Un modèle dynamique de trafic pour le problème d'affectation de fréquences

Hakim Mabed, Alexandre Caminada
France télécom Recherche et Développement
6 Ave des Usines, BP 382
90007 Belfort, France
email: `{hakim.mabed,alexandre.caminada}@francetelecom.com`

Jin-Kao Hao
Université d'Angers
2 Bd Lavoisier
49045 Angers, France
email: `Jin-Kao.Hao@univ-angers.fr`

Résumé

La modélisation du problème d'affectation de fréquences (PAF) s'achemine vers de plus en plus de réalisme. Un réalisme qui apparaît dans une meilleure prise en compte des aspects liés aux brouillages. Ce travail s'inscrit dans cette démarche visant à améliorer la modélisation des facteurs influant sur la qualité d'un plan. Les méthodes actuelles de planification de fréquences se basent sur un surdimensionnement des données de trafic. Ce surdimensionnement entraîne une modélisation imprécise du trafic total perdu. Nous proposons ici une modélisation dynamique du trafic pour le PAF qui tient compte de l'évolution spatio-temporelle des données de trafic. Cette modélisation devrait permettre d'améliorer la qualité globale des plans de fréquences et leur robustesse face aux variations de trafic. Les performances du model dynamique sont testées à l'aide d'un algorithme génétique hybride et comparées avec celles de la modélisation classique basée sur le dimensionnement en 2ème heure la plus chargée. Les résultats des tests affichent une nette amélioration de la capacité en trafic des plans de fréquences générés ainsi que de leur robustesse.

1 Introduction

Alors que la charge des réseaux radio mobiles est en continuelle croissance, les ressources radio restent limitées, faisant du design une tâche fastidieuse. Il est donc légitime de s'intéresser à une modélisation plus fine de la problématique de planification des fréquences.

Dans les réseaux radio mobiles, la connexion des clients est assurée par une liaison radio. Chaque opérateur de téléphonie mobile dispose d'un nombre limité de fréquences (en France, 62 fréquences au plus pour les opérateurs GSM) pour couvrir la totalité du territoire. La réutilisation des fréquences est par conséquent inévitable pour augmenter la capacité du réseau [12]. Le territoire est partitionné en cellules représentant un ensemble de points servis par la même station de base. Une distribution optimale du spectre de fréquences disponible sur les stations doit garantir un écoulement maximal du trafic tout en minimisant les interférences. Ces interférences sont dues à la présence de zones de recouvrement entre les cellules où plusieurs signaux de bonne qualité sont reçus. L'écoulement du trafic porté par ces zones est alors conditionné par la qualité de l'affectation des fréquences.

Traditionnellement, le PAF est modélisé par une matrice de réutilisation [5, 6, 8, 10] indiquant pour chaque couple de stations l'espacement en fréquences à respecter pour résorber l'intégralité du brouillage. Les surfaces des zones brouillées et les volumes de trafic mis en jeu étaient ignorés. Par la suite, des modèles plus précis basés sur la quantification des risques d'interférence ont été proposés [3, 4, 9]. La prise en compte du trafic dans cette quantification est réalisée à partir de statistiques sur les données de trafic relevées sur le réseau. Plus précisément, la quantité de trafic enregistrée à la deuxième heure la plus chargée sur chaque station est retenue dans la modélisation du brouillage. Par la suite cette modélisation sera utilisée comme référence et sera nommée "modélisation classique" ou "modélisation H2C".

Dans cet article nous discutons des inconvénients du dimensionnement H2C et nous proposons une modélisation dynamique du trafic pour le PAF qui utilise directement les variations des données de trafic comme entrée. On attend de ce modèle une amélioration de la qualité globale des plans de fréquences et de leur robustesse face à ces changements. L'apport de la modélisation dynamique est testé sur des données de trafic réelles et fictives et comparé aux résultats de la modélisation classique. Pour réaliser ces tests, une nouvelle heuristique basée sur les Algorithmes Génétiques et la Recherche Tabou est développée.

L'article est organisé de la façon suivante. Dans la section 2, nous discutons de l'importance de la modélisation du trafic dans le PAF. Dans la section 3, nous présentons une modélisation dynamique du trafic pour le problème. Dans la section 4, nous décrivons les différentes composantes de l'heuristique de recherche développée. La section 5 est dédiée à la présentation des résultats des tests. Nous terminons par une conclusion et la présentation des travaux futurs.

2 Modélisation du trafic dans le problème d'affectation de fréquences

La nature fluctuante du trafic, entraîne une instabilité des performances du réseau. Cette instabilité se traduit par une baisse des performances du réseau en certains endroits et à certains moments. Par conséquent, l'adéquation d'un plan de fréquences doit être estimée à la lumière de ces variations. D'autre part, les notions de robustesse et d'évolutivité du plan de fréquences en fonction de la variation de la demande en trafic s'imposent comme des critères clés du design.

2.1 Ingénierie du trafic

L'aspect dynamique du trafic peut être observé sur deux échelles : spatiale et temporelle [1, 2]. L'évolution temporelle du trafic est due aux aspects comportementaux des clients. Les variations spatiales du trafic se rapportent à la mobilité et la densité des clients. Par conséquent, l'analyse de l'évolution du trafic peut être faite soit en observant les variations temporelles du trafic sur chaque cellule, soit en observant la distribution du trafic sur le réseau à chaque période. La figure 1 illustre l'évolution heure par heure du trafic (exprimée en Erlang) sur deux cellules distinctes. On remarque que la deuxième heure la plus chargée n'est pas la même sur les deux cellules.

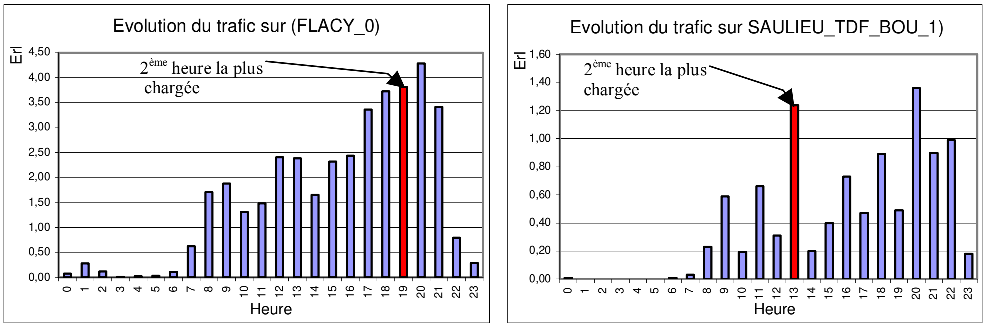

FIG. 1 – Evolution temporelle du trafic sur deux cellules

2.2 Modélisation classique du trafic pour le PAF

Un réseau radio-mobile GSM [11] est composé d'un ensemble de sites supportant chacun une à trois stations. Chaque station, $S_i \in \{S_1, ..., S_N\}$, requiert un nombre donné de fréquences, MA_i, utilisées comme porteuses sur son aire de couverture. L'affectation des fréquences aux stations est régit par un ensemble de règles de réutilisation plus au moins strictes énoncées ci-dessous :

- Contrainte co-station (notée C1) : les fréquences allouées à la même station doivent être espacées par au moins 3 canaux.
- Contrainte co-site (notée C2) : les fréquences allouées à des stations se trouvant sur le même site doivent être espacées par au moins 2 canaux.
- Contrainte inter-site : les fréquences allouées à des stations, localisées sur des sites différents, doivent être espacées en fonction de leur interférence mutuelle.

Alors que la satisfaction des contraintes co-station et co-site est indispensable pour l'applicabilité du plan de fréquences, les contraintes inter-site sont des contraintes de préférence. La satisfaction de ces contraintes est pratiquement infaisable pour la quasi-totalité des réseaux déployés ; une modélisation du PAF consiste donc à minimiser le nombre de ces contraintes insatisfaites. Les contraintes inter-site sont modélisées par un graphe non orienté dont les nœuds correspondent aux stations et les arcs représentent les risques d'interférence. Chaque arc, reliant deux stations, S_i et S_j, est pondéré par un couple de valeurs $(\beta_{i,j,0}, \beta_{i,j,1})$. La valeur $\beta_{i,j,d}$ mesure l'importance du brouillage générée par un couple de fréquences allouées aux stations S_i, S_j, et espacées de d canaux (l'interférence est négligeable si $d > 1$). Le rôle du trafic dans la quantification des interférences est double. En tant que brouilleuse, l'intensité de trafic sur une station rend compte du taux d'utilisation des fréquences qui lui sont allouées, et par conséquent du taux de brouillage occasionné. En tant que brouillée, l'intensité du trafic reflète l'importance de la zone couverte par la station, et donc l'intérêt de réduire les interférences s'y produisant. Par conséquent, nous pouvons grossièrement considérer $\beta_{i,j,d}$ comme la valeur renvoyée par une fonction, I, ayant pour arguments l'intensité du trafic sur les deux stations et la distance inter-canal considérée :

$$\beta_{i,j,d} = I(i, j, t_i, t_j, d) \tag{1}$$

Où t_i et t_j correspondent à l'intensité de trafic sur les stations S_i et S_j.

Dans le modèle classique, les valeurs $\beta i, j, d$ sont calculées à partir des données de trafic à la deuxième heure la plus chargée. Notons par t_i^{H2C} l'intensité du trafic à la deuxième heure la plus chargée sur la station S_i. Les poids du graphe sont alors calculés suivant l'expression suivante :

$$\beta_{i,j,d}^{H2C} = I(i, j, t_i^{H2C}, t_j^{H2C}, d) \tag{2}$$

Le dimensionnement H2C souffre de deux inconvénients majeurs. Premièrement, la répartition de trafic $(t_1^{H2C}, ..., t_N^{H2C})$ ne correspond ni à une cartographie de trafic réellement présente sur le réseau, ni à une bonne agrégation du trafic. En d'autres termes, le dimensionnement H2C entraîne une altération dans l'ordre préférentiel entre les risques d'interférences liée au mauvais dimensionnement de la demande. Deuxièmement, l'évolution temporelle du trafic est indispensable pour l'élaboration de critères de robustesse.

3 Modélisation dynamique du trafic pour le PAF

Nous présentons dans cette partie une modélisation dynamique du trafic pour le PAF qui remédie aux inconvénients de la modélisation classique. Notons par t_i^h, l'intensité du trafic sur la station S_i à la période h, et par $\beta_{i,j,d}^h$, les poids du graphe de contraintes calculés à partir des données de trafic à la période h. Le PAF est donc définie par np graphes de contraintes, un par période, telle que :

$$\beta_{i,j,d}^h = I(i, j, t_i^h, t_j^h, d) \tag{3}$$

L'adéquation d'un plan de fréquences au problème décrit par ces graphes est à mettre en rapport avec les deux caractéristiques suivantes :

- Premièrement, la qualité globale du plan de fréquences le long des périodes et son aptitude à faire face aux changements de trafic. Cette caractéristique est mesurée par le cumul des interférences dans le temps.
- Deuxièmement, la performance locale du plan. Ce qui correspond à la mesure de l'instabilité des performances du plan pour chacune des périodes, et en particulier pendant la période où la qualité est la plus dégradée.

Deux critères sont donc retenus pour représenter ces caractéristiques, la capacité globale en trafic du réseau et la robustesse du plan de fréquence dans le temps :

- Somme totale des interférences : ce critère mesure le volume global d'interférence produit par le plan de fréquences pour l'ensemble des périodes.

$$F_1 = \sum_{h=1}^{np} \left(\sum_{\substack{S_i/S_j \\ i<j}} \left(\sum_{f_{i,k}/f_{j,p}} \beta^h_{i,j,|f_{i,k}-f_{j,p}|} \right) \right) \tag{4}$$

– Répartition temporelle des interférences : ce critère mesure la robustesse du plan de fréquences à travers le temps. L'objectif est de minimiser la quantité maximale d'interférence enregistrée pendant une période.

$$F_2 = MAX_{h=1}^{np} \left(\sum_{\substack{S_i/S_j \\ i<j}} \left(\sum_{f_{i,k}/f_{j,p}} \beta^h_{i,j,|f_{i,k}-f_{j,p}|} \right) \right) \tag{5}$$

Où, np représente le nombre de périodes considérées, et $f_{i,k}$ est la $k^{\text{ème}}$ fréquence allouée à la station S_i. L'objectif est alors de trouver les valeurs $f_{i,k}$ qui satisfont les contraintes co-station et co-site et qui minimise les fonctions F_1 et F_2.

Nous présentons maintenant les détails de l'algorithme hybride servant à générer le plan de fréquences. L'algorithme est basé sur une hybridation des Algorithmes Génétiques et de la Recherche Tabou et se sert des fonctions F_1 et F_2 comme une partie de la fonction de coût.

4 Hybridation des Algorithmes Génétique et de la Recherche Tabou pour PAF

Les notations suivantes seront utilisées dans le reste de l'article : nf est le nombre de fréquences disponibles, $C1$ et $C2$ sont deux fonctions binaires représentant les contraintes co-station et co-site.

$$C1(i,k,p) = \begin{cases} 1 & \text{si } |f_{i,k} - f_{i,p}| < 3 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{6}$$

$$C2(i,j,k,p) = \begin{cases} 1 & \text{si } S_i \text{ et } S_j \text{ sont sur le même site et } |f_{i,k} - f_{j,p}| < 2 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{7}$$

4.1 Codage et fonction de coût

Un plan de fréquences est codé par un vecteur $< f_{1,1}$, ..., f_{1,MA_i}, $f_{2,1}$, ..., f_{2,MA_2}, ... ,$f_{N,1}$, ..., $f_{N,MA_N} >$, représentant l'ensemble des fréquences assignées à chaque station. L'espace de recherche du problème correspond à l'ensemble de toutes les configurations possibles tel que $f_{i,k} \in [1..nf]$.

Les contraintes dures $C1$ et $C2$ sont intégrées dans la fonction de coût en utilisant une approche basée sur la pénalisation. Les contraintes dures et les critères F_1 et F_2 sont linéairement combinés au sein d'une seule fonction de coût. Pour marquer leur importance les contraintes co-station et co-site sont pondérées par une très grande valeur ω.

$$F_{OD} = \omega \left(\sum_{i=1}^{N} \sum_{k=1}^{MA_i-1} \sum_{p=k+1}^{MA_i} C1(i,k,p) + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} \sum_{k=1}^{MA_i} \sum_{p=1}^{MA_j} C2(i,j,k,p) \right) + F_1 + F_2 \quad (8)$$

4.2 Opérateur de sélection et de remplacement

A chaque itération, deux plans de fréquences sont sélectionnés à partir de la population courante. Afin de favoriser la sélection des bonnes solutions, les individus de la population sont ordonnés sur la base de leur fonction de coût de façon à ce que le meilleur ait le rang 0. Notons par r_i le rang de l'individu i. La probabilité de sélection d'un individu i est alors égale à :

$$PS_i = \frac{(taille\_pop - r_i) \times 2}{taille\_pop \times (taille\_pop + 1)} \quad (9)$$

Après l'étape de reproduction, les nouveaux individus sont directement insérés dans la population en remplacement d'autres solutions. L'opérateur de remplacement favorise l'élimination des mauvais plans de fréquences. L'équation 10 représente la probabilité de remplacement d'un individu i de la population.

$$PR_i = \frac{r_i \times 2}{taille\_pop \times (taille\_pop - 1)} \quad (10)$$

Notons que le meilleur plan de fréquences dans la population ne peut être remplacé.

4.3 Opérateurs génétiques

L'opérateur de croisement géographique décrit dans [13] est utilisé pour la générations de nouveaux plans de fréquences. L'opérateur fonctionne de la façon suivante. Ayant deux plans de fréquences, une station de référence S_i est choisie aléatoirement. On construit alors l'ensemble des voisins, $V(S_i)$, de S_i constitué de l'ensemble des stations co-site et des stations interférentes S_j pour lesquelles $B^h_{i,j,d}$. Les fréquences correspondant aux stations $S_i \cup V(S_i)$ sont échangées entre les deux plans parents sélectionnées générant ainsi deux nouveaux plans de fréquences (fig 2).

L'opérateur de mutation est basé sur l'usage d'une liste tabou commune à tous les individus de la population. L'opérateur s'inspire de l'algorithme de recherche tabou décrit dans [7]. La différence principale réside dans les mécanismes de choix du gène à muter.

Pour un plan de fréquences donné, un score de violation est associé à chaque fréquence allouée à une station, ce score mesure la participation de chaque fréquence aux interférences enregistrées. L'opérateur de mutation consiste en un cycle de changements : à chaque itération, une assignation est sélectionnée sur la base de son score de violation, puis une nouvelle fréquence est affectée à cette position. La sélection d'une assignation est basée sur une probabilité, PSG, proportionnelle à son score de violation. Les équations 11 et 12 décrivent respectivement le score de violation et la probabilité de sélection de la

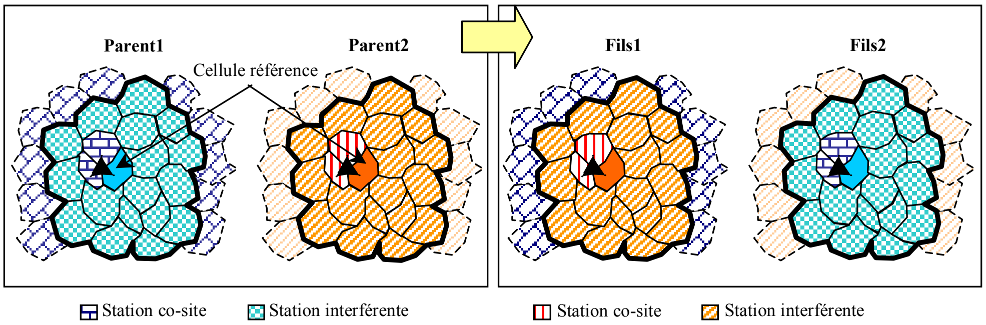

FIG. 2 – Opérateur de croisement

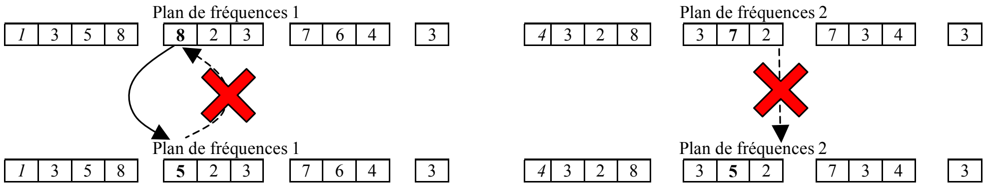

FIG. 3 – Opérateur de mutation

$k$ème fréquence allouée à la station S_i.

$$SCORE_{i,k} = \omega \times \left(\sum_{\substack{p=1 \\ p \neq k}}^{MA_i} C1(i,k,p) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N} \sum_{p=1}^{MA_j} C2(i,j,k,p) \right) + \sum_{h=1}^{np} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N} \sum_{p=1}^{MA_j} \beta^h_{i,j,|f_{i,k}-f_{j,p}|} \quad (11)$$

$$PSG_{i,k} = \frac{SCORE_{i,k}}{\sum_{j=1}^{N} \sum_{p=1}^{MA_j} SCOREj,p} \quad (12)$$

Après la sélection de l'assignation, une nouvelle fréquence est affectée à la station. Soit S_{i*} et $f_{i*,k*}$, respectivement la station et la fréquence sélectionnées pour la mutation, la totalité du spectre de fréquences est analysée pour le remplacement de $f_{i*,k*}$. Premièrement, les fréquences entraînant des conflits co-station et co-site sont éliminées ainsi que les fréquences tabou (la liste tabou est initialement vide). Parmi les fréquences restantes, la meilleure fréquence f' (produisant le meilleur plan de fréquences) est retenue. Les couples $(i*, f_{i*,k*})$ et $(i*, f')$ sont alors insérés dans la liste tabou pour un nombre donné d'itérations. Le couple $(i*, f_{i*,k*})$ permet d'éviter les cycles de recherche, tandis que le couple $(i*, f')$ empêche les mutations ultérieures se déroulant sur d'autres individus de la population d'effectuer les même choix, et pousse ainsi la recherche à plus de diversité. La figure 3 montre le fonctionnement de l'opérateur de mutation.

5 Résultats expérimentaux

Cette section est dédiée à la présentation des résultats expérimentaux du modèle dynamique. Les tests ont porté sur des instances de problèmes réels et fictifs. Les résultats du modèle dynamique sont comparés avec ceux du modèle basé sur le dimensionnement H2C. L'équation 13 représente la fonction de coût utilisée par le modèle classique.

$$F_{H2C} = \omega \times \left(\sum_{\substack{p=1 \\ p \neq k}}^{MA_i} C1(i,k,p) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N} \sum_{p=1}^{MA_j} C2(i,j,k,p) \right) + \sum_{\substack{S_i/S_j \\ i<j}} \sum_{\substack{k=MA_i \\ p=MA_j \\ k=1 \\ p=1}} \beta^{H2C}_{i,j,|f_{i,k}-f_{j,p}|} \qquad (13)$$

5.1 Instances fictives d'évolution de trafic pour le PAF

Les deux instances fictives sur lesquelles ont porté nos tests représentent 63 stations extraites d'un réseau opérationnel noté B. Le terme "fictif" se rapporte aux données de trafic. Les deux réseaux ont les caractéristiques suivantes : un spectre de 30 fréquences disponibles, environ 1100 contraintes et une évolution de trafic sur 6 périodes.

Périodes	Situation de trafic
Période 0	La charge de trafic sur chaque station S_i correspond à 20% de t_i^{H2C}.
Période 1	La charge de trafic sur chaque station S_i correspond à 50% de t_i^{H2C}.
Période 2	La charge de trafic sur chaque station S_i correspond à 100% de t_i^{H2C}.
Période 3	La charge de trafic sur chaque station S_i correspond à 110% de t_i^{H2C}.
Période 4	La charge de trafic sur chaque station S_i correspond à 60% de t_i^{H2C}.
Période 5	La charge de trafic sur chaque station S_i correspond à 20% de t_i^{H2C}.

TAB. 1 – Evolution du trafic pour le réseau *B_63_1*

Périodes	Situation de trafic
Période 0	Dans une partie du réseau, le trafic est à 110% de et à 20% dans l'autre.
Période 1	Dans une partie du réseau, le trafic est à 100% de et à 30% dans l'autre.
Période 2	Dans une partie du réseau, le trafic est à 70% de et à 50% dans l'autre.
Période 3	Dans une partie du réseau, le trafic est à 50% de et à 70% dans l'autre.
Période 4	Dans une partie du réseau, le trafic est à 30% de et à 100% dans l'autre.
Période 5	Dans une partie du réseau, le trafic est à 20% de et à 110% dans l'autre.

TAB. 2 – Evolution du trafic pour le réseau *B_63_2*

Chaque instance présente un scénario différent d'évolution du trafic. Le premier problème, *B_63_1*, présente des montées et des baisses synchrones et proportionnelles du trafic sur tout le réseau. Le deuxième problème, *B_63_2*, met l'accent sur la mobilité des clients et présente deux régions distinctes qui jouent le rôle de vases communicants, la montée du trafic sur une région est accompagnée par une baisse du trafic sur l'autre. Les tables 1 et 2 résument l'évolution du trafic pour les deux instances.

5.2 Instance réelle d'évolution de trafic pour le PAF

Le nouveau modèle proposé dans ce papier est aussi testé sur des données réelles de trafic. Le réseau de test est noté D. Il est caractérisé par : 639 stations, environ 30000 contraintes, un spectre de 62 fréquences et des données de trafic relevées sur 13 heures (7 :00H-20 :00H) soient 13 périodes.

5.3 Critères de performances

La comparaison entre les modélisations dynamique et classique du trafic est faite sur la base de la quantité de trafic brouillé. L'unité de mesure du trafic est l'Erlang. Un Erlang correspond à une heure de communication. Nous utilisons l'évaluateur de qualité de PARCELL(Outil d'ingénierie propriété de la société ORANGE) pour mesurer la quantité de trafic brouillé généré par un plan de fréquences donné. Plus précisément, l'évaluateur de qualité permet à partir des paramètres des stations, des données géographiques, des données de trafic et du plan de fréquences d'estimer le taux d'effacement des trames (FER pour Frame Erasure Rate) au cours d'une communication. Une communication sera considérée brouillée (mauvaise ou impossible) si ce taux dépasse un certain seuil. Selon la qualité radio requise, nous distinguerons trois valeurs de seuil : 2%, 4% et 7% de FER.

5.4 Résultats expérimentaux

Les tables 3, 4 et 5 résument les résultats des tests sur les trois instances de problème. Pour chaque instance deux plans de fréquences sont générés. Le premier est produit sur la base de la modélisation classique du trafic (équation 13). Le deuxième est construit suivant la modélisation dynamique du trafic (équation 8). Les performances de chacun des deux plans en terme de trafic brouillé sont estimées pour chaque période, chaque ligne indique le nombre d'Erlang perdus sur la période pour les deux méthodes. Nous présentons aussi en bas de tableau, le trafic brouillé total qui correspond à la somme de trafic perdu pour l'ensemble des périodes (critère de capacité globale en trafic), le gain en Erlang entre les deux méthodes, et le nombre d'Erlang perdus pour la période la plus dégradée (critère de robustesse). Ces informations sont données pour chacun des trois seuils de qualité en FER.

Les tests ont été effectués en maintenant les mêmes paramètres pour l'heuristique de recherche : 100000 itérations, pour une population de 10 solutions.

Les trois tables affichent une nette amélioration de la qualité des plans de fréquences fournis par le modèle dynamique en terme de capacité globale en trafic et de robustesse. Ce gain important est observable pour les différents scénarios d'évolution du trafic.

La table 6 affiche les correspondances entre les deux plans de fréquences analysés dans la table 5 pour les critères issus des deux modélisations de trafic (F_{H2C} pour la modélisation classique ; F_1 et F_2 pour la modélisation dynamique). Nous remarquons sur le test que nous avons effectué que la solution obtenue par la modélisation classique est bien naturellement meilleure suivant le critère F_{H2C} mais reste plus mauvaise sur les

		trafic perdu à 2% FER (Erl)		trafic perdu à 4% FER (Erl)		trafic perdu à 7% FER (Erl)	
Périodes	Trafic	Classique H2C	Dynamique	Classique H2C	Dynamique	Classique H2C	Dynamique
Période 0	116.85	1.43	1.36	0.71	0.67	0.39	0.35
Période 1	292.13	5.14	4.46	2.57	2.32	1.36	1.25
Période 2	584.27	17.63	15.36	9.02	8.27	4.87	4.37
Période 3	642.70	20.87	18.43	11.29	9.98	5.84	5.24
Période 4	350.56	6.96	6.16	3.54	3.11	1.81	1.87
Période 5	116.85	1.43	1.36	0.71	0.67	0.39	0.35
Total		53.46	47.13	27.84	25.02	14.66	13.43
Gain		6.33		2.82		1.23	
Maximum		20.87	18.43	11.29	9.98	5.84	5.24

TAB. 3 – Résultats des tests pour le problème *B_63_1*

		trafic perdu à 2% FER (Erl)		trafic perdu à 4% FER (Erl)		trafic perdu à 7% FER (Erl)	
Périodes	Trafic	Classique H2C	Dynamique	Classique H2C	Dynamique	Classique H2C	Dynamique
Période 0	329.29	7.69	7.56	4.16	4.40	2.33	2.32
Période 1	340.51	7.63	7.36	4.04	4.25	2.21	2.26
Période 2	339.27	7.03	6.35	3.47	3.45	1.86	1.84
Période 3	361.64	7.50	6.13	3.50	3.24	1.82	1.80
Période 4	418.86	9.39	7.76	4.65	4.13	2.43	2.35
Période 5	430.06	9.99	8.4	5.34	4.21	2.80	2.40
Total		49.23	43.56	25.16	23.68	13.45	12.97
Gain		5.67		1.48		0.48	
Maximum		9.99	7.76	5.34	4.25	2.80	2.54

TAB. 4 – Résultats des tests pour le problème *B_63_2*

		trafic perdu à 2% FER (Erl)		trafic perdu à 4% FER (Erl)		trafic perdu à 7% FER) (Erl)	
Périodes	Trafic	Classique H2C	Dynamique	Classique H2C	Dynamique	Classique H2C	Dynamique
7 :00-8 :00	504.11	7.41	6.38	4.42	3.92	2.46	2.21
8 :00-9 :00	1170.02	21.50	19.62	12.98	11.53	7.26	6.43
9 :00-10 :00	1747.71	37.90	34.79	22.98	20.63	13.22	11.72
10 :00-11 :00	2017.26	45.09	41.61	26.94	24.12	15.40	13.29
11 :00-12 :00	2177.03	50.58	45.82	29.96	26.23	17.08	14.48
12 :00-13 :00	2104.73	46.58	43.50	27.95	25.17	16.54	13.49
13 :00-14 :00	1863.42	38.66	37.06	23.60	21.14	13.92	11.57
14 :00-15 :00	1953.59	43.01	38.42	25.82	22.02	15.25	12.10
15 :00-16 :00	1984.12	45.44	40.66	27.48	23.37	16.03	12.70
16 :00-17 :00	2174.47	51.24	47.03	30.90	27.25	18.31	14.99
17 :00-18 :00	2521.20	60.53	57.10	36.20	33.19	20.97	18.08
18 :00-19 :00	2792.91	69.73	67.55	42.00	39.17	24.24	21.12
19 :00-20 :00	2743.83	61.65	61.00	36.88	34.77	21.35	18.88
Total		579.32	540.54	348.10	312.51	202.03	171.06
Gain		38.78		35.59		30.97	
Maximum		69.73	67.55	42.00	39.17	24.24	21.12

TAB. 5 – Résultats des tests pour le problème *D_639_1* deux autres critères F_1 et F_2. Ceci montre que le dimensionnement H2C ne permet pas de constituer des plans de fréquences performants à la fois localement, sur une période donnée pour une distribution spatiale réelle du trafic, et globalement pour une distribution temporelle du trafic sur un ensemble de périodes. La conséquence est une perte quotidienne du trafic écoulé sur l'ensemble du réseau testé du fait de l'absence de prise en compte de l'évolution dynamique du trafic.

Solution classique	Solution dynamique
F_1 : 970932,916	F_1 : 936139,360
F_2 : 115887,751	F_2 : 115588,483
F_{H2C} : 128749,617	F_{H2C} : 130377,944

TAB. 6 – Adéquation des deux plans de fréquences générés pour *D_639_1*

6 Conclusion et futurs travaux

Nous avons proposé dans cet article une modélisation de trafic plus réaliste pour le problème d'affectation de fréquences. Les variations spatiales et temporelles du trafic sont prises en compte afin d'améliorer la capacité en trafic et la robustesse du plan de fréquence. Nous avons aussi présenté une hybridation originale des Algorithmes Génétiques et de la Recherche Tabou pour la résolution de ce problème. La comparaison entre le modèle dynamique du trafic et le modèle classique basé sur le dimensionnement H2C a montré une nette amélioration de la qualité des plans de fréquences générés en terme de trafic total écoulé et en terme de robustesse.

De nouveaux critères de robustesse sont à étudier surtout en ce qui concerne la répartition spatiale du brouillage. Le modèle pourrait aussi être enrichi pour permettre un traitement privilégié de certaines périodes prenant en compte la nature des communications selon la période de la journée.

Remerciements

Nous tenons à remercier les rapporteurs de l'article pour leurs remarques et commentaires. Nous remercions également Denis Renaud du laboratoire OIP de France Télécom R&D pour son aide et ses conseils.

Références

[1] A. Baier, K. Bandelow. *Traffic engineering and realistic network capacity in cellular radio networks. with inhomogeneous traffic distribution*, IEEE VTC, Vol. 46 : 780–784, 1997.

[2] P. Darwood, I. Oppermann, S. Jakas, W. Linton. *Mobile Network Traffic Forecasting*, IEEE VTC Vol. 50, 2000.

[3] A. Eisenblatter, M. Grotschel, A. Koster. *Frequency planning and ramifications of coloring*, ZIB-Repport 00–47, December 2000.

[4] M. Fischetti, C. Lepschy, G. Minerva, G. Romanin-Jacur, E. Toto. *Frequency assignment in mobile radio systems using branch-and-cut techniques*, European Journal of Operational Research Vol. 123 : 241–255, 2000.

[5] A. Gamst. *A resource allocation technique for FDMA systems*, Alfa Frequenza Vol. 57(2) : 89–96, 1988.

[6] W.K. Hale. *Frequency assignment : theory and application*, Proceedings of IEEE Vol. 68(12) : 1498-1573, 1980.

[7] J.K. Hao, R. Dorne, P. Galinier. *Tabu search for frequency assignment in mobile radio networks*, Journal of Heuristics Vol. 4 : 47-62, 1998.

[8] M. Hellebrabdt, F. Lambrecht, R. Mathar, T. Niessen, R. Starke. *Frequency allocation and linear programming*, IEEE VTC 48 : 617-621, 1999.

[9] S. Hurley, R.M. Whitaker, D.H. Smith. *Channel assignment in Cellular Networks without Channel Separation Constraints*, IEEE VTC Vol. 50 : 1714-1718, 2000.

[10] F. Jaimes-Romero, D. Munoz-Rodreguez. *Channel assignment in cellular systems using genetic algorithms*, IEEE VTC Vol. 45 : 741-745, 1996.

[11] W. Lee. *Mobile Communications Design Fundamentals*, Wiley Series in Telecommunications, 1992.

[12] V. Mac Donald.
Advanced Mobile Phone Service : The Cellular Concept, The BELL System Technical Journal : 15-41, January 1979.

[13] D. Renaud, A. Caminada. *Evolutionary methods and operators for frequency assignment Problem*, SpeedUp Journal Vol. 11(2) : 27-32, 1997.