

Sommaire

<i>Réseau cellulaires d'Auparavant et d'Aujourd'hui</i>	53
<i>Concept de réseaux cellulaires</i>	53
Pourquoi le concept cellulaire ?	53
Principe du réseau cellulaire	54
Résultat de l'utilisation du concept cellulaire	54
L'idée de base du concept cellulaire	55
Concept de Cluster	57
Enjeux du concept cellulaire	58
Forme de la cellule du réseau	58
Principe de la Planification Hexagonale	59
Capacité d'un réseau hexagonal	60
Rapport porteuse/interférence	61
Formation optimale des Clusters	62
Calcul de la distance D de réutilisation de fréquence	64
Taux de réutilisation co-canal	64
Intensité du Trafic	65
Systèmes d'Erlang B	66
Système d'Erlang C	67
Tailles des cellules	67

Réseau cellulaires d'Auparavant et d'Aujourd'hui

- ⇒ Auparavant, les réseaux téléphoniques étaient semblables aux réseaux de diffusion de la radio ou de TV (Voir la figure (1) – côté gauche);
- ⇒ En effet, un seul émetteur puissant, placé dans un milieu assez haut, est utilisé pour assurer la transmission ;
- ⇒ Conséquence → Une faible capacité de prise en charge des utilisateurs. En effet, la bande de fréquences allouée dans la grande cellule peut offrir uniquement 100 communications simultanées ;
- ⇒ Actuellement, plusieurs émetteurs de faibles puissances, placés de façon diversifiée, sont utilisés pour couvrir toute la région (Voir la figure (1) – côté droit) ;
- ⇒ Conséquence → Capacité énorme : Si par exemple la bande de fréquence est réutilisée dans 10 autres cellules de petites tailles (relativement à la précédente), alors on peut offrir $100 \times 10 = 1000$ communications simultanées !!

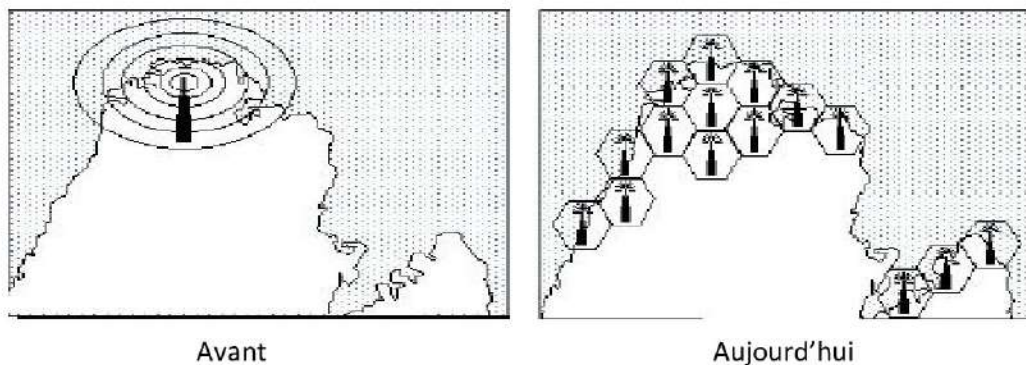


Figure.1. Réseau cellulaires d'Auparavant et d'Aujourd'hui

Concept de réseaux cellulaires

Pourquoi le concept cellulaire ?

- ⇒ Desservir une région de taille importante (pays, continent) sous les contraintes suivantes :
 - 1- Une bande de fréquences limitée ;
 - 2- Une densité d'utilisateurs importante variant en fonction du temps et dans l'espace ;
 - 3- Possibilité de fournir des services téléphoniques et autres à des usagers fixes et mobiles.

Interférences entre canaux

- ⇒ Comme le principe est basé sur l'utilisation des mêmes fréquences porteuses pour couvrir des zones différentes (séparées par des distances suffisantes), les interférences co-canaux ne doivent pas être importantes ;
- ⇒ La figure (2) montre un récepteur mobile recevant des interférences en provenance de plusieurs émetteurs.

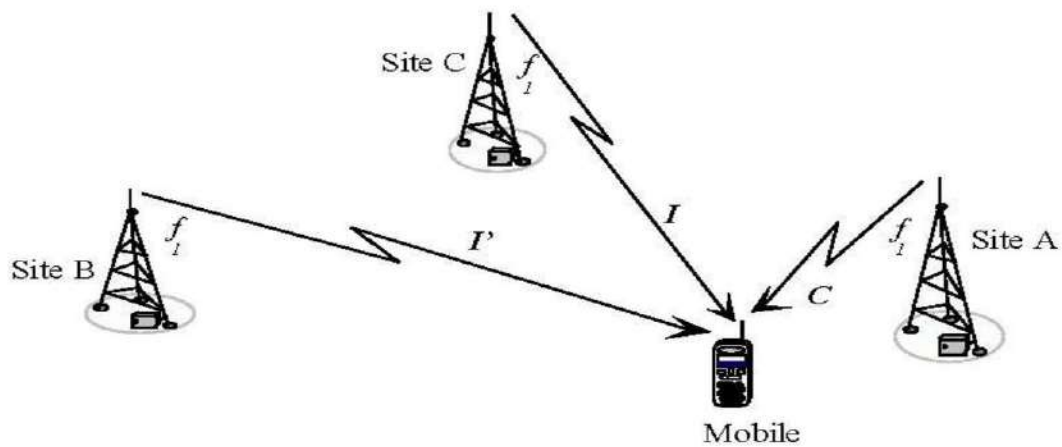


Figure.2. Interférences Inter-Canaux

Principe du réseau cellulaire

Le concept de réutilisation spatiale des fréquences a conduit au développement du principe cellulaire, qui a permis une amélioration significative de l'utilisation économique des fréquences. Les caractéristiques essentielles du réseau cellulaire sont données comme suit :

- ⇒ La zone à couvrir est subdivisée en cellules (zones radio) ;
- ⇒ La station de base est placée au centre de chaque cellule ;
- ⇒ A chaque cellule un sous-ensemble des fréquences est attribué. L'ensemble des fréquences attribuées à une cellule est appelé Cell Allocation (CA). Dans des circonstances normales, le nombre de canaux dans un sous-ensemble S_i dépend des exigences en termes de capacité ;
- ⇒ Les cellules voisines n'utilisent normalement pas les mêmes fréquences ;
- ⇒ Ce n'est qu'à la distance D qu'une fréquence de l'ensemble S_i peut être réutilisée. D doit être choisi d'une façon optimale ;
- ⇒ Lorsqu'une station mobile se déplace d'une cellule à une autre un changement automatique de canal/fréquence peut se produire ;
- ⇒ La répétition spatiale des fréquences se fait de manière régulière et systématique.

Résultat de l'utilisation du concept cellulaire

- ⇒ Le concept cellulaire peut résoudre le problème de congestion spectrale et augmenter en outre la capacité du système ;
- ⇒ La capacité sera augmentée sans allocation supplémentaire du spectre (fréquences).

L'idée de base du concept cellulaire

- ⇒ Comme le spectre de fréquences disponible est limité par l'opérateur et le système, une solution idéale consiste à réutiliser les mêmes fréquences à une distance suffisante pour éviter les interférences ;
- ⇒ Supposons que le système dispose de N_1 canaux fréquentiels ;
- ⇒ En utilisant une méthode d'accès classique (avant le système cellulaire), on dispose uniquement de N_1 canaux fréquentiels ;
- ⇒ Le nombre d'utilisateurs, pouvant occuper simultanément ces canaux, est égal aussi à N_1 .

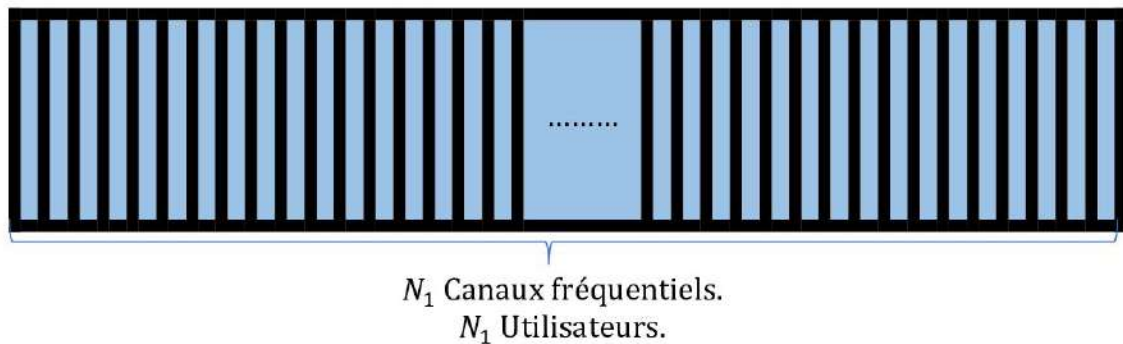


Figure.3. Système disposant de N_1 canaux fréquentiels

Après réutilisation des mêmes fréquences (5 fois N_1 par exemple) à une distance suffisante (pour éviter les interférences), on obtient une nouvelle capacité du système. Cette dernière est donnée par (Voir la figure (4)) :

$$C_2 = 5C_1 = 5N_1.$$

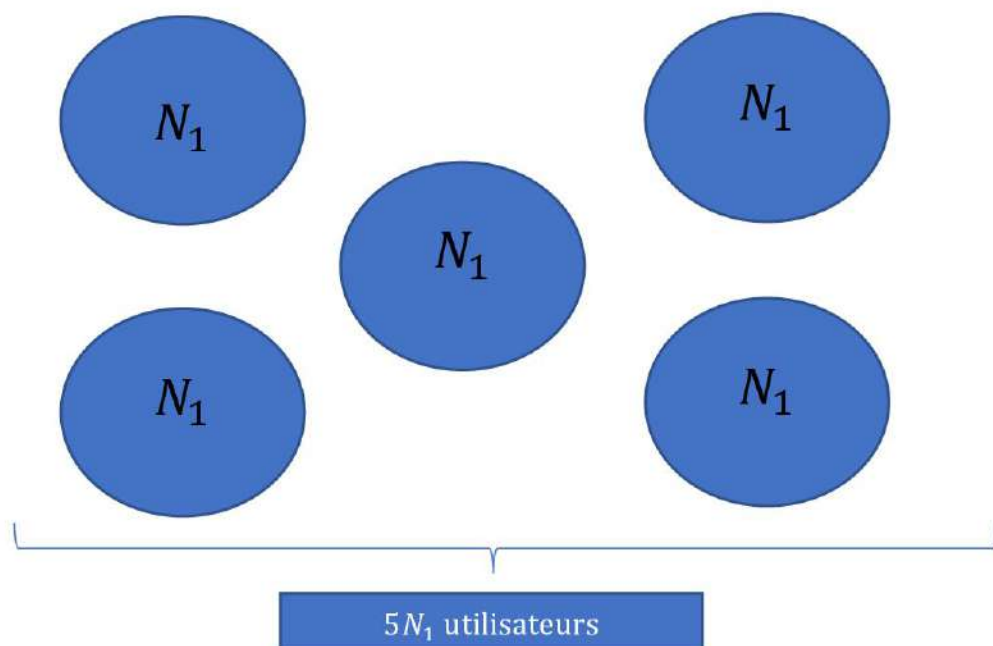


Figure.4. Cinq cellules utilisant les mêmes fréquences

Exemple numérique : pour $N_1 = 70$:

- ⇒ Diviser les N_1 canaux en 7 groupes (A, B, C, D, E, F, G) de 10 canaux chacun (Voir la figure (5)) ;
- ⇒ Les cellules qui utilisent le même groupe de 10 canaux seront éloignées comme le montre la figure (6).

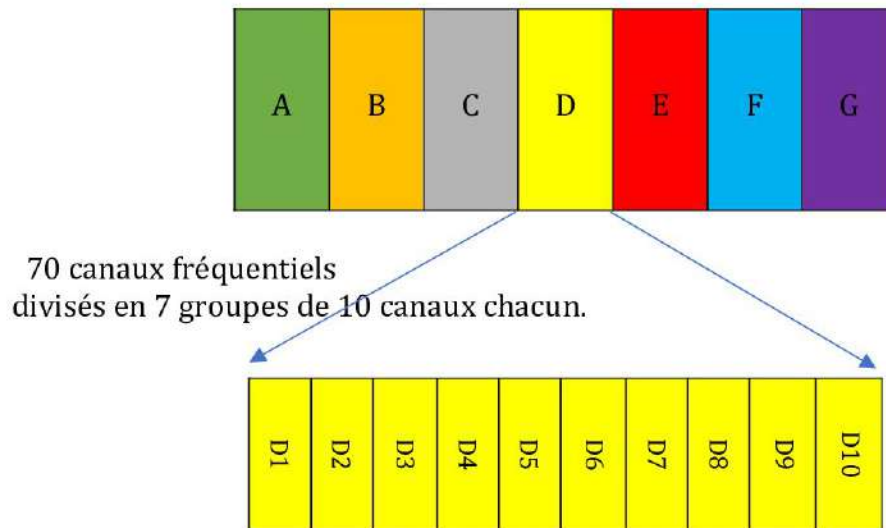


Figure.5. 70 canaux divisés en 7 groupes (A,B,C,D,E,F,G) de 10 canaux chacun

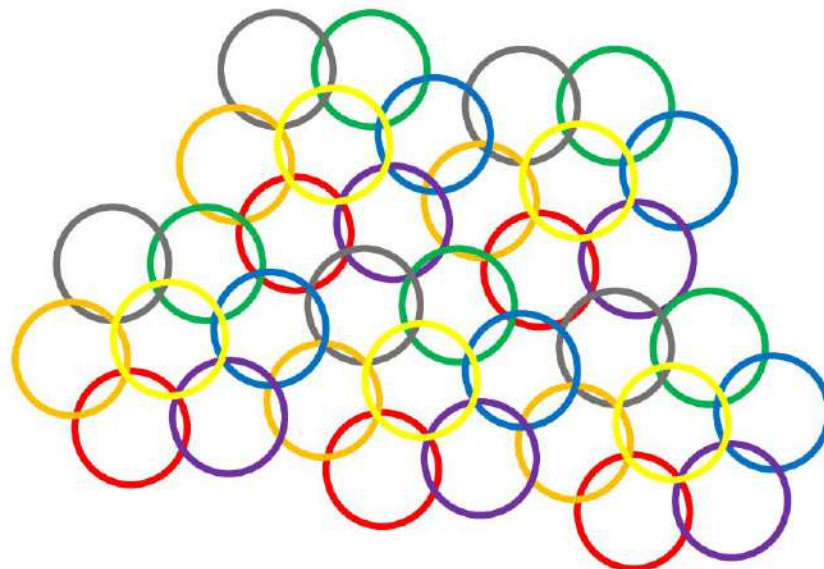


Figure.6. Augmentation de la capacité du réseau après réutilisation des fréquences

⇒ La capacité C du système est égale au nombre d'utilisateurs simultanés. Elle est donnée par : $C = 10 \times 7 \times 5 = 350$ Utilisateurs ;

- ⇒ Comme le système utilise 5 groupes d'émetteurs de faibles puissances, alors avec la même capacité, la puissance de transmission passe de centaines de *Watts* à quelques *Watts*, et même $< 1 W$.

Concept de Cluster

- ⇒ Un cluster est un ensemble de cellules utilisant chacune des fréquences différentes ;
- ⇒ Les fréquences de la cellule peuvent être réutilisées par d'autres cellules dans le système. Ces dernières doivent appartenir à d'autres groupes et donc suffisamment loin pour ne pas provoquer des interférences ;
- ⇒ La distance de réutilisation D (Voir la figure (8)) est égale à la distance minimale entre les centres de deux cellules utilisant le même canal fréquentiel.

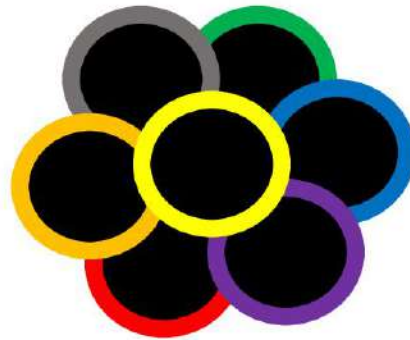


Figure.7. Cluster de taille 7

- ⇒ Pour augmenter la capacité, on peut utiliser des cellules de faible taille ;
- ⇒ La capacité du système (nombre d'utilisateurs simultanés) devient supérieure à 350 (pour l'exemple précédent - Voir la figure (8)).

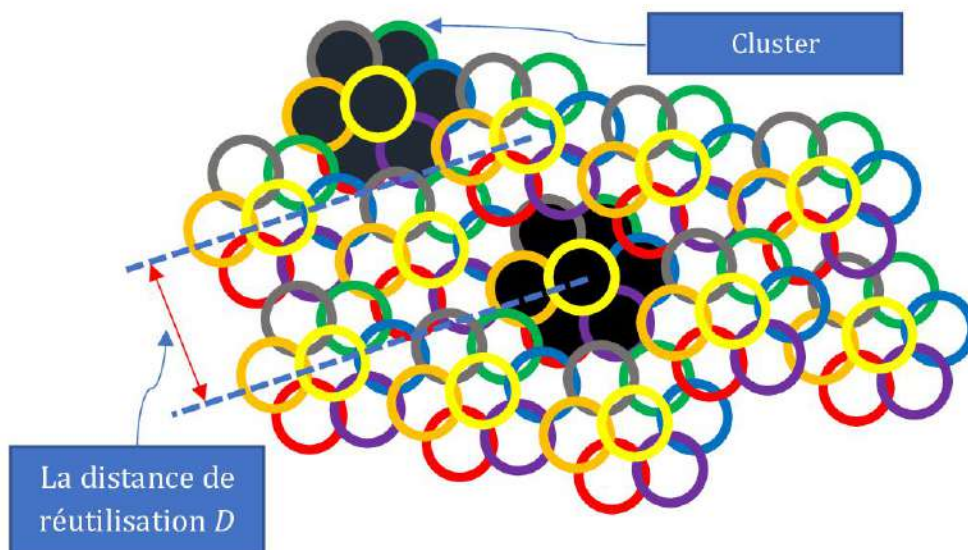


Figure.8. Augmentation de la capacité du réseau par réduction des tailles des cellules

Enjeux du concept cellulaire

Il existe trois enjeux du concept cellulaire qui sont donnés comme suit :

- ⇒ La réduction de la puissance de transmission ;
- ⇒ L'augmentation de la capacité du système par :
 - L'étalement de la couverture par autant de cellules que nécessaire ;
 - L'augmentation du nombre maximum des utilisateurs accédant au réseau.
- ⇒ La réduction des interférences.

Forme de la cellule du réseau

- ⇒ Comme le montre la figure (9), les antennes omnidirectionnelles rayonnent selon une forme circulaire (vue de dessus) ;

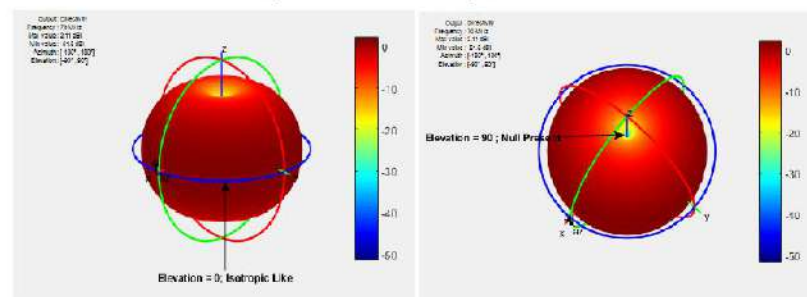


Figure.9. Diagramme de rayonnement omnidirectionnel

- ⇒ Une cellule doit être conçue pour servir les mobiles captant les puissances les plus faibles au sein de l'empreinte (forme ou cellule). Ces mobiles sont généralement situés à la frontière de la cellule ;
- ⇒ On utilise des cellules de différentes formes plus particulièrement celles qui sont circulaires ;
- ⇒ Le problème des cellules circulaires est que ces dernières, lorsqu'elles sont superposées sur une carte, elles laissent des zones non couvertes et créent des zones qui se chevauchent (Voir la figure (8));
- ⇒ Pour remédier aux limitations des cellules circulaires, les concepteurs des réseaux ont proposé 3 choix à savoir le triangle équilatéral, le carré ou l'hexagone (Voir la figure (10)).

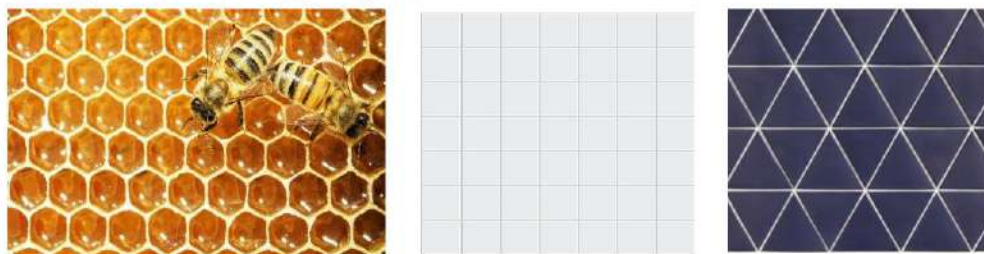


Figure.10. Trois différents types de cellules

- ⇒ Parmi ces trois formes, l'hexagone possède la plus grande superficie qui est très proche à la surface d'un cercle comme le montre la figure (11).

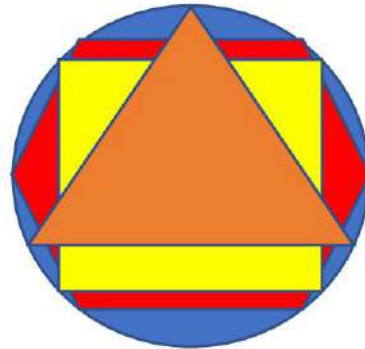


Figure.11. Superficies des différents types de cellules

- ⇒ Par l'utilisation de ce type de cellule (hexagonale), le plus petit nombre de cellules peut couvrir une région géographique vaste.

Principe de la Planification Hexagonale

Pour réaliser une planification hexagonale, on procède de la manière suivante :

- ⇒ La superficie totale de la zone de couverture est divisée en clusters de N (N est la taille du Cluster) cellules chacun (Voir la figure (12)). Ces cellules sont modélisées par des hexagones avec une station de base située au centre de chaque cellule ;
- ⇒ Supposons qu'un opérateur dispose d'une licence sur un ensemble de S canaux ;
- ⇒ A chaque cellule i , dans un même Cluster, est attribué un sous-ensemble des fréquences S_i à partir de l'ensemble total S ;
- ⇒ Dans le même Cluster, les cellules utilisent tous les canaux fréquentiels ;
- ⇒ Les cellules voisines n'utilisent pas les mêmes fréquences (Conséquence de l'utilisation des mêmes fréquences → de graves interférences) ;
- ⇒ Chaque cellule utilise $1/N$ des canaux existants ($1/N$ est appelé facteur de réutilisation de la fréquence) ;
- ⇒ Le Cluster est reproduit sur toute la zone de couverture comme le montre la figure (12) pour des Clusters de tailles respectivement $N = 7$ et $N = 4$.

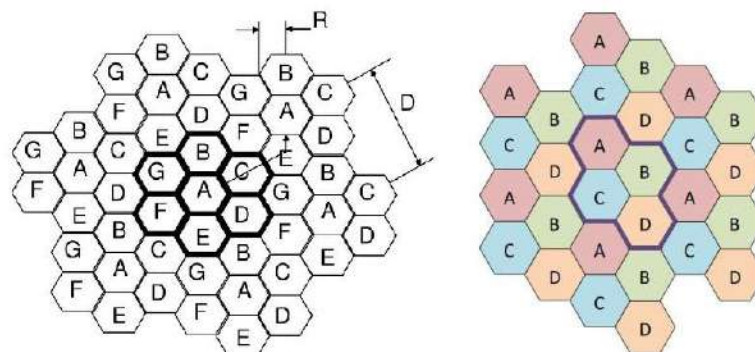


Figure.12. Planification hexagonale du réseau pour respectivement des Clusters de tailles $N = 4$ et $N = 7$.

- ⇒ A la distance D (distance de réutilisation des fréquences), une fréquence de l'ensemble S_i peut être réutilisée (Voir la figure 12). C'est-à-dire que les cellules avec une distance D à la cellule i peuvent se voir attribuer une ou toutes les fréquences de l'ensemble appartenant à la cellule i ;
- ⇒ Lors de la conception d'un réseau radio mobile, la distance D doit être choisie suffisamment grande, de sorte que l'interférence co-canal reste suffisamment faible pour ne pas affecter la qualité de la transmission ;
- ⇒ Lorsqu'une station mobile MS se déplace d'une cellule à une autre, pendant une communication en cours, un changement automatique de canal/fréquence peut se produire (Pour maintenir une connexion active) au-delà des limites de la cellule ;
- ⇒ Il existe exactement six cellules voisines qui utilisent les mêmes fréquences que la cellule i (Voir la figure (12)) ;
- ⇒ Le premier anneau de l'ensemble de fréquences contient toujours six cellules co-canal dans le système de réutilisation des fréquences indépendamment de la forme et de la taille des cellules (pas seulement dans le modèle hexagonal).

Capacité d'un réseau hexagonal

- ⇒ Le nombre de canaux dans le système (Réseau) est donné par :

$$S = mN.$$

m est le nombre de canaux dans chaque cellule ;

- ⇒ La capacité caractérise le nombre maximal de communications simultanées sur le réseau. Elle est donnée par :

$$C = \frac{A_{total}}{A_{cell}} \times m = \frac{A_{total}}{A_{cell}} \times \frac{S}{N}.$$

- ⇒ Dans cette équation, $\frac{A_{total}}{A_{cell}}$ représente le nombre de cellules dans le réseau ;
- ⇒ Dans la même équation, on montre que l'augmentation de C nécessite la réduction de la taille du Cluster N ;
- ⇒ **Problème** : Des valeurs réduites de N peuvent générer des interférences
Solution : Il faut faire un compromis.

Géométrie de l'hexagone

- ⇒ A partir de la figure (13), on peut déterminer la surface de l'hexagone comme suit :

$$Surf_{Hex} = 6 \times 2 \times \left(\frac{1}{2} \times \frac{\sqrt{3}}{2} R \times \frac{1}{2} R \right) = \frac{3\sqrt{3}}{2} R^2 \approx 2.598R^2.$$

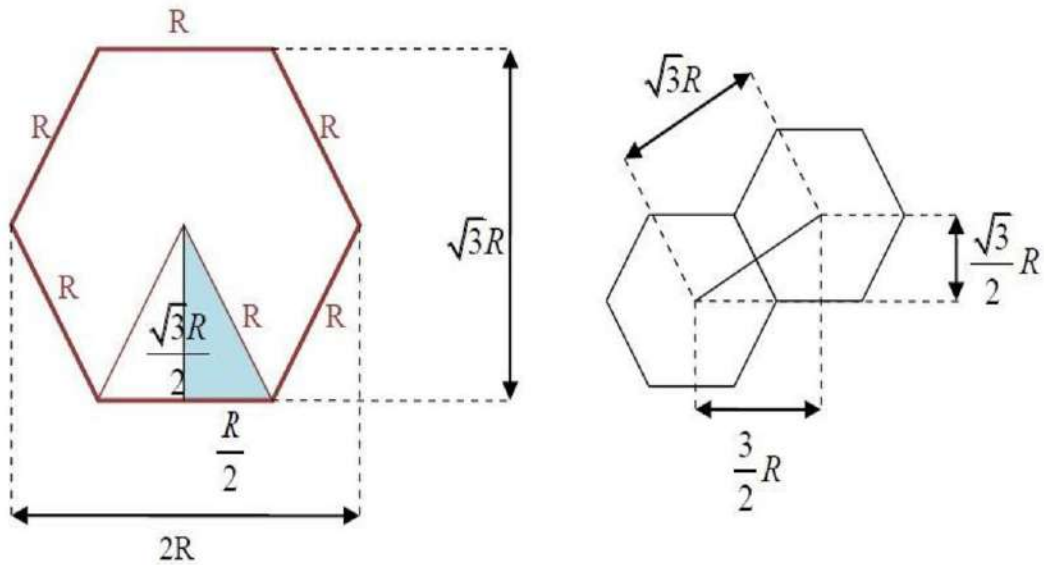


Figure.13. Caractéristique d'une cellule hexagonale

Rapport porteuse/interférence

- ⇒ Dans les systèmes cellulaires, on ne considère que les interférences, ce qui signifie que la puissance d'interférences est beaucoup plus grande que la puissance du bruit ;
- ⇒ La qualité du signal d'une connexion est mesurée en fonction de la puissance du signal utile reçu (Porteuse reçue) et de la puissance d'interférences reçues des cellules co-canal. Elle est donnée par le rapport porteuse sur interférences (*CIR* ou *C/I*) comme suit :

$$CIR = \frac{C}{I} = \frac{\text{Puissance de la porteuse utile}}{\text{Puissance d'interférences (provenant d'autres Clusters)}}$$

- ⇒ L'intensité des interférences est essentiellement fonction de la distance D de réutilisation des fréquences ;
- ⇒ Du point de vue d'une station mobile MS, les interférences sont causées par les stations de base situées à une distance D de la station de base actuelle (voir Figure 12) ;
- ⇒ Une estimation du pire cas pour le *CIR* d'une station mobile à la frontière de la zone couverte (à une distance $d = R$ de la station de base) peut être obtenue en supposant que les six émetteurs d'interférences voisins fonctionnent à la même puissance et sont à peu près à égale distance l'un de l'autre (une distance D grande devant le rayon R de la cellule). Le *CIR* est donné par :

$$CIR = \frac{P_t R^{-\gamma}}{\sum_{i=1}^6 P_t D^{-\gamma}} = \frac{1}{6} \left(\frac{R}{D} \right)^{-\gamma}.$$

Où :

γ est l'exposant d'affaiblissement ;
 P_t est la puissance transmise.

- ⇒ Ainsi, dans un environnement radio donné, le CIR dépend essentiellement du rapport $\frac{R}{D}$;
- ⇒ Pour une valeur de CIR souhaitée ou requise à un rayon de cellule donné, il faut choisir une distance minimale pour la réutilisation de fréquences au-dessus de laquelle l'interférence dans le même canal tombe en dessous du seuil requis.

Formation optimale des Clusters

Rappelons que pour chaque cluster, les éléments suivants sont valables :

- ⇒ Un cluster peut contenir toutes les fréquences du système radio mobile ;
- ⇒ Au sein d'un cluster, aucune fréquence ne peut être réutilisée. Les fréquences d'un ensemble S_i peuvent être réutilisées dans le cluster voisin ;
- ⇒ Plus le cluster est grand, plus la distance de réutilisation des fréquences est grande et plus le CIR est grand. Cependant, plus les valeurs de N sont grandes, plus le nombre de canaux et le nombre d'utilisateurs actifs supportables par cellule est petit. La géométrie des hexagones définit la relation entre la taille du cluster et la distance D de réutilisation donnée comme suit:

$$D = R\sqrt{3N}.$$

Le CIR est dans ce cas donné par:

$$CIR = \frac{1}{6} (3N)^{\frac{\gamma}{2}}.$$

- ⇒ N peut avoir certaines valeurs précises en fonction des valeurs de i et j qui sont des entiers vérifiant la relation suivante :

$$N = i^2 + j^2 + i \times j.$$

- ⇒ Pour localiser le co-canal le plus proche utilisant la même fréquence, on se déplace i cellules le long d'une chaîne d'hexagones, puis on tourne 60 degrés contre le sens d'une montre et on se déplace j cellules.

Exemple 1 : Pour $i = 3$ et $j = 2$, nous avons : $N = 19$.

Dans la figure (14), on montre le principe de la planification pour : $i = 1$ et $j = 1$ et $N = 3$.

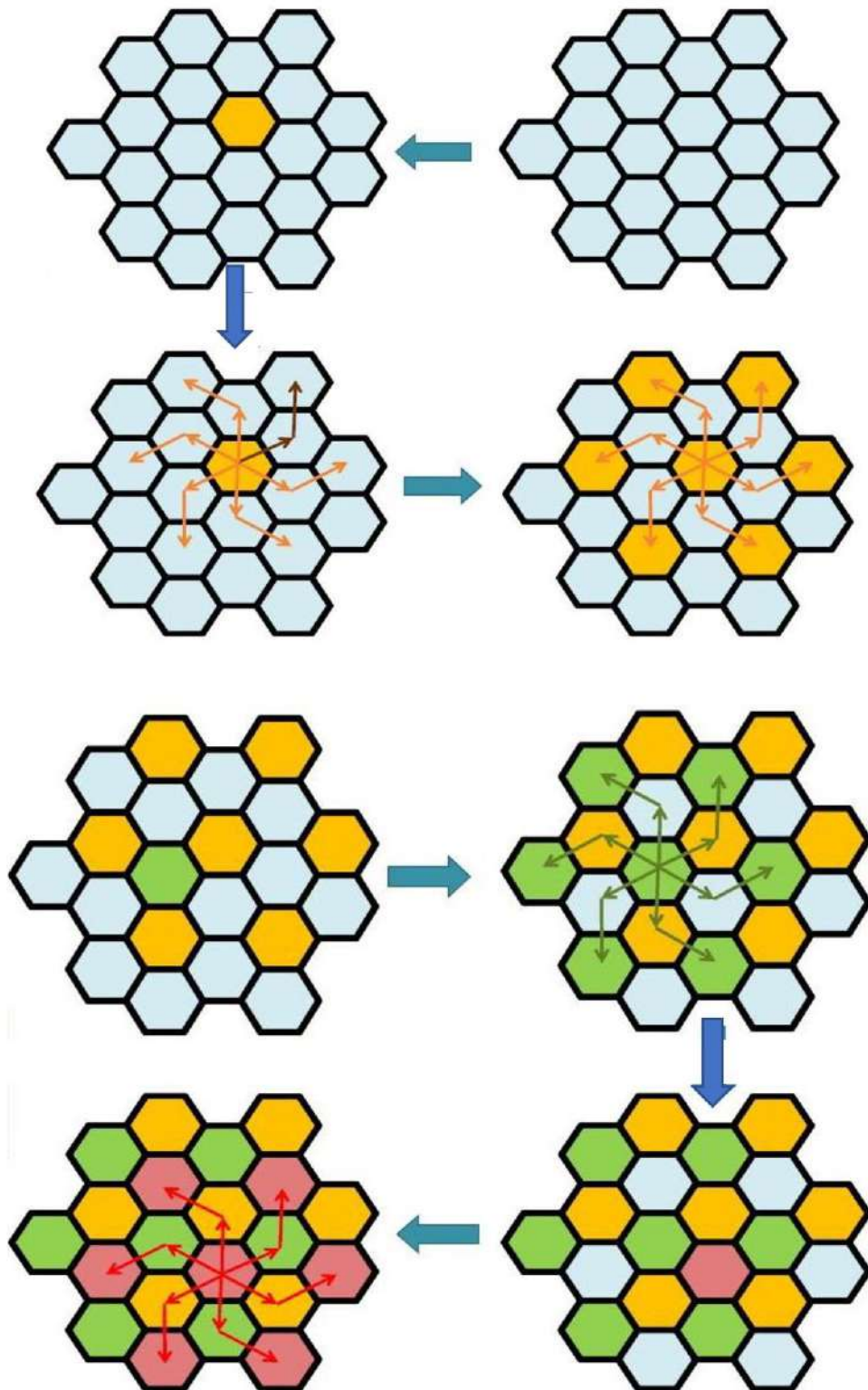


Figure.14. Placement des cellules dans un réseau

Calcul de la distance D de réutilisation de fréquence

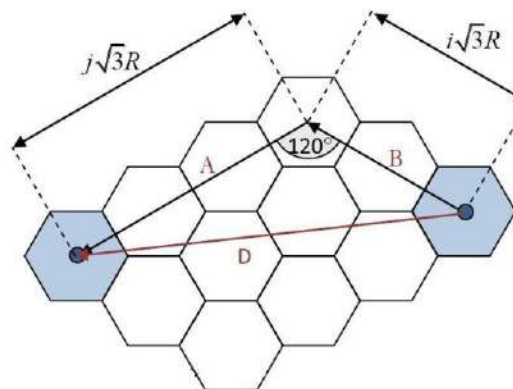


Figure.15. Calcul de la distance D

A partir de la figure (15), on peut calculer D comme suit :

$$D^2 = A^2 + B^2 - 2AB\cos(\theta). \rightarrow$$

$$D = \sqrt{(i\sqrt{3}R)^2 + (j\sqrt{3}R)^2 - 2(i\sqrt{3}R)(j\sqrt{3}R)\cos(120^\circ)}.$$

$$D = R\sqrt{i^2 + j^2 + ij} = R\sqrt{3N}.$$

Taux de réutilisation co-canal

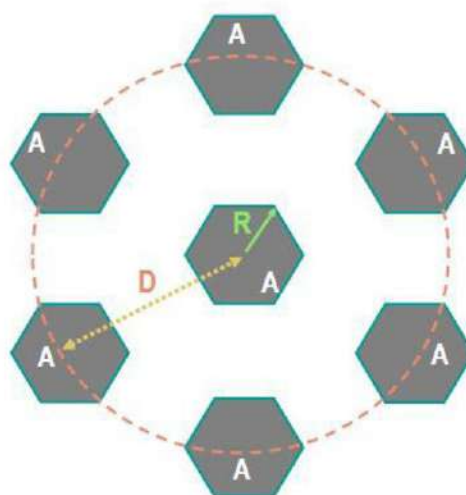


Figure.16. Taux de réutilisation du co-canal

Le Taux de réutilisation co-canal est donné par :

$$Q = \frac{D}{R} = \sqrt{3N}.$$

Intensité du Trafic

- ⇒ Dans les réseaux, chaque utilisateur se voit attribuer un canal pour effectuer son appel ;
- ⇒ A la fin de l'appel, le canal précédemment occupé est immédiatement retourné à l'ensemble de canaux disponibles ;
- ⇒ L'estimation des ressources du canal dépend de nombreux facteurs statistiques liés au trafic, tels que la durée des appels, la répartition temporelle des arrivées d'appels et d'autres paramètres statistiques ;
- ⇒ L'unité de mesure de trafic est l'Erlang (du nom d'Agner Krarup Erlang (1878-1929) qui l'a inventé) ;
- ⇒ Un (1) Erlang représente la quantité de trafic transportée par un canal totalement occupé ;
- ⇒ **Exemple** : un canal radio qui est occupée 30 minutes pendant une heure transporte 0.5 Erlang de trafic ;
- ⇒ Le GoS (pour Grade of service en anglais) mesure la capacité de l'utilisateur d'accéder à un canal partagé pendant l'heure de pointe au cours d'une semaine, un mois ou une année ;
- ⇒ Il est généralement donné comme la probabilité de blocage des appels, ou la probabilité qu'un appel connaît un retard supérieur à une certaine valeur dans une file d'attente ;
- ⇒ **Exemple** : Le système cellulaire AMPS est conçu avec un GoS égal à 2% de blocage. Dans ce cas, les cellules sont conçues pour que parmi 100 appels, 2 seront bloqués en raison de l'occupation du canal pendant l'heure de pointe.

⇒ L'intensité de trafic est donnée par :

$$A = \frac{\lambda \times H}{T} \text{ Erlang}$$

Avec :

T : le temps d'observation. Dans la majorité des cas, $T = 3600s$;

λ : Le nombre moyen de demandes d'appel par unité de temps ;

H : La durée moyenne d'un appel ;

- ⇒ Si le calcul est fait pour un seul utilisateur, on utilise A_u et λ_u ;
- ⇒ Si on a n utilisateurs alors $A = nA_u$ et $\lambda = n \times \lambda_u$;
- ⇒ Si on a m canaux, alors l'intensité de trafic par canal est A/m .
- ⇒ Cette formule signifie qu'un appel d'une durée de 3600 secondes (soit 1 heure) produit 1 Erlang de trafic ;
- ⇒ Pour différents systèmes, deux formules ont été dérivées.
- **Erlang B** (Blocked Calls Cleared System) : Si toutes les ressources sont utilisées, des appels supplémentaires sont perdus. C'est le cas des appels vocaux dans les systèmes cellulaires mobiles.
- **Erlang C** (Blocked Calls Delayed System) : Si les appels sont mis en file d'attente pendant un certain temps et seront servis séquentiellement à mesure que les ressources redeviennent libres.

Systèmes d'Erlang B

- ⇒ La formule Erlang B détermine la probabilité qu'un appel soit bloqué ;
- ⇒ Cette probabilité définit une mesure de GoS pour un système à ressources partagées qui ne prévoit aucune file d'attente pour les appels bloqués (c'est-à-dire que les appels bloqués sont instantanément perdus). La formule Erlang B utilise les hypothèses suivantes :

- Les demandes d'appel sont sans mémoire. Autrement dit, tous les utilisateurs, y compris les utilisateurs bloqués, peuvent demander un canal à tout moment. Tous les canaux gratuits sont entièrement disponibles pour les appels jusqu'à ce que tous les canaux soient occupés ;
- La loi de distribution, concernant le temps de maintien (c'est-à-dire d'utilisation) du canal, est une loi exponentielle. En d'autres termes, les appels les plus longs sont moins susceptibles de se produire en comparaison avec les appels courts ;
- Les délais entre les arrivées des demandes d'appel sont indépendants les uns des autres. Elles suivent une loi exponentielle ;
- Le nombre de canaux occupés est égal au nombre d'utilisateurs occupés.

- ⇒ Le trafic offert A (en Erlangs) est lié au taux d'arrivée des appels, λ , et au temps d'attente moyen des appels, h , par :

$$A = \lambda h.$$

- ⇒ Dans ces conditions, la quantité $\lambda h T$ est un temps de fonctionnement moyen d'un seul utilisateur pendant la période T , également appelé temps d'occupation du canal ;
- ⇒ Le rapport $\frac{\lambda h T}{T} = \lambda h = \alpha$ caractérise la charge de trafic (mesuré en Erlangs) provenant d'un seul utilisateur, $0 \leq \alpha \leq 1$.
- ⇒ La charge de trafic provenant de N utilisateurs est alors $A = N\alpha$, également appelé trafic offert : nous avons supposé que les caractéristiques statistiques de tous les appels effectués par n'importe quel utilisateur sont les mêmes ;
- ⇒ Sous toutes ces hypothèses, la probabilité que dans un système à n canaux, k canaux soient occupés est donnée par la formule :

$$P_k = \frac{\frac{A^k}{k!}}{\sum_{m=1}^n \frac{A^m}{m!}}$$

- ⇒ La probabilité que tous les n canaux soient occupés et, par conséquent, qu'un nouvel appel soit bloqué, est appelée probabilité de blocage et est donnée par la formule de blocage (Erlang B) comme suit :

$$P_k = \frac{\frac{A^n}{n!}}{\sum_{m=1}^n \frac{A^m}{m!}}$$

- ⇒ La formule Erlang B montre les relations entre la charge offerte A et la probabilité de blocage pour un nombre total n de canaux disponibles ;

⇒ Étant donné une quantité fixe de ressources, plus la probabilité de blocage acceptable est élevée, plus le trafic peut être offert.

Système d'Erlang C

⇒ Dans le système Erlang C, Les appels bloqués sont retardés ;
 ⇒ La prob qu'un appel n'aura pas l'accès au système est donnée par :

$$P[\text{Retard} > 0] = \frac{A^m}{A^m + m! \left(1 - \frac{A}{C}\right) \sum_{k=0}^{m-1} \frac{A^k}{k!}}$$

⇒ La probabilité que le retard soit supérieur à t :

$$P[\text{Retard} > t] = P[\text{Retard} > 0]P[\text{Retard} > t / \text{Retard} > 0].$$

$$P[\text{Retard} > t] = P[\text{Retard} > 0] \exp\left[-\frac{(m-A)t}{H}\right].$$

Tailles des cellules

Dans les réseaux cellulaires, c'est le manque du spectre radio qui a conduit les opérateurs à découper le territoire en zones (cellules), de taille variable selon la densité des utilisateurs. On distingue ainsi différentes tailles de cellules qui sont données comme suit :

- ✓ **Picocellule:** désigne un espace de desserte de quelques mètres de diamètres ;
- ✓ **Microcellule:** réfère à une surface géographique de quelques dizaines de mètres de diamètre ;
- ✓ **Cellule:** correspond à une superficie dont le diamètre varie de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres ;
- ✓ **Macrocellule:** correspond à une étendue géographique de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres de diamètre ;
- ✓ **Cellule parapluie:** définit une région de quelques centaines de kilomètres de diamètre.

La figure suivante montre la couverture pour chaque taille de cellules.

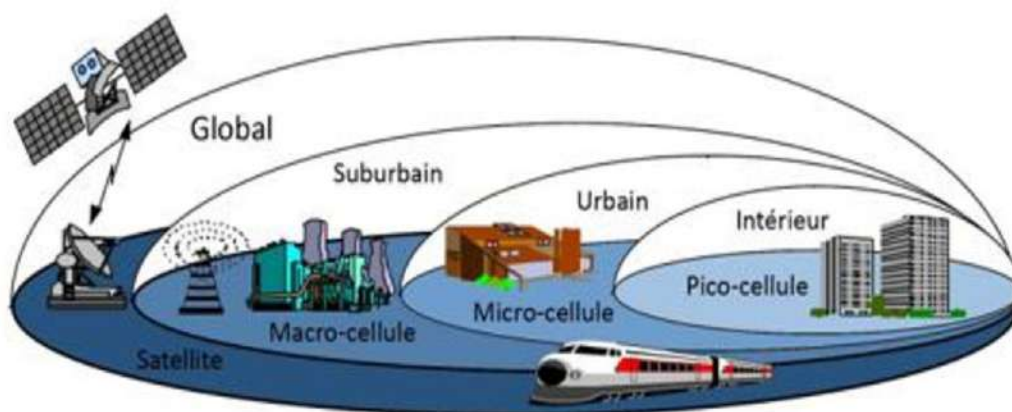


Figure 17 couverture du réseau pour chaque taille de cellules