Optimisation de réseaux de radiotéléphonie mobile par recherche locale et sélection*

Arnaud Berny
IRIN
2 rue de la Houssinière – BP 92208
44322 Nantes cedex 03
email : `Arnaud.Berny@ectia.ec-nantes.fr`

Olivier Sarzeaud
ECTIA
1 rue de la Noë – BP 92119
44321 Nantes cedex 3
email : `Olivier.Sarzeaud@ectia.ec-nantes.fr`

Résumé

Nous présentons une méthode d'optimisation de réseaux de radiotéléphonie mobile. Le problème consiste à choisir, parmi un ensemble de sites potentiels, les sites d'accueil des stations de transmission, le nombre et le type des stations sur chaque site retenu et les paramètres de chaque station pour minimiser une fonction de coût, sous les contraintes de couverture totale et de respect de la demande en trafic. Il s'agit d'un problème mixte, présentant à la fois des aspects combinatoires et continus. La méthode proposée repose sur la sélection des sites suivant les contraintes, des techniques de recherche locale et la méthode du recuit simulé. Nous présentons également les résultats obtenus sur plusieurs jeux de données réelles.

Introduction

Les réseaux de radiotéléphonie mobile connaissent un développement considérable et les opérateurs de télécommunications sont confrontés à la complexité de leur conception ou de leur gestion. Le problème de l'allocation des fréquences, ressource rare, a fait l'objet de recherches intensives qui ont conduit à des algorithmes couramment utilisés.

*Ce travail a été effectué dans le cadre du projet européen ESPRIT IV ARNO (Algorithms for Radio Network Optimisation) n° 23243, avec le soutien de la région des Pays de la Loire.

En revanche, le problème de la conception d'un réseau, comprise comme le choix des sites et le paramétrage des stations de transmission, a été relativement peu abordé, du moins dans la littérature. Citons les travaux de Fortune *et al.* [FGK+95] en optimisation de réseaux micro-cellulaires (à l'intérieur d'une tour) qui font appel à la géométrie algorithmique, ceux de Calégari *et al.* [CGK+96] qui traitent des problèmes à 150 sites sur une étendue de 73×76 km avec un modèle de propagation simplifié, et ceux de Vasquez et Hao [VH99] qui appliquent la méthode de recherche tabou et dont nous partageons le modèle et les jeux de données.

Le problème de l'optimisation de réseaux cellulaires consiste à choisir, parmi un ensemble de sites potentiels, les sites qui vont accueillir les stations de transmission, une station étant constituée d'une antenne et d'un émetteur, et pour chaque site, à déterminer le nombre de ses stations. Pour chaque station, on détermine le type de son antenne, omnidirectionnelle ou directive, et la valeur de ses paramètres continus. Dans le cas d'une antenne omnidirectionnelle, seule la puissance de l'émetteur est nécessaire. Dans le cas des antennes directives, on ajoute leur orientation, repérée par deux angles, l'azimut (dans un plan horizontal) et le tilt (dans un plan vertical). On dispose également de deux types d'antennes directives.

Ajoutons que seules certaines combinaisons d'antennes sont autorisées sur un même site : une antenne omnidirectionnelle, une, deux ou trois antennes directives. Le choix des sites, des combinaisons et des types des antennes directives constituent la partie combinatoire du problème, le choix des paramètres des stations, sa partie continue.

Les deux contraintes sont la couverture totale de la zone d'implantation et le respect de la demande en trafic. Les objectifs à minimiser sont le coût en sites, le niveau des interférences et le nombre de composantes connexes des cellules du réseau.

La méthode d'optimisation proposée repose sur des techniques de recherche locale, déterministe ou stochastique, sur la sélection stochastique des sites suivant les contraintes et sur un échantillonnage de Gibbs des combinaisons (nombre et type des antennes). Elle fait suite à une méthode précédemment présentée [Ber98] dans laquelle les paramètres continus étaient déterminés par des réseaux de neurones et qui ne prenait pas en compte tous les objectifs ni toutes les combinaisons d'antennes.

Dans le § 1, nous présentons le problème plus en détail, en particulier son aspect multi-objectif. Dans le § 3, nous donnons une vue générale de la méthode, en insistant sur l'articulation des différents sous-algorithmes. Dans le § 4, nous détaillons la sélection des sites en fonction de la localisation géographique des contraintes. Dans le § 5, nous présentons les algorithmes de recherche locale des paramètres des stations. Le § 6 présente le programme de recuit simulé utilisé. Nous terminons par une présentation des résultats obtenus sur quatre jeux de données réelles.

1 Présentation du problème

La modélisation du problème est décrite en détail dans un rapport technique du CNET [CDDR97].

Topologie du problème

La donnée fondamentale du problème est la zone d'implantation du réseau qui est définie par un rectangle que l'on note $\mathcal{P}$. Seul un sous-ensemble $\mathcal{S}$ de $\mathcal{P}$ doit être couvert ;

on appelle ses points Service Test Points ou STP. La demande en trafic est définie sur un sous-ensemble $\mathcal{T}$ de $\mathcal{S}$ dont les points sont appelés Trafic Test Points ou TTP. Chaque TTP porte un quantum de trafic que l'on exprime en Erlang (unité de trafic). Le modèle de trafic attendu est statique : il ne dépend pas du temps. Les STP sont répartis sur les sommets d'un maillage rectangulaire régulier. On a les relations d'inclusion $\mathcal{T} \subset \mathcal{S} \subset \mathcal{P}$.

L'ensemble (fini) $\mathcal{L}$ des sites potentiels est contenu dans la zone $\mathcal{P}$ mais pas nécessairement sur les sommets du maillage. On a la relation d'inclusion $\mathcal{L} \subset \mathcal{P}$.

La figure 1 illustre les différents ensembles du problème en s'appuyant sur un jeu de données réelles relatives à une section d'autoroute.

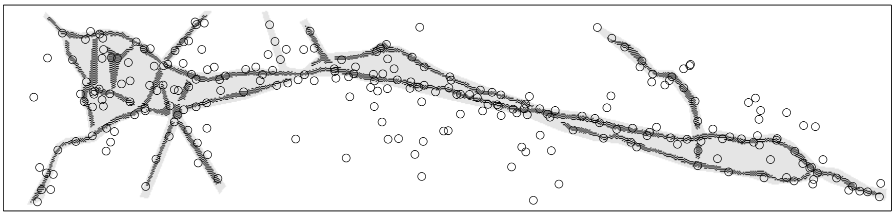

FIG. 1 – *Ensembles pour l'optimisation de réseaux cellulaires. La zone d'implantation est figurée par le cadre, les STP sont en gris, les TTP en noir et les sites potentiels sont représentés par des cercles.*

Modèle de propagation

On dispose d'un modèle de propagation restreint dans la mesure où les seules informations disponibles sont l'atténuation du signal entre chaque site et chaque STP et l'angle d'incidence sous lequel une antenne voit le premier obstacle entre le site et le STP. Ces deux types d'information synthétisent de nombreux phénomènes électromagnétiques tels que la réflexion, la diffraction ou l'absorption. L'angle d'incidence permet de prendre en compte le relief de la zone d'implantation. Seule l'amplitude du signal, ou plutôt le logarithme de son amplitude (exprimé en décibel), est considérée et les calculs de signaux se réduisent à des additions et des soustractions. Outre l'atténuation du signal, le gain de l'émetteur et diverses pertes, on considère le gain de l'antenne émettrice que l'on calcule à partir de son diagramme de rayonnement, de son orientation et de l'angle sous lequel elle voit le STP cible.

Chaque STP reçoit un ensemble de signaux issus des stations présentes dans le réseau. Seuls les signaux au dessus d'un seuil de sensibilité s_ε des mobiles sont pris en compte. On ordonne les signaux par ordre décroissant $f_1 > f_2 > \cdots > f_n > s_\varepsilon$. Un seuil de qualité s est défini pour chaque STP. Il dépend du service proposé et de la puissance des mobiles. Un STP P est dit couvert si le meilleur signal y est supérieur au seuil de qualité, soit encore si $f_1(P) > s(P)$. Dans ce cas, on appelle serveur de P la station source de $f_1(P)$.

Chaque station définit une cellule qui est l'ensemble des STP P couverts qui ont pour serveur cette station. Les différentes cellules du réseau sont disjointes deux à deux. On note T l'ensemble des stations présentes dans le réseau et $C_i \subset \mathcal{S}$ la cellule associée à la station $i \in T$.

Outre le meilleur signal, on réserve les quatre signaux suivants $f_2, \dots f_5$ au mécanisme de handover qui autorise un mobile à changer de cellule sans interruption de communication. Les signaux subséquents sont considérés comme des interférences, le niveau d'interférence en un STP étant égal à la somme $\sum_{i=6}^{n}(f_i - s_\varepsilon)$.

Contraintes et objectifs

La première contrainte est que tous les STP doivent être couverts. La seconde contrainte concerne le respect de la demande en trafic et découle de la limitation de la capacité des stations. En effet, une station peut servir une demande d'au plus $t_{\max} = 43$ Erlangs. La contrainte de trafic se traduit par le fait que la demande dans chaque cellule ne doit pas excéder $t_{\max}$. On note t la mesure (positive) de trafic sur $\mathcal{T}$ que l'on étend à tous les STP en posant $t(P) = 0$ pour $P \in \mathcal{S} \backslash \mathcal{T}$. La contrainte s'écrit

$$\forall i \in T \quad d_i = \sum_{P \in C_i} t(P) < t_{\max}.$$

Un dépassement de capacité égal à $\max\{0,\, d_i - t_{\max}\}$ apparaît dès que $d_i > t_{\max}$. Les configurations qui respectent les deux contraintes sont dites admissibles.

Les objectifs à minimiser sont au nombre de trois : coût en sites, niveau d'interférence et nombre de composantes connexes des cellules. Le coût en sites est simplement le nombre de sites utilisés. Le modèle prévoit le cas de l'extension d'un réseau déjà existant, par opposition à la création d'un réseau, en pondérant le coût en sites par des coefficients de modification (cf. tableau 1). Le niveau total d'interférence est simplement la somme des niveaux par STP. Dans le décompte des composantes connexes des cellules, on exclut celle qui contient le plus de STP (composante connexe principale) et celles qui contiennent moins de 9 STP. La connexité a une influence indirecte sur le niveau d'interférence et le mécanisme de handover.

Modification	Coefficient
Site inchangé	1
Site modifié	2
Site ajouté	5
Site supprimé	7

TAB. 1 – *Pondération du coût en sites dans le cas de l'extension d'un réseau.*

2 Optimisation multi-objectif sous contraintes

Pour traiter ce problème multi-objectif sous contraintes, nous avons incorporé dans une fonction de coût global à la fois les objectifs et les contraintes, ces dernières sous forme de pénalités quantifiant l'écart à la situation idéale, couverture totale ou dépassement de capacité nul. La principale motivation de cette technique est que nous ne disposons pas d'un algorithme clairement identifié de réparation des configurations non admissibles. Il est ainsi difficile de raisonner en terme de voisinage dans l'espace des configurations admissibles. Bien que le nombre de configurations admissibles diminue, jusqu'à tomber à zéro, avec le nombre de sites occupés, nous faisons l'hypothèse qu'il en existe suffisamment pour pouvoir guider la recherche par la réduction de l'écart à la situation idéale.

Le terme de pénalité incorporé à la fonction de coût est une fonction croissante et concave de l'écart à la situation idéale, plutôt que l'écart lui-même. La raison en est que la dégradation d'une configuration admissible coûte plus cher que celle d'une configuration quelconque, si l'on raisonne en terme de coût marginal. Nous avons choisi une fonction logarithmique de la forme

$$\frac{\log(1+x)}{\log(1+M)}$$

où $0 \leq x \leq M$ est une variable d'écart.

Finalement, la fonction de coût global est une combinaison convexe des objectifs partiels et des pénalités de la forme

$$E = \sum_{i=1}^{5} \lambda_i E_i$$

où les coefficients λ_i sont positifs, $\sum_{i=1}^{5} \lambda_i = 1$, E_i, $i \in \{1, 2\}$, représente une pénalité et E_i, $i \in \{3, 4, 5\}$, un objectif. Tous les E_i sont normalisés sur $[0, 1]$.

Le choix des coefficients est empirique mais l'arbre de la figure 2 suggère une méthodologie. La répartition des coefficients entre objectifs et contraintes conditionne l'obtention de configurations admissibles. Un poids de 0.9 s'est avéré un bon choix pour tous les jeux de données dont nous disposons. La répartition des poids entre les trois objectifs reflètent la préférence de l'utilisateur. Nous avons singularisé le coût en sites qui a une traduction économique immédiate.

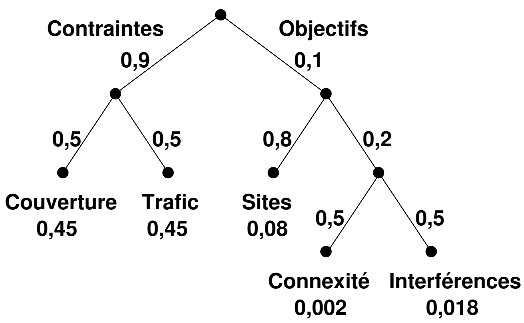

FIG. 2 – *Exemple de choix des coefficients de la fonction de coût global. Les objectifs ou pénalités correspondent aux feuilles de l'arbre et chaque coefficient est le produit des poids rencontrés depuis la racine. L'arbre est construit de sorte que la somme des poids relatif à chaque nœud, et donc celle de tous les coefficients, est égale à 1.*

L'algorithme d'optimisation ne retient pas seulement la configuration admissible de coût global minimal mais un ensemble de configurations admissibles dites non dominées ou optimales au sens de Paretto. Soient deux configurations admissibles x et y. On dit que x domine y si $\forall i \in \{3, 4, 5\}$, $E_i(x) \leq E_i(y)$ et $\exists i \in \{3, 4, 5\}$ tel que $E_i(x) < E_i(y)$.

3 Vue d'ensemble de l'algorithme

L'algorithme procède par mise à jour asynchrone des sites à la manière des algorithmes utilisés en traitement d'image [GG84] ou dans les simulations de Monte Carlo en physique statistique [HB92]. Pour chaque combinaison d'antennes du site visité, on optimise les paramètres des stations par une méthode mélangeant recherche systématique et recherche locale stochastique. Le choix de la combinaison d'antennes et de la configuration futures se fait par échantillonnage de Gibbs [GG84] qui accorde une probabilité élevée aux combinaisons d'antennes ayant un coût global faible. L'échantillonnage de Gibbs introduit un paramètre de contrôle qui permet un schéma de recuit simulé [KGV83].

Un aspect important de l'algorithme réside dans la méthode de sélection des sites. Les sites ne sont pas sélectionnés selon une distribution uniforme ou visités dans un ordre préétabli. Au contraire, on a défini un ensemble de distributions qui favorisent les sites en lesquels le potentiel d'amélioration du respect des contraintes est le plus élevé. La nature géographique du problème et la localisation des contraintes violées permet la définition de telles distributions. Une distribution est définie par une famille de réels positifs (V_i), $i \in \mathcal{L}$, appelés potentiels. La probabilité de sélection d'un site $i \in \mathcal{L}$ est égale à $V_i / \sum_{i\in\mathcal{L}} V_i$. Cette méthode de sélection se rapproche de la sélection proportionnelle dans les algorithmes génétiques. À côté des distributions suivant les contraintes, on dispose de deux distributions supplémentaires : la distribution uniforme sur $\mathcal{L}$ qui est une distribution d'exploration et la distribution uniforme sur les sites occupés qui est une distribution d'intensification. On alterne les distributions suivant le trafic et celles suivant la couverture d'une part, et les distributions d'exploration et celles d'intensification d'autre part.

On note x la configuration d'un réseau et x_i la configuration d'un site $i \in \mathcal{L}$. Si z est une configuration possible pour le site $i \in \mathcal{L}$, on note x^z la configuration du réseau obtenu en remplaçant x_i par z. On note $\mathcal{C}$ l'ensemble des combinaisons d'antennes possibles en un site (site vide, une omnidirectionnelle, une, deux ou trois directives). L'algorithme 1 résume les étapes d'une transition de configuration en un site $i \in \mathcal{L}$. β est le paramètre de contrôle de la distribution de Gibbs.

Algorithme 1 Transition de configuration de site.

```
Choix d'une distribution de site (V_i), i ∈ L
i ← rand( V_i / Σ_{i∈L} V_i )  {Choix du site}
for c ∈ C do
    z_c ← argmin_z E(x^z)  {Recherche des paramètres}
    w_c ← e^{-βE(x^{z_c})}
end for
c ← rand( w_c / Σ_{c∈C} w_c )
x_i ← z_c
```

La recherche des paramètres lors d'une transition de configuration de site doit être la plus efficace possible et la méthode retenue est un compromis entre qualité et complexité de la recherche. Périodiquement, on améliore la recherche précédente dans une phase de mise au point des paramètres ou intensification par recherche locale stochastique.

4 Sélection des sites suivant les contraintes

On a défini quatre distributions de site suivant les contraintes, deux relatives à la couverture et deux relatives au trafic. Pour localiser les contraintes violées, l'une des méthodes consiste à définir, sur l'ensemble $\mathcal{S}$ des STP, pour chaque site $i \in \mathcal{L}$, un voisinage R_i appelé rétine. Pratiquement, la rétine R_i est un carré centré sur i. Son diamètre est choisi empiriquement mais il doit être suffisant pour que la réunion de toutes les rétines recouvrent les STP. Localiser une contrainte revient alors à mesurer sur chaque rétine le trou de couverture ou le dépassement de capacité.

Distributions suivant la couverture

Le potentiel d'un site est la mesure (de comptage) du trou de couverture sur sa rétine. On a donc, pour tout site $i \in \mathcal{L}$,

$$V_i = |R_i \cap \mathcal{S} \backslash (\cup_{j \in T} C_j)|.$$

La figure 3 illustre cette définition.

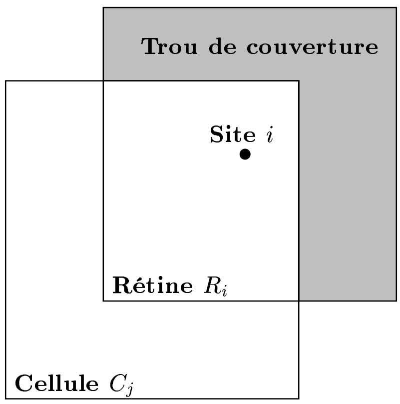

FIG. 3 – *Mesure du trou de couverture (en gris) sur une rétine.*

On définit une seconde distribution suivant la couverture destinée à sélectionner les sites les plus prometteurs pour recouvrir des trous de couverture isolés. On se place du point de vue d'un STP non couvert et on examine son voisinage pour détecter une cellule éventuelle et donc un site candidat. Le voisinage utilisé est un disque (topologie discrète à 8 voisins) de rayon égal à 2. On note $D_2(P)$ le voisinage du STP $P \in \mathcal{S}$. On a, pour tout site $i \in \mathcal{L}$,

$$V_i = \sum_{P \in \mathcal{S} \backslash (\cup_{j \in T} C_j)} |D_2(P) \cap (\cup_{j \in T_i} C_j)|,$$

où T_i est l'ensemble des stations présentes sur le site i. La figure 4 illustre cette définition.

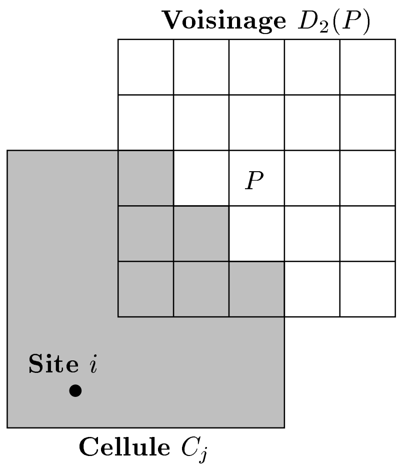

FIG. 4 – *Voisinage d'un STP P non couvert interceptant une cellule C_j.*

Distribution suivant le trafic

La première distribution suivant le trafic est définie à partir de la somme des dépassements de capacité des cellules d'un site. On a, pour tout site $i \in \mathcal{L}$,

$$V_i = \sum_{j \in T_i} \max\{0, d_j - t_{\max}\}.$$

La seconde distribution suivant le trafic s'inspire de la distribution suivant la couverture définie à partir des rétines. Pour chaque site, on fait la somme sur sa rétine des dépassements de capacité pondérés par la demande. L'objectif est d'ajouter un site dont les stations puissent localement absorber les dépassements de capacité des cellules qui interceptent sa rétine. On a, pour tout site $i \in \mathcal{L}$,

$$V_i = \sum_{j \in T} \max\{0, d_j - t_{\max}\} \sum_{P \in C_j \cap R_i} t(P).$$

5 Recherche des paramètres des stations

On fait la distinction entre recherche des paramètres précédant une transition et recherche des paramètres lors d'une intensification. La première mélange recherche systématique et recherche stochastique dans l'espace des paramètres continus discrétisés de manière grossière. La seconde repose exclusivement sur une recherche stochastique avec une discrétisation plus fine et prend également en compte le type des antennes directives. La phase d'intensification est planifiée périodiquement, pratiquement toutes les 5 transitions.

Le tableau 2 donne les caractéristiques des deux discrétisations. Dans le cas d'un problème de 250 sites (par exemple celui de l'autoroute) et avec la discrétisation grossière, on arrive à 10^{2382} configurations, ce qui est considérable.

Discrétisation		Grossière		Fine	
Paramètre	Intervalle	Pas	#	Pas	#
Puissance (dB)	[26,55]	2	15	1	30
Azimut (degrés)	[0,360[	10	36	1	360
Tilt (degrés)	[−15,0]	5	4	1	16

TAB. 2 – *Discrétisations des paramètres.*

Transition

Le fil conducteur de la recherche de transition est l'ordre dans lequel on détermine les différents paramètres : l'azimut, la puissance et le tilt. Dans le cas d'une omnidirectionnelle, on recherche systématiquement la puissance. Dans le cas d'une directive, on recherche indépendamment et systématiquement l'azimut, le tilt et la puissance. Dans le cas de deux ou trois directives, on recherche d'abord systématiquement les azimuts ; on procède ensuite par recherche locale stochastique pour déterminer les puissances ; enfin, on détermine les tilts systématiquement. Dans le cas de deux directives, on parcourt tous les couples d'azimuts distants d'au moins 30 °. Au contraire, dans le cas de trois directives, on considère trois azimuts constants les uns par rapport aux autres et formant deux à deux un angle de 120 °. C'est la configuration canonique des réseaux cellulaires ; elle est repérée par un seul angle qui peut prendre 12 valeurs différentes si l'on ne distingue pas les antennes. La recherche se réduit alors à déterminer systématiquement l'angle de la configuration.

Intensification

L'intensification se fait par recherche locale stochastique (cf. algorithme 2). On note $x_i.P_j$ la puissance de la station j du site i, $x_i.A_j$ l'azimut, $x_i.T_j$ le tilt et $x_i.D_j$ le type de son antenne. On dispose de deux types de directives que l'on représente numériquement par 0 et 1. On fait appel dans l'algorithme à la fonction rand(A) qui renvoie la réalisation d'une variable aléatoire uniforme sur l'ensemble A (fini). Dans le cas $A = \{1, \dots, n\}$, on note simplement rand(n). L'algorithme comporte au plus 100 itérations et on quitte la boucle dès que l'on a détecté un minimum local, c.-à-d. dès que 10 perturbations consécutives ont été refusées. À chaque itération, la perturbation est choisie aléatoirement, de même que la station perturbée du site courant. L'amplitude des perturbations a été déterminée empiriquement.

6 Recuit simulé

Le paramètre de contrôle β de la distribution de Gibbs d'une transition est l'inverse d'une température thermodynamique. Le recuit simulé consiste à choisir une température initiale et une loi de décroissance de la température. La température initiale a été déterminée empiriquement de manière que les probabilités de chacune des transitions soient du même ordre de grandeur, assurant par là même une exploration suffisante de l'espace des configurations. La décroissance de la température se fait par paliers de longueur variable, la température étant abaissée selon une loi géométrique après un nombre donné de transitions acceptées. Une transition est dite acceptée si la nouvelle configuration du

Algorithme 2 Intensification par recherche locale stochastique.

$E^* \leftarrow E(x)$
$k \leftarrow 0$
$l \leftarrow 0$
while $k < 100$ and $l < 10$ **do**
  $x' \leftarrow x$
  $j \leftarrow \mathrm{rand}(T_i)$ {Choix de la station}
  $p \leftarrow \mathrm{rand}(4)$ {Choix du type de perturbation}
  $\varepsilon \leftarrow \mathrm{rand}\{-1, 1\}$ {Signe de la perturbation}
  if $p = 1$ **then** {Perturbation de l'azimut}
    $x'_i.A_j \leftarrow x'_i.A_j + \varepsilon\,\mathrm{rand}(3)$
  else if $p = 2$ **then** {Perturbation de la puissance}
    $x'_i.P_j \leftarrow x'_i.P_j + \varepsilon\,\mathrm{rand}(3)$
  else if $p = 3$ **then** {Perturbation du tilt}
    $x'_i.T_j \leftarrow x'_i.T_j + \varepsilon\,\mathrm{rand}(2)$
  else {Perturbation du type d'antenne}
    $x'_i.D_j \leftarrow 1 - x'_i.D_j$
  end if
  if $E(x') < E^*$ **then**
    $x \leftarrow x'$
    $E^* \leftarrow E(x')$
    $l \leftarrow 0$
  else
    $l \leftarrow l + 1$
  end if
  $k \leftarrow k + 1$
end while

site visité diffère de la précédente. Le nombre de transitions acceptées par palier influence directement la convergence de l'algorithme et la qualité des solutions. Pratiquement, on l'a choisi dans l'intervalle [40,60]. La raison géométrique a été fixée à 0.9.

7 Simulations et résultats

Les simulations présentées dans ce paragraphe concernent deux zones d'implantation, une zone urbaine et une section d'autoroute, et deux scénarios, création ou extension d'un réseau. Les jeux de données correspondant occupent plusieurs centaines de mégaoctets. Leurs caractéristiques sont regroupées dans le tableau 3.

Jeu	Auto.	Auto. (ext)	Ville	Ville (ext)
Étendue (km)	40×170	40×170	50×46	50×46
# sites	250	250 (87)	568	747 (96)
Maille (m)	200	200	200	200
# STP	29.254	29.254	17.392	42.492
# TTP	4.967	4.967	6.656	22.125
Demande (Erlang)	3.211	3.211	2.988	8.087
# min. sites	25	25	24	63

TAB. 3 – *Caractéristiques des jeux de données. Dans le cas de l'extension, on a noté entre parenthèses le nombre de sites occupés dans le réseau existant.*

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux 4 et 5. Seules les configurations admissibles non dominées ont été retenues. Notons que des configurations admissibles sans composante connexe ont été découvertes pour chaque jeu de données et chaque scénario (au prix d'une augmentation du coût en sites). Le temps de calcul nécessaire est de l'ordre de 3 jours avec un processeur pentium II à 300 MHz. La figure 5 montre l'évolution des trois objectifs au fur et à mesure de la découverte des configurations admissibles dans le cas de la ville (création d'un réseau). L'algorithme insère une phase d'intensification toutes les 5 itérations.

À titre de comparaison, nous avons fait figurer dans le tableau 4 certaines des solutions obtenues par Vasquez et Hao [VH99]. Bien que nous partagions le même modèle, ces derniers ont choisi de relaxer la contrainte relative à la satisfaction du trafic et, inversement, considèrent comme une contrainte l'obtention de cellules sans composante connexe (autre que la composante connexe principale). Il en résulte des solutions radicalement différentes dont la particularité est un très faible niveau d'interférence, un nombre élevé de sites et un trafic servi inférieur à la demande. Nous avons également fait figurer deux de leurs solutions non admissibles, c.-à-d. avec des composantes connexes en excès, qui améliorent le trafic servi.

Conclusion

Nous avons présenté une méthode d'optimisation de réseaux de radiotéléphonie mobile qui repose sur un mélange de recherche systématique et de recherche locale stochastique. L'algorithme principal sélectionne les sites à visiter en fonction de la localisation

n°	Trafic (%)	# sites	o	$d1$	$d2$	Interf. (dB)	C.C.
Section d'autoroute							
1	100	41	2	93	3	$3{,}7 \times 10^6$	12,5
2	100	46	1	37	70	$0{,}5 \times 10^6$	14,9
3	100	60	4	86	20	$1{,}7 \times 10^6$	1
4	100	73	10	103	14	$2{,}1 \times 10^6$	0
Ville							
1	100	35	3	46	36	$0{,}76 \times 10^6$	0
Solutions de Vasquez et Hao [VH99]							
Section d'autoroute							
1	70	58	1	35	67	$0{,}33 \times 10^6$	0
2	90	78	0	28	128	$0{,}38 \times 10^6$	0
3	99	79	0	0	118	$0{,}31 \times 10^6$	7,6
Ville							
1	75	60	0	29	41	$0{,}21 \times 10^6$	0
2	100	94	0	0	154	$0{,}21 \times 10^6$	0
3	98	63	0	0	135	$0{,}34 \times 10^6$	1,4

TAB. 4 – *Configurations admissibles non dominées (création de réseau) et comparaison avec les solutions de Vasquez et Hao. On note o le nombre d'antennes omnidirectionnelles, $d1$ le nombre de directives de type 1 et $d2$ celui de directives de type 2. Le nombre de composantes connexes (C.C.) est rapporté au nombre de cellules.*

n°	# sites	o	$d1$	$d2$	Interf. (dB)	C.C.
Section d'autoroute						
1	88 ($\sim 6 + 1$)	12	17	153	$6{,}5 \times 10^6$	13
2	87 ($\sim 56 + 8 - 8$)	21	72	52	$2{,}9 \times 10^6$	1,5
3	87 ($\sim 54 + 9 - 10$)	21	77	46	$3{,}3 \times 10^6$	0
Ville						
1	93 ($\sim$ 74 + 40 - 2)	11	213	62	$34{,}6 \times 10^6$	0

TAB. 5 – *Configurations admissibles non dominées (extension). La notation $\sim a + b - c$ signifie que a sites ont été modifiés, b ajoutés et c supprimés.*

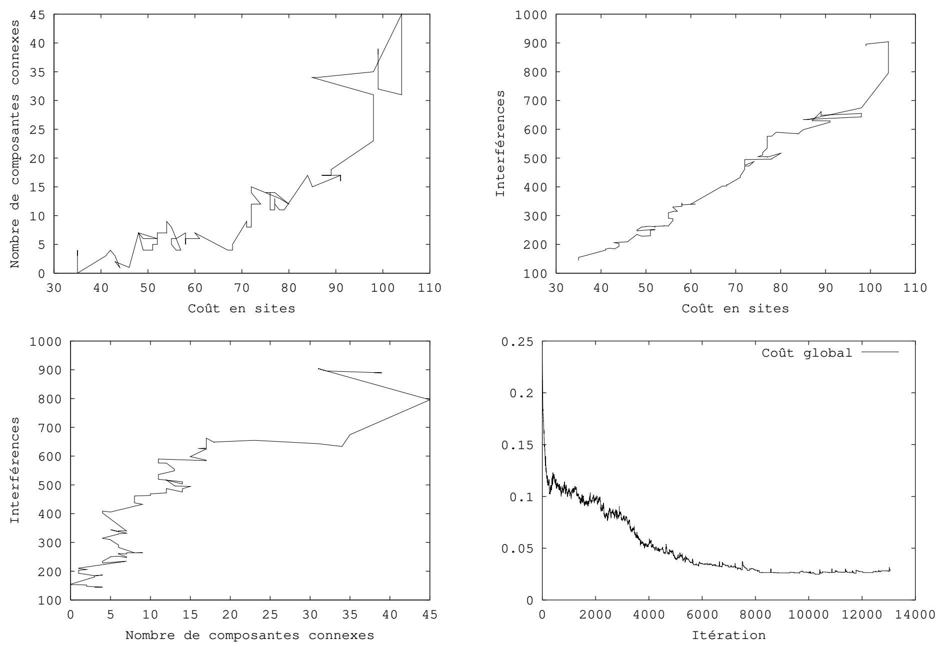

FIG. 5 – *Évolution des objectifs des configurations admissibles au cours du temps. L'origine de la ligne brisée se trouve dans le coin supérieur droit. Les interférences ne sont pas exprimées en dB mais dans une unité propre à l'algorithme. Le dernier graphe représente l'évolution du coût global au cours du temps repéré par le nombre d'itérations.*

géographique des contraintes et la configuration future du site courant est choisie stochastiquement par échantillonnage de Gibbs. La recherche des paramètres des stations est systématique ou stochastique. On alterne des phases de transition et des phases d'intensification de la recherche.

La méthode est flexible. Elle a permis de prendre en compte simplement le cas de l'extension d'un réseau. Les algorithmes de recherche des paramètres peuvent être remplacés ou rendus plus exhaustifs en fonction de la puissance de calcul disponible. On peut également envisager une méthode d'optimisation des paramètres dans le domaine continu.

Bien qu'approchée, la méthode proposée s'est révélée efficace dans la découverte de configurations admissibles de bonne qualité, y compris du point de vue de la connexité des cellules du réseau.

Références

[Ber98] A. Berny. Radio network optimization by means of neural networks. In *Proceedings of the thirty-sixth annual Allerton conference on communication, control and computing*, pages 177–186, September 1998.

[CDDR97] A. Caminada, T. Dony, Y. Duniau, and P. Reininger. ARNO: algorithms for radio network optimization. Technical Report Del. No. 1-A/1, CNET, 1997. IT Program Project No. 23243.

[CGK+96] P. Calégari, F. Guidec, P. Kuonen, B. Chamaret, S. Ubéda, S. Josselin, D. Agner, and M. Pizarosso. Radio network planning with combinatorial algorithms. In *ACTS Mobile Communications*, pages 707–713, May 1996.

[FGK+95] S.J. Fortune, D.M. Gay, B.W. Kernighan, O. Landron, R.A. Valenzueal, and M.H. Wright. WISE design of indoor wireless systems: practical computation and optimization. *IEEE Computational Science and Engineering*, 2(1):58–68, Spring 1995.

[GG84] S. Geman and D. Geman. Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 6(6):721–741, November 1984.

[HB92] D.W. Heermann and K. Binder. *Monte Carlo simulation in statistical physics, an introduction.* Springer-Verlag, Berlin, 1992.

[KGV83] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, and M.P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598):671–680, May 1983.

[VH99] M. Vasquez and J.-K. Hao. A heuristic for antenna positioning in cellular networks. *Journal of Heuristics*, 1999. À paraître.