

Diplôme d'Etudes Approfondies Images et Systèmes

Année 2001-2002

Mémoire de Recherche

La Planification de réseaux locaux sans fils :
Modélisation Matricielle et Présentation d'un
Algorithme Déterministe

KATIA RUNSER

*Directeur de Recherche : **Jean-Marie GORCE***



Laboratoire CITI
INSA bâtiment Léonard de Vinci
69621 Villeurbanne



Remerciements.

Je tiens à remercier vivement M. Jean-Marie Gorce pour son suivi tout au long de mon stage de DEA. J'ai apprécié ses conseils et ses remarques pertinentes qui m'ont permis d'avancer dans mon travail.

Je remercie tout autant M. Stéphane Ubeda et tous les membres du laboratoire pour leur soutien.

Je remercie particulièrement M. Eric Jullo, pour le temps qu'il m'a consacré lors de la prise en main du moteur de propagation et lors de la phase de développement de l'algorithme.

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

Plan.

1	INTRODUCTION.....	4
2	POSITIONNEMENT DU PROBLEME.....	6
2.1	DESCRIPTION DU CANAL RADIO EN ENVIRONNEMENT INDOOR.	6
2.2	MODELES ET MOTEURS DE PROPAGATION.....	7
2.2.1	<i>Méthodes Statistiques.....</i>	7
2.2.2	<i>Méthode Microcellulaire : le Ray Tracing.....</i>	8
	LA METHODE DE PROPAGATION PAR FLUX (PAR FLOW METHOD).	9
2.3.1	<i>Les méthodes discrètes.....</i>	9
2.3.2	<i>Approche Par Flow temporelle.....</i>	9
2.3.3	<i>Approche Par Flow dans le domaine Fréquentiel.....</i>	10
2.4	LA PLANIFICATION DE RESEAUX WIRELESS LAN.....	12
2.4.1	<i>Les Scénarios de Planification.....</i>	12
2.4.2	<i>Le Critère d'Optimisation.....</i>	13
3	MODELISATION.....	14
3.1	DESCRIPTION DU MODELE MATRICIEL.	14
3.1.1	<i>Données initiales.....</i>	14
3.1.2	<i>Représentation matricielle.....</i>	14
3.1.3	<i>La fonction d'évaluation de couverture.....</i>	15
3.1.4	<i>Application de la description matricielle aux différents scénarios d'optimisation.....</i>	19
3.2	SIMPLIFICATION DE LA METHODE.....	20
3.2.1	<i>Un Problème Inverse.....</i>	20
3.2.2	<i>Le Regroupement par Blocs.....</i>	20
3.2.3	<i>Diminution du nombre de sources.....</i>	21
3.3	MISE EN ŒUVRE ET RESULTATS.....	22
3.3.1	<i>Positionnement d'une source.....</i>	22
3.3.2	<i>Couverture de deux sources avec prise en compte des interférences.....</i>	25
4	TECHNIQUES D'OPTIMISATION EN PLANIFICATION WLAN.....	27
4.1	LES ALGORITHMES ET HEURISTIQUES D'OPTIMISATION.....	27
4.1.1	<i>Les méthodes stochastiques.....</i>	27
4.1.2	<i>Les méthodes déterministes.....</i>	28
4.1.3	<i>La méthode génétique.....</i>	28
4.2	ETAT DE L'ART.....	29
5	PRESENTATION D'UN ALGORITHME DETERMINISTE.....	31
5.1	EXPLOITATION DU MOTEUR PARFLOW.....	31
5.2	LA PROPRIETE DE RECIPROCITE.....	33
5.3	DESCRIPTION DE L'ALGORITHME.....	33
5.4	COMPORTEMENT DE L'ALGORITHME.....	35
5.5	PROPOSITIONS D'AMELIORATION.....	38
5.5.1	<i>Prise en compte des discontinuités.....</i>	38
5.5.2	<i>Introduction d'une dimension probabiliste.....</i>	39
5.5.3	<i>Proposition d'un maillage inter-sources.....</i>	39
6	PERSPECTIVES ET CONCLUSIONS.....	41
7	BIBLIOGRAPHIE.....	42

1 INTRODUCTION.

La transmission de données, qu'elle se fasse à longue ou moyenne distance, est actuellement une technique qui peut se décomposer en deux principales catégories : les transmissions filaires et les transmissions hertziennes. Quelle que soit la nature des données, **l'enjeu actuel** est d'obtenir **le meilleur débit et la meilleure qualité** de transmission possible.

Au niveau des **transmissions filaires**, les techniques basées sur des fils de cuivre ou des fibres optiques sont **bien maîtrisées**. Le signal, optique ou électrique, est parfaitement guidé et les pertes sont minimales. Les taux d'erreurs moyens observés avec des fibres optiques sont de l'ordre de $1E^{-9}$. Cette même technologie permet de mettre en œuvre des débits de 400 Gbits/s (la technologie SDH).

Les **transmissions hertziennes** réalisent la même fonction, mais le support de transmission n'est plus un milieu guidé, mais un fluide illimité : l'air. Le **canal radio** est un **canal de transmission complexe**. Les phénomènes de diffraction, d'interférence et d'étalement de spectre en diminuent les performances. Pour pouvoir réaliser une communication, il faut que le rapport entre la puissance du signal reçu et la puissance du bruit soit suffisamment élevé pour que le récepteur puisse démoduler le signal. Etant donné le type de canal et la bande passante dont on dispose, il est clair que l'on ne peut obtenir un taux de pertes et un débit comparable à celui des technologies filaires.

Les réseaux locaux sans fils (Wireless LAN), sont actuellement en plein essor. Cette technologie permet la **transmission par radiofréquences** de flux de données à **l'intérieur** d'un bâtiment ou d'un campus. Les deux principales technologies sont **802.11**, proposé par l'organisme américain IEEE, et **HIPERLAN**, proposé par l'organisme européen ETSI. Une comparaison des principales caractéristiques des deux technologies se trouve dans [1]. La **plus grande partie** des équipements aujourd'hui sur le marché suivent la norme **802.11b**. On peut atteindre des débits allant de 1 à 11 Mbits/s. Mais le canal radio étant partagé entre plusieurs utilisateurs, le débit par utilisateur n'est pas toujours aussi élevé.

Il existe **deux modes de fonctionnement**, implémentés dans les deux normes. Le premier mode est le mode « **Ad Hoc** ». Chaque terminal mobile est un nœud du réseau. **Les communications** se font **directement** entre les terminaux, sans l'utilisation d'un tiers. Ce réseau se **configure automatiquement**. La gestion de cette propriété est réalisée au niveau protocolaire (au niveau des couches liaison de données et réseau du modèle OSI).

Le second mode, le mode « **Point d'Accès** », repose sur le même principe que les réseaux de téléphonie cellulaire. Des **antennes relais** (les stations de base ou bornes de communications) sont positionnées régulièrement dans l'espace, de façon à fournir **une couverture complète**. Tous les dialogues entre les stations mobiles sont effectués via ces bornes de communication. Ces stations de bases sont reliées entre elles soit par un réseau filaire de type Ethernet, soit par un canal radio. La **mobilité** des récepteurs est gérée grâce au « **handover** ». Un handover permet de transférer une communication d'une antenne relais à l'autre sans qu'il y ait de coupure.

Le **placement des points d'accès** lors de la conception d'un réseau WLAN **conditionne les performances** à venir du réseau. On peut choisir **d'optimiser différents critères** (la

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

couverture, le débit, le nombre de points d'accès,...). Ceux-ci seront décrits dans la seconde partie de ce mémoire.

Le problème de planification peut être décrit sous la forme d'un **problème inverse**. Si on est capable de calculer toutes les solutions possibles, on peut le représenter sous la forme d'une **matrice**. Il ne reste qu'à l'interpréter correctement en fonction du critère à optimiser. Cette modélisation sera traitée en troisième partie.

Si la taille de l'environnement de travail est importante, **le calcul** des coefficients de la **matrice est trop onéreux** et trop long. Il existe des méthodes pour se rapprocher, à coût plus faible, de la configuration optimale. Ces méthodes peuvent converger ou non. Un état de l'art des méthodes existantes est proposé en quatrième partie.

Par la suite, je vais présenter **une méthode déterministe** qui utilise à la fois **une propriété de réciprocité** propre au trajet des ondes électromagnétiques et **les propriétés du moteur de propagation ParFlow** développé au laboratoire CITI. Cet algorithme et les résultats de la simulation sont décrits en cinquième partie du mémoire.

Les perspectives et conclusions sont présentées dans la sixième et dernière partie de ce rapport.

2 POSITIONNEMENT DU PROBLEME.

Il est important de placer au mieux les différents points d'accès au sein de l'environnement où sera déployé le réseau. Cette étape influe sur les performances futures du réseau.

Pour donner un cadre à ce problème, il faut bien appréhender les caractéristiques du **canal radio indoor**. Celles-ci sont décrites dans le premier point.

Dans un processus de recherche de la distribution idéale des sources sur le plan, il faut pouvoir **évaluer** une solution. Une **solution** est définie par le **vecteur position des N sources à placer** dans le plan. Pour pouvoir choisir cette solution, on doit être en mesure de prédire la couverture de chaque source et d'en déduire une couverture globale. Pour cela, on a besoin d'un **moteur de propagation** adapté au problème. Le deuxième point traitera des différents moteurs de propagation et le troisième point de la méthode « ParFlow ».

Si l'on est capable de prédire correctement le comportement du champ émis par une source, sans que ce calcul soit trop long, on peut s'attacher à la définition **d'un scénario d'optimisation**. En effet, il existe plusieurs paramètres du problème (la couverture, le débit, le nombre d'antennes ...) que l'on peut chercher à améliorer par le positionnement des antennes.

Quand un scénario est choisi, il faut en déduire **un critère** qui permettra **d'évaluer correctement chaque solution**. Ce critère dépend bien entendu du scénario. La description des scénarios d'optimisation et le choix d'un critère sont décrits dans le quatrième point de cette partie.

2.1 Description du canal radio en environnement indoor.

En environnement fermé, l'importance de certains phénomènes de propagation n'est pas la même qu'en environnement ouvert. Les effets dus à la diffraction, aux interférences et à la propagation multi-trajet sont plus marqués et l'atténuation n'est plus seulement fonction de la distance à la source.

D'après T. S. Rappaport [6], il existe **deux modèles** différents qui permettent de décrire le canal radio suivant :

Le premier type de modèle, le **modèle à grande échelle** (*large scale model*), permet de décrire le **niveau de signal moyen** obtenu au niveau du récepteur pour une distance émetteur récepteur arbitraire.

Le second modèle, le **modèle à petite échelle** (*small scale* ou *fading model*), permet de caractériser les **fluctuations rapides** du signal sur une courte distance. Ce modèle décrit le comportement du canal pour des applications de transmission continue, c'est-à-dire les communications radio pour des réseaux cellulaires. Dans cette situation, la propagation selon plusieurs trajets va créer des retards de phase au niveau du récepteur. On observe alors un **étalement temporel des réponses** et une variation rapide du signal. L'affaiblissement qui en découle suit une loi de probabilité de Rayleigh.

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

Le premier modèle permet de décrire les communications discrètes à courte distance. Il est donc plus apte à retranscrire le comportement **en environnement indoor**. Dans ce cas, l'écart temporel à l'arrivée au récepteur de deux rayons aux trajets différents émis par une même source est important par rapport au temps de propagation émetteur récepteur moyen. Il apparaît alors une dégradation plus lente du niveau de signal : c'est un affaiblissement de type log-normal.

Si l'émetteur et le récepteur sont en **ligne de vue**, le canal peut être modélisé par une **distribution de Rice**. Ce canal est aussi bien dispersif en temps qu'en fréquence. En indoor, cette distribution est **modifiée par la présence de murs**. L'affaiblissement dû aux parois et plafonds est plus ou moins important en fonction des matériaux utilisés. De plus, au niveau des ouvertures (portes, ..), des phénomènes de diffraction apparaissent. Il existe alors des zones d'interférences destructives et constructives.

Au vu de tous ces phénomènes, **il est difficile de prédire fidèlement le comportement** des ondes électromagnétiques et l'étendue de la propagation. Pourtant, pour pouvoir planifier correctement le positionnement des émetteurs pour des réseaux cellulaires ou WLAN, il est nécessaire de connaître ce comportement avant de déployer le réseau.

2.2 Modèles et moteurs de propagation.

Pour pouvoir calculer la propagation des ondes électromagnétiques, plusieurs modèles ont été mis au point.

2.2.1 Méthodes Statistiques.

Vu la complexité du phénomène, on a dans un premier temps utilisé des **modèles empiriques**. Ces modèles sont basés sur de grandes **campagnes de mesure** qui ont été effectuées en environnement urbain pour la propagation d'ondes GSM et DCS. Le **modèle de Hata** et son évolution pour le DCS, le modèle **COST-231**, sont les plus utilisés.

Pour un environnement **indoor**, ce type de méthode détermine l'atténuation (*Path Loss*) en fonction de l'équation suivante :

$$(2.2.1) \quad PL(d) \text{ [dB]} = PL(d_0) \text{ [dB]} + 10.a.\log_{10}(d / d_0) + \sum_{i=1}^N B(i) \text{ [dB]}$$

Où a est le facteur d'atténuation dérivé des tables de mesure, d est la distance émetteur récepteur, d_0 est la distance de référence de l'antenne émettrice et $B(i)$ l'atténuation due au passage par la $i^{\text{ème}}$ obstruction (mur..). C'est une approximation du premier ordre. Le niveau de champ décroît de façon logarithmique en fonction de la distance.

Ce type de prédiction de couverture est utilisé par M. D. Adickes [7] dans sa méthode de planification indoor.

Ces modèles sont adaptés pour des systèmes cellulaires de grandes tailles de type outdoor. Par contre, les **temps de calculs** sont **faibles**. Mais les résultats de cette méthode sont **trop approximatifs** pour une utilisation en environnement indoor.

2.2.2 Méthode Microcellulaire : le Ray Tracing.

Une autre méthode de calcul d'affaiblissement, dérivant de la synthèse d'image 3D, est basée sur le **lancer de rayons** (ou Ray Tracing). Ce modèle de prédiction cherche à prédire une zone de couverture moins étendue de façon plus précise que les modèles empiriques.

C'est en 1991 que McKnown, dans son article [2], proposa d'associer le Ray Tracing à une base de données géométriques pour simuler la propagation des ondes dans un réseau radio. C'est en 1993 que Valenzuela [Valenz., 1993] proposa d'appliquer cette méthode au milieu indoor. La même année, Seidel [9] simula les phénomènes de diffraction par ray tracing. En 1994, Hussman [10] se servit du ray tracing pour la gestion des ressources radio et en particulier le handover et l'allocation de canaux.

La source est ici modélisée par une **sphère d'émission** depuis laquelle on émet des rayons de manière isotrope. Plus le nombre de rayon est élevé, meilleure est la résolution de la prédiction. Il existe deux modèles de rayon. On travaille soit avec **un rayon vectoriel** soit avec un **rayon faisceau (beam tracing) en forme de cône**. Ce dernier type de rayon diminue les temps de calcul, mais est difficile à mettre en œuvre dans les environnements complexes.

Il existe deux modèles pour obtenir le niveau de champ à la réception. **La méthode directe** lance tous les rayons de la source. Le chemin de propagation du rayon est calculé jusqu'à ce qu'il ait réalisé un certain nombre de réflexions. Tous les rayons qui passent au voisinage du point de réception contribuent à la valeur du signal en ce point. Cette technique ne permet pas d'affirmer que le récepteur a obtenu tous les rayons possibles. De plus, certains rayons calculés sont inutiles...

La seconde méthode, la « **méthode image** », ne considère que les rayons allant de la source au récepteur. Cette méthode calcule le nombre exact de rayons nécessaires, mais elle est très sensible à la complexité de l'environnement.

Le ray tracing permet de bien modéliser les phénomènes de trajets multiples. Ainsi, on peut analyser le comportement temporel (retards, déphasages) des différents signaux.

Il est intéressant de noter que **toutes les caractéristiques** du canal radio peuvent être modélisées par ce type de méthode. Pour se rapprocher de la réalité, de nombreux paramètres doivent être pris en compte et optimisés. Actuellement, la plupart des articles se focalisent sur un point précis de la méthode de façon à améliorer ses performances. C'est la méthode actuellement **la plus utilisée** pour la prédiction de couverture **en environnements fermés**.

Par contre, pour obtenir une **carte de couverture précise**, il faut lancer un **grand nombre de rayons**. Cette méthode est rapide si l'on utilise peu de rayons. Dès que l'on augmente la résolution et donc le nombre de rayons, le calcul devient très vite important. Le Ray Tracing est **utile pour des environnements accidentés, de type urbain dense** où l'on souhaite prédire la couverture dans des rues encaissées entre les bâtiments.

Une dernière méthode, particulièrement dédiée à la propagation en milieu fermé, est développée actuellement au laboratoire CITI. Elle est décrite dans le paragraphe suivant.

2.3 La méthode de propagation par flux (Par Flow Method).

2.3.1 Les méthodes discrètes.

La méthode Par Flow est dérivée de méthodes déterministes, **les méthodes discrètes**. Cette famille de techniques de prédiction repose directement sur la discrétisation des **équations de Maxwell**. La première méthode existante est **la méthode des différences finies** dans le domaine temporel (**FDTD**). Elle a été décrite par Pahlavah [11] et J. W. H. Lee [12].

Les champs E et H sont discrétisés. La propagation de ces champs suit les équations de Taflove qui donnent la valeur du champ E_z en fonction des champs H des cellules voisines et de la valeur des incréments temporels et spatiaux Δt et Δ . De même, H_y est calculé en fonction du champ E des cellules voisines, de H à l'instant précédent et de μ_0 , la permittivité du vide.

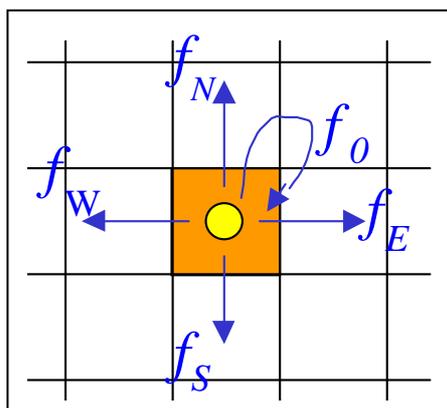
L'avantage de cette méthode est **son exactitude**, l'inconvénient est **son temps de calcul**. Beaucoup d'articles décrivant une méthode qui se veut proche de la réalité prennent la prédiction FDTD comme **témoin**.

2.3.2 Approche Par Flow temporelle.

Les méthodes temporelles donnent des résultats particulièrement intéressants. Pourtant, l'obstacle majeur est le temps de calcul bien trop important. L'élaboration de nouveaux algorithmes diminuant le temps de calcul sans altérer la qualité des résultats se révèle être un axe de recherche intéressant.

Ainsi, **la méthode des flux partiels** proposée par Chopard et al. dans [13] est une méthode issue de la mécanique des fluides qui consiste à **diviser un champ en une somme linéaire de 5 flux** : selon 4 directions (est, ouest, sud, nord) plus un flux réflexif. Le plan est discrétisé et une source est placée dans un bloc du plan. On peut alors décomposer le vecteur représentant le champ électrique en quatre composantes (f_N, f_S, f_E et f_W) plus un flux interne (f_0) (cf. schéma ci-dessous).

A **chaque étape** de l'algorithme, on **propage les vecteurs dans les cellules voisines**. Il existe donc une matrice de passage qui permet, en fonction des flux qui entrent dans une cellule au temps t , de calculer les flux entrants dans les cellules voisines au temps $t+dt$. Cette méthode est **longue** car elle nécessite **la convergence** vers un régime permanent. Pour qu'elle soit valable, il faut que la résolution spatiale soit inférieure à au moins six fois la longueur d'onde (à 2.4 GHz, $\lambda = 125$ cm).



Domaine Temporel :
Description des flux

$$\Psi(i,j) = f_W(i,j) + f_E(i,j) + f_N(i,j) + f_S(i,j) + Y_0(i,j) \cdot f_0(i,j)$$

$$\text{Avec } Y_0 = 4n^2 - 4.$$

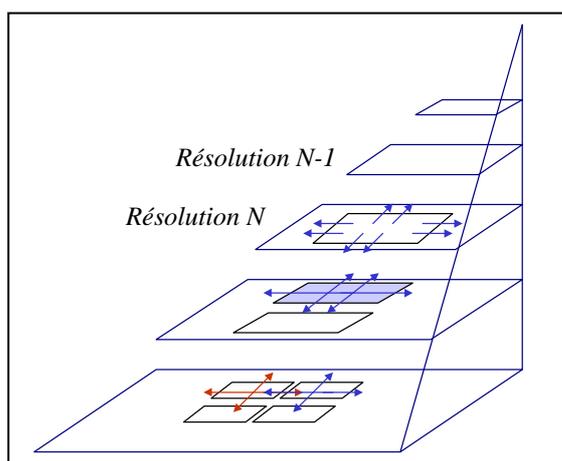
2.3.3 Approche Par Flow dans le domaine Fréquentiel.

Cette nouvelle approche du problème de propagation radio est proposée par Gorce et al. dans [3]. Au lieu de travailler dans le domaine temporel par itérations successives jusqu'à atteindre l'équilibre de la couverture radio, cette méthode travaille dans le domaine fréquentiel et **aboutit directement à l'état d'équilibre.**

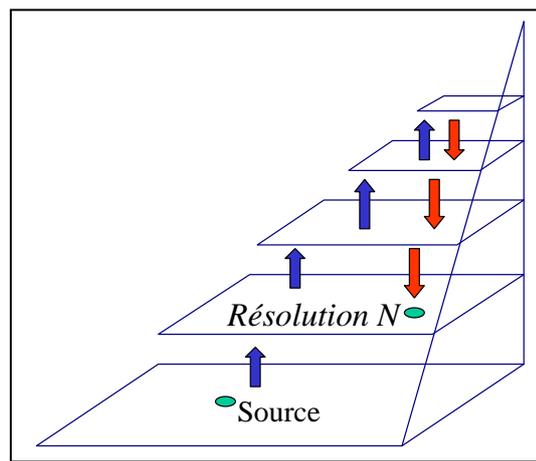
Dans le domaine fréquentiel, il est possible de simplifier le modèle en ne tenant pas compte du flux interne [4]. Ainsi, on peut **regrouper les blocs** pour travailler à une résolution moins fine. En effet, les flux inter blocs deviennent des flux internes et il est possible de les simplifier car ils ne sont plus nécessaires au calcul de propagation à une résolution inférieure. Par contre, il est nécessaire de les mémoriser pour retrouver la couverture à une résolution plus fine. Pour passer **d'une résolution à une autre**, une **inversion matricielle** est nécessaire, mais elle ne dépend pas de la position de la source et peut être **réalisée une fois pour toute.**

Ces différentes résolutions peuvent être représentées sous la forme d'une **pyramide**. Cette structure possède l'avantage d'être indépendante de la position de la source dont on recherche les performances. Elle n'est fonction que de l'environnement de calcul. **Le calcul** de cette pyramide ne se fait **qu'une seule fois** dans une étape de pré traitement.

Dans la représentation ci-dessous, **le regroupement** se fait **de façon régulière**. Un regroupement **irrégulier** des blocs a été proposé par E. Jullo dans [5] de façon à former **des blocs homogènes** en matériau (qui ne contiennent que de l'air ou un mur). Il existe une résolution à partir de laquelle tous les blocs sont homogènes. On est alors certain que le calcul des niveaux de champ à l'intérieur de ces blocs est cohérent. De plus, cette technique permet d'éviter le calcul superflu du champ à l'intérieur des murs.



Domaine Fréquentiel : Structure
Pyramidale Multi-Résolution.



Domaine Fréquentiel :
Propagation d'une source.

Cette **structure multi-résolution** permet de calculer la propagation à une résolution élevée et de récupérer la couverture à une résolution plus faible. En effet, **pour obtenir une couverture** à une résolution donnée, on **propage** d'abord la source **du niveau le plus bas** de

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

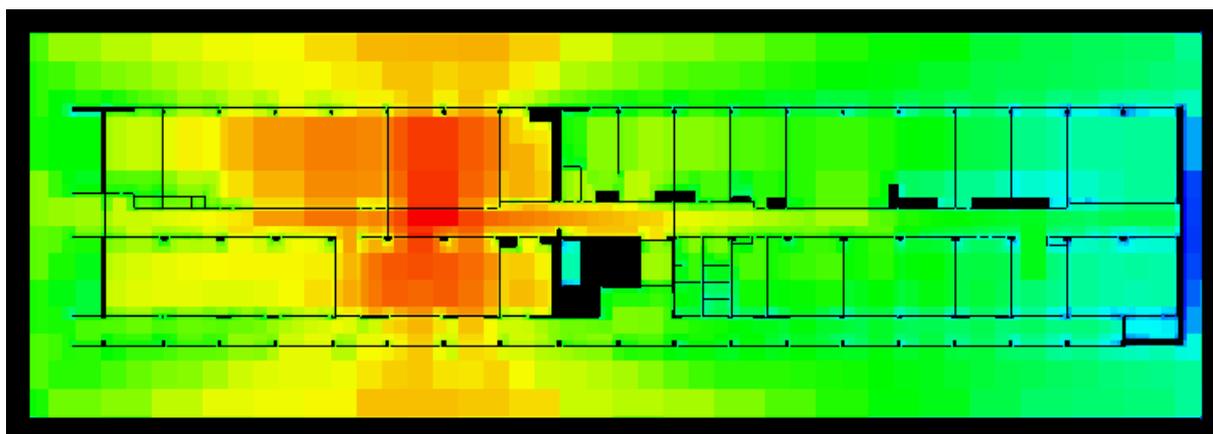
la pyramide **vers le niveau le plus haut**, puis on **redescend** le long de la pyramide pour s'arrêter à la résolution souhaitée (cf. schéma ci-avant).

Pour réaliser une seconde simulation dans le même environnement, il suffit de positionner la source sans recalculer toute la structure matricielle.

Le **gain en temps de calcul est très net sur la méthode temporelle**. D'après [Jullo, 2002], la complexité de cette méthode, au niveau de la propagation d'une source par la méthode fréquentielle est en $\log_2(N)$. La complexité de la méthode itérative est proportionnelle à $10N$. De plus, on obtient un **résultat fidèle** au comportement réel du champ.

La recherche et l'implantation des algorithmes de création de la structure pyramidale, de propagation des sources ont été réalisés par E. Jullo. La structure de données a été choisie de façon à optimiser la place mémoire et le temps de calcul.

Voici un exemple de simulation obtenu avec la structure pyramidale irrégulière. L'environnement de test représente l'étage du bâtiment où se trouve le laboratoire CITI. La taille de cet environnement est de 256×763 pixels. Il est constitué de 8 matériaux différents. La fréquence de calcul utilisée est de 1 GHz et un pixel représente 5cm en réalité. Cette simulation est une représentation du niveau de champ présent à l'intérieur des blocs homogènes de taille maximale.



2.4 La Planification de Réseaux Wireless LAN.

2.4.1 Les Scénarios de Planification

Dans la description du canal radio, il a été montré que le comportement des ondes en environnement fermé est bien plus complexe qu'en espace libre. Il peut apparaître **des zones très mal couvertes** du fait de **l'atténuation** due aux murs ou de phénomènes **d'interférences**. Pour obtenir **un réseau fiable**, il faut au moins pouvoir y accéder dans **toute** la zone de service. C'est pourquoi il est important de **positionner au mieux** la ou les stations de base.

Avant de choisir le positionnement des antennes, il faut clairement définir quels sont les buts à atteindre. Est-ce que l'on veut **simplement accéder au service** sur toute la surface ou préfère-t-on **un champ uniformément réparti** ? Le positionnement ne se fera pas de la même façon dans les deux cas. Dans le premier cas, on cherchera simplement à obtenir un niveau de champ supérieur à la sensibilité du récepteur. Dans le deuxième cas, on essaiera de diminuer au maximum l'écart entre la valeur la plus faible et la plus élevée du niveau de champ pour tendre vers un niveau de couverture moyen.

On peut aussi introduire la notion de **qualité de service**. Pour cela, on peut définir une topologie permettant d'assurer **un débit plus important dans certaines pièces**. Mais le débit et le niveau de couverture ne sont pas les seuls critères variables. On peut essayer de **diminuer les interférences en minimisant le recouvrement** entre différentes stations de base. Ainsi, on diminue le bruit dû aux interférences.

On peut aussi rechercher pour chacun de ces critères, **le nombre minimal de stations de base** et leur position dans le plan.

Dans le cadre du DEA, il a été choisi de travailler sur **l'optimisation du placement de N antennes**, N fixé. En effet, ce type de stratégie est commun à d'autres scénarios de planification. Lors de la recherche du nombre minimal d'émetteurs, il faut savoir placer au mieux les antennes à chaque étape. On recherche dans cette configuration la couverture la plus homogène possible. La taille de l'environnement de travail est de largeur L et de hauteur H.

On doit donc trouver $PA = [(i_0, j_0), (i_1, j_1), \dots, (i_N, j_N)] \in S^N$, le vecteur des coordonnées des N Points d'Accès, tel que :

$$(2.4.1) \quad \left\{ \begin{array}{l} PA = \underset{S^N}{\text{Argmin}} [\underset{(i,j) \in (0,L) \times (0,H)}{\text{Max}} \{P_{ij}\} - \underset{(i,j) \in (0,L) \times (0,H)}{\text{Min}} \{P_{ij}\}] \\ \forall (i,j) \in S \quad P_{ij} > S_0 \end{array} \right.$$

Où S_0 donne la sensibilité du récepteur et P_{ij} la puissance du champ au point (i, j) . S^N est l'ensemble de toutes les solutions de placement possibles. S représente ici l'ensemble des positions que peut prendre une source sur la surface S .

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

Pour obtenir une couverture homogène, il est d'une part nécessaire que l'écart entre les extrema de couverture soit le plus faible possible, et d'autre part que tous les points possèdent un niveau de champ suffisant pour être détectés et démodulés.

2.4.2 Le Critère d'Optimisation

Maintenant que l'on a clairement défini le problème à résoudre, avant de rechercher une solution, il faut être capable de mesurer la pertinence et la qualité d'une solution. Pour **évaluer une solution**, il est nécessaire de définir un critère d'optimisation judicieux.

En l'occurrence, si on recherche la position de N sources dans le plan pour obtenir la **couverture la plus uniforme possible**, il est **nécessaire de pénaliser fortement les faiblesses** de couverture, mais on ne doit **pas négliger les fortes valeurs**. On peut, par exemple, minimiser l'écart quadratique entre la valeur du de champ P_{ij} en chaque point (i, j) et la valeur moyenne P du niveau de champ pour toute l'image de couverture. Il est important de noter que toutes les valeurs de champ sont données en décibels. Ce critère a la forme suivante :

$$(2.4.2) \quad Q_1 = \sum_{i,j} \| (P_{ij})_{dB} - (P)_{dB} \|^2$$

Ce critère s'annule bien quand P_{ij} est égal à P . Mais si l'on observe son comportement pour différentes valeurs de P_{ij} , on note que les **valeurs élevées de P_{ij}** sont bien **plus pénalisantes** que les faibles valeurs. Or, le but initial est de réduire les faiblesses de couverture tout en l'uniformisant. Ce critère **n'est donc pas le plus juste** en matière d'évaluation. De plus, il est impossible de limiter les fortes valeurs de niveau de champ au voisinage d'un point d'accès. Il faut donc rechercher un critère où ce phénomène ne fausse pas les résultats.

Si l'on souhaite **augmenter le poids des valeurs les plus faibles** dans le critère, on peut travailler avec le critère suivant :

$$(2.4.3) \quad Q_2 = \sum_{i,j} \| \text{Max}(0, ((P)_{dB} - (P_{ij})_{dB})) \|^2$$

Avec ce critère, si P_{ij} est supérieur à la moyenne P , la différence sera négative et le critère sera nul. Les valeurs élevées n'influencent plus aussi fortement l'évaluation. Si un point est mal desservi, P_{ij} est inférieur à P . Dans ce cas, la solution est directement pénalisée. **Les valeurs élevées ne sont plus prépondérantes** dans ce critère, mais elles sont encore prises en compte par le truchement de l'utilisation de la moyenne P .

Ce critère **a été adopté** pour l'évaluation des solutions pour **l'optimisation du placement de N antennes**, N fixé. Ce critère n'est pas valable pour d'autres scénarios. En effet, si l'on cherche à minimiser le nombre de points d'accès, la solution avec un nombre d'émetteur nul est la meilleure solution à évaluer !

3 MODELISATION.

Notre objectif est ici, compte tenu d'une distribution initiale des sources et de la représentation de l'environnement sur un plan en deux dimensions, de **trouver la position optimale des différents points d'accès** de façon à optimiser un critère de couverture choisi.

On suppose qu'on est capable d'obtenir **la contribution d'une source en un nombre fini de points régulièrement répartis dans le plan**. Ceci implique une discrétisation du plan de recherche. **La couverture d'une source** est donnée par l'ensemble des points où **la puissance** du champ électrique P est **supérieure à un seuil fixé**. On peut déterminer ce seuil en fonction de **la sensibilité des récepteurs**. Ce seuil est alors calculé en fonction du rapport signal sur bruit minimum nécessaire à une bonne démodulation du signal RF.

Le problème étant posé en **2D**, on **ne tient pas compte du champ magnétique**, car le vecteur H est orthogonal au champ électrique E compris dans le plan. Sa composante tangentielle est donc nulle. Cette simplification n'est bien entendu plus possible si l'on s'intéresse à une modélisation en trois dimensions du problème.

3.1 Description du modèle matriciel.

3.1.1 Données initiales.

Soit N_S le **nombre de sources que l'on cherche à placer** au mieux dans le plan.

Soit N la **taille de l'environnement**, c'est à dire le nombre de points dont on a besoin pour décrire complètement la couverture du plan 2D. Soit $\mathbf{E} = \{\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, .. \mathbf{E}_N\}$ le vecteur qui donne en chaque point du plan la contribution des N_S sources.

Tout point du plan constitué d'air est une position potentielle pour une source. Soit M le **nombre des positions du plan susceptibles d'accueillir une source**.

Lors de la planification, on cherche la configuration des N_S sources qui optimise un critère donné. On peut **rechercher toutes les configurations possibles**, calculer **la couverture globale obtenue pour chaque solution** et en déduire la valeur du critère. Cette **méthode exhaustive** est longue. Pourtant, elle garantit l'obtention de l'extremum global.

3.1.2 Représentation matricielle.

Calculer **la couverture globale d'une solution** revient à déterminer la contribution de chaque source et à la combiner aux N_S-1 autres sources de la solution. Le calcul de couverture d'une source est onéreux. Il est donc intéressant d'obtenir l'ensemble des solutions en **limitant le nombre de propagations**.

Si l'on utilise des sources ayant les mêmes propriétés, il suffit de connaître **la couverture d'une source placée en chaque point du plan**. On a alors toutes les données nécessaires pour décrire complètement le problème et rechercher l'extremum sans réaliser de nouveaux

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

calculs de couverture. On réalise ici une recherche exhaustive de toutes les solutions en réalisant un minimum de propagations.

On peut **représenter** ces données par **la matrice de transfert** suivante :

$$(3.1.2-1) \quad M = \begin{pmatrix} P_{11} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1M} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ P_{i1} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{iM} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ P_{N1} & \dots & P_{Nj} & \dots & P_{NM} \end{pmatrix}$$

Un vecteur colonne de cette matrice donne le **niveau de champ obtenu en chaque point du plan par une source**.

Cette matrice décrit de façon précise **le comportement de l'environnement** pour toutes les sources potentielles. Elle permet de résoudre directement le problème de planification. Il suffit de pouvoir l'interpréter en fonction du scénario d'optimisation que l'on s'est fixé.

Ainsi, pour obtenir la couverture globale $E = \{E_1, E_2, \dots, E_N\}$ avec une distribution de sources S donnée, on utilise une fonction $\Psi : 3_M * 3_N \rightarrow 3_N$ tel que :

$$(3.1.2-2) \quad E = \Psi (M, S)$$

$S = \{S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_M\}$ est un vecteur de taille M . Si une source est présente sur le plan au $j^{\text{ème}}$ point du plan, S_j vaut 1. Sinon, S_j est nul.

3.1.3 La fonction d'évaluation de couverture.

Ψ est une fonction qui permet d'évaluer la couverture obtenue en fonction du vecteur source. Si on cherche à optimiser **le placement d'une seule antenne** ($N_S=1$), Ψ représente simplement le **produit matriciel de M par S** .

Par contre, si N_S est supérieur à 1, on peut définir la couverture de différentes façons. En travaillant avec plusieurs sources, on peut **tenir compte ou non des phénomènes d'interférences**.

- **Sans prise en compte des interférences :**

En effet, **si chaque source** travaille avec **une fréquence distincte** des autres, les sources ne se perturbent pas entre elles. Il suffit donc, pour connaître la couverture en chaque point, de sélectionner **le niveau de champ maximum disponible en ce point**. Ψ est alors de la forme suivante :

$$(3.1.3-1) \quad \Psi : \text{Pour } i \in [1..N], \quad E_i = \max_{j \in [1..M]} (P_{ij} \cdot S_j)$$

On ne peut pas moyenner ou sommer les niveaux de champ des différentes sources, car le récepteur ne communique qu'avec un seul point d'accès à la fois. **La couverture** disponible

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

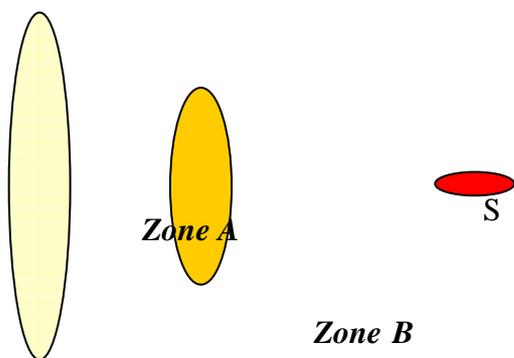
est donnée par **la source qui délivre la puissance la plus importante en chaque point**. Cette source est qualifiée de « **source serveuse** ».

- ***Avec prise en compte des interférences.***

Il peut être important de prendre en compte les interférences dans le calcul global de couverture. En effet, le cas où toutes les antennes travaillent sur **des canaux disjoints ne se présente pas toujours en pratique**. Toutes les fréquences allouées par la norme aux technologies WLAN ne sont pas encore utilisables dans tous les pays.

Ainsi, en France, la bande de fréquences est libérée depuis peu. De plus, certains canaux sont utilisables, mais la puissance d'émission est limitée. Le **facteur de réutilisation** des canaux est donc **plus grand** et **les risques d'interférences** entre des canaux voisins **augmentent**.

On peut schématiser **la couverture d'une source** comme suit :



La **zone A** représente la **zone de service** du point d'accès S. Dans cette zone, le niveau de signal est suffisant pour que la réception se fasse correctement.

La **zone B** est la **zone de brouillage**. Ici, le niveau de signal n'est pas suffisant à la démodulation, mais il perturbe les signaux voisins en augmentant le niveau de bruit.

Pour éviter l'apparition des phénomènes d'interférences, il est important de **minimiser le recouvrement** entre les signaux des différentes sources. Le recouvrement est la superposition de signaux RF provenant de sources différentes. Si **un point ou une zone est desservi par plusieurs sources**, et si les fréquences utilisées sont identiques, **le brouillage dû aux interférences s'amplifie**.

Si on se place au niveau d'une source, **les autres signaux** émis à même fréquence ou à une fréquence proche, **sont perçus comme du bruit**. On peut donc intégrer la puissance des sources voisines dans le niveau de bruit ambiant.

La configuration **la plus désavantageuse** est celle où **la différence** entre le niveau de champ de la source serveuse et celui des sources voisines **est faible**. En effet, dans ce cas là, le rapport signal à bruit est vraiment faible et la démodulation n'est plus possible.

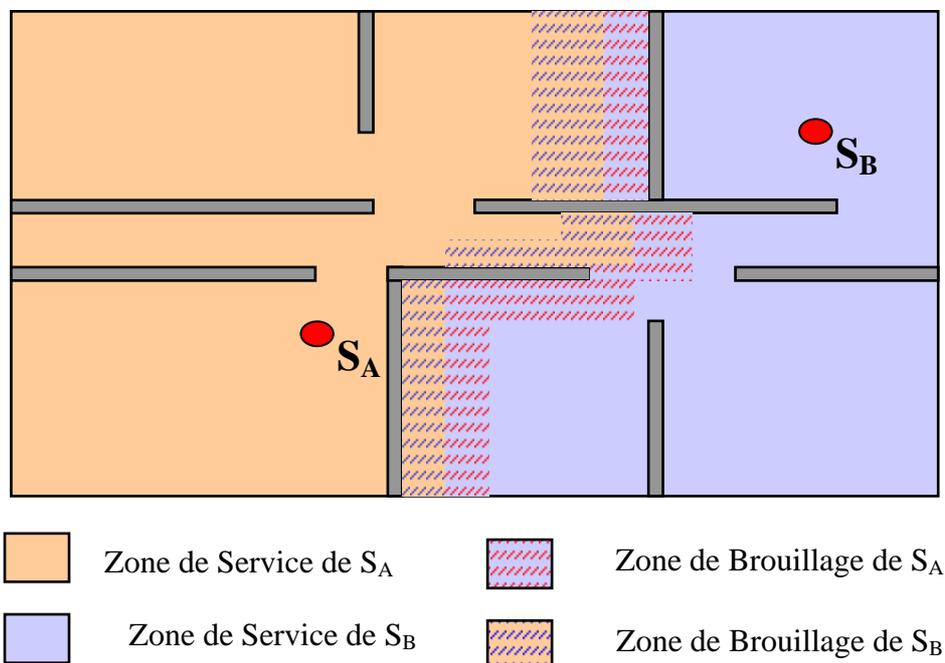
On peut remédier à ce problème de deux façons. Soit on travaille de manière **réactive** : on effectue **un contrôle de la puissance d'émission** des points d'accès lors du fonctionnement du réseau. Ce contrôle peut se faire de différentes manières, mais le but est **d'ajuster les zones de services** pour que **le rapport entre le signal de la source serveuse et celui des autres sources** soit maximal en chaque point du plan.

On peut aussi travailler avec une **méthode « proactive »**. Ceci se réalise au moment de la **planification du réseau**. Si la puissance d'émission des stations de base est fixe, on cherche alors à positionner les émetteurs de façon à obtenir un **découpage disjoint du plan en zone**

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

de services, de façon à toujours maximiser les écarts entre les différents signaux en chaque point du plan.

Ainsi, on souhaiterait obtenir une carte de couverture se rapprochant de ceci :



Dans **les zones de service de S_A et S_B** , ces deux antennes sont respectivement les seules à couvrir la zone. La probabilité d'apparition des interférences est donc faible. On **maximise bien le niveau de signal entre S_A et S_B** .

Par contre, dans la **zone de recouvrement** (ou zone de brouillage), il y a cohabitation des deux signaux. Mais au moment où une source est serveuse, l'autre est dans sa zone de brouillage. On a alors **un écart maximal entre les deux signaux**. Bien entendu, la diminution du niveau du signal ne se fait pas aussi nettement en réalité. La couverture entre les deux zones de service évolue continûment avec une diminution des interférences.

On peut à la fois appliquer du contrôle de puissance et une mise en place du réseau qui tient compte des interférences. Dans un environnement fermé, le canal radio est en perpétuel changement. Le fait d'ouvrir ou de fermer une porte transforme la répartition des niveaux de champ. **Le contrôle de puissance permet d'optimiser finement la répartition des zones de service** réalisée lors de la planification, pendant le fonctionnement du réseau.

- *Application à la description matricielle :*

Si l'on travaille en connaissant la matrice de transfert M , on connaît en chaque point du plan la couverture donnée par toutes les sources potentielles. Pour connaître la couverture, on utilise la relation $E = \Psi(M, S)$.

Pour réaliser convenablement le placement des antennes, il peut être intéressant de travailler sur **une carte de couverture qui tienne compte des interférences**. Cette carte ne donnera **pas le niveau de champ exact** en chaque point. Elle sera **pondérée par la marge disponible entre l'antenne serveuse et la seconde antenne serveuse**. Si la marge est importante, les phénomènes d'interférences seront négligeables. C'est le cas sur le schéma de la page

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

précédente. Dans le cas contraire, le canal sera bien plus sensible aux interférences et la réception plus délicate. On peut émettre cette hypothèse si **le taux d'occupation du canal est faible**. Si ce n'est pas le cas, il faut alors tenir compte des interférences sous la forme d'une somme statistique des signaux des différents interférents.

Pour introduire cette pénalité tout en tenant compte du niveau de champ de la relation matricielle, on définit la fonction Ψ de la manière suivante :

$$\text{Pour } i \in [1..N], \quad \left\{ \begin{array}{l} E_{i \max} = \max_S (P_{ij} \cdot S_j) \quad , \\ E_{i \text{ second}} = \max_{S - \{S_{\max}\}} (P_{ij} \cdot S_j) \quad , \text{ où } S_{\max} = \underset{S}{\operatorname{argmax}} (P_{ij} \cdot S_j) \\ M_i = E_{i \max} - E_{i \text{ second}} \end{array} \right.$$

$$(3.1.3-2) \quad \Psi : \quad E_i = E_{i \max} * \frac{M_i}{M_{\max}}$$

M_j représente la **marge** existant pour chaque bloc entre les deux sources couvrant le mieux le bloc. M_{\max} est la **marge maximale**. Le **rapport** M_i / M_{\max} représente le **pourcentage de marge** du bloc i par rapport à la marge maximale disponible.

Pour obtenir cette carte de couverture, on recherche dans un premier temps les deux sources qui couvrent le mieux le bloc et on calcule la marge entre ces deux sources.

Il est important de noter que cette représentation de la couverture permet **de compléter la carte de couverture réelle**. La pondération par la marge disponible permet de définir une **« qualité » de couverture**.

Cette carte est utile dans **une phase d'optimisation**. Elle permet de **ramener un problème** où l'on cherche à optimiser **la couverture en tenant compte des interférences** à un **scénario simple** d'optimisation de couverture.

En effet, si l'on calcule la couverture de cette manière, les points où **les interférences** apparaissent sont pénalisés et sont interprétés comme une **faiblesse de couverture**. Les algorithmes standards d'optimisation de couverture comblent les faiblesses de couverture. Or, combler ces faiblesses sur une carte calculée en tenant compte des interférences diminue en réalité les zones de recouvrement. Ainsi, au lieu d'uniformiser simplement les niveaux de champ, on réajuste les zones de service de façon à obtenir un découpage disjoint du plan.

3.1.4 Application de la description matricielle aux différents scénarios d'optimisation.

Connaissant la matrice de transfert qui décrit complètement le comportement de l'environnement, on peut, en l'interprétant correctement, trouver la solution à tous les problèmes d'optimisation.

- **Scénario 1 : Couverture simple avec une ou plusieurs sources.**

On cherche simplement à obtenir un niveau de champ **supérieur à la sensibilité du récepteur**. Comme on ne tient pas compte des interférences dans ce scénario, on calcule la carte de couverture avec la fonction Ψ suivante :

$$\Psi : \quad \text{Pour } i \in [1..N], \quad E_i = \max_{j \in [1..M]} (P_{ij} \cdot S_j)$$

Le critère d'évaluation d'une solution est alors :

$$(3.1.4-1) \quad \forall i \in [1..N] \quad E_i > S_0$$

où S_0 représente le niveau de sensibilité du récepteur.

Si l'on cherche à placer N_s **sources** sur le plan, il faudra tester M^{N_s} **configurations**, où M représente le nombre de sources potentielles. On cherche, dans la matrice, les sources pour lesquelles tous les points du plan possèdent un niveau suffisant. Si l'environnement de test est petit, il se peut que plusieurs sources remplissent cette condition. On peut alors choisir la source possédant le **niveau de champ moyen le plus important**.

Si l'on ne trouve pas de source répondant à ce critère, on augmente la puissance d'émission de l'émetteur. Si on est déjà à puissance maximale, il n'y a pas de solution à ce problème.

- **Scénario 2 : Couverture uniforme avec une ou plusieurs sources.**

La recherche de la couverture uniforme avec une ou plusieurs sources se fait de la même façon que la recherche précédente. Le seul changement se trouve dans le critère d'évaluation. En effet, on utilisera le critère défini au paragraphe 2.4 pour évaluer la solution. On cherchera à minimiser ce critère pour un nombre donné de sources.

Ce critère minimise l'écart en chaque point de mesure entre le niveau de champ et la moyenne des niveaux de champ de tout le plan.

- **Scénario 3 : Couverture avec un nombre minimal de sources.**

On peut aussi rechercher pour chacun de ces critères, le **nombre minimal de stations de base** et leur position dans le plan.

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

On choisit dans un premier temps le critère nécessaire (la couverture uniforme ou non, la prise en compte des interférences ...). On démarre la recherche avec une source. On teste toutes les configurations possibles. Une configuration est retenue si le critère choisi est respecté. Si on ne trouve pas de solution, on incrémente le nombre de sources.

- **Scénario 4 : Couverture avec prise en compte des interférences.**

Etant donné la mise en place de **la carte de couverture qui tient compte des interférences**, avec la fonction ψ définie en (3.1.3-2), il **suffit d'appliquer le même critère** que pour les scénarios de recherche de couverture uniforme.

En effet, puisque cette carte de couverture pénalise les zones de recouvrement en y créant des faiblesses de couverture, il suffit de calculer le critère défini en (2.4.3) pour évaluer l'homogénéité d'une solution. Une solution homogène aura une carte de couverture qui tient compte des interférences avec des écarts de niveau de champ restreints. Ainsi, on obtient une carte réelle de couverture avec **peu de recouvrement**.

3.2 Simplification de la méthode.

3.2.1 Un Problème Inverse

Le problème d'optimisation du placement des antennes peut-être interprété comme un **Problème Inverse**. En effet, la matrice de transfert donne tous les éléments nécessaires à la résolution des différents problèmes. Elle peut être comparée aux coefficients de Fourier issus de la transformation d'une image. Si l'on possède tous les coefficients, on est capable de reconstruire l'image originelle sans pertes. Il en est de même ici. Si on connaît la contribution de toutes les sources potentielles, on est capable de choisir la configuration optimale.

Mais si la taille de l'environnement est importante, la **puissance de calcul peut-être insuffisante** pour calculer toutes les solutions en **un temps raisonnable**. Si l'on travaille sur une image de taille $256*256$ qui représente le plan, on possède au maximum (s'il n'y a pas de mur) $256*256=65536$ sources potentielles. Pour chaque source, il est nécessaire de réaliser un calcul de couverture. Si l'on considère qu'une simulation dure 3s pour obtenir la résolution la plus importante, il faut 55 heures pour tout calculer. De plus, cet environnement n'est pas très grand, puisqu'à 1GHz, une unité vaut 5cm. Cette image représente donc une surface de 12,8 m de coté. Ces dimensions sont faibles comparées à un étage de bâtiment standard dans l'industrie.

Dans ce cas, si l'on ne peut calculer tous les coefficients de la matrice de transfert, on peut **chercher à connaître le plus possible de coefficients en un temps de calcul plus faible**.

3.2.2 Le Regroupement par Blocs

On peut réaliser une première simplification de la méthode en **regroupant les points de mesure en blocs**. En effet, si l'on est capable de définir le niveau de champ sur cet ensemble de points sans devoir calculer les contributions en chaque point, on peut diminuer

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

sensiblement le temps de traitement. Pour réaliser cette simplification, on doit découper le plan en **un ensemble disjoint de blocs homogènes**.

Ainsi, une colonne de la matrice de transfert ne donnera plus le niveau de champ d'une source en chaque point de mesure, mais le niveau de champ moyen présent dans chaque bloc homogène du plan.

Cette simplification est possible avec **la structure multi-résolution** du moteur de prédiction de couverture **ParFlow**. En effet, on peut stopper le calcul à n'importe quelle résolution. On peut alors récupérer les niveaux de champ qui se trouvent dans les blocs homogènes de taille maximale. De plus, si l'on souhaite obtenir plus de précision, on peut, avec ce moteur de propagation, continuer la prédiction jusqu'à la résolution maximale pour n'importe quel bloc homogène.

C'est la prédiction à des résolutions élevées qui est coûteuse. On **gagne en temps de calcul au niveau des prédictions**. Par contre, cette première simplification de la méthode ne diminue pas le nombre de simulations à effectuer. Elle diminue tout de même la taille de la matrice.

La nouvelle matrice M' représente à présent la contribution de chaque source potentielle i sur un ensemble de blocs homogènes $B_j, j \in [1..N']$.

Ainsi, pour obtenir la couverture globale $E' = \{E_1, E_2, .. E_{N'}\}$ avec une distribution de sources S donnée, on utilise une fonction $\Psi : 3_M * 3_{N'} \rightarrow 3_{N'}$ tel que :

$$(3.2.2) \quad E' = \Psi (M', S)$$

$S = \{S_1, S_2, ..., S_j, ..., S_M\}$ est un vecteur de taille M . Si une source est présente sur le plan au $j^{\text{ème}}$ point du plan, S_j vaut 1. Sinon, S_j est nul.

La fonction Ψ est identique à la méthode globale, seule M' change. Ce regroupement par bloc revient à **réduire l'espace des points de mesure E**.

3.2.3 La diminution du nombre de sources.

L'utilisation du regroupement par blocs diminue le temps de traitement pour chaque simulation, mais le nombre de simulation est toujours aussi grand.

Si l'on ne veut pas calculer la contribution de toutes les sources potentielles, on peut essayer de connaître assez de coefficients de M' pour s'approcher au mieux de l'extremum recherché. Après avoir réduit E , **on réduit l'espace des sources S** pour diminuer le nombre de simulations.

Il s'agit de réduire judicieusement cet espace. En effet, il faut que **la distribution des sources de test couvre tout le plan**, et que chaque source sélectionnée ait un comportement analogue aux sources adjacentes non sélectionnées. Pour cela on peut échantillonner la distribution des sources en sélectionnant une source sur dix par exemple. On peut également diminuer le nombre de sources en choisissant les points qui se trouvent le long des murs et parois.

On peut bien entendu utiliser en même temps le regroupement par blocs. Ainsi, on obtient la couverture globale $E' = \{E_1, E_2, .. E_{N'}\}$ pour une distribution de sources $S' \in S$ donnée, avec la fonction

$$(3.2.3) \quad M', S' \rightarrow E' = \Psi (M', S')$$

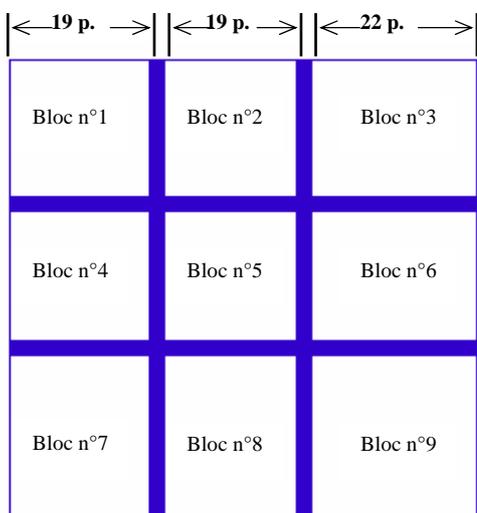
La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

$S' = \{S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_{M'}\}$ est un vecteur de taille $M' < M$.

Avec ces deux simplifications de la modélisation matricielle, le problème est de complexité moindre. Pour illustrer cette modélisation, une simulation sur un environnement de faible taille a été réalisée. Les résultats sont énoncés dans le point suivant.

3.3 Mise en œuvre et Résultats.

La complexité du modèle matriciel mis en œuvre a été diminuée par l'utilisation du moteur de propagation ParFlow et sa structure multi-résolution. Pour limiter les temps de calculs, il a été choisi de calculer les coefficients de la matrice de transfert M' sur un environnement de taille 64*64. Voici la représentation de cet environnement (l'image est grandie 4 fois) :



Chaque mur a une largeur de 2 pixels.

Lors de la recherche de la matrice de transfert, seul le **regroupement en blocs homogènes** a été effectué. L'ensemble des sources potentielles S comporte 3600 éléments.

Il y a 9 blocs homogènes. Pour chaque source, le niveau de champ dans chaque bloc a été calculé.

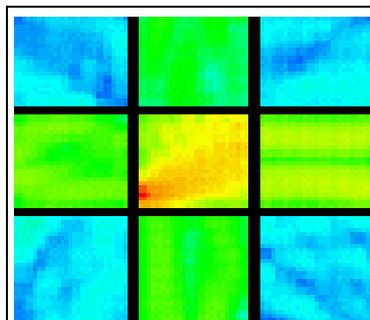
3.3.1 Positionnement d'une source

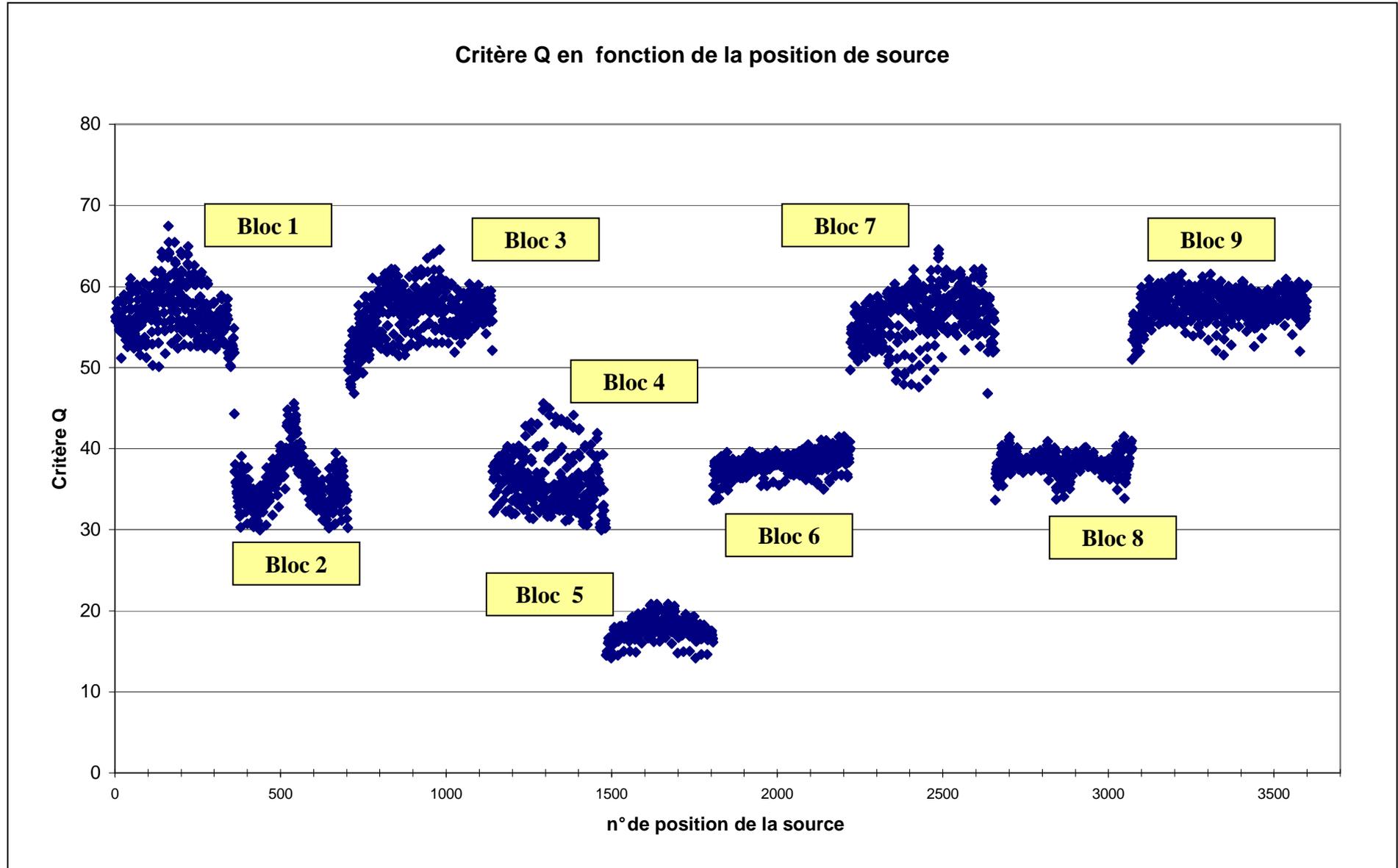
On se place dans un scénario d'obtention de **couverture uniforme**. On cherche à **positionner une seule source**. On calcule donc pour chaque source le **critère défini en (2.4.3)**.

L'évolution du critère pour les différentes sources potentielles est représentée sur la page suivante. Les sources sont regroupées par leur appartenance à un bloc homogène. Un numéro affecté aux sources se trouve en abscisses. Les numéros de blocs auxquels appartiennent les sources sont indiqués sur le graphique.

La **meilleure solution** au vu du critère sélectionné est la source n° 1175 positionnée au niveau du **pixel (21, 36)**.

Voici la carte de couverture obtenue avec cette configuration de source :





La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

Il est intéressant de noter que **le positionnement d'une source dans un bloc reflète le comportement des autres sources du bloc**. Vu la symétrie du problème et l'absence d'ouvertures dans les murs, cette propriété est plus marquée que dans des environnements plus complexes.

Les sources présentes dans les blocs 2, 4, 6 et 8 ont un comportement analogue. Ceci est dû à la symétrie de la zone de recherche. Il en est de même pour les blocs 1, 3, 7 et 8.

Le graphique montre bien **la discontinuité de la fonction d'évaluation**. Au passage d'un mur, on observe un net changement de comportement.

Au vu de cette courbe, on peut en déduire une méthode déterministe de recherche de solution. Comme le comportement d'une source est analogue aux sources qui se trouvent dans le même bloc homogène, on peut, dans un premier temps, **positionner une source dans chaque bloc**. Ainsi, on obtiendra quelques coefficients de la matrice de transfert M' . On évalue chaque solution et on sélectionne le bloc pour lequel le critère est minimal.

Dans ce bloc, on réalise une seconde recherche. Pour cela, on positionne **une source de test en chaque point de ce bloc** de recherche et on mémorise ces coefficients supplémentaires dans M' . On évalue ces nouvelles solutions et on sélectionne **la source qui minimise le critère**.

Les plus grandes discontinuités de la fonction d'évaluation se trouvent au niveau des murs. Si l'on suppose que le comportement est quasi continu dans les blocs homogènes, ce type d'algorithme peut donner de bons résultats.

Dans notre cas, la différence entre les résultats obtenus avec les sources du bloc 5 et les résultats des blocs 2, 4, 6 et 8 est nette. Par contre, si les différences entre les blocs sont faibles (cf. blocs 2, 4, 6 et 8), on n'est pas certain, en ne testant qu'une source au début, de se trouver dans le bloc contenant l'extremum.

Si l'on veut améliorer la robustesse de cette méthode, il est nécessaire d'obtenir plus de coefficients de la matrice de transfert. Pour cela, on peut sélectionner plusieurs sources par bloc homogène dans la première partie de la recherche. Ainsi, on limite les risques de tomber sur une solution qui dégraderait les performances de l'algorithme.

Cette méthode de recherche n'a pas été implantée pendant mon DEA. Il serait tout de même intéressant d'évaluer ses performances, tout en étant conscient des limitations qu'elle impose. Le nombre de sources à tester dans la première phase de recherche peut devenir un paramètre important de cette méthode.

Le **modèle matriciel** qui a été introduit tout au long de cette partie donne un **cadre théorique** à notre problème. On se retrouve bien dans une configuration de **problème inverse**. Comme on n'est pas en mesure de calculer tous les coefficients de la matrice de transfert, les parties suivantes de ce rapport s'attachent à **l'obtention du plus grand nombre de coefficients possibles**.

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

3.3.2 Couverture de deux sources avec prise en compte des interférences.

Ce test a pour but de **vérifier la validité de la couverture** obtenue lors de la **prise en compte des interférences**.

Le calcul du niveau de champ dans chaque bloc a été réalisé d'une part avec la fonction Ψ décrite en (3.1.3-1) qui sélectionne la source serveuse en chaque bloc et d'autre part avec la fonction décrite en (3.1.3-2) qui tient compte des interférences.

Voici la position des deux sources et le bloc auquel elles appartiennent :

	X	Y	n° bloc homogène
Source n°1	0	16	1
Source n°2	1	62	7

Voici le calcul de la transposée de **la matrice de transfert M'** pour ces deux sources :

Bloc n°1	Bloc n°2	Bloc n°3	Bloc n°4	Bloc n°5	Bloc n°6	Bloc n°7	Bloc n°8	Bloc n°9
7,938	5,373	2,755	6,271	2,086	0,036	3,231	-0,57	-3,54
2,329	-0,93	-4,15	5,247	1,667	-0,88	7,701	5,487	2,332

Les niveaux de champ donnés par la fonction Ψ décrite en (3.1.3-1) sont représentés **en grisé** sur la transposée de M' .

La **marge entre le maximum et le minimum** pour chaque bloc est donnée ci-après :

Bloc n°1	Bloc n°2	Bloc n°3	Bloc n°4	Bloc n°5	Bloc n°6	Bloc n°7	Bloc n°8	Bloc n°9
5,609	6,303	6,905	1,024	0,419	0,916	4,47	6,057	5,872

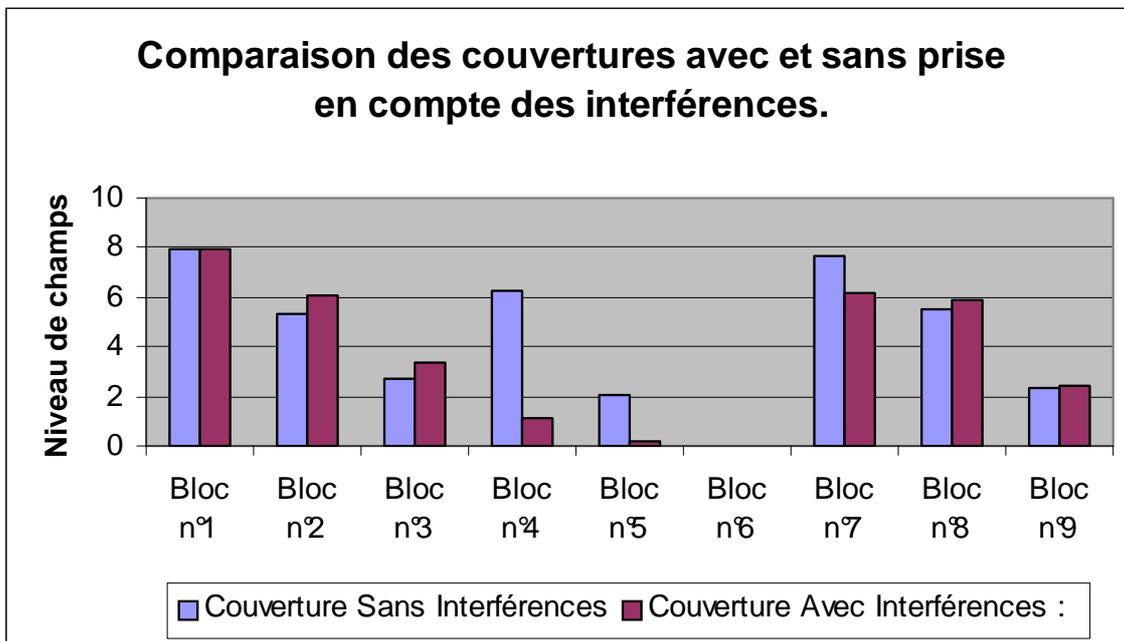
Pour déterminer **la couverture donnée par (3.1.3-2)**, on multiplie, pour chaque bloc, le maximum des niveaux de champ donné par les deux sources et la marge calculée précédemment. La mise à l'échelle se fait par la division de chaque terme par la marge du bloc n° 1 :

Bloc n°1	Bloc n°2	Bloc n°3	Bloc n°4	Bloc n°5	Bloc n°6	Bloc n°7	Bloc n°8	Bloc n°9
7,938	6,038	3,392	1,145	0,156	0,006	6,137	5,925	2,441

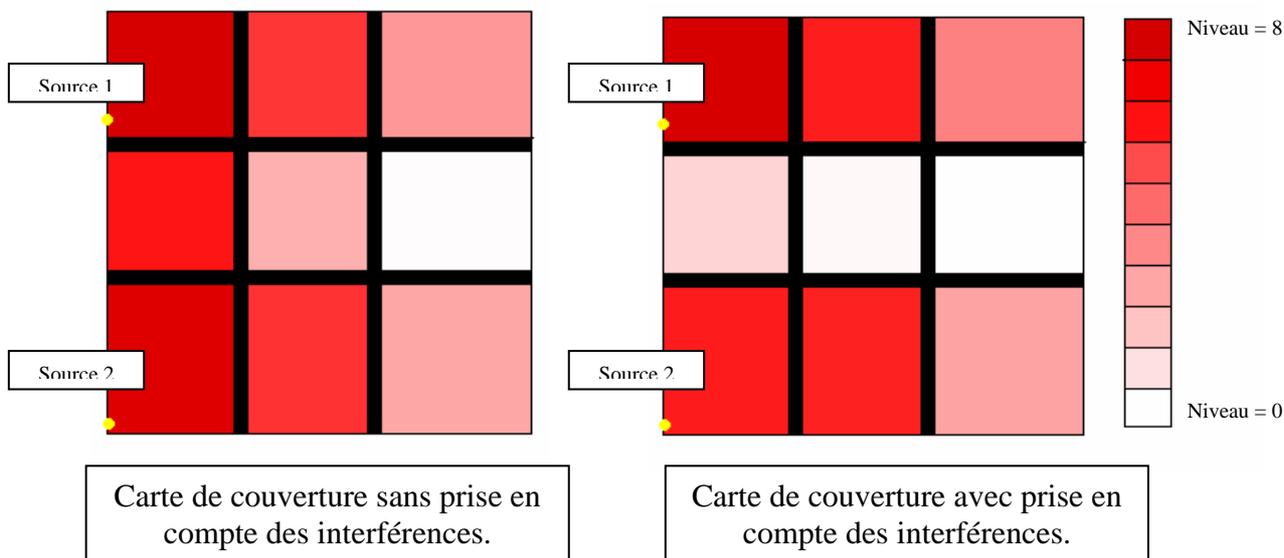
Si l'on compare les deux couvertures, on observe que l'on **pénalise effectivement les blocs où la marge est faible**. Les blocs n°3, 4 et 5 sont bien représentatifs de ce phénomène.

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

a représentation de la répartition des niveaux de champ par bloc se trouve sur le diagramme suivant :



Voici la représentation des niveaux de champ des deux couvertures obtenues :



Les zones les mieux desservies sont en rouge et les moins bien couvertes en blanc. On observe **une dégradation** de la couverture **au niveau de la zone de recouvrement** entre les deux sources. Cette zone est formée des **blocs 4 et 5**.

Cette représentation de la couverture **tient réellement compte des effets néfastes des interférences**.

4 TECHNIQUES D'OPTIMISATION EN PLANIFICATION WLAN.

Maintenant que le problème a été clairement énoncé et modélisé, il est important de réaliser un état de l'art des différentes solutions qui ont été apportées à cette question. Pour cela, je vais revenir, dans un premier temps, sur les méthodes de résolution possibles dans le cadre des problèmes d'optimisation.

4.1 Les Algorithmes et Heuristiques d'optimisation.

Le problème d'optimisation est un problème **mal posé** au sens de Hadamard :

Il existe bien une solution, mais elle n'est pas toujours unique car plusieurs configurations peuvent donner le même résultat. De plus, **la solution ne varie pas continûment** par rapport aux données puisque les murs créent des variations rapides de la solution. Ainsi, si l'on déplace une source et qu'elle traverse un mur, la couverture obtenue n'a plus rien à voir avec la carte de couverture précédente.

De plus, ce problème est **difficile**, car le **nombre de solutions** est trop **important** pour effectuer une recherche exhaustive. En effet, on n'est pas capable, dans des environnements de taille conventionnelle, de calculer tous les coefficients de la matrice de transfert présentée dans la partie précédente.

Il est donc nécessaire de rechercher l'extremum global par des **méthodes** permettant d'obtenir le **plus de coefficients** possibles de cette matrice. La planification de réseaux WLAN est un **problème standard d'optimisation**.

Il existe deux grandes familles de méthodes de recherche de solution : les méthodes **déterministes** et les méthodes **stochastiques**. Une troisième méthode, la méthode **génétique**, plus proche des techniques stochastiques que des techniques déterministes, s'inspire de l'évolution humaine.

Les méthodes **stochastiques** sont des **méthodes optimales** car **la convergence est assurée** à plus ou moins long terme. Les méthodes **déterministes** permettent d'atteindre l'optimum dans des cas particuliers (forme particulière de la fonction d'évaluation), mais en général, leur **convergence n'est pas assurée**. Ce sont des méthodes **sous-optimales**.

4.1.1 Les méthodes stochastiques

Les méthodes stochastiques introduisent **une dimension probabiliste** dans la recherche d'une solution. Un système de prise de décision est mis en place, la décision étant prise avec une probabilité choisie arbitrairement. Le plus souvent, cette décision relève de l'acceptation d'une solution.

Dans un problème d'optimisation, on tente de converger vers un extremum. Pour y arriver à partir d'une solution initiale, il existe plusieurs chemins. Or, dans un **problème multi-modal**, le fait d'avoir trouvé un extremum ne signifie en rien qu'il est global. Dans ce cas, l'amélioration du critère ne signifie pas que l'on s'approche plus du minimum absolu. Il faut donc **accepter la dégradation du critère** d'évaluation pour converger. C'est dans le choix d'une solution dégradée qu'intervient la dimension probabiliste.

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

Le **Recuit Simulé** est la principale méthode stochastique. Elle est inspirée d'une technique de refroidissement des matériaux utilisée en traitement thermique. Cette technique permet de réchauffer la pièce de temps en temps pour arriver à une configuration stable des atomes, à énergie minimale.

Cette méthode permet d'accepter des transitions où le critère se dégrade de façon à sortir des minima locaux. Ainsi, on accepte une transition si le critère s'améliore. **Si le critère se dégrade, on accepte la transition avec une probabilité :**

$$p = \exp(- \|\delta Q\|^2 / T)$$

δQ donne l'écart entre le critère de la solution actuelle et le critère de la solution voisine testée. **T est la température**. Plus la température est élevée, plus on accepte une **dégradation importante**. Plus la température est faible, plus on rigidifie le modèle. Au cours de l'algorithme, on fait décroître T. **La convergence** de cette méthode est prouvée pour **une décroissance lente** de la température. Si on accélère la décroissance, on peut rigidifier le modèle trop tôt et s'arrêter dans un extremum local.

4.1.2 Les méthodes déterministes.

Contrairement aux méthodes stochastiques, **aucun paramètre aléatoire** n'est pris en compte. Ici, l'évolution de la recherche est **une suite de décisions** basée sur un certain nombre de critères (amélioration du critère de convergence...).

Les méthodes gloutonnes et de descente sont des méthodes déterministes. Les méthodes **gloutonnes** sont des méthodes basées sur une suite d'opérations permettant d'arriver à une solution. On ne peut pas faire marche arrière sur une opération, même si le critère se dégrade.

La **méthode de descente** est une méthode qui fonctionne avec une solution et son voisinage. On recherche la solution **qui améliore le critère dans ce voisinage**. On recommence la recherche sur le voisinage de la solution sélectionnée à l'étape précédente. Ainsi, si la fonctionnelle est mono-modale, on convergera vers la solution. Mais **si elle est multi-modale**, on peut très bien se retrouver dans un **minimum local**. Comme on n'accepte pas de dégradation du critère, on ne pourra pas sortir de cette cuvette.

4.1.3 La méthode génétique.

La méthode génétique est une méthode de recherche inspirée de l'évolution humaine. Un ensemble de solutions (une population) est sélectionné. Le but de l'algorithme est de générer au fur et à mesure de nouvelles populations de solutions. Les nouvelles populations sont créées **par croisement et mutation** de la génération précédente.

La sélection de la nouvelle population parmi les deux générations se fait en fonction du critère d'évaluation et les meilleurs individus au sens de ce critère sont gardés. On converge vers **une solution qui n'est pas optimale**, mais qui s'en rapproche. Ce type de méthode peut être appliqué à tous types de problèmes. Plus les mécanismes de croisement et de mutation prennent en compte les caractéristiques du problème, plus cette méthode est fiable.

4.2 Etat de l'Art.

Les premiers travaux concernant la planification de réseaux locaux sans fils datent de **1995**. Ils entrèrent dans le cadre de la mise en place d'un des premiers outils d'aide à la planification. Cet outil, **WiSE** (Wireless System Engineering), fut développé par **M. J.S. Fortune et al.** au sein des Bell Labs. Il comprend un moteur de propagation basé sur du Ray Tracing et un module de planification. Ces travaux sont décrits dans [14]. Le **critère** d'évaluation est donné par le **pourcentage du plan** couvert au-delà d'un seuil donné. La recherche de solution est réalisée à l'aide d'une méthode déterministe, la **méthode du Simplex**, proposée par **Nelder et Mead** [15]. Celle-ci construit un graphe de dimension d possédant en chaque nœud un paramètre du problème (les coordonnées des sources). A chaque itération, la méthode évalue une solution. Elle est choisie en fonction des valeurs aux nœuds du graphe et des solutions précédentes. Le but est de créer un nouveau graphe, dans lequel la plus mauvaise valeur du graphe précédent est éliminée. La forme du graphe est altérée à chaque itération par une réflexion, une expansion ou une contraction en fonction de l'évolution des solutions testées. Cet algorithme de recherche converge vers un **optimum local intéressant**, dans un environnement comprenant plus de 1500 murs. La convergence s'établit en 15 itérations, le tout nécessitant 20 à 25 calculs de couverture.

Trois méthodes sont utilisées par **Sherali et al.** dans [16] : la méthode de *Hooke and Jeeves*, une méthode *Quasi-Newton* et une méthode de *recherche par gradient conjugués*. Elles permettent toutes trois de **tester différentes directions de recherche** au sein de l'ensemble des positions possibles, que ce soit dans le cadre du placement d'un ou de plusieurs émetteurs. La recherche le long d'une direction s'effectue avec un pas de recherche donné. Cette recherche n'est effectuée que si la fonction d'évaluation s'améliore. La méthode de « Hooke and Jeeves » propose différentes directions à tester. Les deux autres techniques sont des méthodes de **descentes de gradient**. Au fur et à mesure de l'avancement de l'algorithme, la résolution de la grille représentant les points de mesure varie. On cherche ici à minimiser une combinaison convexe de **deux critères** : le premier est formé par la **somme des atténuations** (*the Minisum Objective Function*), le second par le **maximum de toutes les atténuations** (*the Minimax Objective Function*). Dans les deux cas, une pénalité est ajoutée au critère si le niveau de champ est inférieur à un seuil fixé.

M. Stamatelos et M. Ephremides proposent dans [17] une solution pour le placement à la fois **d'antennes omnidirectionnelles** et **d'antennes directives**. Dans les deux cas, il s'agit de minimiser la tailles des zones de recouvrement et des zones non desservies. Ils ont mis en place deux type de résolution, la première dans un espace de solutions continu et la seconde dans un espace discret. Les méthodes de **descente de gradient** et du **Simplex** ont été appliquées dans l'espace continu et la méthode des **réseaux neuronaux** proposée par Hopfield [18] dans l'espace discret. Cette méthode a été utilisée pour la résolution du problème du voyageur de commerce, un problème NP-Complet d'optimisation combinatoire. On obtient des **solutions très proches de l'optimum global**. Cette technique réalise une correspondance entre les nœuds du réseau de neurones et la grille discrète représentant le plan. Un neurone représente ici une station de base. Ce sont les réseaux de neurones qui donnent les meilleurs résultats dans cet article. Pour le placement des antennes *omnidirectionnelles*, la méthode de descente converge en 12 itérations, le Simplex en 59 itérations et les réseaux de neurones en 350 à 500 itérations.

Pour optimiser le placement des antennes, au lieu de raisonner en terme de couverture au niveau des stations de base, **T. Frühwirt et al.** ont proposé de **raisonner au niveau des**

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

récepteurs dans [19] et [20]. Le plan est discrétisé en un ensemble de récepteurs potentiels. Ils réalisent alors le calcul de la zone de service de chaque récepteur. Le placement des émetteurs se résume alors à la contrainte suivante : Il faut **au moins un émetteur** dans la zone de service d'un récepteur. Les zones de couvertures sont ici modélisées par des polygones. Ils recherchent à **minimiser le nombre d'émetteurs**. Pour cela il faut trouver les points qui appartiennent au plus grand nombre possible de polygones. La recherche se fait à l'aide d'un langage de programmation sous contrainte proposé par les auteurs. La précision des résultats obtenus est semblable aux résultats obtenus par un ingénieur radio.

K.W Cheung et R.D. Murch proposèrent en 1998 dans [22] d'optimiser le placement en **minimisant une moyenne pondérée de la probabilité de coupure**. Cette probabilité de coupures est calculée en fonction de la qualité de service, cette dernière étant fonction du rapport signal sur bruit minimum et du rapport signal sur bruit au point de calcul. Elle suit une loi de Rayleigh et est définie pour des environnements limités ou non par des interférences. Les deux méthodes de recherche présentées sont des **méthodes de recherche directe** : la méthode du **Simplex** et la méthode de **Powell**. Cette dernière permet d'optimiser une fonction quadratique de dimension N en N itérations. Après simulation, il apparaît que l'algorithme du Simplex converge vers des résultats meilleurs, avec un nombre d'itérations inférieur à la méthode de Powell.

Un **algorithme génétique** a été utilisé par **Martin D. Adickes** dans [Adickes, 1999] pour placer un **nombre minimal** d'émetteurs. Le problème a été modélisé comme **l'optimisation du recouvrement** d'une surface par **un nombre minimal de cercles**. La fonction d'optimisation tient compte à la fois de la surface couverte, du débit offert (par la règle de Shannon – Hartley) et de la puissance d'émission. Cette méthode a été comparée aux résultats d'un article traitant du même sujet via un algorithme génétique [21]. L'optimisation de la couverture a été réalisée pour 2 et 5 antennes. Les deux méthodes ont trouvé une solution couvrant 100% de la surface, mais l'atténuation moyenne se révèle plus faible avec la solution de M. Adickes.

M. Keith S. Butterworth et al. a proposé un article particulièrement intéressant [Butterworth, 2000]. La recherche a été effectuée sur **les conséquences du placement** des stations de base au niveau **d'une coupe verticale d'un bâtiment**. Le comportement intra étages a été mesuré et analysé pour un bâtiment précis. Seulement deux positions diamétralement opposées sont permises par étage. Une caractéristique de la propagation indoor, nommée « **correlated shadowing** », est décrite dans cet article. Ce phénomène d'interférence apparaît quand le signal incident et le signal interférant suivent un chemin analogue. Si la corrélation est positive, les deux signaux sont forts. Si l'un des deux signaux est fort et l'autre faible, la corrélation est dite négative. **Le positionnement des stations de base a un impact important** sur cette caractéristique. Si toutes les stations de bases sont alignées sur un plan vertical, le **gain** en matière de **probabilité de coupures** est de 0.1 en downlink et de 0.09 en uplink sur une configuration alternée des stations de base. Cet article est un des seuls à introduire la troisième dimension dans les problèmes de placement. Il montre bien que si le placement est optimal au niveau d'un étage, les autres étages peuvent grandement réduire ses performances.

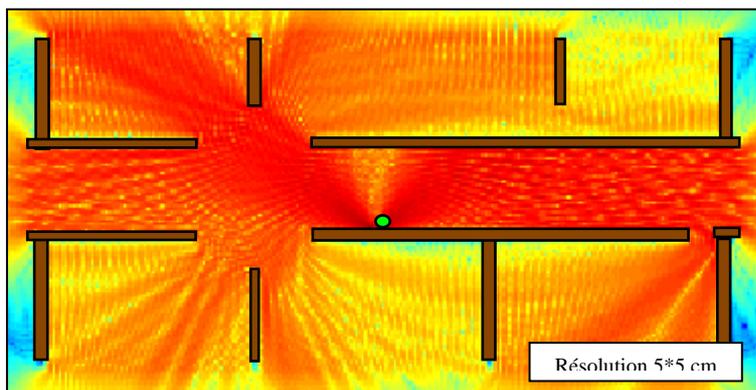
La majeure partie des méthodes utilisées sont des méthodes déterministes. La **description matricielle du problème est originale par rapport aux autres modélisations**. Néanmoins, la recherche d'une solution déterministe plus rapide a été menée pendant le DEA, car les environnements sont de taille trop importante pour réaliser une recherche exhaustive.

5 PRESENTATION D'UN ALGORITHME DETERMINISTE.

Nous avons fait le choix, pour la résolution de ce problème, de mettre en place un algorithme déterministe **exploitant les caractéristiques du moteur de propagation ParFlow**. En effet, il est intéressant de travailler sur **l'aspect multi-résolution** de ce moteur de calcul.

5.1 Exploitation du moteur ParFlow.

Il est inutile, à chaque itération, de calculer la couverture à la résolution la plus grande (1 pixel * 1 pixel). En effet, l'information de couverture nécessaire à la planification est déjà présente dans des cartes de couverture de résolution plus faible. Si l'on utilise des cartes trop détaillées, les phénomènes d'interférences apparaissent et peuvent fausser le jugement. De plus, la prédiction d'une carte de couverture à une telle résolution augmente significativement le temps de calcul.

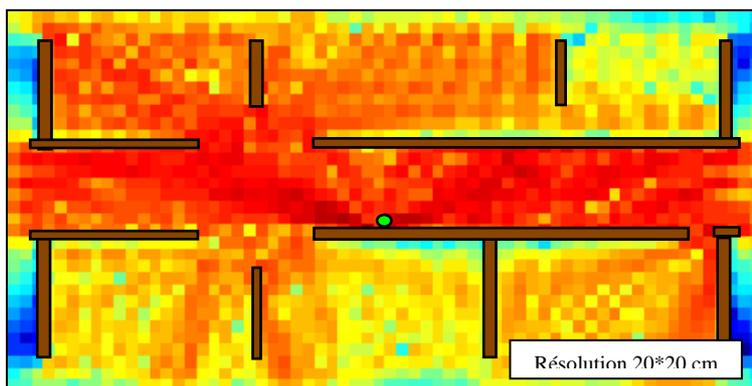


Voici une carte de couverture avec la résolution maximale de 5cm * 5cm.

Les phénomènes d'interférences sont bien visibles.

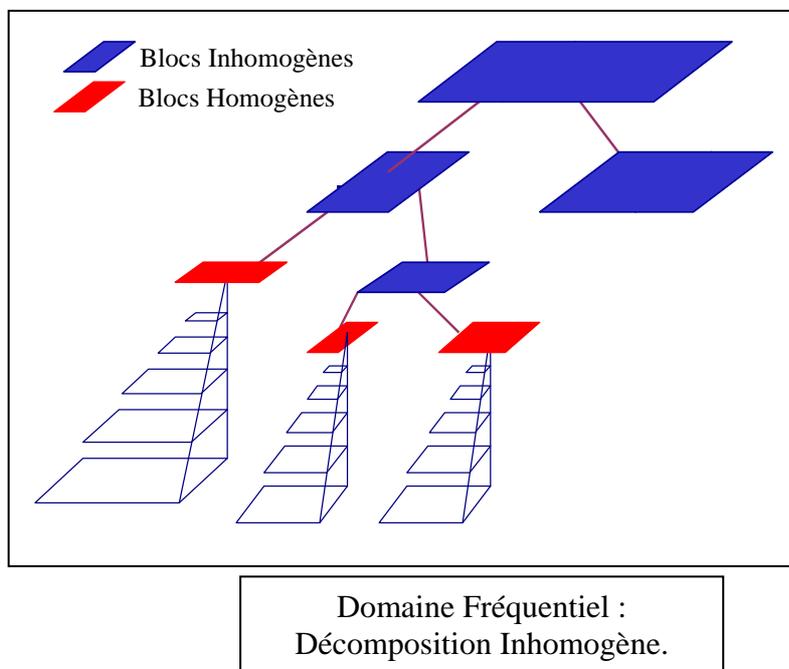
Voici la même carte de couverture avec une résolution de 20cm * 20cm.

L'information de couverture est ici suffisante pour de la planification. L'essentiel est de pouvoir repérer les zones de faiblesse et de pouvoir calculer le critère d'évaluation de façon fiable.



La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

On travaille sur une représentation discrète de la surface sur laquelle on réalise la propagation d'une source. Pour être fidèle à la topologie de la surface, le moteur de propagation réalise un **sous-découpage irrégulier** du plan en blocs **homogènes**. Ces blocs ne sont constitués que d'air. Ils suivent **le tracé des pièces** qui se trouvent dans le plan. Une fois que ces blocs homogènes sont déterminés, ils sont **redécoupés de façon régulière**. A partir de ce niveau, la pyramide multi-résolution est régulière.



Ce mode de fonctionnement du moteur de propagation nous impose, pour obtenir des simulations réalistes, de **se positionner au moins à la résolution des pièces** pour pouvoir exploiter les données de couverture.

On peut imaginer travailler à chaque itération en deux étapes, la première tenant compte de l'ensemble de la surface à une résolution de travail peu élevée, la seconde se focalisant sur une petite partie du plan à une résolution élevée pour pouvoir affiner l'optimisation. Le moteur ParFlow permet de stopper le calcul à la résolution souhaitée, et surtout de poursuivre la prédiction dans une portion du plan.

5.2 La propriété de réciprocité.

L'algorithme repose également sur une propriété intéressante de la propagation électromagnétique. Si l'on positionne une source en un point S, on mesure un niveau de champ E au point de réception R. Si l'on positionne ensuite la même source au point R, les trajets empruntés par les fronts d'ondes seront les mêmes, mais en sens inverse. On est alors certain d'obtenir un niveau de champ E au point S. Cette **propriété de réciprocité** est un point important de l'algorithme déterministe.

On retrouve **cette symétrie** dans **la structure pyramidale** du moteur de propagation ParFlow. En effet, si l'on positionne une source en un point S, la propagation permet de récupérer le niveau de champ en un point R. Si l'on positionne la source en R, les mêmes matrices de passage sont utilisées pour le calcul du niveau de champ en S.

Cette propriété est particulièrement utile si l'on désire **combler une faiblesse** de couverture par le **déplacement d'une source**. Dans ce cas, on peut positionner **une source de test** au centre de la faiblesse et observer la carte de couverture de cette source après simulation. Si l'on positionne une des sources du plan en un point couvert par la source de test, d'après la propriété de réciprocité, on est certain que la faiblesse initiale sera comblée par la source déplacée.

5.3 Description de l'algorithme.

La méthode proposée utilise **le moteur de propagation ParFlow** développé au CITI. Ainsi, on peut obtenir, pour une configuration des sources donnée, un résultat à plusieurs résolutions.

La **recherche de solution** se fait **en déplaçant une source à chaque itération**. Chaque source est déplacée de façon à combler une faiblesse. Cet algorithme fait partie de la famille des **algorithmes gloutons**.

Une solution simple serait de rapprocher géométriquement la source la plus proche de la faiblesse de couverture. Or, la propagation des ondes électromagnétiques dans un environnement indoor ne se comporte pas comme dans un environnement ouvert. Le rapprochement de la source n'assure en rien l'amélioration du niveau de champ dans la faiblesse. Un mur, par exemple, peut se trouver sur le trajet entre la source et la faiblesse, empêchant l'augmentation de niveau de champ au point souhaité.

Pour réaliser **un déplacement apportant une amélioration de couverture**, on utilise **la propriété de réciprocité** décrite au paragraphe précédent. En effet, il suffit de positionner une source de test au niveau de la faiblesse et sélectionner la source du plan la mieux desservie par cette source de test. Par la suite, on déplace la source choisie à l'intérieur d'une zone de recherche jusqu'au point où le niveau de champ de la source de test est maximum. Ainsi, on améliore de façon certaine le niveau de champ dans la faiblesse.

Le **seul inconvénient** de cette méthode est qu'elle demande **une simulation** de propagation **supplémentaire**. Mais elle permet de connaître **un coefficient de plus de** la matrice de transfert **M'**. Ainsi, dans une évolution future de l'algorithme, on peut tenir compte de ce nouveau coefficient à d'autres itérations.

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

La structure multi-résolution permet de minimiser le temps de traitement pour une itération. Les **calculs de couverture** sont réalisés à **deux résolutions différentes**. La première, R_{hom} est une résolution peu élevée. A cette résolution, on obtient le niveau de champ à l'intérieur des **blocs homogènes**. Ces blocs ne sont constitués que d'air et recouvrent une pièce du plan. Cette résolution est utilisée pour rechercher sur tout le plan la zone la moins bien couverte et pour le calcul du critère d'évaluation.

Une deuxième résolution, R_0 , plus précise, est utilisée pour **simuler en détail** les zones intéressantes. Ainsi, elle permet de sélectionner d'une part la position de la source de test et d'autre part la nouvelle position de la source à déplacer à l'intérieur de la zone de recherche.

Remarque : En raison de la structure irrégulière de l'environnement, le **découpage réalisé par le moteur de propagation pyramidal n'est pas régulier**. Il en découle que si l'on travaille à une résolution D , la carte de couverture ne sera pas formée qu'avec des blocs de taille $D \times D$. Le moteur découpe l'environnement et renvoie les blocs de taille $D \times D$ si possible, sinon, il renvoie des blocs aux dimensions immédiatement supérieures. Dans un découpage 3×3 , on peut donc travailler avec des blocs de taille 3×4 , 5×5 ...

Voici le **déroulement d'une itération** de l'algorithme :

1. Calcul de la couverture globale pour tous les blocs homogènes à la résolution R_{hom} .
2. Recherche du bloc homogène le moins bien couvert.
3. Placement de la source de test à l'intérieur du bloc homogène sélectionné. Pour cela, on poursuit la simulation jusqu'à R_0 sur ce bloc.
4. Calcul de la couverture de la source de test S_{test} à la résolution R_{hom} .
5. Sélection de la source S_D la mieux couverte par S_{test} .
6. Calcul de la zone de recherche Z_R autour de S_D .
7. Recherche du point de Z_R le mieux couvert par S_{test} .
8. Déplacement de S_D .

Cet algorithme a été **implanté en Java** sous la forme d'un package dénommé « optimisation ». Ce package travaille directement avec les classes fournies par le package « simulation » du moteur de propagation.

Lors de la mise en place, on cherche à **effectuer un minimum de simulations**. On mémorise, pour chaque source, les flux propres à chaque bloc homogène pour, d'une part, pouvoir descendre dans la pyramide à la résolution R_0 dans n'importe quel bloc, et, d'autre part, ne calculer de nouvelle propagation que pour la source déplacée S_D .

5.4 Comportement de l'algorithme

Les **principaux paramètres** qui définissent le comportement de l'algorithme sont :

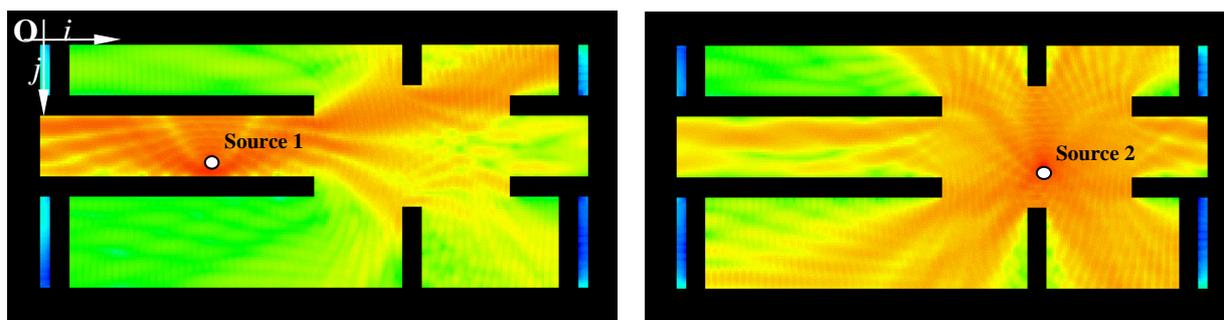
- Les dimensions de la zone de recherche.
- La résolution de recherche R_0 .

La **zone de recherche est un carré de côté c** . Il est intéressant d'observer le comportement de l'algorithme pour différentes valeurs de ces paramètres.

Il existe des configurations où un **phénomène de ping-pong** entre deux solutions intervient. Si le déplacement de la source S_D créé une faiblesse importante, et que seul le déplacement de la même source en sens inverse permette de combler ce trou de couverture, il y aura alternance de deux solutions. Ce type de comportement se passe au niveau des discontinuités (murs, cloisons...). Ce phénomène est le facteur qui limite le plus les performances de l'algorithme. **Dès qu'une telle configuration de source est atteinte, on arrête la recherche de solution.** Nous verrons par la suite les améliorations possibles.

On se positionne à **deux résolutions de recherche** différentes. La première est de l'ordre de la longueur d'onde : 6 pixels, soit 30 cm. La seconde vaut une demi-longueur d'onde : 3 pixels, soit 15 cm. On travaille à une fréquence de 1 GHz.

On travaille sur un environnement de test de 256×128 pixels. On repère cet environnement par un repère (O, i, j) . On positionne deux sources au barycentre des deux moitiés du plan (source 1 = (85,64), source 2 = (170,64)). Cette première solution donne une valeur de critère de $Q = 128,7110728$.

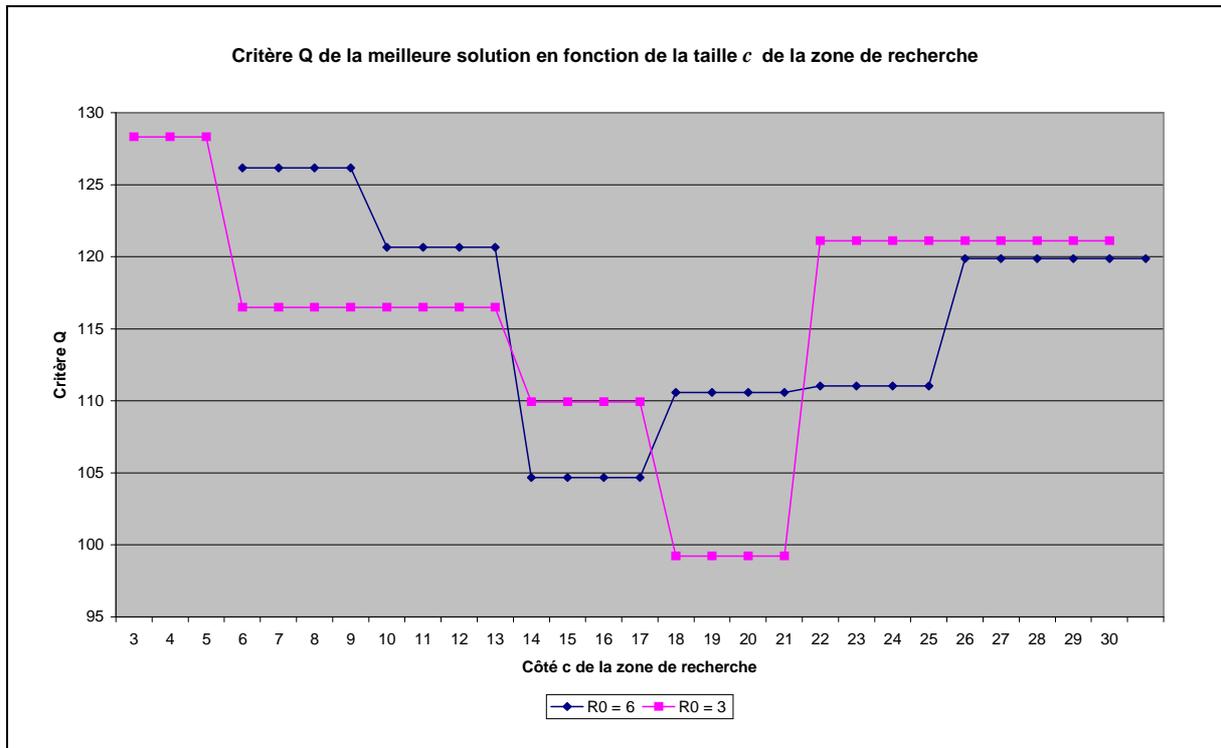


On fait varier c de R_0 à 40. A chaque test, on relève :

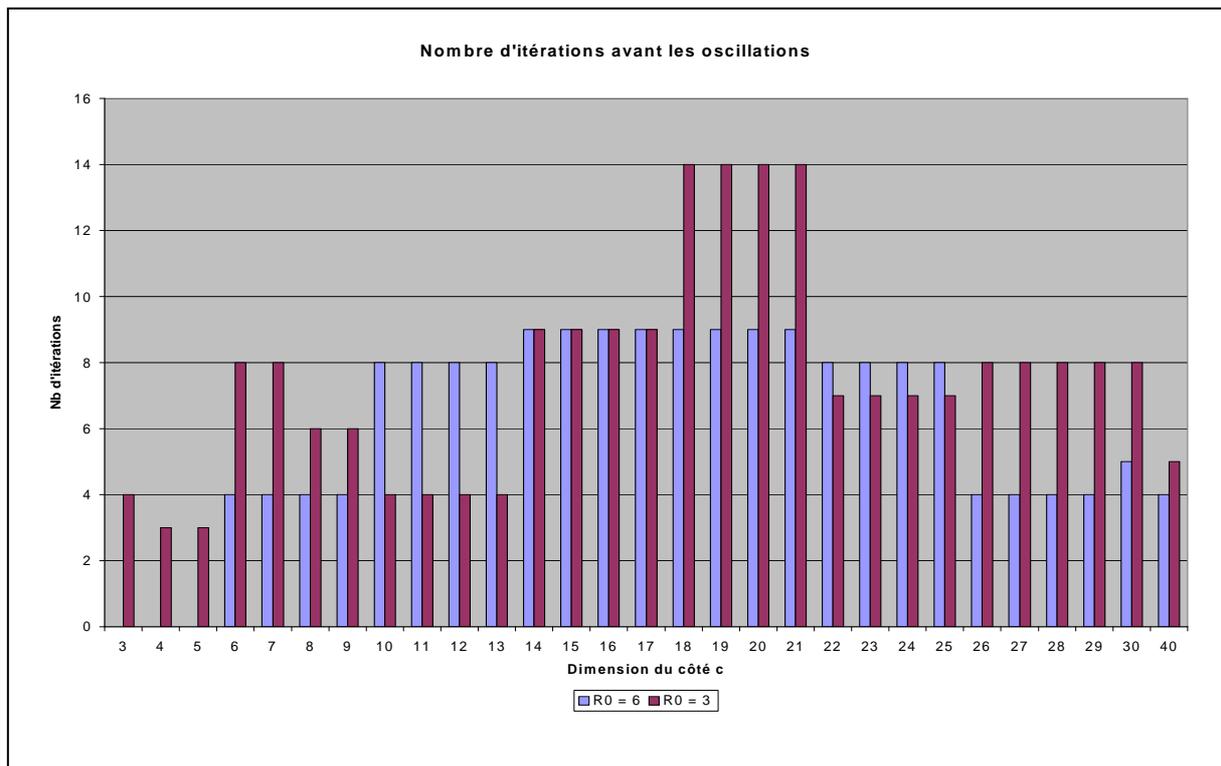
- La meilleure solution.
- Le critère d'évaluation relatif à cette solution.
- L'itération à laquelle on a obtenu cette solution.
- Le nombre d'itération avant apparition du phénomène de ping-pong.

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

Voici la représentation du critère Q de la meilleure solution de chaque test. Ce critère est exprimé en fonction de la taille du coté c de la zone de recherche pour $R_0=3$ et $R_0=6$.



Le diagramme suivant donne le nombre d'itérations où le critère a évolué avant l'apparition du phénomène de ping-pong. Il est également donné en fonction de c .

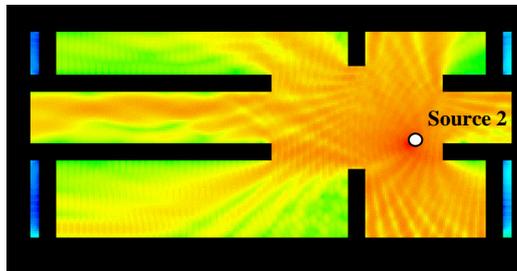
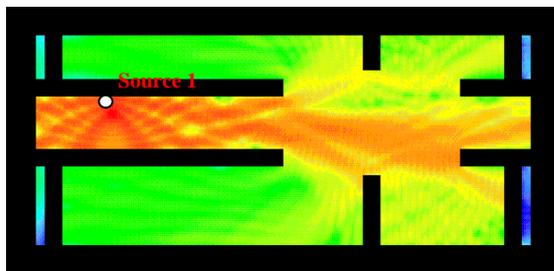


La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

A chaque résolution on observe un extremum. La **meilleure solution** est atteinte pour la résolution $R_0=3$. Elle vaut $Q = 99,22717669$. Les coordonnées de cette solution sont :

Source 1 = (50,52)

Source 2 = (196,68)



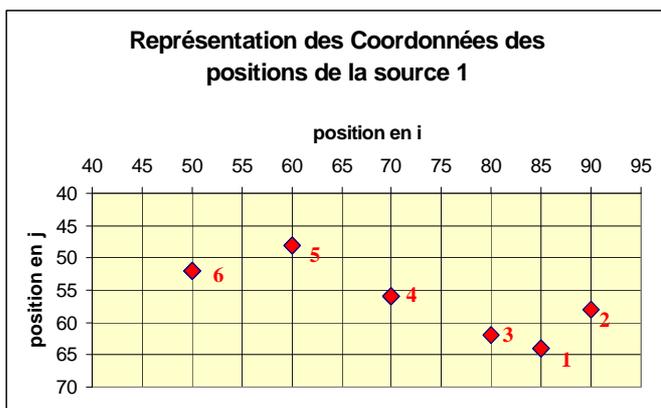
On observe une baisse de **23% du critère d'évaluation**. Sur la carte de couverture, on observe que c'est surtout le **déplacement de la source 2** qui a homogénéisé les niveaux de champs. Le **critère** de cette solution est **encore élevé** car il existe encore plusieurs zones de faiblesses. **L'arrêt précoce** de l'algorithme dû au phénomène de ping-pong ne permet pas de tester assez de configurations.

Sur le graphique comparant les performances de l'algorithme à différentes résolutions de recherche, on observe **un comportement par paliers**. Les paliers ont la même taille et la même position, quelle que soit la résolution de recherche. Ils sont **fonction de la topologie** de la pièce.

Les **résultats** obtenus quand c est **inférieur à $2 \cdot R_0$** sont **mauvais**. On ne possède que les huit points voisins à chaque itération pour déplacer S_D . On ne peut déplacer que très lentement chaque source. Le nombre d'itérations avant apparition des oscillations est faible (entre 2 et 4).

Plus on augmente c , plus on a de positions possibles lors du déplacement de S_D . L'ensemble des évolutions offertes est plus grand.

On observe **les meilleures performances** de l'algorithme pour c variant entre **14 et 21**. C'est à ce moment que l'on a le plus d'itérations. Si l'on observe le plan, on se rend compte que le mur nord du couloir central est positionné à 20 pixels environ de la position initiale de la source 1. Voici le parcours de cette source sur le plan 2D, dans le cas où l'on obtient la meilleure solution :



On observe que l'algorithme **déplace la source 1 vers le nord-ouest**. C'est bien la pièce située au coin supérieur gauche qui est la moins bien desservie. L'algorithme cherche donc à améliorer le niveau de champ à cet endroit.

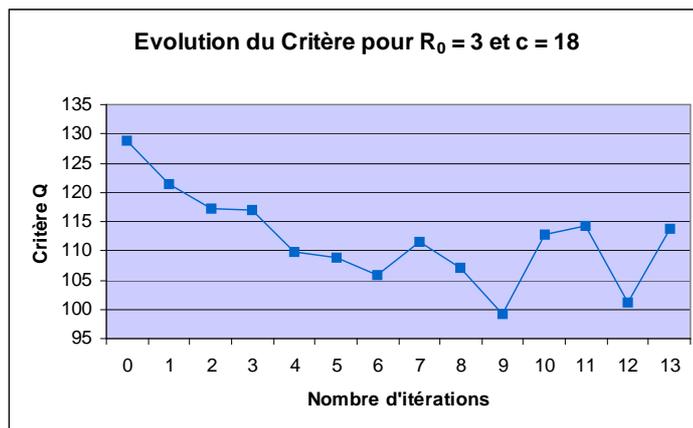
D'après l'algorithme, on sait que l'on positionne une source de test au niveau de la faiblesse.

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

Or, si la zone de recherche inclut des points qui se trouvent au delà du mur, il est certain que ce sont ces points-là qui seront les mieux couverts par la source de test. C'est donc en un de ces points que l'on ira déplacer la source S_D . Le fait de déplacer cette source de cette manière **créera une importante faiblesse dans le couloir**. On obtiendra alors une dégradation nette du critère d'évaluation. C'est également une des cause de l'apparition des phénomènes d'oscillations entre deux solutions.

Voici l'évolution du critère **Q** en fonction du nombre d'itérations pour $c = 18$ et $R_0 = 3$. C'est cette configuration qui comporte la meilleure solution.

On observe une réelle décroissance du critère d'évaluation jusqu'à la 9^e itération. C'est à ce moment que la meilleure solution est testée.



Le fait de **combler les faiblesses de couverture améliore le critère**. Le choix du critère est donc satisfaisant. Au vu de cette courbe, l'algorithme glouton a un comportement semblable aux algorithmes de descente, car le critère décroît progressivement. Mais cet algorithme **ne converge pas vers un optimum**. Les configurations obtenues sont des optimums locaux.

Il est **très sensible aux discontinuités** du plan. Si la zone de recherche est trop importante, une discontinuité (mur, cloison..) peut appartenir à cette zone. Ainsi, la fonction d'évaluation n'évolue pas linéairement. Il peut alors apparaître un **phénomène de ping-pong** entre deux solutions. Si la taille de la zone de recherche est inférieure à deux fois la résolution de recherche R_0 , le même phénomène apparaît car l'algorithme n'a pas assez de solutions pour évoluer.

Le principe de recherche de solution donne bien une décroissance du critère, donc un **homogénéisation de la couverture**, mais **la recherche se termine trop rapidement** par des oscillations. C'est ce phénomène qui limite principalement les performances de l'algorithme. L'objet du paragraphe suivant est de proposer **des améliorations** possibles de cet algorithme glouton.

5.5 Propositions d'amélioration.

5.5.1 Prise en compte des discontinuités.

Si l'on souhaite continuer de travailler sur cet algorithme, on peut **modifier son comportement** au niveau de **la définition de la zone de recherche**. Nous avons vu précédemment que le choix d'une solution situé au-delà d'une discontinuité dégradait les performances de l'algorithme.

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

Pour éviter cela, on rajoute une contrainte en définissant la zone de recherche de façon à ce qu'**aucun mur ne fasse parti de cet espace**. C'est une solution simple qui permettra à l'algorithme d'évoluer de façon **continue**. Dans ce cas, les sources se déplaceront à travers les ouvertures pour changer de pièce. Elles ne pourront pas quitter les pièces en traversant un mur.

Par contre, il sera toujours nécessaire de choisir une taille adéquate pour la zone de recherche. Elle ne doit pas être trop petite pour éviter une apparition trop rapide des oscillations.

5.5.2 Introduction d'une dimension probabiliste.

Pour éviter l'apparition trop rapide du phénomène d'oscillation, on peut introduire une dimension probabiliste à ce problème. En effet, on peut rechercher de la même manière le déplacement que devra effectuer la source, mais on peut proposer de **pondérer le déplacement par une variable aléatoire uniformément répartie entre 0 et 1**. Ainsi, le déplacement ne se fera pas toujours complètement.

La convergence sera ralentie, mais on testera un plus grand choix de déplacement.

On peut également **calculer le critère d'évaluation avant de valider le déplacement**. Si le critère s'améliore, on effectue le déplacement, si le critère **ne s'améliore pas**, on **effectue le déplacement avec une certaine probabilité**. Dans ce cas, on peut appliquer une méthode heuristique de type recuit.

L'avantage de ce type de méthodes est **l'assurance d'une convergence** si l'on pose correctement le problème. Par contre, le déroulement d'un tel algorithme est **assez long**. Mais comme on réalise une planification une seule fois pour toutes, ce n'est pas particulièrement dérangeant.

5.5.3 Proposition d'un maillage inter-sources.

On peut complexifier la résolution du problème en introduisant une **interdépendance entre les sources**. Cette interdépendance peut être modélisée par **un maillage**. Les sources sont placées aux nœuds du maillage.

L'inconvénient du déplacement des sources est l'apparition de faiblesses quelques fois importantes au niveau de l'ancienne position de la source déplacée. Or, si à chaque itération **on déplace les autres sources de façon à combler cette faiblesse**, on peut améliorer la vitesse de convergence et surtout, **supprimer le phénomène de ping-pong** entre plusieurs solutions.

Le maillage permet d'établir **un lien** entre les sources. Ce lien possède **une raideur** qui permet de répercuter de façon élastique les effets du déplacement sur les autres sources, et surtout **d'induire un déplacement relatif** à ces mêmes sources. Une des difficultés propre à la mise en place du maillage réside dans la définition de cette raideur. Elle pourrait être fonction du recouvrement entre deux sources, de la qualité du lien inter-sources...

De plus, une fois que l'on a défini la raideur en question, il faut **déterminer le type de déplacement** à effectuer. Si la source déplacée se trouve au nœud A, si l'on déplace simplement la source du nœud B suivant la droite (AB) en fonction de la raideur k, l'amélioration du niveau de champ en A n'est absolument pas garantie par le déplacement du nœud B.

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

Il faut aussi déterminer **quel est le sous-ensemble de sources** sur lequel on répercutera le déplacement de S_D . Doit-on travailler avec un **voisinage** formé des sources connexes à S_D ou par l'ensemble des sources ? Plus le nombre de sources à prendre en compte augmente, plus la complexité d'une itération et donc le temps de calcul augmentent. Ce **voisinage peut également évoluer à chaque itération**, ce qui permet de l'adapter à la configuration en cours.

Le **choix de ce voisinage définit le type de maillage**. Par exemple, un voisinage formé de toutes les sources définit un maillage complet.

Le **modèle de maillage** suivant est une solution qu'il serait intéressant d'évaluer. Le maillage est un **maillage évolutif**. La connexité évolue à chaque itération. En effet, si l'on décide de déplacer S_D , les sources appartenant au **voisinage V** de S_D sont **les N_V sources** les mieux couvertes par S_D à l'itération précédente, N_V étant un paramètre du modèle.

On souhaite **éviter la détérioration du niveau de champ** le long du lien en chaque source appartenant à V et S_D . La raideur se calcule donc en fonction des images de couverture de S_D avant et après déplacement. **La raideur** peut-être définie comme étant **inversement proportionnelle à la variation de niveau de champ** sur le lien.

Le choix du **type de déplacement** peut se faire également en utilisant la **propriété de réciprocité**. En effet, on connaît la carte de couverture de S_D **avant le déplacement**. Si le déplacement de S_D provoque une faiblesse, la carte de couverture de **S_D avant déplacement** n'est rien d'autre que la carte de couverture de la **source de test** de l'algorithme précédent. Pour obtenir **le point d'arrivée de chaque source de V** , on recherche, comme précédemment, **le point le mieux couvert par S_D avant le déplacement**.

Plus le voisinage pris en compte est important, plus on augmentera le nombre de simulations de couverture à chaque itération. Une itération sera plus gourmande en temps de calcul.

Cet algorithme n'a été ni développé ni testé. Théoriquement, ses performances devraient être meilleures que celles de l'algorithme précédent.

6 PERSPECTIVES ET CONCLUSIONS.

Dans ce travail de DEA, il a fallu se familiariser avec le problème de planification pour des environnements fermés. **La première étape** a été **la modélisation matricielle** de ce problème. Cette modélisation est originale par **son adaptabilité** à tous les scénarios d'optimisation existants. A partir de ce travail, on peut présenter la planification comme un **problème inverse**.

Cette notion de problème inverse permet de décrire toutes les solutions travaillant sur un espace restreint de solutions. Dans la plupart des environnements, **déterminer tous les coefficients** de la matrice de transfert est bien **trop onéreux** en temps de calcul. C'est pourquoi la majeure partie des algorithmes existants cherchent à **obtenir suffisamment de coefficients** de la matrice de transfert pour obtenir une solution valable.

Cette première partie de modélisation du DEA a servi de base à la recherche **d'un algorithme déterministe de type glouton**. Les tests relatifs à cet algorithme ont été présentés. Le comportement de celui-ci n'est pas optimal, néanmoins, on observe bien une décroissance du critère d'évaluation au fur et à mesure du déroulement de l'algorithme. **Le principal problème** réside dans **un phénomène d'oscillations** entre deux solutions.

Quelques améliorations ont été proposées, mais non testées. Une proposition d'interconnexion entre les sources sous forme **d'un maillage déformable** en fait partie. Cette solution devrait permettre d'éviter l'apparition des oscillations et donc d'augmenter le nombre de solutions testées.

Il serait intéressant de mettre en place une **solution heuristique** pour la comparer aux algorithmes déterministes. Ces algorithmes, réputés pour être lents, devraient donner des solutions de meilleure qualité, mais pour cela il est nécessaire de poser convenablement le problème.

Ce travail de DEA est **une première étape** dans la mise en place d'une structure définitive d'optimisation intégrée au moteur de propagation ParFlow du laboratoire CITI. Il n'a pas la prétention de proposer une solution au problème de planification. Il a pour objectif de modéliser le problème de façon exhaustive et de proposer différentes pistes de résolution.

Les travaux menés cette année seront poursuivis dans le cadre d'une thèse que je réaliserai dans le même laboratoire. Ils ont été **très enrichissants** pour moi au niveau de l'apprentissage des principales démarches de Recherche et **constituent une base solide** pour les trois années à venir.

7 BIBLIOGRAPHIE.

- [1] P. Murray, Intersil Corporation. *IEEE 802.11 Draft New Recommendation ITU-R M : Characteristics of broadband radio canal local area networks (RLANs)*. IEEE 802.11-01/057-r1. Janvier 2001. 24p. Disponible sur : <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub>.
- [2] J.W. McKnown, R.L. Hamilton, Jr. . *Ray Tracing as design tool for radio networks*. In IEEE Network Magazine, Vol.5, Nov. 1991, pp. 27-30.
- [3] J.M. Gorce, S. Ubeda. *Propagation simulation with the ParFlow method : fast computation using a multi-resolution scheme*. In : IEEE 54th Vehicular Technology Conference, Fall 2001, Atlantic City, NJ, USA, October 2001.
- [4] J.M. Gorce, S. Frenot, V. Crespo, S. Ubeda. *Modélisation de la propagation en environnement Indoor dans la bande de fréquences UHF*. In International Conference on Image and Signal Processing (ICISP), Agadir, 2001.
- [5] E. Jullo. *Prédiction de couverture radio : rapport de stage de DEA*. DEA DISIC. Lyon : INSA de Lyon, 2002, 38 p.
- [6] T. Rappaport. *Wireless Communications : Principles and Practice*, Englewood Cliffs, New Jersey, USA : Prentice Hall, 1996, ch.3.
- [7] M. D. Adickes, R.E. Billo, B.A. Norman, S. Banerjee, B.O. Nnaji, J. Rajgopal. *Optimization of indoor wireless communication network layout*. Technical Report No. TR 99-5, Department of Industrial Engineering, University of Pittsburgh, 1999. Disponible sur : <http://www.pitt.edu/~rajgopal/vita.htm> (consulté le 19.08.2002).
- [8] R. A. Valenzuela. *Ray Tracing approach to predicting indoor wireless transmission*. In : Proceedings of the 43rd IEEE Vehicular Technology Conference, may 1993, pp. 214-218.
- [9] S. Y. Seidel, K. R. Schaubach, T.T. Tran, T.S. Rappaport. *Research in site-specific propagation modeling for PCS system design*. In : Proceedings of the 43rd IEEE Vehicular Technology Conference, May 1993, pp. 261-264.
- [10] H. Hussman. *Performance analysis of handover and channel management schemes for indoor scenarios based on ray tracing techniques*. In : Proceedings of the 44th IEEE Vehicular Technology Conference, June 1994, pp. 843-847.
- [11] K. Pahlavan, A. H. Lavesque. *Wireless information networks*. In : Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing. New York : Wiley, 1995, pp. 195-196.
- [12] J. W. H. Lee, A. K. Y. Lai. *FDTD analysis of indoor radio propagation*. In : IEEE Antennas Propagation Soc. Int. Symp., vol 3, Atlanta, GA, June 1998, pp. 1664-1667.

La Planification de Réseaux Locaux sans Fils

- [13] B. Chopard, P.O. Luthi, J.F. Wagen. *A lattice boltzmann method for wave propagation in urban microcells*. IEEE Proceedings – Microwaves, Antennas and Propagation, Vol 144, pp. 251-255, 1997.
- [15] J.A. Nelder, R. Mead. *A simplex method for function minimisation*. Computer Journal N°7, pp. 308-313, 1965.
- [16] H.D. Sherali, C.M. Pendyala, T.S.Rappaport. *Optimal Location of Transmitters for Micro-Cellular Radio Communication System Design*. In : IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol 14, No 4, May 1996.
- [17] D. Stamatelos, A. Ephremides. *Spectral efficiency and optimal base placement for indoor wireless networks*. In : IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol 14, No 4, May 1996.
- [18] J.J. Hopfield, DW Tank. *Neural Network computation of decisions in optimization problems*. In : Biological Cybernetics, no. 52, pp. 141-152, 1985.
- [19] T. Frühwirth, J.-R. Molwitz and P. Brisset. *Planning cordless business communication systems*. In : IEEE Expert Magazine, Special Track on Intelligent Telecommunications, February 1996.
- [20] T. Frühwirth, P. Brisset. *Optimal planning of digital cordless telecommunication systems*. In : Third International Conference on the Practical Application of Constraint Technology (PACT97), London, UK, April 1997.
- [21] K.S. Tang, K.F. Man, K.T.Ko. *Wireless LAN Design using hierarchical genetic algorithm*. In : Proceedings of the 7th International Conference on Genetic Algorithm, East Lansing, MI, July 19-23, 1997,, (San Mateo, California : Morgan Kaufman Publishers, 1997), pp. 629-635.
- [22] K.W. Cheung, R.D. Murch. *Optimizing Indoor Base-station Locations in Coverage- and interference-limited indoor Environments*, IEEE Proceedings- Communications, 145 (6): 445-450, 1998.