



**HAL**  
open science

## Routage Dynamique sur Liens HF

Pascale Minet, Cédric Adjih, Paul Mühlethaler, Philippe Jacquet

► **To cite this version:**

Pascale Minet, Cédric Adjih, Paul Mühlethaler, Philippe Jacquet. Routage Dynamique sur Liens HF. [Rapport de recherche] RR-6071, INRIA. 2006, pp.41. inria-00121230v2

**HAL Id: inria-00121230**

**<https://inria.hal.science/inria-00121230v2>**

Submitted on 20 Dec 2006

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

***Routage Dynamique sur Liens HF***

Pascale Minet , Cédric Adjih , Paul Muhlethaler , Philippe Jacquet

**No 6071**

Décembre 2006

THÈME 1

  
*Rapport  
de recherche*





## **Routage Dynamique sur Liens HF**

Pascale Minet , Cédric Adjih , Paul Muhlethaler , Philippe Jacquet

Thème 1 — Réseaux et systèmes  
Projet HIPERCOM

Rapport de recherche n°6071 — Décembre 2006 — 41 pages

*(Résumé : tsvp)*

## **Routage Dynamique sur Liens HF**

**Résumé :** Dans ce papier, nous nous intéressons au routage dynamique sur des liens HF (haute fréquence). La propagation radio sur liens HF fluctue au cours de la journée mais surtout lors des changements jour/nuit et nuit/jour. De plus, la bande passante utile est limitée et les temps de retournement des équipements sont non négligeables. Cette étude se propose de recenser les spécificités des liens HF, de montrer les limitations des solutions existantes et de présenter les grandes lignes d'un routage dynamique sur ces liens. Ce papier a pour objectif de poser le problème du routage dynamique sur liens HF, et de fournir les principes généraux d'une solution générique. Ce papier raffinerait aussi la solution générique pour un accès au médium de type TDMA (Time Division Multiple Access) ainsi que pour un accès au médium de type CSMA (Carrier Sense Multiple Access) et discuterait les mérites respectifs de ces deux approches.

**Mots-clé :** Liens HF, choix des fréquences, réseau ad hoc, routage, protocole de routage OLSR (Optimized Link State Routing protocol), relais multipoint, paquets Hello et TC, protocoles d'accès au médium par multiplexage temporel ou protocoles d'accès à détection de porteuse

## 1 Introduction

Dans ce document, nous nous intéressons au routage dynamique sur des liens HF (haute fréquence). Les liens HF ont des avantages indéniables par rapport aux liens satellite. Ainsi, ils offrent une portée équivalente (jusqu'à 600 km) à un coût moindre. Ils permettent également l'interopérabilité en mer des forces alliées, alors qu'un satellite est la propriété d'une nation. Ces avantages s'accompagnent de limitations. Ainsi, la propagation radio sur liens HF fluctue au cours de la journée mais surtout lors des changements jour/nuit et nuit/jour. De plus, la bande passante utile est limitée et les temps de retournement des équipements non négligeables.

Les procédures actuelles sont basées sur une topologie statique, chargée au démarrage des noeuds du réseau. Le routage est effectué saut par saut en fonction de la qualité du lien sur le prochain saut. Ces procédures manquent de souplesse.

Cette étude se propose de recenser les spécificités des liens HF, de montrer les limitations des solutions existantes et de présenter les grandes lignes d'un routage dynamique sur ces liens. Ce document a pour objectif de :

1. poser le problème du routage dynamique sur liens HF,
2. fournir les principes généraux d'une solution générique,
3. raffiner la solution générique pour un accès au médium de type TDMA,
4. raffiner la solution générique pour un accès au médium de type CSMA,
5. discuter les mérites respectifs de ces deux approches.

Ce document est organisé en six sections :

- La section 1 présente les **objectifs de cette étude** et décrit l'organisation du document.
- La section 2 définit la **problématique étudiée**. Après avoir rappelé les spécificités des liens HF et les limitations des solutions existantes, les propriétés souhaitées du routage dynamique sur liens HF sont énoncées. Une attention particulière est portée à la qualité de service.
- La section 3 présente les grandes lignes d'une **proposition** visant à satisfaire la problématique énoncée dans la section précédente. Cette solution est générique, indépendante du protocole d'accès au médium utilisé. Nous proposons également un **dimensionnement de cette solution générique**, compte-tenu des spécificités des liens HF et dans une certaine mesure des procédures existantes. Ce dimensionnement devra être raffiné en tenant compte de la solution MAC retenue.

- La section 4 définit les **principes généraux d'une couche MAC pour liens HF** et propose deux variantes. L'une est basée sur un **protocole d'accès au médium de type TDMA** (voir section 4.2). L'autre est basée sur un **protocole d'accès au médium de type CSMA**. Nous distinguons selon que l'on dispose ou non d'une tonalité d'occupation (busy tone).
- Finalement, la section 5 **conclut** ce document en synthétisant l'étude réalisée. Elle récapitule les principes généraux de la solution générique, discute les mérites respectifs des deux mises en oeuvre. Elle se termine par une liste des points nécessitant une étude plus détaillée.

## 2 Problématique

Dans cette section, nous rappelons les spécificités des liens HF et les limitations des solutions existantes. Nous présentons ensuite les propriétés souhaitées pour un routage sur liens HF. Nous terminons cette section par la description d'un scénario type à considérer dans cette étude.

### 2.1 Spécificités des liens HF

#### 2.1.1 Avantages des liens HF

Les avantages des liens HF peuvent se résumer comme suit :

- ils sont **peu onéreux** ;
- ils autorisent une **portée importante** (jusqu'à 500 km), car l'atténuation du signal n'est pas en  $1/d^2$  ;
- ils offrent l'**interopérabilité** des communications. En effet, les liens HF permettent de communiquer en coalition sans utiliser de satellites, souvent propriété d'une nation.
- ils permettent à un **noeud en mouvement (jusqu'à 80 km/h) de communiquer**. C'est pourquoi le médium HF constitue un médium de choix pour les réseaux tactiques.

#### 2.1.2 Inconvénients des liens HF

Les liens HF présentent des inconvénients dans les trois domaines suivants :

- **débit** : ils offrent un débit limité à quelques kilobits par seconde. En effet, la propagation souffre de nombreux problèmes : multi-trajet, fort doppler dû au mouvement des couches ionosphériques, temps de groupe important, présence de bruit. De plus,

le débit fluctue très fortement lors des transitions jour/nuit et nuit/jour. Ainsi le débit peut atteindre 8000 bits /seconde au mieux de la journée, puis chuter ensuite à 375 bits/seconde durant la nuit. La couche MAC doit pouvoir fournir des informations sur la qualité des liens. Ces informations seront utilisées par le routage dynamique.

- **latence** : le temps de retournement des équipements HF est important ; il peut se chiffrer en secondes. Le temps de montée MAC est de l'ordre de 10 à 20 ms sans boîte d'accord et de 50 à 100 ms avec boîte d'accord. Par ailleurs, le temps de prise de liaison avec les procédures ALE et RCL est lui aussi important. Les équipements sont half duplex, rendant impossible la réception pendant l'émission.
- **fréquence** : en fonction de l'heure de la journée, seules certaines fréquences peuvent être valablement utilisées. Ceci nécessite la gestion fine du spectre de fréquences dynamiquement au cours de la journée. Pour une communication à un saut, il est parfois nécessaire d'utiliser une fréquence en émission et une autre fréquence en réception. Par ailleurs, pour une même communication à plusieurs sauts, il pourra être nécessaire d'utiliser plusieurs fréquences différentes (une fréquence par saut). Un changement de fréquence nécessite un délai supplémentaire de 5 ms.

De plus, les protocoles classiques ne sont pas toujours adaptés aux communications militaires sur liens HF. Ainsi, à titre d'exemple :

1. Le protocole TCP présente les deux limitations suivantes :
  - est orienté point-à-point, il ne gère donc pas les communications d'une source vers un groupe de destinataires ;
  - interprète l'absence réception d'un acquittement dans un délai imparti comme une congestion et en conséquence fait chuter le débit de la source.
2. En silence radio (EMCON), un noeud peut recevoir mais il ne peut pas émettre (même pas un acquittement au niveau MAC). La gestion du silence radio pose problème à plusieurs niveaux :
  - (a) au niveau transport :
    - avec TCP, le destinataire en silence radio ne peut pas acquitter.
    - avec UDP, l'émetteur ignore si le destinataire en silence radio a bien reçu le message envoyé. La communication n'est pas fiabilisée.
  - (b) au niveau routage, un noeud en silence radio ne doit pas être déclaré inaccessible, bien qu'il ne puisse pas transmettre momentanément. Les messages qui lui sont destinés lui sont acheminés.
  - (c) au niveau de l'accès au médium, un mécanisme de type RTS/CTS n'est pas utilisable avec un noeud en silence radio.

## 2.2 Limitations des solutions existantes

### 2.2.1 Brève description des solutions existantes

Les modes de transmission mis en oeuvre peuvent être regroupés en deux profils :

- **Profil France** avec les procédures :
  - FSD : Fixed Semi Duplex
  - RCL : Recherche Canal Libre : permet de scanner la meilleure fréquence et de la sélectionner avant chaque connexion,
  - EVF : EVasion de Fréquence permet de résister au brouillage mais avec un faible débit ; l'établissement de connexion est plus rapide qu'en mode RCL ;
  - FFS : Fréquence Fixe Simplex : où la même fréquence est utilisée en émission et en réception.
- **Profil OTAN** avec les procédures :
  - EVF, également dans le profil France. Cette procédure fait l'objet du Stanag 4444 ;
  - FFS, également dans le profil France,
  - ALE : Automatic Link Establishment : cette procédure fait l'objet du standard Mil-Std-188 141A Elle utilise un plan d'adressage et de fréquence commun à tous les noeuds ;
  - ECCM : Electronic Counter CounterMeasure.

A titre d'exemple, le format d'une trame radio EEWF5, donné dans le Stanag 4444, varie en fonction du débit. Pour un débit de 2400 bits/seconde, le format est donné par le tableau 1.

Une trame comprend donc 270 symboles et a une durée de 112.51 ms. Une trame contient trois blocs de données, chaque bloc de données comprend 48 symboles. Ceci donne 144 symboles par trame pour les données. Un code de Reed Solomon 2/3 est utilisé. L'entrelacement peut être :

- long, il correspond alors à une durée de 15.3s ;
- moyen, il correspond alors à une durée de 7.65s ;
- court, il correspond alors à une durée de 1.275s.

Ces procédures ont été conçues pour des communications point-à-point et peinent à fonctionner en mode réseau. Au niveau du routage, la topologie prise en compte est statique. Elle est chargée au démarrage des noeuds du réseau. Chaque message est routé en fonction de la destination et de la qualité du lien sur le prochain saut uniquement. Ces procédures manquent de souplesse Il serait préférable de prendre en compte dynamiquement la qualité

abréviation	libellé	symboles	durée (ms)
HTT	Hop Transition Time	16	6.67
AGC	Contrôle Gain	12	5
IT	Initial Training	64	26.67
D	1er bloc Données	48	
MP	Mini Probe	11	
D	2ème bloc Données	48	
MP	Mini Probe	11	
D	3ème bloc Données	48	
MP	Mini Probe	11	
	Trame totale	270	112.51

TAB. 1 – Format d'une trame radio EEFW5 à 2400 bits/seconde.

des liens sur l'ensemble de la route. Il est à noter qu'une route doit exclure les noeuds interdits pour des raisons de sécurité et les noeuds en silence radio.

Actuellement, lorsqu'une station ne répond pas, on peut tenter de la joindre pendant une durée maximum de 45 minutes, s'il n'y a qu'une seule route. Si plusieurs routes existent, la durée maximum est de 10 mn. Avec un routage dynamique, cette limitation n'existerait plus.

### 2.2.2 Limitations de ces solutions

Les limitations de ces solutions peuvent se résumer ainsi :

- ces solutions manquent de souplesse : la table de topologie de chaque noeud est chargée lors de son initialisation ;
- ces solutions sont trop statiques : la route primaire est utilisée et après 45mn d'essais infructueux, il y a basculement vers la route secondaire ;
- ces solutions supportent mal la mobilité des noeuds.

### 2.3 Hypothèses adoptées pour le routage

Les hypothèses adoptées concernent :

- les ressources dont dispose chaque noeud :
  - H1 chaque noeud a un seul équipement radio HF et dispose d'une antenne omnidirectionnelle. Cette hypothèse H1 pourra être levée dans une étude ultérieure ;
  - H2 chaque noeud dispose d'un GPS.
- les fréquences :
  - H3 chaque noeud dispose du plan de fréquence du réseau ;
  - H4 chaque noeud connaît les fréquences éligibles (voir principe P4 dans la section 3.2) ;
  - H5 chaque noeud doit tester les fréquences éligibles dans un ordre prédéterminé connu de tous les noeuds (voir principe P4 dans la section 3.2).
- les informations de qualité de service (QoS) fournies par la couche MAC :
  - H6 chaque noeud dispose d'informations locales relatives à la qualité du signal reçu et au débit de ses liens. Ces informations lui sont fournies localement par la couche MAC.
- les procédures d'entrée/sortie en silence radio :
  - H7 un noeud émet un message spécifique avant de passer en silence radio. Les messages qui lui sont transmis sont transmis en mode FEC et non en mode avec accusé de réception. Un noeud peut rester une durée indéterminée en silence radio. Le routage doit lui faire parvenir les messages qui lui sont destinés. De même, un noeud qui sort de silence radio émet un message.

## 2.4 Propriétés souhaitées pour le routage

Le routage sur liens HF devra s'efforcer de satisfaire les propriétés suivantes :

- être dynamique en :
  - permettant l'ajout et le départ de noeuds,
  - permettant la création et la destruction de lien entre deux noeuds,
  - gérant la chute de débit sur une fréquence sur un lien.
  
- gérer la QoS (qualité de service) :
  - gérer la qualité des liens et n'utiliser que les liens HF jugés de bonne qualité et offrant un débit suffisant.
  - offrir la bande passante demandée par un flux à exigences de QoS, si celui-ci a été accepté par le contrôle d'admission. Dans cette première étude, les seuls paramètres de qualité de service considérés seront la bande passante.
  
- avoir une faible latence :
  - être opérationnel rapidement.
  
- fournir une route :
  - excluant les noeuds interdits,
  - excluant comme noeuds intermédiaires les noeuds en silence radio,
  - offrant la qualité de service demandée. Si plusieurs routes existent, la plus courte sera retenue.

## 2.5 Scénario à considérer

Le scénario typique à considérer correspond au déploiement de forces spéciales. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- de 20 à 50 noeuds répartis dans un carré de 600 km de côté,
- portée radio de 600 km,
- chaque noeud dispose d'un GPS,
- vitesse d'un noeud inférieure à 80 km/h,
- type de flux : unicast, broadcast,
- source et destination d'un flux unicast sont choisis aléatoirement parmi les noeuds du réseau,
- taille utile d'une trame radio = 144 bits,

– 1024 fréquences possibles.

Ce scénario sera utilisé dans la section 3.7 pour dimensionner la solution générique que nous allons décrire dans la section suivante (section 3).

### 3 Principes généraux du Routage Dynamique

Dans cette section, nous décrivons une solution générique basée sur les hypothèses énoncées en section 2.3 et satisfaisant les propriétés listées en section 2.4. Cette solution générique est indépendante du protocole d'accès au médium.

#### 3.1 Quatre composantes

Le routage dynamique est basé sur une **variante du protocole de routage OLSR (Optimized Link State Routing)[1] prenant en compte les différentes fréquences, le silence radio d'un noeud et gérant la QoS**. Plus précisément, la solution générique que nous proposons comprend quatre composantes :

- Gestion des fréquences,
- OLSR étendu au multi-fréquence,
- Gestion des noeuds en silence radio,
- Support de QoS.

Chacune de ces composantes fait l'objet d'une description dans les sections suivantes.

#### 3.2 Gestion des fréquences

Au niveau de la gestion des fréquences, la solution proposée s'appuie sur les principes suivants :

- P1 La solution proposée s'appuie sur l'**utilisation de plusieurs fréquences**. Ces fréquences appartiennent au plan de fréquence du réseau. En effet, il est illusoire d'espérer atteindre tous les noeuds du réseau avec une seule et même fréquence, la nuit notamment.
- P2 **Chaque noeud dispose d'une ou plusieurs fréquences de réception**. Nous verrons comment un noeud choisit sa ou ses fréquences de réception lui permettant de recevoir :
  - les messages de contrôle émis par ses voisins
  - les messages utilisateur émis par un voisin quelconque en point-à-point ou en diffusion.

- **P3 Chaque noeud peut émettre sur toutes les fréquences** du plan de fréquence du réseau considéré. Pour qu'une communication avec un récepteur soit possible, il faut que l'émetteur émette sur une fréquence du récepteur. C'est donc à l'émetteur que revient le rôle de sélectionner la fréquence d'émission selon le récepteur visé. Si plusieurs récepteurs sont visés, il est possible que ces récepteurs ne reçoivent pas sur la même fréquence. Dans ces conditions, l'émetteur émettra le message sur autant de fréquences que nécessaire pour que chaque récepteur puisse recevoir le message émis.
- **P4** Pour des raisons de performances, seul un sous-ensemble de l'ensemble des fréquences est utilisé. Ce sous-ensemble est appelé **ensemble des fréquences éligibles**. Il doit être tel que chaque noeud puisse recevoir les messages de signalisation et les messages utilisateur émis par ses voisins. Les fréquences utilisées pour la signalisation et pour les messages utilisateur sont nécessairement des fréquences éligibles. A un instant donné, tout noeud du réseau connaît l'ensemble des fréquences éligibles. Cet ensemble peut varier au fil du temps. Il suffit que chaque noeud connaisse la loi de variation. La propriété suivante permet de justifier le choix de travailler sur un sous-ensemble des fréquences :

**Propriété 1** *Si un ensemble de noeuds dispose de  $F$  fréquences pour communiquer, alors ces noeuds peuvent communiquer en utilisant uniquement  $\sqrt{F}$  fréquences avec une probabilité de  $1 - 1/e$ .*

*Proof:* La probabilité pour qu'un noeud choisisse une fréquence parmi les  $\sqrt{F}$  est égale à  $\sqrt{F}/F = 1/\sqrt{F}$ .

La probabilité pour que deux noeuds choisissent la même fréquence est de  $1/F$ .

Il s'en suit que le nombre moyen de fréquences communes à deux noeuds est de  $F * 1/F = 1$ .

La distribution suit une loi de Poisson de paramètre 1.

La probabilité de non-lien est donc égale à  $e^{-1} = 1/e$ . ■

- **P5 Chaque noeud teste chaque fréquence éligible.** Ceci offre les avantages liés à la diversité des fréquences :
  - maximiser le nombre de noeuds qu'il est possible d'atteindre directement,
  - permettre la communication malgré le brouillage de certaines fréquences.

Malheureusement, transmettre chaque message sur chaque fréquence éligible offre un débit limité. C'est pourquoi, dès que possible, l'émetteur utilise des fréquences

fixes pour communiquer avec ses voisins.

En conséquence, **chaque noeud doit sélectionner sa fréquence de réception.**

- **P6 Chaque noeud mesure la qualité du signal reçu pour chaque fréquence éligible.** Chaque noeud renseigne sa matrice *QualiteSignalReu*, contenant pour chaque noeud entendu et pour chaque fréquence éligible entendue, la qualité du signal reçu, en termes de qualité radio du signal ou de taux de perte.

Une fréquence ne sera sélectionnée que dans la mesure où la qualité du signal est supérieure à *Seuil\_Haut*. Cette fréquence ne sera utilisée que tant que la qualité du signal est supérieure à *Seuil\_Bas*. Ceci permet de détecter rapidement une dégradation de la qualité d'un signal sur une fréquence utilisée. Le fait de disposer des mesures sur d'autres fréquences va permettre de remplacer si besoin, la fréquence défectueuse par une fréquence plus performante.

Toutes les fréquences éligibles sont testées régulièrement. Il est alors possible à chaque noeud de maintenir sa matrice de qualité de signal à jour pour toutes les fréquences éligibles.

### 3.3 OLSR en multi-fréquence

Le protocole OLSR, [1], a été conçu pour un réseau mono-fréquence. Il faut donc l'étendre pour prendre en compte le multi-fréquence. Dans OLSR natif, **la découverte des voisins** est effectuée par les messages *Hello*, tandis que **la dissémination de la topologie** est effectuée par les messages *TC* (Topology Control). Pour étendre OLSR à plusieurs fréquences, nous proposons d'ajouter un type de message supplémentaire, noté *TF* pour **Test de Fréquence**. Ce message permet à un noeud de tester toutes les fréquences éligibles en émettant un message *TF* sur chaque fréquence éligible. Ce message contient la fréquence de réception de son noeud émetteur.

#### 3.3.1 Aperçu du routage OLSR en multi-fréquence

Le protocole OLSR (RFC 3626) en multi-fréquence est essentiellement utilisé comme s'il fonctionnait un multi-interface, en considérant que chaque fréquence correspond à une interface différente. Les différences sont les suivantes :

- Les noeuds diffusent les messages *Hello* sur plusieurs fréquences.
- La philosophie du calcul des MPR reste identique (couverture à deux sauts), mais des adaptations doivent être faites pour le multi-fréquence et le support de QoS.

- La diffusion par MPR reste similaire, à l'exception du fait qu'un noeud doit transmettre sur toutes les fréquences de réception de ses voisins.
- Le contenu et la transmission des messages TC reste identique, en utilisant la diffusion MPR adaptée.

### 3.3.2 Détails du protocole OLSR en multi-fréquence

Le multi-fréquence est intégré comme suit dans la notion de voisinage.

**Définition 1** *Un noeud  $N$  est dit voisin symétrique d'un noeud  $N'$  si et seulement si il existe une fréquence  $f$  sur laquelle  $N$  entend  $N'$  et  $N'$  entend  $N$ . Le lien  $(N, N')$  est dit symétrique.*

**Définition 2** *Une communication directe entre deux noeuds  $N$  et  $N'$  n'est possible que si ces deux noeuds sont voisins symétriques. Plus généralement, une communication multisaut n'est possible que sur des liens symétriques.*

Il n'est pas possible d'avoir un lien symétrique  $N \leftrightarrow N'$  réalisé à partir de deux liens asymétriques sur deux fréquences différentes : lien  $N \rightarrow N'$  sur une fréquence  $f$  et lien  $N' \rightarrow N$  sur une fréquence  $f' \neq f$ . Ceci poserait problème au niveau MAC pour les acquittements.

Dans la solution proposée pour les liens HF, chaque noeud procède comme suit :

- **P10 Chaque noeud diffuse périodiquement ses *TFs* sur toutes les fréquences éligibles. L'ordre de parcours de ces fréquences est prédéterminé et est connu par tous les noeuds.** Ceci permet à chaque noeud d'évaluer la qualité du signal reçu sur chacune des fréquences éligibles.
- **P11 Un noeud choisit sa fréquence de réception en fonction du rapport signal sur bruit et du nombre de noeuds entendus. La fréquence sur laquelle il a entendu le plus grand nombre de voisins est favorisée. Il indique cette fréquence de réception dans ses *TF*.**
- **P12 Chaque noeud diffuse périodiquement ses *Hellos* dans les fréquences lui permettant d'être entendu par tous ses voisins.**
- **P13 Chaque noeud sélectionne parmi ses voisins symétriques un sous-ensemble lui permettant d'atteindre tous les noeuds à deux sauts. Chaque noeud de ce sous-ensemble est appelé MPR (MultiPoint Relay). L'algorithme de sélection des MPRs d'OLSR natif sera modifié afin de prendre en compte :**
  - la bande passante disponible de chaque noeud sur chaque fréquence de réception des noeuds voisins,
  - uniquement les noeuds qui ne sont pas en silence radio,
  - uniquement les noeuds autorisés (pour des raisons de sécurité),
  - les noeuds sur différentes fréquences,
  - ...
- **P14 Tout noeud du réseau peut être atteint soit directement (il s'agit alors d'un voisin), soit par l'intermédiaire d'un de ses relais multipoint. Les MPRs sont utilisés comme noeuds intermédiaires dans les routes multisaut.**
- **P15 Chaque noeud, sélectionné comme MultiPoint Relay (MPR), diffuse son message *TC* (Topology Control) annonçant les noeuds l'ayant sélectionné comme MPR. Ce message doit pouvoir être entendu de tous ses voisins.**
- **P16 Chaque noeud construit sa table de routage à l'aide de sa table de voisinage, renseignée par les *Hellos*, et sa table de topologie, renseignée par les *TCs*.**

- **P17 Les MPRs permettent également d’optimiser la diffusion de tout message destiné à tous les noeuds du réseau.** Au lieu que chaque noeud retransmette une fois tout message diffusé avec un time-to-live  $\neq 0$ , seuls les noeuds MPR du noeud émetteur vont retransmettre le message.

### 3.4 Gestion des noeuds en silence radio

Pour gérer les noeuds en silence radio, nous proposons d’ajouter une information supplémentaire dans le *Hello* indiquant que le noeud émetteur va passer en silence radio. Plus généralement, la gestion des noeuds en silence radio est basée sur les trois principes suivants :

- **P20 Avant de passer en silence radio, un noeud avertit ses voisins en signalant dans son *Hello* qu’il va passer en silence radio.**
- **P21 Lorsqu’un noeud  $N$  reçoit le *Hello* d’un noeud  $N'$  l’avertissant qu’il passe en silence radio, il va geler les timers associés aux informations concernant  $N'$ .** Nous rappelons que dans OLSR, toute information liée au routage a une date limite de validité, date au-delà de laquelle cette information est éliminée. Geler les timers associés à un noeud en silence radio va permettre à ses voisins de toujours le considérer comme voisin et à ses MPRs de continuer à relayer les messages qui lui sont destinés.
- **P22 Lorsqu’un noeud sort de son silence radio, il émet un *Hello* qui va provoquer le dégel des timers associés aux informations le concernant chez ses voisins.**

### 3.5 Support de QoS

OLSR a déjà été étendu pour gérer la QoS, mais en mono-fréquence uniquement. Le support de QoS décrit dans [2] peut s’appliquer. Nous rappelons les hypothèses adoptées par ce support de QoS ainsi que ses principes. Puis nous décrivons comment étendre cette solution au multi-fréquence.

#### 3.5.1 Hypothèses

Le support de QoS décrit dans [2], fait les hypothèses suivantes :

- les interférences sont limitées à deux sauts ;
- deux types de flux sont distingués : les flux QoS ayant des exigences de QoS (bande passante) et les flux BE (Best Effort) n’ayant aucune exigence particulière ;

- les flux QoS peuvent réquisitionner la bande passante des flux BE.

Remarquons que les flux ayant des exigences de délai sont traités comme des flux QoS, mais prioritairement aux flux ayant des exigences de bande passante. Les flux de contrôle correspondant aux messages OLSR sont traités comme des flux QoS, mais avec la plus grande priorité. Nous avons donc la hiérarchie de priorités suivante :

flux de contrôle > flux QoS délai > flux QoS bande passante > flux BE.

### 3.5.2 Principes du support de QoS

Le support de QoS proposé est illustré sur la figure 1.

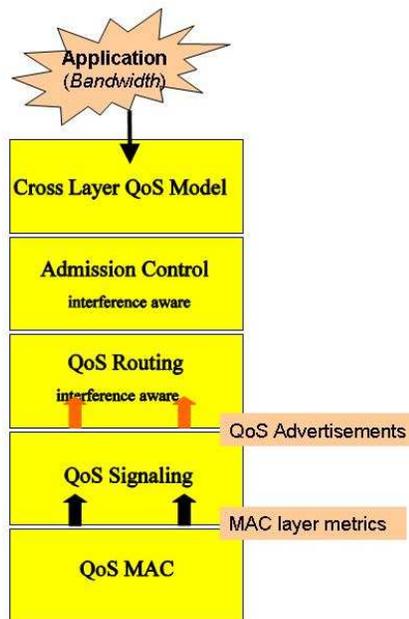


FIG. 1 – Cinq composantes du support de QoS

Le support de QoS est basé sur les cinq composantes suivantes :

1. *le modèle de QoS* est la première composante à concevoir dans un support de QoS. De ce modèle dépend la conception de toutes les autres composantes. Ce modèle décrit les classes de QoS offertes ainsi que leurs propriétés. Tout modèle de QoS comprend au moins deux classes de trafic : celle associée aux flux QoS et celle associée aux flux

BE.

2. *le contrôle d'admission* détermine si un flux QoS peut être accepté ou non, afin d'éviter que ce nouveau flux dégrade à un niveau inacceptable la QoS offerte aux flux déjà acceptés. La décision dépend de la QoS demandée par ce flux, des ressources disponibles et de la QoS demandée par les flux QoS déjà acceptés.

Plus exacte est l'estimation de la bande passante consommée par un flux, plus efficace sera le contrôle d'admission : il acceptera le nombre maximum de flux, compte tenu de la capacité du réseau. Or dans les réseaux mobiles ad hoc, la présence d'interférences rend difficile l'estimation de la bande passante consommée. Néanmoins, les interférences ne sauraient être négligées sous peine d'une dégradation inacceptable des performances. Le contrôle d'admission doit donc prendre en compte les interférences, il sera dit *conscient des interférences*.

En raison de la forte dynamique des réseaux mobiles ad hoc, l'invocation du contrôle d'admission uniquement lors de l'introduction d'un nouveau flux QoS n'est pas suffisante pour maintenir la QoS offerte aux flux acceptés. Un contrôle périodique de la QoS est nécessaire.

3. *le routage par QoS* est chargé de trouver une route entre une source et une destination satisfaisant les exigences de QoS du flux. Il utilise pour ce faire la signalisation de QoS pour sélectionner une route satisfaisante. Dès lors que cette route est trouvée, celle-ci reste fixée tant que la topologie et les conditions de trafic restent constantes. Pour cela, différentes solutions peuvent être utilisées :

- le routage par la source : la source impose le chemin que devra suivre chaque paquet du flux ;
- le chemin maintenu dans chaque noeud visité par le flux sous forme d'un état mou (soft state) devant être rafraîchi périodiquement ;
- le routage par étiquette selon la technique MPLS (MultiProtocol Label Switching).

Remarquons que le routage par QoS pouvant être invoqué à chaque changement de topologie, l'algorithme utilisé doit être simple. Par ailleurs, les routes les plus courtes (plus petit nombre de sauts) tendent à minimiser les ressources réseau utilisées pour la transmission de chaque paquet de la source vers la destination. C'est pourquoi, il est recommandé de prendre en compte la métrique nombre de sauts dans le calcul des routes. Comme certains flux ont des exigences de bande passante, la métrique bande passante doit également être considérée. L'algorithme retenu est une variante de l'algorithme de Dijkstra fournissant la route la plus courte offrant la bande passante demandée. Tout comme le contrôle d'admission, le routage par QoS doit être

conscient des interférences.

4. *la signalisation de QoS* estime et contrôle localement la QoS, comme par exemple la bande passante localement disponible, et la propage aux noeuds concernés. Cette dissémination d'information doit être économe en ressources. Dans le cas d'une diffusion, celle-ci doit être optimisée (diffusion optimisée par les MPRs).
5. *le protocole MAC (Medium Access Control) avec QoS* est requis pour obtenir les meilleures performances du support de QoS. Un protocole MAC avec QoS idéal :
  - serait déterministe ;
  - accorderait l'accès au médium au paquet en attente avec la plus grande priorité ;
  - fournirait de l'information sur la QoS obtenue au niveau MAC. Cette information concernerait la bande passante disponible sur le noeud,....

Lorsqu'un flux à exigences de QoS entre dans le réseau, le comportement du support de QoS est illustré sur la figure 2. Le contrôle d'admission vérifie s'il peut satisfaire la QoS demandée (bande passante dans notre cas) sans dégrader la bande passante des flux QoS déjà acceptés. Pour cela, il cherche la route la plus courte satisfaisant la QoS demandée.

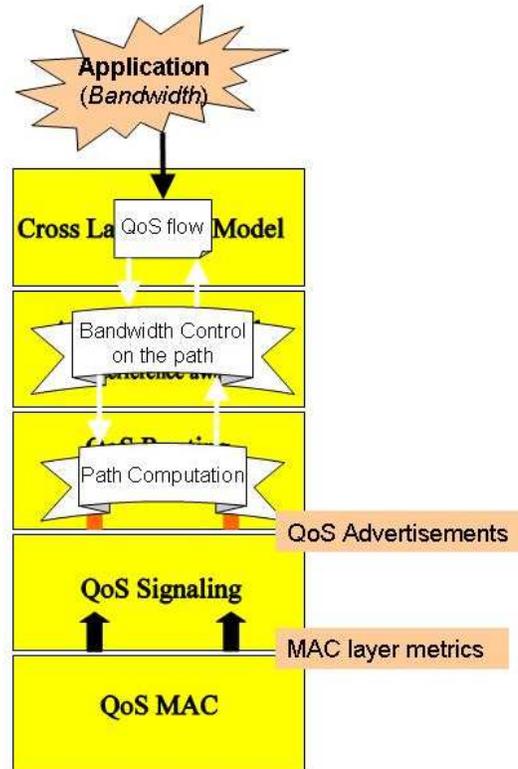


FIG. 2 – Admission d'un flux QoS

Lorsqu'un flux QoS est accepté, ses paquets sont émis conformément à la figure 3. Ils suivent la route précalculée lors du contrôle d'admission.

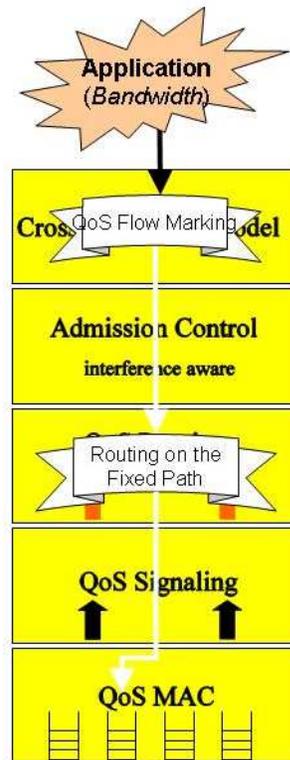


FIG. 3 – Emission des paquets d'un flux QoS accepté

Pour fournir un support de QoS, cette solution gère la bande passante résiduelle (LAB) de chaque noeud en tenant compte des interférences. Nous voyons maintenant comment étendre ce support de QoS au multi-fréquence.

### 3.5.3 Extension au multi-fréquence

Le support de QoS doit gérer la bande passante résiduelle (LAB) de chaque noeud pour chacune des fréquences sur lesquelles ce noeud émettra ses messages utilisateur. Il s'agit en

fait des fréquences de réception des voisins.

Remarquons que la bande passante consommée par les messages de contrôle est décomptée de la bande passante disponible pour les messages utilisateur. De même, sur un noeud, la bande passante utilisée en émission ou réception dans une fréquence  $f$  n'est pas disponible pour les autres fréquences.

Si la bande passante résiduelle (LAB) de chaque noeud pour chacune de ses fréquences d'émission des messages utilisateur n'est pas fournie directement par la couche MAC, il va falloir la calculer à partir de la charge soumise, des caractéristiques du médium et du protocole MAC....

Les performances de cette solution peuvent être améliorées par la gestion de la bande passante résiduelle par lien et non par noeud.

### **3.6 Routage et accès au médium**

L'algorithme de routage devra pouvoir être utilisé sur d'autres réseaux radio que la HF. C'est pourquoi, il devra rester indépendant le plus possible du support de communication utilisé.

Afin d'optimiser les performances, le routage doit exploiter au mieux les informations fournies par la couche MAC, ainsi que les propriétés offertes par cette même couche. C'est pourquoi, le routage dynamique n'est pas totalement indépendant du protocole d'accès au médium.

Plusieurs possibilités existent au niveau MAC. Parmi lesquelles nous pouvons citer les protocoles CSMA et TDMA. Le protocole CSMA présente l'avantage d'être adaptatif aussi bien au niveau du nombre de noeuds que de la charge soumise, tandis que TDMA est déterministe. Nous verrons dans les sections 4.2 et 4.3 comment mettre en oeuvre ce routage sur un protocole TDMA et sur un protocole CSMA, respectivement.

### **3.7 Dimensionnement**

Dans cette section, nous poursuivons la description de la solution générique en donnant le format des messages *TF*, *Hello* et *TC*, nécessaires au routage dynamique.

### 3.7.1 Paramètres considérés

Les paramètres considérés pour ce dimensionnement sont récapitulés dans le tableau suivant.

Item	Nb max	Codé sur
Fréquence éligible	16	4 bits
Adresse d'un noeud	50	6 bits (jusqu'à 64 noeuds)
Taille trame radio		144 bits utiles

### 3.7.2 TFs

Les *TFs* sont émis périodiquement. La périodicité des *TFs* est à évaluer en fonction des conditions d'utilisation du réseau. Le format des messages *TF* est donné dans le tableau suivant.

TF			
Item	Code sur	Nb Max	Soit
Frequence de reception du noeud	4 bits	1	4 bits
Pour chaque noeud entendu, adresse du noeud entendu sur cette freq.	6 bits		
statut du lien	2 bits		
Total partiel	8 bits	nb noeuds entendus	(8 x nb noeuds entendus) bits
Total general			4 + (8 x nb noeuds entendus) bits

Dans ce tableau, le statut d'un lien est : symétrique, asymétrique ou perdu.

**Ainsi, la taille du message *TF* est de (4 + 8 x nb de noeuds entendus) bits.** Dans le pire cas, ce noeud entend tous les autres noeuds. Ce qui donne au pire  $4 + 8 \times 49 = 396$  bits. Pour transmettre ces 396 bits, il faut 3 trames radio, chaque trame disposant de 144 bits utiles. **Il faut donc disposer de 3 trames radio par fréquence testée.**

Pour tester 16 fréquences éligibles, chaque noeud va donc occuper le médium pendant une durée de  $3 \times 16 \times 112 \text{ ms} = 5.376 \text{ s}$ . Les 50 noeuds occupent donc le médium pendant 268.8 secondes pour tester les 16 fréquences éligibles.

**En conclusion, le test des 16 fréquences éligibles par un noeud provoque l'occupation du médium pendant 5.376 s. Si les 50 noeuds testent successivement les 16 fréquences éligibles, cela induit une occupation du médium pendant 268.8 s.**

### 3.7.3 Hellos

Les *Hellos* sont émis périodiquement. La périodicité des *Hellos* est à évaluer en fonction des conditions d'utilisation du réseau. Le format des messages *Hello* est donné dans le tableau suivant, où les informations nécessaires au support de QoS apparaissent en italique.

Hello			
Item	Code sur	Nb Max	Soit
Noeud autorise	1 bit	1	
Noeud va passer en silence radio	1 bit	1	
Frequence de reception du noeud	4 bits	1	
<i>Nb de frequence des voisins</i>	4 bits	1	
Total partiel			10 bits
<i>Pour chaque frequence des voisins, LAB du noeud</i>	6 bits		
Total partiel	6 bits	nb freq voisin	(6x nb freq voisins)
Pour chaque lien, statut du lien	3 bits		
<i>frequence du lien</i>	4 bits		
<i>LAB du distant</i>	6 bits		
Total partiel	13 bits	nb liens	(13 x nb liens) bits
Total general			(10 + 6x nb freq voisin + 13 x nb liens) bits

Dans ce tableau, LAB (Local Available Bandwidth) désigne la bande passante disponible sur un noeud dans la fréquence considérée.

**La taille d'un message *Hello* est donc de (10 + 6x nb freq voisin + 13 x nb liens) bits.**

Dans le pire cas, le nombre de fréquence de réception des voisins est égal au nombre de fréquences éligibles, soit 16. De même, dans le pire cas, chaque noeud a 49 voisins. Nous obtenons donc une taille maximum de *Hello* égale à 743 bits. Ceci correspond à 6 trames radio.

Ces six trames radio doivent être émises sur les fréquences nécessaires pour être reçues par tous les voisins.

- Si les voisins ont 3 fréquences de réception différentes, le médium est donc occupé pendant  $6 \times 3 \times 112 = 2.016$  s pour un *Hello*.
- Si les voisins ont retenu au total les 16 fréquences éligibles, le médium est donc occupé pendant  $6 \times 16 \times 112 = 10.752$  s pour un *Hello*.

Pour 50 *Hello*s, le médium est occupé pendant :

- Si les voisins ont 3 fréquences de réception différentes, le médium est donc occupé pendant 100.8 s pour les 50 *Hello*s.
- Si les voisins ont 16 fréquences de réception différentes, le médium est donc occupé pendant 537.6 s pour les 50 *Hello*s.

### 3.7.4 TCs

Les *TC*s sont émis périodiquement. La périodicité des *TC*s est à évaluer en fonction des conditions d'utilisation du réseau. Le format des messages *TC* est donné dans le tableau suivant, où les informations nécessaires au support de QoS apparaissent en italique.

TC			
Item	Code sur	Nb Max	Total
Nb de MPR selecteurs	6 bits	1	
<i>Nb de fréquence des MPRsel</i>	4 bits	1	
Total partiel			10 bits
<i>Pour chaque fréquence des MPRsel, M2LAB</i>	6 bits		
Total partiel	6 bits	nb freq MPRsel	(6x nb freq MPRsel)
Pour chaque MPRsel, <i>adresse du MPR sélecteur</i>	6 bits		
<i>fréquence du lien</i>	4 bits		
<i>LAB du distant</i>	6 bits		
Total partiel	16 bits	nb MPRsel	(16 x nb MPRsel) bits
Total general			(10 + 6 x nb freq MPRsel + 16 x nb MPRsel) bits

Dans ce tableau, les notations suivantes sont utilisées :

- MPRsel est une abréviation pour MPR sélecteur, c'est-à-dire noeud ayant choisi le noeud origine du *TC* comme MPR.
- M2LAB désigne le minimum de la bande passante locale disponible dans la zone d'interférence du noeud origine du *TC*. Cette valeur est fournie pour chacune des fréquences de réception des voisins l'ayant sélectionné comme MPR.

**La taille d'un message *TC* est donc de  $(10 + 6x \text{ nb freq MPRsel} + 16 x \text{ nb MPRsel bits})$ .**

Dans le pire cas, le nombre de fréquence des MPRsel est identique au nombre de fréquences

éligibles, soit 16. Le nombre de MPRsel est au pire de 48. La taille maximum d'un *TC* est donc de  $10 + 6 \times 16 + 16 \times 48 = 874$  bits. Ceci nécessite 7 trames radio. Chaque *TC* doit être transmis sur les fréquences nécessaires pour être reçu par tous les voisins.

- Si les voisins ont 3 fréquences de réception différentes, le médium est donc occupé pendant  $7 \times 3 \times 112 = 2.352$  s pour l'émission d'un *TC*.
- Si les voisins ont 16 fréquences de réception différentes, le médium est donc occupé pendant  $7 \times 16 \times 112 = 12.544$  s pour l'émission d'un *TC*.

A cela s'ajoutent les retransmissions du *TC*. Ce message est retransmis par tous les MPRs du noeud émetteur au plus une fois, et ainsi de suite....Chaque retransmission a un coût se calculant par la formule donnée plus haut.

### 3.7.5 Conclusion

A l'issue de cette étude, il s'avère que le débit du médium est très critique. Il faut que la déperdition induite par la signalisation n'occupe qu'au plus 20% de la bande passante disponible. Pour un meilleur dimensionnement, il faudrait pouvoir disposer d'informations plus précises sur :

- le nombre moyen de voisins,
- le nombre moyen de fréquence de réception des voisins,
- le taux de perte,
- ....

Par ailleurs, tous les calculs ont été réalisés, en effectuant une signalisation de OLSR en utilisant des messages qui contiennent toute l'information nécessaire de façon directe, et qui correspond au cas le plus général possible.

Il est donc possible de diminuer très fortement le trafic de contrôle, par diverses optimisations :

- Limitation du nombre de fréquences testées. Idée : par exemple si tout le réseau peut fonctionner sur 2 fréquences, il n'est pas absolument nécessaire de tester systématiquement à chaque fois toutes les fréquences éligibles (les 16 prises en exemple).
- Limitation de la redondance temporelle des messages. Idée : si le réseau est relativement statique, les messages seront quasiment identiques ; il est possible de compresser les messages, en limitant la répétition d'informations redondantes.

- Prioritisation des informations. Idée : si toute l'information des messages n'a pas la même importance ou n'a pas besoin de la même fréquence de mise à jour (comme les informations de QoS par rapport aux Hellos) ; Il est donc possible de répéter plus fréquemment l'information la plus essentielle, et de limiter la fréquence des autres messages.
- Autres méthodes d'ingénierie encore pour diminuer le trafic.

Toutefois, toutes ces possibilités d'optimisation du trafic, dépendent très fortement des caractéristiques de la couche physique, et des scénarios d'utilisation dans une moindre mesure.

En l'absence d'optimisation ou même en présence de fort trafic de *TCs*, le trafic de contrôle généré est difficilement écouable sur les liens HF avec cette modulation.

## 4 Accès au médium

Dans cette section, nous décrivons les principes généraux d'une couche MAC pour liens HF et présentons deux variantes MAC. La première est orientée TDMA tandis que la seconde est orientée CSMA. Pour la variante CSMA, nous distinguons selon que l'on dispose ou non d'une tonalité d'occupation (busy tone).

### 4.1 Principes généraux de la couche MAC

Les principes que nous proposons pour la couche MAC sur liens HF se basent sur les hypothèses H1 à H7 données dans la section 2.3.

- **P30 L'émission d'un message de signalisation  $TF$  est exclusive de l'émission d'un message utilisateur.** Ceci afin d'éviter qu'un noeud perde un message de signalisation  $TF$  pendant qu'il émet ou reçoit sur une autre fréquence.

- **P31 Il n'y a pas de fréquence réservée à la signalisation.** Sinon les messages de signalisation pourraient être émis sur certaines fréquences et les messages utilisateur sur d'autres fréquences. Nous pourrions alors avoir la situation suivante où les messages de signalisation sont bien reçus tandis que les messages utilisateur souffrent d'un taux de perte élevé. C'est pourquoi nous recommandons d'émettre les *Hello*s et les *TC*s sur les fréquences de réception des voisins, fréquences qui sont aussi utilisées pour les messages utilisateur.

- **P32 L'allocation du médium est découpée en différentes plages. Les plages temporelles réservées aux  $TF$ s sont connues de tous les noeuds.** Ainsi dans une plage temporelle réservée aux  $TF$ s, un noeud est en attente sur les fréquences éligibles. En dehors d'une plage temporelle réservée aux  $TF$ s, un noeud est en attente sur sa fréquence de réception.

L'allocation du médium peut alors être schématisée par la figure 4. Cette allocation est reproduite périodiquement. Elle commence par une plage de signalisation test, dans laquelle chaque noeud teste les fréquences éligibles. Elle se poursuit avec une plage dans laquelle sont émis les *Hello*s, *TC*s et messages utilisateur.

La couche MAC est confrontée au problème suivant : tous les noeuds vont vouloir émettre leurs messages  $TF$  en même temps (i.e. dans les plages temporelles prévues à cet effet). Nous proposons deux variantes pour résoudre ce problème. La première, décrite dans la section 4.2, est basée sur un protocole d'accès au médium de type TDMA. La seconde, dé-

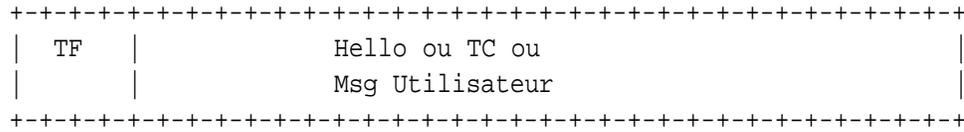


FIG. 4 – Allocation du médium

crite dans la section 4.3, est basée sur un protocole d'accès au médium de type CSMA.

## 4.2 Solution à base de TDMA

### 4.2.1 Principes

Dans cette approche, un protocole TDMA est utilisé. Dans la plage réservée aux *TFs*, chaque noeud du réseau doit pouvoir tester toutes les fréquences éligibles. Une plage temporelle qui n'est pas une plage *TF*, permet à chaque noeud d'émettre :

- ses messages de contrôle *Hellos*, *TCs* dans les fréquences de réception de ses voisins,
- ses messages utilisateur dans
  - la fréquence de réception du destinataire, s'il s'agit d'une transmission unicast ;
  - chacune des fréquences de réception des destinataires, pour une transmission multicast.

Nous avons retenu cette solution qui ne réserve pas à priori de plages spécifiques aux messages *Hellos* et *TCs* et de plages spécifiques aux messages utilisateur. Ceci permet une plus grande souplesse et donc une meilleure efficacité. Remarquons cependant qu'un noeud doit émettre ses messages *Hellos* ou *TCs* prioritairement aux messages utilisateur.

### Plages de signalisation *TF*

Une plage de signalisation *TF* peut être schématisée par la figure 5. Chaque noeud dispose d'un créneau réservé lui permettant de tester chacune des fréquences éligibles. Sur la figure 5, l'axe horizontal représente le temps tandis que l'axe vertical représente les fréquences. Cinq fréquences éligibles sont représentées.

Nous rappelons que les *TF* sont émis sur toutes les fréquences éligibles.

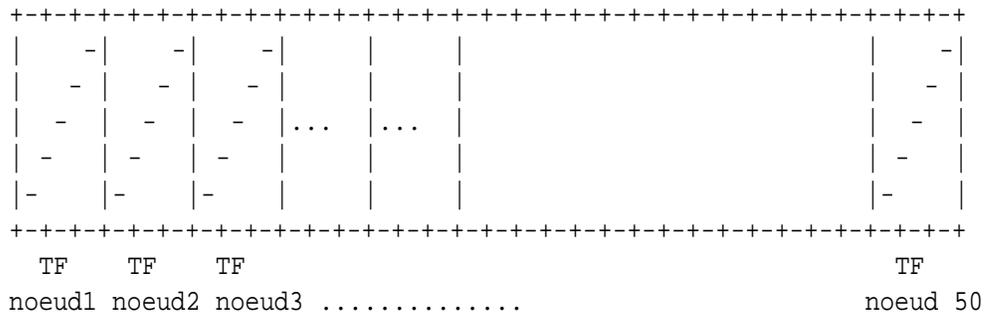


FIG. 5 – Test des fréquences éligibles

**Trame TDMA**

Plus précisément, cette solution basée sur le TDMA, adopte les principes suivants :

- Chaque slot de la trame TDMA est alloué à un unique émetteur.
- Certains slots sont marqués *TF*. Ces slots sont réservés à l’émission des messages *TFs*.
- Un slot qui n’est pas *TF* peut être utilisé par l’émetteur auquel il a été alloué, pour émettre des *Hello*s, *TC*s ou messages utilisateur.

Cette solution se heurte au problème crucial du dimensionnement. Quelle est la taille d’un slot ? Combien de slots réserver aux *TFs* ? Combien de slots réserver à chaque noeud pour émettre ses *Hello*s, *TC*s ou messages utilisateur ?

Nous suggérons d’avoir un dimensionnement par défaut. Afin de ne pas perdre en efficacité, nous proposons d’effectuer le dimensionnement en fonction du nombre de noeuds réellement présents dans le réseau. Pour cela, une procédure destinée à acquérir la liste des noeuds présents dans le réseau pourrait être utilisée.

**Dégradation de qualité**

Dès que la qualité du lien tombe en dessous d’un certain seuil, noté *Seuil\_Bas*, le noeud récepteur détecte cette dégradation. Il considère la possibilité de changer de fréquence de réception. Si une nouvelle fréquence de réception est choisie, celle-ci doit parvenir à ses voisins afin qu’ils utilisent cette fréquence pour le joindre. Ceci nécessite d’attendre la pro-

chaîne plage de signalisation, avant de pouvoir utiliser la nouvelle fréquence de réception.

### **Nouvel arrivant**

Un nouvel arrivant connaissant la structure de la supertrame illustrée par la figure 4, attend la prochaine plage de signalisation test pour renseigner sa matrice *QualiteSignalReu* (noeud entendu x fréquence entendue) et sélectionne sa fréquence de réception qu'il communique dans ses *Hello*s.

#### **4.2.2 Avantages et inconvénients**

Cette solution offre les avantages suivants :

- les messages *TFs* bénéficient de plages temporelles spécifiques leur garantissant qu'ils disposeront d'une bande passante suffisante ;
- elle peut être mise en oeuvre à partir de l'existant.

Cette solution présente les inconvénients suivants :

- Cette solution exige la synchronisation des noeuds. Cette synchronisation pourra être obtenue à partir du GPS dont chaque noeud dispose.
- Chaque noeud doit veiller à ce que ses messages utilisateur n'empiètent pas sur les plages temporelles réservées aux messages de signalisation. Avant de commencer la transmission d'une trame utilisateur, il faut s'assurer que celle-ci sera terminée avant le début de la prochaine plage de signalisation.
- Cette solution repose sur la prédétermination des plages temporelles. Il est difficile d'avoir un dimensionnement optimisé pour tous les cas de figure. L'efficacité peut être limitée, lorsque le nombre de noeuds présents est faible par rapport au nombre prévu : des slots réservés à la signalisation ne sont pas occupés et ne peuvent pas être utilisés pour des messages utilisateur. Les slots réservés aux messages *TFs* seraient statiques, tandis qu'un dimensionnement dynamique des autres slots en fonction du nombre de noeuds réellement présents pourrait être envisagé.

- Dans cette première version, un slot est attribué à un seul émetteur. Il s'en suit qu'il n'y a pas de parallélisme dans les transmissions de messages utilisateur, même si celles-ci sont effectuées dans des fréquences différentes et impliquent des noeuds différents. Permettre le parallélisme de transmission utilisateur fait partie de optimisations possibles.

### 4.3 Solution à base de CSMA

A la différence de la solution précédente, la solution décrite dans cette section ne fait **pas l'hypothèse de slots alloués à chaque noeud du réseau. Seules les plages temporelles dédiées aux messages  $TF$  sont prédéterminées.** Nous distinguons deux cas selon que les noeuds disposent ou non d'une tonalité d'occupation (busy tone).

#### 4.3.1 Principes

Dans cette solution, seuls les messages  $TF$  bénéficient d'une plage temporelle qui leur est exclusivement réservée, et revient périodiquement. L'accès à cette plage temporelle  $TF$  est régie par du CSMA. Afin de faciliter la détection de porteuse, nous suggérons de découper les tests des fréquences éligibles en plusieurs parties contigues (par exemple deux). Chaque partie  $i$  est centrée autour d'une fréquence de base  $f_i$  et comprend les fréquences  $f_{i-j}, f_{i-j+1}, \dots, f_i, \dots, f_{i+j}$ . La fréquence de base  $f_i$  est utilisée pour détecter la porteuse lors du test des fréquences  $f_{i-j}, f_{i-j+1}, \dots, f_i, f_{i+1}, \dots, f_{i+j}$ . La plage temporelle  $TF$  est alors découpée en autant de parties. Tous les noeuds vont d'abord tester les fréquences de la première partie, puis de la seconde partie. Pour chaque partie  $i$ , chaque noeud va accéder à la  $i$ ème partie de la plage temporelle  $TF$  pour tester les fréquences  $f_{i-j}, f_{i-j+1}, \dots, f_i, f_{i+1}, \dots, f_{i+j}$ .

Pour une plage temporelle qui n'est pas dédiée  $TF$ , l'accès au médium est régi par du CSMA. La figure 6 illustre un exemple possible d'allocation du médium, dans lequel le test de fréquences est découpé en deux parties et deux noeuds sont présents<sup>1</sup>

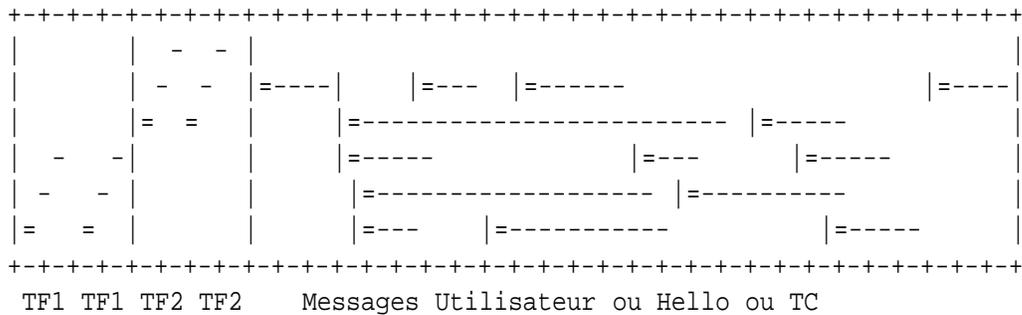


FIG. 6 – Allocation du médium

<sup>1</sup> dans cette figure, le symbole “=” représente un accès en CSMA

L'allocation du médium respecte les règles suivantes :

- **Un message de signalisation est prioritaire par rapport à un message utilisateur.** Une manière simple d'obtenir cela est d'exiger un délai inter-trame plus grand pour les messages utilisateur.
- **On peut également définir deux classes de service utilisateur : une classe prioritaire et une classe régulière.** Le trafic phonie appartiendrait à la classe prioritaire. Le délai inter-trame attendu par un message utilisateur régulier est plus long que celui attendu par un message utilisateur prioritaire, qui lui-même est plus long que le délai-inter-trame attendu par un message de signalisation.

### Dégradation de qualité

Dès que la qualité du lien tombe en dessous d'un certain seuil, noté *Seuil\_Bas*, le noeud récepteur détecte cette dégradation. Il considère la possibilité de changer de fréquence de réception. Si une nouvelle fréquence de réception est choisie, il attend le prochain *Hello* pour signaler sa nouvelle fréquence de réception, laquelle doit parvenir à ses voisins afin qu'ils utilisent cette fréquence pour le joindre.

### Nouvel arrivant

Un nouvel arrivant écoute sur toutes les fréquences éligibles et renseigne sa matrice *QualiteSignalReu* (noeud entendu x fréquence entendue) et sélectionne sa fréquence de réception qu'il communique dans ses *Hello*s.

#### 4.3.2 Variante sans busy tone

Une solution CSMA sans busy tone se heurte au problème suivant : **comment éviter de perdre le message émis dans la fréquence de réception d'un noeud alors que ce noeud est en train de transmettre dans une autre fréquence (i.e. la fréquence de réception d'un de ses voisins) ?**. La figure 7 illustre ce cas. Un noeud transmet le message *M1* au noeud *N* qui est lui-même en train de transmettre le message *M2* à un de ses voisins dans une fréquence différente. Le message *M1* est alors perdu. En effet, dans ces conditions, bien qu'il n'y ait pas de porteuse détectée sur la fréquence d'émission, le destinataire n'est pas à l'écoute, car en train d'émettre sur une autre fréquence.

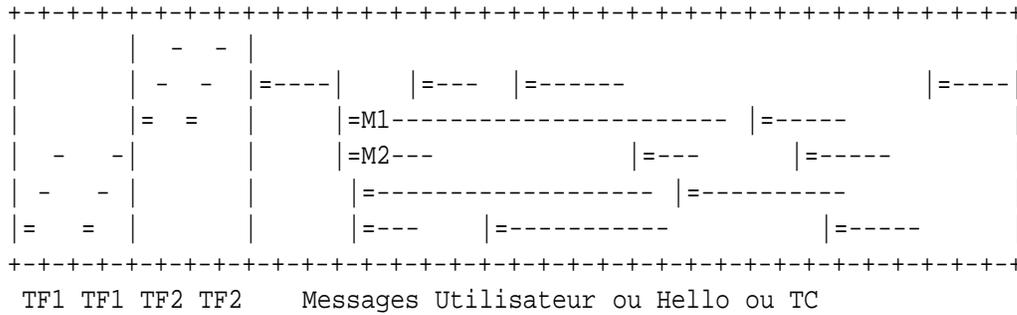


FIG. 7 – Allocation du médium en CSMA sans busy tone

Remarquons que ceci représente l'unique cas de perte. Si le destinataire est en train d'écouter, il écoute obligatoirement sur sa fréquence de réception, donc il entendra le message qui lui est destiné.

Le protocole CSMA pur ne permet pas d'éviter ce problème. Ce problème est d'autant plus crucial qu'il s'agit des messages *Hello*s ou *TC*s. Une étude de dimensionnement est alors nécessaire pour montrer que le taux de perte des messages *Hello*s ou *TC*s reste compatible avec un routage correct. Dans la négative, il faut enrichir le protocole CSMA pour mieux synchroniser les noeuds et éviter de se retrouver dans cette situation.

### 4.3.3 Variante avec busy tone

La variante avec busy tone permet de protéger les messages de signalisation et assure leur exclusivité par rapport aux messages utilisateur. Ainsi, avec le busy tone, le cas illustré par la figure 7 n'est plus possible.

- **Lorsqu'un noeud transmet un message *TF*, *Hello* ou *TC*, il active le signal busy tone.** Ceci permet d'assurer l'exclusivité entre :

- messages de signalisation et messages utilisateur,
- messages de signalisation eux-mêmes.

L'allocation du médium peut être illustrée par la figure 8. Le symbole '\*' représente le busy tone.

- **Chaque noeud reste en veille sur :**
  - sa fréquence de réception sur laquelle il reçoit les *Hello*s, les *TC*s et les messages utilisateur,

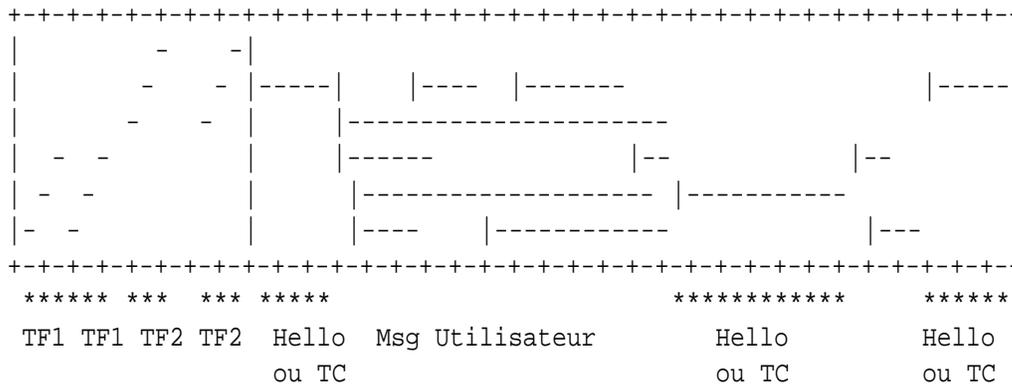


FIG. 8 – Allocation du médium CSMA avec busy tone

- le **busy tone** qui lui indique la transmission d’un message de contrôle (*TF*, *Hello* ou *TC*).

L’allocation du médium respecte la règle supplémentaire suivante :

- **Un noeud ne peut émettre qu’en l’absence de busy tone.**

### Accès au médium

Si nous utilisons un signal de busy tone, nous sommes dans les conditions d’un protocole CSMA (Carrier Sense Multiple Access). La collision sur une transmission peut intervenir dans l’intervalle de temps où le signal se propage c’est-à-dire, dans notre cas, sur un aller retour de 2 fois 600 km. Celà représente une fenêtre de collision de 40 ms. A ce chiffre il convient d’ajouter les temps de détections électroniques, il nous paraît qu’une valeur conservative est 10 ms.

Si l’on appelle  $\beta$  le rapport de la fenêtre de collision à la durée du paquet, il est possible de montrer [3] que la capacité d’un protocole CSMA est au maximum égale à

$$C_{max} = \frac{1}{1 + \sqrt{2\beta}}$$

Si l’on considère un slot de 112 ms et des paquets de 16 slots, on obtient  $\beta = \frac{50}{16 \cdot 112}$  et une capacité maximum  $C_{max}$  de 81 %.

Un noeud accède au canal avant de :

- émettre son *TF* sur toutes les fréquences éligibles,
- émettre son *Hello* sur les fréquences de réception de ses voisins,
- émettre un *TC* sur les fréquences de réception de ses voisins,
- émettre un message utilisateur sur la fréquence de réception d'un voisin.

La figure 9 illustre les différents accès au médium, symbolisés par '|', tandis que le busy tone est symbolisé par '+'.  
 ++++++ ++ +++ ++++++

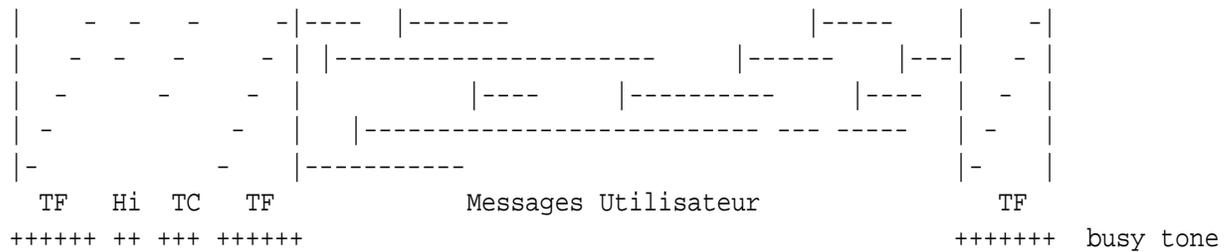


FIG. 9 – Accès au médium

L'accès au médium est effectué conformément aux règles suivantes :

- Ainsi avant d'émettre un message de contrôle, un noeud doit s'assurer de l'absence du signal busy tone.
- Lors de l'émission d'un message de contrôle, un signal busy tone est activé durant toute la transmission. Ce signal peut interrompre la transmission d'un message utilisateur.
- Ainsi avant d'émettre un message utilisateur, un noeud doit s'assurer de l'absence du signal busy tone et de la non-utilisation de la fréquence d'émission.
- En conséquence, plusieurs transmissions de message utilisateur sont possibles simultanément sur des fréquences différentes et sous réserve qu'il n'y ait aucun noeud impliqué dans au moins deux transmissions. La transmission d'un message de contrôle est exclusive.

- Afin d'éviter la monopolisation du médium par un message utilisateur, un noeud ne doit pas occuper le médium pendant une durée supérieure à *Duree\_Max*.

#### 4.3.4 Avantages et inconvénients

La solution CSMA / busy tone requiert un matériel capable d'être en veille sur une fréquence de réception et le busy tone.

Cette solution présente les avantages suivants :

- A la différence de la solution basée sur du TDMA, il n'y a plus de plage temporelle réservée aux messages *Hello*s et *TC*s. Cependant, ces messages sont prioritaires par rapport aux messages utilisateur.
- L'allocation du médium s'adapte dynamiquement aux noeuds et aux trafics présents. Il convient cependant de s'assurer que la charge n'est pas trop importante. Une étude de dimensionnement est nécessaire.
- Par rapport à la solution basée sur du TDMA, cette solution offre l'avantage du parallélisme de transmission des messages utilisateur.

#### Solution CSMA / sans busy tone

Une solution CSMA / sans busy tone requiert une étude plus approfondie afin de montrer que le taux de perte des messages *Hello*s et *TC*s reste compatible avec un routage correct. Dans la négative, il faut enrichir le protocole CSMA pour mieux synchroniser les noeuds.

## 5 Conclusion

### 5.1 Synthèse de l'étude

Dans ce document, nous avons proposé un routage dynamique sur liens HF. Ce routage est basé sur OLSR qui est étendu pour gérer plusieurs fréquences, les noeuds en silence radio et la qualité de service. Pour le multi-fréquence, un nouveau type de message est introduit. Il est destiné à tester la qualité du signal reçu sur toutes les fréquences éligibles et est noté *TF*. Nous avons donc trois types de message de contrôle : les *TF*, les *Hello*s et les *TC*s. Les messages *TF* sont émis sur toutes les fréquences éligibles, tandis que les *Hello*s et les *TC* ne sont émis que sur les fréquences de réception des voisins. Tous ces messages sont émis périodiquement.

Nous avons distingué deux variantes MAC pour la mise en oeuvre de cette solution. Toutes deux réservent des plages temporelles pour l'émission des messages *TF*s.

- L'une s'appuie sur un accès au médium de type TDMA. Un slot qui n'est pas marqué *TF*, peut être utilisé par l'émetteur auquel il a été alloué, indifféremment pour émettre un *Hello*, *TC* ou un message utilisateur.
- L'autre s'appuie sur un accès au médium de type CSMA. Aucun slot n'est réservé aux messages *Hello*s ou *TC*s, mais ceux-ci sont favorisés au niveau de l'accès au médium. L'émission d'un message *TF*, *Hello* ou *TC*s s'accompagne de l'activation du signal busy tone.

A l'issue de cette étude, il s'avère que le débit offert par la couche physique est critique. Le nombre de fréquences de réception des voisins est lui aussi un paramètre critique. En effet, en l'absence d'optimisation ou même en présence de fort trafic de *TC*s, le trafic de contrôle généré est difficilement écouable sur les liens HF avec cette modulation.

### 5.2 Perspectives

Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour :

- raffiner certains points comme la sélection des MPRs et le support de QoS ;
- fournir des spécifications détaillées du routage ;
- dimensionner la solution retenue au niveau du routage ;
- apporter quelques optimisations ;
- raffiner le protocole d'accès au médium ;
- choisir le type d'accès au médium ;
- optimiser la solution globale en fonction du support d'accès au médium.

## **Références**

- [1] T. Clausen, P. Jacquet, *Optimized Link state Routing Protocol (OLSR)*, IETF, RFC 3626, October 2003.
- [2] D.Q. Nguyen, P. Minet, *QoS support and OLSR routing in a mobile ad hoc network*, 5th IEEE International Conference on Networking, ICN06, Mauritius, April 2006.
- [3] D. Bertsekas, R. Gallager, *Data Networks*, Prentice Hall, 1988.



---

Unit ´e de recherche INRIA Lorraine, Technop ˆole de Nancy-Brabois, Campus scientifi que,  
615 rue du Jardin Botanique, BP 101, 54600 VILLERS LÈS NANCY  
Unit ´e de recherche INRIA Rennes, Irista, Campus universitaire de Beaulieu, 35042 RENNES Cedex  
Unit ´e de recherche INRIA Rh ˆone-Alpes, 655, avenue de l'Europe, 38330 MONTBONNOT ST MARTIN  
Unit ´e de recherche INRIA Rocquencourt, Domaine de Voluceau, Rocquencourt, BP 105, 78153 LE CHESNAY Cedex  
Unit ´e de recherche INRIA Sophia-Antipolis, 2004 route des Lucioles, BP 93, 06902 SOPHIA-ANTIPOLIS Cedex

---

´Editeur  
INRIA, Domaine de Voluceau, Rocquencourt, BP 105, 78153 LE CHESNAY Cedex (France)  
<http://www.inria.fr>  
ISSN 0249-6399