

Émetteurs ondes courtes de radiodiffusion 250 kW

par **Guy PELLET**

Chef du Laboratoire Étude Émetteurs ondes longues, ondes moyennes, ondes courtes de radiodiffusion Thomcast

1. Caractéristiques générales de l'émetteur.....	E 6 115 - 2
2. Driver solide	— 3
3. Modulateur état solide.....	— 5
4. Accord automatique de l'émetteur	— 9
5. Contrôle et téléexploitation	— 10
6. Conclusions	— 11
Pour en savoir plus	Doc. E 6 115

Vous vous trouvez à 2 000 km, 1 500 km de Paris.

Vous êtes expatrié, en mission, en voyage, vous attendez le résultat des dernières élections, le résultat de PSG-Metz... Que faire ?

*Sélectionnez votre récepteur sur **ondes courtes** pour écouter les nouvelles fraîches de votre pays natal.*

La portée des émetteurs ondes courtes peut faire le tour du monde si les conditions atmosphériques et ionosphériques le permettent.

Dans le monde entier on peut trouver un récepteur ondes courtes à un prix modique.

Ce service quasi universel à faible coût est rendu possible par la radiodiffusion en ondes courtes qui utilise une gamme de fréquences divisée en deux bandes : 3,2 - 4,95 MHz et 5,06 - 26,1 MHz : la gamme basse est locale et de portée de 1 000 km, tandis que la gamme haute permet une couverture plus large à travers l'ionosphère après multiples réflexions.

Ainsi, pour les raisons précédentes et malgré la concurrence des satellites, les ondes courtes continuent à être utilisées : de gros groupes de radiodiffuseurs tels que VOA (Voice of America), TDF (Télédiffusion De France), BBC (British Broadcast Corporation)... continuent à investir pour des centres émetteurs ondes courtes.

Par exemple pour TDF ; Issoudun (France) 12 émetteurs 500 kW antenne tournante capable de radiodiffuser à n'importe quelle fréquence vers n'importe quelle direction.

L'onde courte peut aussi être tactique ou politique. Certains pays, notamment au Moyen-Orient, achètent des centres émetteurs en vue de propagande. Les guerres Iran-Irak, du Golfe ont aussi généré d'importants achats de stations clés en mains.

Par exemple (dans un pays du Golfe) : 16 émetteurs 500 kW, 100 antennes, superficie 10 km x 10 km. (Le plus gros centre du monde).

La course à la puissance (500 kW) a été instaurée mais un émetteur de 250 kW moins cher en acquisition et coût d'exploitation, monobloc, ne fait perdre que

3 dB de puissance. La différence de propagation étant très faible, un 250 kW fournit une réception très agréable dans le monde entier.

Principaux objectifs techniques

L'évolution vers l'état solide : le tube demeurant un produit consommable (durée de vie 1,5 an) et cher (300 kF), de gros efforts se sont portés sur l'état solide :

— des drivers à transistor au niveau de 2,5 kW ont été développés pour supprimer les tubes de commande du tube RF final ;

— en ce qui concerne le modulateur (amplification de l'audiofréquence), un gros progrès technologique a été fait par le développement d'alimentations haute tension (30 kV) à base de transistors IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), qui a permis de remplacer tous les tubes d'amplification audiofréquence par des étages états solides mis en série.

Les **exigences d'installation** : rapidité et coût faible, ont poussé les concepteurs à étudier des émetteurs monobloc sans contrainte externe importante.

Le **rendement** d'un émetteur est extrêmement important dans le budget de l'exploitation d'une station. La **consommation en énergie** a été considérablement diminuée.

Pour illustrer les règles de l'art technique et technologique, et le besoin du consommateur du nouveau millénaire, un récent émetteur 250 kW ondes courtes étudié et développé par Thomcast est décrit dans cet article.

Cet émetteur est monobloc, monotube RF et état solide en amplification audio fréquence.

1. Caractéristiques générales de l'émetteur

1.1 Les atouts

L'émetteur 250 kW ondes courtes à tube unique se distingue principalement par les caractéristiques suivantes :

- faible coût du cycle de vie grâce à :
 - son bon rapport performance/coût ;
 - son rendement élevé > 75 % global ;
 - son excellente fiabilité ;

Historique

Les émetteurs de radiodiffusion ondes courtes ont compris jusqu'en 1994 quelques dizaines de tubes de puissance. Ces tubes étaient des triodes, tétrodes et pentodes. Les pentodes trop difficiles à utiliser et à maîtriser ont vite été abandonnées. Seules les tétrodes ont subsisté et au fur et à mesure des progrès technologiques le nombre de tubes a diminué.

Les années 1975 ont vu naître le premier émetteur ne comportant que deux tubes en amplification RF et quatre tubes en amplification audiofréquence (500 kW OC). Les performances du tube devenaient prépondérantes lors de la conception des émetteurs. Le tube est devenu l'organe central et l'émetteur est construit autour de celui-ci.

L'orientation actuelle en ondes courtes est de transistoriser au maximum les étages préamplificateurs de puissance. En effet, la technologie actuelle, pour des raisons de coûts, ne permet pas de s'affranchir du tube forte puissance RF en étage de sortie.

- sécurité de fonctionnement grâce à :

- sa conception à tube unique ;
- la redondance modulaire du modulateur tout état solide et de l'amplificateur exciteur RF ;
- son étage de sortie RF éprouvé et largement dimensionné ;
- son aide au diagnostic intégrée permettant une maintenance rapide et efficace.

- installation rapide sur site, facilitée par :

- son architecture monobloc nécessitant une faible surface de montage ;
- la modularité de l'exciteur RF et du modulateur tout état solide ;
- la facilité d'accès prévue à tous les composants ;
- son dispositif de refroidissement simple et fiable nécessitant peu de servitudes au niveau du Génie civil.

- conception avancée caractérisée par :

- une très faible distorsion < 2 % ;
- une réponse audiofréquence de 50 à 7 500 Hz ;
- l'accord adaptatif automatique de l'émetteur sur toutes les fréquences à l'intérieur des bandes de radiodiffusion ;
- le traitement numérique du signal assurant un fonctionnement stable et fiable ;
- une capacité de télécommande intégrale avec possibilité d'intégration dans un système informatisé de téléexploitation de la station ;
- la sécurité du personnel et des équipements suivant la norme EN 60 215 (CEI 215).

1.2 Description générale

L'émetteur 250 kW ondes courtes, monotube caractérisé par une fiabilité et un rendement élevés, assurant les modes DBL (double bande latérale), BLU (bande latérale unique), DCC (Dynamic Carrier Control) (réduction dynamique de porteuse) et modulation trapézoïdale avec un excellent niveau de qualité.

Le modulateur et tous les étages RF (radiofréquence) sont entièrement transistorisés, à l'exception de l'étage RF final, équipé d'un tube TH 558. Pour assurer une disponibilité d'exploitation maximale, l'émetteur peut continuer à fonctionner même en présence de panne dans le modulateur ou le driver.

Le tube TH 558, prévu pour 500 kW, assure une fiabilité maximale. Tous les composants de l'étage RF sont surdimensionnés. Ils sont en outre largement éprouvés, ayant été intégrés depuis des années et en de nombreux exemplaires dans l'étage RF final des émetteurs 500 kW ondes courtes.

De par sa compacité, son exploitation entièrement automatique et télécommandable, et sa simplicité de maintenance, l'émetteur 250 kW ondes courtes se trouve à la pointe de la deuxième génération d'émetteurs à rendement élevé.

Le système de gestion à base de microprocesseurs fournit à l'exploitant et au personnel de maintenance une assistance permanente et immédiatement disponible, à travers un dispositif de visualisation intégré (moniteur couleur) et un clavier. Le même niveau de commande et de contrôle est disponible pour un système de télécommande et de télésurveillance.

Le modulateur état solide représente un progrès considérable en matière de qualité de transmission, de fiabilité, de disponibilité, de simplicité d'interfaçage et d'intégration en système.

De nouvelles technologies ont été mises en œuvre, utilisant des circuits simples et fiables et des composants surdimensionnés, permettant à cet émetteur de fonctionner avec une excellente fiabilité, même dans des conditions d'environnement et de fonctionnement défavorables.

La conception de cet émetteur est en conformité avec les recommandations applicables du CCIR (Comité Consultatif International de Radiocommunications) et avec la norme EN 60215 relative aux « Règles de sécurité pour matériels émetteurs ».

1.3 Modes d'émission

Il existe quatre modes d'émission :

- le mode A3E à double bande latérale avec porteuse intégrale ;
- le mode A3E avec DCC (modulation dynamique de porteuse) : deux courbes résidentes et deux courbes spécifiques sur demande du client permettent des économies d'énergie optimales en fonction du type de programme ;
- la modulation trapézoïdale ;
- le mode BLU (H3E et R3E) avec porteuse résiduelle conformément aux recommandations du CCIR. La modulation de phase selon le système Khan, combinée avec la modulation d'enveloppe BLU permettent à l'étage de sortie RF de fonctionner en classe C, ce qui autorise un rendement élevé tout en assurant d'excellentes caractéristiques de modulation.

1.4 Chaîne RF

La chaîne RF possède un tube (TH 558) fonctionnant en classe C et dont la cathode est directement mise à la masse. Cette configuration

du circuit assure une stabilité élevée et permet un réglage quasi-continu de l'accord en fréquence.

Tous les condensateurs et toutes les pièces RF sont accordables en continu. Le tube fonctionne avec un rendement anodique élevé dans tous les modes d'émission ; la modulation est appliquée à l'anode de cet étage et l'écran est auto-modulé.

L'amplificateur état solide de puissance intermédiaire (IPA) est composé de quatre modules 500 W en parallèle. Il couvre toute la gamme de fréquences sans reprise des réglages autre qu'un ajustement préprogrammé du gain.

L'amplificateur de puissance intermédiaire est autoprotégé contre les défauts tels que surintensités, surtensions, températures et ROS (rapport d'ondes stationnaires) excessifs. L'émetteur peut continuer à fonctionner avec un module 500 W hors service.

1.5 Accord automatique

Dans la version standard, deux modes sont disponibles :

- accord rapide sur des fréquences préréglées ;
- recherche automatique pour une nouvelle fréquence : elle peut être obtenue automatiquement à l'intérieur des bandes de radiodiffusion, grâce à un processus d'interpolation.

L'émetteur est préréglé en usine pour fonctionner avec accord automatique à l'intérieur et autour des bandes d'émission. Le fonctionnement de l'émetteur pour des fréquences différentes exige une programmation spécifique.

Dans tous les cas, l'adaptation de la charge peut être automatique ou préréglée.

Le positionnement absolu des composants variables est assuré par des circuits entièrement numériques à base de moteurs pas-à-pas et de codeurs optiques assurant une excellente précision.

1.6 Tube de puissance

L'émetteur possède comme seul tube une tétrode TH 558 à refroidissement Hypervapotron avec des grilles pyroblocs en graphite pyrolytique.

L'association des techniques Hypervapotron et Pyrobloc permet une charge thermique élevée et augmente les capacités d'échange de chaleur du tube. Cette technologie permet une définition saine du circuit RF, améliorant ainsi le fonctionnement aux fréquences élevées.

La tétrode et les circuits associés ont été conçus en vue d'un remplacement rapide et facile du tube, sans pertes d'eau et sans défaire les connexions électriques.

2. Driver solide

2.1 Théorie générale du driver

Le premier étage RF est le synthétiseur de fréquence situé dans le bloc gestion. Le second étage appelé driver ne comporte pas de tube mais est constitué de quatre sous-modules transistorisés couplés par l'intermédiaire de transformateurs à ferrites. La puissance d'excitation maximale obtenue est de 2,5 kW, ce qui est surabondant pour attaquer la grille du tube de puissance TH 558 équipant le 250 kW ondes courtes.

Dans la même philosophie que pour les modules du modulateur, en cas de défaillance de l'un des quatre modules RF, des fusibles de protection permettent de déconnecter ce module. Une information est envoyée au système de gestion centrale pour traitement et affichage du numéro de module en panne. La surabondance évoquée précédemment permet de continuer l'exploitation en fonctionnant avec trois modules. Le caisson est blindé et est extractible sur glissières pour la maintenance. Chaque module est associé à une alimentation séparée.

Le driver solide est une partie sensible de l'émetteur ; en cas de court-circuit interne du tube RF, le driver doit se protéger des surtensions ou surintensités engendrées par ces faits.

Le driver reçoit du synthétiseur de fréquence un signal RF. La puissance délivrée par ce synthétiseur est de + 13 dBm (1 V efficace). Il couvre une bande de fréquence de 3 à 27 MHz. Le driver amplifie ce signal et l'applique sur l'entrée du circuit d'adaptation d'impédance de la grille du tube.

Le driver est piloté par le tiroir automatique de l'émetteur. Celui-ci gère la tension de consigne de la commande automatique de gain (CAG) du driver et il prend en compte toutes les informations de sécurités (surtension, module en panne).

2.2 Choix technologique

Le driver comporte huit transistors FET (Field Effect Transistor) MRF 157 capables de fournir une puissance de 500 W chacun ce qui permet d'obtenir une surabondance de puissance.

Chaque paire de transistors travaille en push-pull avec un rendement de l'ordre de 50 % ce qui n'est pas un effet négatif vis-à-vis de la puissance globale consommée par l'émetteur 250 kW OC.

Le seul aléa est que le MRF 157 de Motorola est monosource mais utilisé par les militaires Américains et donc assure un suivi de fabrication et de performances.

2.3 Architecture du driver

Le driver est constitué par :

- une carte d'entrée ;
- quatre cartes de sorties ;
- une carte coupleur de sortie.

Toutes ces cartes sont fixées sur une plaque froide à circulation d'eau ;

- une carte d'interface qui se trouve dans une boîte blindée contre tout rayonnement radiofréquence ;
- un coupleur bidirectionnel qui est fixé à l'entrée du circuit d'adaptation de la grille de sortie.

2.3.1 Carte d'entrée

La carte d'entrée reçoit du synthétiseur un signal RF de + 13 dBm. Ce signal est appliqué à l'entrée d'un atténuateur variable. À la sortie de cet atténuateur on trouve une chaîne d'amplification de 40 dB.

L'atténuateur est commandé par une tension de commande issue de la carte d'interface qui sert à commander la puissance de sortie de la carte. Cette puissance de sortie est appliquée sur un diviseur de puissance 1 → 4 voies.

Chaque sortie de ce diviseur de puissance est envoyée sur l'entrée de la carte de sortie.

L'amplification de cette carte est inconditionnellement stable. Son entrée RF et ses différentes sorties ont un ROS < 2 dB.

2.3.2 Carte de sortie

La carte de sortie comprend un seul étage push-pull. Le gain de cet étage est de 17 dB. L'écart de gain entre chaque carte est inférieur à 1 dB. L'erreur de phase maximale entre cartes est inférieure à 5°.

Le signal RF de chacune des quatre cartes est appliqué à l'entrée du coupleur de sortie. L'amplificateur de chaque carte est inconditionnellement stable.

2.3.3 Coupleur de sortie

La carte coupleur de sortie reçoit sur ses quatre entrées les signaux RF issues des 4 cartes de sortie. Elle fait la sommation de ces signaux RF et applique le signal résultant à l'entrée du coupleur bidirectionnel.

Le ROS de chacune des 4 entrées et sortie est inférieure à 1,2 dB. La perte d'insertion entre chacune des entrées et la sortie est inférieure à 0,2 dB.

2.3.4 Carte d'interface

Elle fait office de contrôle et de dialogue entre le tiroir de gestion, la carte d'entrée ainsi que chacune des cartes de sortie. Toutes les commandes d'échanges entre le tiroir de gestion et la carte d'interface sont filtrées.

Elle fait office de contrôle car elle contient la fonction de contre réaction de la commande automatique de gain. Elle reçoit du coupleur bidirectionnel (placé en sortie du driver) les informations de P_i et P_r (puissance incidente et réfléchie) et de l'automatisme la tension de consigne.

Elle filtre les informations P_i et P_r puis les détecte.

La tension de P_i est comparée à la tension de consigne issue de l'automatisme. L'erreur de tension issue du comparateur est amplifiée et sert de commande de l'atténuateur qui se trouve dans la carte d'entrée.

La tension P_r est comparée à un seuil de tension représentant une puissance réfléchie de 400 W. Si P_r est < 400 W, l'asservissement se fait uniquement sur P_i . La puissance totale en sortie du driver croît et maintient une puissance incidente constante. Si P_r est \geq à 400 W, la puissance en sortie du driver s'atténue en 1/ROS. Cette fonction a pour effet de faire fonctionner l'étage de la carte de sortie dans des conditions optimales.

Les informations de bons fonctionnements des sous-ensembles sont envoyées à la carte d'interface. Ces informations sont filtrées puis envoyées à l'automatisme.

La mesure du courant consommé par les quatre cartes de sorties est faite dans la carte d'interface. Si ce courant dépasse 120 A, elle envoie à l'automatisme un signal d'alarme afin qu'il prenne la décision d'arrêt du driver pour anomalie.

2.3.5 Coupleur bidirectionnel

Le coupleur bidirectionnel mesure avec précision la puissance incidente (P_i) et la puissance réfléchie (P_r) qu'il transmet à la carte d'interface. Le couplage entre le signal d'entrée et P_i est de - 60 dB. Il en est de même entre la puissance de sortie et P_r .

2.4 Performances du driver

- Impédance d'entrée RF : 50 Ω ; ROS < 2 dB.

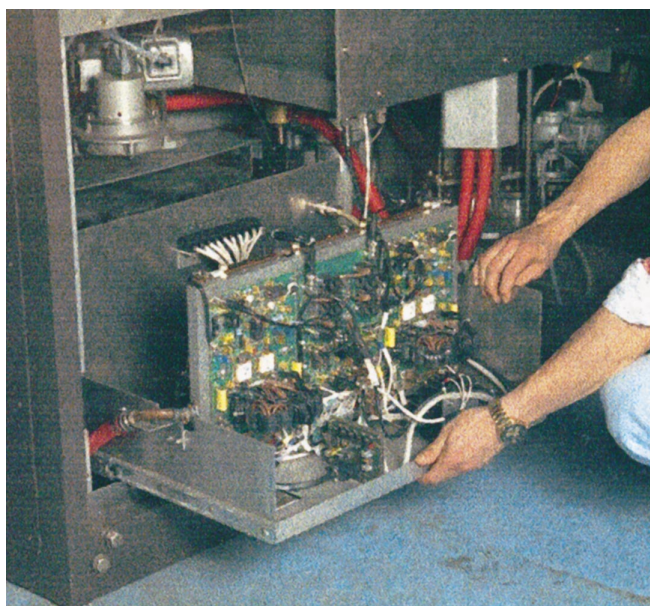


Figure 1 – Driver

- Impédance de sortie RF : 50 Ω ; ROS < 2 dB.
- Bande passante : 3 à 27 MHz.
- Puissance de sortie réglable par une tension de consigne et asservie à ± 1 dB.
- Puissance de sortie réglable de 500 W à 2,5 kW.
- Sortie RF protégée et supporte toutes désadaptations représentant tout ROS et toutes phases.
- Niveau d'entrée : 13 dBm.
- Température de fonctionnement : + 5 à 60 °C.
- Refroidissement par circulation d'eau (plaque froide).

2.5 Le driver dans son environnement

Le driver se trouve placé dans un rack amovible (figure 1) situé directement sous la grille du tube de puissance. Pour un fonctionnement optimal à des fréquences > 21 MHz. Les connections de sorties driver, grille du tube doivent être minimales.

3. Modulateur état solide

3.1 Théorie générale du modulateur

La modulation d'amplitude est définie par un signal audiofréquence modulant l'amplitude d'un signal haute fréquence (figure 2).

Un signal sinusoïdal produit une variation de gain de tension suivant la loi :

$$A = A_0 (1 + m \sin \omega t)$$

avec m commande la modulation c'est-à-dire plus m est grand, plus le gain en tension est grand. Le taux

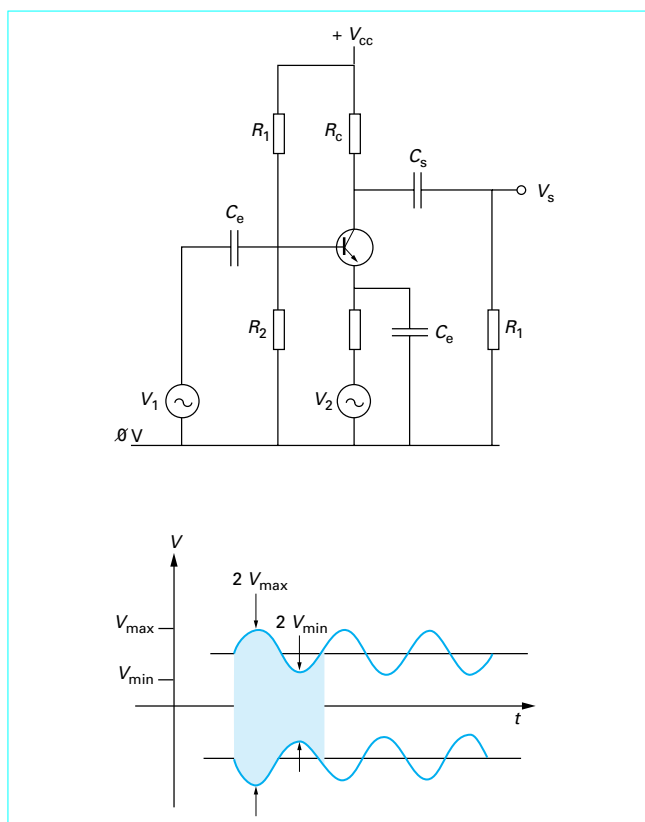


Figure 2 – Principe de la modulation d'amplitude

de modulation représente l'amplitude de modulation.

Par définition : taux de modulation = $m \times 100$ %. La tension crête-à-crête maximale est $2V_{\max}$ et la tension minimale crête-à-crête est $2V_{\min}$. Les valeurs crête-à-crête sont liées à m par la formule suivante :

$$m = \frac{2V_{\max} - 2V_{\min}}{2V_{\max} + 2V_{\min}}$$

La haute tension modulée appliquée sur l'anode du tube RF (30 kV crête) est élaborée dans le bloc modulateur état solide. Cette haute tension est obtenue par la mise en série de 48 sources de tensions DC identiques montées en série.

Le modulateur ne comporte aucun tube de puissance, mais utilise 48 IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) qui sont des transistors qui s'attaquent comme des MOS (*Metal Oxide Semiconductor*) et qui permettent de passer une forte puissance.

Une diode maintient le débit de courant dans chaque alimentation lorsque celle-ci est coupée par son IGBT. En contrôlant le nombre de modules en service à un moment donné et le moment précis de la mise « en » ou « hors » service, on obtient une reproduction fidèle du signal de modulation, superposé à un niveau de courant continu (correspondant au niveau de la porteuse), qui est ensuite appliqué à l'étage RF tube.

Pour produire les différents schémas de modulation à porteuse contrôlée, qui peuvent se traduire par des économies d'exploitation substantielles, le traitement numérique du signal permet de contrôler l'amplitude de modulation instantanée et le niveau de porteuse.

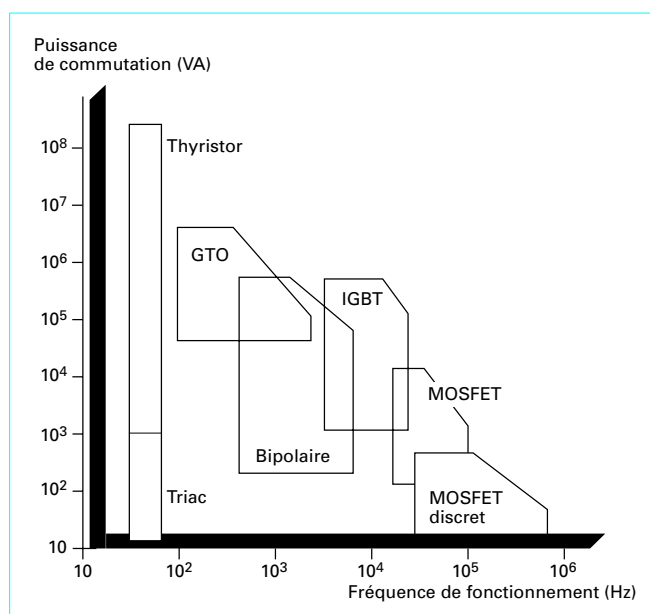


Figure 3 – Performances des familles de semi-conducteurs

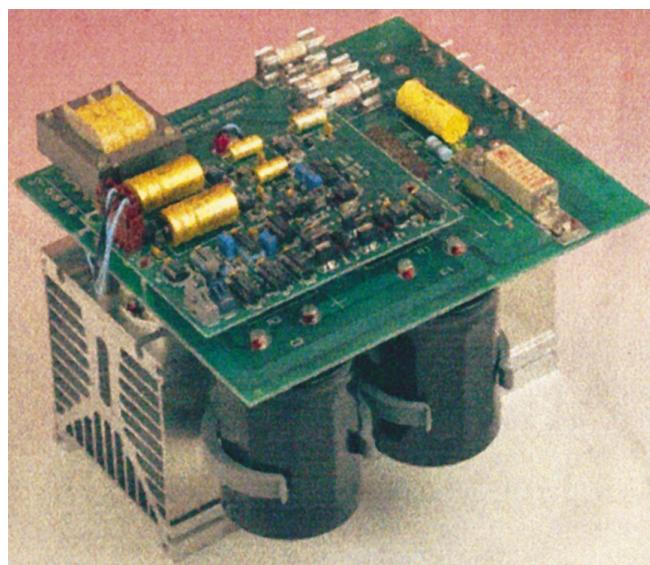


Figure 4 – Description du module

3.2 Choix technologique des composants

La fonction de commutation est réalisée grâce à un IGBT et une diode de roue libre. L'IGBT est un composant bipolaire avec une technologie de commande MOS (figure 3). Ceci sous-entend une tension de commande simple à partir d'utilisation de transistors bipolaires.

Un thyristor ou un GTO (*Gate Turn Off*) auraient nécessité des circuits de commande beaucoup plus complexes et un encombrement

supérieur. L'IGBT est réellement le composant le plus approprié à cette application.

3.3 Description physique du module

Le module est constitué de deux circuits imprimés et d'un radiateur qui est surdimensionné et a une fonction de support mécanique (figure 4).

Sur ce radiateur, sont fixés :

- le pont de diodes permettant le redressement de la tension sinusoïdale trois phases issues du transformateur multi-enroulements ;
- l'IGBT organe de commutation de puissance ;
- la diode de roue libre permettant (lorsque l'IGBT est bloqué) de refermer le chemin électrique.

Les semi-conducteurs sont interconnectés entre eux par un circuit imprimé qui a une fonction énergie. Un circuit imprimé additionnel assemblé sur le premier assure les fonctions de commande du module, protections et renvoi d'une information de bon fonctionnement.

Les informations de commande et retour sont en relation avec le tiroir de stratégie de modulation grâce à des fibres optiques. L'isolation optique est nécessaire pour isoler les potentiels des modules mis en série du tiroir de contrôle qui lui est référencé par rapport à la masse.

3.4 Tiroir de stratégie de modulation

Le tiroir de gestion du modulateur état solide utilise une technologie de forte intégration gérant le filtrage audio et les 48 modules de puissance. Ce tiroir est géré par microprocesseurs microcontrôleur et DSP (figure 5).

Le signal audio modulant est appliqué à son entrée. Ce signal est filtré par des filtres actifs passe-bas passe-haut puis est numérisé.

Il gère le mode dégradé c'est-à-dire qu'en cas de panne de modules, une reconfiguration automatique permet de continuer l'exploitation jusqu'au prochain arrêt. De là, trois modules en panne pas de changement de performances, de 4 à 7 baisse de puissance de 2 % sans augmentation de la distorsion, au huitième module en panne, arrêt de l'émetteur.

Une carte interface fibres optiques relie physiquement la gestion bas niveau aux 48 modules de puissance.

La stratégie de modulation assure les fonctions d'ajustement de puissance, taux de modulation, réduction dynamique de puissance porteuse (en suivant une courbe programmée) lorsque le signal modulant diminue, correction de bruit 50 Hz.

3.5 Performances du modulateur

Les émetteurs de radiodiffusion de l'ancienne génération présentaient deux désavantages importants :

- modulateurs comportant au moins quatre tubes de puissance en push-pull et un tube de puissance pour les modulateurs PDM (*Pulse Duration Modulation*). Leurs coûts sont importants et leurs durées de vie faible (15 000 h) ;
- le rendement de ce nouveau type de modulateur est augmenté de 15 points. Le modulateur à semi-conducteur IGBT permet de s'affranchir de ces surcoûts d'exploitation.

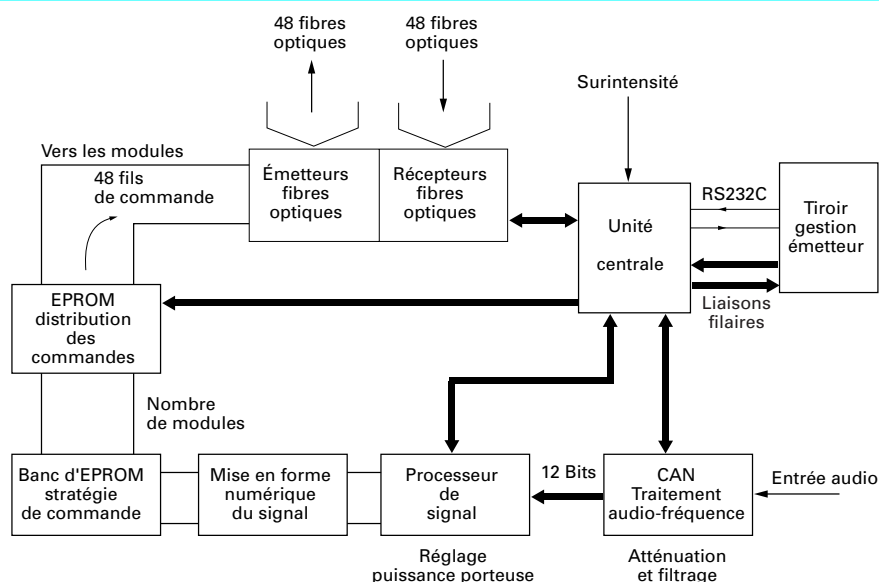


Figure 5 – Principe du tiroir de gestion du modulateur

3.6 Le modulateur dans son environnement

3.6.1 Arrangement modulateur

Pour minimiser les interconnexions électriques, les risques d'accès à des tensions dangereuses et réduire les tailles d'installation, le modulateur forme un sous-ensemble compact intégré dans la structure de l'émetteur.

Un algorithme de commutation à paramètres multiples assure une charge égale de tous les modules, quelle que soit la profondeur de modulation ou la puissance de sortie, et la continuité du fonctionnement avec une qualité élevée, même lorsque plusieurs modules sont en panne. En amont de l'émetteur on utilise une tension de 400 V alternative trois phases. Cette tension est appliquée au primaire d'un transformateur multi-enroulements comportant 48 secondaires qui alimentent les 48 modules de puissance.

L'utilisation d'un transformateur intégré unique à secondaires multiples pour alimenter les modules, associée à une intégration mécanique poussée, permet un excellent rendement, une bonne accessibilité et la meilleure sécurité possible pour le personnel. De plus, il améliore le rendement de la station, dû au fait que l'air est canalisé et évacué sans affecter le système de climatisation de la salle technique. L'architecture électrique interne du modulateur fournit un redressement double hexaphasé (12 impulsions par cycle) pour réduire les distorsions de la source d'alimentation primaire.

Le modulateur est autoprotégé contre les défauts intérieurs et extérieurs et assure une protection efficace de l'étage RF final, grâce à la coupure instantanée de la haute tension, d'abord par des circuits de protection câblés, confirmée ensuite par le logiciel du système de gestion.

Chaque module de commutation est commandé et arrêté de façon que l'on obtienne une réelle amplification du signal modulant à partir des impulsions carrées (figure 6). À chaque instant, les n

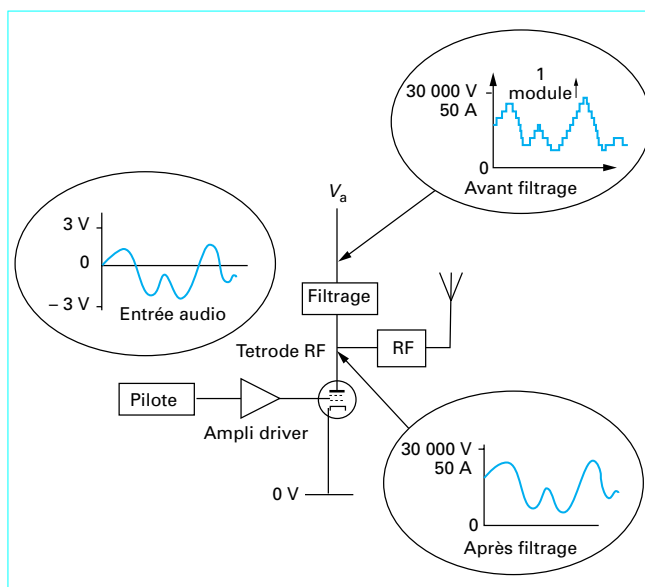


Figure 6 – Principe de modulation

modules commandés, sont tels que les tensions de sorties instantanées sont de la forme :

$$U_s \times n = U \quad (\text{où } U_s \text{ est la tension aux bornes d'un module})$$

La tension est redressée, filtrée et appliquée sur les IGBT qui se comportent comme des interrupteurs. Quarante-huit fibres optiques issues du tiroir de gestion du modulateur viennent exciter les 48 modules de puissance montés en série (figure 7).

La stratégie de modulation commande les modules de façon à ce que le point porteuse demandé soit respecté et que le signal modulé

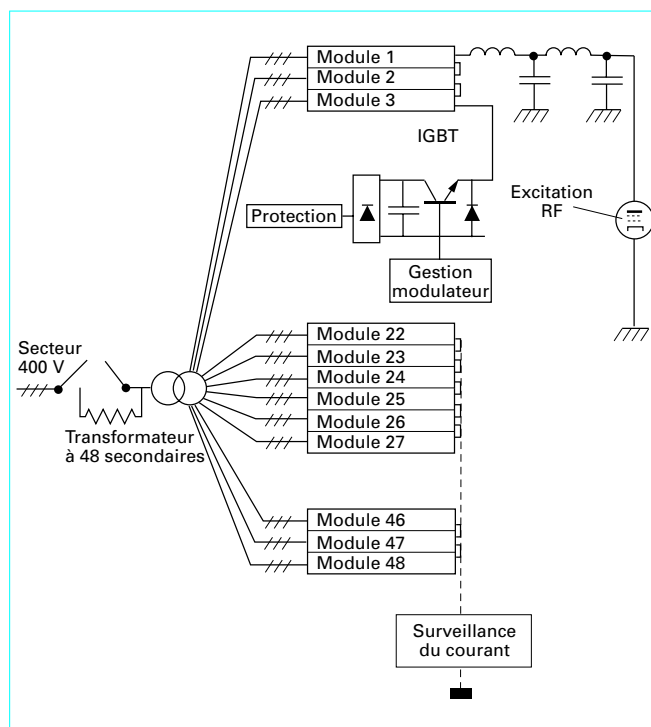


Figure 7 – Architecture du modulateur

à la sortie du modulateur soit identique à celui entrant dans l'émetteur. Une rotation automatique des modules assure la même dissipation thermique sur chaque module.

En cas de dysfonctionnement du module une information est traitée et déconnecte automatiquement le module du circuit par l'intermédiaire de deux fusibles placés sur la partie alternative. Dans ce cas une fibre optique de retour en informe la gestion centrale pour traitement et affichage du numéro du module déconnecté.

La conception extrêmement simple du module permet d'atteindre un MTBF (*Mean Time Between Failure*) pour le modulateur complet (48 modules) de l'ordre de 14 808 h à une température ambiante de 40 °C. Pour une utilisation de 16 h par jour, il y a une probabilité de panne une fois tous les 30 mois.

La redondance des modules exposée dans le précédent paragraphe n'est pas prise en compte, ce qui augmenterait considérablement le MTBF !, car il y a possibilité de changer le module défaillant pendant une période de vacation. Le module est déconnectable extrêmement facilement en tirant sur une poignée d'extraction.

Le module est testable sur table et réparable en laboratoire à l'aide d'un banc de test et des appareils rudimentaires (mesureur ohm-mètre et oscilloscope).

Le modulateur complet est refroidi par air pulsé par l'intermédiaire d'un ventilateur basse pression placé sur le toit de l'émetteur.

Les modules sont arrangés en six groupes de huit modules. Le modulateur est ventilé par une circulation d'air forcé et chaque module possède son propre canal de ventilation à travers son radiateur percé à cet effet (figure 8).

3.6.2 Alimentation en amont du modulateur

L'alimentation du modulateur est représenté sur la figure 9.

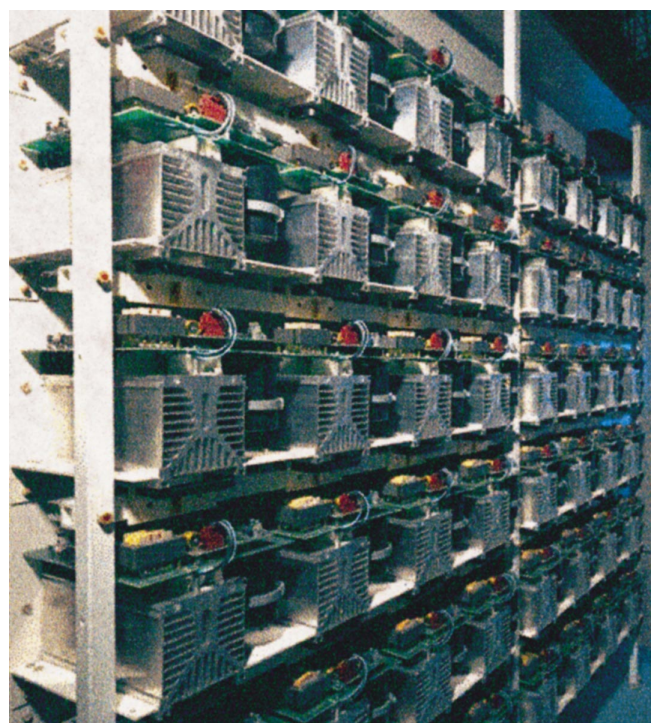


Figure 8 – Architecture mécanique du modulateur

Le premier élément est constitué d'une baie énergie située près de l'émetteur. Cette baie comprend principalement un disjoncteur et un court-circuiteur.

Quand l'émetteur démarre la haute tension est appliquée à travers une résistance de limitation pour limiter le courant de charge des condensateurs de filtrage des modules. Dès que ceux-ci sont chargés, le court-circuiteur strappe les résistances de limitation.

Le disjoncteur protège l'équipement en cas de défaut majeur de l'émetteur. La baie énergie fournit 400 V, trois phases alternatives au transformateur 48 secondaires. La moitié est câblée en étoile et la moitié en triangle. Chaque enroulement est connecté à un module.

Le modulateur contrôle le tube RF entre anode et cathode.

Un capteur à effet Hall situé dans le circuit de retour du modulateur (point froid) détecte une éventuelle surintensité due à un court-circuit dans le tube RF. Cette information est envoyée vers la gestion centrale qui par blocage rapide stoppe les impulsions de commande des modules.

3.6.3 Transformateur multienroulement

Le transformateur sec (sans huile) est un élément essentiel du modulateur. Le primaire est câblé en bandes c'est pourquoi la tension d'entrée doit être basse.

Ce genre de câblage fournit une distribution naturelle des ampères tours même si un ou plusieurs modules sont en panne.

Au secondaire, l'isolement entre enroulements doit supporter la tension maximale de 30 kV.

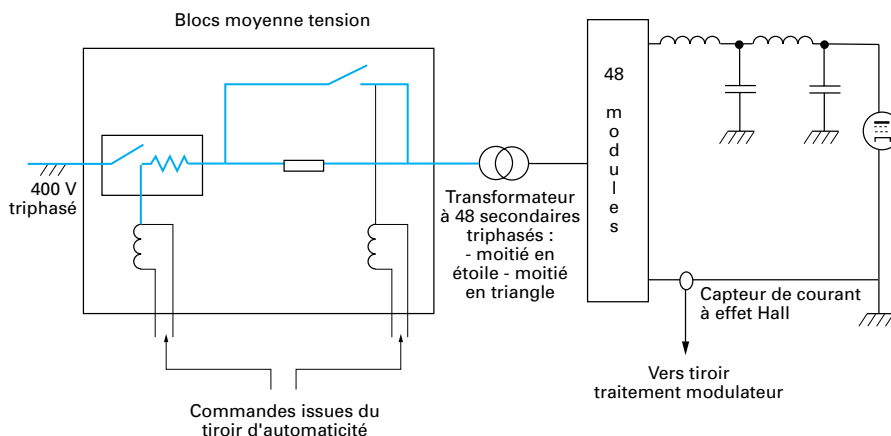


Figure 9 – Alimentation du modulateur

3.7 Sécurité

Avant toute intervention sur le modulateur, tous les modules doivent être mis à la masse et les condensateurs déchargés.

Une mise à la terre manuelle et visible permet de s'assurer de la mise hors tension des éléments dangereux (condensateurs de filtrage).

4. Accord automatique de l'émetteur

4.1 Description

Le système d'accord de l'émetteur commande et contrôle les positions des composants variables, et éventuellement de certains composants accordables extérieurs, tandis que le synthétiseur est commandé directement par l'unité de commande d'exploitation. Le circuit est entièrement numérique.

Le servomécanisme de chaque composant variable comporte un moteur pas à pas, directement couplé avec un codeur optique. Ce système permet de lire la position absolue précise des composants variables.

Les informations sont fournies sur 12 bits, ce qui correspond à 4 096 pas. Le système d'accord de l'émetteur calcule le nombre de pas entre la position commandée et la position réelle. Le nombre de pas nécessaire à effectuer par le moteur est ensuite envoyé aux servo-amplificateurs à travers l'oscillateur à rampe. La nouvelle position est atteinte avec une tolérance de quelques pas seulement.

Le faible jeu mécanique du système d'entraînement est compensé en réalisant les derniers pas toujours dans le même sens. Le moteur sera actionné directement à la position requise ou dépassera délibérément celle-ci pour y retourner ensuite, afin de toujours effectuer la dernière partie du mouvement dans la même direction. Si la précision requise n'est pas obtenue, deux autres tentatives sont effectuées avant de déclarer le système en défaut.

La position de chaque composant individuel peut être affichée sur la face avant de l'émetteur. En commande manuelle, trois vitesses sont disponibles : rapide, lente, pas à pas.

Grâce aux techniques numériques utilisées, le positionnement est absolu, donc extrêmement précis et stable à long terme, ce qui exclut totalement les effets d'oscillation autour d'une position.

4.2 Changement de fréquence

Le système d'accord de l'émetteur possède une mémoire spécifique dans laquelle il stocke les informations de position de tous les composants variables pour chaque fréquence de référence.

Ces fréquences de référence et ces informations de position constituent en fait le tableau d'accord intégré de l'émetteur, sur lequel tous les modes de fonctionnement sont basés.

4.2.1 Mode manuel

On effectue un accord grossier à partir de la position de référence la plus proche de la fréquence désirée. L'accord fin sera ensuite réalisé manuellement selon la méthode traditionnelle pour obtenir les meilleures performances de l'émetteur.

Les réglages obtenus peuvent bien entendu être mémorisés pour une réutilisation ultérieure en mode accord automatique sur fréquences pré-réglées. 999 fréquences, numérotées de 01 à 999, peuvent être mémorisées de la sorte, ces fréquences pré-réglées venant s'ajouter aux fréquences de référence au tableau d'accord.

4.2.2 Mode accord automatique sur fréquences pré-réglées

Lorsque les paramètres pour une fréquence donnée se trouvent déjà en mémoire, il suffira pour y accéder d'entrer simplement le numéro du canal (01 à 999). Tous les composants variables sont immédiatement placés sur les positions mémorisées.

Au fur et à mesure que la puissance porteuse est établie, le système procède à l'adaptation dynamique de la charge à partir de la position mémorisée. La modulation est appliquée dès que la puissance porteuse nominale est atteinte.

4.2.3 Réglage automatique d'une nouvelle fréquence

Dans ce mode, l'émetteur peut être démarré automatiquement sur une fréquence qui n'a jamais été utilisée auparavant, c'est-à-dire pour laquelle les paramètres de positionnement ne sont pas mémorisés.

L'opérateur tape simplement la fréquence désirée en Hertz et valide. Par l'intermédiaire d'un processus d'interpolation linéaire le système d'accord de l'émetteur calcule la position de tous les éléments, l'interpolation s'effectuant entre les fréquences de référence les plus proches. À partir de ce moment, le fonctionnement est semblable au réglage automatique à partir des fréquences pré-réglées.

4.2.4 Accord automatique de charge (antenne)

L'émetteur change de fréquence environ toutes les deux heures et également d'antenne lorsque la fréquence d'émission est incompatible de la fréquence de l'antenne précédente.

Deux sondes de mesures sont connectées sur le feeder à la sortie de l'émetteur avant le Π d'adaptation. Ces sondes ayant leur directivité réglée ; leurs informations RF sont transmises à une carte de traitement directement connectée sur les sondes par l'intermédiaire de deux fiches coaxiales.

Cette carte de traitement est constituée d'un circuit imprimé comportant un système d'échantillonnage commandé par un DSP. En sortie on obtient (par l'intermédiaire de fibres optiques) des informations numériques envoyées à un tiroir de commande.

Celui-ci (grâce à ces informations) suivant un algorithme, commande des moteurs pour accorder l'émetteur chargé par une nouvelle antenne.

Le point situé juste avant le Π de sortie doit être réel pour éviter des surtensions qui pourraient détruire des condensateurs sous vide ou inductances.

Le circuit de sortie est donc capable de supporter un ROS de 2. Une réduction de puissance est apportée entre des ROS de 2 à 3 ; puis coupure de l'émetteur pour un ROS de 3.

5. Contrôle et téléexploitation

5.1 Commande et contrôle

Ces fonctions sont à base de microprocesseurs. En plus des mesures fournies par les instruments traditionnels, l'utilisateur est informé en permanence de l'état de fonctionnement de l'émetteur et de toutes les données techniques importantes, grâce à des messages affichés sur un moniteur vidéo couleur.

Pour faciliter l'exploitation, l'émetteur comporte également un système d'aide au diagnostic. En cas de défaut, et lorsque le système est actif, le moniteur vidéo fournit à l'opérateur une liste logique des causes probables du défaut avec les moyens permettant de les vérifier.

5.2 Télécommande

L'émetteur peut être entièrement commandé et surveillé à distance à travers une interface RS 232C à partir d'une unité de télécommande. Toutes les opérations réalisées à partir de la face avant peuvent être commandées à distance.

L'émetteur reçoit en outre une imprimante (journal de bord) ce qui permet à l'exploitant de suivre les événements au fil de l'eau.

5.3 Système d'exploitation

L'exploitation de l'émetteur est assurée en mode local à partir de claviers spécifiques situés en face avant.

En exploitation à distance, l'émetteur est commandé à partir d'une unité de téléexploitation via une interface RS 232C.

Le dialogue interne se déroule à travers un bus IEEE 488.

Le système de contrôle d'exploitation est également en mesure de contrôler les périphériques extérieurs associés à l'émetteur, par exemple un balun intérieur accordable.

5.4 Système de gestion de l'émetteur

L'émetteur possède une unité de gestion de la deuxième génération.

L'émetteur bénéficie de l'expérience, longue de plusieurs années, acquise par sa famille d'émetteurs PDM (*Pulse Duration Modulation*), dans lesquels ce type de système de gestion est apparu pour la première fois dans le monde de la radiodiffusion de puissance.

Le système de gestion de l'émetteur est basé sur une unité centrale à microprocesseur, des cartes d'interface assurant l'échange de données entre le système de télécommande, ou l'opérateur, et les sous-ensembles internes de l'émetteur.

Dans sa version standard, l'émetteur possède en face avant un moniteur vidéo couleur affichant en permanence son état de fonctionnement. L'unité centrale assure le comptage et la corrélation des défauts survenus en cours d'exploitation. Ces informations sont affichées successivement sur le moniteur, qui permet à l'unité centrale d'afficher une analyse statistique des défauts, la corrélation entre les défauts ainsi qu'une liste des vérifications et des interventions à réaliser dans l'ordre.

Le programme d'analyse des défauts est appelé « aide au diagnostic ». Il permet de tracer la chronologie d'un défaut. Cela est très utile pour la localisation d'un défaut puisque certains défauts sont juste la conséquence d'un défaut d'origine.

L'émetteur est équipé d'une imprimante qui, lorsqu'elle est activée, imprime le journal de bord de l'émetteur. Il s'agit d'une liste chronologique et horodatée de tous les événements, indiquant les différents changements d'état intervenus en cours de fonctionnement de l'émetteur, y compris une liste des défauts.

L'unité de commande de l'émetteur possède une interface RS 232C permettant la télécommande intégrale de l'émetteur, plus particulièrement à partir d'une salle de contrôle informatisée.

5.5 Tiroir de traitement audio

Cet ensemble permet à l'opérateur par l'intermédiaire du tiroir de gestion de :

- choisir le niveau de puissance RF : puissance nominale, demi-puissance ou variation continue du niveau de puissance ;
- régler le niveau AF dans la gamme de ± 10 dB par paliers de 0,1 dB ;
- choisir le mode d'exploitation, c'est-à-dire A3E (avec ou sans modulation trapézoïdale), A3E + DCC, H3E (BLU – 6 dB) et R3E (BLU – 12 dB).

5.6 Tiroir de commande de fréquence

Sur le panneau de commande de la fréquence, l'opérateur peut commander un changement de la fréquence porteuse, soit par une valeur de fréquence, soit par un numéro de canal préréglé.

Ce panneau regroupe les organes de réglage de tous les composants variables et affiche la position de ces circuits. Au-dessus de cet ensemble, un panneau de mesure équipé d'instruments individuels permet de contrôler et de mesurer les principaux paramètres des circuits réglés pendant les opérations d'accord manuels.

5.7 Dialogue interne

■ Commande du synthétiseur, tiroir de traitement audio et tiroir de commande de fréquence à travers le bus IEEE 488 interne.

■ Surveillance des informations d'alarme qui, sans arrêter le fonctionnement de l'émetteur, sont destinées à avertir l'opérateur en cas de mauvais fonctionnement.

■ Surveillance des sécurités statiques ou électrotechniques ; ces informations entraînent la coupure de l'émetteur.

■ Contrôle du processus de traitement des défauts dynamiques et fuitifs : dans ce cas, les défauts, susceptibles d'entraîner l'arrêt de l'émetteur, sont comptés et intégrés.

5.8 Dispositifs de sécurité

L'émetteur est autoprotégé par des sécurités internes contre tous les défauts susceptibles d'empêcher le bon fonctionnement de ses sous-ensembles. L'origine de ces défauts peut se situer dans l'émetteur lui-même, ou dans un élément extérieur totalement indépendant de l'émetteur.

Dans ce cas, la sécurité interne de l'émetteur réagira également, assurant en fait la protection de ces éléments extérieurs.

Les trois niveaux de protection de l'émetteur sont les suivants :

— premier niveau : défauts fuitifs, par exemple amorçage d'un éclateur, surintensité dans les électrodes du tube, cause extérieure telle que ROS trop élevé. Dans ce cas, la haute tension est coupée dans un délai d'environ 10 μ s pendant un temps de 0,5 s ;

— deuxième niveau : dans l'éventualité de défauts fuitifs répétés, l'intégrateur répond, trois blocages en 12 s sont autorisés, avec remise à zéro automatique à la douzième seconde. Si un quatrième défaut fuitif intervient avant la seizième seconde, l'émetteur passe automatiquement à mi-puissance. Si un nouveau cycle de quatre défauts se produit en moins de 16 secondes, l'émetteur sera arrêté ;

— troisième niveau : dans le cas d'un défaut statique ou électrotechnique, c'est-à-dire d'un défaut permanent, l'émetteur sera bloqué et arrêté.

6. Conclusions

6.1 Implantation générale et structure

L'émetteur 250 kW ondes courtes complet s'installe sur un seul niveau et ne demande pas de canalisations au sous-sol.

Physiquement, il se compose d'un bloc émetteur installé à l'intérieur du bâtiment, tandis que l'implantation des ventilateurs et de l'échangeur thermique eau/air dépend de la configuration du site.

Le bloc émetteur est assemblé en usine et peut être conteneurisé. Ce bloc contient tous les composants de l'émetteur, à l'exception des ventilateurs, de l'armoire basse tension et de l'échangeur thermique eau/air extérieur.

Le bloc émetteur comprend :

— une face avant constituée par un châssis 19 pouces contenant le tiroir de gestion de l'émetteur, le tiroir de gestion de fréquence, les servo-amplificateurs et l'étage AF ;

— un autre châssis en face avant renferme la platine électrotechnique et le régulateur de tension automatique pour les étages de puissance ;

— un troisième contient les composants hydrauliques nécessaires au refroidissement pompe, bûche de réserve, système de régénération d'eau, résistivimètre et débitmètres. Le synthétiseur fait également partie de cet ensemble.

Derrière les unités de la face avant se trouvent :

— le modulateur état solide avec ses modules état solide et son transformateur ;

— le bloc RF comprenant l'amplificateur de puissance intermédiaire à transistors MOSFET, l'amplificateur de puissance à tube unique et les circuits de la chaîne RF.

6.2 Structure modulaire de l'émetteur 250 kW

Résultat d'une intégration extrêmement poussée, l'émetteur est réalisé sous forme d'un bloc assemblé en usine.

Son encombrement au sol est limité à 11,7 m².

Le bloc contient tous les composants nécessaires au fonctionnement de l'émetteur, à l'exception des ventilateurs, de l'armoire basse tension et de l'échangeur thermique eau/air refroidi par air.

Dans la mesure du possible, les fonctions électriques de l'émetteur sont modulaires et indépendantes.

La maintenance, assurée par des ensembles remplaçables en ligne LRU (*Line Replaceable Units*), est favorisée par la bonne accessibilité de la structure modulaire indépendante.

6.3 Système de refroidissement de l'émetteur 250 kW

L'émetteur est refroidi par eau et par air.

L'anode du tube de l'amplificateur de puissance, le radiateur des transistors MOSFET de l'amplificateur de puissance intermédiaire et les inductances et condensateurs RF de puissance sont refroidis par eau.

Le modulateur état solide est refroidi par air.

L'air de refroidissement pour l'émetteur est fourni par un ventilateur haute pression (pour le socle du tube de l'amplificateur de puissance et les composants RF) et par un ventilateur basse pression (pour le modulateur état solide). Les ventilateurs peuvent être montés sur l'émetteur ou installés à part.

L'air chaud évacué de l'émetteur peut être canalisé, ce qui permet de limiter ses effets sur le chauffage et le refroidissement de la salle d'émission.

6.4 Sécurité et protection du personnel

Le personnel d'exploitation et de maintenance des équipements bénéficie d'un niveau de sécurité élevé (CEI 215).

La sécurité du personnel est assurée par un système de mise à la terre, associé à un système de verrouillage qui empêche l'accès aux tensions mortelles.

L'équipement est autoprotégé contre les surcharges et autres défauts.

En outre, il convient de signaler que la construction monobloc de l'émetteur, réduit considérablement le risque d'accidents (absence d'interfaces potentiellement dangereuses entre différents blocs de l'émetteur).

Pour assurer la protection du personnel, le système de sécurité de l'émetteur a été conçu en conformité avec les « Règles de sécurité pour matériels émetteurs » (EN 60215).

Toutes les parties soumises à des hautes tensions dangereuses sont entièrement entourées de panneaux métalliques suffisants ou situées derrière des portes. Toutes les parties métalliques sont mises à la terre. Chaque bloc, armoire ou ensemble est relié au système général de mise à la terre de l'émetteur.

Un système de verrouillage empêche l'accès à l'intérieur des équipements, avant d'avoir coupé les tensions dangereuses et mis à la terre l'ensemble des circuits haute tension, y compris les condensateurs. La mise à la terre reste effective pendant l'accès à l'intérieur du bloc émetteur. La position « à la terre » du sectionneur est visible.

Pour prolonger la durée de vie du tube il est souhaitable de maintenir le chauffage. C'est pourquoi, la basse tension (secteur triphasé

et tension de chauffage à intensité élevée) est maintenue dans les parties concernées. Toutes les mesures sont prises pour empêcher le contact accidentel avec les équipements sous basse tension pendant les opérations de maintenance. Néanmoins il sera toujours possible de couper cette basse tension en totalité.

6.5 Fiabilité, disponibilité et maintenabilité

La fiabilité de l'émetteur est basée sur une conception simple et soignée des circuits, l'utilisation de composants surdimensionnés de qualité, et des contrôles de qualité approfondis.

La maintenance occupe une place primordiale dans la conception et le développement des émetteurs de radiodiffusion de Thomcast. Notre concept de maintenance est basé sur une réparation rapide et facile des équipements par le personnel de la station.

En association avec la modularité des équipements et leur organisation, un équipement de test intégré (BITE *Built In Test Equipment*), comprenant la liste des défauts mémorisés et une fonction d'aide au diagnostic, permet à l'opérateur de localiser les défauts et de déterminer le LRU à remplacer, assurant ainsi un excellent niveau de disponibilité opérationnelle.

Émetteurs ondes courtes de radiodiffusion 250 kW

par **Guy PELLET**

*Chef du Laboratoire Étude Émetteurs ondes longues, ondes moyennes, ondes courtes
de radiodiffusion Thomcast*

Bibliographie

de BOISRIOU (P.) . – *Dispositif de traitement et de précorrection d'un signal audiofréquence avant son amplification dans une chaîne*

d'amplification d'un émetteur à modulation d'amplitude. Brevet français 92 06836 du 05/06/92.

DARGES (B.). – *Étage d'excitation d'un tube d'émission pour émetteur à ondes courtes. Brevet français 92 07884 du 26/06/92.*

Normalisation

UIT-R SM.326-6 Détermination et mesure de la puissance des émetteurs radioélectriques.

UIT-R SM.328-8 Spectres et largeurs de bande des émissions.

UIT-R SM.329-6 Rayonnements non essentiels.

UIT-R S.560-3 Rapport de protection RF en radiodiffusion en ondes kilométriques, hectométriques et décimétriques.

UIT-R BS.639 Largeur de bande nécessaire à l'émission pour la radiodiffusion à ondes kilométriques, hectométriques et décimétriques.

UIT-R BS.640-1 Système à bande latérale unique (BLU) en radiodiffusion à ondes décimétriques.

IEEE-587 Protections contre la foudre.

CEI-215 : 1987 Règles de sécurité applicables aux matériels d'émission radioélectrique.

NFC 03270 classe C1 et C2 Résistance des câbles électriques à la propagation du feu.

ISO 1999 : 1990 Acoustique. Détermination de l'exposition au bruit en milieu professionnel et estimation du dommage auditif induit par le bruit.

Constructeurs

Continental Electronics Corp.
Telefunken Sendertechnik GmbH.

Thomcast.
Riz Transmitter Co.