER  
15 \$ US

Je joins mon règlement à la demande  
au compte C.C.P. N. 16196-58

Signature

Agent Comptable  
Ecole Nationale Polytechnique  
B.P. 182  
H. Badi El-Harrach

(1) Frais d'envoi en sus

## TABLE DES MATIERES

Comité de Rédaction .....	I
Avant Propos .....	III
The effect of the balun in modelling waveguide to microstrip junctions in the range 18 26 GHz	
T. KEZAI and A. VANDER VORST, fellow I.E.E.F. ....	01
Optimization of energy transfer : Implanted and external power supplies	
M. MEHENNI, A. FARAH .....	11
Etude du coefficient de couplage entre lignes stratifiées	
A. ZERGUERRAS, R. AKSAS .....	21
Amplificateur à fréquence intermédiaire pour la T.V.D.S.	
A. OUCHAR, R. AKSAS .....	33
Contribution sur une approche numérique de réseaux micro-ondes à n poles	
L. DEKAR, Z. GRABOWSKI, M. TRABELSI .....	57
Synthèse d'un régulateur optimal pour les machines outils à très haute précision	
R. SEHAB, V. LYSSOV .....	79
Courants et charges des streamers dans les diélectriques liquides en géométrie pointe plan sous tension de choc de foudre	
H. MDULAI, A. BEROUAL .....	105
Contribution to the study and the regeneration of insulated mineral oil	
S.E. CHITOUR, F. MDHALLEBI .....	117
Contribution à l'étude de la régénération des huiles usagées moteur	
S.E. CHITOUR, F. MDHALLEBI, T. GUENDOZI .....	137
Contribution à l'étude de la pollution de l'Oued Réghaia (Algérie) par les métaux lourds	
J. ARRAR, R. BELABBES .....	157
Recommandations aux auteurs .....	179