POLYPUBLIE

# Resyntonisation multipériode d'un réseau de téléphonie cellulaire

Vincent Barbéra

**Document en libre accès dans PolyPublie**
**Open Access document in PolyPublie**

| | |
|---|---|
| **Date** | 1998 |
| **Type** | Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis<br>Mémoire de maîtrise/Master's thesis |
| **URL de PolyPublie**<br>**PolyPublie URL** | https://publications.polymtl.ca/6755/ |
| **Conditions d'utilisation**<br>**Terms of use** | © Tous droits réservés / All rights reserved |
| **Référence**<br>**Citation** | Barbéra, V. (1998). Resyntonisation multipériode d'un réseau de téléphonie cellulaire [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/6755/ |

**Détails de la thèse**
**Thesis details**

| | |
|---|---|
| **Directeurs de recherche**<br>**Advisors** | Brigitte Jaumard |
| **Programme**<br>**Program** | Non spécifié |

**Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal**
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal
https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

# RESYNTONISATION MULTIPÉRIODE D'UN RÉSEAU DE TÉLÉPHONIE CELLULAIRE

VINCENT BARBÉRA
DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES
ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES)
MAI 1998

© Vincent Barbéra, 1998.

National Library of Canada
Acquisitions and Bibliographic Services
395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale du Canada
Acquisitions et services bibliographiques
395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

*Your file Votre référence*

*Our file Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-37428-9

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

# RESYNTONISATION MULTIPÉRIODE D'UN RÉSEAU DE TÉLÉPHONIE CELLULAIRE

présenté par : BARBÉRA Vincent

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. HACCOUN David, Ph.D., président

Mme JAUMARD Brigitte, T.Doct., T.Hab., membre et directrice de recherche

Mme MARCOTTE Odile, Ph.D., membre

A Hélène Paris, ma grand-mère.

# REMERCIEMENTS

Je remercie Brigitte Jaumard pour m'avoir accueilli au GERAD et pour avoir accepté de m'encadrer. Merci aux Professeurs David Haccoun et Odile Marcotte d'avoir accepté d'être membre de mon jury et d'avoir enrichi ce mémoire par leurs commentaires.

Mes plus vifs remerciements à BELL MOBILITÉ CELLULAIRE et plus particulièrement à MM. Alain Fortier, Sylvain Légaré et Serge Rivard pour la confiance qu'ils m'ont accordée lors de nos échanges et rencontres et pour avoir financé cette recherche.

Un grand merci à Laurent Homeyer et à toutes les personnes du GERAD et de l'École Polytechnique avec qui j'ai travaillé, directement ou indirectement, et qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

# RÉSUMÉ

En raison de la croissance rapide du nombre d'usagers, les réseaux de téléphonie cellulaire doivent être remis à jour fréquement. Dans l'objectif de réduire les coûts, l'affectation de canaux n'est généralement pas complétement redéfinie à chaque mise à jour. Des modifications uniquement locales sont faites dans le but d'avoir une affectation de canaux acceptable. Après plusieurs mises à jour locales, la qualité de l'affectation est souvent loin d'être optimale. Il est alors nécessaire de procéder à une resyntonisation complète du réseau. Lorsque la taille du réseau dépasse le nombre de cellules resyntonisables en une fois, il n'est plus possible d'implanter une nouvelle solution d'affectation en une seule resyntonisation. La question est alors de savoir comment passer d'une solution courante à une solution cible en plusieurs étapes.

Dans la présente étude, nous considérons l'objectif de minimiser les interférences. Nous traitons du cas d'affectation fixe de canaux sans patron de réutilisation uniforme. Nous proposons une heuristique gloutonne et une méthode de recherche tabou pour une resyntonisation multipériode. Toutes les contraintes du problème d'affectation de canaux sont prises en compte (cocanaux, canaux adjacents, espacement minimum entre canaux) ainsi que les contraintes de resyntonisation telles que le nombre d'étapes et la limite sur le nombre maximum de cellules qui peuvent être resyntonisées par étape. Les contraintes d'interférences cocanaux et de canaux adjacents sont exprimées par des matrices de compatibilité produites avec une discrétisation du ratio signal sur interférence (SIR). Des résultats numériques sont présentés sur des données provenant de BELL MOBILITÉ CELLULAIRE pour un réseau urbain de 359 cellules.

# ABSTRACT

Due to the rapid increase of the number of users, mobile cellular networks must be updated very often and channel assignments must be modified accordingly. In order to reduce the costs, the channel assignment is usually not completely redefined at each updating, and only local modifications are made in order to get an acceptable channel assignment. However, after several updatings, the quality of the channel assignment may be far from optimal, and it is necessary to perform a complete retuning of the network. Size of urban networks does not allow retuning in one step. The question is then how to go from a current channel assignment to a target one?

In the current study, we considered the realistic objective of minimizing the interference level since it is nowadays often difficult to find a complete interference free channel allocation for urban networks. We assume here a fixed channel allocation scheme with a nonuniform pattern. We propose a greedy heuristic and a Tabu Search method to retune a network in a given number of steps. All constraints of the channel assignment problem are taken into account (co-channel, adjacent channel, minimum channel spacing on antennas), as well as retuning constraints such as the number of steps and limits on the maximum number of cells which can be retuned at each step. Co-channel and adjacent channel constraints are expressed through compatibility matrices produced with a discretization of the signal-to-interference ratio (SIR). Numerical results are presented on BELL MOBILITÉ CELLULAIRE data for a network of 359 cells.

# TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE . . . . . iv

REMERCIEMENTS . . . . . v

RÉSUMÉ . . . . . vi

ABSTRACT . . . . . vii

TABLE DES MATIÈRES . . . . . viii

LISTE DES TABLEAUX . . . . . xiv

LISTE DES FIGURES . . . . . xv

LISTE DES SYMBOLES . . . . . xix

INTRODUCTION . . . . . 1

CHAPITRE 1 Principes élémentaires de la téléphonie cellulaire . . 3

1.1 Concepts . . . . . 3

1.1.1 Fonctionnement d'un réseau . . . . . 4

1.1.2 Gestion du spectre de fréquences . . . . . 6

1.1.3 Propagation du signal . . . . . 9

1.1.4 Interférences . . . . . 11

1.2 Techniques opérationnelles . . . . . 14

1.2.1 Supervision des appels . . . . . 14

1.2.2 Augmentation de la capacité du réseau . . . . . 15

1.2.3 Réduction des interférences . . . . . 17

1.2.4 La relève ou "handoff" . . . . . 19

**CHAPITRE 2 Problématiques . . . . . 20**

2.1 Contexte . . . . . 20

2.2 Le problème d'affectation de blocs de canaux . . . . . 22

2.2.1 Nombre de canaux requis par cellule . . . . . 22

2.2.2 Définition des blocs de canaux . . . . . 23

2.2.3 Interférence cocanal . . . . . 23

2.2.4 Interférence de canaux adjacents . . . . . 26

2.2.5 Nombre d'antennes . . . . . 28

2.2.6 Espacement minimum entre canaux . . . . . 29

2.2.7 Allocation de canaux du spectre étendu . . . . . 29

2.2.8 Évaluation d'une solution . . . . . 30

2.2.9 Récapitulation . . . . . 33

2.3 Les modèles de la littérature . . . . . 33

2.4 Problématique de la resyntonisation multipériode . . . . . 36

2.5 Description du modèle . . . . . 38

2.5.1 Notations . . . . . 38

2.5.2 Contraintes . . . . . 41

2.5.3 Évaluation de la solution et fonction objectif . . . . . 43

**CHAPITRE 3 La resyntonisation multipériode: méthodes . . . . . 49**

3.1 Schéma de la résolution . . . . . 49

3.2 Une heuristique gloutonne pour une solution initiale . . . . . 50

3.3 Amélioration de la solution initiale par une heuristique de descente et de remontée . . . . . 54

3.3.1 Schéma de l'heuristique . . . . . 54

3.3.2 Principe de la recherche tabou . . . . . 55

3.3.3 Phase 1 : recherche tabou . . . . . 56

3.3.3.1 Recherche du meilleur candidat pour chaque bloc de la solution . . . . . 56

3.3.3.2 Sélection du meilleur mouvement . . . . . 59

3.3.3.3 Renforcement des contraintes de resyntonisation . . . 60

3.3.3.4 Algorithme TRANSIT1 . . . . . 61

3.3.4 Phase 2 : diversification de la recherche . . . . . 64

3.3.5 TRANSIT: l'algorithme de résolution . . . . . 67

**CHAPITRE 4 Résultats . . . . . 68**

4.1 Implantation . . . . . 68

4.2 Construction des matrices $M^{co}$ et $M^{adj}$ . . . . . 69

4.3 Résultats numériques . . . . . 77

4.3.1 Validation de TRANSIT . . . . . 78

4.3.2 Résultats pour les matrices de compatibilité filtrées $M^{co}_{filtrée}$ et $M^{adj}_{filtrée}$ . . . . . 81

4.3.2.1 Résultats de l'heuristique gloutonne TRANSIT0 . . . 81

4.3.2.2 Résultats de TRANSIT . . . . . 85

4.3.2.3 Géographie des cellules resyntonisées . . . . . 96

4.3.3 Résultats pour les matrices de compatibilité non filtrées $M^{co}$ et $M^{adj}$ . . . . . 97

4.3.3.1 Résultats de l'heuristique gloutonne . . . . . 98

4.3.3.2 Résultats de TRANSIT . . . . . 101

4.3.3.3 Géographie des cellules resyntonisées . . . . . 104

**CHAPITRE 5 Analyses et Perspectives . . . . . 109**

5.1 Diversification . . . . . 109

5.2 Perspectives . . . . . 110

CONCLUSIONS . . . . . 113

BIBLIOGRAPHIE . . . . . 114

# LISTE DES TABLEAUX

1.1 Numérotation des canaux . . . . . 7

1.2 Table des canaux disponibles . . . . . 8

2.1 Exemple d'évaluation d'un réseau de deux cellules . . . . . 32

2.2 Comparaison de deux solutions de resyntonisation $\hat{S}$ et $S$ . . . . . 44

2.3 Comparaison de deux solutions de resyntonisation $\hat{S}$ et $\overline{S}$ . . . . . 46

3.1 Variations d'interférence des blocs candidats . . . . . 59

4.1 Pénalités pour calculer $r(S)$ . . . . . 78

# LISTE DES FIGURES

1.1 Structure d'un réseau cellulaire . . . . . 5

1.2 Configuration $N = 7$ . . . . . 9

1.3 Affectation du SAT . . . . . 15

1.4 Division de cellules . . . . . 16

1.5 Interférences pour $N = 7/120^o$ . . . . . 16

1.6 Sectorisation et affectation des colonnes de canaux pour $N = 7/120^0$ . 17

1.7 Partition d'une cellule . . . . . 18

2.1 Exemple d'évaluation d'un réseau de deux cellules . . . . . 31

2.2 Idée de la resyntonisation . . . . . 37

2.3 États des cellules pendant une resyntonisation . . . . . 40

2.4 Le problème d'optimisation de la resyntonisation multipériode . . . . 48

3.1 Heuristique gloutonne pour une période $p$: étape 1 . . . . . 51

3.2 Heuristique gloutonne pour une période $p$: étape 1 (critère géographique) 52

3.3 Heuristique gloutonne pour une période $p$: étape 2 . . . . . 53

3.4 Heuristique gloutonne: TRANSIT0 . . . . . 54

3.5 Recherche du meilleur candidat pour chaque bloc du réseau . . . . . 58

3.6 Phase 1 tabou : réduire les interférences cocanaux et de canaux adjacents 62

3.7 Procédure d'échange de deux blocs . . . . . 63

3.8 Phase 2 : diversification . . . . . 66

3.9 TRANSIT : l'algorithme de résolution . . . . . 67

4.1 Densité de la matrice $M^{co}$ . . . . . 74

4.2 Densité de la matrice $M^{adj}$ . . . . . 75

4.3 Densité de la matrice $M^{co}_{filtrée}$ . . . . . 75

4.4 Densité de la matrice $M^{adj}_{filtrée}$ . . . . . 76

4.5 Comparaison de TRANSIT et d'ECLIPSE . . . . . 80

4.6 Données pour une répartition quasi-uniforme de $limitP(p)$ et $limitT(p)$ 81

4.7 Résultats pour une répartition quasi-uniforme de $limitP(p)$ et $limitT(p)$ 82

4.8 Données pour une répartition non uniforme de $limitP(p)$ et $limitT(p)$ 83

4.9 Résultats pour une répartition non-uniforme de $limitP(p)$ et $limitT(p)$ 84

4.10 Qualité $r(\mathcal{S})$ en fonction de l'itération . . . . . 87

4.11 TRANSIT : résultats pour $minTabuIter = 10$ et $maxTabuIter = 25$ . 88

4.12 TRANSIT : résultats pour $minTabuIter = 25$ et $maxTabuIter = 50$ . 89

4.13 TRANSIT : résultats pour $minTabuIter = 35$ et $maxTabuIter = 70$ . 90

4.14 TRANSIT : résultats pour $minTabuIter = 50$ et $maxTabuIter = 100$ . 91

4.15 Violations des contraintes de spectre étendu en fonction de l'itération 93

4.16 Violations des contraintes d'espacement en fonction de l'itération . . 95

4.17 Paramètres $limitP(p)$ et $limitT(p)$ (matrices $M^{co}$ et $M^{adj}$) . . . . . 98

4.18 Résultats de TRANSIT0_GÉOGRAPHIQUE (matrices $M^{co}$ et $M^{adj}$) . . 99

4.19 Résultats de TRANSIT0 (matrices $M^{co}$ et $M^{adj}$) . . . . . 100

4.20 TRANSIT : résultats sans critère géographique . . . . . 102

4.21 TRANSIT : résultats avec critère géographique . . . . . 103

4.22 Extrait du réseau : cellules $\mathcal{C}^P(1)$ (sans critère géographique) . . . . . 105

4.23 Extrait du réseau : cellules $\mathcal{C}^T(1)$ (sans critère géographique) . . . . . 106

4.24 Extrait du réseau : cellules $\mathcal{C}^P(1)$ (avec critère géographique) . . . . . 107

4.25 Extrait du réseau : cellules $\mathcal{C}^T(1)$ (avec critère géographique) . . . . . 108

# LISTE DES SYMBOLES

$B_k^{i,p}$ : bloc $k$ de la cellule $C_i$ à la période $p$.

$C_i$ : une cellule du réseau $(i = 1, \ldots, n)$.

$\mathcal{C}^I(p)$ : ensemble des cellules à leur affectation initiale à la période $p$.

$\mathcal{C}^P(p)$ : ensemble des cellules à leur affectation cible à la période $p$.

$\mathcal{C}^T(p)$ : ensemble des cellules à une affectation temporaire à la période $p$.

$d_i$ : distance, en nombre de canaux, à respecter entre les canaux d'une même antenne de la cellule $C_i$.

$\delta_{k \leftarrow \ell}^{i,p}$ : variation de qualité si nous remplaçons $B_k^{i,p}$ par $B_\ell^{i,p}$.

$\Delta_{k \leftarrow \ell}^{i,p}$ : variation de la qualité du réseau sur les périodes $q = p, p+1, \ldots, \overline{p}$ après remplaçement de $B_k^{i,p}$ par $B_\ell^{i,p}$ dans la cellule $C_i$ pour ces périodes.

$f_k$ : canal $k$ de la table des canaux.

$\mathcal{F}$ : ensemble des blocs de canaux disponibles.

$\mathcal{F}_{candidats}(S_i^p)$ : ensemble des blocs candidats pour être affectés à la cellule $C_i^p$.

$K$ : cardinal de l'ensemble $\mathcal{F}$ des blocs disponibles, c'est-à-dire, $K = |\mathcal{F}|$.

$limit(p)$ : limite sur le nombre de cellules à resyntoniser à la période $p$.

$limitP(p)$ : limite sur le nombre de cellules à resyntoniser à leur affectation cible à la période $p$.

$limitT(p)$ : limite sur le nombre de cellules à syntoniser à une affectation temporaire à la période $p$.

$L(\mathbb{S})(m)$ : vecteur des interférences de niveau $m$ pour une solution de resyntonisation multipériodes $\mathbb{S}$ (vecteur de dimension $P-1$).

$m_{ij}^{co}$ : élément générique de la matrice de compatibilité cocanal.

$m_{ij}^{adj}$ : élément générique de la matrice de compatibilité d'adjacence.

$m$ : niveau d'interférence ($1 \leq m \leq 10$).

$\overline{m}^{co}$ : niveau d'interférence seuil au-dessus duquel les interférences cocanaux sont inacceptables.

$\overline{m}^{adj}$ : niveau d'interférence seuil au-dessus duquel les interférences de canaux adjacents sont inacceptables.

$m^{max}(S)$ : niveau d'interférence maximum de la solution $S$.

$M^{co}$ : matrice de compatibilité cocanal.

$M^{adj}$ : matrice de compatibilité d'adjacence.

$n$ : taille du réseau (nombre de cellules).

$N$ : facteur de réutilisation.

$p$ : une période intermédiaire de la resyntonisation ($p = 1, \ldots, P-1$).

$q$ : une période intermédiaire de la resyntonisation ($q = 1, \ldots, P-1$).

$P$ : nombre d'étapes pour la resyntonisation multipériodes.

$r(S)$ : qualité de la solution $S$ (calculer à partir du vecteur $z(S)$ ; $r(S) \in \mathbb{R}$).

$\mathbb{R}$ : ensemble des nombres réels.

$SIR_{ij}$ : rapport du signal de la cellule $C_i$ sur le signal interférent provenant de la cellule $C_j$ (SIR : Signal-to-Interference Ratio).

$\overline{SIR}^{adj}$ : borne supérieure du ratio $SIR_{ij}$ définissant des zones de couvertures mutuellement indépendantes dans le cas de l'interférence de canaux adjacents.

$\overline{SIR}^{co}$ : borne supérieure du ratio $SIR_{ij}$ définissant des zones de couvertures indépendantes dans le cas de l'interférence cocanal.

$S$ : affectation de blocs de canaux pour l'ensemble du réseau.

$S^p$ : affectation de blocs de canaux pour le réseau à la période intermédiaire $p$.

$S_i$ : affectation de blocs de canaux pour la cellule $C_i$, c'est-à-dire, la liste des blocs qui lui sont affectés.

$S_i^p$ : affectation de blocs de canaux pour la cellule $C_i$ à la période $p$.

$\mathcal{S}$ : une solution de resyntonisation multipériodes.

$z(B_k^i)$ : vecteur interférence du bloc $B_k$ de la cellule $C_i$.

$z(S_i^p)$ : vecteur interférence der la cellule $C_i$ à la période $p$.

$z(S)$ : vecteur interférence de la solution $S$.

# INTRODUCTION

En raison de la croissance rapide du nombre d'usagers, les réseaux de téléphonie cellulaire doivent être remis à jour fréquemment. Dans l'objectif de réduire les coûts, l'affectation de canaux n'est généralement pas complétement redéfinie à chaque mise à jour. Des modifications uniquement locales sont faites dans le but d'avoir une affectation de canaux acceptable. Après plusieurs mises à jour locales, la qualité de l'affectation est souvent loin d'être optimale. Il est alors nécessaire de procéder à une resyntonisation complète du réseau. Lorsque la taille du réseau dépasse le nombre de cellules resyntonisables en une fois, il n'est plus possible d'implanter une nouvelle solution d'affectation en une seule resyntonisation. En effet, les contraintes techniques, économiques et de personel n'autorisent la resyntonisation que d'une centaine de cellules à la fois. Cette resyntonisation doit alors se faire en plusieurs étapes. La question est donc maintenant de savoir comment passer d'une solution courante à une solution cible en plusieurs étapes. Une des difficultés est due au fait que la resyntonisation des cellules ne peut être faite que pendant les fins de semaines quand le nombre d'usagers est faible. Entre deux étapes, c'est-à-dire entre deux fins de semaines, la qualité doit rester acceptable. Pour chaque étape, il faut alors choisir les cellules à resyntoniser à leur affectation cible parmi celles qui ne le sont pas encore. Si on veut assurer une qualité acceptable du réseau, ces choix doivent être faits judicieusement et dans l'objectif de minimiser les interférences.

Dans la présente étude, nous avons considéré l'objectif réaliste de minimiser les interférences: il est en effet maintenant difficile de trouver une affectation de

canaux sans interférences pour les grands réseaux urbains. Nous proposons une heuristique gloutonne et une méthode de recherche tabou pour resyntoniser un réseau en un nombre donné d'étapes. Toutes les contraintes du problème d'affectation de canaux sont prises en comptes (contraintes cocanaux, de canaux adjacents et d'espacement minimum sur les antennes) ainsi que les contraintes d'une resyntonisation multipériode qui sont le nombre d'étapes et la limite sur le nombre de cellules à resyntoniser à chaque étape.

Le premier chapitre est un rappel des principes élémentaires de la téléphonie cellulaire. Il permet de mieux replacer l'étude dans son contexte. Le chapitre deux décrit le problème de la resyntonisation multipériode, qui peut être considéré comme une extension du problème d'affectation de canaux, et le modèle mathématique utilisé. La méthode de résolution du problème de resyntonisation multipériode est l'objet du chapitre trois. Les résultats numériques sont présentés au chapitre quatre sur des données de BELL MOBILITÉ CELLULAIRE. Le chapitre cinq est une analyse des méthodes et une description des perspectives. Enfin, les conclusions nous donnent une synthèse des contributions de ce mémoire.

# CHAPITRE 1

# Principes élémentaires de la téléphonie cellulaire

## 1.1 Concepts

Les concepts présentés ici décrivent exclusivement les systèmes cellulaires de type FDMA (Frequency Division Multiple Access) comme le standard AMPS (Advanced Mobile Phone Service) qui couvre l'Amérique du Nord et qui est utilisé par BELL MOBILITÉ CELLULAIRE.

Nous rappelons ces principes dans le but de donner un aperçu de la structure et du fonctionnement d'un réseau cellulaire pour mieux replacer l'étude dans son contexte. Pour avoir des détails et informations plus approfondies, le lecteur peut se referer à Lee [15], Rappaport [18] ou à tout autre ouvrage de base sur la question.

### 1.1.1 Fonctionnement d'un réseau

Les premiers systèmes de téléphonie mobile étaient composés d'une unique station émettrice couvrant une zone aussi grande que possible (*Mobile Telephone Service* - St Louis, 1946, *Improved Mobile Telephone Service* - 1965 et *New york City Mobile Phone Service* - 1979). Etant donné les limitations du spectre radio, ces systèmes ne satisfaisaient pas la demande. La technologie cellulaire permet d'augmenter la capacité des réseaux. Elle est basée sur le concept de concurrence. Le territoire à couvrir est divisé en zones, appelées cellules. La concurrence est alors créée par la réutilisation des canaux dans différentes cellules. Les puissances de transmission sont plus faibles que dans le cas des systèmes non-cellulaires.

Chacune des cellules est conçue en fonction de la zone qu'elle dessert, de la qualité de service exigée et de la capacité nécessaire pour satisfaire la demande. Son diamètre peut varier de plusieurs kilomètres en milieu rural à quelques centaines de mètres en zone urbaine où la densité d'usagers est plus importante. Chaque cellule ne contient qu'un sous-ensemble des canaux disponibles. Le même ensemble de canaux est alors affecté à deux cellules qui sont géographiquement "assez" distantes l'une de l'autre pour que les interférences soient très faibles.

Un réseau cellulaire est composé de sites cellulaires, d'unités mobiles (les usagers) et de commutateurs MTSO ("Mobile Telephone Switching Office") comme décrit par la figure 1.1.

Le site cellulaire est l'interface entre le commutateur MTSO et les unités mobiles. Le MTSO est l'élément coordonateur du système : il le contrôle et permet aux

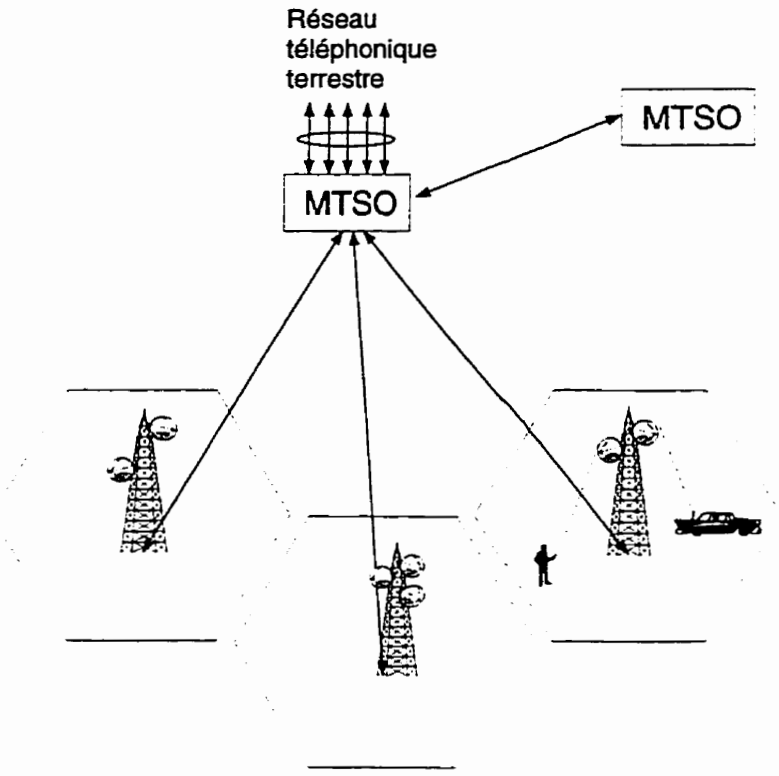



Figure 1.1 – *Structure d'un réseau cellulaire*

usagers de bénéficier des mêmes services que dans le réseau téléphonique terrestre. Lors de l'établissement d'un appel, c'est lui qui localise l'unité mobile à travers les sites et qui lui affecte un canal radio libre.

Nous appellons cellule une zone géographique desservie de manière unique par une station de base pourvu d'une ou de plusieurs antennes. Nous avons généralement de une à trois antennes par cellule.

Remarquons qu'une cellule est représentée par un hexagone mais qu'en réalité la zone de couverture d'un site est très irrégulière et affectée par divers facteurs tels que la topologie du terrain, les constructions ou les conditions atmosphériques.

### 1.1.2 Gestion du spectre de fréquences

La bande du spectre électromagnétique dédiée aux communications radio-mobiles est situé dans les $800MHz$ pour le système AMPS. Elle est divisée en deux pour pouvoir être exploitée par deux compagnies différentes selon les principes de la commission fédérale américaine sur les communications (FCC). Au Québec, ce sont BELL MOBILITÉ CELLULAIRE et *CANTEL* qui disposent chacune de 416 canaux. Le tableau 1.2 nous donne les canaux disponibles pour BELL MOBILITÉ CELLULAIRE.

Il y a 21 canaux dédiés à la supervision des communications (canaux de contrôle : canaux 335 à 355 pour BELL MOBILITÉ CELLULAIRE) et les 395 restants sont utilisés pour la transmission de la voix (canaux 356 à 666 et 718 à 799 pour BELL MOBILITÉ CELLULAIRE). Un canal est composé de deux bandes de fréquences de $30KHz$ chacune :

- une bande comprise entre $824MHz$ et $849MHz$ pour la communication du mobile vers le site (voix montante) et
- une bande comprise entre $869MHz$ et $894MHz$ pour la communication du site vers le mobile (voix descendante).

La correspondance entre le numéro d'un canal $f$ et les bandes de fréquences associées est donnée par le tableau 1.1.

Tableau 1.1 – *Numérotation des canaux*

| Transmetteur | Numéro de canal | Fréquence centrale ($MHz$) |
|---|---|---|
| Mobile | $1 < f < 866$ | $825 + 0,03f$ |
| | $990 < f < 1023$ | $825 + 0,03(f - 1023)$ |
| Site | $1 < f < 866$ | $870 + 0,03f$ |
| | $990 < f < 1023$ | $870 + 0,03(f - 1023)$ |

Tableau 1.2 – *Table des canaux disponibles*

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | | 335 | 336 | 337 | 338 | 339 | 340 | 341 | 342 | 343 | 344 | 345 | 346 | 347 | 348 | 349 | 350 | 351 | 352 | 353 | 354 | A |
| B | 355 | 356 | 357 | 358 | 359 | 360 | 361 | 362 | 363 | 364 | 365 | 366 | 367 | 368 | 369 | 370 | 371 | 372 | 373 | 374 | 375 | B |
| C | 376 | 377 | 378 | 379 | 380 | 381 | 382 | 383 | 384 | 385 | 386 | 387 | 388 | 389 | 390 | 391 | 392 | 393 | 394 | 395 | 396 | C |
| D | 397 | 398 | 399 | 400 | 401 | 402 | 403 | 404 | 405 | 406 | 407 | 408 | 409 | 410 | 411 | 412 | 413 | 414 | 415 | 416 | 417 | D |
| E | 418 | 419 | 420 | 421 | 422 | 423 | 424 | 425 | 426 | 427 | 428 | 429 | 430 | 431 | 432 | 433 | 434 | 435 | 436 | 437 | 438 | E |
| F | 439 | 440 | 441 | 442 | 443 | 444 | 445 | 446 | 447 | 448 | 449 | 450 | 451 | 452 | 453 | 454 | 455 | 456 | 457 | 458 | 459 | F |
| G | 460 | 461 | 462 | 463 | 464 | 465 | 466 | 467 | 468 | 469 | 470 | 471 | 472 | 473 | 474 | 475 | 476 | 477 | 478 | 479 | 480 | G |
| H | 481 | 482 | 483 | 484 | 485 | 486 | 487 | 488 | 489 | 490 | 491 | 492 | 493 | 494 | 495 | 496 | 497 | 498 | 499 | 500 | 501 | H |
| I | 502 | 503 | 504 | 505 | 506 | 507 | 508 | 509 | 510 | 511 | 512 | 513 | 514 | 515 | 516 | 517 | 518 | 519 | 520 | 521 | 522 | I |
| J | 523 | 524 | 525 | 526 | 527 | 528 | 529 | 530 | 531 | 532 | 533 | 534 | 535 | 536 | 537 | 538 | 539 | 540 | 541 | 542 | 543 | J |
| K | 544 | 545 | 546 | 547 | 548 | 549 | 550 | 551 | 552 | 553 | 554 | 555 | 556 | 557 | 558 | 559 | 560 | 561 | 562 | 563 | 564 | K |
| L | 565 | 566 | 567 | 568 | 569 | 570 | 571 | 572 | 573 | 574 | 575 | 576 | 577 | 578 | 579 | 580 | 581 | 582 | 583 | 584 | 585 | L |
| M | 586 | 587 | 588 | 589 | 590 | 591 | 592 | 593 | 594 | 595 | 596 | 597 | 598 | 599 | 600 | 601 | 602 | 603 | 604 | 605 | 606 | M |
| N | 607 | 608 | 609 | 610 | 611 | 612 | 613 | 614 | 615 | 616 | 617 | 618 | 619 | 620 | 621 | 622 | 623 | 624 | 625 | 626 | 627 | N |
| O | 628 | 629 | 630 | 631 | 632 | 633 | 634 | 635 | 636 | 637 | 638 | 639 | 640 | 641 | 642 | 643 | 644 | 645 | 646 | 647 | 648 | O |
| P | 649 | 650 | 651 | 652 | 653 | 654 | 655 | 656 | 657 | 658 | 659 | 660 | 661 | 662 | 663 | 664 | 665 | 666 | | | | P |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Q | | | | | | | 718 | 719 | 720 | 721 | 722 | 723 | 724 | 725 | 726 | 727 | 728 | 729 | 730 | 731 | 732 | Q |
| R | 733 | 734 | 735 | 736 | 737 | 738 | 739 | 740 | 741 | 742 | 743 | 744 | 745 | 746 | 747 | 748 | 749 | 750 | 751 | 752 | 753 | R |
| S | 754 | 755 | 756 | 757 | 758 | 759 | 760 | 761 | 762 | 763 | 764 | 765 | 766 | 767 | 768 | 769 | 770 | 771 | 772 | 773 | 774 | S |
| T | 775 | 776 | 777 | 778 | 779 | 780 | 781 | 782 | 783 | 784 | 785 | 786 | 787 | 788 | 789 | 790 | 791 | 792 | 793 | 794 | 795 | T |
| U | 796 | 797 | 798 | 799 | | | | | | | | | | | | | | | | | | U |

A chaque communication, on affecte un canal qui ne peut alors plus être utilisé. Le nombre de canaux étant peu important, leur gestion est critique. En théorie, on utilise des patrons de répétition pour optimiser la réutilisation des fréquences. On définit par $N$ le *facteur de réutilisation*: c'est le nombre de cellules contenues dans un patron de réutilisation. Celui utilisé par BELL MOBILITÉ CELLULAIRE est constitué de $N = 7$ cellules comme le montre la figure 1.2.

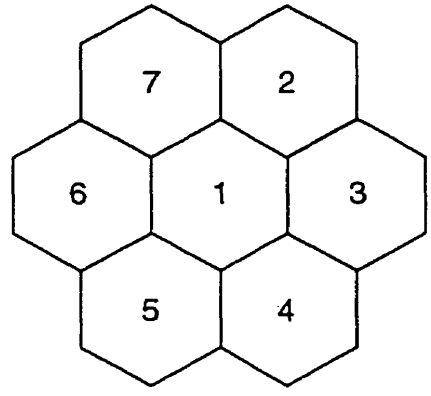



Figure 1.2 – *Configuration* $N = 7$

En pratique, l'utilisation des patrons ne suffit pas car l'adjacence d'une cellule ne peut pas être uniquement définie par des considérations géographiques. La propagation des signaux est complexe et irréguliére. Nous verrons au chapitre 2.2 la description pratique du problème chez BELL MOBILITÉ CELLULAIRE.

### 1.1.3 Propagation du signal

La propagation du signal se fait par ondes radio. Ce transport doit se faire dans les meilleures conditions possibles et c'est donc un des aspects les plus importants en téléphonie cellulaire.

Les ondes radio utilisées sont dans la bande des $800MHz$, c'est-à-dire dans le UHF (Ultra Haute Fréquence). La modulation utilisée est une modulation de fréquence.

La qualité d'une onde radio dépend fortement de sa fréquence et de la distance parcourue. En propagation radio, les signaux peuvent être affaiblis, mélangés à des bruits et soumis à des interférences. Les principaux bruits en téléphonie cellulaire sont générés par les véhicules (celui contenant l'unité mobile et ses voisins), les lignes hautes tensions (champs électromagnétiques), l'environnement industriel (moteurs électriques) et l'échauffement des composants électroniques de l'équipement radio.

En communication radio, l'onde émise se propage suivant plusieurs directions avant d'arriver au récepteur. L'onde reçue est donc la somme de plusieurs ondes. Il s'agit d'une propagation multi-chemins. L'onde radio est alors altérée par un affaiblissement log normal (affaiblissement en espace libre), un affaiblissement de Rayleigh (à effet rapide), une distorsion de fréquence (effet Dopler) et un délai de propagation.

La propagation du signal est très complexe et dépend non seulement des caractéristiques de propagation nommées ci-dessus mais aussi d'autres facteurs comme les irrégularités du terrain ou les conditions atmosphériques. Il existe cependant plusieurs modèles de propagation comme celui d'Okumura *et al.*[17], basé sur des mesures extensives faites à Tokyo et sa banlieue dans les années 1966 à 1968, ou de McMahon [16]. Le modéle d'Okumura a ensuite été adapté à la bande radio mobile par Hata [9]. Des outils de simulation et de planification intégrent généralement ces modèles et proposent une gestion "automatisée" des réseaux (e.g. PlaNET, Cellcad, Parcell).

### 1.1.4 Interférences

Ce sont les interférences qui constituent le facteur limitant en téléphonie cellulaire et qui sont prépondérantes par rapport aux bruits. Les principales interférences sont brièvement décrites ci-dessous (voir la section 2.2 pour une description détaillée et pratique dans les réseaux de BELL MOBILITÉ CELLULAIRE) :

(i) *interférence cocanal*

Deux cellules $C_i$ et $C_j$ peuvent utiliser les mêmes canaux sans qu'il se produise d'interférences si leurs zones de couverture sont mutuellement indépendantes (pas de recouvrement). Puisque le recouvrement existe dans la plupart des cas, les zones de couverture des cellules $C_i$ et $C_j$ sont considérées indépendantes en pratique, si le ratio signal sur interférence $SIR_{ij}$ ("Signal-to-Interference Ratio" entre les cellules $C_i$ et $C_j$) est plus grand qu'une valeur seuil $\overline{SIR}^{co}$. Dans le standard AMPS, ce seuil est couramment fixé à $18dB$ avec un patron de répétition $N = 7$.

Soit $f_k$ un canal affecté à la cellule $C_i$ et $f_\ell$ un canal affecté à la cellule $C_j$. La contrainte d'interférence cocanal entre les deux cellules est respectée si et seulement si :

$$|f_k - f_\ell| \geq 1 \text{ lorsque } SIR_{ij} \leq \overline{SIR}^{co}.$$

(ii) *interférence entre canaux adjacents*

Cette contrainte reflète l'incapacité des filtres de fréquence radio d'empêcher l'interférence entre 2 canaux adjacents lorsqu'ils sont utilisés tous les deux dans la même zone.

Pour satisfaire les contraintes de canaux adjacents, deux canaux $f$ et $f'$ doivent

être tels que $f \neq f'$ et $f \neq f' \pm 1$. On remarque que la contrainte de canaux adjacents inlut la contrainte cocanal avec $f \neq f'$.

Une cellule $C_i$ peut utiliser des canaux adjacents à ceux d'une autre cellule $C_j$ sans qu'il se produise d'interférences si leurs zones de couverture sont mutuellement indépendantes. Puisque le recouvrement existe dans la plupart des cas, les zones de couverture des cellules $C_i$ et $C_j$ sont considérées indépendantes en pratique si le rapport signal sur interférence $SIR_{ij}$ est plus grand qu'une valeur seuil $\overline{SIR}^{adj}$.

Soit $f_k$ un canal affecté à la cellule $C_i$, et $f_\ell$ un canal affecté à la cellule $C_j$. La contrainte d'interférence de canaux adjacents entre les deux cellules est respectée si et seulement si :

$$|f_k - f_\ell| \geq 2 \text{ lorsque } SIR_{ij} \leq \overline{SIR}^{adj}.$$

(iii) *interférence d'espacement*

Dans une cellule donnée, le signal d'un mobile peut masquer celui d'un autre plus éloigné (et donc reçu avec moins de puissance par l'antenne) s'il n'y a pas suffisamment de séparation entre les bandes de fréquence des canaux utilisés par les deux unités mobiles. Soit $d_i$ la distance à respecter dans la même cellule $C_i$. Dans une cellule $C_i$, si deux canaux $f$ et $f'$ sont affectés à la même antenne, il n'y a pas d'interférence d'espacement si :

$$|f - f'| \geq d_i.$$

Remarquons que la valeur de $d_i$ est fonction du matériel utilisé dans la cellule $C_i$ et peut donc varier d'une cellule à l'autre.

(iv) *intermodulation*

Les produits d'intermodulation apparaissent lorsque deux ou plusieurs signaux

se mélangent en un système électrique non-linéaire pour produire une troisième fréquence (indésirable). Si la fréquence ainsi produite est proche d'une fréquence utilisée, il arrive qu'elle ne soit pas filtrée. Il en résulte alors des interférences dites d'intermodulation. Les contraintes qui correspondent aux pires produits d'intermodulation sont les suivantes : soit les fréquences $f, f', f''$ et $f'''$, alors

$$2f - f' \neq f'' \quad \text{(deux signaux, troisième ordre)}$$
$$f + f' - f'' \neq f''' \quad \text{(trois signaux, troisième ordre)}$$
$$3f - 2f' \neq f'' \quad \text{(deux signaux, cinquième ordre)}$$
$$2f + f' - 2f'' \neq f''' \quad \text{(trois signaux, cinquième ordre)}$$

On note que le produit *deux signaux, troisième ordre* est un cas particulier des produits *trois signaux, troisième ordre* et *deux signaux, cinquième ordre* (en prenant $f = f'$).

(v) *autres types d'interférences de faible incidence sur les réseaux cellulaires*

Les interférences précédentes sont les principales et elles sont prépondérantes. Mais nous pouvons également avoir des interférences mineures comme par exemple entre les stations de télévision UHF et les mobiles (ou les sites) s'ils ne sont pas suffisament éloignés les uns des autres.

Une onde radio peut aussi se propager par réflexions troposphériques à des distances très élevées et créer alors une interférence dite de longue distance.

## 1.2 Techniques opérationnelles

### 1.2.1 Supervision des appels

La supervision des appels a pour but de s'assurer que toutes les communications s'établissent et se déroulent correctement.

(i) *La tonalité audio de supervision ou "Supervision Audio Tone" (SAT)*

Le SAT est une tonalité à $5970Hz$, $6000Hz$ ou $6030Hz$ ajoutée à la communication vocale. Elle est générée par le site dans la voix descendante et reproduite, après conversion, dans la voix montante par le mobile. Une absence de la tonalité SAT pendant plus d'une seconde fait perdre l'appel. On utilise le même SAT à l'intérieur d'un patron de répétition. Pour un mobile en communication, le SAT est un moyen d'identification de la cellule qui le dessert. Si un des récepteurs (le site ou le mobile) reçoit la bonne fréquence pour la communication établie mais avec une tonalité SAT différente, l'appel est perdu. Une affectation théorique du SAT est montrée par la figure 1.3.

(ii) *Le code de couleur digital ou "Digital Color Code" (DCC)*

Le DCC a un rôle et un fonctionnement similaire au SAT mais pour les 21 canaux de contrôle. On affecte un code à chaque canal de contrôle. Le code est généré par la cellule, ajouté au signal dans la voix descendante puis identifié, converti et ajouté dans la voix montante par le mobile. Il y 4 codes de couleurs représentés par 00, 01, 10 et 11 pour les communications du site vers le mobile et par 0000000, 0011111, 1100011 et 1111100 respectivement pour les communications du mobile vers le site.

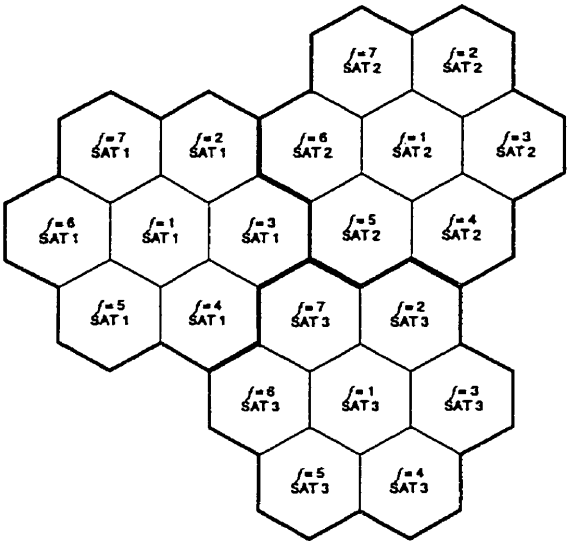



Figure 1.3 – *Affectation du SAT*

### 1.2.2 Augmentation de la capacité du réseau

La capacité en canaux cellulaires doit augmenter d'environ 15% par an pour pouvoir continuer à satisfaire la demande des usagers. Avec un tel taux de croissance, il faut régulièrement intervenir dans le réseau pour augmenter la capacité.
Les méthodes de base sont :

(i) *L'addition de cellules*

On crée une cellule et on élargit ainsi le territoire couvert.

(ii) *La division de cellules*

La division de cellules est utilisée dans les régions de fort trafic : elle permet d'augmenter la capacité locale du réseau. Cette technique implique seulement une mise à jour locale du réseau. Malheureusement, cela implique un taux de relève plus élevé, une infrastructure plus importante et une augmentation du niveau d'interférences. Une division de cellule est illustrée à la figure 1.4.

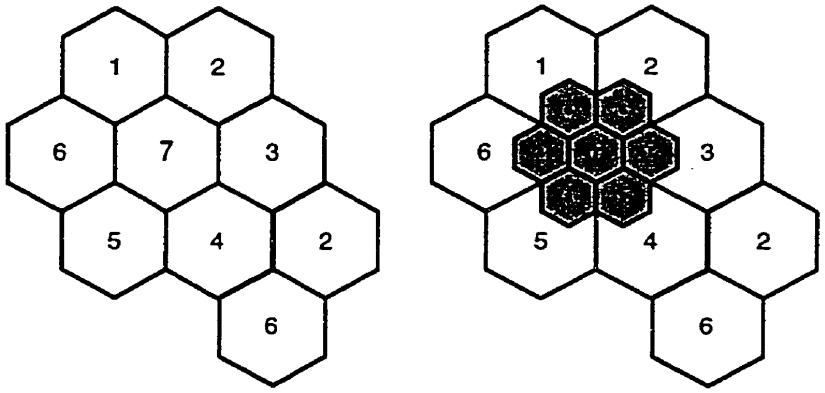



Figure 1.4 – *Division de cellules*

(iv) *La sectorisation*

La sectorisation des cellules diminue le nombre d'interférences et augmente la capacité du réseau. Dans un patron $N = 7/Omnidirectionnel$, une cellule a 6 cellules adjacentes en interférence. La sectorisation d'une cellule omnidirectionnelle en trois secteurs de $120^o$ (cas $N = 7/120^o$ ) n'offre alors plus que 2 cellules en interférence, comme le montre la figure 1.5.

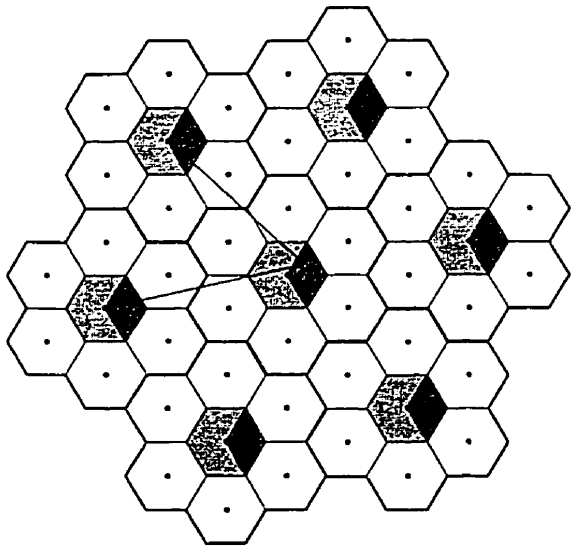


Figure 1.5 – *Interférences pour* $N = 7/120^o$

Pour $N = 7/120^o$, nous avons donc en réalité un facteur de réutilisation de $N = 21$. C'est pourquoi la table des canaux est organisée en 21 colonnes (voir tableau 1.2). Chaque colonne est théoriquement affectée à un secteur du patron (voir figure 1.6).

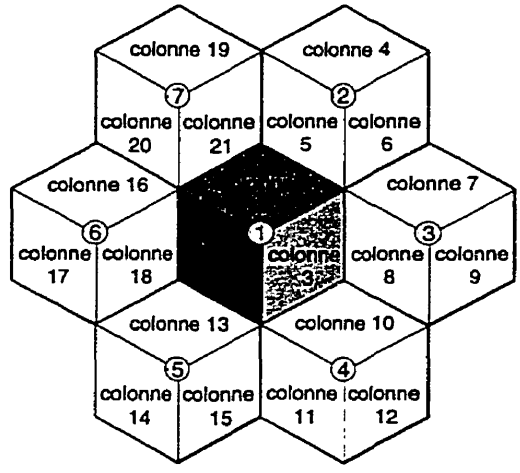



Figure 1.6 – *Sectorisation et affectation des colonnes de canaux pour* $N = 7/120^0$

Dans ce qui va suivre, nous désignerons par cellule un secteur ou une cellule omnidirectionnelle. Une autre sectorisation typique dans les systèmes AMPS est $N = 7/60^o$ (6 secteurs). Une combinaison des deux est aussi possible.

(v) *Le partitionnement*

La cellule est divisée en deux parties, l'une imbriquée dans l'autre (voir figure 1.7). La partition interne ayant un rayon plus petit, les canaux radio qui y sont utilisés peuvent être affectés à une autre cellule située à une distance moindre que la partition externe ne l'aurait permise.

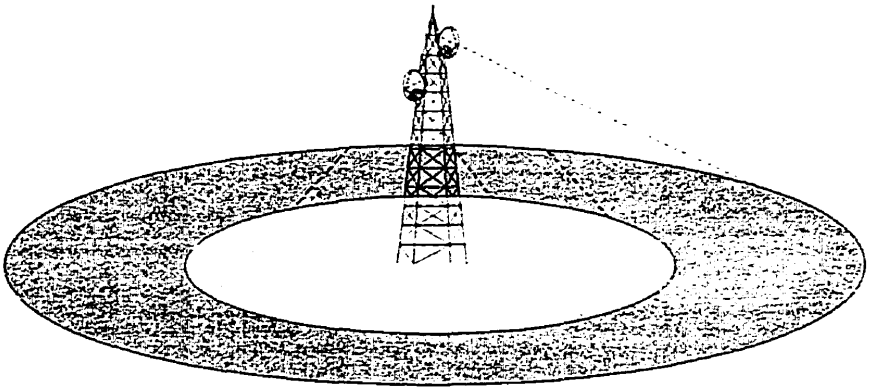


Figure 1.7 – *Partition d'une cellule*

### 1.2.3 Réduction des interférences

La réduction des interférences a pour but d'assurer une qualité de transmission acceptable en maximisant la capacité du système et ce par une utilisation adéquate du matériel.

La sectorisation et le partionnement permettent de réduire les interférences et d'augmenter la capacité simultanément (voir les paragraphes (iv) et (v) de la section 1.2.2). Il est aussi possible d'abaisser la hauteur d'un site , ce qui réduit sa zone de couverture et donc les chevauchements avec ses voisins. Cette technique est généralement utilisée en conjonction avec le contrôle de puissance des mobiles et du site. La puissance est fonction de la distance entre le site et le mobile : plus elle est réduite, plus la puissance sera faible. L'inclinaison d'une antenne est par contre mise en oeuvre avec la sectorisation. C'est une méthode qui s'ajoute aux deux précédentes pour réduire d'autant plus la zone couverte. Enfin, l'équipement doit être en adéquation avec la qualité du signal souhaité.

### 1.2.4 La relève ou "handoff"

La relève est le changement de canal radio en cours de communication. La relève est aussi appelée "handoff"(standards cellulaires américains) ou "handover" (standards CCITT/CCIR) ou ALT (Automatic Link Transfer; ANSI T1P1). Lorsqu'un mobile arrive aux limites de la cellule qui le dessert, la communication doit basculer sur un canal de la cellule où il rentre. C'est la relève entre cellules. Il existe aussi des relèves entre secteurs et entre partitions d'une cellule.

La relève est une procédure complexe qui génère le plus de messages dans le système. Si l'on veut alléger la charge du système, il faut donc prendre soin d'en générer le moins possible, mais sans que cela nuise à la qualité de transmission de la voix.

# CHAPITRE 2

# Problématiques

## 2.1 Contexte

C'est en 1978 à Chicago que le système AMPS a été testé pour la première fois. Il fait partie des standards de première génération, basés sur le principe FDMA, au même titre que le TACS (Total Access Cellular System), utilisé en Angleterre, le TACS japonais (JTACS) ou le NMT (Nordic Mobile Telephone) dans les pays scandinaves. Cette première génération est appelée à disparaître à long terme sur les marchés approchant de la saturation et où les opérateurs veulent proposer de nouveaux services. Il est alors nécessaire de trouver d'autres solutions. Les technologies de deuxième génération, comme par exemple IS-54 ou GSM (Global System for Mobile Communication - déjà largement implanté en Europe), sont basées sur le principe TDMA (Time Division Multiple Access). En Amérique du Nord, même si GSM est sporadiquement implanté, c'est le standard CDMA (Code Division Multiple Access), de troisième génération, qui commence à être choisi par les opérateurs. En théorie, CDMA peut supporter 20 fois plus d'appels que AMPS. Mais en pratique, on s'approche plutôt de 4 fois. Le IS-54 triple la capacité par rapport à AMPS.

Dans ce contexte, l'optimisation des réseaux de première génération reste plus que jamais d'actualité. AMPS est une technologie connue, bien maîtrisée et déjà implantée en Amérique du Nord. Ce sont des atouts importants. Les infrastructures sont déjà existantes et les réseaux ne demandent qu'une mise à jour régulière. Le coût est donc plus faible que s'il fallait bâtir un nouveau réseau. L'optimisation des réseaux de type FDMA permettra de repousser les limites de ces systèmes et donc de prolonger leur durée d'utilisation. Les opérateurs pourront alors reporter la décision stratégique du choix d'un nouveau système offrant plus de capacité et de nouveaux services. On diffère des investissements financiers importants et on offre aussi la possibilité de décider en fonction des dernières percées technologiques. Ce point n'est pas négligeable dans le domaine des télécommunications en perpétuelle et rapide évolution. En deux ou trois ans, les standards peuvent changer, proposer de nouvelles fonctionnalités, être plus performants ou tout simplement être mieux maîtrisés et de coûts plus faibles. Malgré cela, le FDMA restera toujours intéressant pour des pays souhaitant acquérir des services de téléphonie mobile à moindre coût.

La ressource la plus rare, car définitivement limitée, est le nombre de canaux disponibles. C'est son utilisation optimale qui nous intéresse. Nous allons donc dans la section suivante décrire le problème d'affectation de canaux chez BELL MOBILITÉ CELLULAIRE, qui utilise AMPS. Par la suite, nous aborderons le problème de la resyntonisation multipériode.

## 2.2 Le problème d'affectation de blocs de canaux

La resyntonisation multipériode est une extension du problème d'affectation de canaux car elle doit prendre en compte les contraintes de ce problème. C'est pourquoi nous décrivons le problème d'affectation de blocs de canaux avant de définir celui de la resyntonisation multipériode. Cette description s'appuie sur l'expérience de BELL MOBILITÉ CELLULAIRE.

Le problème d'affectation de canaux pour les réseaux cellulaires basés sur le principe FDMA peut être défini de la manière suivante : étant donné un ensemble de $n$ cellules et un nombre fini de canaux, on veut affecter à chaque cellule une quantité précise de canaux, appelée la demande de la cellule, en minimisant les interférences et sous certaines contraintes. Les canaux disponibles sont définis par la table des canaux (voir tableau 1.2). Dans notre cas, ces interférences et contraintes sont décrites dans les sections suivantes.

### 2.2.1 Nombre de canaux requis par cellule

Le premier objectif de l'affectation de canaux est de satisfaire la demande dans chaque cellule. Dans les réseaux AMPS, avec une sectorisation $N = 7/120°$, on affecte théoriquement à chaque cellule une colonne de la table des canaux (voir la section 1.2.2). La demande ne peut alors excéder le nombre de canaux dans la colonne, soit 19 dans notre cas. Mais en pratique, la densité du trafic variant d'une cellule à l'autre, les cellules qui doivent gérer un trafic plus important ont besoin de plus de canaux. A BELL MOBILITÉ CELLULAIRE, le nombre de canaux requis pour une cellule donnée

est déterminé en tenant compte de la projection du trafic à gérer par la cellule dans les 12 à 18 prochains mois. Il varie entre 10 et 35 canaux par cellule environ. Cette information est décrite par le vecteur $v_required$ de longueur $n$ défini comme suit :

$$v_required[i] = \text{ nombre de canaux requis par } C_i (i = 1, 2, \ldots, n).$$

On peut également définir une tolérance $tolVReq$ et satisfaire la demande dans les limites $v_required[i] \pm tolVReq$. Cet ajout donne plus de souplesse dans la recherche d'une solution d'affectation avec un minimum d'interférences.

### 2.2.2 Définition des blocs de canaux

Les canaux ne sont pas affectés un à un, mais par bloc. Un bloc est un ensemble de 3 à 8 canaux d'une colonne de la table des canaux (voir tableau 1.2). Les blocs sont disjoints : un canal ne peut pas appartenir à deux blocs distincts. On note $B_k$ un bloc de l'ensemble $\mathcal{F}$ des blocs disponibles et $K = |\mathcal{F}|$ la cardinalité de l'ensemble. On suppose a priori que plus les blocs sont petits, meilleure sera la qualité du réseau.

### 2.2.3 Interférence cocanal

Rappellons qu'une cellule $C_i$ peut utiliser les mêmes canaux qu'une autre cellule $C_j$ sans qu'il se produise d'interférence si leurs zones de couverture sont mutuellement indépendantes (pas de recouvrement). Puisque le recouvrement existe dans la plupart des cas, les zones de couverture des cellules $C_i$ et $C_j$ sont considérées indépendantes

en pratique si le ratio signal sur interférence $SIR_{ij}^{co}$ entre les cellules est plus grand qu'une valeur donnée $\overline{SIR}^{co}$.

L'indépendance des zones de couverture entre toutes les cellules du réseau est exprimée par une matrice de compatibilité cocanal $M^{co}$. Chaque coefficient $m_{ij}^{co}$ exprime le niveau de compatibilité cocanal entre la cellule $C_i$ et la cellule $C_j$. Il est directement fonction du ratio signal sur interférence $SIR_{ij}^{co}$. Les valeurs possibles du ratio $SIR_{ij}^{co}$ ont été partitionnées en 10 intervalles. A chaque intervalle correspond une valeur comprise entre 0 (ratio $SIR_{ij}^{co}$ très élevé; compatibilité parfaite) et 10 (ratio $SIR_{ij}^{co}$ très faible; incompatibilité totale). Plus précisement, nous avons:

$m_{ij}^{co} = 0$ si toutes les mesures de zone de couverture faites entre les cellules $C_i$ et $C_j$ pour un même canal $f$ sont fortement compatibles avec la contrainte $SIR_{ij}^{co} \geq \overline{SIR}^{co}$. Dans ce cas, les deux cellules peuvent utiliser les mêmes canaux.

$m_{ij}^{co} \in \{1, 2, 3, 4\}$ si les mesures de zone de couverture faites entre les cellules $C_i$ et $C_j$ pour un même canal $f$ sont compatibles avec la contrainte $SIR_{ij}^{co} \geq \overline{SIR}^{co}$. Dans ce cas, l'utilisation de canaux identiques est possible.

$m_{ij}^{co} \in \{5, 6, 7, 8\}$ si les mesures de zone de couverture faites entre les cellules $C_i$ et $C_j$ pour un même canal $f$ sont incompatibles avec la contrainte $SIR_{ij}^{co} \geq \overline{SIR}^{co}$. Dans ce cas, l'utilisation de canaux identiques est déconseillée, à moins qu'on ne puisse trouver d'autres blocs de canaux qui soient compatibles.

$m_{ij}^{co} = 9$ si les mesures de zone de couverture faites entre les cellules $C_i$ et $C_j$ pour un même canal $f$ sont fortement incompatibles avec la contrainte $SIR_{ij}^{co} \geq \overline{SIR}^{co}$. Dans ce cas, l'utilisation de canaux identiques doit être complètement évitée.

$m_{ij}^{co} = 10$ si $i = j$ ou si les mesures de zone de couverture faites entre les cellules $C_i$ et $C_j$ pour un même canal $f$ sont totalement incompatibles avec la contrainte $SIR_{ij}^{co} \geq \overline{SIR}^{co}$. Cela arrive lorsque $C_i$ et $C_j$ appartiennent au même site. Dans ce cas, l'utilisation de canaux identiques est interdite.

Dans le cas où il y a plusieurs possibilités d'affectation, on doit choisir d'affecter un bloc au couple ($C_i$,$C_j$) qui a le plus petit coefficient $m_{ij}^{co}$, c'est-à-dire le plus grand ratio $SIR_{ij}^{co}$.

Soit $f_k$ un canal de fréquence affecté à la cellule $C_i$ et $f_\ell$ un canal de fréquence affecté à la cellule $C_j$. La contrainte d'interférence cocanal entre les deux cellules est acceptable si et seulement si :

$$|f_k - f_\ell| \geq 1 \text{ lorsque } m_{ij}^{co} \geq \overline{m}^{co},$$

où $\overline{m}^{co}$ est directement fonction du seuil $\overline{SIR}^{co}$. Dans notre cas, nous avons $\overline{m}^{co} = 5$.

Rappelons que si $SIR_{ij}^{co} \geq \overline{SIR}^{co}$, alors l'affectation est acceptable au regard du standard AMPS. Dans ce qui suit, on dira qu'une affectation de blocs est acceptable s'il n'existe aucune cellule $C_i$ et $C_j$ qui reçoivent des canaux identiques telles que $m_{ij}^{co} \geq \overline{m}^{co}$, c'est-à-dire si $SIR_{ij}^{co} \geq \overline{SIR}^{co}$.

Si la matrice initiale $M^{co}$ n'est pas symétrique, on la modifie de sorte que

$$m_{ij}^{co} = m_{ji}^{co} \leftarrow \max\{m_{ij}^{co}, m_{ji}^{co}\}.$$

Nous disons que deux cellules $C_i$ et $C_j$ qui ont un canal identique créent un lien cocanal de niveau $m_{ij}^{co}$ ($m_{ij}^{co} \neq 0$).

### 2.2.4 Interférence de canaux adjacents

Cette contrainte reflète les limites des filtres de fréquence radio. Il s'agit d'empêcher l'interférence entre deux canaux adjacents lorsqu'ils sont utilisés tous les deux dans la même zone.

Deux canaux $f$ et $f'$ qui doivent satisfaire les contraintes de canaux adjacents ne peuvent être tels que $f = f'$ et $f = f' \pm 1$. La contrainte cocanal définie à la section 2.2.3 est donc incluse dans la contrainte de canaux adjacents. Pour éviter toute redondance, nous ne tenons pas compte du cas $f = f'$ dans la contrainte de canaux adjacents.

Une cellule $C_i$ peut utiliser des canaux adjacents à ceux d'une autre cellule $C_j$ sans qu'il se produise d'interférences si leurs zones de couverture sont mutuellement indépendantes (pas de recouvrement). Puisque le recouvrement existe dans la plupart des cas, les zones de couverture des cellules $C_i$ et $C_j$ sont considérées indépendantes en pratique si le rapport signal sur interférence $SIR_{ij}^{adj}$ est plus grand qu'une valeur donnée $\overline{SIR}^{adj}$.

L'indépendance des zones de couverture adjacentes entre toutes les cellules du réseau est exprimée par une matrice de compatibilité d'adjacence $M^{adj}$, définie de manière similaire à $M^{co}$. Chaque coefficient $m_{ij}^{adj}$ exprime le niveau de compatibilité d'adjacence entre la cellule $C_i$ et la cellule $C_j$. Celui-ci est directement fonction du ratio signal sur interférence $SIR_{ij}^{adj}$. Les valeurs possibles du ratio $SIR_{ij}^{adj}$ ont été partitionnées en 10 intervalles. A chaque intervalle correspond une valeur comprise

entre 0 (ratio $SIR_{ij}^{adj}$ très élevé ; compatibilité parfaite) et 10 (ratio $SIR_{ij}^{adj}$ très faible ; incompatibilité totale). Plus précisement, nous avons :

$m_{ij}^{adj} = 0$ si toutes les mesures de zone de couverture faites entre les cellules $C_i$ et $C_j$ sont fortement compatibles avec la contrainte $SIR_{ij}^{adj} \geq \overline{SIR}^{adj}$. Dans ce cas, les deux cellules peuvent utiliser des canaux adjacents.

$m_{ij}^{adj} \in \{1, 2, 3, 4\}$ si les mesures de zone de couverture faites entre les cellules $C_i$ et $C_j$ sont compatibles avec la contrainte $SIR_{ij}^{adj} \geq \overline{SIR}^{adj}$. Dans ce cas, l'utilisation de canaux adjacents est possible.

$m_{ij}^{adj} \in \{5, 6, 7, 8\}$ si les mesures de zone de couverture faites entre les cellules $C_i$ et $C_j$ sont incompatibles avec la contrainte $SIR_{ij}^{adj} \geq \overline{SIR}^{adj}$. Dans ce cas, l'utilisation de canaux adjacents est déconseillée, à moins qu'on ne puisse trouver d'autres blocs de canaux qui soient compatibles.

$m_{ij}^{adj} = 9$ si les mesures de zone de couverture faites entre les cellules $C_i$ et $C_j$ sont fortement incompatibles avec la contrainte $SIR_{ij}^{adj} \geq \overline{SIR}^{adj}$. Dans ce cas, l'utilisation de canaux adjacents doit être complètement évitée.

$m_{ij}^{adj} = 10$ si $i = j$ ou si les mesures de zone de couverture faites entre les cellules $C_i$ et $C_j$ sont totalement incompatibles avec la contrainte $SIR_{ij}^{adj} \geq \overline{SIR}^{adj}$. Cela arrive lorsque $C_i$ et $C_j$ appartiennent au même site. Dans ce cas, l'utilisation de canaux adjacents est interdite.

Dans le cas où il y a plusieurs possibilités d'affectation, on doit choisir d'assigner un bloc au couple ($C_i$,$C_j$) qui a le plus petit coefficient $m_{ij}^{adj}$, c'est-à-dire le plus grand ratio $SIR_{ij}^{adj}$.

Soit $f_k$ un canal de fréquence affecté à la cellule $C_i$ et $f_\ell$ un canal de fréquence affecté à la cellule $C_j$. La contrainte d'interférence de canaux adjacents entre les deux cellules est respectée si et seulement si

$$|f_k - f_\ell| \geq 2 \text{ lorsque } m_{ij}^{adj} \geq \overline{m}^{adj},$$

où $\overline{m}^{adj}$ est directement fonction du seuil $\overline{SIR}^{adj}$. Dans notre cas, nous avons $\overline{m}^{adj} = 5$.

Dans ce qui suit, on dira qu'une affectation de blocs est acceptable s'il n'existe aucun couple de cellules ($C_i$, $C_j$) reçevant des canaux adjacents telles que $m_{ij}^{adj} \geq \overline{m}^{adj}$, c'est-à-dire si $SIR_{ij}^{adj} \geq \overline{SIR}^{adj}$.

Si la matrice initiale $M^{adj}$ n'est pas symétrique, on la modifie de sorte que

$$m_{ij}^{adj} = m_{ji}^{adj} \leftarrow \max\{m_{ij}^{adj}, m_{ji}^{adj}\}.$$

Nous disons que deux cellules $C_i$ et $C_j$ qui ont un canal en adjacence créent un lien d'adjacence de niveau $m_{ij}^{adj}$ ($m_{ij}^{adj} \neq 0$).

### 2.2.5 Nombre d'antennes

Le nombre d'antennes peut varier d'une cellule à l'autre. Il est fonction de la demande et est compris généralement entre une et trois antennes (trois pour les cellules qui ont une demande importante). Le nombre d'antennes pour chaque cellule est donné par le vecteur *v_antennas* de longueur $n$ tel que:

$$v_antennas[i] = \text{ nombre d'antennes pour } C_i (i = 1, 2, \ldots, n).$$

### 2.2.6 Espacement minimum entre canaux

Cette contrainte reflète la capacité de l'équipement de filtrage des antennes d'une cellule à séparer des canaux proches. Un équipement de filtrage typique nécessite un espacement minimum de 17 canaux entre tous les canaux affectés à la même antenne d'une cellule donnée. Cependant cela peut varier suivant le type de matériel utilisé. Cette information est donnée par le vecteur *v_ch_spacing* de longueur $n$ tel que :

$$v_ch_spacing[i] = \text{espacement minimum entre canaux pour la cellule } C_i (i = 1, 2, \ldots, n).$$

Soient $f_k$ et $f_\ell$ deux canaux affectés à la cellule $C_i$ sur la même antenne. La contrainte d'espacement minimum est satisfaite si et seulement si

$$|f_k - f_\ell| \geq 17.$$

### 2.2.7 Allocation de canaux du spectre étendu

Pour chaque cellule, il existe un pourcentage maximum de canaux qui peuvent appartenir au spectre étendu, c'est-à-dire le spectre allant du canal 718 au canal 799 inclus (voir tableau 1.2). Cette contrainte est due à la présence de vieux téléphones cellulaires introduits sur le réseau en 1986, avant l'allocation à BELL MOBILITÉ CELLULAIRE du spectre étendu. Étant donné que ces téléphones sont amenés à disparaître, cette contrainte n'aura plus lieu d'être dans un futur proche. Le vecteur *v_add_spectrum* de dimension $n$ donne le pourcentage maximum de canaux qui

peuvent appartenir au spectre étendu pour les cellules $C_i \quad (i = 1, 2, \ldots, n)$ :

$v_add_spectrum[i]$ = pourcentage maximum de canaux qui peuvent appartenir au spectre étendu pour la cellule $C_i (i = 1, 2, \ldots, n)$.

### 2.2.8 Évaluation d'une solution

Notons $S$ une affectation de blocs de canaux aux cellules. La qualité d'une solution $S$ est évaluée par un vecteur $z(S)$ de dimension 20. La $(2m)^{ième}$ composante (respectivement la $(2m-1)^{ième}$) est égale au nombre de liens cocanaux (respectivement de canaux adjacents) de niveau $m$, avec $1 \leq m \leq 10$. Les composantes paires de $z(S)$ stockent donc les violations relatives à l'interférence cocanal et les composantes impaires de $z(S)$ les violations relatives à l'interférence de canaux adjacents.

Nous utilisons aussi un vecteur $z(S_i)$ de dimension 20 pour mesurer l'interférence de la cellule $C_i$ ($S_i$ représente l'affectation de blocs à la cellule $C_i$). La composante $2m$ (respectivement $2m-1$) du vecteur $z(S_i)$ est le nombre d'interférences cocanaux (respectivement de canaux adjacents) de niveau $m$ impliquant un canal affecté à $C_i$. Si $B_k^i$ représente l'affectation du bloc $B_k$ à la cellule $C_i$, alors on définit de manière similaire le vecteur $z(B_k^i)$ qui représente les interférences cocanaux et de canaux adjacents pour $B_k^i$.

Pour un réseau de $n$ cellules, nous avons donc

$$z(S) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} z(S_i) \text{ et } z(S_i) = \sum_{B_k \in C_i} z(B_k^i) \quad (i = 1, \ldots, n).$$

A l'intérieur d'une cellule $C_i$, nous interdisons toutes les interférences cocanaux ou de canaux adjacents, c'est-à-dire $m_{ij}^{co} = 10$ et $m_{ij}^{adj} = 10$ si $i = j$.

**Exemple :** évaluation de $z(S)$, $z(S_i)$ et $z(B_k^i)$ pour un réseau de deux cellules. Soit deux cellules $C_i$ et $C_j$ telles que $m_{ij}^{co} = 7$ et $m_{ij}^{adj} = 6$. Nous définissons trois blocs de canaux $B_1$, $B_2$ et $B_3$ par :

$B_1 = \{$canaux $400, 421, 442$ et $463\}$,

$B_2 = \{$canaux $500, 521, 542, 563$ et $584\}$,

$B_3 = \{$canaux $501, 522, 543, 564, 585, 606, 627$ et $648\}$.

Soit les affectations $S_i = \{B_1, B_2\}$ et $S_j = \{B_1, B_3\}$ (voir figure 2.1).

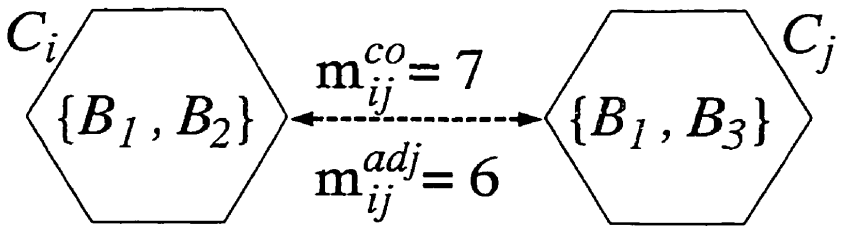



Figure 2.1 – *Exemple d'évaluation d'un réseau de deux cellules*

Avec cette affectation de blocs de canaux, nous avons pour $C_i$ :

$z(B_1^i)$ : $B_1^i$ est en interférence cocanal avec $B_1^j$ pour 4 canaux ;

$z(B_2^i)$ : $B_2^i$ est en interférence d'adjacence avec $B_3^j$ pour 5 canaux ;

$z(S_i) = z(B_1^i) + z(B_2^i)$.

Nous avons de même pour $C_j$ :

$z(B_1^j) = z(B_1^i)$ car le problème est symétrique dans notre exemple ;

$z(B_2^j) = z(B_3^i)$ car le problème est symétrique dans notre exemple ;

$z(S_j) = z(B_1^j) + z(B_2^j) = z(S_i)$.

Enfin, pour le réseau $S$ nous avons :

$z(S) = \frac{1}{2}(z(S_i) + z(S_j))$ ;

soit 4 liens cocanal de niveau 7, et 5 liens d'adjacence de niveau 6.

Les vecteurs $z(B_1^i)$, $z(B_2^i)$, $z(S_i)$ et $z(S)$ sont donnés dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 – *Exemple d'évaluation d'un réseau de deux cellules*

| | $z(B_1^i)$ | | $z(B_2^i)$ | | $z(S_i) = z(B_1^i) + z(B_2^i)$ | | $z(S) = \frac{1}{2}(z(S_i) + z(S_j))$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $m$ | $z_{2m}(B_1^i)$ | $z_{2m-1}(B_1^i)$ | $z_{2m}(B_2^i)$ | $z_{2m-1}(B_2^i)$ | $z_{2m}(S_i)$ | $z_{2m-1}(S_i)$ | $z_{2m}(S)$ | $z_{2m-1}(S)$ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 5 | 0 | 5 |
| 7 | 4 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 4 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

avec $z_{2m}$ : nombre de liens (ou d'interférences) cocanaux de niveau $m^{co}$

et $z_{2m-1}$ : nombre de liens (ou d'interférences) de canux adjacents de niveau $m^{adj}$

### 2.2.9 Récapitulation

La description d'un réseau de $n$ cellules est donnée par les matrices $n \times n$ suivantes :

$M^{co}$ : matrice de compatibilité cocanal ;

$M^{adj}$ : matrice de compatibilité d'adjacence,

et par les vecteurs de longueur $n$ :

$v_required[i]$ : nombre de canaux requis par $C_i$ $(i = 1, 2, \ldots, n)$ ;

$v_antennas[i]$ : nombre d'antennes pour $C_i$ $(i = 1, 2, \ldots, n)$ ;

$v_ch_spacing[i]$ : espacement minimum entre canaux pour $C_i$ $(i = 1, 2, \ldots, n)$ ;

$v_add_spectrum[i]$ : pourcentage de canaux qui peuvent appartenir au spectre étendu pour la cellule $C_i$ $(i = 1, 2, \ldots, n)$.

## 2.3 Les modèles de la littérature

Le problème de la resyntonisation multipériode d'un réseau cellulaire n'a jamais été abordé en tant que tel dans la littérature, mais il constitue une extension du problème d'affectation de canaux. La description du problème d'affectation de canaux, et notamment des contraintes, est donc intéressante. C'est pourquoi nous décrivons rapidement les modèles déjà proposés pour ce dernier problème. Même si

les méthodes de résolution sont différentes, la description classique du problème d'affectation de canaux dans la littérature reste identique. Le problème est défini comme suit :

1. un ensemble de $n$ cellules ;
2. un vecteur demande $v_required[i] \quad (i = 1, \ldots, n)$ ;
3. un canal $f_{ik}$, affecté à $a_{ik}$ (le $k^{ième}$ appel de la cellule $C_i$) ;
4. une matrice symétrique de compatiblité $D$ où chaque élément $d_{ij}$ représente la distance minimum entre les canaux de la cellule $C_i$ et ceux de la cellule $C_j$. Les contraintes de distance sont respectées si $|f_{ik} - f_{jl}| \geq d_{ij}$.

Les coefficients $d_{ij}$ de la matrice $D$ sont généralement définis comme suit :

$d_{ii} = 17$ (espacement minimum de canaux dans la cellule $C_i$) ;

$d_{ij} = 0$ (aucune contrainte de réutilisation de canaux entre $C_i$ et $C_j$) ;

$d_{ij} = 1$ (contrainte cocanal entre $C_i$ et $C_j$ (voir la section 2.2.3));

$d_{ij} = 2$ (contrainte d'adjacence entre $C_i$ et $C_j$ (voir la section 2.2.4)) ;

$d_{ij} \geq 3$ (contrainte d'adjacence d'adjacence entre $C_i$ et $C_j$).

Dans les premières années de la résolution du problème d'affectation de canaux, les modèles étaient basées sur une approche de coloriage de graphe (voir, e.g., Gamst et Rave [5], Hale [8]) où des hypothèses simplificatrices fortes étaient souvent faites (propagation du signal uniforme, demande en canaux constante, émétteurs et récepteurs omnidirectionnels,...). Récemment, d'autres modèles basés sur le coloriage

de graphe ont aussi été proposés (voir Borndörfer *et al.* [2]). Des modèles d'optimisation ont par la suite été développés dont l'objectif est de minimiser les interférences dans le réseau (voir Katzela et Naghshineh [13] pour une revue des plus récents algorithmes). Plus récemment, des modèles de programmation en nombres entiers ont été proposés (voir, e.g., Giortzis et Turner [6], Jaumard *et al.* [12], Warners *et al.*[20]). On cherche alors à minimiser, soit la demande non satisfaite [6], soit le niveau des interférences [12]. Remarquons que dans le cas de Jaumard *et al.*[12], la description du problème est celle donnée à la section 2.2 et non pas celle de la littérature.

L'inconvénient majeur de la définition classique du problème d'affectation de canaux est dû à la représentation unique des contraintes d'interférences par une matrice de compatiblité $D$. Il n'y a pas de réelle distinction entre les interférences cocanaux et de canaux adjacents. D'autre part, cette représentation implique des résultats binaires : si la distance est respectée, la contrainte n'est pas violée, dans le cas contraire, elle l'est. Malheureusement, cette représentation ne traduit pas exactement la situation sur le terrain. Deux interférences peuvent ne pas représenter le même ratio SIR. Lors de l'implantation d'une solution d'affectation de canaux dans un réseau, les opérateurs voudront choisir les liens les plus favorables (SIR le plus élevé) mais ils n'auront pas cette information . Nous perdons des données sur la qualité d'une solution. D'autre part, lorsque'on a pour objectif de minimiser les interférences dans le réseau, il faut pouvoir discriminer les liens (ou les interférences) pour être capable de choisir les plus favorables. Ce n'est pas possible avec la description classique, mais ce l'est avec la description de la section 2.2.

## 2.4 Problématique de la resyntonisation multipériode

Le premier point critique d'une resyntonisation multipériode efficace est la définition de la solution d'affectation optimale, ou proche de l'optimalité, que l'on souhaite implanter. Il existe de nombreux algorithmes d'affectation de canaux et le lecteur peut se reporter à l'article de synthèse de Katzela et Naghshineh [13]. A BELL MOBILITÉ CELLULAIRE, c'est l'affectation fixe de canaux avec patron non uniforme qui est utilisée. Pour ce type de problème, plusieurs heuristiques ont été proposées dans la littérature. On peut se référer à Gamst et Rave [4] pour une revue sur les heuristiques gloutonnes et à Hurley, Thiel et Smith [10] pour une synthèse sur les plus récentes meta-heuristiques (recherche tabou, recuit simulé et algorithmes génétiques). Les contraintes techniques et économiques permettent à BELL MOBILITÉ CELLULAIRE de ne modifier qu'une centaine de cellules à la fois, avec un maximum de cent cinquante. Lorsque la taille des réseaux dépasse cette limite, il n'est plus possible d'implanter une solution cible en une seule étape. La resyntonisation doit se faire en plusieurs périodes. Mais alors combien de périodes intermédiaires sont-elles nécessaires? Dans quel ordre resyntoniser les cellules? Comment minimiser la détérioration des communications pendant cette transition?

A chaque période intermédiaire, la qualité du réseau va se détériorer : une partie du réseau sera à son affectation cible et une autre à son affectation initiale. Les deux affectations étant différentes, elles ne seront pas compatibles et elles généreront des interférences. L'idée est alors de définir pour chaque période intermédiaire un ensemble de cellules tampons qui recevront une affectation de canaux temporaire en

vue d'atténuer les interférences entre la partie du réseau à son affectation cible et celle à son affectation initiale.

Si la resyntonisation doit se faire en $P$ étapes, à chaque période intermédiaire $p$ nous devons définir les cellules qui doivent être à leur valeur cible et ensuite déterminer les cellules tampons. Une illustration de la resyntonisation est donnée à la figure 2.2.

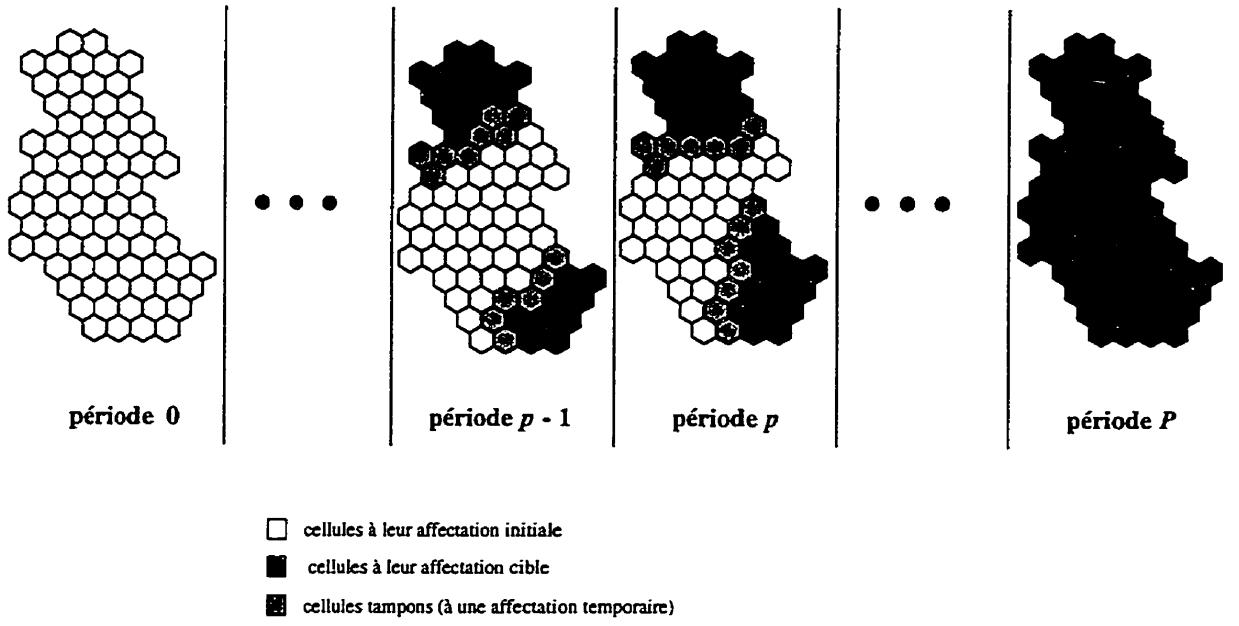



Figure 2.2 – *Idée de la resyntonisation*

Le problème doit bien sûr prendre en compte la limite sur le nombre de cellules pouvant être resyntonisées à chaque période intermédiaire ainsi que les contraintes du problème d'affectation de canaux décrites à la section 2.2

## 2.5 Description du modèle

### 2.5.1 Notations

Nous supposons que la resyntonisation multipériode nécessite $P$ étapes. Nous avons donc $P-1$ périodes intermédiaires à définir. Chaque période intermédiaire $p$ est caractérisée par une affectation de blocs de canaux $S^p$. Ainsi, une solution de resyntonisation multipériode peut être définie par l'ensemble $\mathbb{S} = (S^0, S^1, \ldots, S^P)$ où $S^0$ correspond à la solution initiale et $S^P$ à la solution cible (ou optimale).

Nous notons par $S_i^p$ l'affectation de blocs de canaux à la cellule $C_i$ pour la période $p$ ($i = 1, 2, \ldots, n$ et $p = 0, \ldots, P$). Le nombre total de canaux dans la cellule $C_i$ à la période $p$ est noté $|S_i^p|$. A chaque étape $p$, les cellules sont partitionnées comme suit :

- L'ensemble $\mathcal{C}^P(p)$ des cellules $C_i$ qui sont à leur affectation cible à la période $p$. Il se décompose en deux sous-ensembles :
  - l'ensemble $\mathcal{C}^P_{old}(p)$ des cellules $C_i$ telles que $S_i^{p-1} = S_i^p = S_i^P$, c'est-à-dire les cellules qui ont été mises à leur affectation cible à une période $q \leq p-1$.
  - l'ensemble $\mathcal{C}^P_{new}(p)$ des cellules $C_i$ telles que $S_i^p = S_i^P$ et $S_i^{p-1} \neq S_i^p$, c'est-à-dire les cellules qui viennent juste d'être mises à leur valeur cible.

- L'ensemble $\mathcal{C}^T(p)$ des cellules $C_i$ qui sont à une affectation temporaire à la période $p$. Il se décompose en deux sous-ensembles :
  - l'ensemble $\mathcal{C}^T_{old}(p)$ des cellules $C_i$ telles que $S_i^p \neq S_i^P$, $S_i^p \neq S_i^0$, et $S_i^{p-1} = S_i^p$, c'est-à-dire les cellules qui ont été mises à une affectation temporaire à une période $q \leq p-1$.
  - l'ensemble $\mathcal{C}^T_{new}(p)$ des cellules $C_i$ telles que $S_i^p \neq S_i^P$ et $S_i^{p-1} \neq S_i^p$, c'est-à-dire les cellules qui viennent juste d'être mises à une affectation temporaire.
- L'ensemble $\mathcal{C}^I(p)$ des cellules $C_i$ telles que $S_i^p \neq S_i^P$ et $S_i^p = S_i^0$, c'est-à-dire, les cellules qui sont encore à leur affectation initiale.

La figure 2.3 illustre les périodes intermédiaires avec les différents états que peut prendre une cellule au cours d'une resyntonisation multipériode.

Rappelons que les contraintes techniques et économiques permettent de modifier cent cellules pendant une fin de semaine, avec un maximum de cent cinquante. Nous notons $limit(p)$ le nombre maximal de cellules modifiables à l'étape $p$. On définit aussi les paramètres $limitP(p)$, qui représente le nombre supplémentaire de cellules à mettre à leur affectation cible à la période $p$, et $limitT(p)$, qui représente le nombre supplémentaire de cellules à mettre à une affectation temporaire à la période $p$. Notons que $limitP(p) + limitT(p) \leq limit(p)$ et que la proportion de cellules à mettre à leur affectation cible peut varier d'une période à l'autre. On a également $\sum_{p=1}^{P} limitP(p) = n$.

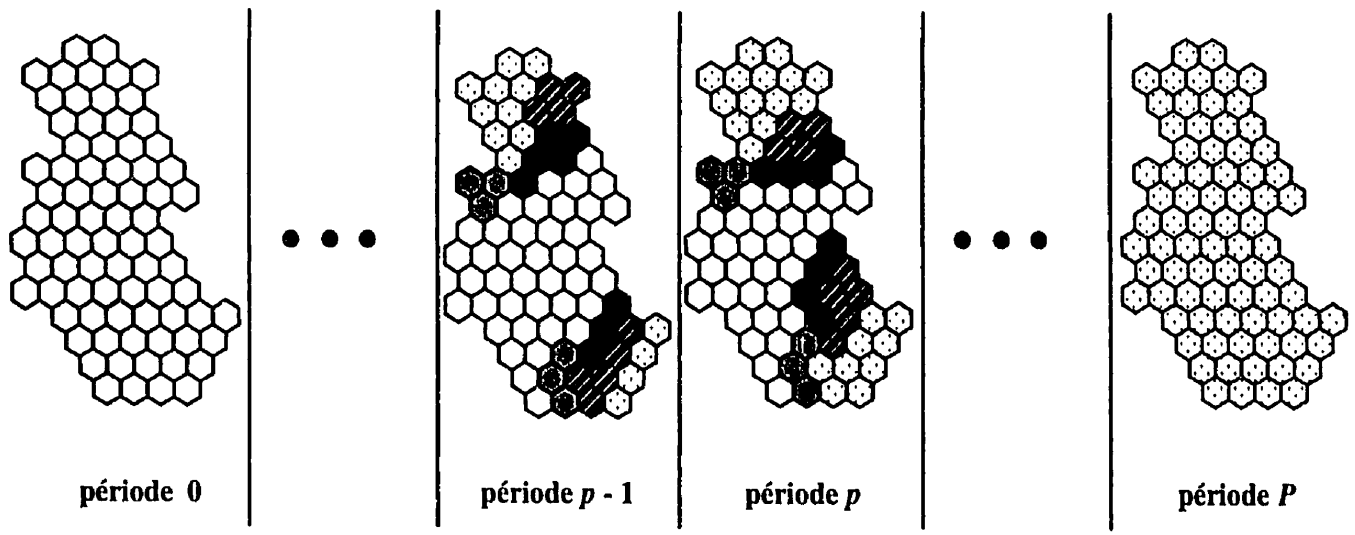



Figure 2.3 – États des cellules pendant une resyntonisation

### 2.5.2 Contraintes

Les contraintes propres au problème de la resyntonisation multipériode sont les suivantes :

**(1) limite sur le nombre de cellules modifiables par période :**

Avec les notations définies ci-dessus, nous avons :

$|\mathcal{C}^P_{new}(p)| \leq limitP(p)$ $(p = 1, \ldots, P-1)$ ;

$|\mathcal{C}^T_{new}(p)| \leq limitT(p)$ $(p = 1, \ldots, P-1)$ ;

avec $\sum_{p=1}^{P} limitP(p) = n$.

**(2) nombre de périodes P :**

Lors de la réception des données de BELL MOBILITÉ CELLULAIRE, le réseau de Montréal possédait 359 cellules. Avec une limite de 100 cellules modifiables par période, il faut un minimum de quatre périodes. Afin de s'assurer d'une qualité acceptable, il est conseillé de réaliser l'opération en six étapes minimum. Donc

$$P = 6 \text{ pour notre problème où } n = 359.$$

Évidemment, si le nombre de cellules $n$ augmentait, ce nombre $P$ devrait être révisé.

Nous considérons aussi les contraintes du problème d'affectation de blocs de canaux suivantes (on peut se référer à la section 2.2 pour plus de détails) :

- contraintes fortes (ne pouvant pas être violées) :

  **(3) demande :**

  Pour chaque cellule, nous devons respecter le nombre de canaux demandé, à une tolérance près :

  $$|S_i^p| = v_required[i] \pm tolVReq \ (i = 1, \ldots, n \text{ et } p = 1, \ldots, P-1).$$

  **(4) contrainte d'interférences cocanaux :**

  Si $m_{ij}^{co} = 10$, les cellules $C_i$ et $C_j$ ne peuvent utiliser des canaux identiques. Sinon, deux cellules $C_i$ et $C_j$ qui utilisent les mêmes canaux produisent un lien (ou une interférence) cocanal de niveau $m_{ij}^{co}$ $(m_{ij}^{co} \neq 0)$.

  **(5) contrainte d'interférences de canaux adjacents :**

  De façon similaire, si $m_{ij}^{adj} = 10$, les cellules $C_i$ et $C_j$ ne peuvent utiliser des canaux adjacents. Sinon, deux cellules $C_i$ et $C_j$ qui utilisent des canaux adjacents produisent un lien (ou une interférence) d'adjacence de niveau $m_{ij}^{adj}$ $(m_{ij}^{adj} \neq 0)$.

- contraintes faibles (pouvant être violées dans une certaine limite) :

  **(6) contrainte d'espacement des canaux sur une même antenne :**

  Pour une cellule $C_i$ $(i = 1, \ldots, n)$, si la contrainte d'espacement est respectée dans la solution initiale $(S_i^p)_{initiale}$ , alors nous ne pouvons pas la violer. Sinon, nous n'avons aucune obligation de la respecter.

Nous disons que nous avons une violation faible de la contrainte d'espacement pour un couple de blocs de canaux $(B_k, B_\ell)$ si seulement un canal de $B_k$ et de $B_\ell$ est en cause. Si plus d'un canal viole cette contrainte, alors nous disons avoir une violation forte de la contrainte d'espacement. Une tolérance est fixée pour chacun des types de violations :

- un maximum de 10 % de violations fortes est toléré dans le réseau ;
- un maximum de 20 % de violations faibles est toléré dans le réseau.

**(7) contrainte d'allocation de canaux du spectre étendu :**

Le pourcentage maximum de canaux pouvant appartenir au spectre étendu est donné par le vecteur $v_add_spectrum[i]$ $(i = 1, \ldots, n)$. Si l'on note par $\%cAddSpec[i]$ le pourcentage de canaux qui appartiennent au spectre étendu pour $C_i$, alors nous devons avoir :

$$\%cAddSpec[i] \leq v_add_spectrum[i] \quad (i = 1, 2, \ldots, n).$$

En pratique, nous autorisons un maximum de 20% de violation de cette contrainte.

### 2.5.3 Évaluation de la solution et fonction objectif

Pour une solution de resyntonisation multipériode $\mathcal{S} = (S^1, \ldots, S^{P-1})$, la qualité de chaque solution intermédiaire $S^p$ est évaluée grâce à un vecteur de dimension 20 (le vecteur d'évaluation d'un réseau décrit à la section 2.2.8). Les solutions pour $p = 0$ et $p = P$ sont omises de l'évaluation car ce sont des données initiales, donc constantes. Nous avons donc $P - 1$ vecteurs.

Considérons maintenant la question de la comparaison de deux solutions, disons $\hat{\mathbb{S}}$ et $\tilde{\mathbb{S}}$. Pour une période donnée $p$, nous dirons que l'affectation de canaux $\hat{S}^p$ est meilleure que $\tilde{S}^p$ (c'est-à-dire $z(\hat{S}^p) < z(\tilde{S}^p)$) si le vecteur $z(\hat{S}^p)$ est plus petit que $z(\tilde{S}^p)$ au sens de l'ordre lexicographique des composantes (la dernière ayant plus de poids que les autres).

Si la comparaison doit être faite non seulement sur une période mais sur l'ensemble des étapes intermédiaires, une première règle possible serait :

$$z(\hat{S}) \preceq z(\tilde{S}) \quad \text{si et seulement si} \quad z(\hat{S}^q) \leq z(\tilde{S}^q)\ (q = 1, \ldots, P-1).$$

Mais cette règle ne permet pas de comparer efficacement toutes les solutions. Par exemple, la solution $\hat{S}$ pourrait être globalement meilleure que $\tilde{S}$ même si pour une période donnée $p$, nous avons $\hat{S}^p > \tilde{S}^p$. Pour illustrer ceci, considérons les affectations $\hat{S}$ et $\tilde{S}$ définies dans le tableau 2.2 où $P = 4$.

Tableau 2.2 – *Comparaison de deux solutions de resyntonisation* $\hat{\mathbb{S}}$ *et* $\tilde{\mathbb{S}}$

| | $z(\hat{\mathbb{S}})$ | | | $z(\tilde{\mathbb{S}})$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| m | $z(\hat{S}^1)$ $(p=1)$ | $z(\hat{S}^2)$ $(p=2)$ | $z(\hat{S}^3)$ $(p=3)$ | $z(\tilde{S}^1)$ $(p=1)$ | $z(\tilde{S}^2)$ $(p=2)$ | $z(\tilde{S}^3)$ $(p=3)$ |
| 1 | 223 | 275 | 183 | 215 | 267 | 175 |
| 2 | 116 | 114 | 74 | 120 | 117 | 74 |
| 3 | 20 | 6 | 0 | 20 | 6 | 0 |
| $\geq 4$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Même si l'intuition conduit à considérer $\hat{\mathcal{S}}$ comme une meilleure solution d'affectation de canaux que $\tilde{\mathcal{S}}$, en utilisant la première règle de comparaison nous concluons que $z(\hat{\mathcal{S}}) \not\preceq z(\tilde{\mathcal{S}})$ car $z(\hat{S}^1) < z(\tilde{S}^1)$, $z(\hat{S}^2) < z(\tilde{S}^2)$ mais $z(\hat{S}^3) > z(\tilde{S}^3)$.

Pour éliminer cet inconvénient, une autre règle de comparaison pourrait être définie comme suit :

$$z(\hat{\mathcal{S}}) \prec z(\tilde{\mathcal{S}}) \quad \text{si et seulement si} \begin{cases} L(\hat{\mathcal{S}})(m) \prec L(\tilde{\mathcal{S}})(m) \\ L(\hat{\mathcal{S}})(m') = L(\tilde{\mathcal{S}})(m'), \quad m' = m+1, m+2, \ldots, 20 \end{cases}$$

où, pour une affectation donnée $\mathcal{S}$, $L(\mathcal{S})(m)$ est le vecteur de dimension $P-1$ des interférences de niveau $m$, c'est-à-dire :

$$L(\mathcal{S})(m) = (\quad z(S^1)(m), \ldots, z(S^{P-1})(m) \quad) \quad (m = 1, 2, \ldots, 20).$$

Ceci nous conduit vers une comparaison de $\hat{S}$ et $\tilde{S}$ basée sur un ordre lexicographique des niveaux d'interférence sur l'ensemble des périodes intermédiaires. Revenons à l'exemple et considérons les niveaux d'interférence. La première différence entre les deux solutions apparraît pour $m = 2$. En utilisant la deuxième règle de comparaison, nous concluons que la solution $\hat{S}$ est meilleure que $\tilde{S}$ car avec $L(\hat{\mathcal{S}})(2) = (116, 114, 74)$ et $L(\tilde{\mathcal{S}})(2) = (120, 117, 74)$, nous avons :

$$\left(z(\hat{\mathcal{S}})\right) \prec \left(z(\tilde{\mathcal{S}})\right) \text{ car } \begin{cases} L(\hat{\mathcal{S}})(2) \prec L(\tilde{\mathcal{S}})(2) \\ L(\hat{\mathcal{S}})(m') = L(\tilde{\mathcal{S}})(m'), \quad m' = 3, 4, \ldots, 20 \end{cases}$$

Considérons maintenant les deux solutions décrites dans le tableau 2.3 où nous avons $\hat{\mathcal{S}}$ et $\overline{\mathcal{S}}$ ($\overline{\mathcal{S}}$ diffère lérègement de $\tilde{\mathcal{S}}$).

Tableau 2.3 – *Comparaison de deux solutions de resyntonisation* $\hat{\mathbb{S}}$ *et* $\overline{\mathbb{S}}$

| | $z(\hat{\mathbb{S}})$ | | | $z(\overline{\mathbb{S}})$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| m | $z(\hat{S}^1)$ $(p=1)$ | $z(\hat{S}^2)$ $(p=2)$ | $z(\hat{S}^3)$ $(p=3)$ | $z(\overline{S}^1)$ $(p=1)$ | $z(\overline{S}^2)$ $(p=2)$ | $z(\overline{S}^3)$ $(p=3)$ |
| 1 | 223 | 275 | 183 | 215 | 267 | 175 |
| 2 | 116 | 114 | 74 | 120 | 113 | 78 |
| 3 | 20 | 6 | 0 | 20 | 6 | 0 |
| $\geq 4$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Ici encore, l'intuition nous conduit à considérer $\hat{\mathbb{S}}$ comme étant une meilleure solution que $\overline{\mathbb{S}}$. Pourtant, ce n'est pas la conclusion à laquelle nous aboutissons en utilisant la deuxième règle de comparaison. Nous proposons une troisième règle de comparaison plus adaptée :

$$z(\hat{\mathbb{S}}) \prec z(\tilde{\mathbb{S}}) \quad \text{si et seulement si} \quad \begin{cases} \sum_{p=1}^{P-1} L_p(\hat{\mathbb{S}})(m) < \sum_{p=1}^{P-1} L_p(\tilde{\mathbb{S}})(m) \\ L(\hat{\mathbb{S}})(m') = L(\tilde{\mathbb{S}})(m'), \quad m' = m+1, m+2, \ldots, 20 \end{cases}$$

Nous concluons que $\hat{\mathbb{S}}$ est une meilleure solution que $\overline{\mathbb{S}}$ car $\sum_{p=1}^{3} L_p(\hat{\mathbb{S}})(m=2) = 304 < \sum_{p=1}^{3} L_p(\overline{\mathbb{S}})(m=2) = 311$. En suivant la deuxième règle, nous aurions conclu le contraire.

C'est cette dernière règle que nous utiliserons dans la recherche d'une solution à la resyntonisation multipériode.

Nous pouvons maintenant définir la fonction objectif. De manière similaire au problème d'affectation de canaux, nous cherchons à minimiser les interférences sous les contraintes décrites à la section 2.5.2, soit :

$$\textbf{minimiser} \quad z(\mathcal{S}) \text{ avec } \mathcal{S} = (S^1, \ldots, S^{P-1}).$$

Le problème d'optimisation est résumé à la figure 2.4.

---

**Minimiser** $z(\mathcal{S})$ avec $\mathcal{S} = (S^1, \ldots, S^{P-1})$

sous les contraintes :

**(1) nombre de périodes P :** $P = 6$ pour $n = 359$ ;

**(2) limite sur le nombre de cellules modifiables par période :**
$|\mathcal{C}^P_{new}(p)| \leq limitP(p)$ $(p = 1, \ldots, P-1)$ ;
$|\mathcal{C}^T_{new}(p)| \leq limitT(p)$ $(p = 1, \ldots, P-1)$ ;
$\sum_{p=1}^{P} limitP(p) = n$ ;

**(3) demande :** $|S_i^p| = v_required[i] \pm tolerance$ $(i = 1, \ldots, n$ et $(p = 1, \ldots, P-1)$ ;

**(4) contrainte d'interférences cocanaux :** si $m_{ij}^{co} = 10$, les celluls $C_i$ et $C_j$ ne peuvent utiliser des canaux identiques ; sinon, deux cellules $C_i$ et $C_j$ qui utilisent les même canaux produisent un lien cocanal de niveau $m_{ij}^{co}$ ;

**(5) contrainte d'interférence de canaux adjacents :** si $m_{ij}^{adj} = 10$, les cellules $C_i$ et $C_j$ ne peuvent utiliser des canaux adjacents ; sinon, deux cellules $C_i$ et $C_j$ qui utilisent des canaux adjacents produisent un lien d'adjacence de niveau $m_{ij}^{adj}$ ;

**(6) contrainte d'espacement des canaux sur une même antenne :** si la contrainte était respectée initialement pour toute paire de canaux $(f, f')$ sur la même antenne de $C_i$, alors $|f_k - f_\ell| \geq 17$ pour tout $f_k$ et $f_\ell$ sur la même antenne de $C_i$ ;

**(7) contrainte d'allocation de canaux du spectre étendu :** $\%cAddSpec[i] \leq v_add_spectrum[i]$ $(i = 1, 2, \ldots, n)$.

---

Figure 2.4 – *Le problème d'optimisation de la resyntonisation multipériode*

# CHAPITRE 3

# La resyntonisation multipériode : méthodes

## 3.1 Schéma de la résolution

A chaque période, une partie des cellules sera mise à son affectation définitive (c'est-à-dire celle de la solution cible trouvée) et une autre partie sera mise à une affectation temporaire afin d'atténuer la détérioration de la qualité du réseau causée par l'affectation de certaines cellules à leur valeur cible. La méthode de résolution se décompose de la manière suivante :

- Une *heuristique gloutonne* afin de trouver une affectation de blocs de canaux initiale $S_{initiale} = (S^1, \ldots, S^{P-1})$.
- Une *heuristique de descente et de remontée* basée sur une recherche tabou pour améliorer la solution initiale $S_{initiale}$ fournie par l'heuristique gloutonne.

L'illustration de la résolution a déjà été donnée à la figure 2.2.

## 3.2 Une heuristique gloutonne pour une solution initiale

Le principe de l'heuristique gloutonne est d'affecter itérativement de plus en plus de cellules à leur valeur cible. A chaque période $p$, on définit un ensemble $\mathcal{C}^P_{new}(p)$ de cellules supplémentaires à mettre à leur valeur cible. Malheureusement, cela conduit à une détérioration de la qualité du réseau. Afin de compenser ce phénomène de détérioration, on définit également pour chaque période $p$ un ensemble $\mathcal{C}^T_{new}(p)$ de cellules à mettre à une affectation temporaire.

**Étape 1.** *Affectation de cellules à leur valeur cible.*

Pour chaque période $p$, on choisit l'ensemble $\mathcal{C}^P_{new}(p)$ de cellules comme suit : parmi les cellules qui ne sont pas encore à leur valeur cible, on choisit itérativement la cellule $C_i$ telle que la qualité du réseau résultant du remplacement de son affectation actuelle par sa valeur cible soit la meilleure possible. On itère jusqu'à ce que la limite $limitP(p)$ soit atteinte. La figure 3.1 donne le pseudo-code de cette étape.

L'ensemble $\mathcal{C}^P_{new}(p)$ ne peut être composé que de cellules appartenant à $\mathcal{C}^T(p-1)$ et à $\mathcal{C}^I(p-1)$.

**Procédure** HGREEDY_ETAPE_1 $(p = 1, 2, \ldots, P-1)$
**Début**
Initialisation de $S^p$ avec $S^{p-1}$,
i.e., mettre $S_i^p$ à $S_i^{p-1}$ $(i = 1, 2, \ldots, n)$ ;
$iter \leftarrow 1$ ;
**TantQue** $iter \leq limitP(p)$ **faire**
Déterminer la cellule $C_i$ telle que :

$$z((S^p \setminus S_i^p) \cup S_i^P) = \min_{j=1,2,\ldots,n} \left\{ z((S^p \setminus S_j^p) \cup S_j^P) : S_j^p \neq S_j^P \right\} ;$$

$S^p \leftarrow (S^p \setminus S_i^p) \cup S_i^P$ ;
$iter \leftarrow iter + 1$ ;
**FinTantQue**
**FinProcédure**

Figure 3.1 – *Heuristique gloutonne pour une période p : étape 1*

En utilisant cette première méthode, l'analyse des résultats préliminaires a montré qu'il n'y avait pas d'uniformité géographique: les cellules appartenant à $\mathcal{C}_{new}^P(p)$ étaient réparties dans tout le réseau. Or, la majorité des plus sévères interférences d'une cellule se produit avec les cellules immédiatement voisines géographiquement. Nous avons donc modifié la méthode pour prendre en compte le voisinage géographique. Lorsque nous affectons à une cellule son affectation cible, nous affectons aussi ses cellules voisines à leur affectation cible. C'est-à-dire que nous sélectionnons toutes les cellules $C_j$ voisines de $C_i$ telles que: $m_{ij}^{co/adj} \geq SeuilGeographique$ (et tant que $iter \leq limitP(p)$). Plus de détails sur les motivations de cette méthode sont donnés dans la section des résultats 4.3.3. Le pseudo-code de l'étape 1 modifiée est donné à la figure 3.2

**Procédure** HGREEDY_ETAPE_1_GÉOGRAPHIQUE ($p = 1, 2, \ldots, P-1$)
**Début**
Initialisation de $S^p$ avec $S^{p-1}$,
i.e., mettre $S_i^p$ à $S_i^{p-1}$ $(i = 1, 2, \ldots, n)$ ;
$iter \leftarrow 1$ ;
**TantQue** $iter \leq limitP(p)$ **faire**
Déterminer la cellule $C_i$ telle que :

$$z((S^p \setminus S_i^p) \cup S_i^P) = \min_{j=1,2,\ldots,n} \left\{ z((S^p \setminus S_j^p) \cup S_j^P) : S_j^p \neq S_j^P \right\};$$

$S^p \leftarrow (S^p \setminus S_i^p) \cup S_i^P$ ;
$iter \leftarrow iter + 1$ ;
**Pour** toutes les cellules $C_j$
telles que $m_{ij}^{co/adj} \geq SeuilGeographique$ **faire**
**Si** $iter < limitP(p)$ **faire**
$S^p \leftarrow (S^p \setminus S_j^p) \cup S_j^P$ ;
$iter \leftarrow iter + 1$ ;
**FinSi**
**FinPour**
**FinTantQue**
**FinProcédure**

Figure 3.2 – *Heuristique gloutonne pour une période p : étape 1 (critère géographique)*

**Étape 2.** *Affectation de blocs de canaux aux cellules tampons.*

Une fois que l'on a choisi les cellules devant être mises à une valeur cible pour la période $p$, on choisit un sous-ensemble $\mathcal{C}_{new}^T(p)$ de cellules afin d'améliorer la qualité du réseau. On procéde comme suit : parmi les cellules n'étant pas encore à leur affectation cible à la période $p$, on détermine la cellule $C_i$ pour laquelle le niveau d'interférence est le plus grand , i.e., $z(S_i^p) = \max_{j:C_j \notin \mathcal{C}^P(p)} z(S_j^p)$. On choisit ensuite une nouvelle affectation $(S_i^p)'$ pour la cellule $C_i$. Notons $B_k^{i,p}$ le bloc $B_k$ affecté à la cellule $C_i$ à la période $p$. Un bloc de canaux $B_\ell^{i,p}$ est un candidat potentiel s'il satisfait les contraintes (3), (4), (5), (6) et (7) du problème d'optimisation tel que défini à la figure 2.4. Nous notons par

$\mathcal{F}_{candidats}(S_i^p)$ l'ensemble des blocs candidats pour une cellule $C_i$ à la période $p$. Le choix de la nouvelle affectation $(S_i^p)'$ se fait de la manière suivante : tant que la demande en canaux de la cellule $C_i$ à la période $p$ n'est pas satisfaite, on choisit de manière séquentielle et itérative le bloc de $\mathcal{F}_{candidats}(S_i^p)$ qui dégrade le moins la qualité du réseau à la période $p$. Le pseudo-code est donné par la figure 3.3.

---

**Procédure** HGREEDY_ETAPE_2 $(p = 1, 2, \ldots, P-1)$
**Début**
  **TantQue** $iter \leq limitT(p)$ **faire**
    Chercher $C_i$ telle que $z(S_i^p) = \max_{j:C_j \notin \mathcal{C}^p(p)} z(S_j^p)$ ;
      // Détermination de l'affectation de canaux $(S_i^p)'$ :
    **TantQue** $|(S_i^p)'| \leq v_required[i]$ **faire**
      sélectionner $B_\ell^{i,p} : z(B_\ell^{i,p}) = \min_{B_k^{i,p} \in \mathcal{F}_{candidats}(S_i^p)} z(B_k^{i,p})$ ;
      $(S_i^p)' \leftarrow (S_i^p)' \cup B_\ell^{i,p}$ ;
    **FinTantQue**
    $S^p \leftarrow (S^p \setminus S_i^p) \cup (S_i^p)'$ ;
    $iter \leftarrow iter + 1$;
  **FinTantQue**
**FinProcédure**

---

Figure 3.3 – *Heuristique gloutonne pour une période $p$ : étape 2*

Notons que $\mathcal{C}_{new}^T(p)$ peut être composé de cellules de $\mathcal{C}^T(p-1)$ (qui reçoivent une nouvelle affectation temporaire) et de cellules appartenant à $\mathcal{C}^I(p-1)$.

L'heuristique gloutonne, appelée TRANSIT0, détermine une solution initiale pour chaque période intermédiaire en appelant HGREEDY_ETAPE_1 puis HGREEDY_ETAPE_2 de manière séquentielle. Le détail est donné à la figure 3.4. De manière similaire, nous appelons TRANSIT0_GÉOGRAPHIQUE l'heuristique gloutonne qui utilise HGREEDY_ETAPE_1_GÉOGRAPHIQUE au lieu de HGREEDY_ETAPE_1.

```
Procédure TRANSIT0
Début
  Pour  p = 1, ..., P − 1  faire
    HGREEDY_ETAPE_1 ;
    HGREEDY_ETAPE_2 ;
  FinPour
FinProcédure
```

Figure 3.4 – *Heuristique gloutonne :* TRANSIT0

Si nous choisissons les mêmes limites $limitP(p)$ et $limitT(p)$ pour tout $p = 1, \ldots, P-1$, nous aurons de moins bonnes qualités aux périodes intermédiaires "centrales" (soit $p = 2$, $p = 3$ généralement). Par conséquent, si nous voulons répartir la dégradation de la qualité, ces limites doivent varier avec $p$.

## 3.3 Amélioration de la solution initiale par une heuristique de descente et de remontée

### 3.3.1 Schéma de l'heuristique

La méthode de descente et de remontée suit un scénario de recherche tabou et est décomposée en deux phases. La première phase est le coeur de la méthode de descente et de remontée et a pour but de minimiser les violations de contraintes d'interférences cocanaux et de canaux adjacents. Cette phase est basée sur un processus d'échange de blocs de canaux. Le schéma est le suivant. Pour chaque bloc de canaux $B_k^{i,p}$, nous cherchons son meilleur bloc de remplacement $B_{k'}^{i,p}$, c'est-à-dire celui donnant la plus grande amélioration (ou la plus petite détérioration) de la qualité du

réseau sur l'ensemble des périodes intermédiaires. Une fois tous les blocs $B_k^{i,p}$ considérés, nous procédons à l'échange de blocs conduisant à la meilleure amélioration (ou la plus petite détérioration) de la qualité du réseau.

La deuxième phase est une diversification de la recherche : dans le but d'explorer différentes possibilitées pour les ensembles de cellules $\mathcal{C}^I(p)$, $\mathcal{C}^T(p)$ et $\mathcal{C}^P(p)$, nous faisons des échanges de cellules entre $\mathcal{C}^T(p)$ et $\mathcal{C}^P(p)$.

### 3.3.2 Principe de la recherche tabou

Une méta-heuristique de type tabou est une amélioration des heuristiques gloutonnes ou des méthodes de descente et de remontée car elle permet de sortir d'un optimum local. En suivant cette approche, une solution initiale est trouvée et des mouvements locaux de descente dans la direction de la plus grande pente (faisons l'hypothèse que nous considérons un problème de minimisation) sont faits jusqu'à ce qu'un minimum local soit atteint. Quand c'est le cas, la solution correspondante et sa valeur associée sont mémorisées, c'est la meilleure solution rencontrée jusqu'ici. Un mouvement local de remontée est alors fait dans la direction de la plus petite pente et le mouvement inverse est interdit pour un nombre donné d'itérations. La méthode se termine si aucune amélioration par rapport à la meilleure solution connue n'a été trouvée pendant un cycle d'itérations de longueur fixée (voir, e.g., Glover et Laguna [7] ou Reeves [19] pour plus de détails).

### 3.3.3 Phase 1 : recherche tabou

Dans cette phase, nous considérons uniquement les cellules $C_i$ qui ne sont pas encore à leur affectation cible, i.e., les cellules $C_i \in \mathcal{C}^T(p) \cup \mathcal{C}^I(p)$. A chaque itération, nous sélectionnons le bloc $B_k^{i,p}$, pour tout $k, i, p$ admisssible, qui nous donne la meilleure amélioration (ou la plus petite détérioration) quand il est échangé par son bloc de remplacement $B_{k'}^{i,p}$.

#### 3.3.3.1 Recherche du meilleur candidat pour chaque bloc de la solution

Pour un bloc de canaux donné $B_k^{i,p}$, nous déterminons son meilleur bloc de remplacement $B_{k'}^{i,p}$ comme suit. Soit $\overline{p}$ la dernière période où la cellule $C_i$ ne change pas de statut (c'est-à-dire qu'elle ne change pas de statut pour les périodes $q = p, p+1, \ldots, \overline{p}$). Un bloc de canaux $B_\ell^{i,p}$ est un candidat potentiel pour remplacer $B_k^{i,p}$ s'il satisfait les contraintes (3), (4), (5), (6) et (7) du problème d'optimisation tel que défini à la figure 2.4.

Nous notons $\mathcal{R}(B_k^{i,p})$ l'ensemble des candidats potentiels pour remplacer $B_k^{i,p}$ à la période $p$. Pour chaque bloc $B_\ell^{i,p}$ de $\mathcal{R}(B_k^{i,p})$, nous estimons la variation de qualité $\delta_{k \leftarrow \ell}^{i,p}$ obtenue si nous affectons $B_\ell^{i,p}$ à la place de $B_k^{i,p}$, i.e., $B_k^{i,p} \leftarrow B_\ell^{i,p}$. C'est-à-dire nous calculons

$$\delta_{k \leftarrow \ell}^{i,q} = z(B_k^{i,q}) - z(B_\ell^{i,q}),$$

pour chaque période $q = p, p+1, \ldots, \overline{p}$.

Nous appellons *portée* du bloc $B_k^{i,p}$ à la période $p$ le nombre de périodes $q \in \{p, p+1, \ldots, \overline{p}\}$, c'est-à-dire que $portée(B_k^{i,p}) = \overline{p} - p + 1$.

À cause du voisinage de $B_k^{i,p}$ qui peut changer d'une période à l'autre, les variations peuvent prendre des valeurs différentes en fonction de $q$.

Soit

$$\Delta_{k\leftarrow\ell}^{i,p} = \sum_{q=p}^{\overline{p}} \delta_{k\leftarrow\ell}^{i,q}$$

la variation de qualité du réseau sur les périodes $q = p, p+1, \ldots, \overline{p}$ après un remplacement du bloc $B_k^{i,p}$ par $B_\ell^{i,q}$ dans la cellule $C_i$ pour ces périodes. En suivant la troisième règle de comparaison de la section 2.5.3, nous pouvons dire que :

- si $\Delta_{k\leftarrow\ell}^{i,p} > 0$, nous avons globalement une amélioration ;

- si $\Delta_{k\leftarrow\ell}^{i,p} < 0$, nous avons globalement une détérioration ;

- si $\Delta_{k\leftarrow\ell}^{i,p} = 0$, la solution reste constante.

Parmi tous les blocs candidats, nous choisissons celui qui a la plus grande amélioration (ou la plus petite détérioration). La règle de sélection peut être exprimée comme suit : sélectionner le bloc de remplacement $B_{k'}^{i,q}$ tel que :

$$\Delta_{k\leftarrow k'}^{i,p} = \max\Big\{\Delta_{k\leftarrow\ell}^{i,p} : \ell \text{ tel que } B_\ell \in \mathcal{R}(B_k^{i,p})\Big\}.$$

La figure 3.5 nous donne le pseudo-code de cette recherche.

**Exemple :** considérons un petit réseau dans lequel nous voulons remplacer un certain bloc $B_k$ appartenant à une cellules $C_i$ de la période $p$. Disons que nous avons 7 blocs

**Procédure** RECHERCHECANDIDATS
**Début**
  **Pour** $p = 1, \ldots, P-1$ **faire**
    **Pour** $i = 1, \ldots, n$ **faire**
      **Si** $C_i \in \mathcal{C}^I(p)$ *ou* $C_i \in \mathcal{C}^T(p)$ **alors**
        **Pour** *tout* $k$ *tel que* $B_k \in S_i^p$ **faire**
          évaluer $\Delta^{i,p}_{k \leftarrow \ell}$, pour tout $\ell$: $B_\ell \in \mathcal{F}_{candidats}(S_i^p)$ ;
          choisir $B_{k'}^{i,p}$ tel que
            $$\Delta^{i,p}_{k \leftarrow k'} = \max\left\{\Delta^{i,p}_{k \leftarrow \ell} : \ell \text{ tel que } B_\ell \in \mathcal{R}(B_k^{i,p})\right\};$$
        **FinPour**
      **FinSi**
    **FinPour**
  **FinPour**
**FinProcédure**

Figure 3.5 – *Recherche du meilleur candidat pour chaque bloc du réseau*

de remplacement possible: $B_1$, $B_2$, $B_3$, $B_4$, $B_5$, $B_6$ et $B_7$ pour remplacer $B_k$, et que $\overline{p}_1 = p+3$, $\overline{p}_2 = p+2$, $\overline{p}_3 = p+2$, $\overline{p}_4 = p+2$, $\overline{p}_5 = p+1$, $\overline{p}_6 = p+3$, $\overline{p}_7 = p+3$.

Les variations d'interférence des blocs candidats sont données dans le tableau 3.1 ci-dessous.

D'après les données du tableau 3.1, nous avons

$$z(B_7) = \max_{\ell : B_\ell \in \mathcal{R}(B_k^{i,p})} \Delta^{i,p}_{k \leftarrow \ell},$$

Nous sélectionnons $B_7$ comme candidat pour remplacer $B_k$.

Tableau 3.1 – *Variations d'interférence des blocs candidats*

| | période $q = p$ $z(B_k) = 36$ | | période $q = p+1$ $z(B_k) = 34$ | | période $q = p+2$ $z(B_k) = 37$ | | période $q = p+3$ $z(B_k) = 43$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $B_\ell$ | $z(B_\ell)$ | $\delta^{i,q}_{k\leftarrow\ell}$ | $z(B_\ell)$ | $\delta^{i,q}_{k\leftarrow\ell}$ | $z(B_\ell)$ | $\delta^{i,q}_{k\leftarrow\ell}$ | $z(B_\ell)$ | $\delta^{i,q}_{k\leftarrow\ell}$ | $\Delta^{i,p}_{k\leftarrow\ell}$ |
| $B_1$ | 40 | -4 | 28 | 8 | 51 | -14 | 54 | -11 | -21 |
| $B_2$ | 10 | 26 | 13 | 21 | 61 | -24 | 52 | -9 | 14 |
| $B_3$ | 36 | 0 | 48 | -14 | 51 | -14 | 50 | -7 | -35 |
| $B_4$ | 10 | 26 | 8 | 26 | 11 | 26 | – | - | 78 |
| $B_5$ | 20 | 16 | 28 | 6 | – | – | 40 | – | 22 |
| $B_6$ | 15 | 21 | 8 | 26 | 6 | 31 | 39 | 4 | 82 |
| $B_7$ | 0 | 36 | 8 | 26 | 26 | 21 | 35 | 8 | 91 |

### 3.3.3.2 Sélection du meilleur mouvement

Nous venons de chercher le meilleur candidat pour chaque bloc admissible de la solution S. Nous sommes maintenant prêts à sélectionner le bloc $B^{i,p}_k$, noté $B^*$, qui va être modifié. Il est choisi comme celui qui a le bloc de remplacement $B^{i,p}_{k'}$, noté $(B^*)'$, donnant la meilleure amélioration (ou la plus petite détérioration), i.e., nous sélectionnons le bloc $B^*$ tel que:

$$z(B^*) = \max_{B^{i,p}_k} \Delta^{i,p}_{k\leftarrow\ell}$$

c'est-à-dire,

$$z(B^*) = \max_{q=1,2,\ldots,P-1} \max_{i=1,2,\ldots,n} \left\{ \Delta^{i,p}_{k\leftarrow\ell}, \quad \text{pour tout } B^{i,p}_k : S^p_i \neq S^P_i \right\}.$$

Le bloc $B^*$ est remplacé par $(B^*)'$ dans la cellule $C_{i\bullet}$ aux périodes $p^*, p^* + 1, \ldots, \overline{p^*}$.

#### 3.3.3.3 Renforcement des contraintes de resyntonisation

En utilisant la règle d'échange décrite à la section précédente, nous ne garantissons pas le respect des contraintes de resyntonisation sur $limitP(p)$ et $limitT(p)$ (contrainte (2) du problème d'optimisation, voir figure 2.4). Si ces limites sont violées, nous devons faire quelques ajustements. Nous distinguons les cas suivants :

**cas 1.** $B^* \in S_{i\bullet}$ : $C_{i\bullet} \in \mathcal{C}^I(p^*)$, c'est-à-dire la cellule dans laquelle nous voulons faire le mouvement est toujours à son affectation initiale. Dans ce cas, $C_{i\bullet}$ va passer de $\mathcal{C}^I(p^*)$ à $\mathcal{C}^T_{new}(p^*)$. Si $|\mathcal{C}^T_{new}(p^*)| > limitP(p^*)$ après le remplacement de $B^*$ par $(B^*)'$, un mouvement "inverse" sur une cellule doit être fait : une autre cellule doit bouger de $\mathcal{C}^T_{new}(p^*)$ vers $\mathcal{C}^T_{old}(p^*)$ ou $\mathcal{C}^I(p^*)$. Nous faisons le mouvement donnant la plus grande amélioration (ou la plus petite détérioration) de la qualité du réseau.

**cas 2.** $B^* \in S_{i\bullet}$ : $C_{i\bullet} \in \mathcal{C}^P_{old}(p^*)$, c'est-à-dire la cellule dans laquelle nous voulons faire le mouvement est à son affectation cible. Dans ce cas, $C_{i\bullet}$ va passer de $\mathcal{C}^T_{old}(p^*)$ vers $\mathcal{C}^T_{new}(p^*)$. Si $|\mathcal{C}^T_{new}(p^*)| \geq limitT(p^*)$, un mouvement "inverse" sur une cellule doit être fait de la même manière que dans le cas précédent.

**cas 3.** $B^* \in S^{p^*}_{i\bullet}$ : $C_{i\bullet} \in \mathcal{C}^T_{new}(p^*)$, c'est-à-dire la cellule dans laquelle nous voulons faire le mouvement est à une affectation temporaire. Aucun mouvement "inverse" n'a besoin d'être fait pour respecter les contraintes de resyntonisation.

#### 3.3.3.4 Algorithme TRANSIT1

Nous décrivons à la figure 3.6 l'algorithme TRANSIT1 de la phase 1. Il correspond à une heuristique de recherche tabou qui vise à réduire les interférences cocanaux et de canaux adjacents. Elle est basée sur une procédure d'échange de blocs de canaux, appelée TABOUECHANGEBLOCS et donnée à la figure 3.7, qui suit les méthodes décritent dans les sections 3.3.3.1 et 3.3.3.2.

En pratique, le paramètre *rep* a été initialisé à 300 et le paramètre $iterRepMax$ à 10. Le paramètre $iterTabu$ détermine le nombre d'itérations de base pour lesquelles un bloc est tabou. Nous définissons les bornes $minIterTabu$ et $maxIterTabu$ et à chaque itération nous choisissons de manière (pseudo-) aléatoire une valeur de $iterTabu$ telle que $minIterTabu \leq iterTabu \leq maxIterTabu$.

---

**Procédure** TRANSIT_PHASE-1_TABOU :
**Début**
$\mathcal{S}^{best} \leftarrow \mathcal{S}$ ;
$z(\mathcal{S})^{best} \leftarrow z(\mathcal{S})$ ;
$iter \leftarrow 0$ ; // Initialisation du compteur des itérations de base.
$iterRep \leftarrow 0$ ; // Initialisation du compteur des macro-itérations.
Initialiser $rep$ ; // Nombre max. d'itérations de base successives qui peuvent
// être faites sans aucune amélioration de la qualité.
Initialiser $iterRepMax$ ; // Limite sur le compteur des macro-itérations.
Initialiser $minIterTabu$ et $maxIterTabu$ ; // Bornes pour initialiser $iterTabu$.
$change \leftarrow$ .true. ;
**TantQue** $change$ **et** $iterRep < iterRepMax$ **faire**
    $change \leftarrow$ .false. ;
    $iterRep \leftarrow iterRep + 1$ ;
    **Répéter** $rep$ **fois**
        $iter \leftarrow iter + 1$ ;
        Faire un mouvement avec la procédure TABOUECHANGEBLOCS ;
        Renforcer les contraintes de resyntonisation si nécessaire ;
        Soit $\mathcal{S}^{new}$ l'affectation de canaux résultantes ;
        **Si** $z(\mathcal{S}^{new}) \prec z(\mathcal{S}^{best})$ **alors**
            $\mathcal{S}^{best} \leftarrow \mathcal{S}^{new}$ ;
            $change \leftarrow .true.$ ;
        **FinSi**
        $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S}^{new}$ ;
    **FinRépéter**
**FinTantQue**
**FinProcédure**

---

Figure 3.6 – *Phase 1 tabou : réduire les interférences cocanaux et de canaux adjacents*

**Procédure** TABOUECHANGEBLOCS.
**Début**
Initialiser $iterTabu$ : $minIterTabu \leq iterTabu \leq maxIterTabu$ ;
RECHERCHECANDIDATS ; // Meilleur candidat pour chaque bloc admissible.
Soit $k^*, i^*, p^*$ tel que : $\Delta^{i^*,p^*}_{k^* \leftarrow (k^*)'} = \max\limits_{B^{i,p}_k} \Delta^{i,p}_{k \leftarrow k'}$ ;
Posons $B^* = B^{i^*,p^*}_{k^*}$ et $(B^*)' = B^{i^*,p^*}_{(k^*)'}$ ;
Soit $\mathcal{S}^{new}$ la qualité si nous faisons le mouvement $B^* \leftarrow (B^*)'$ ;
$\mathcal{L} \leftarrow \emptyset$ ; // Liste des blocs tabous qui n'améliore pas la solution courante.
*change* $\leftarrow$ .true. ;
**TantQue** *change* **faire**
**Si** $B^*$ est un bloc *tabou* **alors**
**Si** $z(\mathcal{S}^{new}) \preceq z(\mathcal{S}^{best})$ **alors**
aspirer (i.e., ignorer) le facteur tabou sur $B^*$ ;
$B^* \leftarrow (B^*)'$ ;
*change* $\leftarrow$ .false. ;
**sinon**
$\mathcal{L} \leftarrow \mathcal{L} \cup \{B^*\}$ ;
soit $k^*, i^*$ tel que : $\Delta^{i^*,p^*}_{k^*} = \max\limits_{B^{i,p}_k} \{\Delta^{i,p}_{k \leftarrow k'} : B_k \notin \mathcal{L}\}$ ;
mettre à jour $B^*$, $(B^*)'$ and $\mathcal{S}^{new}$ ;
**FinSi**
**sinon**
selectionner $B^* \leftarrow (B^*)'$ comme le prochain mouvement :
soit $\mathcal{S}$ la nouvelle solution d'affectation :
**FinSi**;
**FinTantQue**
**Si** $z(\mathcal{S}) + \Delta^* \preceq z(\mathcal{S}^{best})$ **alors**
$\mathcal{S}^{best} \leftarrow \mathcal{S}$ ;
**FinSi**
Soit $\Delta^* = \Delta^{i^*,p^*}_{k^* \leftarrow (k^*)'}$ ; // Variation de la qualité.
**Si** $\Delta^* < 0$ (déterioration) **alors**
mettre $B^*$ tabou pour $iterTabu$ itérations ;
**FinSi**
Mettre à jour les autres facteurs tabou ;
**FinProcédure**

Figure 3.7 – *Procédure d'échange de deux blocs*

### 3.3.4 Phase 2 : diversification de la recherche

Nous explorons deux types de modifications des ensembles $\mathcal{C}^P(p)$ et $\mathcal{C}^T(p)$. Soit $p$ la plus mauvaise période de $\mathcal{S}$.

**Type 1 :** *Modification d'une cellule de* $\mathcal{C}^P(p)$. On modifie une cellule qui est déjà à son affectation cible. Soit $C_i \in \mathcal{C}^P(p)$ une cellule dont le niveau d'interférence est le plus grand sur l'ensemble des cellules de $\mathcal{C}^P(p)$ pour la période $p$. Parmi les blocs de $C_i$, soit $B_k$ le bloc qui possède le plus grand niveau d'interférence, c'est-à-dire,

$$z(B_k) = \max_{B_\ell \in C_i} \{z(B_k) : C_i^p \in \mathcal{C}^p(p)\}.$$

On remplace le bloc $B_k$ par le bloc $B_{k'}$ qui minimise le niveau d'interférence, c'est-à-dire,

$$z(B_{k'}) = \min_{B_\ell \in \mathcal{R}(B_k^{i,p})} \Big\{z(B_\ell) : C_i \in \mathcal{C}^p(p)\Big\}.$$

où $\mathcal{R}(B_k^{i,p})$ est l'ensemble des blocs candidats défini ci-dessus.

La cellule $C_i$ appartient maintenant à l'ensemble $\mathcal{C}^T(p)$ car $S_i^p \neq S_i^P$ et $S_i^p \neq S_i^{p-1}$.

**Type 2 :** *Modification d'une cellule de* $\mathcal{C}^T(p)$.

A l'issue de l'opération précédente, une cellule a donc été mise à une affectation temporaire à la période $p$. Il faut donc choisir une cellule $C_j$ de $\mathcal{C}^T(p)$ à mettre à sa valeur cible $S_i^P$, de sorte que : $limitP(p) + limitT(p) \leq limit(p)$. On choisit une cellule $C_j$ de $\mathcal{C}^T(p)$, telle que la modification de son affectation actuelle à sa valeur cible, donne la meilleure amélioration de la qualité du réseau.

Sans prendre de précautions, la phase 2 peut gravement détériorer la qualité du réseau. En effet, si le mouvement de type 1 crée une interférence élevée, il sera difficile de réparer ce lien pour revenir à un niveau d'interférence acceptable si l'environnement de la cellule n'est pas favorable. Pour limiter ce problème, nous déterminons le niveau d'interférence le plus élevé $m^{max}(S)$ dans la solution S. Nous n'autorisons un mouvement de la phase 2 que s'il ne dégrade pas S d'un niveau supérieur à $m^{max}(S)$. Une telle implantation est donnée à la figure 3.8. Une autre alternative, plus sévère, est d'autoriser un mouvement dans la phase 2 que s'il ne dégrade pas la solution courante S.

**Procédure** TRANSIT_PHASE-2
**Début**

// Détermination du mouvement de type 1 :

Trouver $p$, la plus mauvaise période de $\mathcal{S}$ ;

Sélectionner $C_i^p : z(S_i^p) = \max_{C_j^p \in \mathcal{C}^P(p)} z(S_j^p)$ ; // La plus mauvaise cellule.

Sélectionner $B_k^{i,p} : z(B_k^{i,p}) = \max_{B_\ell^{i,p} \in S_i^p} z(B_\ell^{i,p})$ ; // Plus mauvais bloc de $S_i^p$.

Rechercher $B_{k'}^{i,p}$,le meilleur candidat pour remplacer $B_k^{i,p}$ ;

Soit $\delta_i = z(B_k^{i,p}) - z(B_{k'}^{i,p})$ ; // Variation de la qualité.

// Détermination du mouvement de type 2 :

**Pour** $i = 1, \ldots, n$ **faire**

**Si** $C_i^p \notin \mathcal{C}^P(p)$ **alors**

évaluer $\delta_i^p = \sum_{q=p}^{P-1} \left( z(S^q) - z((S^q \setminus S_i^q) \cup S_i^P) \right)$ ;

**sinon**

$\delta_i^p = -\infty$ ;

**FinSi**

**FinPour**

// Cellule qui donne la meilleure amélioration :

Sélectionner $C_j^p : \delta_j = \max_{i=1,\ldots,n} \delta_i$ ;

Soit $\delta = \delta_i + \delta_j$ ; Variation de qualité totale.

Chercher $m^{max}(\mathcal{S})$ ; // Niveau d'interférence le plus élevé de $\mathcal{S}$.

Soit $m^{phase2}$ le niveau d'interférence le plus élevé de $\delta$ :

**Si** $m^{max}(\mathcal{S}) \leq m^{phase2}$ **alors**

$B_k^{i,p} \leftarrow B_{k'}^{i,p}$ ; // Exécution du mouvement de type 1.

**Pour** $q = p, \ldots, p-1$ **faire**

$S_j^q \leftarrow (S^q \setminus S_i^q) \cup S_i^P$ ; // Exécution du mouvement de type 2.

**FinPour**

**FinSi**

**FinProcédure**

Figure 3.8 – *Phase 2 : diversification*

### 3.3.5 TRANSIT: l'algorithme de résolution

Aprés l'initialisation, l'algorithme est un enchaînement des phases 1 et 2, décrites dans les sections précédentes. Le paramètre *nbEnchainements* est le nombre d'enchaînements phase 2/phase 1 que l'utilisateur souhaite. Nous finissons toujours par une phase d'optimisation (phase 1). L'algorithme est donné à la figure 3.9.

---

**Procédure** TRANSIT
**Début**
  Initialiser *nbEnchainements* ;
  TRANSIT0 ;
  TRANSIT_PHASE-1_TABOU ;
  *iterEnchainement* $\leftarrow$ 0 ;
  **TantQue** *iterEnchainement* $\leq$ *nbEnchainements* **faire**
    TRANSIT_PHASE-2 ;
    TRANSIT_PHASE-1_TABOU ;
    *iterEnchainement* $\leftarrow$ *iterEnchainement* + 1 ;
  **FinTantQue**
**FinProcédure**

---

Figure 3.9 – TRANSIT *: l'algorithme de résolution*

# CHAPITRE 4

# Résultats

## 4.1 Implantation

L'implantation de TRANSIT a été faite en programmation orientée objet avec le langage C++, sous environnement UNIX. Les tests ont été réalisés sur des stations SUN/Ultra 1 Creator avec $256Mb$ de mémoire et une horloge de $167MHz$.

Pour tous les essais réalisés, et sauf indications contraires, les paramètres *rep*, $iterRepMax$ (cf figure 3.6), $tolVReq$ (cf figure 2.4) et $nbEnchainements$ (cf figure 3.9) ont été fixés comme suit :

- $rep = 100$ ;
- $iterRepMax = 5$ ;
- $tolVReq = 4$ ;
- $nbEnchainements = 5$.

## 4.2 Construction des matrices $M^{co}$ et $M^{adj}$

**Génération des matrices $M^{co}$ et $M^{adj}$ :**

Lors de la réception des données de BELL MOBILITÉ CELLULAIRE, nous n'avions pas directement les matrices $M^{co}$ et $M^{adj}$. Nous avions la matrice d'adjacence $A$ entre les secteurs d'un réseau de $n = 359$ cellules, où l'élément générique $a_{ij}$ est tel que :

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 \text{ si les cellules } C_i \text{ et } C_j \text{ ne sont pas immédiatement} \\ \quad \text{voisines géographiquement ;} \\ 1 \text{ si } C_i \text{ et } C_j \text{ sont immédiatement voisines géographiquement.} \end{cases}$$

En pratique, il est fortement déconseillé d'affecter des canaux identiques ou adjacents à deux secteurs qui ont un niveau d'incompatibilité supérieur ou égal à $m^{co/adj} = 5$. Nous avons donc distingué cinq cas dans la génération des composantes des matrices cocanal et d'adjacence. Ces cinq cas sont résumés ci-dessous.

**Cas 1.** $a_{ij} = 1$ et les deux cellules $C_i$ et $C_j$ appartiennent au même site :

$m_{ij}^{co} = m_{ij}^{adj} = 10$.

L'affectation de canaux adjacents ou identiques est interdite.

**Cas 2.** $a_{ij} = 1$, i.e., les cellules sont immédiatement voisines :

$m_{ij}^{co} = m_{ij}^{adj} = 9$ ;

L'affectation de canaux adjacents ou identiques est très fortement déconseillée.

**Cas 3.** $a_{ij} = 0$ et $C_j$ est une cellule voisine d'une voisine immédiate de $C_i$ :

$m_{ij}^{co}$ = un coefficient choisi aléatoirement entre 5 et 9 (rappelons que le seuil

d'acceptabilité est $\overline{m}^{co} = 5$ ;

$m_{ij}^{adj}$ = un coefficient choisi aléatoirement entre 5 et $m_{ij}^{co}$ (rappelons que le seuil d'acceptabilité est $\overline{m}^{adj} = 5$ ;

L'affectation de canaux adjacents ou identiques est fortement déconseillée.

**Cas 4.** $a_{ij} = 0$ et $C_j$ est une cellule voisine d'une voisine d'une voisine immédiate de $C_i$ :

$m_{ij}^{co}$ = un coefficient choisi aléatoirement entre 0 et 4 ;

$m_{ij}^{adj}$ = un coefficient choisi aléatoirement entre 0 et $m_{ij}^{co}$.

L'affectation de canaux adjacents ou identiques est tolérée.

**Cas 5.** Pour toutes les autres configurations :

$m_{ij}^{co} = m_{ij}^{adj} = 0$.

Il n'y a aucune contrainte d'affectation : on peut utiliser des canaux adjacents ou identiques sans aucun dommage pour les performances du réseau.

Les matrices ainsi générées ont été utilisées pour développer TRANSIT. mais aussi ECLIPSE, un logiciel cherchant une solution optimale et basé sur une recherche tabou similaire à celle de TRANSIT (voir Jaumard [11]).

Il est également possible de générer ces matrices à partir de mesures extensives dans le champ électromagnétique ou en utilisant un modèle de propagation théorique (voir Hata [9] ou McMahon [16]).

**Détermination du seuil géographique pour l'heuristique gloutonne** TRANSIT0_GÉOGRAPHIQUE :

La construction des matrices de compatibilités nous indique que les cellules $C_i$ et $C_j$ sont des voisines immédiates, ou qui appartiennent au même site, si $m_{ij}^{co/adj} \geq 9$ (voir les cas 1 et 2 du paragraphe précédent). Nous fixons donc notre paramètre *SeuilGeographique* à 9. Ce seuil est fonction des matrices de compatiblités et peut être ajusté par la suite. Dans notre cas, on pourrait prendre aussi $SeuilGeographique = 5$ : pour une cellule $C_i$, cela reviendrait à choisir les cellules immédiatement voisines et les voisines de ses voisines immédiates.

**Relation entre la matrice de composantes $D$ de la littérature et nos matrices $M^{co}$ et $M^{adj}$ :**

Àpartir de $M^{co}$ et $M^{adj}$, nous pouvons reconstruire la matrice $D$ de la manière suivante :

si $m_{ij}^{co} \geq \overline{m}^{co} = 5$ et $m_{ij}^{adj} \geq \overline{m}^{adj} = 5$, alors $d_{ij} = 2$ ;

si $m_{ij}^{co} \geq \overline{m}^{co} = 5$ et $m_{ij}^{adj} < \overline{m}^{adj} = 5$, alors $d_{ij} = 1$ ;

si $m_{ij}^{co} < \overline{m}^{co} = 5$ et $m_{ij}^{adj} < \overline{m}^{adj} = 5$, alors $d_{ij} = 0$ ;

si $i = j$, alors $d_{ij} = 17$ ;

**Filtrage des matrices $M^{co}$ et $M^{adj}$ :**

Les solutions intermédiaires fournies par TRANSIT vont être fonction de la qualité de la solution initiale $S^0$ et de la qualité de la solution cible $S^P$. Si $z(S^0)$

et $z(S^P)$ sont loin de l'optimalité, il sera alors difficile de juger des performances de TRANSIT de manière absolue. C'est pourquoi, pour le developpement de TRANSIT, nous utilisons des matrices $M^{co}$ et $M^{adj}$ modifiées de manière à garantir une solution initiale et finale (quasi-)optimale (c'est-à-dire $z(S^1) \approx z(S^P) \approx 0$). Ces matrices modifiées éliminent les "bruits" liés aux solutions $S^0$ et $S^P$.

Pour construire les matrices modifiées, dites matrices filtrées, nous utilisons une méthode développée sur une approche similaire au problème décrit à la section 2.2 (voir Adjakplé et Jaumard [1] pour la méthode). Cette méthode utilise les matrices de compatibilité $M^{co}$ et $M^{adj}$ construites à la section précédente et nous fournit une solution $S$.

À partir de cette solution $S$, nous construisons la liste des paires de cellules en conflit. C'est à partir de cette liste que nous construisons les matrices de compatibilité filtrées (voir Labit [14]).

Pour chaque matrice que nous voulons filtrer, le principe est le suivant : pour chaque paire de cellules $(C_i, C_j)$ pour lesquelles un conflit existe, on pose $m_{ij} = 0$. Pour tous les autres éléments de la matrice, on tire un nombre au hasard entre 1 et 9. Cependant, pour respecter les densités des matrices originales, on introduit un facteur correctif sur le nombre de zéros de la matrice. La question de la densité est abordée à la section suivante 4.2.

Le principe peut donc être résumé ainsi :

On note $M^{co}_{filtrée}$ et $M^{adj}_{filtrée}$ respectivement les matrices filtrées des contraintes cocanaux et de canaux adjacents, et $d$ un nombre aléatoire entre zéro et un, calculé pour chaque paire de cellules.

$$(m^{co}_{ij})_{filtrée} = \begin{cases} 0 \text{ s'il existe un conflit de type cocanal} \\ \quad \text{dans la solution S entre les cellules } C_i \text{ et } C_j \\ \quad \text{ou si } d > densité(M^{co}); \\ 10 \text{ si } i = j \text{ ; } 1, \ldots, 9 \text{ sinon .} \end{cases}$$

$(i = 1, 2, \ldots, n, \text{ et } j = 1, 2, \ldots, n)$.

$$(m^{adj}_{ij})_{filtrée} = \begin{cases} 0 \text{ s'il existe un conflit de type adjacent} \\ \quad \text{dans la solution S entre les cellules } C_i \text{ et } C_j \\ \quad \text{ou si } d > densité(M^{adj}); \\ 10 \text{ si } i = j \text{ ;} \\ 1, \ldots, 9 \text{ sinon.} \end{cases}$$

$(i = 1, 2, \ldots, n, \text{ et } j = 1, 2, \ldots, n)$.

Lors des expériences numériques préliminaires, nous avons utilisé les matrices de compatibilité filtrées.

### Densité des matrices de compatibilité

La densité des matrices de compatibilité détermine la difficulté à résoudre le problème. À chaque coefficient $m^{co}_{ij} \neq 0$ ou $m^{adj}_{ij} \neq 0$, nous avons une contrainte cocanal ou d'adjacence respectivement. Si la densité est élevée, le nombre de contraintes est donc lui aussi important. Les densités des matrices $M^{co}$ et $M^{adj}$ sont données par les figures 4.1 et 4.2.

Lors de la construction des matrices filtrées, nous avons pris garde d'avoir une densité égale, sinon supérieure, aux matrices originales. Il en résulte une densité légérement supérieure de $M^{co}_{filtrée}$ et $M^{adj}_{filtrée}$ par rapport à $M^{co}$ et $M^{adj}$ respectivement. On observe, par contre, que le filtrage a eu pour effets de répartir plus uniformément la densité par coefficients. En utilisant la matrice $M^{co}$, la difficulté sera concentrée pour les liens de coefficients $m^{co} = 7, 8$ et 9, alors qu'avec la matrice $M^{co}_{filtrée}$, la difficulté sera uniforment répartie.

```
La taille de la matrice est : n = 359
Le nombre d'arcs est : 10959

La densite de la matrice du fichier 'mtl.co' est 0.1705 = 17.05%

Coefficients de valeur 0 :      82.72 pourcent  ou : 106604 coefficients
Coefficients de valeur 1 :      1.87 pourcent   ou :   2414 coefficients
Coefficients de valeur 2 :      3.15 pourcent   ou :   4064 coefficients
Coefficients de valeur 3 :      4.22 pourcent   ou :   5434 coefficients
Coefficients de valeur 4 :      0.16 pourcent   ou :    200 coefficients
Coefficients de valeur 5 :      0.45 pourcent   ou :    586 coefficients
Coefficients de valeur 6 :      0.75 pourcent   ou :    964 coefficients
Coefficients de valeur 7 :      1.17 pourcent   ou :   1502 coefficients
Coefficients de valeur 8 :      1.39 pourcent   ou :   1788 coefficients
Coefficients de valeur 9 :      3.41 pourcent   ou :   4394 coefficients
Coefficients de valeur 10 :     0.72 pourcent   ou :    931 coefficients
```

Figure 4.1 – *Densité de la matrice* $M^{co}$

```
La taille de la matrice est : n = 359
Le nombre d'arcs est :  1362

La densite de la matrice du fichier 'mtl.adj' est 0.0212 = 2.12%

Coefficients de valeur 0 :      97.61 pourcent  ou : 125798 coefficients
Coefficients de valeur 1 :      0.01 pourcent   ou :     18 coefficients
Coefficients de valeur 2 :      0.07 pourcent   ou :     84 coefficients
Coefficients de valeur 3 :      0.11 pourcent   ou :    140 coefficients
Coefficients de valeur 4 :      0.15 pourcent   ou :    196 coefficients
Coefficients de valeur 5 :      0.19 pourcent   ou :    244 coefficients
Coefficients de valeur 6 :      0.22 pourcent   ou :    288 coefficients
Coefficients de valeur 7 :      0.26 pourcent   ou :    334 coefficients
Coefficients de valeur 8 :      0.28 pourcent   ou :    364 coefficients
Coefficients de valeur 9 :      0.38 pourcent   ou :    484 coefficients
Coefficients de valeur 10 :     0.72 pourcent   ou :    931 coefficients
```

Figure 4.2 – *Densité de la matrice* $M^{adj}$

```
La taille de la matrice est : n = 359
Le nombre d'arcs est : 11491

La densite de la matrice du fichier 'mtlfiltree.co' est 0.1788 = 17.88%

Coefficients de valeur 0 :      81.89 pourcent  ou : 105540 coefficients
Coefficients de valeur 1 :      1.92 pourcent   ou :   2478 coefficients
Coefficients de valeur 2 :      1.89 pourcent   ou :   2436 coefficients
Coefficients de valeur 3 :      1.94 pourcent   ou :   2498 coefficients
Coefficients de valeur 4 :      2.00 pourcent   ou :   2574 coefficients
Coefficients de valeur 5 :      2.05 pourcent   ou :   2642 coefficients
Coefficients de valeur 6 :      2.03 pourcent   ou :   2610 coefficients
Coefficients de valeur 7 :      1.95 pourcent   ou :   2512 coefficients
Coefficients de valeur 8 :      1.98 pourcent   ou :   2546 coefficients
Coefficients de valeur 9 :      2.08 pourcent   ou :   2686 coefficients
Coefficients de valeur 10 :     0.28 pourcent   ou :    359 coefficients
```

Figure 4.3 – *Densité de la matrice* $M^{co}_{filtrée}$

```
La taille de la matrice est : n = 359
Le nombre d'arcs est :  1866

La densite de la matrice du fichier 'mtlfiltree.adj' est 0.0290 = 2.90%

Coefficients de valeur 0 :      96.83 pourcent  ou : 124790 coefficients
Coefficients de valeur 1 :      0.58 pourcent   ou :    752 coefficients
Coefficients de valeur 2 :      0.54 pourcent   ou :    690 coefficients
Coefficients de valeur 3 :      0.48 pourcent   ou :    624 coefficients
Coefficients de valeur 4 :      0.39 pourcent   ou :    500 coefficients
Coefficients de valeur 5 :      0.32 pourcent   ou :    416 coefficients
Coefficients de valeur 6 :      0.24 pourcent   ou :    312 coefficients
Coefficients de valeur 7 :      0.20 pourcent   ou :    256 coefficients
Coefficients de valeur 8 :      0.10 pourcent   ou :    132 coefficients
Coefficients de valeur 9 :      0.04 pourcent   ou :     50 coefficients
Coefficients de valeur 10 :     0.28 pourcent   ou :    359 coefficients
```

Figure 4.4 – *Densité de la matrice* $M^{adj}_{filtrée}$

## 4.3 Résultats numériques

L'utilisation d'un vecteur pour évaluer une solution intermédiaire de resyntonisation $S$ permet difficilement de quantifier l'ampleur des variations au cours de la recherche d'un optimum. Pour pallier à ce problème, on convertit le vecteur $z(S)$ en un réel, noté $r(S)$. Nous proposons de faire la somme des éléments du vecteur $z(S)$, c'est-à-dire la somme du nombre de liens, niveau par niveau. Pour conserver la discrimination des niveaux d'interférence, nous introduisons des pénalités $p_m^{co}$ et $p_m^{adj}$. La qualité réelle $r(S)$ est alors :

$$r(S) = \sum_{m=1}^{10} \Big( p_m^{co} z_{2m}(S) + p_m^{adj} z_{2m-1}(S) \Big).$$

Les pénalités utilisées sont définies dans le tableau 4.1. Elles traduisent le fait que toute interférence de niveau $m$ est préférable à une interférence de niveau $m+1$, donc $p_{m+1}^{co/adj} > p_m^{co/adj}$, et qu'entre une interférence cocanal et une interférence d'adjacence de même niveau $m$, on préfère l'interférence d'adjacence, donc $p_m^{co} > p_m^{adj}$.

Une solution $\mathcal{S}$ est donc évaluée par $z(\mathcal{S}) = \Big( z(S^1), \ldots, z(S^{P-1}) \Big)$ qui peut être convertie en $r(\mathcal{S}) = \Big( r(S^1), \ldots, r(S^{P-1}) \Big)$. La qualité en nombres réels $r(\mathcal{S})$ nous donne maintemant un moyen de comparer les différentes améliorations apportées à $\mathcal{S}$. Nous pouvons tracer une représentation graphique de $r(S)$ en fonction des itérations.

Tableau 4.1 – *Pénalités pour calculer $r(S)$*

| $m_{ij}^{co/adj}$ | $p_m^{co}$ | $p_m^{adj}$ |
|---|---|---|
| 1 | $2^1$ | $2^0$ |
| 2 | $2^3$ | $2^2$ |
| 3 | $2^5$ | $2^4$ |
| 4 | $2^7$ | $2^6$ |
| 5 | $2^9$ | $2^8$ |
| 6 | $2^{11}$ | $2^{10}$ |
| 7 | $2^{13}$ | $2^{12}$ |
| 8 | $2^{15}$ | $2^{14}$ |
| 9 | $2^{17}$ | $2^{16}$ |
| 10 | $2^{19}$ | $2^{18}$ |

### 4.3.1 Validation de TRANSIT

Pour la validation de TRANSIT, nous avons modifié le code informatique dans l'objectif de chercher une solution optimale, ou quasi-optimale, d'affectation de blocs de canaux à partir d'une solution initiale.

L'idée est de comparer les résultats de TRANSIT avec un logiciel cherchant aussi une solution optimale (ou quasi-optimale) pour une même solution initiale, avec exactement les mêmes paramètres et les mêmes données. Le logiciel utilisé à cette fin est ECLIPSE, qui a été développé pour BELL MOBILITÉ CELLULAIRE parallèlement à TRANSIT. La solution initiale, fournie par ECLIPSE, a été construite avec une heuristique gloutonne.

Nous avons utilisé les matrices de compatibilité non filtrées $M^{co}$ et $M^{adj}$. Les paramètres *rep*, $iterRepMax$ et $tolVReq$ ont été fixés aux valeurs suivantes :

- $rep = 100$ ;
- $iterRepMax = 10$ ;
- $tolVReq = 2$.

Dans cette comparaison, les paramètres de la recherche tabou sont :

- $minTabuIter = 50$ ;
- $maxTabuIter = 30$.

Les résultats de TRANSIT et d'ECLIPSE sont résumés à la figure 4.5. On observe que les deux programmes ont les mêmes niveaux d'interférences maximales : niveau $m = 6$ pour les interférences cocanaux et $m = 5$ pour les interférences de canaux adjacents. Peu de liens d'interférence sont supérieurs aux seuils $\overline{m}^{co} = 5$ et $\overline{m}^{adj} = 5$. En terme de liens d'interférences, la solution trouvée par TRANSIT présente un peu plus de liens cocanaux mais moins de liens de canaux adjacents que la solution d'ECLIPSE. Les interférences cocanaux étant plus dommageables au réseau, nous dirons que la solution d'ECLIPSE est légèrement meilleure que celle de TRANSIT en terme de liens cocanaux et de canaux adjacents. Par contre, la solution de TRANSIT a nettement moins de violations de la contrainte d'espacement : 2,23% contre 6,69% pour ECLIPSE. Les violations de la contrainte de spectre étendu sont très proches.

Les deux solutions ne sont pas identiques, mais nous dirons qu'elles sont similaires. Ces résultats nous permettent de valider le code et la méthode de recherche tabou utilisés pour résoudre le problème, c'est-à-dire valider TRANSIT.

Interférences cocanaux (Co) et de canaux adjacents (Adj) :
(nombre de liens de niveau m)

| | Transit | | Eclipse | |
|---|---|---|---|---|
| m | Co | Adj | Co | Adj |
| 1 | 912 | 24 | 839 | 24 |
| 2 | 813 | 47 | 822 | 62 |
| 3 | 377 | 22 | 385 | 11 |
| 4 | 16 | 31 | 8 | 31 |
| 5 | 20 | 4 | 8 | 23 |
| 6 | 4 | 0 | 4 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Violations de la contrainte d'espacement :

| | Transit | | Eclipse | |
|---|---|---|---|---|
| | Faible | Forte | Faible | Forte |
| nombre de cellules | 0 | 8 | 1 | 24 |
| nombre d'antennes | 0 | 8 | 1 | 28 |
| nombre de canaux | 0 | 33 | 1 | 149 |

Violations de la contrainte de spectre étendu :

| Transit | Eclipse |
|---|---|
| 30 cellules | 29 cellules |

Figure 4.5 – *Comparaison de* TRANSIT *et d'*ECLIPSE

### 4.3.2 Résultats pour les matrices de compatibilité filtrées $M^{co}_{filtrée}$ et $M^{adj}_{filtrée}$

L'intérêt d'analyser les résultats de TRANSIT obtenus avec les matrices de compatibilité $M^{co}_{filtrée}$ et $M^{adj}_{filtrée}$ est de juger des performances de la méthodes de manière absolue, c'est-à-dire sans avoir de "bruits" liés aux solutions $S^0$ et $S^P$.

#### 4.3.2.1 Résultats de l'heuristique gloutonne TRANSIT0

C'est à cette étape de TRANSIT que nous devons choisir la cardinalité maximale des ensembles $\mathcal{C}^P_{new}(p)$ et $C^T_{new}(p)$, c'est-à-dire fixer $limitP(p)$ et $limitT(p)$ pour $p = 1, \ldots, P$ (rappellons que nous avons $P-1$ périodes intermédiaires mais $P$ resyntonisations à effectuer). Dans un premier temps, ces valeurs ont été fixées de manière uniforme. Pour $n = 359$ et sachant que la dernière resyntonisation ne nécessite pas de cellules tampons, nous devons avoir environ $limitP(p) = 48$ et $limitT(p) = 52$ pour toutes les périodes $p$ ($p = 1, \ldots, P$). La limite de 100 cellules à resyntoniser par période n'est pas dépassée. Les données exactes sont précisées à la figure 4.6.

```
PERIODE_1      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 51    #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 49
PERIODE_2      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 52    #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 48
PERIODE_3      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 52    #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 48
PERIODE_4      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 52    #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 48
PERIODE_5      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 52    #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 48
PERIODE_6      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 100   #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 0
```

Figure 4.6 – *Données pour une répartition quasi-uniforme de $limitP(p)$ et $limitT(p)$*

Les résultats associés à ce choix sont donnés à la figure 4.7. On observe que les périodes dite centrales, c'est-à-dire pour $p = 2$ et $p = 3$, ont une qualité moins bonne que les autres périodes, car $z(S^2)$ et $z(S^3)$ ont un niveau d'interférence maximum de $m^{max}(S^{2/3}) = 5$.

---

Nombre de liens d'interférences COCANAUX de niveau m :

| m | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 202 | 287 | 348 | 324 | 124 | 0 |
| 2 | 0 | 140 | 226 | 239 | 187 | 26 | 0 |
| 3 | 0 | 75 | 153 | 128 | 102 | 7 | 0 |
| 4 | 0 | 84 | 168 | 192 | 3 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Nombre de liens d'interférences de CANAUX ADJACENTS de niveau m :

| m | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 18 | 105 | 217 | 193 | 198 | 66 | 0 |
| 2 | 8 | 78 | 138 | 131 | 84 | 31 | 0 |
| 3 | 7 | 43 | 105 | 120 | 102 | 10 | 0 |
| 4 | 0 | 64 | 99 | 84 | 16 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 41 | 39 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| r(S)= | 217 | 21566 | 52893 | 52601 | 10734 | 1385 | 0 |

---

Figure 4.7 – TRANSIT0 : *Résultats pour une répartition quasi-uniforme de limit$P(p)$ et limit$T(p)$*

Afin de chercher à répartir la dégradation de la qualité lors de la resyntonisation, nous avons modifié les limites sur les cardinalités maximales. Nous mettons plus de cellules tampons dans les premières périodes intermédiaires avec moins de cellules à resyntoniser à leur valeur cible (cf figure 4.8). On remarquera que pour certaines périodes $limit(p) = 110$.

```
PERIODE_1      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 41    #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 59
PERIODE_2      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 44    #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 76
PERIODE_3      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 43    #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 57
PERIODE_4      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 43    #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 67
PERIODE_5      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 68    #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 42
PERIODE_6      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 110   #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 0
```

Figure 4.8 – *Données pour une répartition non uniforme de $limitP(p)$ et $limitT(p)$*

Les résultats obtenus, donnés à la figure 4.9, sont alors homogènes d'une période à l'autre. Nous n'avons aucun lien d'interférence pour des niveaux $m$ supérieurs à 3. Ce sont ces données que nous avons utilisées comme solutions initiales dans la suite des expériences numériques de la section 4.3.2. Lors de cette recherche d'une qualité uniformisée sur les périodes intermédiaires, nous avons observé que les résultats sont très sensibles à de petites variations de $limitP(p)$ et de $limitT(p)$.

Nombre de liens d'interférences COCANAUX de niveau m :

| m | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 97 | 214 | 271 | 206 | 102 | 0 |
| 2 | 0 | 99 | 180 | 229 | 151 | 99 | 0 |
| 3 | 0 | 35 | 70 | 36 | 7 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Nombre de liens d'interférences de CANAUX ADJACENTS de niveau m :

| m | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 18 | 69 | 238 | 209 | 159 | 94 | 0 |
| 2 | 8 | 85 | 78 | 136 | 123 | 114 | 0 |
| 3 | 7 | 37 | 98 | 115 | 83 | 13 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| r(S)= | 217 | 3857 | 7698 | 7782 | 5006 | 2415 | 0 |

Figure 4.9 – TRANSIT0 : *Résultats pour une répartition non-uniforme de limit$P(p)$ et limit$T(p)$*

#### 4.3.2.2 Résultats de TRANSIT

Les améliorations sont principalement dues aux échanges de blocs de cellules appartenant à $\mathcal{C}^T_{new}(p)$. Les échanges de blocs appartenant à des cellules à $\mathcal{C}^I(p)$ et $\mathcal{C}^T_{old}(p)$ doivent généralement impliquer un mouvement "inverse" sur une cellule pour respecter les contraintes de resyntonisation (voir les deux premiers cas de la section 3.3.3.3). Ces mouvements sont donc coûteux: nous devons, en moyenne, faire 3 à 5 mouvements de blocs "inverses" pour un bloc d'une cellule à $\mathcal{C}^I(p)$ ou $\mathcal{C}^T_{old}(p)$ (car une cellule est généralement composée de 3 à 5 blocs). En pratique, on observe environ 3 mouvements sur des cellules appartenant à $\mathcal{C}^I(p)$ ou $\mathcal{C}^T_{old}(p)$. Ces mouvements sont sélectionnés au début de la descente. Lorsque nous sommes dans le voisinage d'un optimum, ils sont trop coûteux par rapport au gain potentiel. Ainsi, la répartition des cellules en divers statuts par l'heuristique gloutonne joue un rôle essentiel pour la qualité de la solution.

Les résultats que nous donnons sont pour diverses valeurs des paramètres $minTabuIter$ et $maxTabuIter$.
Nous avons:

essai 1: $minTabuIter = 10$ et $maxTabuIter = 25$ (résultats à la figure 4.11)

essai 2: $minTabuIter = 25$ et $maxTabuIter = 50$ (résultats à la figure 4.12)

essai 3: $minTabuIter = 35$ et $maxTabuIter = 70$ (résultats à la figure 4.13)

essai 3: $minTabuIter = 50$ et $maxTabuIter = 100$ (résultats à la figure 4.14)

Même si les résultats sont proches les uns des autres, nous observons de meilleures solutions pour de petites valeurs de $minTabuIter$ et de $maxTabuIter$.

Les résultats montrent que des améliorations significatives, jusqu'à près de 30% suivant les périodes, sont obtenues par l'heuristique de descente et de remontée. Ces améliorations sont d'autant meilleures qu'elles concernent une période intermédiaire proche de la fin de la resyntonisation. Cela se comprend aisément quand on sait qu'un mouvement sur un bloc $B_k^{i,p}$ nécessite une substitution de $p$ à $\overline{p}$ (voir la section 3.3.3.2) : la portée moyenne pour les blocs des périodes $p = 1$ et $p = 2$ est plus importante que pour les périodes $p = 3, 4$ ou 5. Le gain d'un mouvement sur un bloc ayant une portée élevée est en probabilité plus faible que celui sur un bloc ayant une plus petite portée. C'est pourquoi nous devons apporter un soin tout particulier à la confection des solutions initiales pour les périodes intermédiaires du début de la resyntonisation.

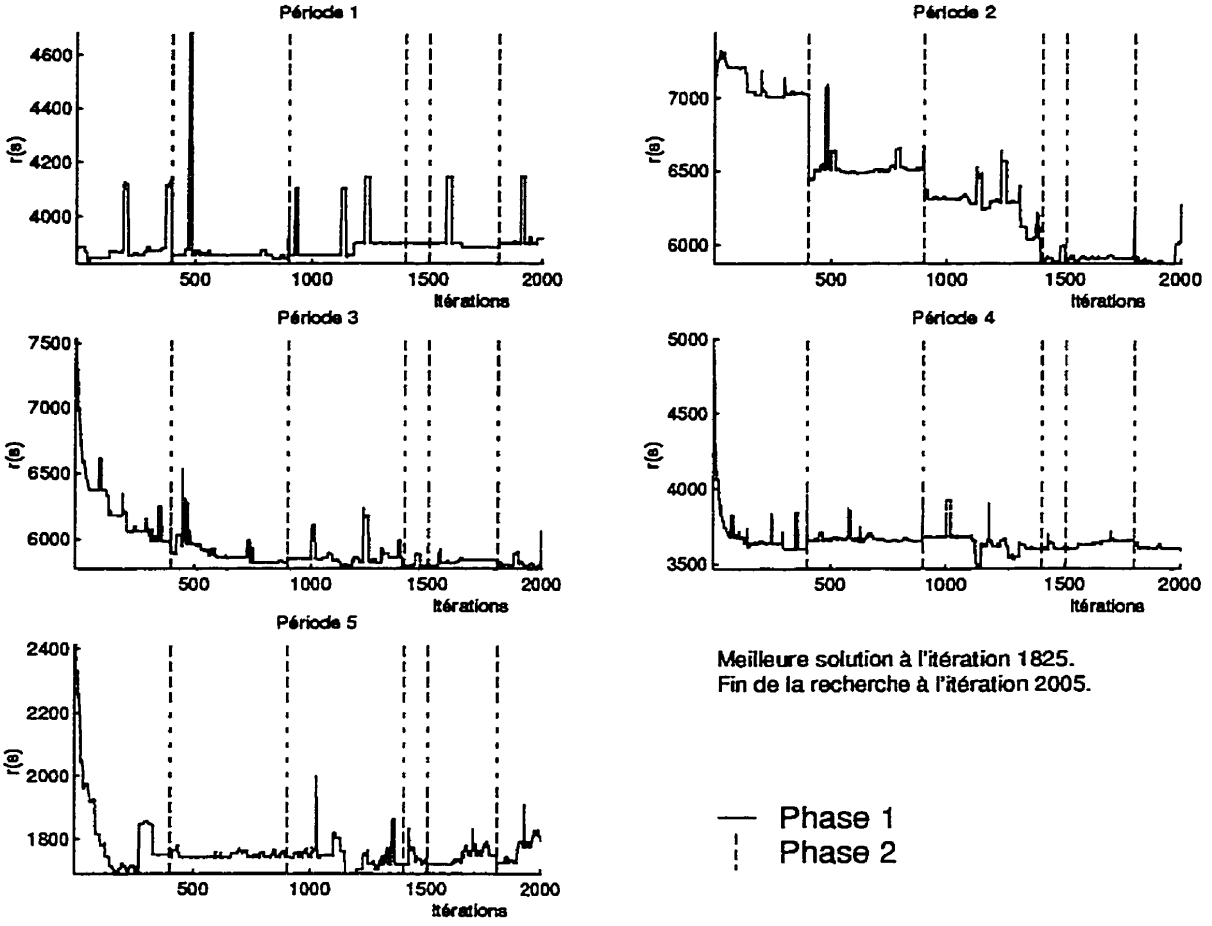



Figure 4.10 – *Qualité* $r(\mathcal{S})$ *en fonction de l'itération*

La figure 4.10 nous donne l'évolution de $r(\mathcal{S})$, pour l'essai 1, en fonction de l'itération. Les plus importantes améliorations sont obtenues pendant les 500 premières itérations. La diversification joue bien son rôle et permet de relancer la recherche d'un optimum : après chaque appel à la Phase 2, la méthode de descente a été capable de touver une meilleure solution dans la plupart des cas. Ce point est particulièrement illustré à la figure 4.10 pour la période $p = 2$, la plus mauvaise période de l'essai 1 et où se sont faits les mouvement de diversification.

Nombre de liens d'interférences COCANAUX de niveau m :

| level | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 96 | 190 | 219 | 148 | 78 | 0 |
| 2 | 0 | 96 | 163 | 175 | 112 | 58 | 0 |
| 3 | 0 | 28 | 40 | 21 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Nombre de liens d'interférences de CANAUX ADJACENTS de niveau m :

| level | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 18 | 73 | 206 | 218 | 185 | 112 | 0 |
| 2 | 8 | 90 | 77 | 105 | 109 | 94 | 0 |
| 3 | 7 | 37 | 76 | 77 | 54 | 6 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| r(S)= | 217 | 3617 | 5918 | 5671 | 3614 | 1716 | 0 |

amélioration basée sur r(S) :

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Imp(%) | - | 6.22245 | 23.1229 | 27.1267 | 27.8066 | 28.9441 | - |

Meilleure solution à l'itération 1825.
Fin à l'itération 2005.

Figure 4.11 – *Résultats de* TRANSIT *pour* $minTabuIter = 10$ *et* $maxTabuIter = 25$

Nombre de liens d'interférences COCANAUX de niveau m :

| m | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 96 | 209 | 242 | 152 | 85 | 0 |
| 2 | 0 | 99 | 159 | 175 | 119 | 65 | 0 |
| 3 | 0 | 35 | 40 | 21 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Nombre de liens d'interférences de CANAUX ADJACENTS de niveau m :

| m | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 18 | 73 | 224 | 223 | 189 | 116 | 0 |
| 2 | 8 | 82 | 69 | 97 | 96 | 81 | 0 |
| 3 | 7 | 37 | 68 | 76 | 54 | 6 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| r(S)= | 217 | 3844 | 5771 | 5683 | 3626 | 1737 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| amélioration basée sur r(S) : | | | | | | | |
| Imp(%) | - | 0.33705 | 25.0325 | 26.9725 | 27.5669 | 28.0745 | - |

Meilleure solution à l'itération 1460.
Fin à l'itération 1705.

Figure 4.12 – *Résultats de* TRANSIT *pour* $minTabuIter = 25$ *et* $maxTabuIter = 50$

Nombre de liens d'interférences COCANAUX de niveau m :

| m | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 103 | 212 | 234 | 158 | 95 | 0 |
| 2 | 0 | 99 | 151 | 167 | 104 | 58 | 0 |
| 3 | 0 | 35 | 48 | 21 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Nombre de liens d'interférences de CANAUX ADJACENTS de niveau m :

| m | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 18 | 83 | 231 | 237 | 201 | 122 | 0 |
| 2 | 8 | 82 | 69 | 98 | 95 | 80 | 0 |
| 3 | 7 | 37 | 76 | 77 | 54 | 6 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| r(S)= | 217 | 3885 | 6146 | 5632 | 3512 | 1703 | 0 |

amélioration basée sur r(S) :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Imp(%) - | -0.725953 | 20.1611 | 27.6279 | 29.8442 | 29.4824 | - |

Meilleure solution à l'itération 1419.
Fin à l'itération 1605.

Figure 4.13 – *Résultats de* TRANSIT *pour* $minTabuIter = 35$ *et* $maxTabuIter = 70$

```
Nombre de liens d'interférences COCANAUX de niveau m :

m       p=0       p=1       p=2       p=3       p=4       p=5       p=6
1       0         96        221       243       162       78        0
2       0         99        170       179       123       69        0
3       0         35        40        21        0         0         0
4       0         0         0         0         0         0         0
5       0         0         0         0         0         0         0
6       0         0         0         0         0         0         0
7       0         0         0         0         0         0         0
8       0         0         0         0         0         0         0
9       0         0         0         0         0         0         0
10      0         0         0         0         0         0         0

Nombre de liens d'interférences de CANAUX ADJACENTS de niveau m :

m       p=0       p=1       p=2       p=3       p=4       p=5       p=6
1       18        77        226       227       182       116       0
2       8         82        81        103       102       87        0
3       7         37        76        77        54        6         0
4       0         0         0         0         0         0         0
5       0         0         0         0         0         0         0
6       0         0         0         0         0         0         0
7       0         0         0         0         0         0         0
8       0         0         0         0         0         0         0
9       0         0         0         0         0         0         0
10      0         0         0         0         0         0         0

r(S)=   217       3852      6145      5789      3718      1792      0
amélioration basée sur r(S) :
Imp(%) -          0.129634  20.1741   25.6104   25.7291   25.7971   -
Meilleure solution à l'itération 1460.
Fin à l'itération 1705.
```

Figure 4.14 – *Résultats de* TRANSIT *pour* $minTabuIter = 50$ *et* $maxTabuIter = 100$

**Résultats de TRANSIT pour les violations du nombre de canaux dans le spectre étendu :**

Le nombre de violations du nombre de canaux dans le spectre étendu ne peut dépasser 10%. La figure 4.15 nous permet de constater que le nombre de violations varie très peu d'une itération à l'autre et ce pour toutes les périodes intermédiaires. La qualité de la solution initiale fournie par l'heuristique gloutonne n'est donc pas sans influence.

Les résultats de la figure 4.15 ont été obtenus pour $minTabuIter = 25$ et $maxTabuIter = 50$, mais ils restent similaires quelles que soient les valeurs des paramètres car la solution initiale est la même.

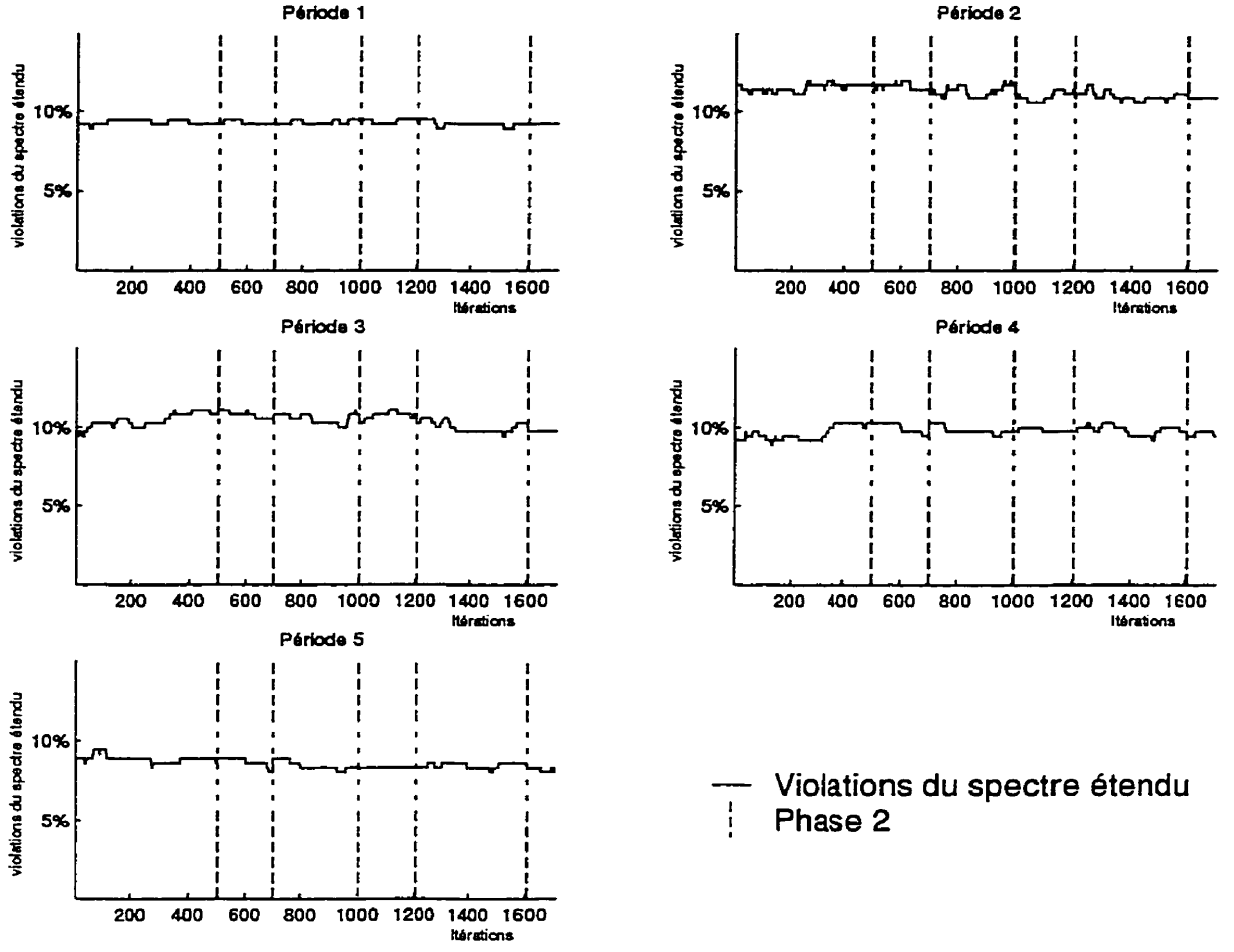



Figure 4.15 – *Violations des contraintes de spectre étendu en fonction de l'itération*

**Résultats de TRANSIT pour les violations de la contrainte d'espacement :**

Rappelons que le nombre de violations faibles de la contrainte d'espacement ne peut dépasser 20% et que cette limite est de 10% dans le cas de violations fortes. La figure 4.16 nous donne ces pourcentages en fonction des itérations. Nous observons très peu de violations faibles, voir aucune suivant les périodes. Les violations fortes sont plus importantes mais restent au voisinage de 5%, ce qui est largement inférieur à la limite de 10%. Encore une fois, la qualité de la solution initiale fournie par l'heuristique gloutonne est de première importance.

Les résultats de la figure 4.15 ont été obtenus pour $minTabuIter = 25$ et $maxTabuIter = 50$, mais ils restent similaires quelles que soient les valeurs des paramètres car la solution initiale est la même.

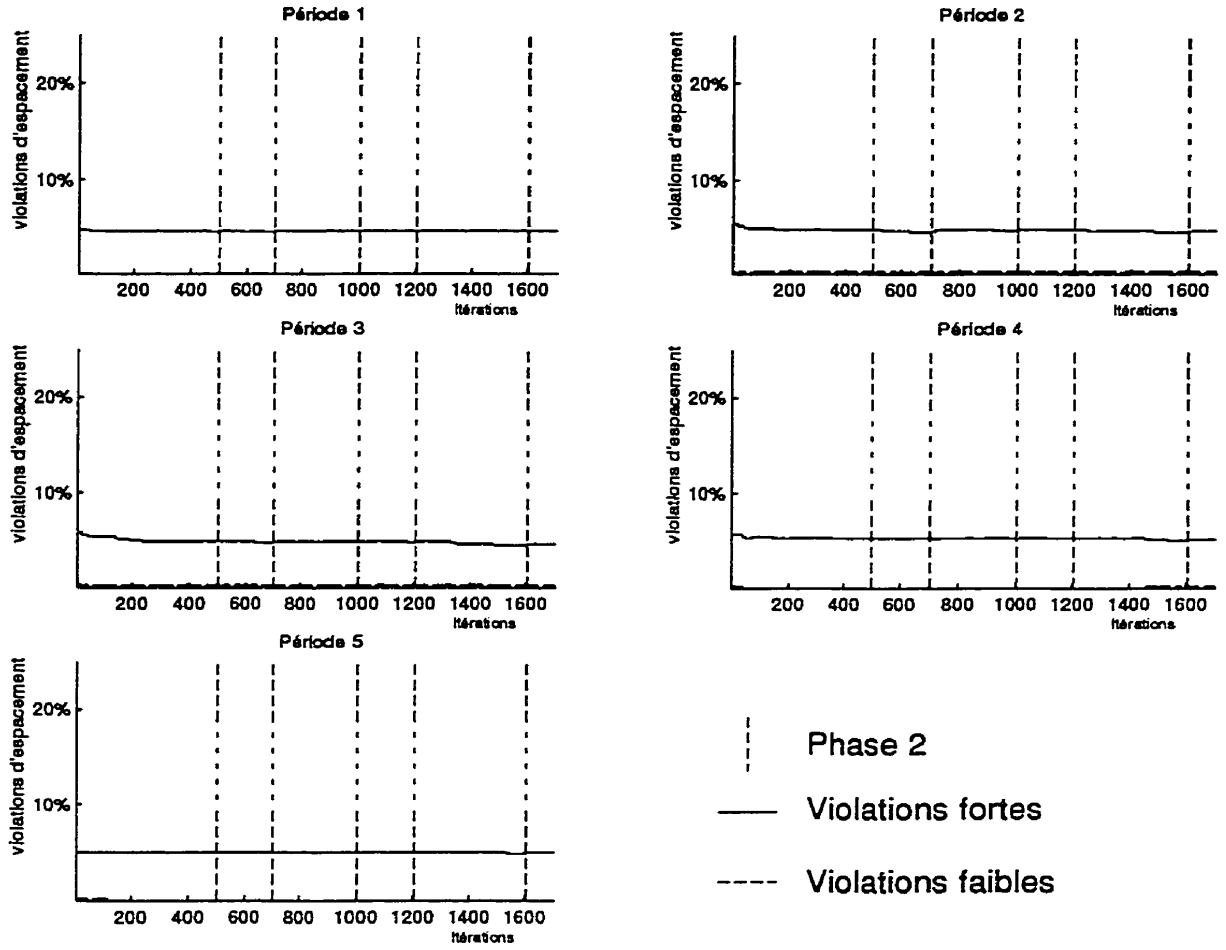



Figure 4.16 – *Violations des contraintes d'espacement en fonction de l'itération*

#### 4.3.2.3 Géographie des cellules resyntonisées

Nous avons voulu vérifier s'il existait une adéquation entre l'adjacence géographique et le choix des cellules à resyntoniser à leur affectation cible par l'heuristique gloutonne TRANSIT0.

Nous avons utilisé MAESTRO [3], un logiciel permettant de visualiser une solution d'affectation de blocs de canaux fournie par ECLIPSE ou TRANSIT.

Nous avons observé une "dispersion" uniforme des cellules à resyntoniser : les cellules appartenant à $\mathcal{C}^P(p)$ sont réparties dans tout le réseau.

La "dispersion" des cellules à $\mathcal{C}^P(p)$ sur l'ensemble du réseau s'explique par le fait que l'adjacence entre cellules n'est pas définie géographiquement mais par les matrices de compatibilité. Cette dispersion signifie que les matrices de compatibilité utilisées ne reflétent pas l'adjacence géographique des cellules, ce qui est le cas car nous avons utilisé les matrices filtrées $M^{co}_{filtrées}$ et $M^{adj}_{filtrées}$ pour les tests numériques de cette section. Regardons attentivement la manière dont nous avons construit ces matrices filtrées. Les matrices non filtrées $M^{co}$ et $M^{adj}$ ont été construites à partir des voisinages géographiques. Elles reflétent donc l'adjacence géographique (voir la section 4.2). Par contre, dans les matrices filtrées, un coefficient $(m_{ij}^{co/adj})_{filtrées} = 0$ si $m_{ij}^{co/adj} \neq 0$ et si nous avions un conflit dans la solution $S$ ayant servi à construire les matrices filtrées. Une cellule $C_i$ ne pourra très probablement plus être en interférence avec une cellule $C_j$ voisine géographiquement car le coefficient $m_{ij}^{co/adj}$ aura été probablement mis à zéro. En filtrant les matrices, la notion d'adjacence

géographique est donc complétement éliminée des données au profit d'une "dispersion" uniforme des liens d'interférence dans le réseau. C'est pourquoi nous avons poursuivi le développement de TRANSIT en utilisant les matrices de compatibilité non filtrées $M^{co}$ et $M^{adj}$.

### 4.3.3 Résultats pour les matrices de compatibilité non filtrées $M^{co}$ et $M^{adj}$

Les résultats de la section 4.3.2 ont montré la nécessité de poursuivre le développement de TRANSIT avec les matrices non filtrées, c'est-à-dire sur des données réelles et représentant le réseau considéré. En effet, nous devons vérifier s'il existe une unité géographique lors de la resyntonisation multipériode, sinon la qualité des solutions pourrait en être affectée.

Dans cette section, nous présentons les résultats numériques pour les deux cas suivants (matrices de compatibilité non filtrées) :

- résultats sans prise en compte du voisinage géographique (utilisation de TRANSIT0 dans l'heuristique gloutonne), comme à la section 4.3.2 ;
- résultats avec un critère géographique (utilisation de TRANSIT0_GÉOGRAPHIQUE dans l'heuristique gloutonne où le paramètre *SeuilGeographique* est fixé à 9).

#### 4.3.3.1 Résultats de l'heuristique gloutonne

Les paramètres $limitP(p)$ et $limitT(p)$ ont été fixés de manière à répartir les interférences sur toutes les périodes intermédiaires. Ces donnés sont présentées à la figure 4.17 et ont été utilisées pour obtenir les résultats de TRANSIT0 et de TRANSIT0_GÉOGRAPHIQUE.

```
PERIODE_1      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 50    #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 58
PERIODE_2      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 49    #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 51
PERIODE_3      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 46    #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 54
PERIODE_4      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 42    #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 51
PERIODE_5      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 66    #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 53
PERIODE_6      #_Cells_At_Final_Assgnt_: 106   #_Cells_At_Temp_Assgnt_: 0
```

Figure 4.17 – *Paramètres $limitP(p)$ et $limitT(p)$ (matrices $M^{co}$ et $M^{adj}$)*

Les résultats sont donnés à la figure 4.18 pour TRANSIT0_GÉOGRAPHIQUE et à la figure 4.19 pour TRANSIT0. On observe que les niveaux d'interférence maximum $m^{max}(\mathcal{S})$ sont les mêmes dans les deux cas mais que la solution de TRANSIT0_GÉOGRAPHIQUE est bien meilleure car elle présente beaucoup moins d'interférences que celle de TRANSIT0 (67% d'interférences en moins ; en se basant sur $r(\mathcal{S})$).

Nombre de liens d'interférences COCANAUX de niveau m :

| m | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 956 | 713 | 707 | 723 | 774 | 570 | 624 |
| 2 | 776 | 779 | 804 | 795 | 646 | 581 | 362 |
| 3 | 365 | 524 | 647 | 427 | 332 | 315 | 60 |
| 4 | 8 | 0 | 0 | 0 | 7 | 7 | 0 |
| 5 | 8 | 0 | 0 | 0 | 12 | 6 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 10 | 3 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Nombre de liens d'interférences de CANAUX ADJACENTS de niveau m :

| m | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 24 | 24 | 16 | 16 | 0 | 0 | 15 |
| 2 | 69 | 47 | 41 | 41 | 36 | 25 | 25 |
| 3 | 11 | 37 | 35 | 44 | 59 | 41 | 20 |
| 4 | 31 | 7 | 22 | 19 | 19 | 27 | 4 |
| 5 | 21 | 4 | 4 | 0 | 11 | 11 | 0 |
| 6 | 0 | 4 | 0 | 7 | 7 | 4 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| r(S)= | 36855 | 34942 | 36289 | 55220 | 46402 | 81535 | 8424 |

Figure 4.18 – *Résultats de* TRANSIT0_GÉOGRAPHIQUE

*(avec $M^{co}$, $M^{adj}$ et un critère géographique)*

Nombre de liens d'interférences COCANAUX de niveau m :

| m | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 956 | 912 | 872 | 844 | 779 | 654 | 624 |
| 2 | 776 | 956 | 1018 | 999 | 843 | 657 | 362 |
| 3 | 365 | 427 | 590 | 784 | 689 | 622 | 60 |
| 4 | 8 | 19 | 38 | 53 | 53 | 53 | 0 |
| 5 | 8 | 0 | 70 | 59 | 67 | 37 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 47 | 8 | 7 | 16 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 4 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Nombre de liens d'interférences de CANAUX ADJACENTS de niveau m :

| m | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 24 | 24 | 15 | 0 | 12 | 8 | 15 |
| 2 | 69 | 65 | 87 | 86 | 66 | 45 | 25 |
| 3 | 11 | 22 | 26 | 83 | 86 | 82 | 20 |
| 4 | 31 | 11 | 34 | 37 | 32 | 41 | 4 |
| 5 | 21 | 0 | 23 | 43 | 89 | 37 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 22 | 0 | 15 | 11 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 16 | 0 | 0 | 12 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| r(S)= | 36855 | 31353 | 268859 | 109725 | 166600 | 196942 | 8424 |

Figure 4.19 – *Résultats de* TRANSIT0

*(avec $M^{co}$, $M^{adj}$ et sans critère géographique)*

#### 4.3.3.2 Résultats de TRANSIT

Les analyses faites à la section 4.3.2.2 pour les matrices de compatibilité $M^{co}_{filtrée}$ et $M^{adj}_{filtrée}$ restent valides dans le cas étudié ici, tant pour les contraintes d'interférences cocanaux et de canaux adjacents que pour les contraintes d'espacement et de spectre étendu. La différence réside dans le fait que nous avons considéré le cas où les matrices de compatibilité ne sont pas filtrées. Nous ne présenterons donc que les résultats concernant les interférences cocanaux et de canaux adjacents, les résultats pour les autres contraintes étant similaires. Nous donnerons les résultats de TRANSIT sans critère géographique (donc en utilisant TRANSIT0) et ceux de TRANSIT avec un critère géographique (c'est-à-dire en utilisant TRANSIT0_GÉOGRAPHIQUE).

La première observation à faire est de voir que la solution de TRANSIT avec un critère géographique est très bonne: nous avons $m^{max}(\mathcal{S}) = 4$, ce qui est en dessous de nos seuils $\overline{m}^{co} = \overline{m}^{adj} = 5$ (voir la figure 4.21). Dans ce cas là, TRANSIT a été capable de diminuer le niveau maximum d'interférence de 3 niveaux, c'est-à-dire de $m^{max}(\mathcal{S}) = 7$ à $m^{max}(\mathcal{S}) = 4$, ce qui est très significatif.

Par contre, dans le cas de TRANSIT sans critère géographique, nous avons $m^{max}(\mathcal{S}) = 6$ et un total de 479 liens d'interférence supérieurs ou égaux à $\overline{m}^{co} = \overline{m}^{adj} = 5$. Cette solution n'est donc pas acceptable. La solution initiale fournie par TRANSIT0 était de trop mauvaise qualité pour permettre une recherche efficace par TRANSIT. Encore une fois, on note l'importance de la solution fournie par l'heuristique gloutonne.

Nombre de liens d'interférences COCANAUX de niveau m :

| m | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 956 | 917 | 853 | 812 | 792 | 682 | 624 |
| 2 | 776 | 962 | 987 | 1023 | 780 | 707 | 362 |
| 3 | 365 | 480 | 648 | 769 | 653 | 500 | 60 |
| 4 | 8 | 19 | 30 | 38 | 39 | 23 | 0 |
| 5 | 8 | 16 | 75 | 71 | 58 | 16 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Nombre de liens d'interférences de CANAUX ADJACENTS de niveau m :

| m | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 24 | 32 | 23 | 8 | 20 | 22 | 15 |
| 2 | 69 | 65 | 94 | 87 | 60 | 42 | 25 |
| 3 | 11 | 22 | 26 | 69 | 76 | 75 | 20 |
| 4 | 31 | 0 | 18 | 22 | 18 | 29 | 4 |
| 5 | 21 | 0 | 11 | 29 | 66 | 20 | 0 |
| 6 | 0 | 8 | 36 | 22 | 21 | 26 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| r(S)= | 36855 | 49063 | 128339 | 114878 | 110089 | 73617 | 8424 |
| amélioration basée sur r(S) : | | | | | | | |
| Imp(%) - | | -56.4858 | 52.2653 | -4.69629 | 33.9202 | 62.62 | - |

Meilleure solution à l'itération 1132.
Fin à l'itération 1512.

Figure 4.20 – TRANSIT : *résultats sans critère géographique*

Nombre de liens d'interférences COCANAUX de niveau m :

| m | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 956 | 722 | 741 | 740 | 725 | 648 | 624 |
| 2 | 776 | 793 | 777 | 725 | 666 | 516 | 362 |
| 3 | 365 | 527 | 532 | 371 | 273 | 137 | 60 |
| 4 | 8 | 0 | 0 | 0 | 14 | 7 | 0 |
| 5 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Nombre de liens d'interférences de CANAUX ADJACENTS de niveau m :

| m | p=0 | p=1 | p=2 | p=3 | p=4 | p=5 | p=6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 24 | 24 | 16 | 20 | 8 | 0 | 15 |
| 2 | 69 | 51 | 37 | 33 | 25 | 28 | 25 |
| 3 | 11 | 23 | 50 | 48 | 58 | 37 | 20 |
| 4 | 31 | 7 | 11 | 19 | 4 | 0 | 4 |
| 5 | 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| r(S)= | 36855 | 29832 | 30565 | 29939 | 21802 | 13753 | 8424 |
| amélioration basée sur r(S) : | | | | | | | |
| Imp(%) | - | 14.6317 | 15.7734 | 45.7805 | 53.0150 | 83.1299 | - |

Meilleure solution à l'itération 1313.
Fin à l'itération 1412.

Figure 4.21 – TRANSIT : *résultats avec critère géographique*

Les résultats de TRANSIT avec un critère géographique ont un niveau maximum d'interférences de $m^{max}(S) = 4$ ; or nos seuils d'acceptabilité sont $\overline{m}^{co} = 5$ et $\overline{m}^{adj} = 5$. La solution présentée à la figure 4.21 est donc acceptable. Nous en concluons qu'il est possible de procéder à une resyntonisation en 6 étapes pour un réseau d'environ 400 cellules, avec des solutions intermédiaires respectant les contraintes imposées..

#### 4.3.3.3 Géographie des cellules resyntonisées

L'analyse de la géographie des résultats confirme celle que nous avons faite à la section précédente. Sans utiliser de critère géographique, nous nous retrouvons avec une dispersion uniforme des cellules à $C^P(p)$ dans tout le réseau, comme nous l'avons déjà décrit à la section 4.3.2.3. La figure 4.22 nous donne un exemple de la répartition des cellules à $\mathcal{C}^P(p)$ dans le réseau pour $p = 1$. Une telle configuration induit une autre dispersion : celle des cellules à $\mathcal{C}^T(p)$ qui doivent servir de tampons entre les cellules à $\mathcal{C}^P(p)$ et le reste du réseau. Ce point est illustré par la figure 4.23 qui nous donne les cellules à $\mathcal{C}^T(p)$ pour $p = 1$.

Les résultats obtenus à la section 4.3.3.2 en utilisant un critère géographique sont acceptables et en dessous des seuils admissibles $\overline{m}^{co} = \overline{m}^{adj} = 5$. Cela se comprend aisément : les cellules $\mathcal{C}^P(p)$ étant groupées, les cellules $\mathcal{C}^T(p)$ sont utilisées beaucoup plus efficacement. A titre d'exemple, nous donnons les cellules $\mathcal{C}^P(p)$ pour $p = 1$ à la figure 4.24 et les cellules $\mathcal{C}^T(p)$ correspondantes à la figure 4.25. Il apparaît clairement que l'analyse se confirme : les cellules $\mathcal{C}^P(p)$ sont groupées et les cellules $\mathcal{C}^T(p)$ sont réparties en couronne autour des cellules $\mathcal{C}^P(p)$.

Utiliser un critère géographique est donc non seulement pertinent mais nécessaire.

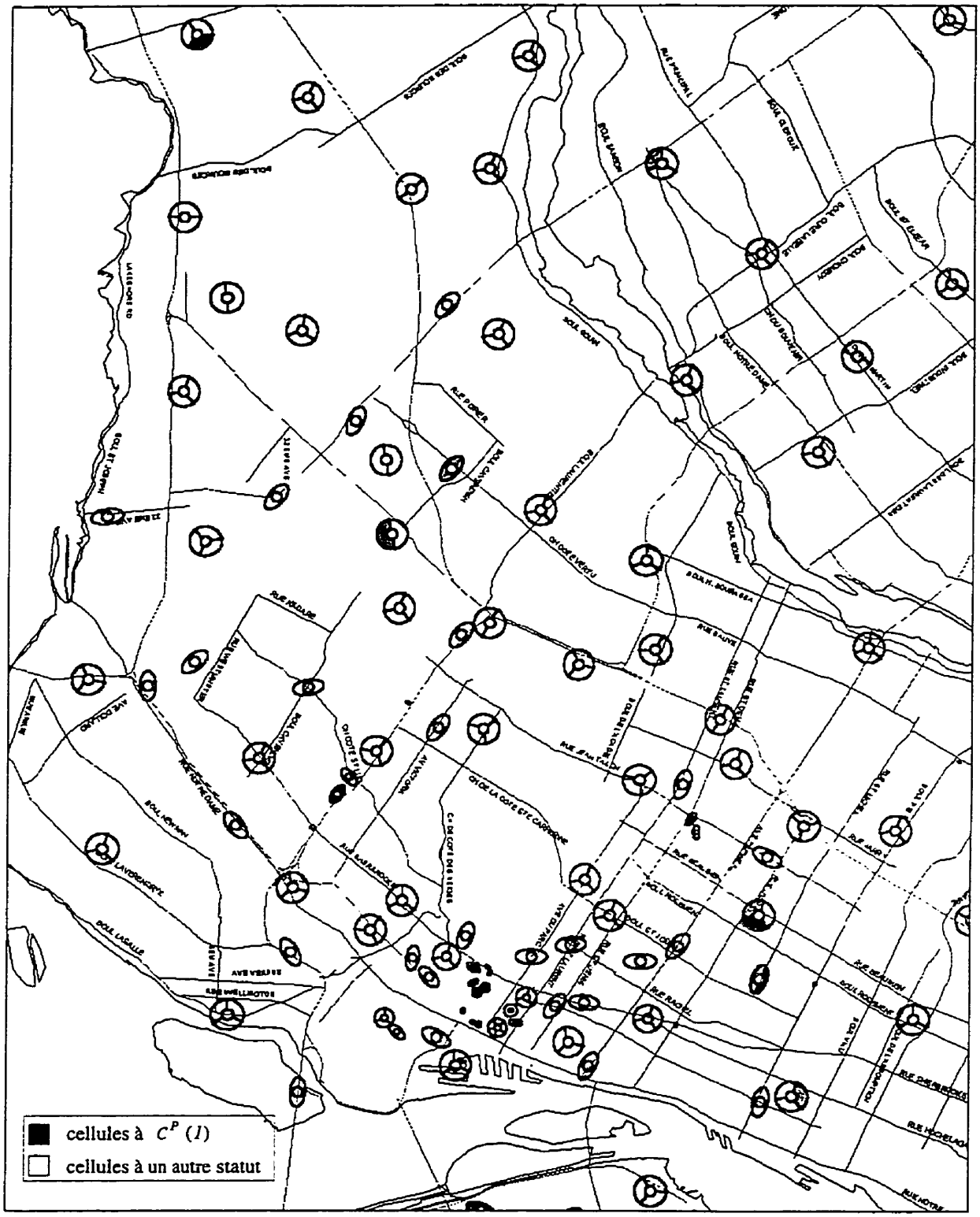



Figure 4.22 – *Extrait du réseau : cellules* $C^P(1)$ *(sans critère géographique)*

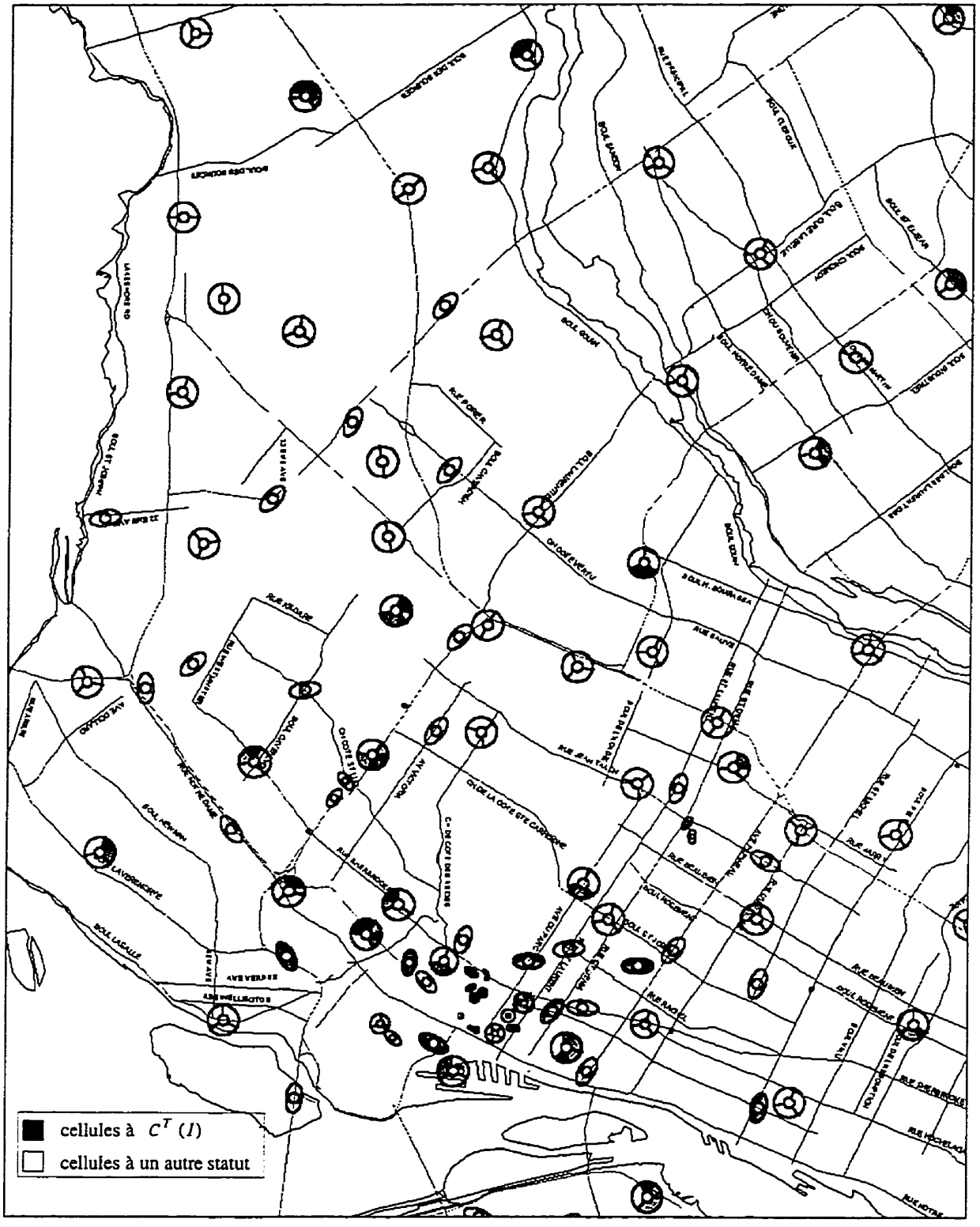



Figure 4.23 – *Extrait du réseau : cellules* $\mathcal{C}^T(1)$ *(sans critère géographique)*

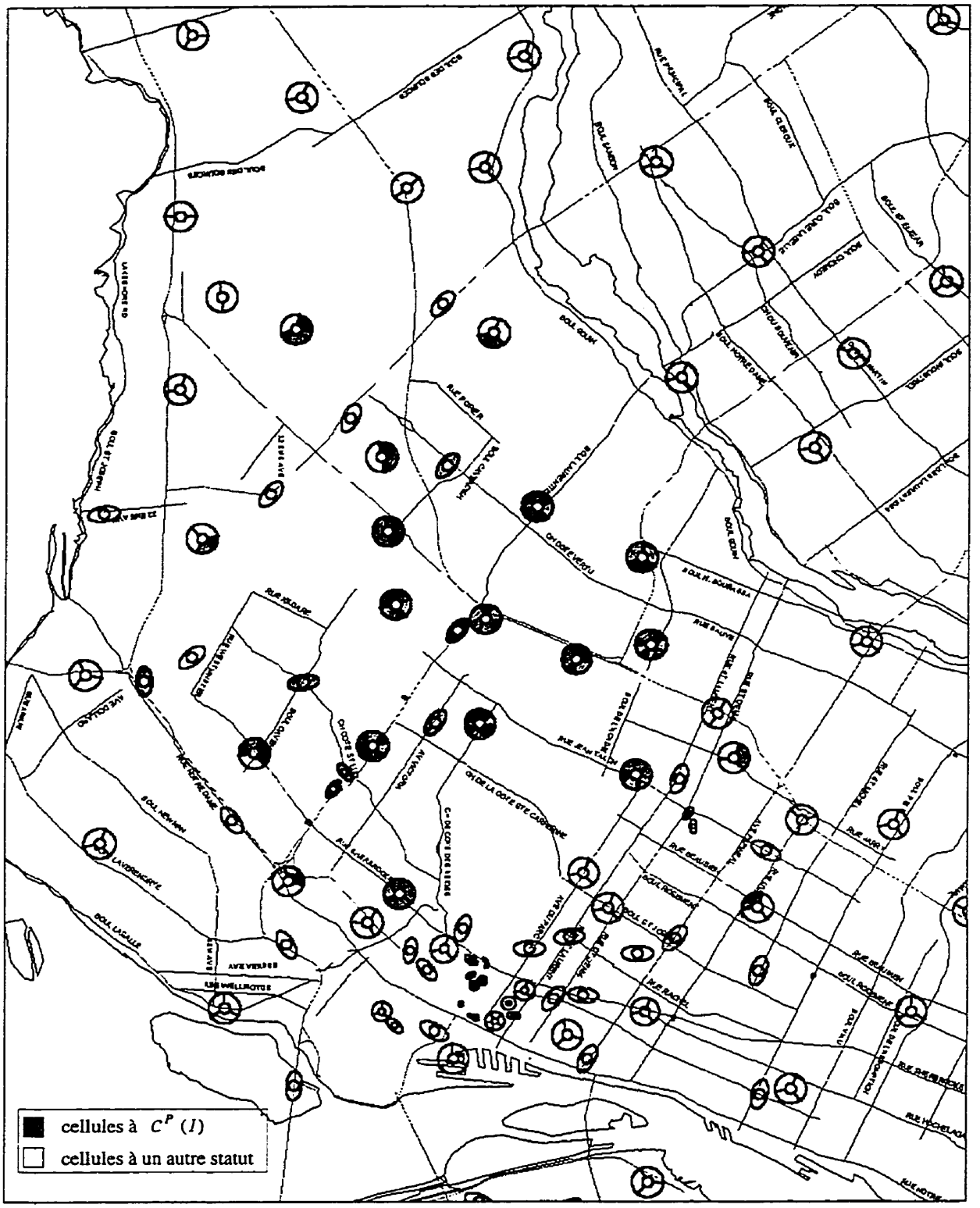



Figure 4.24 – *Extrait du réseau : cellules* $\mathcal{C}^P(1)$ *(avec critère géographique)*

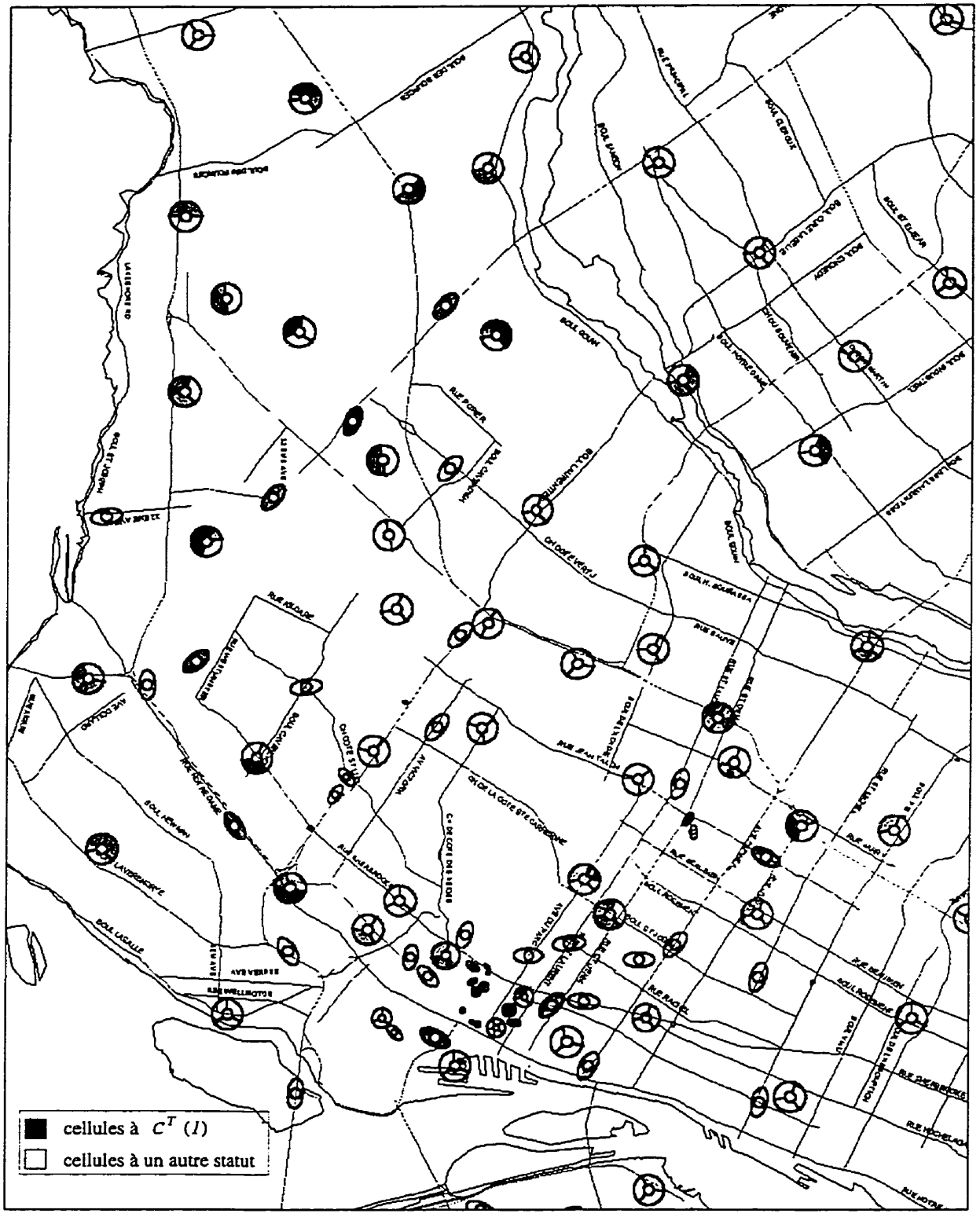



Figure 4.25 – *Extrait du réseau : cellules* $\mathcal{C}^T(1)$ *(avec critère géographique)*

# CHAPITRE 5

# Analyses et Perspectives

## 5.1 Diversification

Le rôle joué par la diversification s'est montré très profitable pour l'amélioration de la qualité des solutions. La diversification entraine une amélioration dans la plupart des cas. La diversification telle qu'implantée porte sur une cellule de la plus mauvaise période intermédiaire. On pourrait envisager, par exemple, de l'appliquer à toutes les périodes intermédiaires, sur plusieurs cellules ou une combinaison des deux propositions. Lors de l'élaboration des données, nous avons en effet observé que la solution initiale produite par l'heuristique gloutonne est très sensible à de petites variations de $limitP(p)$ et $limitT(p)$. En autorisant plus de mouvement de diversification, l'exploration couvrirait une plus grande diversité de solutions.

## 5.2 Perspectives

L'expérience acquise et les résultats obtenus au cours de cette étude nous permettent de donner des orientations intéressantes pour des améliorations de la méthode. Les différentes perspectives que nous proposons sont décrites ci-dessous.

**Modification de la composition d'une cellule.**

Une solution $S_i^p$ pour une cellule $C_i^p$ ($\forall i = 1, \ldots, n, \forall p = 0, \ldots, P$) est composée d'un sous-ensemble des blocs de canaux de $\mathcal{F}$. La taille de ce sous-ensemble varie généralement entre 1 et 5 blocs de canaux. Une cellule $C_i$ qui a un niveau d'interférence inacceptable pourrait, par exemple, être composée de deux blocs de 8 canaux et d'un bloc de 4 canaux si elle avait une demande $V_Required[i] = 20$. Cette cellule $C_i$ avec une interférence élevée pourrait alors recevoir une nouvelle composition de blocs, par exemple, deux blocs de 4 canaux, un bloc de 7 canaux et un autre de 5 canaux. Cette modification de la composition d'une cellule serait alors une autre diversification possible.

**Modification de la règle d'échange.**

Au lieu de remplacer un bloc $B_k$ par un autre bloc $B_\ell$ de taille similaire (ou à une tolérance près), on pourrait chercher à remplacer $B_k$ par un sous-ensemble de blocs tel que ce sous-ensemble soit de même taille, en nombre de canaux, que $B_k$. De la façon, on peut chercher à échanger un ensemble de blocs d'une cellule par un seul bloc de manière à toujours couvrir la demande de la cellule.

**Relaxation ou renforcement de la contrainte d'espacement minimum.**

- *Relaxation des contraintes d'espacement.*

L'idée est de vérifier s'il est possible d'améliorer la qualité du réseau, c'est-à-dire de réduire le niveau d'interférence, en relaxant les contraintes d'espacement dans la cellule $C_i$.

Contraintes d'espacement et interférences cocanaux :

On considère une paire de cellules $(C_i, C_j)$ telle que, pour au moins l'une des deux cellules, les contraintes d'espacement (fortes ou faibles) sont respectées. Le couple $(C_i, C_j)$ doit aussi être tel que le coefficient de compatibilité cocanal $m_{ij}^{co}$ est supérieur ou égal au seuil d'acceptabilité $\overline{m}^{co}$ et qu'il existe un lien d'interférence cocanal entre $C_i$ et $C_j$. On cherche s'il est alors possible d'éliminer ce lien d'interférence sans tenir compte de la contrainte d'espacement.

Interférences de canaux adjacents et contraintes d'espacement :

Ce cas est très proche du précédent. On considère une paire de cellules $(C_i, C_j)$ telle que pour au moins l'une des deux les contraintes d'espacement (fortes ou faibles) sont respectées. Le couple $(C_i, C_j)$ doit aussi être tel que le coefficient de compatibilité d'adjacence $m_{ij}^{adj}$ est supérieur ou égal au seuil d'acceptabilité $\overline{m}^{adj}$ et qu'il existe un lien d'interférence d'adjacence entre $C_i$ et $C_j$. On cherche s'il est alors possible d'éliminer ce lien d'interférence sans tenir compte de la contrainte d'espacement.

- *Renforcement des contraintes d'espacement.*

Lorsque la limite du nombre de cellules où les contraintes d'espacement sont relaxées est atteinte, on renforce les contraintes d'espacement d'autres cellules. On considère lors de cette phase les cellules $C_i$ telles que les contraintes d'espacement (fortes ou faibles) ne sont pas satisfaites pour au

moins une paire de blocs $(B_k, B_k)$ et qui ont un niveau d'interférence inférieur aux seuils $\overline{m}^{co}$ et $\overline{m}^{adj}$.

**Pourcentage maximum de canaux appartenant au spectre étendu.**

L'idée est proche de celle décrite au paragraphe précédent. On considère une paire de cellules $(C_i, C_j)$ telle que, pour au moins l'une des deux cellules, la limite sur le nombre de canaux appartenant au spectre étendu est satisfaite. Le couple $(C_i, C_j)$ doit aussi être tel que $m_{ij}^{co} > \overline{m}^{co}$ ou $m_{ij}^{adj} > \overline{m}^{adj}$. L'idée est de vérifier s'il est possible d'améliorer la qualité du réseau, c'est-à-dire de réduire le niveau d'interférence, en relaxant la limite sur le nombre de canaux appartenant au spectre étendu dans la cellule $C_i$. Si la limite du nombre de cellules où ces contraintes sont violées est atteinte, on peut envisager de renforcer ces contraintes pour un autre ensemble de cellules.

# CONCLUSIONS

Nous avons abordé un problème nouveau, celui de la resyntonisation multipériode d'un réseau de téléphonie cellulaire. La méthode de descente et de remontée proposée s'est avérée efficace. Nous avons à cet effet implanté une recherche tabou.

Nous avons pu valider le code et la méthode de recherche avec un logiciel indépendant de notre étude, et les résultats nous permettent de conclure qu'il est possible de procéder à une resyntonisation en 6 étapes pour un réseau d'environ 400 cellules. En effet, le niveau maximum d'interférences est en dessous des seuils d'acceptabilité cocanal et d'adjacence pour toutes les périodes intermédiaires.

Nous avons utilisé un modèle plus précis que ceux de la littérature en utilisant deux matrices de compatibilité (une pour les interférences cocanaux et une autre pour les interférences de canaux adjacents) combinées à une discrétisation du ratio signal sur interférence. Ce modèle nous permet d'être plus proche de la réalité en distinguant les différents cas auxquels sont confrontés les opérateurs radio-mobiles. Les solutions sont directement exploitables.

Le logiciel TRANSIT est aujourd'hui implanté chez BELL MOBILITÉ CELLULAIRE. Lié à un logiciel de planification cellulaire efficace, TRANSIT peut susciter un intérêt important chez les autres opérateurs de téléphonie cellulaire.

Enfin, les perspectives font l'objet du dernier chapitre et donnent des orientations pour les travaux futurs. En particulier, les efforts pourraient être concentrés sur la diversification de la recherche.

# BIBLIOGRAPHIE

[1] ADJAKPLÉ, P.M. et JAUMARD, B. (1997). "Greedy and Tabu Search Heuristics for Channel Block Assignment in Cellular Systems", *Les cahiers du GERAD*, No. G-97-45 (disponible sur http://www.crt.umontreal.ca/~nicolep/cahiers-en.html).

[2] BORNDÖRFER, R., EISENBLÄTTER, A., GRÖTSCHEL, M. et MARTIN, A. (1998). "Frequency assignment in cellular phone networks", *Annals of Operations Research*, Vol. 76, pages 73–93.

[3] BOYER, D. (1997). "Manuel d'utilisation de MAESTRO", Rapport technique, Ecole Polytechnique de Montréal (version révisée juillet 1997).

[4] GAMST A. (1982). "Homogeneous Distribution of Frequencies in a Regular Hexagonal Cell System", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 31, No. 3, pages 132–144.

[5] GAMST, A. et RAVE, W. (1982). "On Frequency Assignment in Mobile Automatic Telephone Systems". *Proc. Globecom'82*, pages B3.1.1–B3.1.7.

[6] GIORTZIS, A.I. et TURNER, L.F. (1996). "A Mathematical Programming Approach to the Channel Assignment Problem in Radio Networks", *Proceedings IEEE 46$^{th}$ Vehicular Technology Conference*, Vol. 2, pages 736–740.

[7] GLOVER, F. et LAGUNA, M. (1997). "Tabu Search", Kluwer, Boston.

[8] HALE, W.K. (1980). "Frequency Assignment: Theory and Applications", *Proceeding of the IEEE*, Vol. 68, No. 12, pages 1497–1514.

[9] HATA, M. (1980). "Empirical formula for propagation loss in land-mobile radio services". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 29, No. 3, pages 317–325.

[10] HURLEY, S., THIEL, S.U. et SMITH, D.H. (1996). "A comparison of local search algorithms for radio link frequency assignment problems". *ACM Symposium on Applied Computing*, Philadelphia, pages 251–257.

[11] JAUMARD, B. (1997). "A Multiphase Heuristic for the Optimization of Channel Assignment in Bell Mobilité Systems". Rapport technique, GERAD.

[12] JAUMARD, B., MARCOTTE, O. et MEYER, C. (1998). "Estimation of the Quality of Cellular Networks using Column Generation Techniques", *Les cahiers du GERAD*, No. G-98-02 (disponible sur http://www.crt.umontreal.ca/~nicolep/cahiers-en.html).

[13] KATZELA, I. et NAGHSHINEH, M. (1996). "Channel Assignment Schemes for Cellular Mobile Telecommunication Systems: A Comprehensive Survey". *IEEE Personal Communications*, juin, pages 11–31.

[14] LABIT, P. (1997). "Allocation de fréquences dans un réseau de téléphonie cellulaire", Rapport de stage effectué au GERAD, Institut Supérieur d'Informatique, de Modélisation et leurs Applications (ISIMA).

[15] LEE, W.C.Y. (1995). "Mobile Cellular Telecommunications: Analog and Digital Systems", McGraw-Hill, deuxième édition.

[16] MACMAHON, J.H. (1974). "Interference and propagation formulas and tables used in the Federal Communications Commission spectrum management task

force land mobile radio frequency assignment model", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 23, pages 129–134.

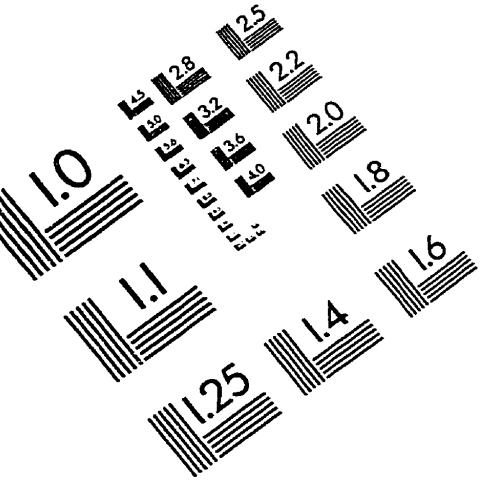
[17] OKUMURA, Y., OHMORI, E., KAWANO, T. et FUKUDA, K. (1968). Okumura Y., Ohmori E., Kawano T. et Fukuda K. "Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile service", *Review of the Electric Communication Laboratory*, Vol. 16, pages 825–873.

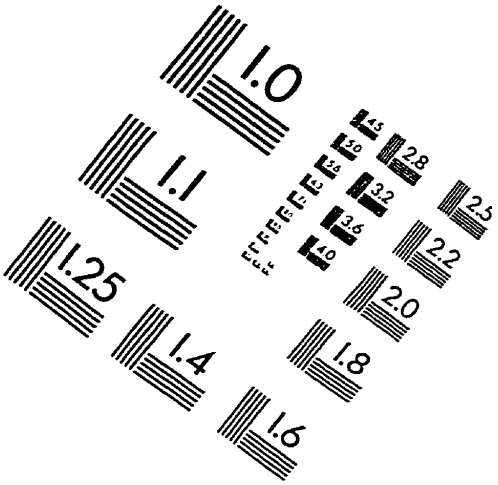
[18] RAPPAPORT, T.S. (1996). "Wireless Communications - Principles & Practice", Prentice-Hall.

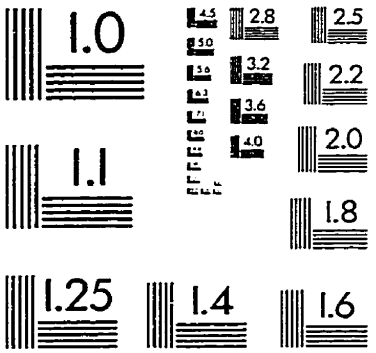
[19] REEVES, C.R., éditeur (1993). "Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems", Advanced Topics in Computer Science, Blackwell.

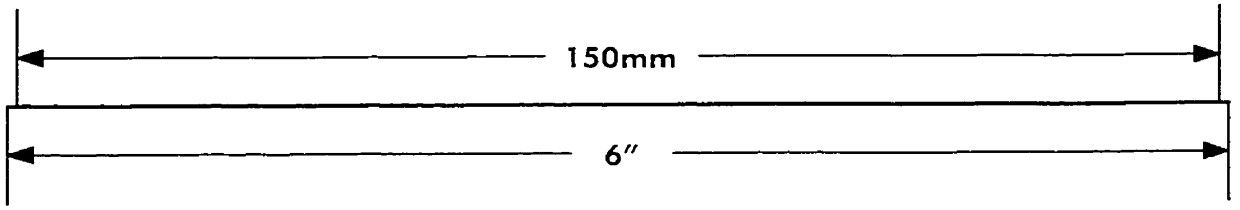
[20] WARNERS, J.P., TERLAKY, T., ROOS, C. et JANSEN, B. (1997). "A Potential Reduction Approach to the Frequency Assignment Problem", *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 78(1–3), pages 251–282 (disponible sur http://www.twi.tudelft.nl/Publications/TechReports/ ; rapport technique No. 95–98).

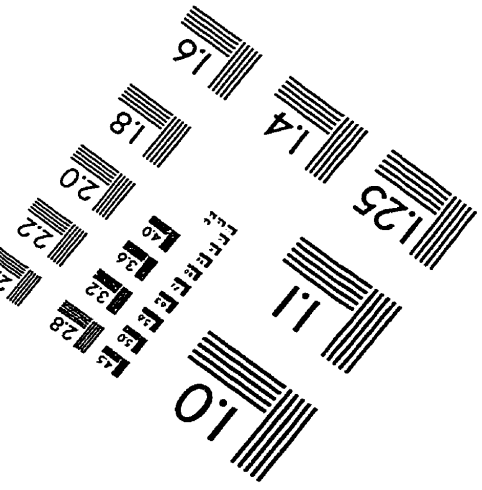
# IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)

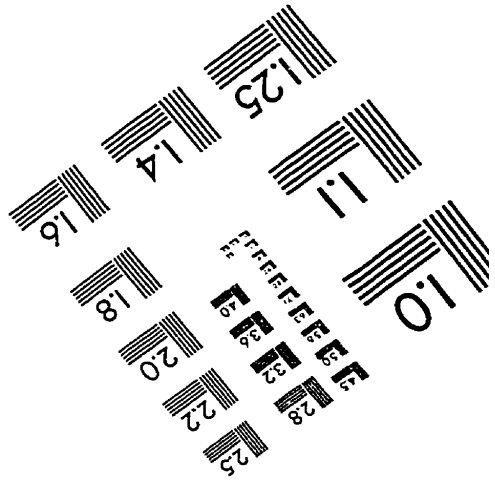



APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved