

Les mesures en hyperfréquences

Omniprésentes, les hyperfréquences font partie de notre quotidien technologique. Hormis pour quelques spécialistes, elles sont pourtant assez peu connues par beaucoup d'entre nous. C'est pourquoi il nous a paru nécessaire d'ouvrir un dossier sur le sujet. Qu'est-ce qu'un système hyperfréquence, quelles sont les grandeurs qui le caractérisent, et comment mesure-t-on ces grandeurs ? Nous essaierons d'apporter à ces questions une réponse simple, quitte à être parfois simpliste, afin d'être compréhensible par tous.



Le radar est à l'origine de l'essor des hyperfréquences. Il a été développé dans un but militaire aux USA, pendant la seconde guerre mondiale, pour localiser le plus tôt possible les escadrilles d'avions ennemis, afin d'avoir le temps d'organiser une défense efficace. Aujourd'hui, les hyperfréquences sont utilisées dans des domaines d'activité divers et variés. Citons les plus connus :

- l'aéronautique avec le radar et le radioaltimètre,
- les télécommunications avec les faisceaux hertziens,
- la radiotéléphonie cellulaire avec le téléphone portable,
- la sécurité avec les alarmes :
détection de franchissement et protection volumétrique,
- l'industrie agroalimentaire avec le chauffage par micro-ondes
- le négoce avec la mesure de taux d'humidité sans contact, procédé utilisé également dans l'industrie pharmaceutique, l'industrie alimentaire, le stockage des céréales
- les mesures de niveau ou de distance sans contact sont d'autres applications industrielles récentes.

Le plan de fréquence

Les hyperfréquences (ou micro-ondes) correspondent à une plage de fréquences comprise entre les fréquences utilisées par la radio et l'infrarouge. Elles s'étendent d'environ 300 MHz à environ 300 GHz (voir schéma en bas de page).

Les hyperfréquences sont remarquables par le fait que la faible valeur de leurs longueurs d'onde (proches du spectre visible) permet de réaliser des émissions d'une très grande directivité à l'aide d'antennes de dimensions assez réduites. De ce fait, les équipements rayonnants sont moins sensibles aux parasites d'origine atmosphérique ou industrielle. La portée limitée des hyperfréquences est aussi un avantage largement utilisé par la téléphonie cellulaire (plusieurs relais distants utilisent la même fréquence pour transmettre diverses émissions).

Constitution type d'un système hyperfréquence

Généralement un système hyperfréquence utilisé en télécommunication est composé des principaux sous-ensembles suivants :

- un **émetteur**, qui génère l'énergie hyperfréquence nécessaire à la liaison, c'est-à-dire la fréquence support de l'information et la puissance nécessaire pour atteindre la portée recherchée ;
- un **câble de liaison** qui sert au transport de l'énergie hyperfréquence produite par l'émetteur jusqu'à...
- une **antenne**, qui va la rayonner.

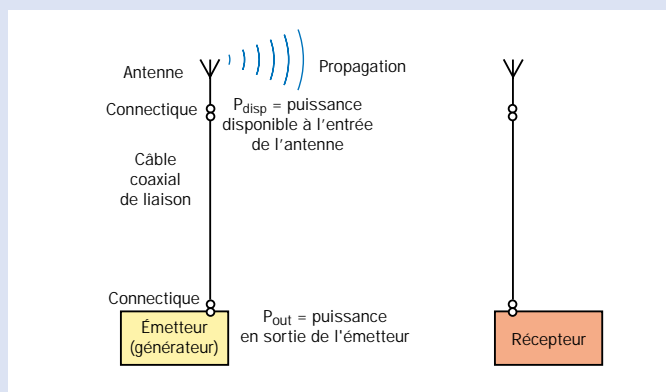
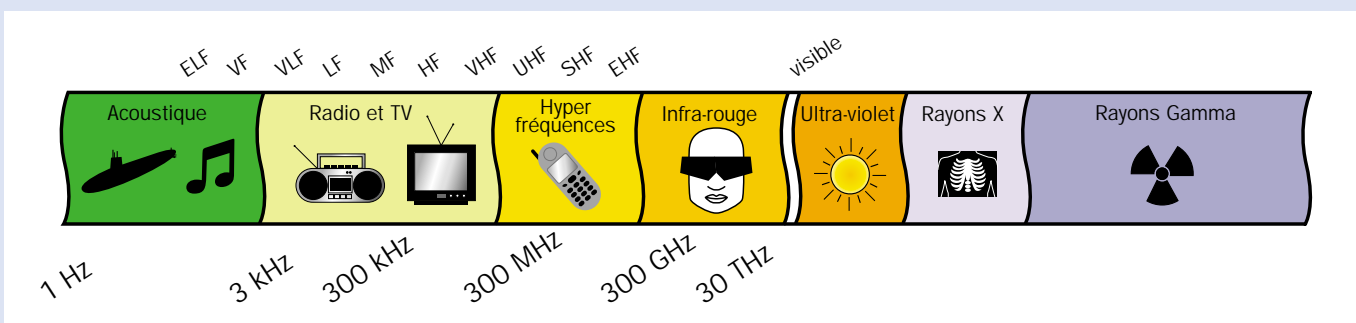


Schéma type d'un système hyperfréquence
Cas idéal : $P_{disp} = P_{out}$ (il y a Transfert maximum d'énergie)



Le plan de fréquence

L'énergie hyperfréquence va ensuite se propager en espace libre, transportant ainsi l'information utile. À l'autre extrémité de la chaîne de transport de l'information, on trouvera généralement une structure symétrique composée :

- d'une **antenne** qui va capter l'information hyperfréquence,
- puis d'un **câble de liaison** qui va la transporter...
- jusqu'au **récepteur**, chargé de restituer l'information utile (écho radar ou message numérique ou analogique, ou enfin message audible tel que message téléphonique, radio ou télévision).

La nécessité de faire des mesures

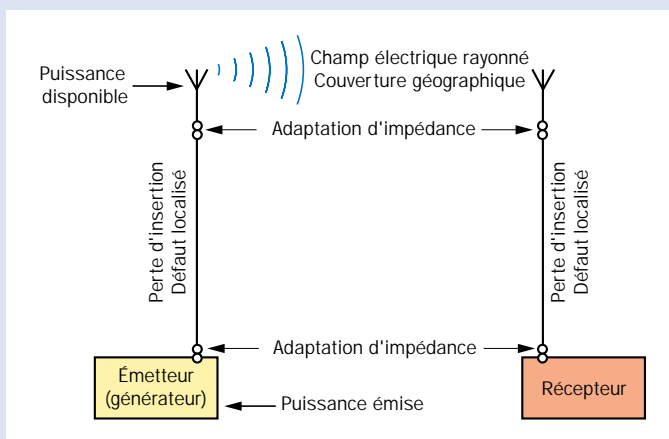
Pourquoi et quand a-t-on besoin de faire des mesures ? Comme pour tout système électronique, le besoin de faire des mesures existe tout au long de la vie d'un système hyperfréquence, depuis sa conception, jusqu'à sa réforme. À savoir :

- au cours de la conception du produit,
- lors de la qualification du produit, pour vérifier sa conformité au cahier des charges,
- lors de son installation sur site d'exploitation,
- au moment de la recette technique,
- puis tout au long de sa période d'exploitation pour en assurer la maintenance.

Quelles mesures faire ?

Pour qualifier un système hyperfréquence, on procédera, suivant les cas, aux contrôles suivants :

- mesure de puissance émise par le générateur
- mesure d'adaptation d'impédance de la charge (câble + antenne)
- mesure de la perte d'insertion du câble de liaison
- localisation des défauts sur le câble de liaison
- mesure du champ électrique rayonné
- relevé de la zone géographique couverte par l'émetteur



Qualification d'un système hyperfréquence

La mesure de puissance.

Pour vérifier la conformité d'un émetteur, on est amené à mesurer la puissance qu'il fournit. Deux méthodes permettent cette évaluation.

A. La mesure par insertion.

Cette méthode consiste à **insérer** - en série, donc - entre la sortie de l'émetteur et son circuit d'utilisation (câble, antenne), un instrument de mesure : **wattmètre** ou **wattmètre-reflectomètre**. Un coupleur directif prélève une partie de l'énergie circulant entre l'émetteur et sa charge. Un détecteur est ensuite utilisé pour délivrer une tension proportionnelle à la puissance détectée ; cette tension et la valeur du couplage permettent de déduire avec précision la valeur de la puissance mesurée.

B. La mesure d'extrémité.

Cette seconde méthode consiste à **connecter en sortie** du générateur, **en lieu et place du circuit d'utilisation**, un **milliwattmètre** couplé à un transducteur dans lequel sera dissipée la puissance fournie. Deux types sont généralement utilisés : le **transducteur à diode** et le **capteur thermoélectrique**. Dans ces deux cas, le capteur est utilisé en tant que charge adaptée à l'extrémité de la ligne de mesure.

a) Le **transducteur à diode** assure une détection d'amplitude en fournissant une tension proportionnelle à l'amplitude du signal hyperfréquence à mesurer ; cette tension est ensuite utilisée pour calculer la valeur de la puissance mesurée.

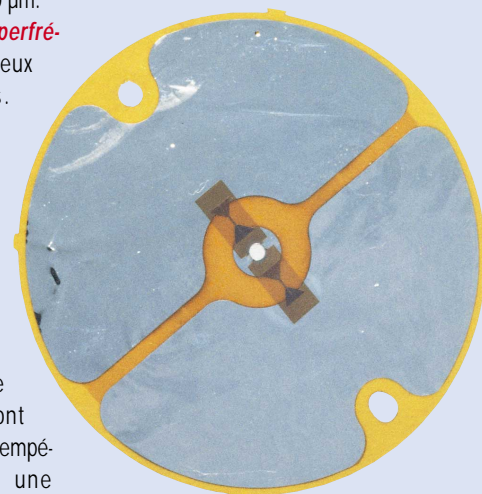
b) Le **capteur thermoélectrique** fournit, quant à lui, une information proportionnelle à la puissance moyenne dissipée sous forme de température dans la charge. Deux variantes coexistent :

■ **La thermistance hyperfréquence**, généralement utilisée dans une branche d'un pont de Wheatstone. La puissance hyperfréquence qui est dissipée dans la thermistance provoque un changement de sa résistance qui déséquilibre ainsi le pont de Wheatstone. La variation de résistance de la thermistance étant proportionnelle à la puissance moyenne à mesurer, l'information de déséquilibre du pont de Wheatstone est utilisée pour déterminer la valeur de cette puissance.

La thermistance utilisée ici est un composant de très faibles dimensions ; son diamètre est de l'ordre de 0,2 mm et ses fils de connexion de l'ordre de 20 μm .

■ Le thermocouple hyperfréquence

superposant deux fonctions distinctes. D'abord, une couche résistive à l'impédance adaptée, dans laquelle la puissance à mesurer est dissipée, provoquant une élévation de température. Puis un **thermocouple couches minces** superposé à cette résistance de charge dont il mesure l'élévation de température, et qui délivre une tension proportionnelle à la puissance à mesurer. Le thermocouple hyperfréquence est un composant réalisé en couches métalliques minces dont les épaisseurs sont de l'ordre de quelques centaines d'Angströms.



Thermocouple hyperfréquence couche mince. Diamètre réel : environ 30 mm

La mesure d'adaptation

Dans tout système hyperfréquence, il est primordial de s'assurer que le circuit de charge, d'utilisation de l'énergie produite par le générateur, a bien une impédance adaptée à l'impédance de sortie du générateur. C'est la condition essentielle pour qu'il y ait **transfert maximum d'énergie** entre le générateur et le circuit d'utilisation. Ce problème, qui conditionne le rendement du dispositif, a une incidence directe sur le coût de l'exploitation.

En hyperfréquence, quand un circuit de charge n'est pas adapté, sous-entendu quand son impédance ne correspond pas à "l'impédance conjuguée" de celle du générateur, une partie de l'énergie produite par le générateur est perdue par réflexion sur l'impédance de la charge. L'**énergie réfléchi**e par la charge va se propager dans la ligne de transmission, de la

charge vers le générateur, et rencontrer l'énergie produite (alors appelée **incidente**) qui elle se propage en sens inverse. Ces deux énergies, issues du même générateur sont cohérentes, et vont donc interférer en donnant naissance à une **"onde stationnaire"**, composée d'une succession de maxima et de minima correspondants à la composition en phase ou en opposition de phase des répartitions le long de la ligne de ces deux énergies. L'onde stationnaire ainsi produite est caractéristique du niveau de la désadaptation d'impédance entre générateur et circuit de charge.

On est donc naturellement amené à effectuer des mesures sur cette onde stationnaire pour qualifier le degré de désadaptation d'impédance, ce qui revient à évaluer le rendement du système. Les instruments utilisés ici sont le **wattmètre-rélectomètre, l'analyseur ou contrôleur scalaire**.

A. Le coefficient de réflexion

On qualifie la désadaptation d'impédances par le **Coefficient de Réflexion en Tension**, symbolisé par la lettre gamma, qui correspond au rapport entre la tension réfléchie et la tension incidente : $\Gamma_v = V_r / V_i$

Il peut aussi s'exprimer en fonction de la puissance $\Gamma_v = \sqrt{(P_r / P_i)}$ où P_r et P_i désignent respectivement les puissances réfléchie et incidente. Γ_v est compris entre 0 et 1.

Γ est souvent exprimé en dB : $\Gamma_{(dB)} = 20 \log \Gamma_v$, notamment par les anglo-saxons qui l'appellent alors "Return loss" (pertes de retour ou pertes par réflexion).

B. Le ROS

L'autre mesure essentielle consiste à déterminer le **Rapport d'Onde Stationnaire**, le **ROS** en abrégé, dont la valeur est comprise entre 0 et ∞ .

Si V_i et V_r représentent respectivement la tension incidente et la tension réfléchie, par définition, le ROS est donné par la relation suivante :

$$\text{ROS} = (V_i + V_r) / (V_i - V_r)$$

Le ROS peut aussi être exprimé à partir du coefficient de réflexion :

$$\text{ROS} = (1 + \Gamma_v) / (1 - \Gamma_v)$$

Quelques ordres de grandeur

ROS = 1,05	Très bon
ROS = 1,20	Acceptable
ROS \geq 2	Mauvais

La Perte d'Insertion

Quand on veut qualifier un équipement de télécommunications en hyperfréquences, il est intéressant de s'assurer que le câble de liaison entre l'émetteur (ou le récepteur) et l'antenne associée, est en parfait état, qu'il ne s'oppose pas au transport de l'énergie. Il faut s'assurer que le câble n'introduit pas une "Perte d'Insertion" trop importante, par respect du principe du "transfert maximum d'énergie".

Comme son nom l'indique, la Perte d'Insertion est une perte, une dissipation de l'énergie produite transportée, par l'insertion du composant en cause - ici le câble de liaison - entre le générateur et son utilisation.

Les équipements destinés à assurer cette mesure (milliwattmètre ou contrôleur scalaire) procèdent par comparaison entre l'énergie injectée à l'entrée du câble sous test et l'énergie disponible à la sortie.

Si P_{out} est la puissance injectée à l'entrée du câble à tester, et si P_{disp} est la puissance restant à l'autre extrémité du même câble, la **Perte d'Insertion**, symbolisée par PI et exprimée en dB, est donnée par la relation suivante :

$$PI_{(dB)} = 10 \log (P_{disp} / P_{out})$$

Pour un câble donné, la valeur de la perte d'insertion est, bien entendu, proportionnelle à sa longueur ; par exemple si elle est de 0,2 dB pour 1 m, elle atteint 20 dB pour 100 m.

La localisation de défaut sur un câble

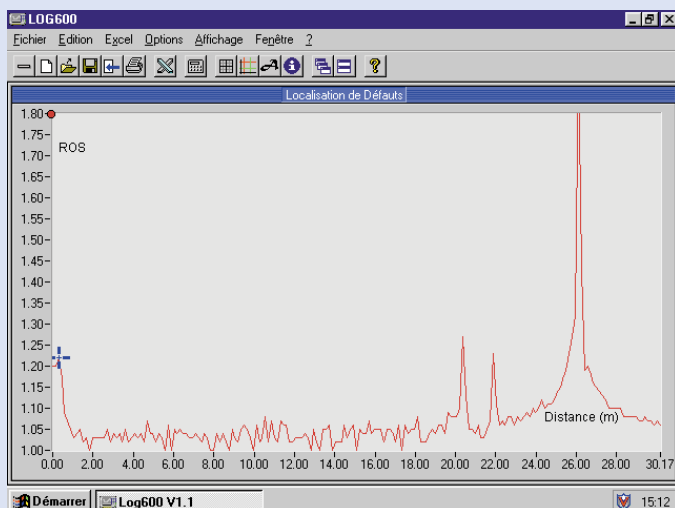
Il y a pratiquement toujours une partie de l'installation de télécommunication en hyperfréquence qui est située en extérieur et c'est souvent le cas des câbles coaxiaux de liaison. Ces équipements, soumis à l'action des agents extérieurs tels que les variations de température, d'humidité, les contraintes mécaniques anormales..., peuvent devenir défectueux :

- oxydation des contacts d'un connecteur,
- écrasement d'un câble,
- mauvais contact entre conducteur extérieur du câble et connecteur,
- connecteur en court circuit...



Antennes de station terrienne de faisceaux hertziens

Ces différents défauts sont des causes de détérioration ou d'interruption de la transmission du signal hyperfréquence, entre générateur et utilisation, donc causes de pannes majeures. Or ces câbles de liaison qui relient l'émetteur à l'antenne d'émission, ou l'antenne de réception au récepteur, sont souvent de grande longueur, car les antennes sont généralement placées sur les toits ou au sommet d'un mât de plusieurs dizaines de mètres de hauteur. Il convient donc de disposer d'un outil capable de localiser



Ce câble présente un important défaut à 26 m du départ et deux défauts moindres, au 20^e et au 22^e mètre, correspondant à des connecteurs de raccordement (mesure réalisée avec un contrôleur scalaire ORITEL RO600)

l'éventuel défaut sur le trajet du câble à tester. L'instrument type de ces mesures est un localisateur de défauts, fonction que possède également le contrôleur scalaire.

Deux méthodes de mesure permettent de localiser un défaut sur le trajet d'un câble coaxial d'impédance caractéristique connue. Toutes deux utilisent la même particularité physique concernant la propagation des signaux hyperfréquences dans les lignes : "les déphasages subits par les signaux hyperfréquences, pendant leur trajet "Aller-Retour" sur la longueur d'une ligne de transmission, varient suivant la fréquence utilisée".

A. Méthode par échelon.

La première méthode consiste à injecter à l'entrée du câble sous test un échelon de tension excessivement raide, c'est-à-dire avec un temps de montée très faible ; puis d'analyser l'écho, c'est-à-dire le signal disponible en retour. Le signal réfléchi par la discontinuité d'impédance du câble correspond à l'échelon émis transformé par le défaut d'impédance et le temps de propagation.

Cette méthode de mesure, qui a l'avantage d'être rapide, nécessite cependant une interprétation délicate, et offre une médiocre résolution de mesure.

B. Réponse en fréquence.

La seconde méthode correspond à la mesure de la réponse en fréquence du coefficient de réflexion du câble à tester, réponse en fréquence caractéristique de la nature et de la position des défauts sur les trajets de câbles. Un algorithme, basé sur le calcul de la "Transformée Inverse de Fourier", permet de déterminer avec précision la position en distance de la discontinuité d'impédance recherchée.

La mesure de champ électrique

La transmission à distance du signal utile est réalisée grâce à la propagation de l'onde électromagnétique rayonnée par l'antenne. Il est intéressant de vérifier la validité de cette propagation, afin de s'assurer si ce maillon de la chaîne de transmission de l'information, entre émetteur et récepteur, n'est pas interrompu, par exemple par des réflexions parasites ou un obstacle à la propagation.

Il est aussi important de pouvoir vérifier qu'un équipement ne rayonne par un niveau d'énergie trop important, afin de ne pas perturber les équipements électriques voisins (compatibilité électromagnétique).

Ces mesures sont réalisées par les **mesureurs de champ électrique**. Leur principe est basé sur l'emploi d'une antenne de réception à très large bande,

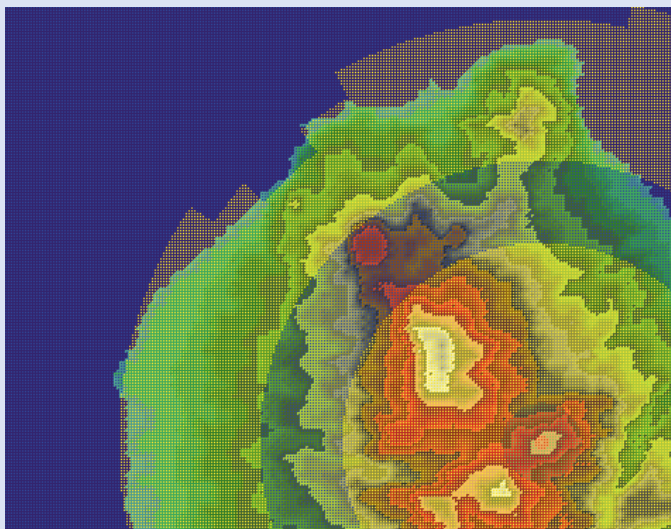
à laquelle est associé un détecteur qui délivre une tension proportionnelle au champ électrique capté. Ces instruments, qui offrent l'avantage de fonctionner sur une très large bande de fréquence, présentent cependant l'inconvénient d'ignorer la valeur de la fréquence du signal mesuré.

La couverture de champ électrique

Pour déterminer la zone géographique couverte par un émetteur, afin de prévoir la portée des communications prévues, par exemple, étendue de couverture GSM en radiotéléphonie cellulaire, on est amené à établir la **cartographie** de champ électrique autour de cet émetteur. L'équipement destiné à réaliser cette mesure doit avoir une bonne sensibilité et permettre de faire une mesure à une fréquence déterminée sans être perturbé par les champs électriques disponibles sur d'autres fréquences.

Les équipements destinés à assurer ce type de fonction sont des **récepteurs sélectifs**, à plusieurs changements de fréquences, utilisant la technique de la "Fenêtre de Mesure" déplaçable en fréquence ; technique utilisée en analyse spectrale.

Ces récepteurs de mesure disposent, en plus de leur capacité à effectuer des mesures sélectives en fréquence, d'une très grande dynamique de mesure en niveau, et d'une très bonne sensibilité. Il est assez courant d'avoir des sensibilités de l'ordre de -120 à -130 dBm, c'est-à-dire que ces récepteurs sont capables de mesurer des signaux de l'ordre de 1 fW (10^{-15} W) !



Exemple de cartographie de champ électrique tracée par logiciel à partir du récepteur sélectif C.A 47

CHAUVIN ARNOUX
Pôle Test & Mesure
Tél. : 01 44 85 44 85 - Fax : 01 46 27 73 89
e-mail : info@chauvin-arnoux.fr

Hyperfréquences : nos solutions de mesure

Tous les différents paramètres qualitatifs d'un système hyperfréquence tels que nous vous les avons présentés dans les pages précédentes sont mesurables avec les appareils constituant la gamme "hyperfréquences" du pôle Test & Mesure de Chauvin Arnoux.

Les instruments de mesure correspondants

Le tableau suivant présente les instruments de mesure **Chauvin Arnoux** couvrant ces types de mesure.

	Puissance		Adaptation d'impédance	Perte d'insertion	Localisation de défaut	Champ électrique	
	Insertion	Extrémité				Rayonnement	Couverture
ORITEL MH600	Avec coupleur associé	■	Avec coupleur associé	■			
ORITEL RO600			■	■	■		
ORITEL RW500	■	Avec charge associée	■	■			
C.A 41/C.A 43						■	
C.A 47						■	Avec accessoires

Milliwattmètre ORITEL MH600

■ Les mesures de puissances sont assurées par le **Milliwattmètre ORITEL MH600** qui couvre une plage de fréquence de 100 kHz à 50 GHz, sur une dynamique de mesure de 100 pW à quelques W suivant la sonde de mesure associée (voir détails page suivante).



Wattmètres - Réflectomètres série ORITEL RW500

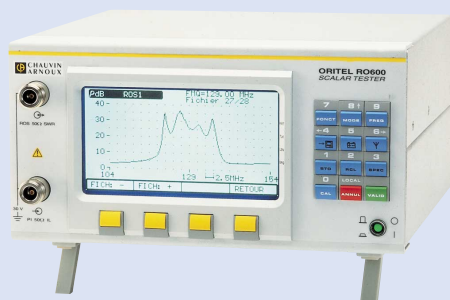
■ Les puissances élevées, quant à elles, se mesurent avec les **Wattmètres Réflectomètres de la série ORITEL RW500**. Ils donnent les puissances incidentes ou réfléchies jusqu'à 1 kW entre 1 MHz et 2,7 GHz suivant le modèle ; ils permettent aussi de qualifier une adaptation.

Service-lecteur n° 5

Contrôleur Scalaire ORITEL RO600

■ Le **Contrôleur Scalaire ORITEL RO600**, appareil de terrain, mesure l'adaptation (ROS) et la perte d'insertion d'un quadripôle entre 1 MHz et 2,7 GHz. Cet instrument localise aussi avec précision, sur le trajet d'un câble coaxial de liaison, la position d'un défaut correspondant à une discontinuité d'impédance.

Service-lecteur n° 6



Mesureurs de champ C.A 41 et C.A 43

■ Les **Mesureurs de champ C.A 41 et C.A 43** associés à leurs sondes EF1 et EF2, mesurent un champ électrique dans un domaine de fréquences très étendu, de 1 MHz à 3 GHz.

Service-lecteur n° 7



Récepteur RF C.A 47

■ Le **Récepteur RF sélectif C.A 47**, quant à lui mesure le champ électrique capté par une antenne, à une fréquence quelconque choisie entre 25 MHz et 2,5 GHz, sur une très grande dynamique qui s'étend entre 100 μW / -10 dBm et 0,1 fW / -130 dBm.

Service-lecteur n° 8

Exploitation informatique des données

Les C.A 43, C.A 47 et ORITEL RO600 peuvent être exploités avec des logiciels permettant le traitement et l'archivage des mesures sur un micro-ordinateur. Ces logiciels sont maintenant disponibles pour une utilisation dans l'environnement Windows™ 95, 98 ou NT.

CHAUVIN ARNOUX
Pôle Test & Mesure
Tél. : 01 44 85 44 85 - Fax : 01 46 27 73 89
e-mail : info@chauvin-arnoux.fr