

# De nouveaux critères d'optimisation:

Pierre.fuerxer@wanadoo.fr

## Résumé :

La gestion du spectre a été faite par l'application de règles juridiques strictes qui ont permis le respect des matériels en services. Au delà du respect des matériels anciens, les systèmes nouveaux doivent pouvoir répondre aux besoins définis par un scénario de déploiement.

Pour cela, il importe de savoir faire le meilleur choix entre les techniques sur la base d'une meilleure connaissance des limites physiques: la propagation et la compatibilité électromagnétique intra et inter systèmes.

Le recours à de grandes simulations ne peut conduire à une optimisation crédible. Il nous faut donc rechercher des lois macroscopiques permettant de lier les performances globales des systèmes à un ensemble limité de paramètres statistiques. Ceci passe par l'abandon des concepts anciens et le choix de nouveaux critères, fondés sur des estimations spatio-temporelles de la propagation et de l'occupation spectrale, permettant une prévision de la qualité de service du système final, dans son environnement réel, et d'évaluer la compatibilité inter-systèmes.

Le présent exposé se propose de montrer comment aborder la recherche des lois statistiques décrivant de façon synthétique l'environnement de plus en plus in-stationnaire des systèmes en raison de la fluctuation du trafic, de la mobilité des terminaux et des algorithmes d'adaptativité mis en oeuvre.

## 1 INTRODUCTION :

L'évolution des techniques et des usages rend nécessaire le choix de nouveaux critères d'optimisation adaptées aux besoins actuels. Les premiers systèmes radioélectriques ont été développés en partant des possibilités techniques. Le développement récent de la technologie a permis une extraordinaire multiplication des usages et une croissance extraordinaire des débits transmissibles par voie radioélectrique. Compte tenu de cette évolution, les critères d'optimisation fixés au début du vingtième siècle sont-ils encore adaptés ? Est-il possible d'en trouver d'autres ?

Nous nous proposons de passer rapidement en revue les choix techniques possibles aujourd'hui dans la conception des systèmes radioélectriques modernes, et nous demander de quelle façon faire évoluer les règles et principes fondamentaux qui s'imposent à eux, souvent implicitement.

## 2 LA GESTION DU SPECTRE :

Dès les premiers temps de la radioélectricité, la gestion du spectre a été faite par l'application de règles juridiques strictes permettant de respecter le fonctionnement des matériels en services.

Cette protection a été assurée par la définition de canaux de largeur normalisée et la fixation de gabarits spectraux aussi rigoureux qu'il était technologiquement possible. Malgré tout, la cohabitation sur un même site d'émetteurs et de récepteurs restait délicate. En l'absence de scénario de déploiement, la compatibilité des émetteurs et des récepteurs était étudiée au cas par cas, sur la base d'implantations réelles. Ce choix est-il encore judicieux ?

Nous savons bien qu'il n'est plus possible de décrire complètement l'ensemble des systèmes de radiocommunication en service et de déterminer la compatibilité électromagnétique intra et inter systèmes autrement que par une probabilité de bon fonctionnement dans un scénario donné, prenant en compte en particulier la densité des équipements installés et leur taux d'utilisation.

Enfin, au moins dans le domaine des communications avec les mobiles, des bandes exclusives sont affectées aux systèmes qui ont bénéficié de la pleine responsabilité de leurs choix techniques. Ils ont ainsi une liberté totale pour choisir le codage, la modulation, mais aussi la gestion de la bande de fréquence qui leur est allouée de façon exclusive, et dans laquelle ils sont libres de fixer les caractéristiques de leurs équipements.

Sans cette liberté d'entreprendre, ces systèmes n'auraient certainement pas pu être développés. Cependant, l'évolution des techniques et des usages ne manquera pas de rendre caducs les choix faits lors de leur conception. Est-on certain que le remplacement progressif des systèmes anciens par des systèmes nouveaux pourra se faire sans d'énormes difficultés ?

Peut-on abandonner à long terme la responsabilité totale d'exploitation d'une bande de fréquences à des opérateurs laissée totalement libres de leurs décisions ?

Ne faut-il pas faire en sorte que, même dans des bandes radiotéléphonique, des systèmes indépendants puissent un jour coexister ?

## 2.1 UN SCENARIO GENERIQUE PUREMENT ALEATOIRE :

Nous devons rechercher de nouveaux critères d'optimisation permettant d'assurer à la fois la garantie de fonctionnement des premiers utilisateurs, tout en autorisant l'évolution des techniques et des usages. Nous devons également permettre la coexistence de systèmes de générations différentes [1]. Ceci suppose le choix de nouvelles règles de partage et la description objective de l'environnement radioélectrique, c'est-à-dire de l'occupation spectrale, en termes généraux, sans entrer dans une description détaillée des systèmes connus qui ne manqueront pas d'évoluer.

Ceci ne peut être fait que sur la base d'un scénario générique, décrivant les rayonnements électromagnétiques, mais n'ayant pas d'autre prétention que de permettre une comparaison entre elles des méthodes de gestion du spectre. Les émissions ne devront plus être décrites que d'une façon globale, sans entrer dans des détails techniques inutiles. Nous supposons donc les émetteur-récepteurs disposés aléatoirement sur le terrain au delà d'une distance minimale pour laquelle les effets de proximité entre émetteurs et récepteurs doivent être pris en compte (figure 1). Nous excluons dans un premier temps les systèmes spatiaux que semblent d'une nature particulière, et qui méritent un scénario particulier, en grande partie déterministe, exclu de cet exposé. Nous choisirons une loi statistique de propagation simple complétée par une dispersion gaussienne. Par exemple la formule suivante:

$$A = 128.1 + 37.6 \cdot \text{Log}(D)$$

De façon à évaluer l'occupation spectrale sans entrer dans la description fine des systèmes, nous choisissons naturellement une attribution aléatoire des fréquences. Nous estimons alors la disponibilité de fréquence par le pourcentage des canaux dans lesquels le brouillage reste inférieur à un seuil donné, permettant un fonctionnement normal des équipements. La probabilité de succès d'une procédure de choix de fréquence, quelle que soit la méthode employée, est nécessairement fonction croissante de ce pourcentage. Ceci constitue le premier élément d'une approche statistique de l'occupation spectrale, intéressante autant pour l'étude du fonctionnement d'un système particulier que pour celle de la compatibilité inter-systèmes dans une même bande de fréquences, et qui a fait ses preuves dans le développement des systèmes passés.

Comme vous le savez, la méthode classique d'attribution des fréquences conduit à prendre des marges importantes même dans le cas d'une implantation sur un terrain réel et le recours à des calculs aussi précis que possible de tous les affaiblissements. De plus, prendre en compte un cas réel ne permet de comparaison objective des méthodes de gestion des fréquences, puisque, pour conduire à un résultat objectif, ce travail devrait être repris sur un ensemble représentatif de situations particulières et les résultats traités de façon optimale.

De plus, sur un terrain réel, il devient rapidement impossible d'optimiser globalement l'attribution des fréquences, et cela devient totalement impossible lorsque les émetteurs sont mobiles ou ne fonctionnent que de façon intermittente.

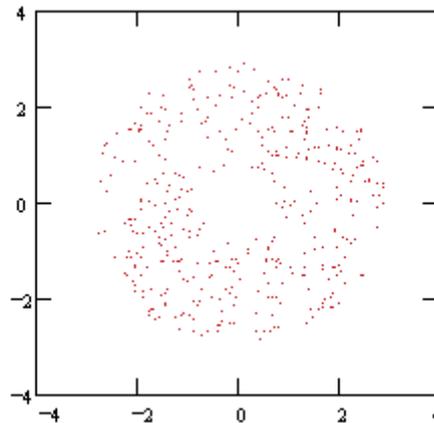


Figure 1 :

Ayant dû renoncer à une attribution centralisée des fréquences, généralement sous-optimale, même dans le cas de liaisons fixes et permanentes, nous sommes amenés à adopter un scénario purement aléatoire dans lequel les implantations sont réparties sur le terrain avec une densité de probabilité uniforme et des atténuations fixées par une distribution statistique dépendant de la distance et du temps dans le cas des mobiles.

Dans ce scénario, le choix des fréquences pourrait être fait selon la méthode combinant deux niveaux de gestion, adoptée dans les systèmes cellulaires:

- Un niveau de gestion centralisé propre à chaque cellule,
- Un niveau de gestion déterministe inter-cellules tolérant un certain niveau de brouillage.

Ceci conduirait le scénario à dépendre de cette méthode d'attribution de fréquences et donc à ne pas être totalement aléatoire, ce qui présenterait deux inconvénients :

- Imposer une prise en compte des atténuations réelles entre les équipements, donc imposer le recours à un terrain simulé.
- conduire à des performances liées aux méthodes de gestion des cellules par nature centralisées, et perdre ainsi sa généralité.

Nous sommes donc logiquement conduits à renoncer dans ce scénario générique à tenir compte d'une éventuelle gestion centralisée des fréquences. A l'image des affaiblissements de propagation, le scénario d'attribution des fréquences doit donc être aléatoire, des procédures décentralisées non décrites permettant de protéger efficacement les liaisons en cours. Nous considérerons dans un premier temps les émetteurs et récepteurs fixes et les atténuations constantes, la prise en compte des mobiles et des fluctuations temporelles de la propagation n'intervenant que dans un second temps.

Dans ce scénario générique, ce qui était fait une fois pour toutes par applications de règles juridiques de gestion des fréquences se fait en temps réel et de façon décentralisée à partir des conditions de propagation définies par des lois de probabilités.

## 2.2 LA TRANSGRESSION DES PRINCIPES FONDAMENTAUX :

Adopter cette démarche nous fait entrer dans un monde aléatoire de l'informatique. Nous considérons une radioélectricité nouvelle, construite sur des procédures asynchrones et décentralisées dans laquelle rien n'est totalement garanti, mais qui ont fait leurs preuves dans le monde informatique.

Il nous reste à renoncer à un dernier tabou : la canalisation. Par souci de simplifier les attributions de fréquence, nous avons pris l'habitude de fixer aux émissions des gabarits spectraux et de définir une largeur de canal, pas de quantification en fréquence. Cette pratique simplifie tant les matériels radioélectriques que la gestion du spectre. Dans la mesure où notre scénario est aléatoire, nous pouvons raisonnablement nous demander si la notion de canal a encore un sens.

Pour répondre à cette question, il suffit de considérer les valeurs de champs reçu des différents émetteurs en fonction de la distance. La forme de cette courbe ne dépend que de la loi de propagation retenue (figure 2) :

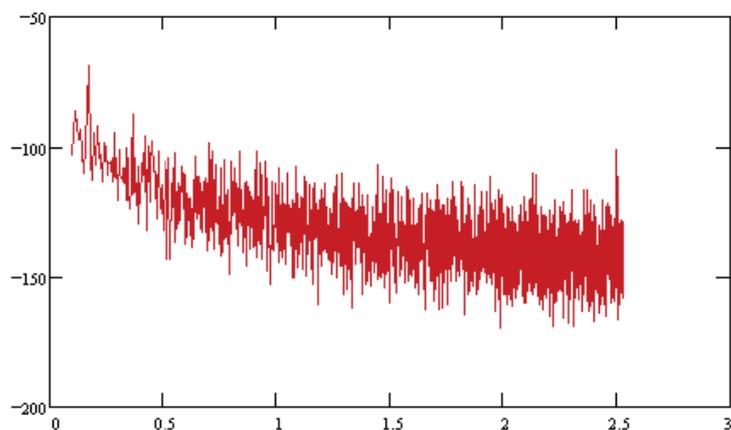


Figure 2 :

L'histogramme des puissances reçues de ces émetteurs (sans tenir compte de leurs fréquences) est alors de la forme suivante (figure 3) :

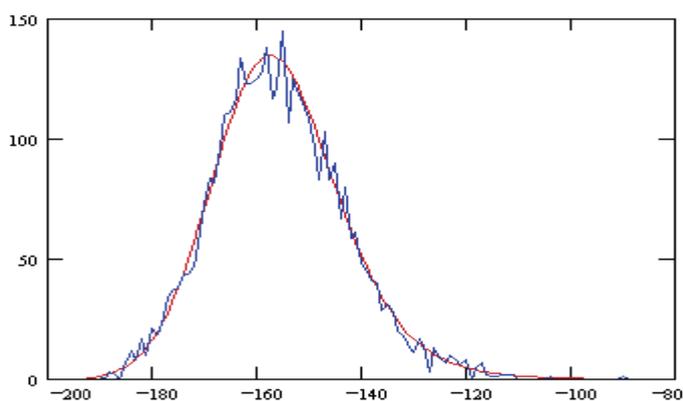


Figure 3 :

Evidemment, ces courbes peuvent se calculer analytiquement. Le résultat analytique est la courbe rouge et la simulation la courbe bleue. Ceci montre la supériorité du calcul sur la simulation. Le calcul, correspondant à l'attitude scientifique, doit en effet être préféré à la simulation chaque fois que cela est possible [2].

Pour déterminer le nombre de liaisons possibles dans une bande donnée, il nous faut choisir un pas de canalisation. Celui-ci est généralement fixé avec le souci de protéger suffisamment les canaux adjacents de façon à permettre une gestion simple des fréquences.

Longtemps, des protections élevées des canaux adjacents ont été exigées, souvent au prix de prouesses technologiques. Le passage au numérique a nécessité de réduire cette exigence, ce qui a été l'occasion de réfléchir au besoin réel.

Dans la mesure où les attributions de fréquences sont faites de façon décentralisée grâce à un algorithme adaptatif, nous pouvons admettre que l'occupation spectrale en un lieu donné est très voisine de celle qui résulterait d'une attribution aléatoire de fréquences. Toutefois, cette hypothèse simplificatrice mériterait d'être

confortée par une simulation mettant en évidence l'effet d'une éventuelle cohérence spatiale des choix de fréquence résultant des procédures retenues.

Une fois le gabarit fixé, il faut rechercher le pas de canalisation optimal. Pour cela, nous faisons varier le nombre de canaux de fréquence dans la bande. Pour un ensemble de 50 canaux respectant une bonne séparation fréquentielle, nous obtenons la courbe suivante (figure 3). Nous pouvons remarquer que l'enveloppe de ce spectre (en bleu) correspond aux niveaux reçus sur les fréquences centrales des canaux de transmission.

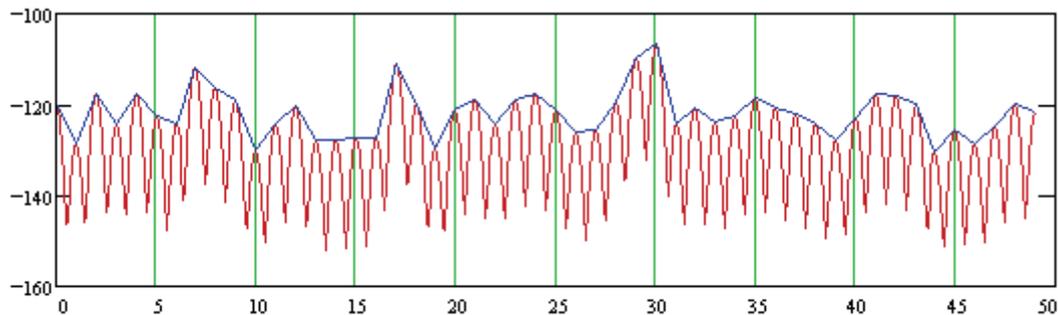


Figure 3 :

Nous observons que le brouillage est maximum sur les fréquences centrales des canaux. Si maintenant nous oublions la notion de canal et nous choisissons les fréquences aléatoirement sans tenir compte d'une quelconque largeur de canal, le niveau d'inter-brouillage devient le suivant (figure 4) :

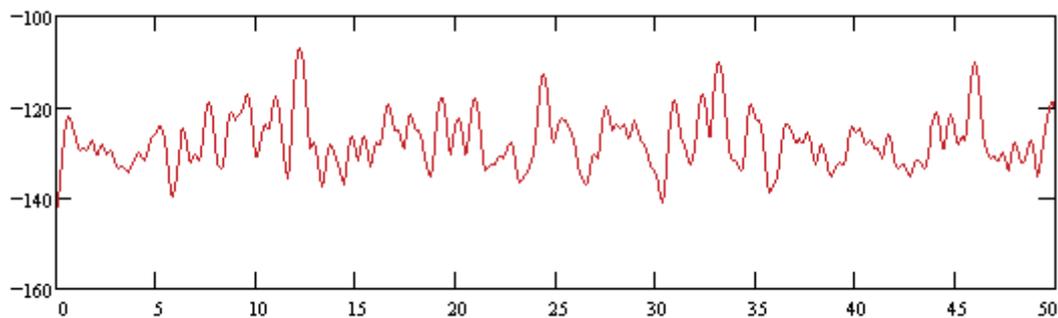


Figure 4 :

Il est en fait statistiquement plus faible. L'effet de la canalisation est finalement d'augmenter le brouillage entre liaisons. La probabilité de recevoir un niveau inférieur à un seuil donné est liée au pas de canalisation. Avec les hypothèses faites, cette probabilité augmente lorsque le pas de canalisation décroît. En effet, la canalisation concentre le brouillage sur les fréquences centrales des canaux, ce qui augmente le niveau d'interférence lié aux autres liaisons.

Si le pas de canalisation devient très inférieur à la largeur spectrale des émetteurs, la disponibilité des canaux tend vers une valeur limite maximale (figure 5). L'ordonnée correspond à la probabilité qu'un niveau donné ne soit pas dépassé, soit la probabilité qu'un canal soit déclaré libre. Dans les deux graphiques, la courbe rouge correspond au cas où le pas de canalisation est très inférieur à la largeur de spectre émis. Dans celui de gauche, la courbe bleue correspond à la distribution des niveaux dans la bande. Dans celui de droite, cette probabilité n'est calculée que pour les fréquences centrales des canaux.

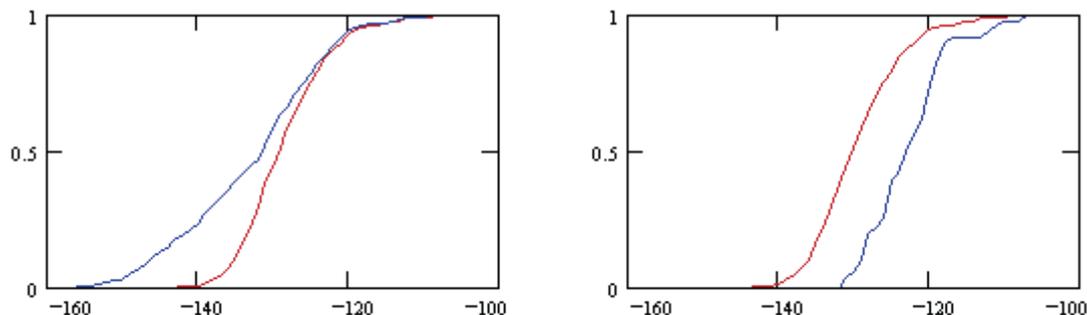


Figure 5 :

Ainsi, si nous répartissons les émetteurs sur 50 canaux (courbes bleue) ou 500 canaux (courbe rouge), c'est-à-dire de façon quasi-uniforme, nous observons que le taux de canaux disponibles à un niveau de brouillage donné croît et tend vers une limite lorsque le pas de canalisation tend vers zéro.

Considérons un algorithme adaptatif dans lequel les équipements choisissent aléatoirement les canaux puis éliminent ceux qui sont excessivement brouillés. Les performances de celui-ci seront meilleures si l'incrément de fréquence est bien inférieur à la largeur du spectre émis, ce qui est à priori paradoxal.

Les systèmes militaires utilisant le saut de fréquence (ou l'évasion de fréquence), même s'ils respectent une canalisation ont donc sacrifié la protection des canaux adjacents, précédemment exigée par les normes radioélectriques, de façon à maximiser la qualité de liaison.

Les anciens qui ont vu des opérateurs radiotélégraphiques savent bien qu'ils déplaçaient légèrement leurs fréquences de travail pour réduire le brouillage. L'instabilité des oscillateurs était une excuse bien commode en cas de réclamation des autres usagers...

La répartition des fréquences sur la base d'une attribution fixe, dans des canaux de largeurs identiques, consiste à mettre tous les utilisateurs dans des cases de surface définies par une portée maximale et un gabarit spectral unique. Ces cases sont des objets à trois dimensions, deux d'espace et une de fréquence.

Pour prendre une image simple, l'opération d'allocation de fréquences correspond à vouloir ranger des objets de taille et de forme mal connues dans des boîtes de taille unique en vue de les stocker dans un volume limité. Il est bien évident que cette méthode de rangement est loin d'être optimale. Si elle apporte une réponse simple au problème posé, elle ne peut en aucun cas être performante du point de vue de la densité d'occupation de l'espace.

### 2.3 UN RETOUR POSSIBLE A LA NOTION DE CANAL ?

Comme nous le savons, la modulation COFDM qui conduit à des spectres émis pratiquement carrés fait exception, les spectres étant quasiment rectangulaires. Dans ce seul cas, la notion de canal de transmission reste totalement pertinente, ce qui constitue un des intérêts de cette technique.

La modulation COFDM utilisée en radiodiffusion permet ainsi de conserver la notion de canal unique dans toute une zone. En revanche, les services non permanents devraient abandonner la notion de canal de transmission utilisée par l'UIT.

### 2.4 UNE OCCUPATION SPECTRALE STATISTIQUE :

Tout au long de ce chapitre, nous avons vu apparaître un premier critère d'optimisation résultant d'un choix de procédures adaptatives de choix de fréquence conduisant à une occupation statistique du spectre.

Chaque liaison occupera dans une surface donnée une bande spectrale dont les paramètres seront de plus en plus aléatoires. La prise en compte des aspects temporels conduira même à considérer un pavage

irrégulier dans un espace à quatre dimensions, deux d'espace, une de fréquence et une temporelle. De plus, le niveau émis, la fréquence centrale, la largeur de bande pourront être variables dans le temps en fonction des services demandés.

Toute l'activité humaine produit ainsi un bruit radioélectrique qui modifie le rayonnement thermique de la Terre [3]. Pour protéger l'environnement radioélectrique, il faudra donc constituer des « parcs radioélectriques protégés » dans lesquels il restera possible d'observer les signaux naturels et la propagation des ondes, et même créer des « déserts radioélectriques » depuis lesquels observer l'univers...

## 2.5 UN PREMIER CRITERE D'OPTIMISATION :

Compte tenu de ce qui vient d'être dit, nous devons alors introduire un premier critère:

### L'occupation spectrale.

Ce critère d'occupation spectrale doit quantifier d'une façon simple le niveau de pollution spectrale décrite de façon statistique. Il doit prendre en compte le niveau des émissions de chaque système, ses fluctuations temporelles et permettre de valider les procédures choisies pour les systèmes en projet.

Cette approche peut paraître utopique. Elle seule permettra la cohabitation dans une même bande de systèmes différents ou de générations et techniques différentes. Elle a pourtant été adoptée, au moins implicitement, par les systèmes de télécommunications antibrouillés militaires. Les brouilleurs ennemis ne sont-ils pas des utilisateurs, certes malveillants, de la bande de fréquences allouées, mais qui participent à leur manière à l'environnement radioélectrique ? Pourquoi les techniques destinées à protéger les liaisons contre les brouilleurs ennemis et les autres allocataires d'une même bande de fréquence ne seraient-elles pas les mêmes ?

## 3 LA MODULATION, LE CODAGE ET LE TRAITEMENT D'ANTENNE:

La modulation et le codage ont été longtemps des techniques indépendantes. Depuis les origines, les systèmes radioélectriques ont conduit progressivement au développement des techniques de modulation analogiques. Avec la numérisation des transmissions, des adaptations ont été apportées à ces techniques. Nous ne reviendrons pas sur ces développements, mais nous les considérerons sous un angle nouveau.

Aujourd'hui, modulation et codage correcteur d'erreur sont de plus en plus imbriqués, et cela à un point tel qu'il devient impossible de les séparer. Peut-on encore les distinguer ?

### 3.1 LE CODAGE :

L'effort de recherche a d'abord porté sur l'optimisation des codes à redondance donnée, dans des conditions standard correspondant à des erreurs distribuées aléatoirement. Depuis, les systèmes ont souvent fait appel à des ensembles de codes adaptés aux différents échanges (procédures, transmission numériques ou de données...). Par exemple, dans le cas des modulations QAM, la distribution des erreurs n'est pas uniforme, et les codes doivent en tenir compte.

Un grand nombre d'études a porté sur l'optimisation du codage. Celles-ci font, souvent implicitement des hypothèses sur la répartition des erreurs. Par ailleurs, l'effet des erreurs sur le fonctionnement du système doit être évalué. Est-il sensible aux erreurs isolées ou au pourcentage de blocs erronés ?

Sans entrer dans la théorie des codes, il est facile de constater que le codage réduit le débit d'une liaison en fonction de la distance entre les mots de code. La valeur maximale de celle-ci résulte du nombre de mots entourant chacun des mots du code. Le calcul de ce nombre est extrêmement simple, puisqu'il est directement lié au nombre de configurations d'erreurs entourant chaque mot du code.

Pour un code, la correction d'erreur ne peut que réduire le débit. La valeur minimale de cette réduction est donnée alors par une courbe limite (figure 6), ici pour un code de 50 bits. Bien évidemment, le débit tend vers zéro lorsque la capacité de correction du code augmente.

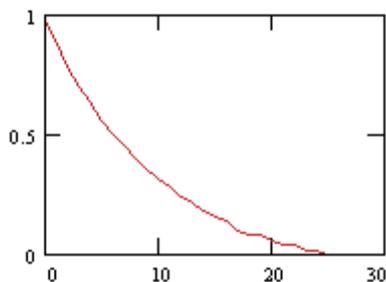


Figure 6 :

Les codes utilisés en pratique correspondent à des distances faibles pour lesquelles la réduction de débit reste acceptable, ou à des distances très grandes dans le cas du CDMA, mais dans ce cas le débit d'information devient faible par rapport au débit en ligne.

Nous constatons un phénomène analogue à celui mis en évidence dans le domaine fréquentiel. L'élargissement des canaux nécessité par l'augmentation du débit en ligne est compensé par la meilleure tolérance au bruit et au brouillage des liaisons.

Tous les codes, ou les ensembles de codes utilisés en cascade, conduisent à des résultats proches les uns des autres. Ils sont choisis en fonction de nombreux critères liés aux structures de données, retard de codage, distribution attendue des erreurs, minimisation du taux d'erreur bit au bloc de données, mais aussi aux possibilités technologiques.

Avec la technique dite CDMA, codage et modulation deviennent inséparables. Nous venons de voir que les canaux de fréquence classiques ne sont pas totalement orthogonaux et n'assurent pas un usage optimal du spectre. Avec cette nouvelle technique, les canaux sont remplacés par des pseudo-canaux très imparfaitement orthogonaux mais qui possèdent des caractéristiques intéressantes.

Pour chaque code, il est possible de tracer des abaques présentant le taux d'erreur après correction en fonction du taux d'erreur initial. Cette présentation est assez trompeuse, car, pour les rapports signal sur bruit faibles, le taux d'erreur est en fait pratiquement linéaire par rapport au logarithme du niveau reçu.

La figure 7 correspond à la courbe théorique de taux d'erreur en fonction de la valeur de  $E/N^{\circ}$ .

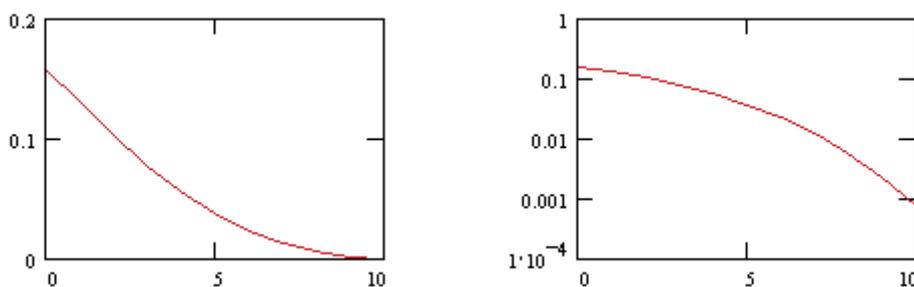


Figure 7 :

La courbe de droite est la courbe classique, la courbe de gauche correspond à une échelle linéaire en ordonnées. Dans la mesure où le décodage serait linéaire, cette courbe établie pour la modulation de phase à deux états se prolongerait pour donner le résultat d'une corrélation linéaire pour les très faibles rapports signal sur bruit. Le cas du CDMA correspond au prolongement de cette courbe pour les rapports signal sur bruit négatifs.

Ceci permet de comprendre que codage et modulation sont des opérations analogues et que seul le bruit de quantification crée par le codeur détériore les performances à faible signal sur bruit des décodeurs. Avec un traitement linéaire, il y a une continuité parfaite entre codage correcteur et modulation CDMA.

### 3.2 LE TRAITEMENT D'ANTENNE :

Le traitement d'antenne revient à deux traitements différents. En émission, il est possible de former un faisceau en direction d'un récepteur particulier, c'est-à-dire d'utiliser une antenne directive spécifique d'un récepteur particulier. En réception, le traitement d'antenne a un rôle bien différent, en liaison avec le codage et la modulation.

Ses performances sont directement liées à la fonction de transfert spatio-temporelle du milieu. Il ne peut être évalué qu'en fonction du nombre de points brillants, identifiables ou non, des retards de propagation associés et de leur stationnarité.

L'évaluation de ses performances exige une très bonne connaissance de la propagation des ondes qui a été un des plus importants sujets de recherche depuis l'UMTS.

### 3.3 DES TRANSMISSIONS EN DIVERSITE DE FREQUENCE ET D'ESPACE ?

Comme Monsieur Jourdain faisait de la prose, nos systèmes numériques font-ils de la diversité sans le savoir ?

En effet, avec le codage, et bien plus encore avec les modulations CDMA, les liaisons occupent une bande de fréquence élargie par rapport à la valeur minimale théorique. Il s'agit donc d'une sorte de diversité de fréquence. De même, l'utilisation de plusieurs antennes correspond à une diversité d'antennes. Un récepteur numérique utilisant un réseau d'antennes réalise un traitement qui n'est pas sans rappeler celui fait dans les faisceaux hertziens troposphériques par les combineurs de diversité, dont les performances ont été étudiées de façon théorique et expérimentale. Il faut donc s'attendre à ce que les gains obtenus soient comparables à ceux apportés par les diversités de fréquences et d'antennes pour des niveaux de diversité comparables.

Dans cette étude, nous avons donc à trouver, pour les liaisons numériques, des critères théoriques d'optimisation analogues à ceux établis au temps de l'analogique. Dans les faisceaux hertziens à diffusion troposphérique, la structure de l'espace de diffusion et sa fluctuation temporelle, représentée par un ensemble de points brillants jouait un rôle fondamental dans le fonctionnement de la liaison. Dans les systèmes de radiocommunication modernes, les fluctuations des trajets multiples et l'effet Doppler lié aux déplacements des mobiles, conduisent à des effets comparables.

Même lorsqu'une seule antenne est utilisée, le récepteur numérique optimal reste un récepteur adaptatif prenant en compte la réponse impulsionnelle du canal de transmission in-stationnaire, technique utilisée depuis longtemps dans les modems HF.

Ceci montre à quel point une connaissance très fine de la propagation est nécessaire à l'optimisation d'un système de radiocommunications.

### 3.4 L'ANTIBROUILLAGE :

La congestion du spectre observée dans les bandes de radiocommunications incite à rechercher des techniques d'antibrouillage susceptibles d'augmenter la capacité des systèmes. Pour savoir si ces techniques sont capables d'avoir un réel effet, nous devons absolument disposer du scénario de déploiement du système et bien connaître la distribution spatiale des signaux indésirables, c'est-à-dire des brouilleurs.

La multiplication des procédures adaptatives destinées à améliorer les performances des systèmes est-elle souhaitable, utile ou catastrophique ? Que peut-on attendre d'un antibrouillage dans un environnement in-stationnaire ?

Les militaires ont dû abandonner progressivement les allocations de fréquences, celles-ci étant incompatibles avec les techniques d'antibrouillage. Les bandes disponibles étaient déjà officiellement saturées et il fallait attribuer à chaque liaison un très grand nombre de canaux utilisés de façon pseudo aléatoire. Par nature, ces techniques militaires devenaient incompatibles avec des allocations de fréquence. Ceci est-il réellement une particularité militaire ? L'encombrement des bandes de fréquence civiles n'est-il pas, au moins sur le papier, au moins aussi important que celui des bandes militaires ?

### 3.5 UN DEUXIEME CRITERE D'OPTIMISATION :

Pour pouvoir optimiser un projet, nous devons introduire un nouveau critère d'optimisation prenant en compte ce que j'appellerai la diversité. Celui-ci devra permettre de définir les performances de modulation-codage par rapport à une limite théorique en fonction des paramètres suivants :

- **Le compromis largeur de bande/ signal a bruit.** Le critère doit permettre de faire correspondre rapport débit utile / largeur de bande avec le rapport signal sur bruit nécessaire.

-**Les traitements d'antenne.** Le critère devra permettre de déterminer l'efficacité de ces techniques en association avec la modulation-codage et ses possibilités d'antibrouillage.

- La résistance à l'effet Doppler, y compris du point de vue des variations de réponse impulsionnelle, donc de l'in-stationnarité de la propagation.

L'ensemble doit permettre de lier les performances d'une liaison sur la base de paramètres synthétiques définissant un niveau de diversité combinant l'ensemble des techniques employées (modulation, codage, traitement d'antenne, compensation du Doppler...).

## 4 LA PROPAGATION : UNE LIMITE FONDAMENTALE.

Bien évidemment, la propagation joue un rôle essentiel dans les applications de la radioélectricité. Les possibilités techniques nouvelles ont conduit à un grand nombre d'études qu'il serait trop long d'analyser ici. Il me semble cependant nécessaire de préciser les aspects suivants :

La radiotéléphonie mobile a nécessité de très nombreux travaux dirigés dans deux directions indépendantes :

- Prévoir la couverture radioélectrique des systèmes cellulaires.
- Connaître les réponses impulsionnelles du milieu, les dopplers liés au mouvement des mobiles et la répartition angulaire des rayons frappant les antennes.

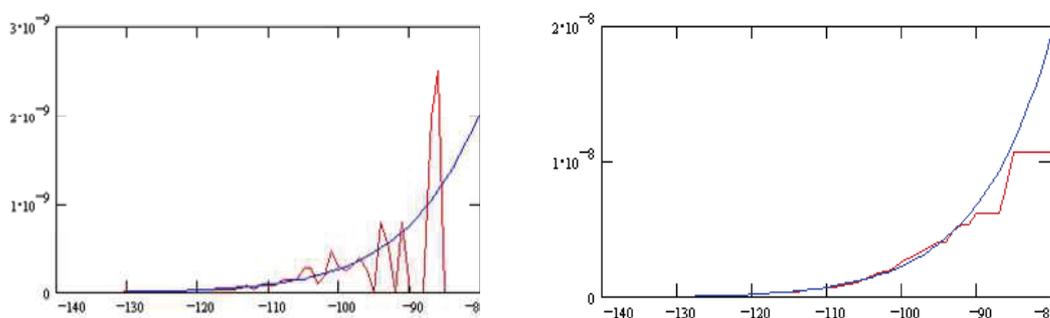


Figure 8 :

La figure 8 représente symboliquement une répartition de champs reçus dans l'hypothèse du scénario aléatoire et sur la base de la formule de propagation statistique proposés. La courbe de gauche représente la distribution des champs reçus. Celle de droite, la somme des puissances reçues dans le canal.

Ces courbes montrent clairement la présence de quelques signaux prépondérants et d'une répartition diffuse de signaux de plus faible niveau. Un traitement d'antenne pourra jouer un rôle positif pour sélectionner un signal suffisamment fort, mais sans doute pas pour éliminer un perturbateur puissant.

Enfin, l'environnement des antennes joue un rôle essentiel dans les fluctuations des fonctions de transfert entre les émetteurs et les récepteurs [4]. Il produit des trajets multiples de directions et de retards variés. Dans le cas des mobiles, la fluctuation rapide de leurs déphasages relatifs peut réduire ou même annihiler les gains espérés. Enfin, il ne faut pas oublier que l'environnement des antennes est susceptible d'évoluer pour des raisons extérieures de toutes natures : utilisation de nouveaux matériaux en architecture, diversification des besoins...

Il importe donc de ne pas réaliser des traitements trop spécifiques d'un environnement particulier et pouvant ne plus convenir après un changement mineur de celui-ci.

N'avons-nous pas besoin d'un modèle synthétique décrivant la propagation des signaux ? Celle-ci ne risque-t-elle pas d'invalider des choix techniques apparemment raisonnables?

## 5 UNE TACHE HERCULEENNE ?

Nous savons bien que gérer le spectre radioélectrique avec les méthodes actuelles est déjà une tâche considérable, et que le taux d'utilisation des fréquences qui en résulte est très faible, sauf dans les bandes radiotéléphonique dont la gestion est délégué aux opérateurs.

Pour introduire de nouveaux usages, les règles de l'UIT poussent à décrire, au cas par cas, et de façon détaillée, tous les systèmes risquant d'interférer. Cette voie conduit à faire des simulations de plus en plus complexes, malheureusement toujours spécifiques, mais dont la nécessité est incontestable [5]. Quel utilisateur du spectre radioélectrique pourrait accepter qu'une nouvelle application soit développée sans respecter son antériorité ?

Pour ces raisons, vouloir étudier de façon détaillée la compatibilité de systèmes adaptatifs différents, cohabitant dans une partie du spectre radioélectrique devient juridiquement exclu et techniquement quasiment impossible. La complexité des simulations deviendrait excessive et leurs conclusions peu crédibles compte tenu des nombreuses hypothèses sous jacentes faites, consciemment ou inconsciemment, lors de la définition du scénario. Il faut donc adopter une autre stratégie.

Si une tâche devient impossible, ne faut-il pas renoncer à l'entreprendre et à la mener à Bien?

### 5.1 UNE VOIE PARTICULIEREMENT PROMETTEUSE :

Nous devons donc éviter de buter sur le mur de la complexité et essayer de décrire de façon synthétique une réalité extrêmement complexe. Cette attitude est depuis toujours celle des scientifiques. On étudie l'hydrodynamique et non le mouvement des molécules élémentaires...

Il faut alors procéder à une réduction considérable des données à traiter, et renoncer à tout simuler. On cherchera à décrire le plus simplement possible, et d'une façon globale, les signaux rayonnés par les systèmes, mais aussi la tolérance des récepteurs aux perturbations, par nature instationnaires, auxquelles ils sont soumis.

Comme dans de nombreux domaines scientifiques, seule l'adoption de critères synthétiques permettra la réduction de cette complexité, et une comparaison objective des techniques concurrentes.

#### 5.1.1 LA CARACTERISATION DES RAYONNEMENTS :

L'introduction de nouveaux systèmes contribue toujours à une augmentation du niveau de la puissance rayonnée et des interférences hors bande qui doivent pouvoir se décrire de façon générique. Les pollutions spectrales inévitables s'ajoutant au bruit thermique (et aux bruits naturels), doivent être évaluées d'une façon statistique simple. Il doit en être de même des variations temporelles des émissions résultant des procédures adaptatives et de la fluctuation des usages.

Il faut donc changer radicalement de méthode de pensée et caractériser statistiquement l'environnement radioélectrique dans la bande et hors bande. Cette évaluation sera faite sur la base de lois de propagation décrites par des fonctions spatio-temporelles simples, mais aussi en décrivant l'activité radioélectrique des systèmes. Dans la mesure du possible, les corrélations locales de ces lois seront également estimées.

Nous savons bien que les récepteurs VLF utilisent la connaissance du bruit atmosphérique pour réduire son influence sur les récepteurs.

Pourquoi des systèmes comme les RADARS et des liaisons ULB ne pourraient pas partager une bande de fréquence ? La figure 8 présente le taux d'erreur brut d'une liaison soumise à des parasites pendant de 0.2% ou 2% du temps, et pouvant correspondre à des impulsions RADAR.

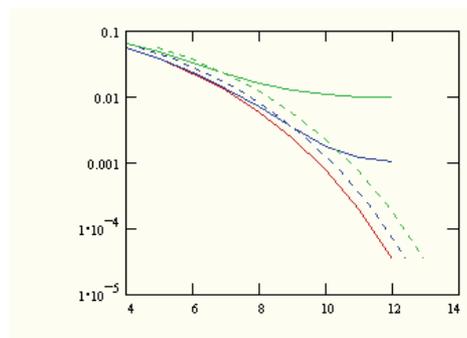


Figure 8 :

Ajouter ces paquets d'erreurs au taux d'erreurs en ligne, avant l'intervention des codes correcteurs d'erreurs, conduirait-il à une dégradation inacceptable des performances réelles d'un système?

### 5.1.2 LA TOLERANCE DES SYSTEMES AUX PERTURBATIONS:

Indépendamment de ces estimations du niveau d'occupation du spectre, nous devons étudier la tolérance des systèmes à des perturbations types. Cette méthode permettrait de travailler sur un système sans avoir à simuler son environnement réel. Elle consisterait à tester le système en référence à des perturbations arbitraires, pouvant ou non être observé dans la pratique.

La robustesse d'un système aux dégradations de l'environnement et à occupation spectrale, due aux autres usagers comme aux rayonnements hors bande, pourra alors être facilement évaluée sur la base des résultats obtenus avec ces interférences types.

Comme dans les systèmes militaires, on cherchera à déterminer grâce à cet ensemble de stimuli « le brouilleur optimal », c'est-à-dire celui le moins bien toléré par le système. Il faudra s'assurer que l'environnement réel reste bien moins agressif et ne risque pas, en générant spontanément les signaux les moins acceptables, de conduire à une dégradation inacceptable du système.

## 6 LE RECOURS AUX METHODES DE L'AUTOMATIQUE:

Moyennant quelques adaptations, un système de radiocommunication doit pouvoir être étudié avec les méthodes de l'automatique. Nous allons tout d'abord le décrire comme un système bouclé, puis montrer comment appliquer les méthodes de l'automatique à ce type de système.

### 6.1 LA MODELISATION DES SYSTEMES :

Une fois propagées jusqu'aux récepteurs, l'ensemble des émissions volontaires ou parasites, contribuent à l'environnement radioélectrique.

Nous avons à prédire le fonctionnement des récepteurs, donc celui du système, dans cet environnement. Pour cela, nous modélisons le système sous la forme d'une boîte noire liant de façon dynamique entrées et sorties. Les entrées sont l'encombrement spectral et la demande de services fixant l'activité du système. Les sorties sont la contribution du système à l'encombrement spectral et la qualité de service.

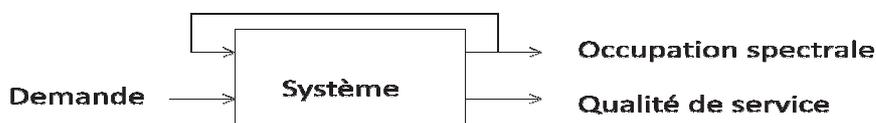


Figure 9 :

La modélisation peut se faire d'une façon plus ou moins complexe, selon les objectifs poursuivis. Par souci de généralité, elle doit s'appuyer sur un modèle d'implantation aléatoire. La demande peut alors être fixe ou fluctuer aléatoirement. La qualité de service peut être décrite par un ensemble de données comme le taux d'échec des liaisons ou leur temps d'établissement.

L'occupation spectrale peut être décrite par la valeur statistique des niveaux reçus et en cas de besoin par les directions des trajets multiples et leurs retards relatifs. Cette occupation spectrale peut donc être seulement une probabilité de trouver un canal libre comme dans les simulations effectuées par le CELAR dans le cadre de l'étude du radiotéléphone du RITA ou un ensemble beaucoup plus riche d'informations.

Enfin, cette boîte noire doit permettre de lier les sorties à des variations temporelles des entrées.

### 6.2 L'ETUDE EN BOUCLE OUVERTE :

Comme en automatique, cette approche en boucle fermée doit s'appuyer une étude en boucle ouverte. La boîte noire présente alors deux entrées et deux sorties liées par des fonctions temporelles.

Ce modèle dynamique permet alors, toutes choses égales par ailleurs, de déterminer de façon globale le comportement du système en présence de tout environnement radioélectrique et de toute charge de trafic.

Comme en automatique, on pourra tester le comportement du système en boucle ouverte et déterminer une fonction de transfert généralisée liant les entrées aux sorties.

Lorsque l'activité du système est faible, on s'assurera du fait que les perturbations réelles sont d'un niveau bien inférieur à celui tolérable. Si l'activité est importante, on pourra tester la stabilité du système et prévoir d'éventuels accrochages dus aux procédures d'adaptation (réduction de puissance, changement de canal ou de mode, régulation du trafic...).

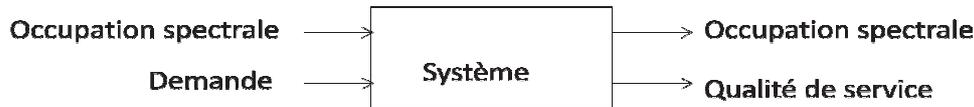


Figure 10 :

Cette méthode est la seule permettant d'arrêter une course au gigantisme des simulations qui, en fin de compte, nécessitent une très grosse puissance de calcul et ne pourront conduire à des résultats totalement convaincants. Le recours excessif aux simulations est en fait au renoncement à une attitude réellement scientifique.

L'occupation spectrale peut être décrite de façon plus ou moins détaillée. Elle peut être simplement définie la probabilité qu'un niveau de brouillage ne soit pas dépassé. D'autres caractéristiques spectrales peuvent être ajoutées. Il est en particulier possible de couper la bande spectrale et sous-bandes ou même en canaux, et par ce biais d'entrer dans le fonctionnement intime du système (ce qui ne semble souhaitable que lors des phases de conception). De même, la qualité de service peut être définie pas des paramètres plus ou moins globaux.

### 6.3 D'AUTRES CRITERES D'OPTIMISATION :

De façon à pouvoir étudier le comportement transitoire des systèmes, les boites noires doivent être décrites par des fonctions temporelles simples de façon à pouvoir utiliser les outils de l'automatique.

Pour pouvoir comparer les techniques mises en œuvre, les paramètres et les critères de qualité seront définis d'une façon claire et acceptée par tous. Seule la normalisation de la façon de décrire les entrées et sorties des boites noires décrivant les systèmes offrira aux chercheurs un langage commun leur permettant de comparer leurs résultats. Ce langage sera celui de la science des systèmes électromagnétiques, comme les notions de vitesse et de pression appartiennent à celui de l'hydrodynamique. Son utilisation conduira implicitement à la formalisation de nouveaux critères d'optimisation reconnus par tous.

### 6.4 LE COHABITATION DE SYSTEMES DIFFERENTS:

Un langage commun une fois établi, la cohabitation de systèmes se décrit simplement en juxtaposant des boucles qui sont alors couplées par l'occupation spectrale :

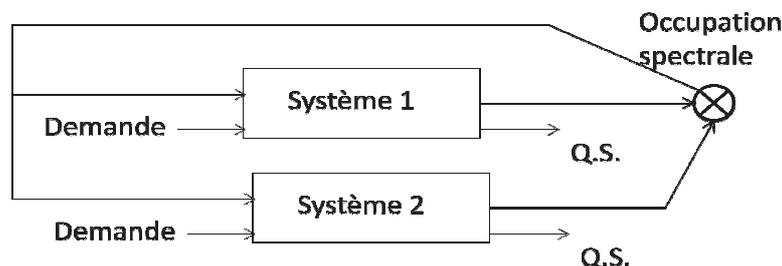


Figure 11 :

Une fois les systèmes modélisés, il suffit de fermer la boucle pour étudier la stabilité de l'ensemble et l'influence des fluctuations des éléments exogènes que sont l'activité des autres systèmes occupant le spectre, mais aussi l'évolution de la demande.

Les couplages inter-systèmes résultent simplement de la mise en parallèles des boucles de réaction propres à chaque système. Cette approche doit permettre d'appliquer à la gestion dynamique du spectre

radioélectrique l'ensemble des méthodes de l'automatique. Il est alors possible de déterminer des marges de stabilité globale, de qualifier les techniques d'adaptation et de tester les limites de fonctionnement qui en résultent.

## 6.5 LA REPRESENTATION DES FONCTIONS :

Pour décrire les fonctions de transferts, il semble préférable de choisir les fonctions analytiques simples, en temps continu [6]. Elles présentent par rapport aux filtres numériques des avantages importants :

- Elles sont indépendante du pas d'échantillonnage temporel des données et permettent donc de changer facilement l'échelle du temps en fonction des phénomènes étudiés.
- Elles évitent les problèmes de troncature observés dans les filtres numériques.
- Elles permettent toutes les opérations de filtrage, convolution...
- Le retour à des échantillons temporels est très facile.

Bien évidemment, ces fonctions analytiques simples seront nécessairement des approximations linéaires des fonctions réelles et ne seront valables qu'autour d'un état moyen. Comme en automatique, il peut être nécessaire de considérer plusieurs de ces états et d'évaluer la dispersion des paramètres du modèle qui en résultent. De plus, les retenir impose un langage commun aux différents chercheurs.

Dans le passé, j'ai appliqué cette méthode de modélisation à la conception d'un prédicteur macroéconomique [7]. Le modèle décrit l'ensemble des acteurs économiques avec moins de 20 paramètres significatifs, dont seuls quelques ont un rôle important. La modélisation de ce système était bien plus difficile en raison de la présence de constantes de temps très diverses (dans un rapport de plus de un à cent). Le prédicteur associé à ce modèle conduit à des prévisions à long terme tout-à-fait remarquables, le comportement asymptotiques et le respect de la causalité de toutes les fonctions de transfert étant individuellement vérifiés.

De façon à tirer le meilleur parti de cette modélisation synthétique, les signaux test utilisés en vue de l'étude dynamique des systèmes devront être également des fonctions analytiques simples : fonctions exponentielles réelles ou complexes, éventuellement modulation linéaire de fréquence...

Il est alors possible de déterminer, pratiquement sans calcul, l'effet sur l'ensemble de la modification d'une partie quelconque du système, et donc de trouver les paramètres significatifs.

## 7 UNE REVOLUTION CONCEPTUELLE :

Comme cela a été dit plus haut, les premières utilisations expérimentales des ondes radioélectriques avaient rapidement montré la nécessité d'un contrôle des émissions. Ceci a conduit à créer des organismes supranationaux qui sont devenus l'UIT, mais la notion de système n'est apparue que plus tard.

### 7.1 LES PRINCIPES ORIGINELS :

- Les règles d'attribution de fréquence avaient été faites en adoptant des principes simples :
- le spectre était découpé en bandes ou canaux séparés par des bandes de garde,
  - Les attributions étaient faites dans une grande région, les fréquences n'étant pas réattribuées dans toute la zone dans laquelle elles étaient susceptibles de se propager (même si ce choix s'est avéré inadapté aux ondes courtes).
  - L'usage était supposé permanent.

L'espace radioélectrique comportait implicitement deux dimensions d'espace et une dimension de fréquence. Il était découpé de façon permanente en cellules. L'espace radioélectrique n'avait alors que trois dimensions (deux d'espace et une de fréquence). Des marges de protection étaient dimensionnées de façon à éviter toute possibilité de brouillage entre les cellules, ce qui limitait grandement la densité du pavage et réduisait encore la disponibilité des fréquences.

Avec l'adoption de la modulation de fréquence en radiodiffusion, l'élargissement des bandes nécessité par cette modulation augmentait encore l'encombrement du spectre. Jusque dans les années 60, on assurera que dans la bande FM, il n'était pas possible de trouver des fréquences pour plus de trois stations de radiocommunications...

## 7.2 UNE EVOLUTION RECENTE :

Le développement des transmissions numériques a profondément modifié les contraintes techniques. Les largeurs de bande de modulation, les rayonnements hors bande, la sensibilité au brouillage des liaisons numériques sont profondément différentes de ce qu'elles étaient du temps de l'analogique. Une connaissance plus fine de la propagation a permis de prendre en compte les défauts des canaux et de les corriger.

Les usages radioélectriques ne correspondent plus nécessairement à des usages fixes et permanents. Les procédures d'adaptation prennent en compte et en temps réel les conditions locales.

Enfin, le développement des systèmes de radiocommunications cellulaires, dans lesquels les concepteurs ont toute liberté d'usage du spectre, a permis l'adoption de solutions innovantes.

Le pavage est passé de trois à quatre dimensions (les deux dimensions d'espace, une de fréquence, une de temps), les portées étant réduites et le pas de réutilisation des fréquences s'est fait pratiquement sans séparation spatiale entre des cellules de dimensions réduites.

Ceci a permis d'atteindre une capacité de transmission sans commune mesure avec ce qu'il aurait été possible de faire en appliquant des règles d'attribution de fréquences unitaires et fixes à des usagers.

## 7.3 UNE GENERALISATION POSSIBLE ?

Cette évolution s'est faite à partir des systèmes de radiocommunications cellulaires peut-elle s'étendre aux autres services radioélectriques ? Elle a permis une croissance considérable des usages qui n'avait pas été imaginée lors des premières discussions des normes du GSM.

Dans les années 70, des expérimentateurs sérieux nous expliquaient qu'en certains endroits il était impossible de transmettre un débit de 16 Kbits/s. Aujourd'hui, une meilleure connaissance de la propagation et les progrès de la technologie du traitement de signal, ont repoussé les limites de capacité de transmission au delà de tout ce qui pouvait être imaginé.

Les raisons essentielles de cette évolution ont été une connaissance plus fine de la propagation, et en particulier des réponses impulsionnelles des canaux, les progrès technologiques, mais aussi le confinement des transmissions dans des cellules de plus en plus petites.

Est-il possible qu'à long terme, des changements comparables n'interviennent pas dans toutes les bandes de fréquences et pour tous les usages du spectre ?

Les fonctions transmission et localisation sont de plus en plus imbriquées et pourraient l'être davantage. Il est maintenant possible de réaliser des RADARS multistatiques utilisant des sources d'opportunité comme les émissions de radiodiffusion DAB ou la télévision TNT. Aujourd'hui, quelqu'un oserait-il affirmer que télécommunications et radiodiffusion sont des domaines totalement disjoints ?

Techniquement, le mélange d'applications est devenu possible. La localisation des mobiles est un besoin de plus en plus ressenti. Toutes ces possibilités nouvelles de partage, si elles sont peu compatibles avec les classifications de l'UIT, doivent être étudiées, sans tenir compte de considérations réglementaires, qui, nous le savons, ne résistent pas très longtemps à l'évolution des techniques et des besoins.

Il est bien certain qu'il restera nécessaire de créer de nouvelles classes de services devant occuper des bandes de fréquence différentes. Pour autant, la recherche doit préparer les outils conceptuels qui permettront de choisir des techniques qui conduiront aux meilleurs compromis.

## 8 CONCLUSION :

Les progrès de la technologie électronique ont permis d'améliorer de façon décisive notre connaissance de la propagation. En retour, celle-ci nous a permis de valoriser les nouvelles possibilités technologiques en télécommunications, mais aussi dans l'ensemble des applications de la radioélectricité.

Cependant, il ne faut pas oublier que l'étude de la propagation dont nous parlons ici n'est pas celle intéressant les opérateurs de télécommunications. Ceux-ci ont à installer au mieux des systèmes figés dans un environnement complexe, tout en respectant des contraintes de toutes natures: techniques, réglementaires, architecturales, juridiques, environnementales...

Dans les recherches, nous ne devons considérer que les limites techniques fondamentales que la propagation impose aux systèmes actuels et futurs, qu'ils soient ou non réalisables à moyen terme.

Les systèmes cellulaires ont permis de transmettre des volumes de trafic inimaginables dans les années 80. Ceci s'est fait grâce à une liberté quasi complète des concepteurs qui ont réalisé sans contraintes des systèmes fermés extrêmement performants. Dans leurs bandes propres, ils ont pu s'affranchir de certains principes, mais en conservant, au moins partiellement, une gestion centralisée des fréquences.

Le rêve d'un gouvernement mondial des télécommunications capable d'effectuer en temps réel une gestion efficace de toutes les fréquences est une pure chimère. Nous devons donc chercher à concevoir des systèmes décentralisés, optimisés individuellement sur la base d'une bonne connaissance spatio-temporelle de la propagation et de l'activité radioélectrique. A contrario, vouloir mélanger toutes les applications de la radioélectricité sans prendre aucune précaution serait tout aussi dangereux et tout autant utopique.

Des nouveaux critères devront permettre de qualifier les idées nouvelles et de prévoir les performances des systèmes en projet, mais aussi de s'assurer que ceux-ci ne sont pas susceptibles d'être gravement perturbés par l'introduction ultérieure de nouvelles applications. Ceci ne peut être fait que sur la base de recherches prospectives menées en toute indépendance d'esprit.

Lors de l'étude des faisceaux hertziens à diffusion troposphérique, les théoriciens ont mis au point des modèles qui ont permis de déterminer les performances des différents types de combineurs, que leur réalisation ait été ou non technologiquement possible et économiquement rentables. Ils ont établi des formules qui ont été parfaitement vérifiées sur liaisons réelles.

Aujourd'hui, nos études doivent être menées de la même manière et nous conduire à estimer les performances limites, dans un environnement réel, de toute combinaison envisageable des techniques actuelles (modulation, codage, procédures adaptatives, diversité d'antennes...), cela même si la technologie nécessaire n'est pas encore disponible. Comme dans les systèmes militaires, cette optimisation doit se faire en tenant compte de la présence d'autres systèmes, anciens ou futurs, qui constituent involontairement des sources de brouillage dont il faut tenir compte.

A l'avenir, la généralisation des méthodes de l'informatique rendra in-stationnaire l'ensemble des paramètres classiques des émissions : fréquence, modulation ?... Les transmissions, initialement synchrones, sont devenues partiellement ou totalement asynchrone [8]. Pourquoi les méthodes qui assurent la gestion de l'accès au milieu dans les réseaux informatiques ne permettraient-elles pas de gérer efficacement l'accès au spectre radioélectrique ?

Par la force des choses, la radioélectricité a dû maîtriser des phénomènes aléatoires : la propagation, les bruits naturels et les parasites... Aujourd'hui, s'y ajoute la non-stationnarité du milieu, du trafic et des usages. Ne doit-elle pas faire, comme l'informatique, le choix d'un monde asynchrone ? N'avons-nous pas à étudier les méthodes qui nous permettront de traiter au mieux les problèmes multidimensionnels bien plus complexes que pose le développement des radiocommunications ?

De toute façon, l'évolution ne se fera qu'en transgressant les règles établies et en les remplaçant par des règles nouvelles. Celles-ci devront garantir la compatibilité entre des systèmes non encore définis. Les nouveaux critères d'optimisation devront donc permettre de qualifier globalement l'occupation spectrale et la compatibilité inter-systèmes. Bien évidemment, des services, analogues à ceux actuellement utilisés par l'UIT, seront définis en termes techniques et non plus en termes d'usage. Qui croit encore que les télécommunications et la radiodiffusions sont des mondes totalement différents ?

Enfin, pour ne pas buter contre le mur de la complexité, nous devons limiter l'usage de la simulation à l'obtention de formules analytiques simples, insérables dans des modèles de niveau supérieur. Nous parviendrons ainsi à rendre intelligible une réalité de plus en plus complexe que nous devons continuer à maîtriser. Nous ferons alors un travail réellement scientifique et maîtriserons l'ensemble des phénomènes aléatoires intervenant dans le champ des applications radioélectriques.

Depuis les origines, la maîtrise des phénomènes aléatoires n'a-t-elle pas été à l'origine du développement extraordinaire des applications que nous connaissons ?

**9 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :**

- [1] An alternative spectrum management strategy Paper presented by SEE club 23 in DNA/DGAC (Paris), on 2002-06-23 by Pierre FUERXER (Original title: Partager le spectre autrement), (SEE newsletter).
- [2] Evaluation Methods for Spectrum Management Strategies. (An appropriate balance between analytical computation and simulation) By Pierre FUERXER, (SEE newsletter).
- [3] Une nouvelle source de bruit, les systèmes radioélectriques, Pierre Fuerxer, URSI, J.S. 2006.
- [4] L'histoire des télécommunications : La maîtrise des phénomènes aléatoires, Pierre Fuerxer. Revue Scientifique et Technique de la Défense, N° 50, décembre 2000.
- [5] Technical Methodology for assessing the potential for interference between IMT 2000 and other services. ITU document 8F/TEMP/24, Sept 2001.
- [6] La modélisation des fonctions de transfert appliquée à la théorie des cycles économiques, P. et J. Fuerxer, Economies et Sociétés, mars 1990.
- [7] Les fluctuations cycliques fondamentales des économies capitalistes, P. et J. Fuerxer, Economies et Sociétés, mars 1990.
- [8] L'histoire des télécommunications : La maîtrise du temps, Pierre Fuerxer. Revue Scientifique et Technique de la Défense, N° 54, décembre 2001.