

RECOMMANDATION UIT-R F.1337*

**GESTION DES FRÉQUENCES POUR LES SYSTÈMES ET RÉSEAUX
DE RADIOCOMMUNICATION ADAPTATIFS À ONDES DÉCAMÉTRIQUES
UTILISANT LE SONDAGE SOUS INCIDENCE OBLIQUE PAR ONDES
ENTRETENUES MODULÉES EN FRÉQUENCE**

(Question UIT-R 205/9)

(1997)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) qu'il est nécessaire d'offrir des services de communication en ondes décimétriques de haute fiabilité;
- b) que les fréquences disponibles en ondes décimétriques, pour la transmission de signaux vocaux et de données, sont limitées;
- c) que les contraintes liées aux variations des paramètres ionosphériques dans le temps limitent le nombre de canaux utilisables dans le spectre disponible;
- d) qu'il est essentiel de recourir à des techniques de gestion des fréquences ainsi qu'à une réglementation efficace et efficiente pour optimiser l'utilisation des fréquences dans le service fixe et dans certains services mobiles entre 1,6 et 28 MHz;
- e) que les études expérimentales, présentées dans l'Annexe 1, ont montré qu'il était possible d'obtenir des améliorations substantielles de l'utilisation des canaux en ayant recours à la diversité de fréquence et de trajet;
- f) que les techniques de sondage sous incidence oblique par ondes entretenues modulées en fréquence (OEMF) peuvent permettre une évaluation précise et en temps réel des canaux à ondes décimétriques disponibles pour un réseau et donc constituer la base d'une gestion dynamique des fréquences;
- g) que la méthode de sondage par ondes entretenues modulées par une fréquence variable (OEMFV) peut permettre de limiter les brouillages préjudiciables et être utilisée de manière externe afin de ne pas amoindrir la capacité des systèmes,

recommande

- 1** de tenir compte, pour les réseaux adaptatifs à ondes décimétriques, des techniques de gestion automatique et adaptative afin d'inclure une sélection dynamique des fréquences optimales, un partage de fréquences à l'intérieur d'un même réseau et une sélection adaptative des trajets possibles dans le réseau;
- 2** d'envisager l'utilisation du sondage OEMFV dans la méthode de gestion dynamique des fréquences, à savoir:
 - l'utiliser comme source de données en temps réel, pour la mise à jour des programmes de gestion des ressources et de prévision de la propagation;
 - l'utiliser pour la mise à jour des listes de fréquences scrutées dans les systèmes adaptatifs à ondes décimétriques;
 - l'utiliser pour modifier et améliorer les matrices d'analyse de la qualité des liaisons des systèmes adaptatifs à ondes décimétriques;
 - l'utiliser en complément au sondage exclusif des canaux dans la bande des fréquences et augmenter ainsi la capacité de communication du réseau et réduire les brouillages induits par le sondage des canaux;
- 3** pour ce qui concerne les réseaux adaptatifs à ondes décimétriques des services fixes et mobiles, de tenir compte des informations contenues dans l'Annexe 1 pour la planification générale des fréquences et pour définir des topologies de réseau;
- 4** d'entreprendre des études complémentaires pour évaluer les avantages qu'apportent les techniques de sondage à la gestion des fréquences des réseaux adaptatifs mondiaux et régionaux, en prêtant une attention particulière aux zones de latitude élevée et aux zones équatoriales dans des conditions d'activité solaire maximale.

* Cette Recommandation doit être portée à l'attention des Commissions d'études 1 et 8 des radiocommunications

Etude à long terme de la méthode de sondage OEMF sous incidence oblique pour la gestion dynamique des fréquences des réseaux de communication à ondes décamétriques

1 Introduction

Le sondage OEMF avec balayage de fréquence a été utilisé dans les réseaux à gestion centralisée du spectre pour permettre une évaluation en temps réel des canaux (RTCE) dans des systèmes à ondes décamétriques multiples. Souvent appelés sondeurs à ondes entretenues modulées par une fréquence variable (en anglais «chirp» sounders), ces dispositifs bénéficient des avantages liés au sondage sous incidence oblique, à savoir l'optimisation de l'utilisation des fréquences, l'amélioration de la fiabilité des circuits, la possibilité d'évaluation des rapports signal/bruit plus brouillage et la mesure des paramètres de propagation ionosphériques utilisés par certains systèmes adaptatifs à ondes décamétriques. Connectés aux réseaux de gestion centralisée du spectre, ces sondeurs peuvent être exploités en nombre limité, à faible puissance et par intermittence pour obtenir des informations de gestion du spectre en temps réel destinées à plusieurs utilisateurs. Cette méthode réduit le nombre de sondages nécessaires en général et la durée totale de fonctionnement d'un sondeur en canal partagé avec d'autres émetteurs à ondes décamétriques. Il en résulte une meilleure information de l'ensemble des utilisateurs et une réduction des risques de brouillage dû au sondage.

2 Principe utilisé

Dans les réseaux à gestion centralisée du spectre, les informations obtenues par sondage OEMF avec balayage de fréquence peuvent être utilisées pour représenter, sous forme d'ionogrammes, les temps de propagation du signal à la réception en fonction de la fréquence d'émission. Le canal ionosphérique peut être constitué de plusieurs couches et centres de diffusion assurant la communication en ondes décamétriques, et par conséquent les signaux reçus à une fréquence donnée subiront des distorsions de temps de propagation variables. Les courbes de l'ionogramme indiquent les divers modes de propagation ionosphérique qui permettront la communication.

Ces ionogrammes sont obtenus par traitement d'un signal OEMF de faible puissance sur une gamme de fréquences sélectionnable, 2-30 MHz en général. Ces ionogrammes à modulation de fréquence variable («chirp») sont bien plus intéressants que ceux obtenus, à puissance moyenne égale, avec des sondeurs à impulsions; les ionogrammes «chirp» utilisent en effet une forme d'onde à large spectre caractérisée par un gain de traitement permettant de compenser les effets des brouillages à bande étroite. La puissance nominale moyenne (et la puissance crête de la porteuse modulée) de ces systèmes est égale, ou éventuellement inférieure, à 10-100 W, selon les circonstances.

Le sondage OEMF réduit également le temps d'occupation d'une fréquence. La vitesse nominale de balayage de ces sondeurs dans la bande 2-30 MHz est de 100 kHz/s et ainsi, l'ensemble de la bande des ondes décamétriques est échantillonnée en environ 5 min. Pour un émetteur, le temps entre deux balayages successifs, appelé intervalle de scrutation, est en général de 15 min, mais il peut être fixé à 30 min ou plus. De ce fait, l'émetteur OEMF avec balayage de fréquence utilise non seulement une puissance faible mais il a également, à chaque balayage, un effet momentané sur d'autres utilisateurs des ondes décamétriques et l'intervalle de scrutation est relativement long. Si un utilisateur d'un même canal se trouve dans le domaine de fréquence exploré par le sondeur OEMF, un canal standard de 3 kHz peut subir une perturbation pendant 30 ms deux fois par heure au maximum lorsque l'intervalle de scrutation est de 30 min.

Dans un réseau à gestion centralisée du spectre, le nombre de sondeurs peut être limité tout en assurant une couverture régionale ou mondiale pour un grand nombre d'utilisateurs. Grâce à ce processus, les opérateurs particuliers de systèmes à ondes décamétriques n'ont plus besoin d'effectuer leur propre sondage, et le nombre total de sondages nécessaires pour servir un certain nombre d'utilisateurs est donc réduit. Même s'il permet d'obtenir des informations utiles, le sondage des canaux par des émetteurs séparés risque d'aggraver l'encombrement du spectre des ondes décamétriques. Le sondage OEMF par balayage de fréquence, associé à des réseaux à gestion centralisée du spectre, peut considérablement réduire la probabilité de brouillage dû aux sondages.

3 Implications expérimentales relevant de la présente Recommandation

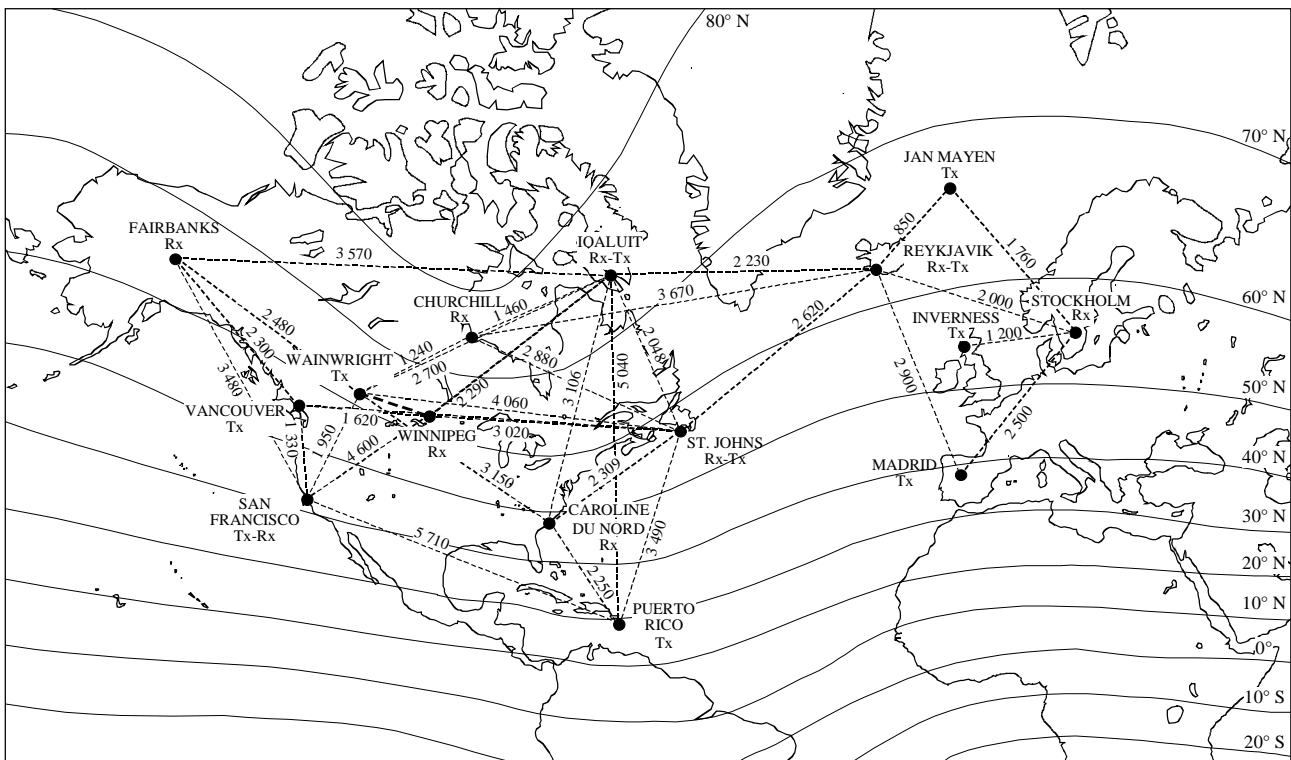
Bon nombre d'expériences ont été réalisées au cours de ces dernières années avec des sondeurs OEMF avec balayage de fréquence et sous incidence oblique. Entre 1993 et 1996, période de faible activité solaire, les possibilités offertes par la diversité de fréquence et de trajet ont fait l'objet d'un vaste programme expérimental. Ce programme portait sur dix sites de l'hémisphère nord dont la géométrie est illustrée à la Fig. 1. On se proposait de résoudre les problèmes liés aux

systèmes adaptatifs de communication en ondes décimétriques en mettant particulièrement l'accent sur la transmission automatique de données numériques. D'autres sujets étaient également étudiés et notamment la propagation des ondes radioélectriques, la gestion des fréquences et l'architecture des systèmes. Les études sur certains trajets ont permis de recueillir des informations sur les liaisons dans la zone de la calotte polaire, dans la zone aurorale, dans des zones dépressionnaires de latitude élevée ainsi que dans des environnements de canaux en latitude moyenne.

FIGURE 1

Configuration ayant servi aux expériences de propagation

Les distances entre émetteurs et récepteurs sont exprimées en kilomètres. Les données ont été recueillies entre 1993 et 1996.



1337-01

Les émetteurs utilisés lors des expériences avaient des puissances comprises entre 10 et 100 W et les sondeurs étaient réglés pour un intervalle de scrutation de 30 min. Plus de 40 trajets-années de données ont été recueillis et analysés afin d'obtenir des estimations sur la disponibilité et des communications sur des liaisons et pour des réseaux en étoile utilisant une grande variété de conditions de diversité de fréquence et de station.

Non seulement, les données relevées lors de ces expériences ont permis d'obtenir des informations intéressantes, mais l'étude de longue durée montra que l'utilisation de sondeurs OEMF associés à des réseaux à gestion centralisée du spectre, permettaient de réduire les risques de brouillage. Il n'a été rapporté aucun brouillage au cours de toute cette période d'exploitation expérimentale de sondeurs OEMF entre 1993 et 1996.

Les conclusions ci-après résultent de l'analyse des données ainsi recueillies. Certaines de ces conclusions découlent directement des postulats concernant la propagation des ondes décimétriques et l'interaction ionosphérique.

4 Facteurs intervenant dans le sondage OEMF

4.1 Le spectre

Si la connectivité optimale exige la disponibilité d'un spectre de fréquences adéquat, cette adéquation dépend finalement de certains facteurs, tels que l'intensité du trafic. Des études sur les réseaux en étoile ont indiqué qu'à long terme on pouvait obtenir une disponibilité de communication proche de 100%, à condition de pouvoir accéder à plusieurs stations terrestres séparées par des distances importantes et de pouvoir, sur la base de sondages en temps réel, sélectionner de manière dynamique des fréquences dans un nombre suffisant de bandes réparties sur le spectre des ondes décimétriques. En règle générale, huit fréquences suffisent pour les applications de haute qualité dans le service fixe et le service mobile. Cependant, dans des conditions de brouillage données, en cas de réduction du nombre de trajets de diversité ou d'augmentation des distances de corrélation ionosphérique, cette adéquation peut nécessiter des fréquences supplémentaires. L'inverse est également vrai, le nombre des fréquences nécessaires peut être réduit lorsque les conditions ambiantes sont favorables ou lors de périodes de faible intensité de trafic.

En général, le nombre des fréquences requises pour atteindre des niveaux élevés de disponibilité sera fonction du nombre de stations dans le réseau. Cette relation a fait l'objet d'un certain nombre de tests et, dans la plupart des cas, la règle suivante s'est révélée applicable:

$$N_f \sim a + b/N_s \quad (1)$$

où N_f est le nombre de fréquences, N_s est le nombre de stations et a et b sont fonctions de la topologie du réseau (c'est-à-dire, les séparations entre nœuds), de la zone géographique desservie, du cycle diurne, de la saison et des conditions d'activité solaire. Pour les essais, des valeurs de $a \approx -4$ et de $b \approx 48$ ont été jugées suffisamment représentatives pour $3 \leq N_s \leq 5$, sauf en cas de perturbation. Il existe également des cas où une couche E sporadique est l'élément déterminant sur un ou plusieurs trajets de propagation. Dans ce dernier cas, une seule station peut être en mesure de traiter autant de fréquences que nécessaire pour prendre en charge tout le trafic depuis une tête de groupe de stations jusqu'à la station terrestre, avec un niveau de disponibilité élevé. La diversité de stations est alors inutile et l'équation (1) ne s'applique pas. Un système de gestion des fréquences en temps réel, fondé sur la technique de sondage OEMF décrite dans la présente Annexe, permettra de détecter et d'évaluer à la fois les modes de propagation normale et les modes de propagation avec couche E sporadique.

4.2 La topologie du réseau

La connectivité des configurations de réseaux en étoile, constituées d'un nœud central (c'est-à-dire une tête de faisceau) entouré d'un groupe de nœuds externes, augmente avec le nombre d'éléments constitutifs du groupe. En outre, il y a une quasi-saturation de la connectivité dans le cas de réseaux ayant au moins quatre nœuds très espacés. Ceci montre l'importance du nombre de trajets qui contribuent à la connectivité et du degré d'indépendance de la propagation sur ces trajets. La connectivité est également conditionnée par la viabilité des trajets concernés, sachant qu'un trajet nul ne peut contribuer à la connectivité. Ces principes suggèrent de retenir la stratégie de choix suivante, pour la sélection des éléments du groupe: d'une part association de trajets ayant des points de contrôle largement séparés, d'autre part association de trajets soumis à des régimes géophysiques différents, utilisation de trajets dont la propagation permet les largeurs de bandes les plus importantes, c'est-à-dire les trajets les plus longs possibles vers l'équateur et les trajets pour lesquels les angles d'élévation solaire sont les plus grands. En règle générale, on constate que la région définie par les trajets sur le grand cercle reliant des nœuds dans le groupe doit circonscrire une zone aussi grande que possible contenant la tête de groupe pour assurer une diversité de trajet maximale. Cependant, comme dans la direction des pôles, les trajets ont en général une viabilité limitée, il faut s'efforcer de spécifier autant que possible des circuits vers l'équateur et avec une séparation diurne maximale.

Un réseau régional ou mondial peut être constitué d'un ensemble de sous-réseaux ou de faisceaux dans lequel les caractéristiques ionosphériques évoluent en permanence au niveau des têtes de faisceaux et des autres nœuds de chaque groupe. Pour les services fixes dont la tête de faisceau est fixe, cette évolution est due à la variabilité des caractéristiques ionosphériques. Pour les services mobiles dont la tête de groupe peut se déplacer, la situation est plus complexe. Les fréquences ne restent optimales que pendant un temps très limité et il est donc important d'utiliser une gestion dynamique des ressources du réseau avec un échange de fréquences entre les nœuds du faisceau. De nombreux éléments laissent à penser que la présence d'une couche E sporadique donne lieu à un excès de capacité entre un nœud donné et une zone de couverture généralisée. Alors que l'on sait que la couche E sporadique est un phénomène estival diurne en moyenne latitude, on constate que les bandes constituant la couche E sporadique dues à la zone aurorale peuvent être utilisées pour remédier aux perturbations de propagation en région F.

4.3 Influence de l'activité magnétique

Les orages magnétiques peuvent avoir une influence importante sur le spectre des fréquences à ondes décimétriques disponible, du fait des écarts importants de la fréquence maximale observée (MOF). Les effets des orages magnétiques peuvent affecter de vastes zones et être durables; il est donc évident que la disponibilité en temps réel des informations ionosphériques concernant les liaisons concernées, serait un avantage essentiel par rapport aux méthodes de prédiction à long terme qui sont quelquefois utilisées pour définir des listes de fréquences scrutées dans les systèmes adaptatifs à ondes décimétriques. Les circuits en latitude moyenne sont à cet égard les plus affectés par les importantes réductions de largeur de bande disponible dues aux orages magnétiques.

Aux évidentes variations de la MOF dues aux orages magnétiques, s'ajoutent également des fluctuations de la MOF liées à des niveaux élevés d'activité magnétique. Ces fluctuations peuvent être associées à une augmentation, en nombre et en amplitude, des perturbations ionosphériques itinérantes qui peuvent apparaître au voisinage de la zone aurorale et se propager vers l'équateur. Même si ces perturbations plus légères ne sont pas suffisamment structurées pour donner lieu à un orage magnétique, elles introduisent néanmoins divers effets de propagation des ondes décimétriques: trajets multiples, diffusion latérale et étalement de la couche F. Ces effets sont directement observés par les sondeurs OEMF.

On sait également que l'activité magnétique est liée à la position géographique et à l'importance des caractéristiques de haute latitude et notamment à la cuvette dépressionnaire de moyenne latitude et à l'ovale auroral. L'ovale, par exemple, s'épaissit et se déplace vers l'équateur lorsque l'activité magnétique augmente et se contracte lorsque l'activité magnétique diminue. Ceci est d'autant plus important que l'activité magnétique peut fortement modifier le régime géophysique et par conséquent le profil de variabilité, pour des circuits fixes et mobiles. Les méthodes d'évaluation en temps réel, telles que le sondage OEMF, constitueront la base la plus appropriée d'évaluation des qualités de fonctionnement actuelles et futures des circuits à ondes décimétriques dans les régions de haute latitude. La méthode complète d'évaluation et de prévision pourrait associer une constellation de sondeurs, des données hélio-terrestres sélectionnées à partir d'utilitaires informatiques et d'autres ressources de données en temps réel dont on pourrait disposer. Ce concept suppose préalablement l'existence d'une constellation de sondeurs suffisamment dense et d'une infrastructure de distribution vers les réseaux adaptatifs à ondes décimétriques concernés des données obtenues relatives aux canaux, y compris les informations de gestion des fréquences.

La Fig. 2a illustre les effets de l'activité magnétique sur des circuits observés lors des essais expérimentaux décrits dans la présente Annexe. On constate une différence nettement définie entre les états «sans perturbation» et «avec perturbation», qui n'existe que pour les réseaux à ondes décimétriques en étoile exploités aux latitudes plus élevées.

4.4 Avantages du sondage en temps réel sur les méthodes de prévision

Des méthodes de prévision ont été utilisées pour spécifier et classer des listes de fréquences pour les systèmes adaptatifs à ondes décimétriques. Elles sont fondées sur le comportement moyen des paramètres de propagation et il y a donc des écarts entre l'observation réelle et les prévisions données par les modèles, ce qui exige une actualisation des modèles. Les méthodes utilisées pour la mise à jour des informations font intervenir les ensembles de données fournies par des sondeurs verticaux et obliques. Les méthodes dites de pseudo-flux ont été utilisées avec un certain succès pour obtenir des informations et il existe par ailleurs des techniques qui intégreront divers ensembles de données quasi entemps réel pour améliorer la qualité du modèle de communication.

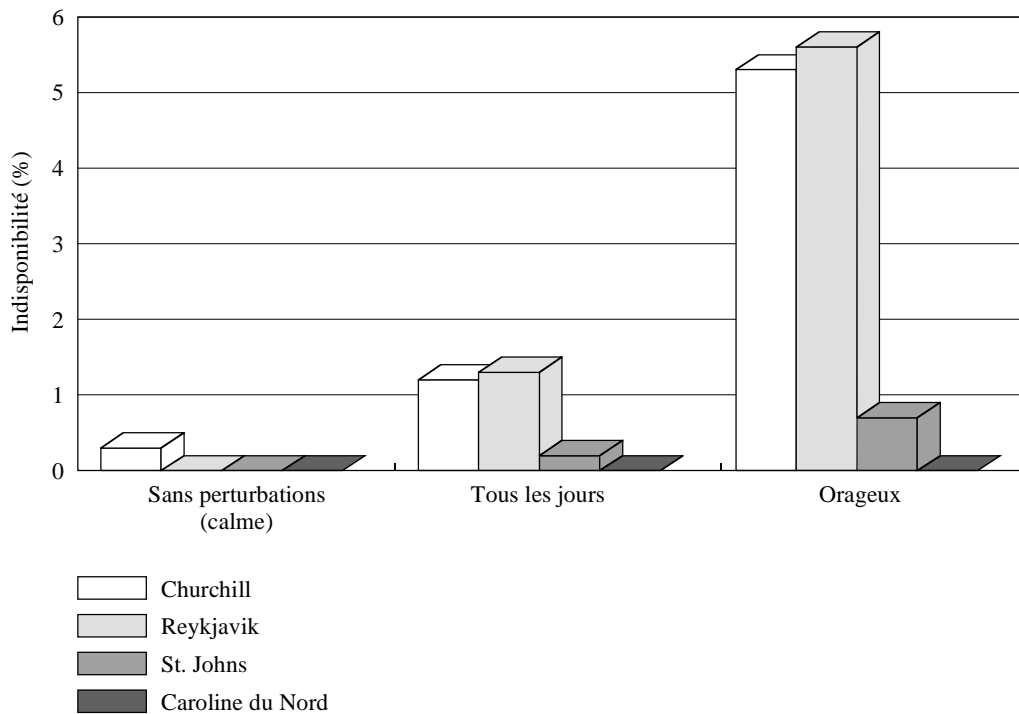
Il apparaît que la validité de ces méthodes dépend fortement de:

- l'intervalle de temps entre le moment où les mesures sont effectuées et celui où le résultat est utilisé,
- la faible différence entre le résultat obtenu avec le modèle mis à jour et celui obtenu dans la région concernée.

Ce dernier facteur dépend de la densité des sources de mise à jour tandis que le précédent dépend du temps de réaction du réseau après réception des informations de gestion des fréquences. En effet, l'environnement étant variable par nature, les mises à jour perdent rapidement de leur valeur.

La Fig. 2b illustre de manière claire les avantages de la RTCE, en l'occurrence la technique du sondage OEMF, par rapport aux méthodes de prévision. La simulation représentée concerne un service de transmission de données à ondes décimétriques pour lequel était spécifié un rapport signal/bruit, S/N , nécessaire pour obtenir une qualité de service acceptable. Dans cet exemple, on compare la méthode de prévision et l'observation réelle par sondeurs OEMF. Ces deux systèmes de gestion des fréquences pouvaient accéder à onze bandes de fréquences et la transmission était considérée bonne si, sur au moins une fréquence, le rapport S/N mesuré était supérieur à un seuil prédéfini (déterminé par le niveau de service). Le système de prévision devait présélectionner les trois «meilleures» fréquences à partir de la liste des onze bandes de référence. Le système RTCE était considéré comme étant supérieur au système de «prévision» si le sondeur OEMF parvenait à identifier une bande de fréquences utilisable non incluse dans les trois bandes de fréquences sélectionnées par le système de prévision.

FIGURE 2a
Effets de l'activité magnétique



Indisponibilité d'une communication (%) en fonction des conditions d'activité magnétique pour quatre groupes de réseaux en étoile au cours du mois d'avril 1995, un mois présentant des variations importantes du paramètre d'activité magnétique, A_p . Les têtes de groupes sont localisées par Churchill, Reykjavik, St. Johns et Caroline du Nord; chaque groupe est constitué de quatre trajets aboutissant à la tête de faisceau. Dans cet exemple de calcul, chaque réseau en étoile accède à une fréquence dans chacune des onze bandes attribuées au service mobile aéronautique et ces fréquences sont utilisées en partage entre les quatre liaisons dans chaque faisceau. La période «orageuse» correspond à la période du 7 au 12 avril au cours de laquelle l'activité magnétique était $22 > A_p > 100$. Le reste du temps, la valeur du paramètre A_p était inférieure à huit et la période est donc désignée par le terme «sans perturbations».

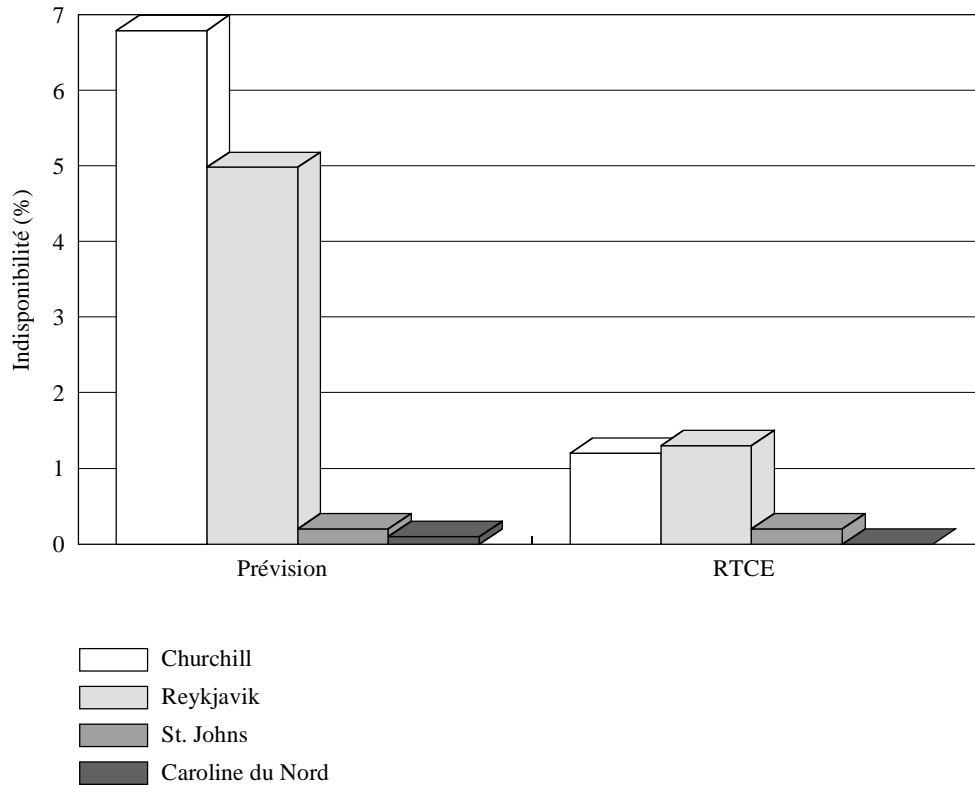
1337-02a

5 Disponibilité à long terme

Des évaluations de la disponibilité globale du réseau ont été effectuées sur la base d'un débit de référence de 300 bit/s pour les têtes de groupe indiquées à la Fig. 1. La disponibilité moyenne du réseau est déterminée sur la base de l'établissement de la connectivité pour l'une quelconque des onze bandes de fréquences présélectionnées et l'une quelconque des liaisons participant au réseau et en considérant que la connectivité est réalisée lorsqu'un test montre que le rapport S/N est conforme à la valeur spécifiée.

On a observé des disponibilités composites remarquablement élevées et les disponibilités pour la plupart des combinaisons groupe/mois dépassaient largement les 99%. En outre, on a observé une très forte différence entre les disponibilités globales en fonction de l'heure locale, la plupart des interruptions ayant lieu entre l'aube et midi (comportement vérifié à partir de la tête du groupe). Ces observations devraient avoir, de toute évidence, des conséquences importantes sur la gestion des fréquences pour le système de transmission de données à ondes décimétriques qui sera finalement retenu.

FIGURE 2b
Méthodes de prévision et RTCE



Indisponibilité en fonction de deux méthodes de gestion des fréquences. La méthode désignée par le terme «prévision» correspond à l'utilisation d'un programme de prévision établi pour préselectionner les trois fréquences les plus probables à prendre en compte. La seconde méthode désignée par le terme RTCE correspond à la meilleure fréquence déterminée à partir de mesures de sondeurs en temps réel.

1337-02b

6 Conclusion

La qualité de fonctionnement d'un réseau à ondes décimétriques est optimale lorsqu'un système de sondage oblique fournit des informations permettant le contrôle dynamique des ressources du réseau. La méthode de sondage OEMFV doit être préférée aux autres méthodes prévues à cet effet: on a montré que cette méthode était relativement discrète et n'entraînait aucun brouillage préjudiciable aux autres utilisateurs. L'utilisation en partage des fréquences et leur réattribution dynamique sont une condition indispensable au contrôle des ressources des réseaux, mais pour exploiter efficacement la capacité de prévision dynamique, il faut disposer également d'un ensemble complet de fréquences dans toutes les bandes autorisées. Les réseaux adaptatifs à ondes décimétriques peuvent être à couverture internationale et il est possible d'apporter des améliorations considérables de leur qualité de fonctionnement grâce à l'utilisation de techniques de diversité de trajet et de réutilisation de fréquence, et ceci sans provoquer de brouillages préjudiciables. Ces possibilités d'amélioration de la qualité de fonctionnement peuvent être renforcées et facilitées par un réseau mondial de sondeurs discrets. Il est souhaitable de poursuivre les études sur le sujet pour tirer le meilleur parti de ce concept. Par ailleurs, les informations utilisées pour parvenir à la présente conclusion, ont été obtenues au cours d'une période de faible activité solaire, entrecoupée d'un petit nombre d'épisodes de sous-orages magnétiques accentués. Il est donc nécessaire de recueillir des informations et données similaires pour des niveaux d'activité solaire maximale.