

Modélisation et Optimisation de la Planification de Réseaux Sans Fil

Thèse soutenue le 8 décembre 2008

par

Alexandre GONDRAN

Devant le Jury :

M. Jean-Marie GORCE

rapporteur

Pr, INSA Lyon

M. Olivier HUDRY

rapporteur

Pr, TELECOM Paris

M. Philippe GALINIER

examineur

Pr, École polytechnique, Montréal

M. Michel MINOUX

examineur

Pr, Université de Paris 6

M. Jean-François MORLIER

examineur

Ingénieur R&D, Orange Labs, Belfort

M. Alexandre CAMINADA

directeur

Pr, UTBM

Mme Oumaya BAALA

co-directrice

MC, UTBM

Problématique

Le problème de planification de WLAN à grande échelle

consiste d'une part à positionner et paramétrer des antennes dans un bâtiment et d'autre part à leur affecter une fréquence afin d'offrir aux clients un accès au réseau local avec la couverture souhaitée et la qualité de service requise, tout en minimisant le coût financier.

- GSM : fait mais séquentiellement
automatique et de grande échelle
- WLAN : à faire – objectif de la thèse
Coût financier / Qualité de service

Planification des Réseaux sans fil

1. **État de l'art : traitement séparé des deux problèmes**
2. Modélisation par le SINR
 1. Fonctionnement des WLAN
 2. Modèle
3. Optimisation
 1. Comparaison des stratégies d'optimisation
 2. Algorithme à Voisinages Variables Aléatoire (VVA)
4. Hypergraphes : approfondissement théorique sur l'affectation de fréquences

Traitement séparé des deux problèmes

Localisation + Allocation des fréquences
(Couverture + Interférences)



(Set Covering Problem)

x_i positionnement de l'AP i

avec puissance d'émission
diagramme de rayonnement
azimut



+ il y a d'antennes
+ on couvre en puissance



(k-coloring ou T-coloring)

f_i canal de fréquence de l'AP i



+ il y a d'antennes
+ il y a d'interférence
- on couvre en service

Problème non conservatif en qualité

Traitement séparé des deux problèmes

Localisation

puis

Allocation des fréquences

1^{ère} étape



Localisation avec contraintes sur les interférences

1. couverture en puissance F_{11}

2. interférence

3. capacité

F_{12}

F_{13}

Difficile problème de pondération

$$F_1(\mathbf{x}) = \alpha_1 F_{11} + \alpha_2 F_{12} + \alpha_3 F_{13}$$

2^{ème} étape



une fois le problème de localisation résolu

Allocation des fréquences

$F_2(f)$

2 fonctions d'évaluation $F_1(\mathbf{x})$ et $F_2(f)$

Critères d'optimisation de la littérature

	Eco.	Couverture			Interférences				Capacité		
		max puiss.	pb couv.	homog.	recouv.	écart puiss.	SINR	AFP	fixe	équi.	débit
[Aguado-Agelet <i>et al.</i> , 2002]		×	×		×						
[Amaldi <i>et al.</i> , 2004b]	×		×		×						×
[Anderson & McGeehan, 1994]	×		×					×			
[Bahri <i>et al.</i> , 2005]	×		×			×		×	×		
[Bosio <i>et al.</i> , 2007]	×		×					×			×
[Eisenblätter <i>et al.</i> , 2007]	×	×		×			×				
[Fortune <i>et al.</i> , 1995]			×								
[He <i>et al.</i> , 2004]			×			×					
[Jaffrès-Runser <i>et al.</i> , 2008]			×	×		×					×
[Ji <i>et al.</i> , 2002]		×	×	×							
[Kamenetsky & Unbehaun, 2002]		×	×	×							
[Kouhbor <i>et al.</i> , 2005]		×	×	×							
[Lee <i>et al.</i> , 2002]			×		×			×	×	×	
[Ling & Yeung, 2005]								×			×
[Lu <i>et al.</i> , 2006]			×	×		×					×
[Maksuriwong <i>et al.</i> , 2003]	×	×									
[Mathar & Niessen, 2000]	×		×		×			×			
[Prommak <i>et al.</i> , 2002]			×				×	×	×		
[Rodrigues <i>et al.</i> , 2000]	×	×			×			×			
[Jaffrès-Runser <i>et al.</i> , 2006]			×	×		×					×
[Sherali <i>et al.</i> , 1996]		×	×	×							
[Stamatelos & Ephremides, 1996]			×				×				
[Tang <i>et al.</i> , 2001]	×	×	×	×							
[Wertz <i>et al.</i> , 2004]			×				×	×			
[Wong <i>et al.</i> , 2003]	×		×				×				

Stratégies d'optimisation de la littérature

	sites		nombre point de service	Optimisation		Modèle propag.	Paramètres		Algorithmes
	nb cand.	nb sélé.		AFP co-c.	SINR adj-c.		puiss. émiss.	ant. direct.	
[Aguado-Agelet <i>et al.</i> , 2002]	∞	3	400			Friis			Q-N, Simplex, AE
[Amaldi <i>et al.</i> , 2004b]	50	45	300			cercle			G+RL
[Anderson & McGeehan, 1994]	fixe	4				rayons			RS
[Bahri <i>et al.</i> , 2005]	400	75	600	×		Friis	×		Tabou
[Bosio <i>et al.</i> , 2007]	30	29	100	×		cercle			G+RL
[Eisenblätter <i>et al.</i> , 2007]	32	8	798	×		rayons			CPLEX
[Fortune <i>et al.</i> , 1995]	∞	2	1000			rayons			Simplex
[He <i>et al.</i> , 2004]	∞	2				rayons			DIRECT
[Jaffrès-Runser <i>et al.</i> , 2008]	11	256	449		×	MR-FDPF			RT
[Ji <i>et al.</i> , 2002]	∞	3				Friis			Q-N, Simplex, AE, RS, DG
[Kamenetsky & Unbehaun, 2002]	112	8	112			Friis			RL, RS
[Kouhbor <i>et al.</i> , 2005]	3000000	13	75			Friis			DGD
[Lee <i>et al.</i> , 2002]	25	13	100	×			cercle		CPLEX
[Ling & Yeung, 2005]	15	10	200	×		rayons			RL
[Lu <i>et al.</i> , 2006]	257	11	12600			MR-FDPF			RT
[Mathar & Niessen, 2000]	504	25	974	×		cercle			RS
[Prommak <i>et al.</i> , 2002]		4	90	×	×	Friis	×		
[Rodrigues <i>et al.</i> , 2000]	6	6		×		Friis			CPLEX
[Wertz <i>et al.</i> , 2004]	57	8	10000	×	×	rayons			RL

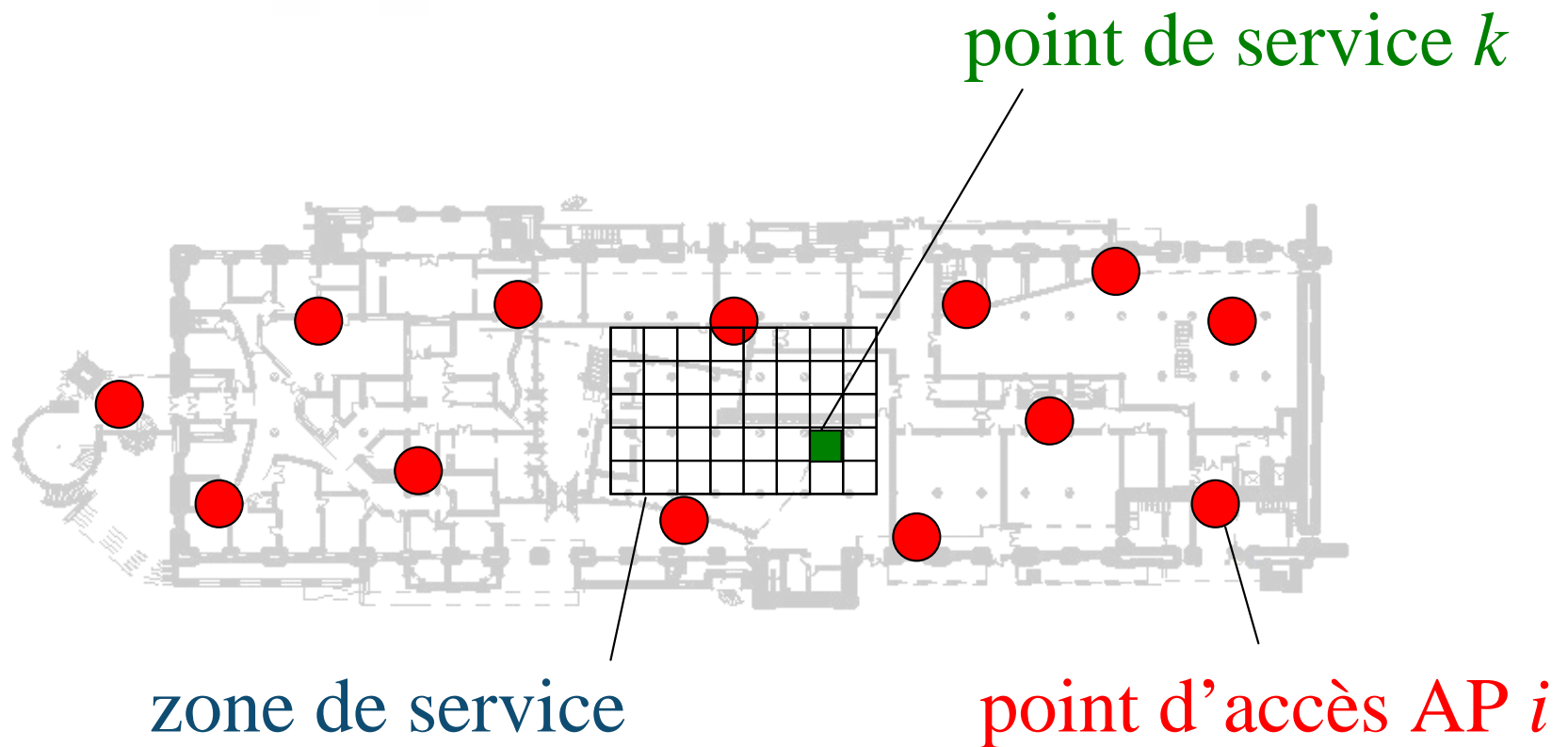
Orientations de la thèse

- Optimisation séquentielle :
 - Problèmes sous ou sur contrainte
- Unification des critères de qualité de service
 - Difficile comparaison
- Algorithmes
 - Taille des problèmes traités
 - Modèles de propagation
 - Intégration des 2 problèmes

Planification des Réseaux sans fil

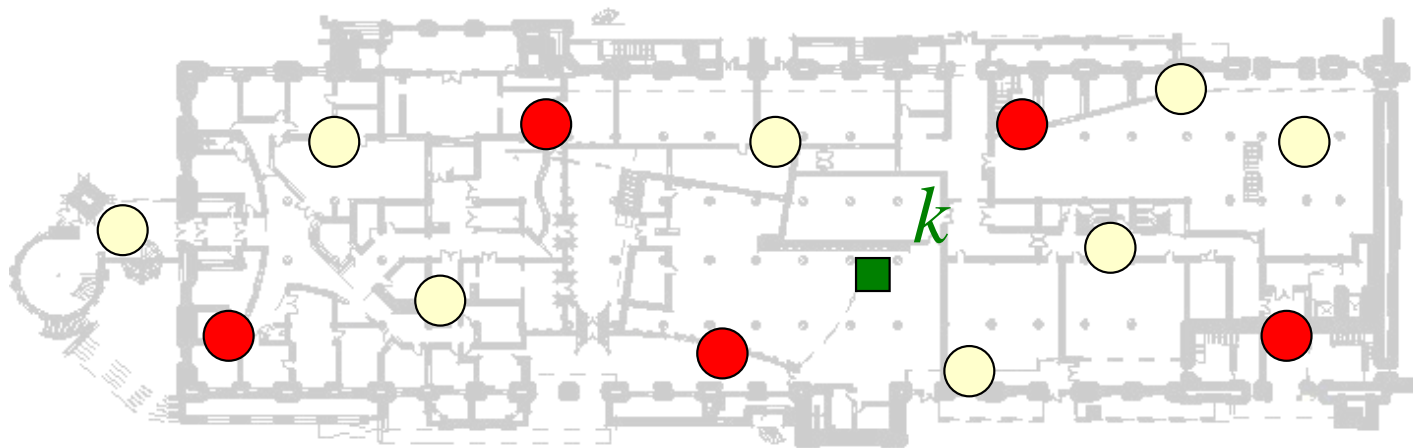
1. État de l'art : traitement séparé des deux problèmes
2. **Modélisation par le SINR**
 1. **Fonctionnement des WLAN**
 2. Modèle
3. Optimisation
 1. Comparaison des stratégies d'optimisation
 2. Algorithme à Voisinages Variables Aléatoire (VVA)
4. Hypergraphes : approfondissement théorique sur l'affectation de fréquences

Fonctionnement d'un WLAN



Fonctionnement d'un WLAN

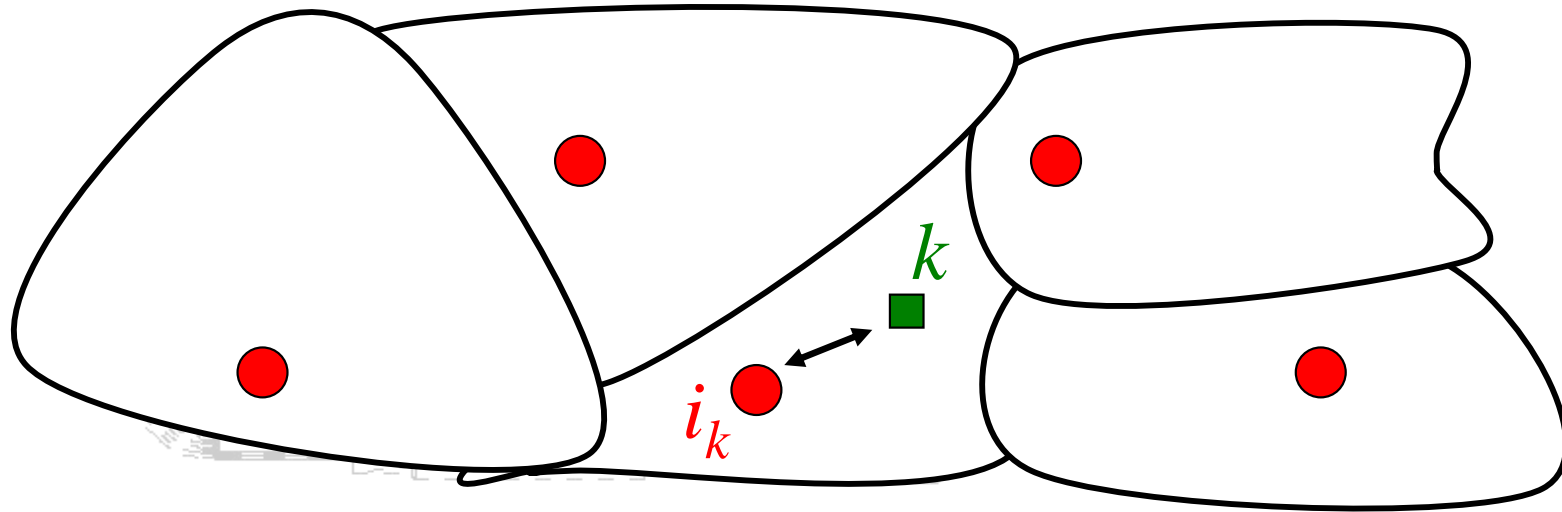
Variables : x



Association du point de service au meilleur signal reçu

Fonctionnement d'un WLAN

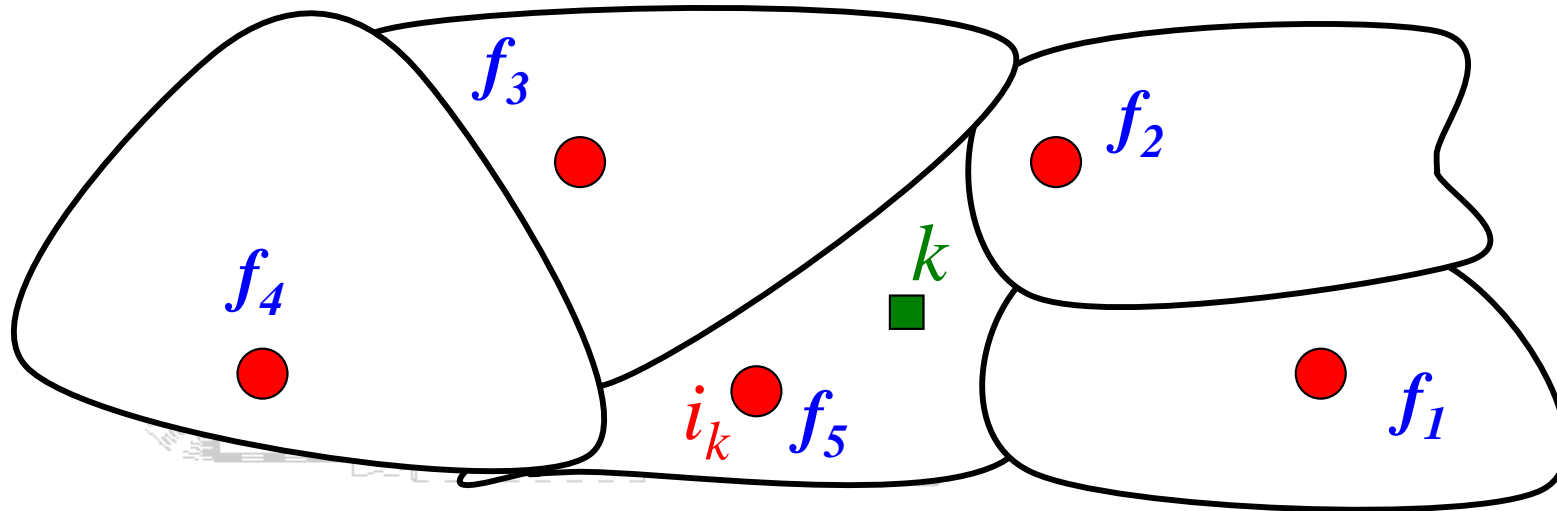
Variables : x



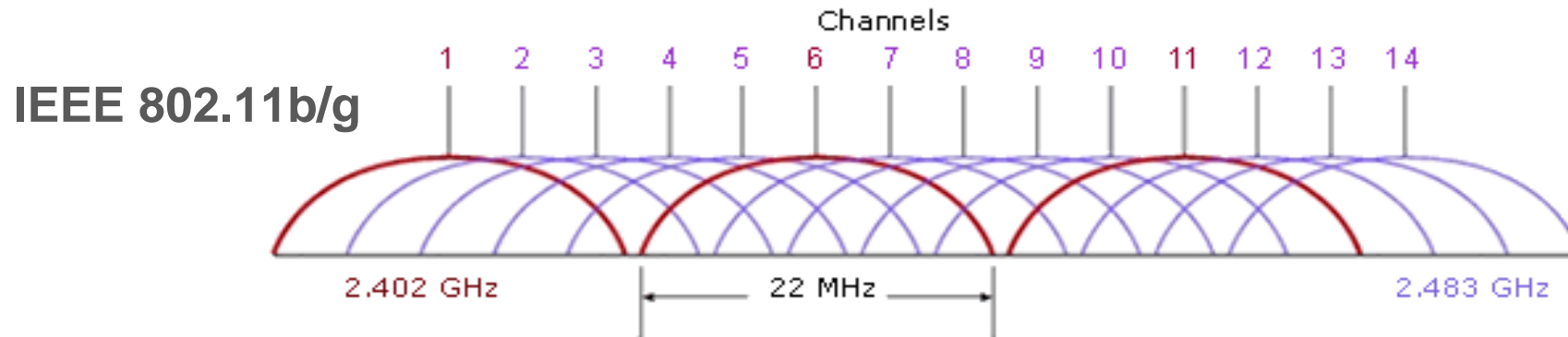
Association du point de service au meilleur signal reçu

Fonctionnement d'un WLAN

Variables : x et f

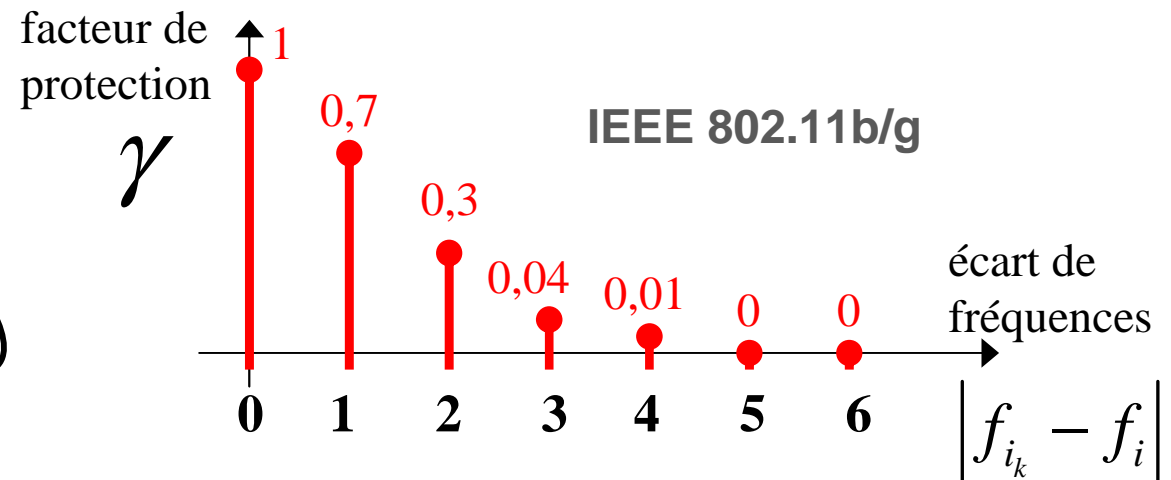
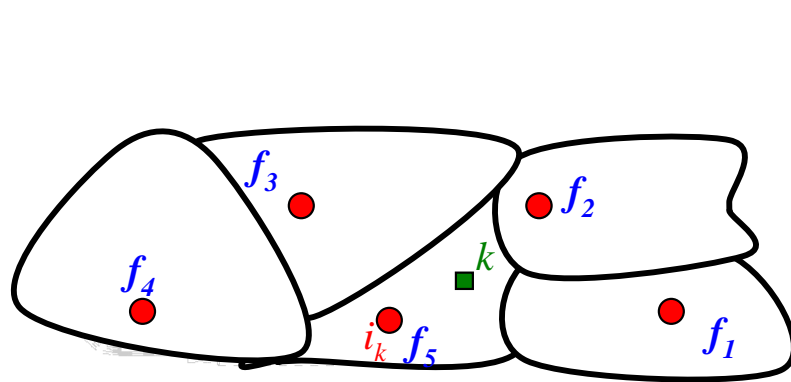


Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio

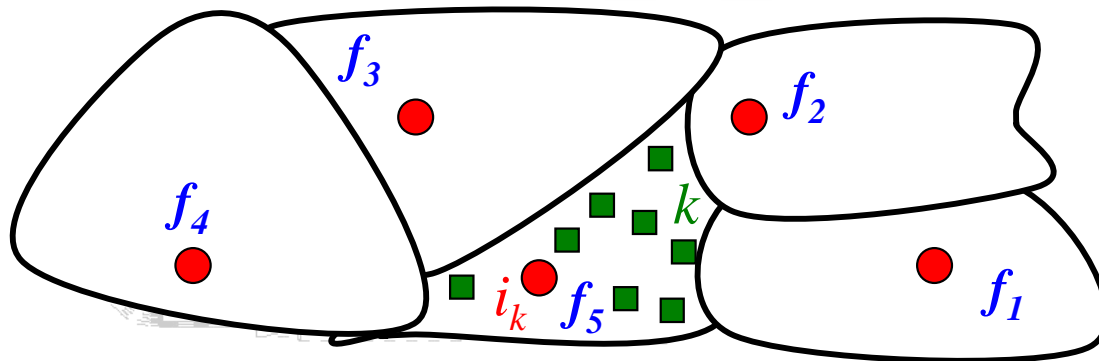


Calcul du SINR au point de service k :

$$SINR_k = \frac{P_{i_k k}}{\sum_{i \neq i_k} p_{ik} \times \gamma(|f_{i_k} - f_i|) + N}$$



Capacité réel d'un AP (lien descendant)



Données du problèmes :

 \mathcal{K}_k

Nombre de clients que représente le points de service k

 t_k^{MSDU}

Taille des données utiles (en Kbits/s) que nécessite le service demandé par le points de service k

$$capacité_i = \frac{\sum_{k \in cell(i)} \mathcal{K}_k \times t_k^{MSDU}}{\sum_{k \in cell(i)} \mathcal{K}_k \times \delta(SINR_k)}$$

Variables calculées :

 $\delta(SINR_k)$

Durée en seconde de la transmission des données utiles pour le points de service k au débit nominal correspondant à son SINR

Débit réel d'un point de service

Calcul du débit réel par point de service :

$$\text{débit}_k^o = \kappa_k \times \frac{\text{capacité}_{i_k}}{n_{i_k}}$$

Une seule fonction d'évaluation :

$$F(\mathbf{x}, \mathbf{f}) = \sum_k \underbrace{\max(0; \text{débit}_k^s - \text{débit}_k^o)}_{\text{manque de débit en kbit/s}} + \beta \times \text{coût financier en €}$$

↓
débit en kbit/s que l'on a pour 1€

Planification des Réseaux sans fil

1. État de l'art : traitement séparé des deux problèmes
2. **Modélisation par le SINR**
 1. Fonctionnement des WLAN
 2. **Modèle**
3. Optimisation
 1. Comparaison des stratégies d'optimisation
 2. Algorithme à Voisinages Variables Aléatoire (VVA)
4. Hypergraphes : approfondissement théorique sur l'affectation de fréquences

Modèle

- Données d'entrée
 - Bâtiments
 - Sites candidats avec leurs cartes de couverture (p_{ik}) et leurs coût d'installation :
 - Demande des usagers (type de service) : $débit_k^s, t_k^{MSDU}, \kappa_k$
 - Liste des points d'accès disponible
 - Paramètres de la norme utilisée
- Variables de décision
 - Choix des configuration d'AP (site, antenne, puissance, azimut) : x_i
 - Choix des canaux de fréquences : f_i
- Evaluation
 - Calcul du débit réel par usager : $débit_k^o$
 - $F(\mathbf{x}, \mathbf{f}) = \sum_k \max(0; débit_k^s - débit_k^o) + \beta \times coût \text{ financier}$

Planification des Réseaux sans fil

1. État de l'art : traitement séparé des deux problèmes
2. Modélisation par le SINR
 1. Fonctionnement des WLAN
 2. Modèle
3. **Optimisation**
 1. **Comparaison des stratégies d'optimisation**
 2. Algorithme à Voisinages Variables Aléatoire (VVA)
4. Hypergraphes : approfondissement théorique sur l'affectation de fréquences

Comparaison de stratégies d'optimisation

1. Optimisation globale

$$\min F(\mathbf{x}, \mathbf{f}) \Rightarrow \tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{f}}$$

$$SINR_k = \frac{P_{i_k k}}{\sum_{i \neq i_k} P_{ik} \times \gamma(|f_{i_k} - f_i|) + N}$$

2. Optimisation globale restreinte à 3 couleurs (littérature)

interférences co-canal \Rightarrow 3-coloration

$$\gamma(|f_{i_k} - f_i|) = 0 \text{ ou } 1 \quad SINR_k = \frac{P_{i_k k}}{\sum_{i \neq i_k} P_{ik} \times \gamma(|f_{i_k} - f_i|) + N}$$

$$\min F(\mathbf{x}, \mathbf{f} \in \{1, 6, 13\}) \Rightarrow \tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{f}} \Rightarrow \min F(\tilde{\mathbf{x}}, \mathbf{f}) \Rightarrow \tilde{\mathbf{f}}$$

Comparaison de stratégies d'optimisation

3. Optimisations séquentielles (3 cas)

1. *Problème de recouvrement* (littérature)

$$\gamma(|f_{i_k} - f_i|) = 0$$

$$SINR_k \simeq \frac{P_{i_k k}}{\sum_{i \neq i_k} P_{ik} \times 0 + N} = \frac{P_{i_k k}}{N} = SNR_k$$

2. *Problème co-canal* (littérature)

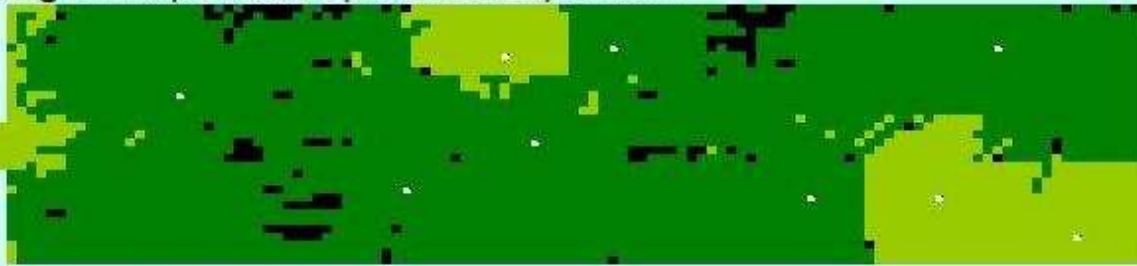
$$\gamma(|f_{i_k} - f_i|) = 1$$

$$SINR_k \simeq \frac{P_{i_k k}}{\sum_{i \neq i_k} P_{ik} + N}$$

$$3. \gamma(|f_{i_k} - f_i|) = \bar{\gamma}$$

$$SINR_k \simeq \frac{P_{i_k k}}{\sum_{i \neq i_k} P_{ik} \times \bar{\gamma} + N}$$

$$\min F(\mathbf{x}, \bar{\gamma}) \Rightarrow \tilde{\mathbf{x}} \Rightarrow \min F(\tilde{\mathbf{x}}, \mathbf{f}) \Rightarrow \tilde{\mathbf{f}}$$

Stratégie 1 : Optimisation purement séquentielle

Séquentielle
(co-canal) $\bar{\gamma} = 1$

Stratégie 2 : Optimisation de localisation avec coloration de graphe

Globale restreint
à 3 couleurs

Stratégie 3 : Optimisation de localisation avec brouillage moyen entre antennes

Séquentielle
(Trinaps)
 $\bar{\gamma} = 0,1$

Stratégie 4 : Optimisation de localisation et affectation simultanée

Globale
(Orange Labs)

Planification des Réseaux sans fil

1. État de l'art : traitement séparé des deux problèmes
2. Modélisation par le SINR
 1. Fonctionnement des WLAN
 2. Modèle
3. **Optimisation**
 1. Comparaison des stratégies d'optimisation
 2. **Algorithme à Voisinages Variables Aléatoire (VVA)**
4. Hypergraphes : approfondissement théorique sur l'affectation de fréquences

2 types de variables (x , f)

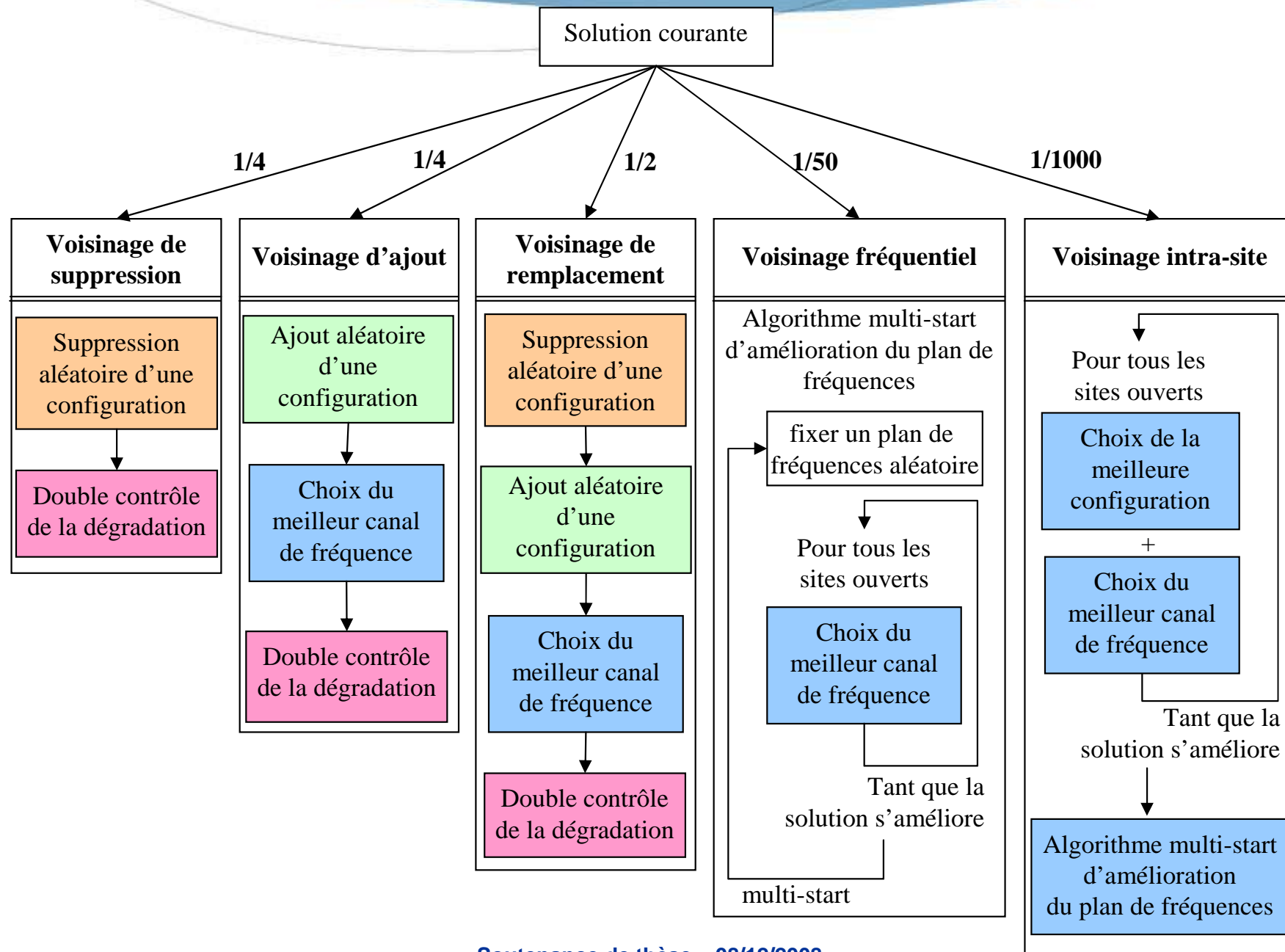


Plusieurs voisinages

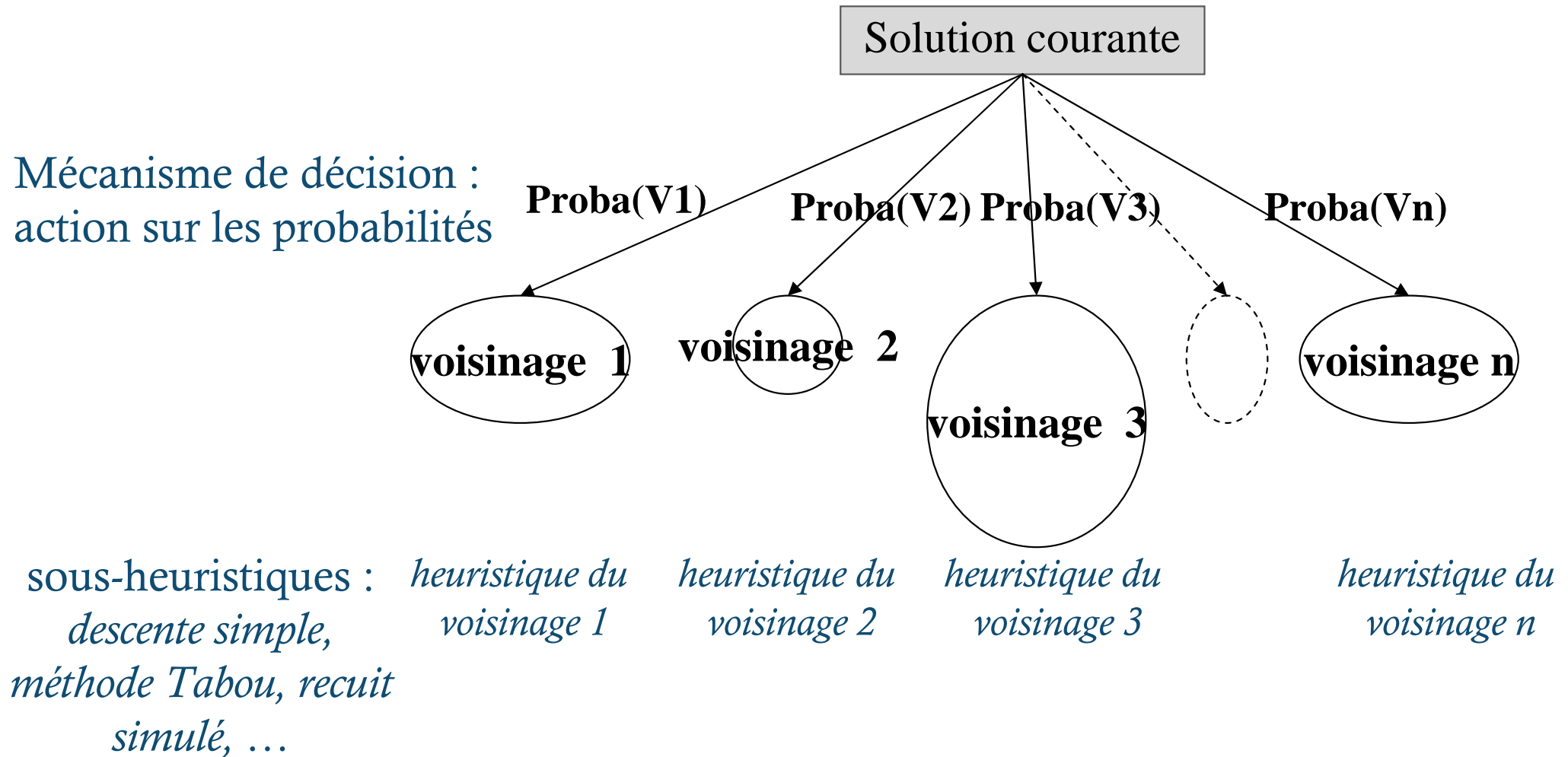


Algorithme à voisinages variables aléatoires

Algorithme à Voisins Variables Aléatoires



Algorithme à Voisinages Variables Aléatoires



Performances VVA

- Comparaison difficile
 - Pas de benchmarks
 - Modèles tous différents
- Facilité intrinsèque à traiter les 2 problèmes simultanément
- Éléments de comparaison avec les travaux les plus performants du domaine (thèse de Katia Jaffrès-Runser)

	Katia Jaffrès-Runser	VVA
Taille des problèmes traités		
Temps de calcul		

Planification des Réseaux sans fil

1. État de l'art : traitement séparé des deux problèmes
2. Modélisation par le SINR
 1. Fonctionnement des WLAN
 2. Modèle
3. Optimisation
 1. Comparaison des stratégies d'optimisation
 2. Algorithme à Voisinages Variables Aléatoire (VVA)
4. **Hypergraphes : approfondissement théorique sur l'affectation de fréquences**

Nouveau contexte

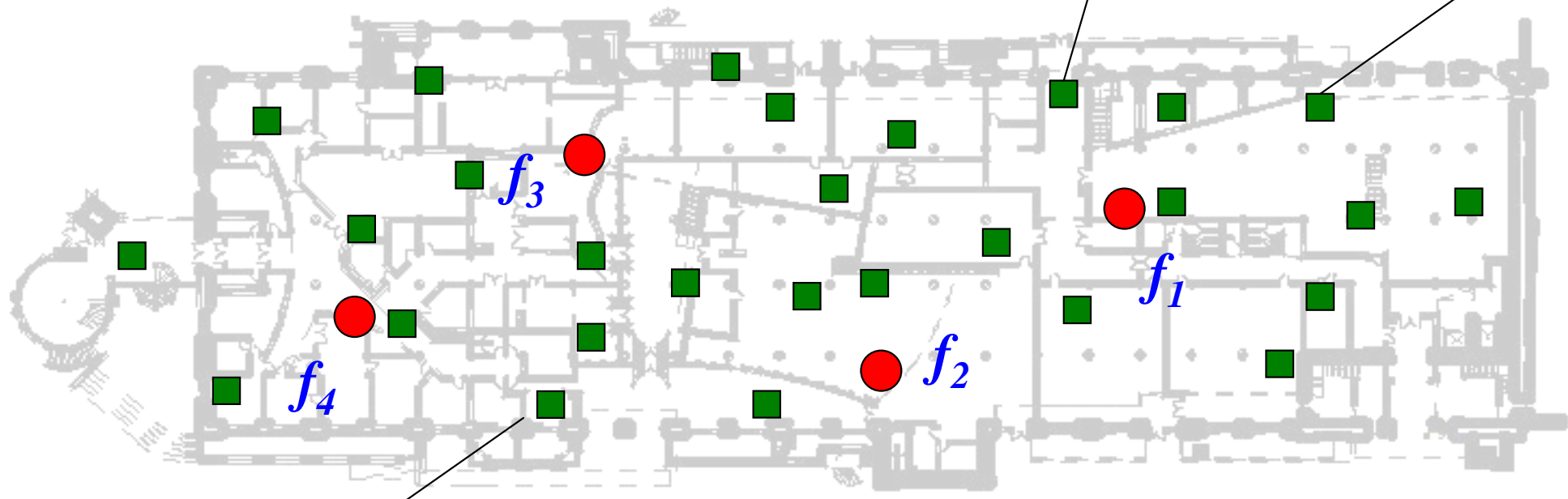
- Sous problème
 - Problème d'affectation des fréquences
 - Les configurations sont données
- Problème de décisions
 - Problème de satisfaction de contraintes
 - Oui ou non existe-t-il une solution ?

Allocation de fréquence dans les WLAN: contraintes SINR

s_k seuil de SINR nécessaire pour satisfaire le client k

$SINR \geq 20 \text{ dB}$

$SINR \geq 25 \text{ dB}$



$SINR \geq 15 \text{ dB}$

Trouver f_i

Tel que $\forall k, SINR_k \geq s_k$

contraintes SINR

$$SINR_k = \frac{p_{i_k k}}{\sum_{i \neq i_k} p_{ik} \times \gamma(|f_{i_k} - f_i|) + N} \geq s_k$$

T-coloration
de graphe

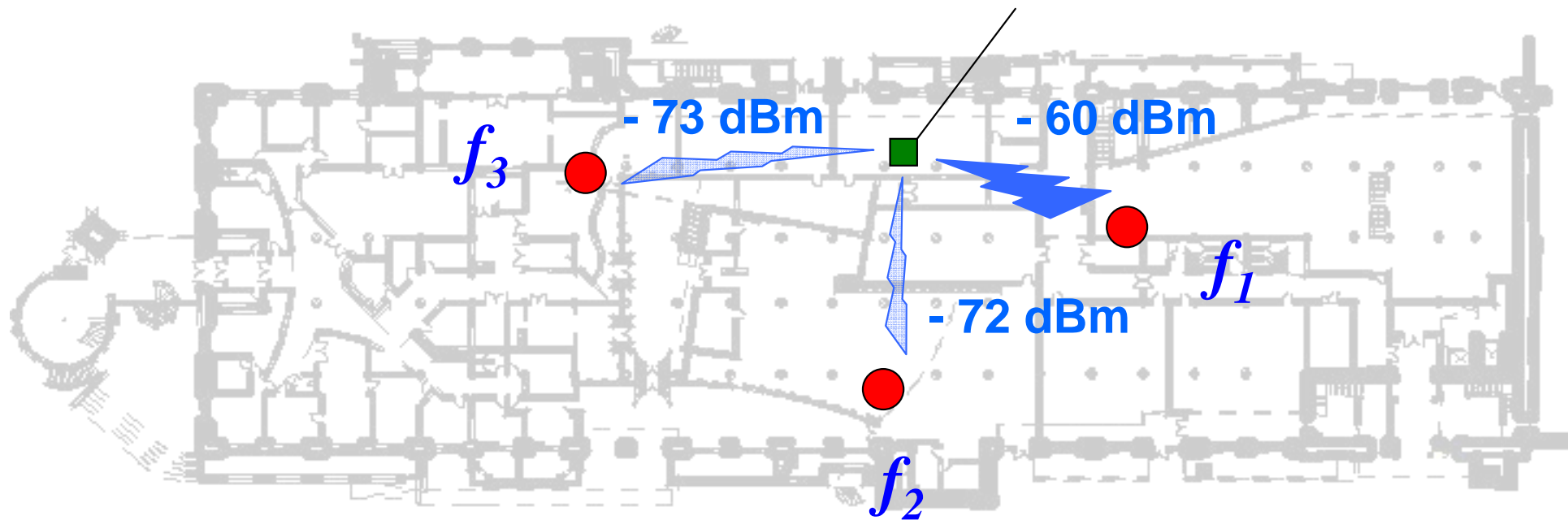
$$|f_j - f_i| \geq t_{ij}$$

$$t_{ij} = \max_k \left(\gamma^{-1} \left(\frac{p_{i_k k} / s_k - N}{p_{ik}} \right), j = i_k; \gamma^{-1} \left(\frac{p_{i_k k} / s_k - N}{p_{jk}} \right), i = j_k \right)$$

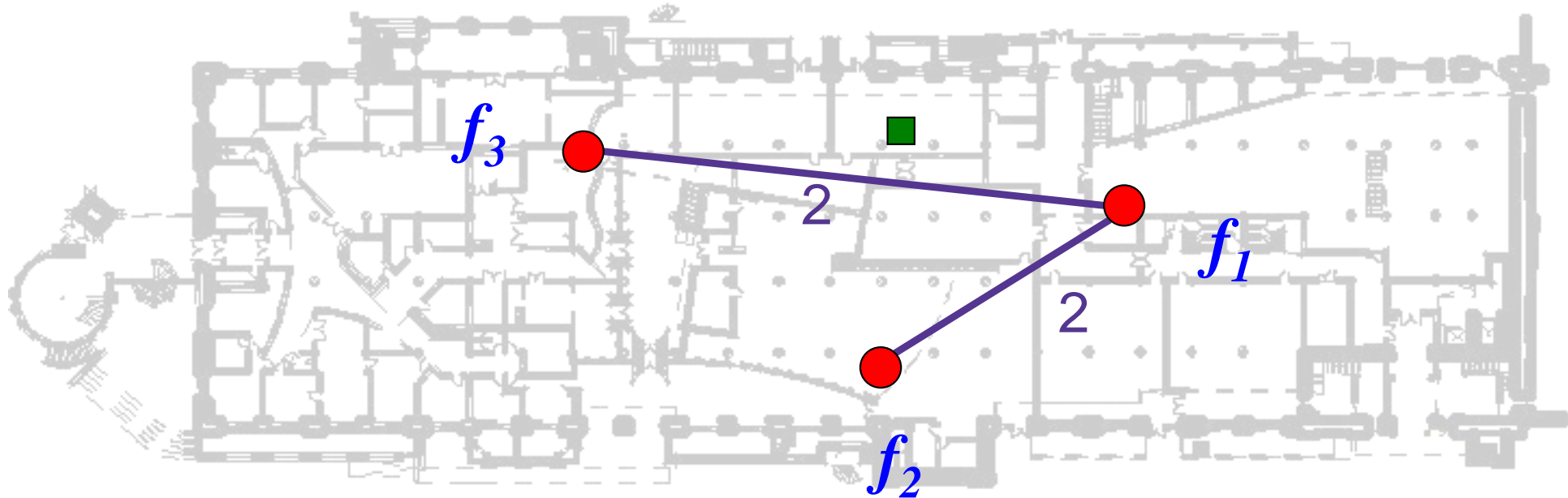
Condition nécessaire : problème de T -coloration de graphe

Exemple 1

$SINR \geq 15dB$



Condition nécessaire : problème de T -coloration de graphe



$$SINR \geq 15 \iff \begin{cases} |f_1 - f_2| \geq 2 \\ |f_1 - f_3| \geq 2 \end{cases}$$

contraintes SINR

$$SINR_k = \frac{P_{i_k k}}{\sum_{i \neq i_k} P_{ik} \times \gamma(|f_{i_k} - f_i|) + N} \geq s_k$$

équivalence ?

T -coloration
de graphe

$$|f_j - f_i| \geq t_{ij}$$

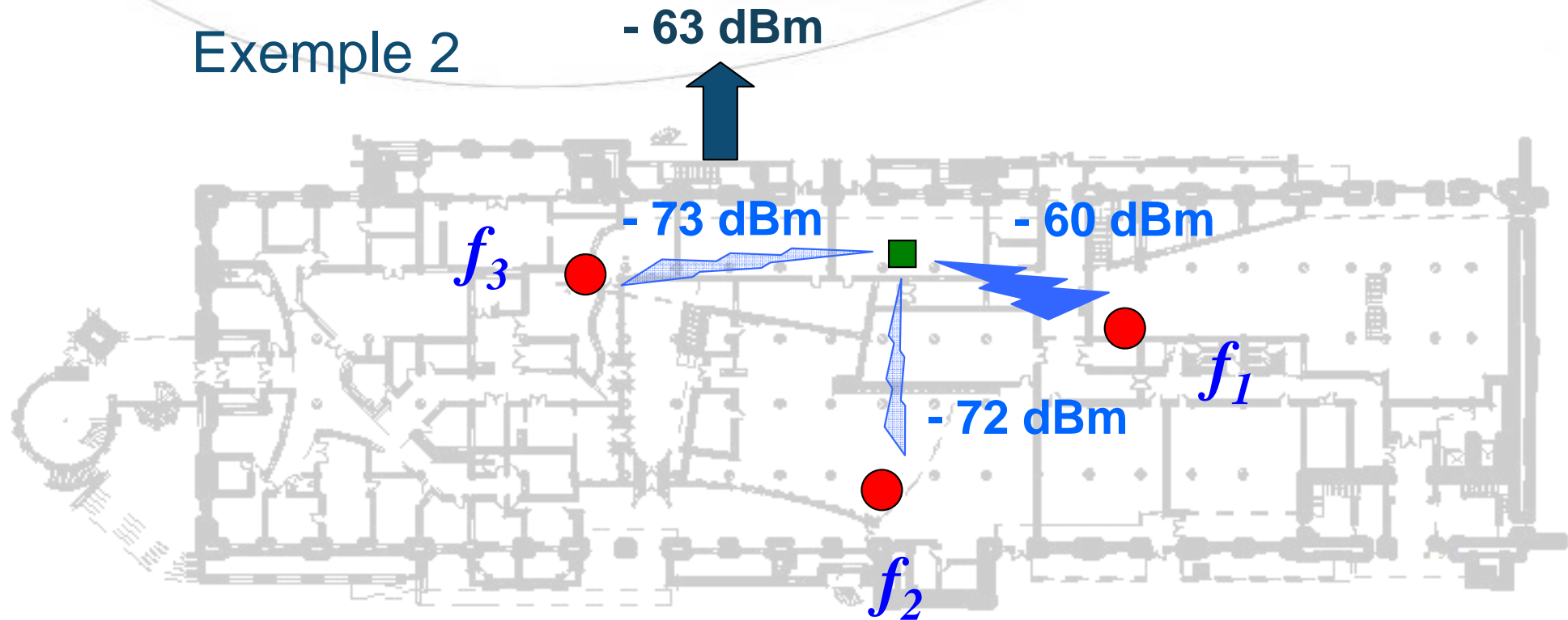
Théorème:

Oui, si

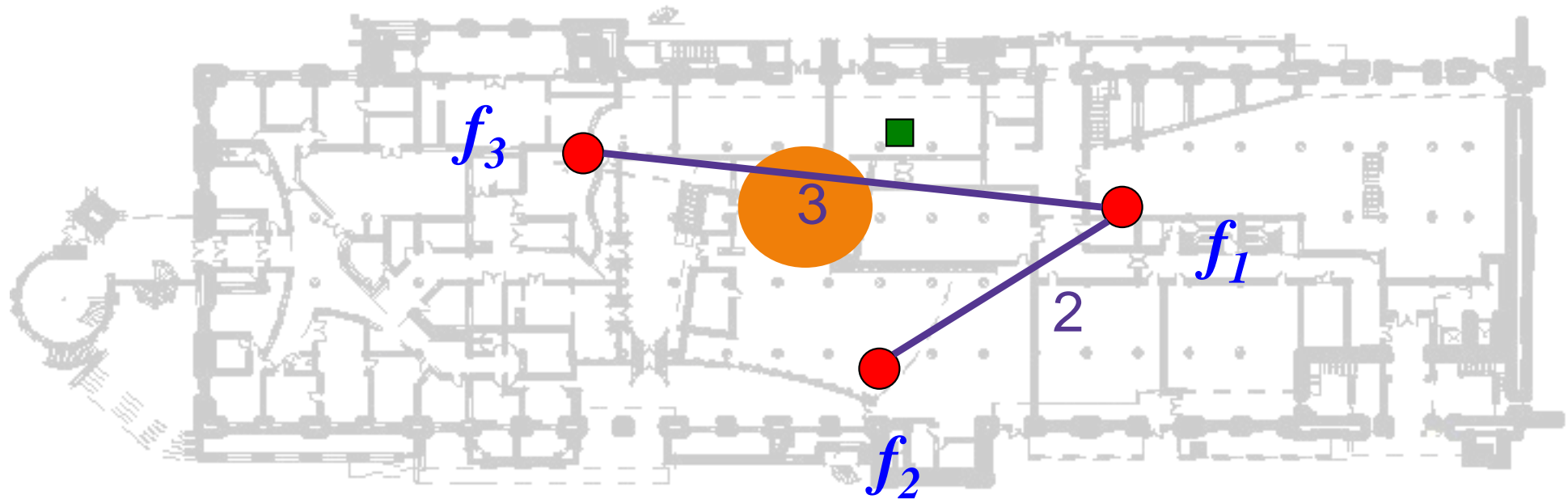
$$\forall k, \quad \underline{SINR}_k := \frac{P_{i_k k}}{\sum_{i \neq i_k} P_{ik} \times \gamma(t_{ii_k}) + N} \geq s_k$$

Condition quasi équivalente : problème T -coloration d'hypergraphe

Exemple 2



Condition quasi équivalente : problème T -coloration d'hypergraphe



$$SINR \geq 15 \Rightarrow \begin{cases} |f_1 - f_2| \geq 2 \\ |f_1 - f_3| \geq 3 \end{cases}$$

Condition quasi équivalente : problème T -coloration d'hypergraphe

$$SINR \geq 15 \quad \not\Leftrightarrow \begin{cases} |f_1 - f_2| \geq 2 \\ |f_1 - f_3| \geq 3 \end{cases}$$

Il est nécessaire d'ajouter une nouvelle contrainte

→ contrainte n -aire linéaire : $|f_1 - f_2| + |f_1 - f_3| \geq 6$

$$SINR \geq 15 \quad \Leftrightarrow \begin{cases} |f_1 - f_2| \geq 2 \\ |f_1 - f_3| \geq 3 \\ |f_1 - f_2| + |f_1 - f_3| \geq 6 \end{cases}$$

contraintes SINR

$$SINR_k = \frac{P_{i_k k}}{\sum_{i \neq i_k} P_{ik} \times \gamma(|f_{i_k} - f_i|) + N} \geq s_k$$



T-coloration
de graphe

$$|f_j - f_i| \geq t_{ij}$$

T-coloration
d'hypergraphe

$$\sum_{i \neq i_k} \alpha_{ik} |f_i - f_{i_k}| \geq \alpha_{i_k k}$$

$$\forall k, \forall i \neq i_k, \quad \alpha_{ik} = \frac{1}{t} \min_t \left(p_{jk} \gamma(t_{ji_k} + t) + \sum_{i \neq j} p_{ik} \gamma(t_{ii_k}) \leq \frac{P_{i_k k}}{s_k} - N \right)$$

contraintes SINR

$$SINR_k = \frac{P_{i_k k}}{\sum_{i \neq i_k} P_{ik} \times \gamma(|f_{i_k} - f_i|) + N} \geq s_k$$

équivalence ?

T -coloration
de graphe

$$|f_j - f_i| \geq t_{ij}$$

T -coloration
d'hypergraphe

$$\sum_{i \neq i_k} \alpha_{ik} |f_i - f_{i_k}| \geq \alpha_{i_k k}$$

Théorème:

Oui, si $\forall k, \forall i \neq i_k, \alpha_{ik} = 1$

contraintes SINR

$$SINR_k = \frac{p_{i_k k}}{\sum_{i \neq i_k} p_{ik} \times \gamma(|f_{i_k} - f_i|) + N} \geq s_k$$

Pour les problèmes réels, les seuils s_k sont inconnus
Seules les demandes de débit par client
(kilobit/s) sont connues

T-coloration
de graphe

$$|f_j - f_i| \geq t_{ij}$$

T-coloration
d'hypergraphe

$$\sum_{i \neq i_k} \alpha_{ik} |f_i - f_{i_k}| \geq \alpha_{i_k k}$$

contraintes SINR

$$SINR_k = \frac{p_{i_k k}}{\sum_{i \neq i_k} p_{ik} \times \gamma(|f_{i_k} - f_i|) + N} \geq s_k$$

Pour les problèmes réels, les seuils s_k sont inconnus
Seules les demandes de débit par client
(kilobit/s) sont connues

Contraintes
de capacité

$$Capacité_{AP} \geq Demande$$

T-coloration
de graphe

$$|f_j - f_i| \geq t_{ij}$$

T-coloration
d'hypergraphe

$$\sum_{i \neq i_k} \alpha_{ik} |f_i - f_{i_k}| \geq \alpha_{i_k k}$$

contraintes SINR

$$SINR_k = \frac{p_{i_k k}}{\sum_{i \neq i_k} p_{ik} \times \gamma(|f_{i_k} - f_i|) + N} \geq s_k$$

Nous avons défini une nouvelle procédure qui détermine dynamiquement les meilleurs seuils s_k pour transformer le problème en un problème de T -coloration de graphe et d'hypergraphe

Contraintes de capacité

$$Capacité_{AP} \geq Demande$$

 T -coloration de graphe

$$|f_j - f_i| \geq t_{ij}$$

 T -coloration d'hypergraphe

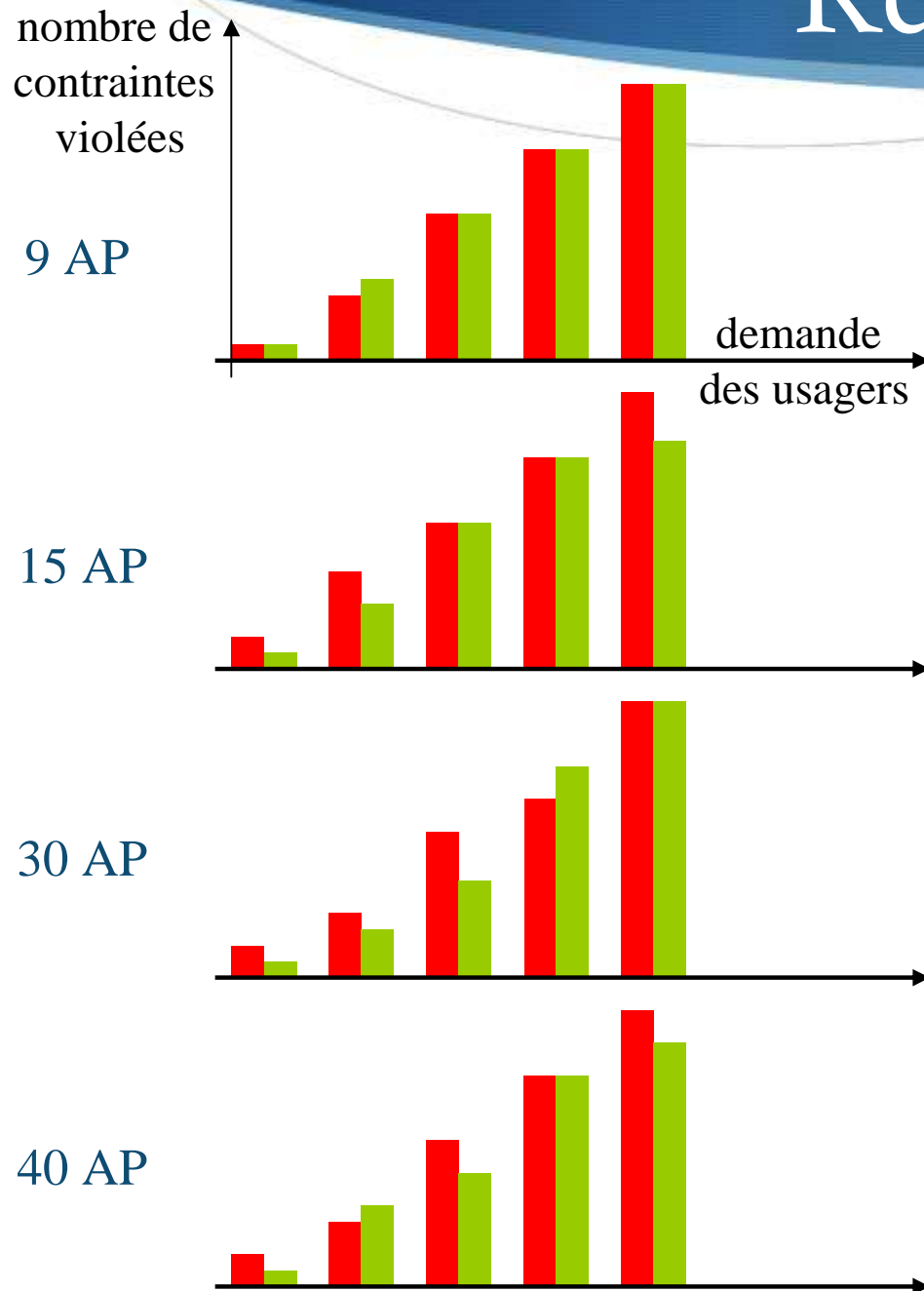
$$\sum_{i \neq i_k} \alpha_{ik} |f_i - f_{i_k}| \geq \alpha_{i_k k}$$

Résultats


Tests	T-coloration de graphe		T-coloration d'hypergraphe		
	time (s)	f_0	time (s)	f_0	
9 AP	1-9/3024/4/100	0.5	0	2.5	0
	2-9/3024/16/1000	9	2.1	59	3.2
	3-9/3024/22/1000	10	21.2	54	21.2
	4-9/3024/24/1000	10	29.2	56	29.2
	5-9/3024/30/1000	10	96.7	59	96.7
15 AP	6-15/3024/4/100	2	0.5	13	0
	7-15/3024/16/1000	37.7	24.2	146	21.8
	8-15/3024/22/1000	39	79.8	136	79.8
	9-15/3024/24/1000	41	111.6	149	111.6
	10-15/3024/30/1000	43	160	136	158.4
30 AP	11-30/7728/4/100	37	0.6	108	0.4
	12-30/7728/16/200	95.6	36.1	393	35.1
	13-30/7728/22/100	45	80.4	180	73.5
	14-30/7728/24/100	157	103	668	104.1
	15-30/7728/30/100	45	186.5	188	186.5
40 AP	16-40/7728/4/100	85.7	1.3	192	0
	17-40/7728/16/100	146	33.6	421	35.6
	18-40/7728/22/100	137	86.2	428	83.3
	19-40/7728/24/100	142	112.3	428	112.3
	20-40/7728/30/100	149	205.6	415	201.1

- Premiers résultats prometteurs
- Création de benchmarks
- Développement de solveurs (travail avec des étudiants)

Résultats



 *T*-coloration de graphe

 *T*-coloration d'hypergraphe

3/20 *T*-coloration de graphe meilleurs résultats

17/20 *T*-coloration d'hypergraphe meilleurs résultats ou équivalents

- Premiers résultats prometteurs
- Création de benchmarks
- Développement de solveurs (travail avec des étudiants)

Conclusion

- Optimisation simultanée du placement des transmetteurs et de l'allocation des fréquences
 - Débit réel et SINR au cœur de la modélisation
 - Stratégies globale et séquentielle
- Algorithme à voisinages variables aléatoires
 - Démarche de généralisation du procédé
 - Performances

Conclusion

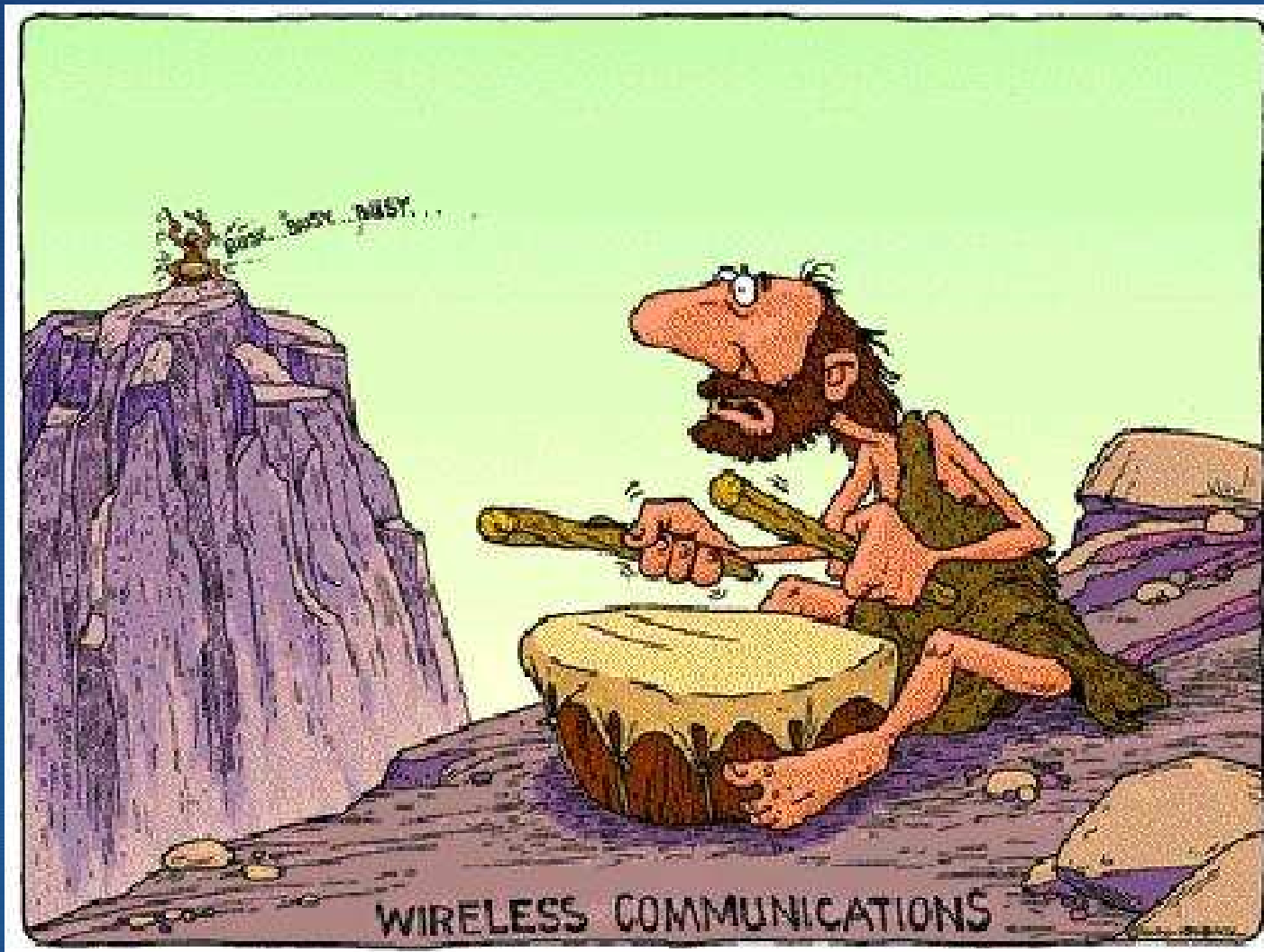
- Résultats théoriques sur l'affectation de fréquences
 - Modélisation par des hypergraphes
 - Construction de benchmarks
- Valorisation
 - Trinaps
 - Orange Labs

Perspectives

- Modèle physique
 - Optimisation conjointe WiFi/WiMAX
 - Utilisation du modèle de propagation MR-FDPF
 - Lien montant : formules analytiques pour le calcul du débit
- Robustesses :
 - Modèle :
 - Variation de la demande
 - Variation des puissances reçues
 - Algorithme à Voisinages Variables Aléatoires :
 - Validation sur plusieurs scénarios

Perspectives

- *T*-coloration d'hypergraphe
 - Intégrer la à l'optimisation WIFIOPT
 - Application GSM/EDGE
- Géométrie des réseaux
 - Etude commencée à consolider
 - Fondamentale pour les services de mobilité (VoIP)



Merci à tous