

Système DRM de radiodiffusion numérique

par **Patrick BUREAU**

*Responsable marketing radio du groupe Thomcast
Chef du programme Radionumérique en AM*

et **Pierre CLOUET**

Traducteur

1. Standard DRM	TE 6 145 - 3
2. Tests d'évaluation en laboratoire	— 7
3. Première phase d'essais terrain	— 10
4. Conclusion	— 15
Références bibliographique	— 15

DRM (Digital Radio Mondiale) est un consortium international à but non lucratif de plus de soixante membres ayant comme unique objectif le développement d'un standard mondial de diffusion numérique dans les bandes de radiodiffusion en AM (modulation en amplitude) au-dessous de 30 MHz. Le consortium DRM comprend des représentants des radiodiffuseurs, des opérateurs de réseaux, des fabricants de récepteurs, d'émetteurs et de semi-conducteurs, des instances de régulation et de réglementation, des syndicats de radiodiffuseurs, des universités et des centres de recherche et l'Union internationale des télécommunications (UIT).

Il est temps d'être plus confiant quant au devenir du futur système sachant que DRM a dès mi-janvier 2000, soumis à l'UIT sa proposition de recommandation pour un standard de diffusion numérique en grandes ondes (OL), ondes moyennes (OM) et ondes courtes (OC).

DRM a d'ores et déjà établi une première mondiale, car en moins de deux ans, une proposition de recommandation de standard numérique mondial a été soumise à l'UIT. Ce défi exceptionnel a été possible uniquement grâce à une stratégie ambitieuse basée sur le temps de mise sur le marché et appuyée par une approche technique itérative. Bénéficiant d'études avancées dans le domaine numérique effectuées en amont par différents membres de DRM et du grand avantage de pouvoir s'appuyer dans ses différents groupes de travail techniques sur la plupart des meilleurs experts mondiaux en conception de modems et de codecs, DRM a pu construire une proposition de standard dans un laps de temps très court. Partant des blocs de base proposés et bénéficiant des technologies les plus avancées en traitement numérique du signal et en compression du son, DRM a principalement travaillé à un processus d'amélioration qui se finalise aujourd'hui par un système flexible représentant le meilleur compromis entre les exigences commerciales et techniques et capable de satisfaire les demandes les plus variées en matière de radiodiffusion.

Flexibilité et efficacité sont les mots clés du développement du standard numérique DRM pour la radiodiffusion dans les bandes AM.

Le standard DRM, à travers une sélection appropriée du mode d'exploitation, offre la flexibilité nécessaire permettant à un radiodiffuseur d'obtenir un équilibre optimal entre la capacité/qualité et la fiabilité/robustesse de ses services.

Par exemple, il est possible d'obtenir :

- *une couverture à grande échelle à partir d'un émetteur existant en utilisant un mode robuste ;*
- *une couverture identique à une transmission analogique mais avec une qualité globale améliorée ;*
- *une meilleure efficacité spectrale, par exemple :*
 - *en transmettant deux services ou plus simultanément sur le même canal,*
 - *en utilisant un réseau isofréquence pour couvrir une large zone avec une seule fréquence ;*
- *des zones de couverture similaires de jour comme de nuit pour une diffusion locale en OM en changeant le mode de transmission à l'aube et au crépuscule.*

Du point de vue de l'auditeur, le standard DRM offre de nouvelles fonctionnalités très attrayantes :

- *une sélection et une identification automatique des services en utilisant les informations diffusée en ligne ;*
- *le recalage automatique et transparent sur des fréquences alternatives diffusant le même programme ;*
- *la réception d'informations associées au programme diffusé.*

Principaux sigles utilisés	
AAC	Audio Advanced Coding
AM	Modulation d'amplitude
DLB	Double bande latérale
DRM	Digital Radio Mondiale
EP	Equal Protection
FAC	Fast Access Channel
IML	Impulsion modulée en largeur
LUF	Lowest Usable Frequency
MLC	Multi Level Coding
MSC	Main Service Channel
MUF	Maximum Usable Frequency
OC	Ondes courtes
OL	Grandes ondes
OM	Ondes moyennes
PRBS	Pseudo-Random Binary Sequence
PSM	Pulse Step Modulation
SB/B	Rapport signal sur bruit
SBR	Spectral Band Replication
SDC	Service Description Channel
TEB	Taux d'erreurs binaire
UEP	Unequal Error Protection
WSSUS	Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering Model

1. Standard DRM

1.1 Vue d'ensemble

Le système DRM est conçu pour être utilisé à n'importe quelle fréquence inférieure à 30 MHz, c'est-à-dire dans les bandes de radiodiffusion en grandes ondes (OL), ondes moyennes (OM) et ondes courtes (OC), avec des contraintes variables de canalisation et de condition de propagation relatives à chacune de ces bandes.

Afin de satisfaire à ces contraintes opérationnelles, différents modes de transmission sont disponibles. Un mode de transmission est défini par des paramètres de transmission classés selon deux types :

- paramètres relatifs à la bande passante du signal transmis ;
- paramètres relatifs à l'efficacité de la transmission.

Le premier type de paramètres définit la largeur de bande en fréquence et la structure pour une transmission. Les largeurs des canaux actuels alloués pour la radiodiffusion AM dans les bandes de fréquences inférieures à 30 MHz sont de 9 kHz et de 10 kHz. Le standard DRM est conçu pour être utilisé :

- à l'intérieur de ces bandes passantes nominales, afin de satisfaire à la situation actuelle ;
- à l'intérieur de canaux multiples de 4,5 kHz (moitié de 9 kHz) ou de 5 kHz (moitié de 10 kHz), afin de permettre la diffusion simultanée d'un programme AM analogique et d'un programme numérique ou pour permettre une plus grande capacité de transmission où et quand les contraintes de planification en fréquence permettront de tels aménagements.

Il peut aussi éventuellement permettre des largeurs de bandes plus élevées qui ne sont pas strictement comprises dans la canalisation UIT, mais qui permettraient d'augmenter la capacité du système dans des conditions d'interférence favorables.

Quelle que soit la valeur du paramètre de bande passante du signal, les paramètres relatifs à l'efficacité de transmission sont définis pour permettre un choix entre la capacité (débit utile) et la résistance au bruit, aux multitrajets et aux effets Doppler.

Ces paramètres sont de deux types :

- les taux de codage et les paramètres de la constellation de modulation (modulation à N états de phase sur un ensemble de porteuses), définissant le code et les constellations utilisés pour transporter les données ;
- les paramètres des symboles OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) définissant la structure des symboles OFDM à utiliser en fonction des conditions de propagation. Les modes ainsi définis sont appelés « *Ground Wave mode* », « *Sky Wave mode* » et « *Highly Robust mode* ».

1.2 Architecture générale

Ce paragraphe présente l'architecture générale du système DRM, basée sur le schéma synoptique de la figure 1. Ce schéma décrit le flux général des différentes classes d'informations (audio, données...) et ne différencie pas les différents services qui peuvent être compris dans une ou plusieurs classes d'informations.

Le **codeur de source** et le **préencodeur** assurent l'adaptation du flux d'entrée dans un format approprié de transmission numérique. Dans le cas d'un codage de source audio, cette fonctionnalité inclut des techniques de compression audio. La sortie des codeurs de source et le précodeur de données peuvent comprendre deux parties distinctes demandant deux niveaux de protection différents dans le codeur canal. En fonction de la sélection, tous les services utiliseront le même ou les deux niveaux de protection.

Le **multiplexeur** combine les niveaux de protection de tous les services de données et audio.

Le **brouilleur de dispersion d'énergie** effectue un complément sélectif et déterministe des bits afin de réduire la possibilité que des motifs systématiques ne donnent une régularité involontaire dans le signal transmis.

Le **codeur canal** ajoute des informations redondantes comme un moyen d'avoir des transmissions quasiment sans erreurs et définit la répartition sur les cellules QAM des informations numériquement codées.

Les **entrelaceurs** répartissent les cellules QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) consécutives en une séquence de cellules séparées quasiment au hasard en temps et en fréquence, afin de fournir une transmission robuste dans les canaux dispersifs temps-fréquence.

Le **générateur de références** (temps, fréquence, gain) apporte le moyen d'estimer à la réception la réponse du canal de transmission, permettant ainsi une démodulation cohérente du signal.

Le **répartiteur de cellules OFDM** collecte les différentes classes de cellules et les place sur la grille temps-fréquence.

Le **générateur de signal OFDM** transforme chaque ensemble de cellules de même index temporel en une représentation du signal dans le domaine temporel. Consécutivement, le symbole OFDM est obtenu à partir de cette représentation dans le domaine temporel en insérant un intervalle de garde comme une répétition cyclique d'une portion de signal.

Le **modulateur** convertit la représentation numérique du signal OFDM en un signal analogique qui sera transmis. Cette opération fait intervenir une conversion numérique-analogique et un filtrage qui doivent se conformer aux exigences de pureté spectrale.

« Trois années pour aboutir »

La première année fût principalement utilisée à la mise en place d'une procédure de test d'évaluation en laboratoire permettant de faire le bon choix entre les différentes solutions techniques et les architectures proposées pour les principaux blocs de base du système final. À la fin de cette phase, un premier système DRM version 0 a été défini pour être utilisé comme référence de comparaison avec toute nouvelle proposition de solution d'amélioration.

La seconde année fût utilisée afin de trouver la meilleure solution pour améliorer chaque bloc de base pour atteindre les spécifications du système final proposé aujourd'hui. Chaque nouvelle amélioration ou nouvelle fonctionnalité a été adoptée après une étape de validation incluant, au minimum, les résultats de simulation montrant les avantages de la nouvelle solution d'après des critères prédéfinis. Il faut en outre signaler que pour chaque étape d'évaluation ou de validation ayant impliqué de nouvelles idées ou fonctionnalités, il a été bien souvent nécessaire de développer, dans les délais impartis, des moyens d'évaluation et de validation dédiés : soit sous la forme d'outils de simulation, d'adaptations logicielles ou matérielles, soit sous la forme d'équipements numériques ou de kits de modification.

La troisième année a été utilisée pour optimiser, valider et qualifier le système final afin d'aboutir fin 2001 à un système numérique DRM en voie de standardisation et de qualification.

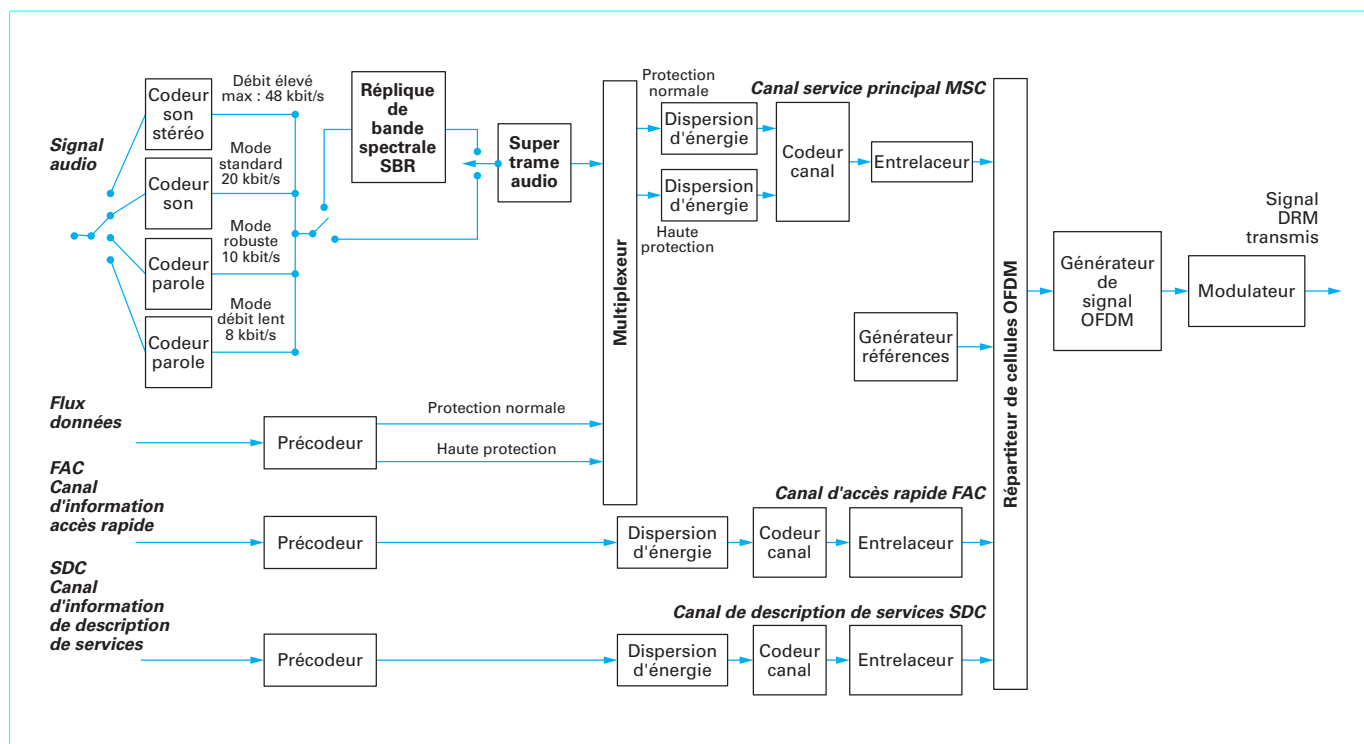


Figure 1 – Système DRM : principe de génération du signal numérique

1.3 Description générale

1.3.1 Codage de source

Compte tenu des contraintes liées à la réglementation des canaux de radiodiffusion dans les bandes de fréquences inférieures à 30 MHz et des paramètres de codage et de modulation appliqués, le débit utile disponible pour le codage de source varie de 8 kbit/s (canaux à faible bande passante) jusqu'à 48 kbit/s (deux canaux regroupés) en passant par 20 kbit/s (canaux HF standard).

Afin d'assurer une qualité optimale à un débit donné, le système offre deux combinaisons différentes de codeur source : un sous-ensemble MPEG-4 AAC (*Audio Advanced Coding*) et un codeur de parole CELP (*Code Excited Linear Prediction*).

Nota : MPEG : Motion Picture Expert Group

■ Codage audio AAC

Le codage audiogénérique utilise un sous-ensemble de la boîte à outils MPEG-4 AAC. Par exemple, une configuration standard pour un usage en ondes courtes pourrait délivrer 20 kbit/s de débit utile en mono AAC.

Les fonctionnalités spécifiques d'un flux AAC sont :

- l'ajustabilité : le flux numérique AAC a le format d'une couche de base d'un flux numérique AAC ajustable. Cela assure que les futures extensions seront compatibles avec les versions précédentes au moyen d'un codage audiovariable (= hiérarchique) ;
- le débit : l'AAC peut être utilisé à n'importe quel débit ;
- la fréquence d'échantillonnage : les fréquences d'échantillonnage autorisées sont 12, 24 ou 48 kHz ;
- la longueur de transformation : la longueur de transformation est de 960 échantillons. Cela assure qu'une trame audio correspond à 80 ms (960 échantillons à 12 kHz), 40 ou 20 ms. Cela est requis

pour harmoniser les longueurs de trame CELP et AAC et ainsi autoriser la combinaison d'un nombre entier de trames audio pour construire une supertrame audio de 400 ms, synchrone de la trame de transmission ;

- la résistance aux erreurs : des outils MPEG-4 sont utilisés pour améliorer la résistance aux erreurs d'un flux AAC. Cela améliore les performances du codeur pour les canaux de transmission prédisposés aux erreurs ;

- le supertramage audio : 5 (12 kHz), 10 (24 kHz) ou 20 (48 kHz) trames audio sont réunies en une supertrame audio qui correspond toujours à 400 ms. Les trames audio dans la supertrame audio sont codées ordinairement pour que chaque supertrame audio ait une longueur constante, c'est-à-dire qu'un échange de bits entre trames audio n'est possible que dans une même supertrame audio. Une supertrame audio est toujours transmise en une trame de transmission. De cette façon, aucune synchronisation supplémentaire n'est nécessaire pour le codage audio. La reconnaissance des limites de trames et les données pour l'UEP (*Unequal Error Protection* – protection inégale des erreurs) sont aussi comprises dans la supertrame audio ;

- l'UEP : une meilleure dégradation progressive et un meilleur fonctionnement à haut TEB (taux d'erreur binaire) est assuré en appliquant l'UEP au flux AAC. L'UEP est réalisé via les unités de multiplexage et de codage.

■ Codage CELP

Un codeur de parole CELP est intégré dans le système DRM pour permettre une qualité acceptable à des débits sensiblement inférieurs aux débits standards (par exemple « demi-débit » à 8 kbit/s).

Alors que le codeur AAC peut être utilisé à de tels faibles débits, en offrant encore une qualité acceptable pour de la musique, la qualité de codage de la parole à 8 kbit/s est inférieure aux possibilités d'un codeur de parole CELP. Toutefois, il doit être noté, que par définition un codeur de parole est fait pour coder de la parole et qu'il

pourrait ainsi produire des résultats inacceptables sur des signaux autres que de la parole.

Les scénarios possibles pour l'utilisation du codeur de parole sont :

- applications biparole : au lieu d'un programme audio à 20 kbit/s, le canal contient deux signaux de parole de 8 à 10 kbit/s chacun en fonction du niveau de protection choisi, permettant deux transmissions simultanées de programmes contenant de la parole (par exemple le double langage) ;
- simulcast : en cas de transmission simultanée sur un même canal d'un programme analogique et d'un programme numérique, seuls des faibles débits de l'ordre de 8 kbit/s pourraient être disponibles ;
- applications très robustes pour la parole : de par nature, un codeur de parole est supposé offrir une plus forte robustesse contre les erreurs liées au canal de transmission. Un codage de parole à 8 kbit/s peut donc être utilisé pour effectuer un codage de parole très robuste sur un canal de transmission intégral (9 ou 10 kHz).

Le format de transport du flux des deux systèmes de codage de source (AAC et CELP) a été modifié pour répondre aux conditions du système DRM (supertramage). L'**UEP**, technique de protection des erreurs, peut être appliqué aux deux types de codeurs sources pour améliorer le comportement global du système dans les canaux prédisposés aux erreurs. Dans un tel système, une protection renforcée est appliquée sur les informations les plus sensibles, alors qu'une protection moindre est appliquée aux parties les moins sensibles du flux.

La qualité de perception des deux systèmes de codage audio (MPEG-4 AAC et CELP) peut optionnellement être améliorée par l'usage additionnel de la technique dite « réplique de bande spectrale » **SBR** (*Spectral Band Replication*). En effet, pour maintenir une qualité perceptible acceptable, les algorithmes classiques de codage, audio ou de parole ont besoin de limiter la bande passante et d'opérer à de faibles fréquences d'échantillonnage. Bien sûr, il est souhaitable de pouvoir offrir une large bande passante audio y compris dans des environnements avec des transmissions de très faibles débits. Cela peut être réalisé en utilisant l'outil SBR. Cette technologie reconstruit la portion haute de la bande passante manquante du signal par une extrapolation spéciale de la portion basse de la bande passante existante. La technique SBR est intégrée aux flux AAC ou CELP et requiert la transmission de données spéciales dans le flux audio réduisant d'un faible pourcentage le débit disponible pour le codeur audio. Les signaux combinés sont traités similairement aux signaux sans SBR (supertrame audio, multiplexage, UEP). L'application de la technologie SBR dans le décodeur n'est pas obligatoire. Si le décodage SBR n'est pas disponible, la donnée SBR est ignorée et seuls les flux AAC/CELP sont décodés. SBR est un nouvel outil d'amélioration du codage audio. Il offre la possibilité d'augmenter les performances des codecs audio et parole à faible débit. SBR peut augmenter la bande passante d'un codec conventionnel faible débit jusqu'à égaliser ou dépasser la bande passante FM (15 kHz). SBR est principalement un post-traitement à effectuer par le récepteur, même si quelques pré-traitements sont effectués dans l'encodeur afin de guider le décodeur.

Le système DRM inclut le codage audio AAC ainsi que le codage de la parole CELP, optionnellement améliorés par le SBR. Une attention particulière est accordée afin que le signal audio encodé puisse être composé de supertrames de longueur constante. Le multiplexage et l'UEP des services audio/parole est effectué au moyen des unités de multiplexage et de codage canal. Les informations de configuration spécifiques à l'audio sont transmises par le canal de description du service SDC (*Service Description Channel*).

1.3.2 Définition du multiplex

Le multiplex DRM est constitué de trois canaux : le canal contenant le service principal MSC (*Main Service Channel*), le canal d'accès rapide FAC (*Fast Access Channel*) et le canal de description

de service SDC (*Service Description Channel*). Le MSC contient les services. Le FAC fournit des informations sur la largeur du canal et d'autres paramètres du même type ainsi que des données de sélection de service permettant un balayage rapide. Le SDC donne des informations sur la manière de décoder le MSC, comment trouver les fréquences alternatives transmettant les mêmes services et donne les attributs d'un service dans le multiplex. Il peut inclure des liens vers des services en simulcast.

■ MSC canal de service principal

Le MSC contient les données pour tous les services contenus dans le multiplex DRM. Le multiplex peut contenir entre un et quatre services, chaque service peut contenir indifféremment de l'audio ou des données. Le débit global du MSC est dépendant de la bande passante du canal et du mode de transmission.

Le MSC est constitué de deux parties, chacune assignée à un niveau de protection. De cette façon, l'UEP est assurée pour un ou plusieurs services du MSC. L'EP (*Equal Protection*) est assurée en établissant le même niveau de protection pour les deux parties.

Le MSC est divisé en trames logiques d'une durée de 400 ms.

■ FAC canal d'accès rapide

Le FAC est utilisé pour fournir une information de sélection de service consultable à la réception par un balayage rapide. Il contient des informations sur les paramètres du canal (par exemple, l'occupation spectrale et la profondeur d'entrelacement) permettant au récepteur de déterminer s'il est capable de décoder le multiplex efficacement. Il contient aussi des informations sur les services du multiplex pour permettre au récepteur soit de décoder ce multiplex, soit de changer de fréquence et effectuer une nouvelle recherche.

La périodicité des trames FAC est de 400 ms.

Les paramètres de canal sont compris dans chaque trame FAC.

Les paramètres du service sont transportés dans les trames FAC successives, un service par trame. Le radiodiffuseur peut choisir la façon dont les trames portant les informations relatives à chaque service sont répétées afin de satisfaire à ses exigences. Par exemple, s'il transmet un service audio et deux services de données, il peut choisir de transmettre le FAC pour les services audio sur des trames alternées pour réduire le temps de balayage pour l'audio au prix d'un temps augmenté pour les données.

■ SDC canal de description de service

Le SDC donne des informations sur le décodage du MSC, l'accès à des sources alternatives pour un même service et donne des attributs aux services du multiplex.

La recherche de fréquences alternatives peut être effectuée, sans perte de service, en gardant la donnée transmise quasi statique dans le SDC. De cette manière, les données dans les trames SDC doivent être gérées avec soin. La périodicité des trames SDC est de 1 200 ms. La capacité en données d'une trame SDC varie avec l'occupation spectrale du multiplex et d'autres paramètres. La capacité peut être augmentée, si nécessaire, en variant le modèle de répétition des trames SDC.

1.3.3 Codage canal et modulation

Le but de la **dispersion d'énergie** est d'éviter la transmission d'échantillons de signal qui pourrait résulter en une régularité involontaire dans le signal transmis.

En fonction de la protection désirée, associée à chaque service ou partie de service, le système offre la possibilité de choisir jusqu'à deux niveaux de **codage** simultanés. En fonction des besoins du service, ces niveaux de protection peuvent être déterminés soit par le taux de codage du codeur canal, soit par une concaténation de code additionnel, soit par le type de constellation (par exemple 4-PSK, 16-QAM, 64-QAM), soit par modulation hiérarchique.

Le processus de codage canal est basé sur un schéma de codage multiniveau MLC (*Multi Level Coding*). Le principe du codage multiniveau est l'optimisation jointe du codage et de la modulation pour atteindre la meilleure performance en transmission. Cela signifie que les bits, dont le positionnement sur la constellation QAM est le plus sujet aux erreurs, bénéficient d'une meilleure protection. Les différents niveaux de protection sont atteints avec différentes variantes de codes qui sont réalisées avec des codes convolutionnels, dérivés du même code mère.

Le système offre différents taux de codage ou combinaisons de taux de codage, qui permettent de sélectionner le niveau de correction d'erreurs le plus approprié pour une transmission donnée. Ainsi, une combinaison de taux de codage consiste à avoir jusqu'à deux différents taux de codage globaux pour permettre soit différentes protections pour différents services, soit une protection inégale des erreurs (UEP) pour l'ensemble des services. En conséquence, les bits les plus sensibles aux erreurs peuvent être mieux protégés, ce qui est utile lors de la transmission de flux binaires transportant de l'audio.

Le décodage dans le récepteur peut être intégré comme un processus itératif ou non itératif. De cette manière, la performance de correction d'erreurs du décodeur peut être augmentée avec le nombre d'itérations et est donc dépendante de l'intégration du décodeur. Le FAC et le SDC sont protégés avec un modèle de codage canal beaucoup plus robuste que le modèle de codage du MSC. La détection d'erreurs est nécessaire pour les deux.

L'**entrelacement** est appliqué entre les cellules OFDM déterminées par le FAC. L'entrelacement est appliqué entre les deux symboles SDC OFDM. Deux niveaux d'entrelacement sont appliqués au MSC. L'un est orienté bit alors que les cellules QAM sont entrelacées sur plusieurs trames.

La stratégie de **répartition** pour chaque cellule OFDM dépend de l'assignation au canal (FAC, SDC, MSC). Pour le FAC et le SDC, une répartition de constellation robuste est appliquée. Pour le MSC, un 64-QAM peut être appliqué, donnant une grande efficacité spectrale tout en étant assez robuste pour les conditions de transmission présumées. Le flux de données à la sortie de l'entrelaceur consiste en une suite de mots binaires. Ceux-ci sont répartis sur les points de la constellation suivant un nombre complexe z . Pour les modes à fort étalement Doppler et à fort étalement temporel, le 16-QAM peut être appliqué.

Un **entrelacement** convolutionnel des symboles orienté cellule peut être appliqué.

1.3.4 Structure de la trame et modes de transmission

Le signal transmis est organisé en trames de transmission. Chaque trame dure T_f et est constituée de N_S symboles OFDM ($N_S = 15$). Trois trames constituent une supertrame afin de permettre un changement de fréquence automatique. Chaque symbole est constitué par un ensemble de K porteuses et transmis en un temps T_S . Il est composé de deux parties : une partie utile d'une durée T_u et un intervalle de garde d'une durée T_g .

Les symboles dans une trame OFDM sont numérotés de 0 à $N_S - 1$. Tous les symboles contiennent des données et des informations de référence. Puisque le signal OFDM est composé d'un certain nombre de porteuses modulées séparément, chaque symbole peut être considéré comme étant divisé en cellules, chacune correspondant à la modulation appliquée à une porteuse durant un symbole.

En plus des données transmises, une trame OFDM contient :

- des cellules de référence ;
- des cellules de contrôle (FAC et SDC).

Les références peuvent être utilisées pour la synchronisation des trames, de fréquence et de temps, pour l'estimation de canal, l'identification du mode de transmission et aussi pour corriger la

présence de bruit de phase. Les porteuses adjacentes sont espacées de $1/T_u$.

Les paramètres OFDM doivent être choisis afin de satisfaire aux conditions de **propagation** et à la zone de couverture desservie par l'opérateur. Différents ensembles de paramètres OFDM sont donc définis. Deux de ces ensembles de paramètres sont censés être les plus communément utilisés ; ils répondent respectivement aux conditions normales de propagation en ondes de sol (*Ground-Wave*) et en ondes ionosphériques (*Sky-Wave*). Lors de circonstances exceptionnelles de propagation ionosphériques difficiles, il peut être nécessaire de tolérer un plus grand étalement Doppler ou temporel. D'autres ensembles de paramètres seront définis pour faire face à ces cas.

Les **paramètres OFDM** doivent être choisis et optimisés en fonction du type de propagation utilisé et de la **largeur de bande de fréquence disponible**. Selon la largeur de bande de fréquence disponible, un choix donné du nombre K de porteuses ainsi que de leur emplacement par rapport à la fréquence de référence (appelée DC, en rapport avec la porteuse traditionnelle utilisée en transmission analogique DBL AM).

Nota : DBL : double bande latérale

Deux types de choix d'occupation spectrale sont offerts :

- standard (basé sur une canalisation 4,5 kHz ou 5 kHz) ;
- simulcast (pour une transmission simultanée de signaux analogique et numérique).

Des choix supplémentaires peuvent être ajoutés pour permettre l'adaptation à l'utilisation actuelle des bandes de fréquences.

La figure 2 montre les différentes possibilités offertes pour une transmission numérique.

Le même principe est utilisé pour l'extension de bande passante (par exemple 25 kHz, 30 kHz, 35 kHz ou 40 kHz). Il consiste à ajouter un groupe additionnel de porteuses de 4,5 kHz ou 5 kHz au signal original.

Des choix supplémentaires peuvent être introduits pour permettre l'adaptation à l'utilisation actuelle des bandes de fréquences.

Pour une transmission simulcast, deux solutions sont proposées :

- juxtaposition d'un signal AM analogique (Vestigial ou DBL complet) et d'un signal numérique ;
- ajout d'un ensemble de porteuses numériques de chaque côté d'un signal AM analogique.

La figure 3 explique les trois solutions et définit les paramètres nécessaires pour la partie numérique.

Seul le dernier type de transmission en simulcast implique une définition spéciale des paramètres OFDM. Des choix supplémentaires peuvent être introduits pour permettre l'adaptation à l'usage existant de la bande de fréquences.

1.3.5 Signaux de référence

Diverses cellules dans la trame OFDM sont modulées avec une information de référence dont la valeur transmise est connue du récepteur. Ces cellules sont des cellules de référence pour l'estimation du canal de transmission et la synchronisation. Les niveaux et phases avec lesquels ces cellules sont transmises sont choisis avec soin afin d'optimiser les performances. Les cellules de référence sont principalement utilisées pour la démodulation cohérente. Ces cellules sont dispersées en temps et fréquence sur l'ensemble du motif et sont utilisées par le récepteur pour effectuer l'estimation de la réponse du canal.

Les cellules de références de fréquence sont utilisées par le récepteur pour détecter la présence et pour estimer le décalage en fréquence du signal reçu. Elles peuvent aussi être utilisées pour l'estimation de canal et pour les divers processus de recherche. De plus, certaines cellules de référence sont utilisées pour la synchroni-

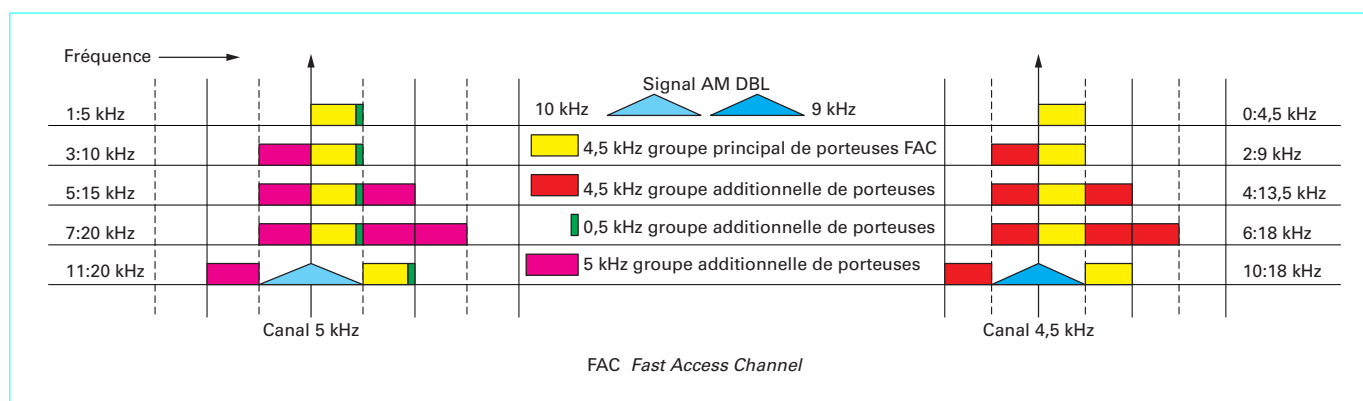


Figure 2 – Transmission numérique

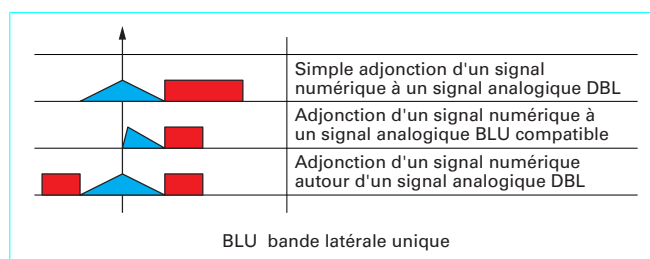


Figure 3 – Transmission simulcast

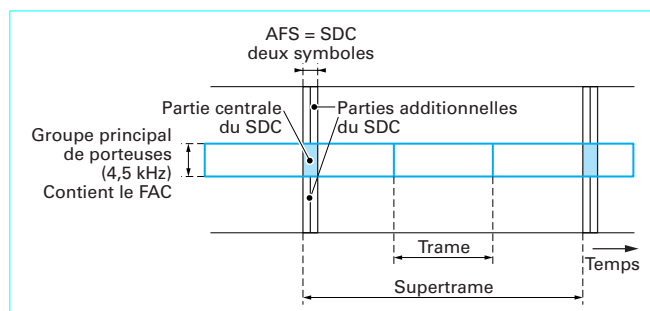


Figure 4 – Emplacement temps-fréquence des signaux FAC et SDC

sation de trame et temporelle. Les cellules de référence sont transmises à un niveau de puissance supérieur de 3 dB (par rapport à toutes les autres portuses) pour une meilleure synchronisation et estimation de canal.

Les phases des cellules de référence sont choisies de façon à optimiser les performances du système et à minimiser le facteur de crête.

1.3.6 Signal de contrôle du récepteur

Le signal de contrôle du récepteur est constitué de deux parties différentes :

- le canal FAC intégré à chaque trame du groupe principal de portuses est utilisé par le récepteur pour obtenir très rapidement

l'information nécessaire pour démoduler les signaux contenant le reste des informations ;

- le canal de données statiques (SDC) répété à chaque supertrame, contient toutes les informations supplémentaires qui décrivent les services actuellement disponibles. Le SDC est aussi utilisé pour le changement automatique de fréquence (AFS, *Alternative Frequency Switching*).

La figure 4 décrit l'emplacement temps-fréquence des ces signaux :

1.3.7 Capacité de service et débits

Exemple : le tableau suivant donne les débits nets possibles en fonction de la bande passante disponible et du mode de protection choisi (avec 64-QAM, taux de codage 0,6, pas de bits perdus pour le SDC et le FAC).

Bande passante	Mode ondes de sol	Mode ondes ionosphérique
4,5 kHz	1 410 cellules/trame 12 690 bit/s	1 076 cellules/trame 9 684 bit/s
5 kHz	1 581 cellules/trame 14 229 bit/s	1 201 cellules/trame 10 809 bit/s
9 kHz	2 904 cellules/trame 26 136 bit/s	2 236 cellules/trame 20 124 bit/s
10 kHz	3 246 cellules/trame 29 214 bit/s	2 486 cellules/trame 22 374 bit/s

2. Tests d'évaluation en laboratoire

La première étape d'évaluation et du processus de validation de DRM commença fin 1998 avec la première évaluation laboratoire. L'objectif de cette évaluation était de choisir entre les différentes solutions techniques proposées le principe le mieux adapté pour les blocs de base du standard DRM.

Le groupe de travail sur l'évaluation du système DRM, avec l'aide du groupe de travail sur la modulation et le codage, a établi une procédure de test en laboratoire et une matrice de décision. Le but de la matrice de décision était de transcrire en spécifications techniques les spécifications de besoins déterminés par le comité commercial.

La matrice de décision a été établie pour comparer les différentes solutions proposées relatives au principe et à l'architecture du modem. Les critères sélectionnés n'étaient pas représentatifs de l'ensemble des besoins auquel le système final doit satisfaire, mais suffisant pour évaluer les différentes formes d'onde proposées pour le modem numérique. Les principaux critères de sélection se rapportaient à la comparaison des performances suivantes : le TEB (taux d'erreur binaire) en fonction du rapport SB/B (signal sur bruit), la robustesse à l'étalement Doppler et temporel, la robustesse aux interférences, le temps de synchronisation, la complexité du récepteur et le facteur de crête de la forme d'onde, spécification majeure pour le rendement global de l'émetteur.

Le paragraphe 2.1 donne une vue d'ensemble du travail effectué pour élaborer la procédure de tests en laboratoire. Les profils de canaux sont représentatifs de liaisons de transmission typiques et sont définis pour fournir un outil de comparaison précis afin de choisir entre différents principes de modem.

Le paragraphe 2.2 donne une idée précise des conditions dans lesquelles l'évaluation fut faite. De plus, elle fournit une vue claire de l'architecture des systèmes à évaluer et des outils d'évaluation développés pour effectuer cette campagne de tests en laboratoire.

Le paragraphe 2.3 fournit une vue d'ensemble des performances techniques du système de base. Ce système fut utilisé pendant la première phase de tests terrain de DRM afin de valider, dans des conditions réelles de radiodiffusion, la justesse des profils de canaux de transmission utilisés durant l'évaluation en laboratoire.

2.1 Définition des profils des canaux de transmission

Les canaux à considérer sont les canaux de transmission dans les bandes radiofréquences LF, MF et HF avec un espacement de 9 kHz pour les bandes LF et MF et de 2 x 5 kHz pour les bandes HF. En principe, les émissions dans les trois bandes de fréquence ont à faire face à des canaux de transmission présentant des multitrajets car la surface de la terre et l'ionosphère sont impliquées dans le mécanisme de propagation des ondes électromagnétiques.

L'approche est d'utiliser des modèles stochastiques à variations statistiques temporelles stationnaires et de définir ces modèles pour des conditions bonnes, moyennes et mauvaises en prenant des valeurs de paramètres appropriées du modèle général.

Un de ces modèles avec des paramètres ajustables est le modèle WSSUS (*Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering Model* – mode à dispersion stationnaire non corrélée au sens large). L'approche stationnaire et l'utilisation de différents jeux de paramètres se justifie dans le fait que le résultat sur des canaux réels mène à des courbes TEB situées entre celles des meilleurs et les pires cas trouvés dans la simulation.

Les modèles de canaux ont été générés d'après l'équation suivante où $e(t)$ et $s(t)$ sont les enveloppes complexes respectives des signaux d'entrée et de sortie :

$$s(t) = \sum_{k=1}^n \rho_k c_k(t) e(t - \Delta_k) \quad (1)$$

Cela représente une ligne à retard à prises, avec

- ρ_k atténuation relative du k^{e} trajet (tableau 1),
- Δ_k retard relatif du k^{e} trajet (tableau 1),
- $c_k(t)$ poids de sortie, nombres complexes aléatoires et gaussiens de moyenne nulle.

Les amplitudes $c_k(t)$ suivent une distribution de Rayleigh et les phases $\Phi(t)$ sont distribuées uniformément.

Le tableau 1 définit le type de canal de propagation et l'ensemble des paramètres retenus pour les canaux test.

2.2 Réglage du système de tests d'évaluation en laboratoire

Pour effectuer les tests d'évaluation en laboratoire comme montré sur la figure 5, il a été nécessaire de développer un démonstrateur temps réel complet pour chaque principe et architecture de modem proposé. En plus et afin d'optimiser le temps de développement et de réduire les coûts liés aux essais terrain, un simulateur d'émetteur temps réel et un simulateur de propagation de canal HF temps réel ont été développés.

Tableau 1 – Ensemble des canaux test

Canal n° 1 : AWGN (Average White Gaussian Noise, bruit blanc gaussien moyenné) Conditions d'utilisation : bonnes en LF, MF et HF				
Un seul trajet	trajet 1			
Retard Δ_k(ms)	0			
Gain par trajet ρ_k(rms)	1			
Décalage Doppler D_{sh}(Hz)				
Étalement Doppler D_{sp}(Hz)				
Canal n° 2 : rice avec retard Conditions d'utilisation : typiques/modérées en MF et HF				
Deux trajets	trajet 1	trajet 2		
Retard Δ_k(ms)	0	1		
Gain par trajet ρ_k(rms)	1	0,5		
Décalage Doppler D_{sh}(Hz)				
Étalement Doppler D_{sp}(Hz)	0	0,1		
Canal n° 3 : consortium US Conditions d'utilisation : typiques/modérées en HF mauvaises en MF				
Quatre trajets	trajet 1	trajet 2	trajet 3	trajet 4
Retard Δ_k(ms)	0	0,7	1,5	2,2
Gain par trajet ρ_k(rms)	1	0,7	0,5	0,25
Décalage Doppler D_{sh}(Hz)	0,1	0,2	0,5	1,0
Étalement Doppler D_{sp}(Hz)	0,1	0,5	1,0	2,0
Canal n° 4 : CCIR pauvre Conditions d'utilisation : mauvaises en HF				
Deux trajets	trajet 1	trajet 2		
Retard Δ_k(ms)	0	2		
Gain par trajet ρ_k(rms)	1	1		
Décalage Doppler D_{sh}(Hz)	0	0		
Étalement Doppler D_{sp}(Hz)	1	1		
Canal n° 5 : CCIR mauvais Conditions d'utilisation : mauvaises en HF				
Deux trajets	trajet 1	trajet 2		
Retard Δ_k(ms)	0	4		
Gain par trajet ρ_k(rms)	1	1		
Décalage Doppler D_{sh}(Hz)	0	0		
Étalement Doppler D_{sp}(Hz)	2	2		

rms : root mean square (valeur efficace)

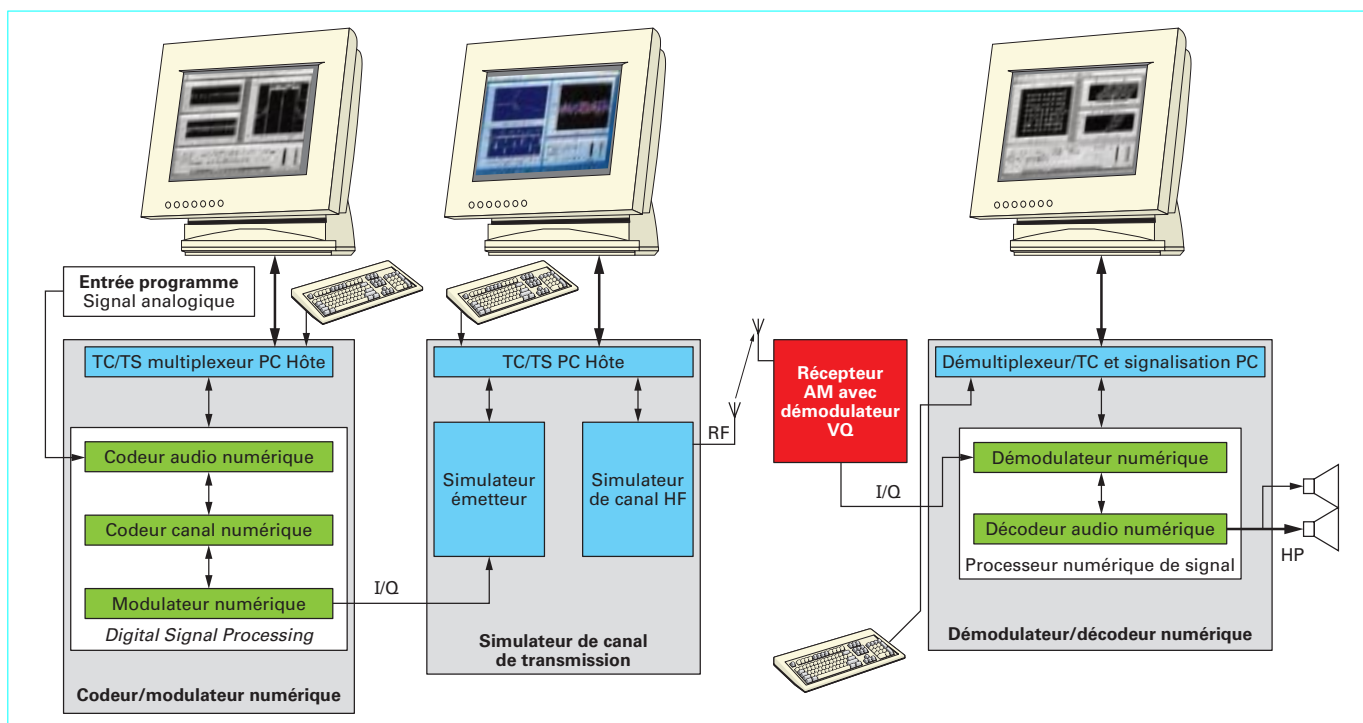


Figure 5 – Évaluation Laboratoire DRM : schéma synoptique du système de test

Le simulateur d'émetteur temps réel est basé sur un modèle théorique d'émetteur de radiodiffusion permettant d'analyser l'effet des imperfections de l'émetteur sur le spectre du signal de sortie. Ces imperfections sont les suivantes :

- la non-linéarité du modulateur d'enveloppe ;
- la bande passante de la voie enveloppe (variation du module et du temps de propagation de groupe) ;
- la linéarité de la voie RF (radiofréquence) ;
- la bande passante de la voie RF (variation du module et du temps de propagation de groupe) ;
- le découplage entre les deux voies (diaphonie ou modulation de phase parasite dues à la modulation d'enveloppe).

Le simulateur d'émetteur temps réel a été développé en prenant en compte la structure physique réelle d'un émetteur classe C à modulation haut niveau par la tension d'anode. Ce type de structure se retrouve sur tous les émetteurs de radiodiffusion modernes à tube, de types IML (*Impulsion Modulée en Largeur*) ou PSM (*Pulse Step Modulation*, modulation à échelon de tension).

Le simulateur de canal HF temps réel a les caractéristiques suivantes :

- la possibilité de paramétrer un canal de transmission multitrajet ayant jusqu'à quatre trajets différents ;
- la possibilité d'ajuster pour chaque trajet les paramètres suivants au moyen d'une interface homme-machine (IHM) graphique :
 - retard de 1 à 10 ms,
 - atténuation de 0 à 60 dB,
 - étalement Doppler de 0 à 10 Hz,
 - décalage Doppler de 0 à 100 Hz ;
- la possibilité d'ajuster les paramètres suivants pour le canal multitrajet :
 - bruit blanc gaussien additionnel,
 - interférence colocalisée dans le même canal,
 - interférence avec le canal adjacent.

2.3 Performance du système de base

Les courbes de la figure 6 montrent les résultats du système DRM de base obtenus durant les tests d'évaluation DRM en laboratoire. Les performances ont été établies pour le signal numérique complexe suivant :

- une modulation 64-QAM pour les données audio ;
- un taux de code associé $R = 0,6$;
- la puissance du signal inclut les références ou pilotes et l'intervalle de garde.

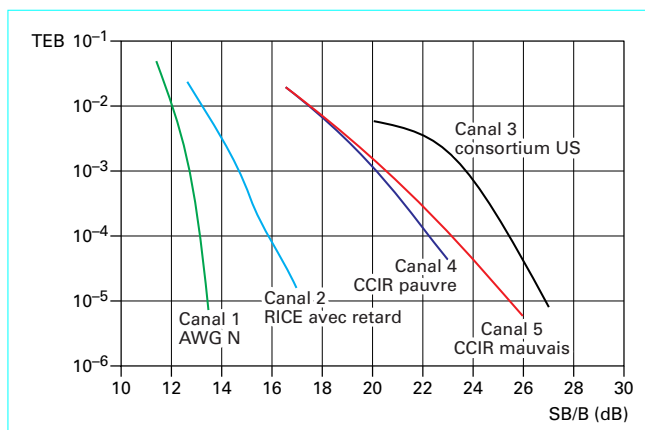


Figure 6 – Performances du système DRM de base

Il faut mentionner que les premiers résultats obtenus avec le nouveau système avant optimisation finale sont très positifs. En effet, dans les mêmes conditions de test avec les cinq mêmes canaux de propagation, le nouveau système DRM montrent pour un $TEB = 1 \times 10^{-4}$ une amélioration de 1,5 à 2 dB selon le type de canal de propagation utilisé.

Pour ces tests, le mode OFDM associé est le mode ondes de sol (*Ground-Wave*) pour les canaux 1 et 2 et le mode ondes ionosphériques (*Sky-Wave*) pour les canaux 3 à 5.

3. Première phase d'essais terrain

La seconde étape du processus de validation et d'évaluation de DRM commença en novembre 1999 et se termina en mars 2000. Cette étape consiste en la première phase d'essais terrain du système DRM. Ces essais ont été effectués à partir de six types différents d'émetteurs existants et non modifiés, cinq émetteurs OC et un émetteur OM, avec un système de base non optimisé. L'objectif de ces essais terrain était de vérifier en situation réelle l'exactitude des critères d'évaluation laboratoire et de fournir les données opérationnelles permettant l'optimisation des paramètres du système DRM final par les experts techniques des groupes de travail Modem et Codec.

3.1 Objectifs détaillés

Quatre objectifs ont été identifiés pour la première phase d'essais terrain de DRM :

- l'indication des performances de différents types d'émetteurs de radiodiffusion lorsqu'ils sont modulés avec le signal numérique DRM ;
- l'extraction des caractéristiques des canaux de propagation HF et MF par sondage de canal ;
- les performances du système de base DRM version 0 qui serviront de référence pour évaluer toute nouvelle optimisation ;
- la procuration des extraits audio nécessaire pour effectuer des démonstrations ou des opérations de promotion du système de référence DRM version 0.

3.1.1 Performance de l'émetteur face à un signal numérique

Durant le paramétrage des émetteurs et des modulateurs impliqués dans les essais terrain, le spectre du signal de sortie est enregistré. Ces mesures donnent une indication, pour chaque type d'émetteur utilisé, de la pureté spectrale du signal numérique transmis qui peut être atteinte par ces émetteurs sans modification majeure.

Afin de tirer une plus grande expérience de l'influence de l'émetteur, sur chaque type utilisé, les points suivants sont étudiés durant le paramétrage :

- le niveau des principales émissions harmoniques ;
- le spectre du signal de sortie pour chaque mode de transmission ;
- l'influence sur la linéarisation de l'émetteur d'une composante continue additionnelle.

3.1.2 Sondage de canal

Les principaux paramètres suivants sont extraits du sondage de canal :

- la réponse impulsionnelle du canal ;
- le SB/B (rapport signal sur bruit) avant démodulation ;
- l'influence des signaux d'interférence.

Les paramètres suivants sont statistiquement évalués d'après la réponse impulsionnelle du canal :

- le nombre de trajets ;
- l'étalement temporel ;
- le niveau relatif entre les trajets ;
- le décalage Doppler ;
- l'étalement Doppler ;
- la concordance avec les modèles de canaux de propagation 1 à 5 (pondération en fonction du pourcentage de temps).

Le dernier élément de la liste correspond à la tâche de vérification des critères d'évaluation laboratoire et plus particulièrement à la concordance des résultats obtenus en situation réelle avec les valeurs définies pour les paramètres des canaux de tests d'évaluation en laboratoire 1 à 5. Cela permet d'estimer pour chaque canal de propagation le pourcentage de temps où les conditions du canal de propagation mesurées sont moins bonnes, similaires ou meilleures que les conditions définies pour les canaux de tests 1 à 5. Cette méthode, bien que statistique, permet de quantifier la fiabilité des paramètres définis pour les simulateurs de développement et les tests en laboratoire et d'y remédier si nécessaire.

3.1.3 Évaluation du système de référence

Le troisième objectif de la première phase d'essais terrain de DRM est d'obtenir des données sur le système de référence auquel le système final DRM peut être comparé. Les paramètres pertinents sont :

- le spectre à l'entrée de l'émetteur ;
- le spectre à la sortie de l'émetteur ;
- le spectre à l'entrée du récepteur ;
- l'indication du niveau de champ reçu ;
- l'histogramme du SB/B sur les symboles démodulés ;
- l'histogramme du SB/B sur les symboles de référence ;
- l'évaluation de l'efficacité du codage ;
- l'évaluation du pourcentage de temps avec perte de programme ;
- l'évaluation du pourcentage de temps avec perte de synchronisation ;
- le taux d'erreur binaire sur les données enregistrées ;
- la distribution des erreurs sur les données enregistrées ;
- la performance du système en cas d'interférences dans le même canal ;
- la performance face à différentes sortes de bruits d'origine humaine ou industrielle (spécialement pour les ondes moyennes si possible) ;
- l'évaluation de la précision des mesures pour le calcul de l'étalement Doppler.

3.1.4 Démonstration audio

Cette évaluation n'est pas un objectif principal de la première phase d'essais terrain de DRM pour deux raisons majeures. La première est que le codeur de source du système de référence version 0 (MPEG-2 Layer 3) est différent de celui du système DRM final (MPEG-4 AAC + CELP). La seconde est que le système de référence n'est pas équipé d'un processus de correction d'erreurs efficace qui peut considérablement augmenter la fiabilité du décodage audio lorsque l'on approche la limite.

3.2 Organisation des essais terrain

En fonction de la disponibilité des émetteurs et du nombre total des récepteurs de référence, un programme de test a été établi en faisant attention à ce qu'à la fin de la première phase d'essais terrain de DRM, la plupart des types de liaisons et de conditions de propagation aient été évalués.

Afin de simplifier la compilation et l'analyse des résultats, chaque test de transmission est effectué suivant la même séquence de test de 30 min.

Séquence de test

1. pas de signal	2 min
2. porteuse seule	1 min
3. audioanalogique (identification de la station)	30 s
4. audionumérique (identification de station)	30 s
5. séquence OFDM 64-QAM PRBS	12 min
6. séquence PRBS robuste	12 min
7. porteuse seule	1 min
8. pas de signal	1 min
Total	30min

Les deux minutes sans signal sont utilisées pour fixer la référence du bruit pour l'évaluation du SB/B (rapport signal sur bruit) et pour détecter la présence de signaux d'interférence.

La minute suivante avec la porteuse seule sert à évaluer le SB/B.

Les 30 s d'audioanalogique en mode AM DBL standard émettant l'identification de la station sont utilisées pour une comparaison de la qualité audio avec les 30 s d'audionumérique diffusant le même programme. De plus, cela fournit un moyen simple d'identifier la liaison pour des analyses ultérieures.

Les 12 min de signal numérique utilisant une séquence 64-QAM PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*) permettent de quantifier le niveau de TEB afin de calculer ultérieurement le modèle de distribution des erreurs. Un modèle de distribution d'erreurs précis est très utile au groupe de travail Codec pour définir le système de correction d'erreurs adéquat du système final.

Les 12 min de signal numérique avec une séquence PRBS robuste sont indispensables pour analyser le canal de transmission lorsque les conditions de propagation dépassent les limites théoriques du système DRM version 0. Cette séquence permet de définir les paramètres optimisés pour un système final fiable.

La minute avec la porteuse seule permet d'évaluer la variation du SB/B durant la séquence de test.

La dernière minute sans signal est utilisée pour vérifier la référence du plancher de bruit défini pour l'évaluation du SB/B et pour détecter la présence de signaux d'interférence.

3.2.1 Évaluation OC (ondes courtes)

L'évaluation du système dans les bandes de fréquences OC est effectuée au moyen de cinq émetteurs existants non modifiés situés comme le montre la figure 7. Pour rassembler un maximum d'informations sur le comportement d'un émetteur de radiodiffusion en présence d'un signal numérique complexe, les essais terrain sont effectués avec différents types d'émetteurs existants : linéaire, IML, PSM.

Afin de fournir un maximum d'informations sur les conditions de propagation, les différentes liaisons sont testées à différents moments de la journée, dans toutes les bandes de fréquences de radiodiffusion en OC, de 5,9 MHz à 25,7 MHz. Les liaisons expérimentales ont été effectuées sur des distances de quelques centaines de kilomètres à plusieurs milliers de kilomètres afin de traiter tous

les types de couverture, courte, moyenne ou longue distances utilisant la réflexion ionosphérique sur un, deux ou trois bonds.

Certaines des fréquences choisies sont proches soit de la LUF (*Lowest Usable Frequency* – fréquence utilisable la plus basse) soit de la MUF (*Maximum Usable Frequency* – fréquence utilisable la plus haute).

De plus, il faut mentionner que la plupart des liaisons critiques en OC ont été analysées : les transmissions au-dessus, du cercle polaire, des zones tropicales et équatoriales.

3.2.2 Évaluation OM (ondes moyennes)

Comme pour les essais en ondes courtes, les tests en OM ont été effectués sur plusieurs types de liaisons, à différents moments de la journée, couvrant ainsi les différents cas de couverture : soit de type onde de sol, soit de type ondes ionosphériques (figure 7).

3.2.3 Équipements spécifiques pour les essais terrain

Pour être en mesure de faire cette campagne d'essais en avance par rapport à la disponibilité du standard DRM final, un démonstrateur temps réel du système numérique DRM version 0 a été développé. Ce démonstrateur est basé sur des logiciels temps réel et des sous-ensembles matériels spécifiques. Le diagramme des blocs fonctionnels du système de test est représenté sur la (figure 8).

Le démonstrateur du système numérique DRM version 0 est constitué d'un exciteur numérique et d'un récepteur numérique.

L'**exciteur numérique** pour émetteurs de radiodiffusion est composé de :

- un encodeur/modulateur numérique (figure 9) intégré dans un PC comprenant :

- un logiciel temps réel d'encodage audio intégré sur un processeur Pentium III,
- des logiciels temps réel codeur canal et modulateur numérique intégrés sur un module de traitement du signal spécifique,
- une interface entrées/sorties rapide intégrée sur un module spécifique fournissant les interfaces dédiées pour le synthétiseur RF numérique et la plupart des émetteurs de radiodiffusion existants ;

- un synthétiseur RF numérique spécifiquement développé pour assurer la plus haute qualité et la meilleure pureté spectrale du signal RF de sortie lorsqu'il est modulé avec un signal d'entrée complexe I et Q. Le synthétiseur RF numérique peut délivrer aussi bien un signal RF modulé en phase ou un signal RF modulé à la fois en phase et en amplitude. Il est de ce fait compatible avec la plupart des émetteurs de radiodiffusion existants.

Le **récepteur numérique de référence** (figure 10) est intégré dans un PC. Il est composé de :

- une tête HF numérique couvrant toutes les bandes de fréquence AM (OL, OM et OC). Ce module spécifique a été conçu pour supporter différents modes de transmission : AM DBL analogique, BLU analogique, simulcast (analogique + numérique) et tout numérique. Le signal démodulé I/Q en bande de base à la sortie de la tête HF est délivré au format numérique AES/EBU en mots de 32 bits (les 16 bits de poids fort pour I et les 16 bits de poids faible pour Q) à une fréquence d'échantillonnage de 32 kHz ;
- un module d'interface numérique en bande de base intégré sur une carte son professionnelle assure l'interface et le transfert des données du signal complexe I/Q en bande de base à la sortie de la tête HF vers le bus PCI du PC hôte ;
- des logiciels temps réel intégrés sur un microprocesseur Pentium III assurent la démodulation numérique, le décodage canal et le décodage audio. En complément de la démodulation et du décodage du signal reçu, ils permettent une surveillance en temps

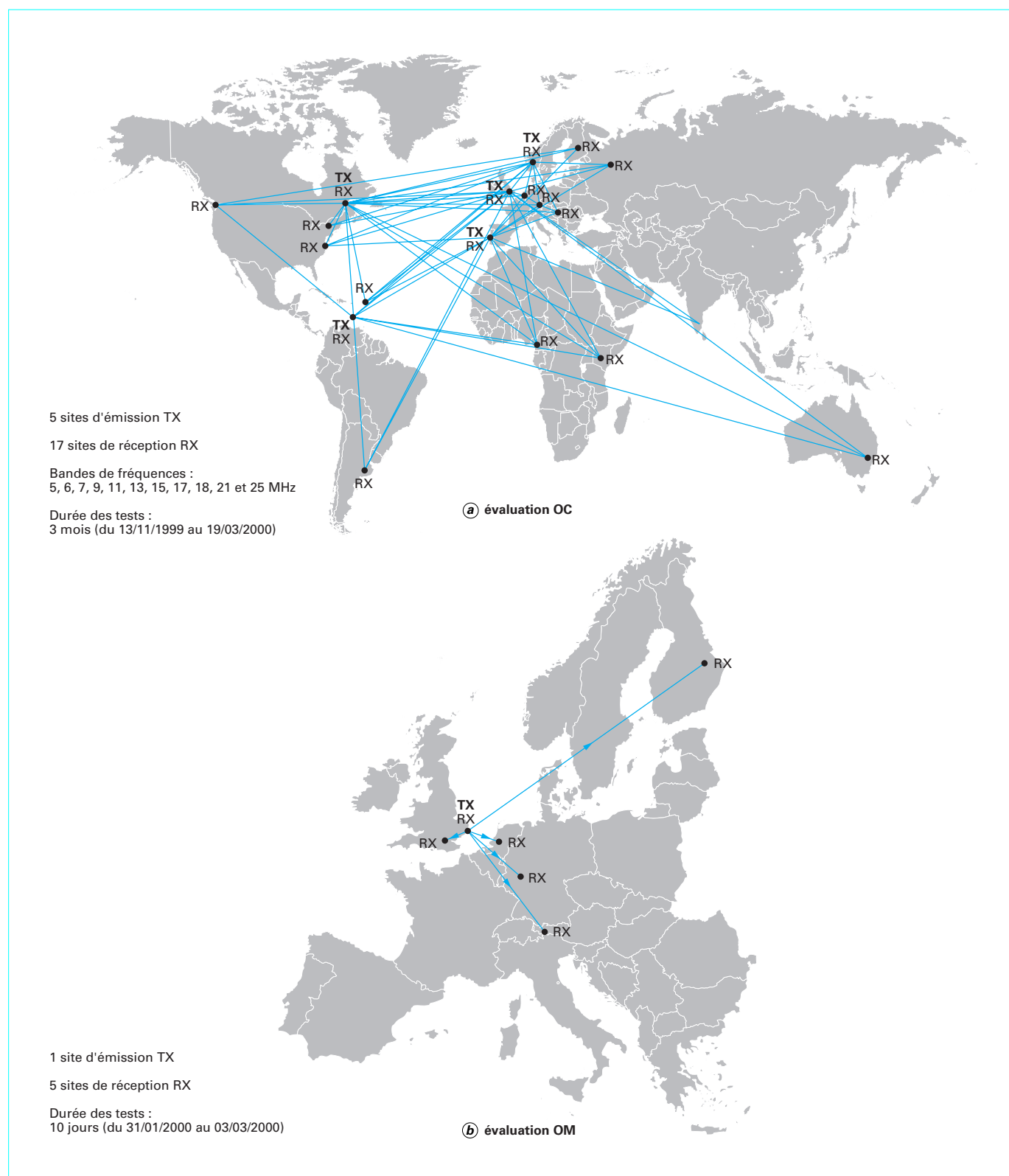


Figure 7 – Essais terrains

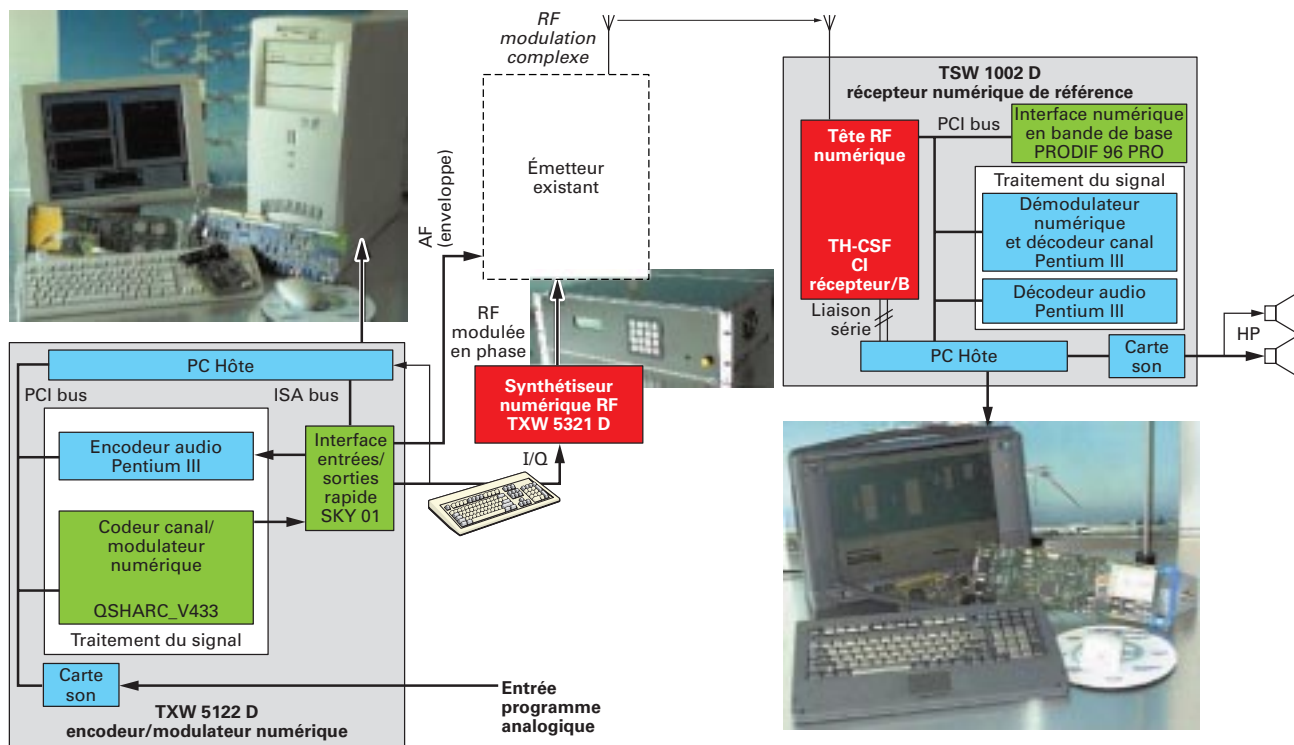


Figure 8 - Diagramme des blocs fonctionnels du système de test

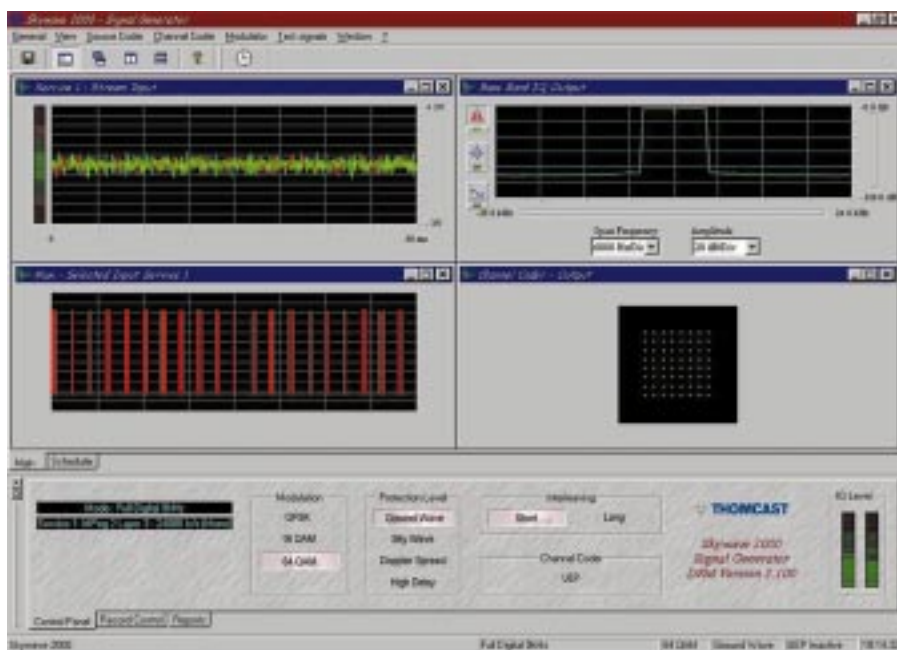


Figure 9 - Encodeur/modulateur numérique

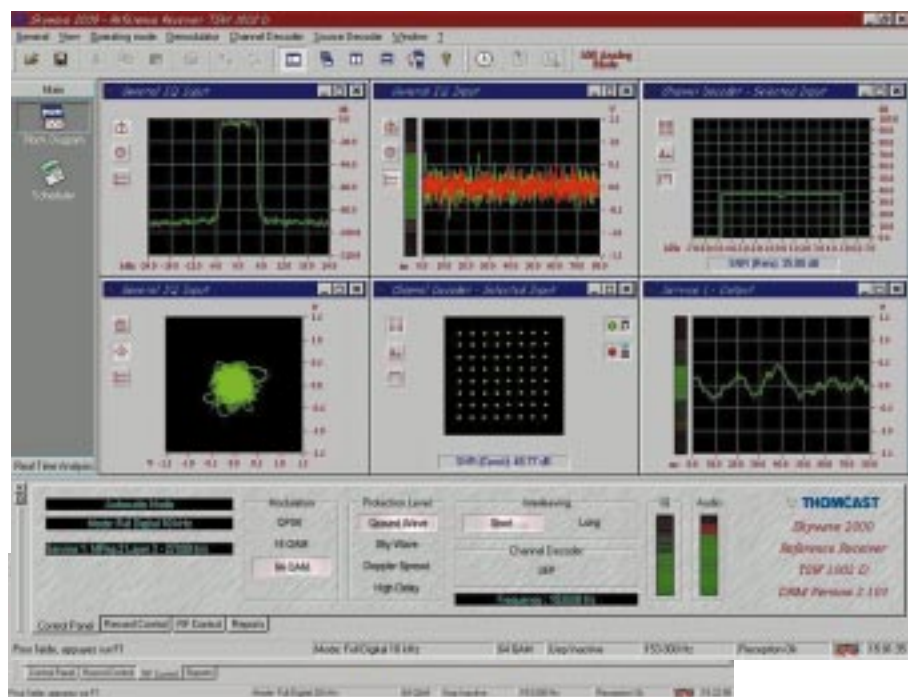


Figure 10 – Récepteur numérique de référence

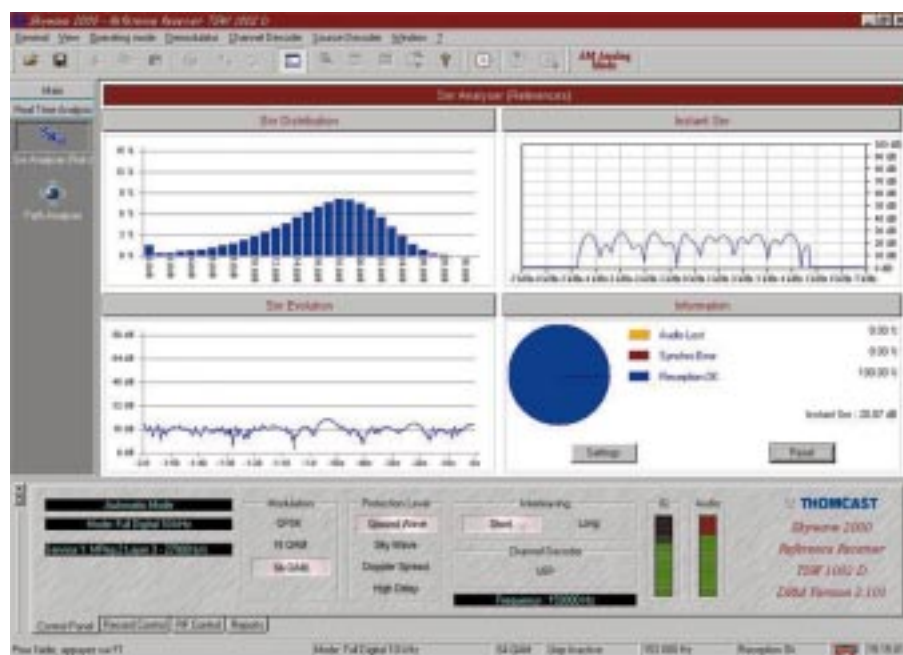


Figure 11 – Fonctions disponibles pour l'analyse statique du rapport signal sur bruit

réel de la plupart des paramètres techniques, aussi bien ceux relatifs au signal reçu, que ceux relatifs au canal de transmission.

3.3 Analyse des essais terrain

Afin de simplifier le tri des données ainsi que les analyses hors ligne ultérieures, le récepteur numérique de référence est capable d'enregistrer en temps réel sur son disque dur tous les paramètres

relatifs au signal reçu ou au canal de transmission. Pour faciliter ces analyses ultérieures, des outils spécifiques sous forme d'options logicielles complémentaires ont été développés. Ils peuvent être intégrés sur le récepteur numérique de référence afin d'effectuer la plupart des analyses statistiques nécessaires à l'optimisation des paramètres du système DRM final.

Exemple : les schémas des figures 11 et 12 montrent certaines des analyses statistiques automatiques effectuées à partir de fichiers préenregistrés.

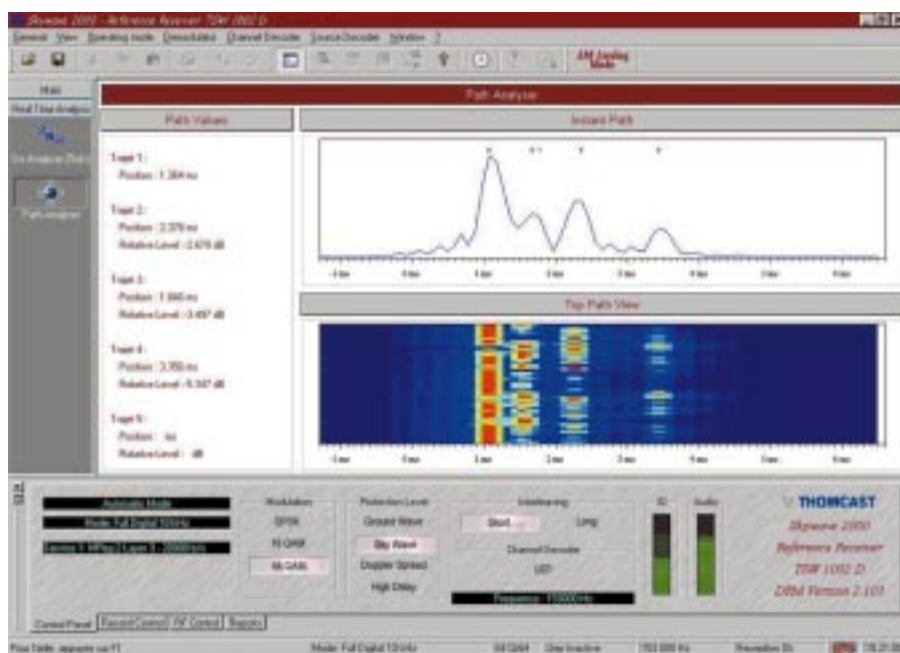


Figure 12 – Fonctions disponibles pour l'analyse statistique de la réponse impulsionnelle du canal de transmission

L'analyse statistique des **paramètres relatifs au canal de transmission** permet d'évaluer la fiabilité de la liaison. Elle délivre les données suivantes :

- le nombre de pertes de programme avec leur durée, le pourcentage du temps et la probabilité de l'événement ;
- le nombre de pertes de synchronisation avec leur durée, le pourcentage du temps et la probabilité de l'événement.

Ce type d'analyse permet d'évaluer la robustesse du système de synchronisation et de fournir des informations sur le meilleur choix du taux de codage en fonction du type de liaison.

L'analyse statistique du **SB/B** permet d'évaluer les différents types d'évanouissement (*fading*) du signal, sélectif ou plat. La possibilité de classifier les différents évanouissements selon leur durée et leur probabilité d'occurrence est donnée. Cette fonction est très utile pour optimiser les paramètres des entrelaceurs temporel et fréquentiel du standard DRM final.

L'analyse statistique de la **réponse impulsionnelle du canal de transmission** est très utile pour optimiser les paramètres OFDM en terme de robustesse face à l'étalement temporel, à l'étalement Doppler et au décalage Doppler. De plus, cette analyse permettra de vérifier la représentativité des cinq canaux de tests définis pour le développement et l'évaluation en laboratoire.

L'analyse statistique sur le **TEB** permettra de tracer le diagramme de répartition des erreurs binaires. Une telle information est très importante pour les experts du groupe de travail Codec pour définir le type de système de correction d'erreur le plus adéquat pour le système DRM final.

4. Conclusion

Dans cet article, on a essayé de démontrer que le système DRM est maintenant sur la voie du succès pour atteindre, dans les délais impartis, l'objectif ambitieux qu'il s'était fixé à l'origine : un standard numérique mondial pour la radiodiffusion dans les bandes AM en moins de trois ans.

Les tests en conditions réelles sur le terrain ont clairement démontré que la radiodiffusion en numérique peut fournir la qualité de réception que les auditeurs apprécieront.

Cela est la meilleure preuve que la radiodiffusion dans les bandes de fréquences AM fera partie de la révolution numérique du troisième millénaire.

Avec sa capacité unique à fournir en toute indépendance et à moindre coût une couverture radio sur de larges zones géographiques, elle continuera d'informer et de divertir les auditeurs, partout dans le monde, avec des programmes pluralistes variés de haute qualité.

Quelques adresses internet

DRM	http://www.drm.org
UIT	http://www.itu.org
MPEG	http://www.cse.it/mpeg

Références bibliographiques

Dans les Techniques de l'Ingénieur :

- [1] NAJMAN (M.). – *Emetteurs DAB. E 6 120* Traité Electronique. 5-1999
- [2] FERT (E.). et JEANNIN (S.). – *Compressions MPEG.1 à MPEG.4. TE 5 360* Traité Télécoms 02-2000.
- [3] THUE (M.). – *Organisations internationales. E7 020* Traité Electronique 3-1996.