

RAPPORT 944

PLANIFICATION EN RÉSEAU THÉORIQUE

(Question 46/10, Programme d'études 46L/10)

(1982)

1. Introduction

Les réseaux d'émetteurs de radiodiffusion doivent être planifiés de manière que la couverture nécessaire de la zone soit assurée à l'aide d'un nombre minimal de fréquences. D'un point de vue strictement technique, la zone de couverture d'un émetteur dépend de nombreux facteurs dont la puissance d'émission, le champ minimal utilisable, le rapport de protection en radiofréquence, la distance entre émetteurs du même canal ou du canal adjacent, l'espacement entre canaux, la bande passante à l'émission et d'autres facteurs influençant la propagation des ondes. Elle dépend aussi du système d'organisation des canaux.

Lorsque la planification ou la replanification doit porter sur un grand nombre de canaux pour un service de radiodiffusion sonore MA ou MF, l'expérience montre que l'utilisation exclusive de méthodes empiriques risque de rendre difficile l'exploitation efficace du spectre. C'est pourquoi on a mis au point une théorie des réseaux uniformes d'émetteurs vers la fin des années 50 et au début des années 60 [UER, 1960]. Cette méthode peut être appliquée avec succès lorsqu'il existe une certaine uniformité de normes dans le service à planifier. De plus, la bande à planifier doit faire l'objet d'un minimum de contraintes, c'est-à-dire que théoriquement on devrait être entièrement libre d'assigner n'importe quelle fréquence à n'importe quel émetteur.

Cette théorie permet de concevoir de nouveaux réseaux d'émetteurs ou de réorganiser des réseaux existants mais elle constitue aussi un instrument puissant pour la détermination des caractéristiques techniques optimales telles que l'espacement entre canaux, les caractéristiques des émetteurs, etc., ainsi que pour déterminer la meilleure couverture susceptible d'être obtenue.

La méthode décrite ci-après a déjà été utilisée pendant la Conférence de planification de Stockholm en 1961, la Conférence africaine de planification de 1963, et elle a aidé aux études préliminaires de la Conférence de radiodiffusion B.km-B.hm de Genève, 1975.

2. Théorie des réseaux réguliers

On notera qu'on ne considère dans ce paragraphe que des réseaux purement théoriques, ce qui signifie que:

- tous les émetteurs sont identiques: mêmes puissance rayonnée et hauteur d'antenne;
- toutes leurs antennes sont équidirectives dans le plan horizontal et ont le même diagramme vertical;
- la propagation est isotrope et indépendante de la fréquence, au moins dans la bande à planifier;
- on suppose que, du point de vue du calcul des distances, la zone de planification est plate, que la population est uniformément répartie à sa surface et qu'il n'y a de frontières ni politiques, ni naturelles.

Dans ces conditions et en supposant les brouillages négligeables, la zone de couverture, c'est-à-dire la région où un récepteur grand public normal permet une bonne réception, est limitée par le contour à l'intérieur duquel le champ électromagnétique de l'émetteur est supérieur ou égal à la valeur nécessaire pour obtenir un rapport signal/bruit choisi. Dans la situation idéale qui vient d'être décrite, ce contour est circulaire et son rayon dépend du type de service et des lois de propagation valables dans la bande de fréquences considérée. Si on veut recouvrir totalement la zone de planification à l'aide de semblables zones de couverture circulaires, il est bien évident que c'est en situant les émetteurs aux nœuds d'un réseau de triangles équilatéraux qu'on réduira leur nombre au minimum (voir Fig. 1). On notera bien qu'il n'y a pas un émetteur par triangle mais un émetteur pour chaque paire de triangles formant un losange (surface ombrée sur la Fig. 1). C'est une remarque à ne pas perdre de vue quand on calcule l'efficacité d'un réseau.

Avec une telle structure, tout point de la zone de planification est desservi par au moins un émetteur et le recouvrement des zones de couverture est aussi faible que possible. Par la suite, nous prendrons comme unité de longueur le côté du triangle équilatéral élémentaire. Le nombre d'émetteurs par unité de surface est alors égal à un par losange élémentaire dont la surface est égale à $\sqrt{3}/2$. L'efficacité du réseau s'exprime par le rapport de la surface totale où le service est de bonne qualité (la zone du losange élémentaire) à la somme des zones de couverture (qui empiètent les unes sur les autres). La valeur la plus élevée s'obtient avec un réseau régulier de triangles équilatéraux; elle est égale à 0,83 (chaque émetteur a une zone de couverture de $\pi/3$ dont le rayon est $\sqrt{3}/3$). La valeur 1, qui serait évidemment l'idéale, n'est pas accessible car il n'est pas possible de couvrir une surface à l'aide de cercles sans chevauchement. Avec un réseau régulier de carrés (ou de triangles rectangles isocèles), le rapport n'est égal qu'à 0,64 (chaque émetteur a une zone de couverture de $\pi/2$ dont le rayon est $\sqrt{2}/2$

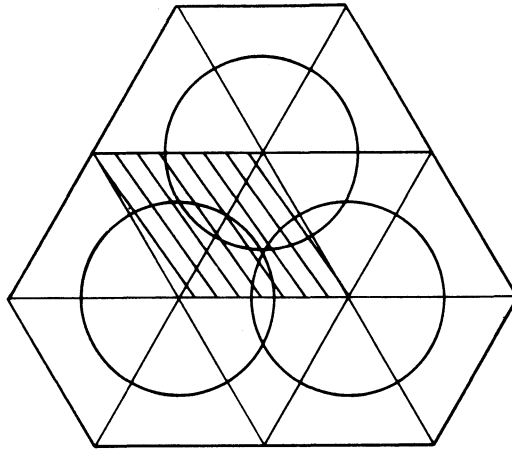


FIGURE 1 – *Emplacements et zones de couverture d'émetteurs de radiodiffusion identiques répartis selon un réseau régulier*

Il y a lieu de noter que les réseaux d'émetteurs actuels ne sont pas réguliers sur le plan géométrique et que leurs caractéristiques techniques ne correspondent pas à celles du réseau théorique. Si l'on s'écarte de la régularité géométrique, de la puissance et de la hauteur d'antenne du réseau théorique, on obtiendra inévitablement une moindre efficacité du réseau. Les résultats d'études concernant des réseaux théoriques permettent néanmoins d'avoir une idée assez précise du rapport entre ces facteurs et l'efficacité du réseau.

3. Exemple de réseau théorique

On suppose tout d'abord que la bande de fréquences disponible a été divisée de façon appropriée en canaux suffisamment larges pour pouvoir loger un programme sonore ou télévisuel et qu'ils ont été espacés de telle sorte [9 kHz pour la radiodiffusion sonore MA, 100 ou 200 kHz pour la radiodiffusion à modulation de fréquence, 6 ou 8 MHz pour la télévision (200 kHz et 6 MHz correspondent aux canaux américains)] que le brouillage dans le même canal prédomine sur le brouillage par le canal adjacent.

On obtient alors aisément, à partir de cet espacement entre canaux, le nombre des canaux à planifier. Ce nombre étant évidemment fini, il faudra inévitablement, à une plus ou moins grande distance du point de départ des assignations, répéter le premier canal qui a été attribué. Le nombre de canaux nécessaires pour couvrir toute la zone de planification est d'autant plus faible que la distance D , suffisante pour qu'aucun brouillage n'apparaisse entre deux émetteurs dans le même canal, est plus courte.

Il n'est pas difficile d'évaluer D . Grâce aux courbes de propagation appropriées, on calcule les champs de l'émetteur utile et de l'émetteur brouilleur tout au long du cercle qui limite la zone de couverture de chaque émetteur, comme défini au § 2, pour certains pourcentages du temps (voir les Recommandations 368 et 370). La longueur de D sera choisie suffisante pour que la différence entre ces deux champs, exprimée en décibels, soit supérieure au rapport de protection correspondant qui figure dans les Recommandations 560, 412 et 418 et dans le Rapport 306. Le cas des brouillages multiples sera examiné ci-après.

Avec N canaux, on parvient à recouvrir N losanges élémentaires, c'est-à-dire une surface égale à $N\sqrt{3}/2$, en prenant pour unité de surface l'aire d'un carré dont le côté est égal à celui d'un triangle élémentaire. Un nouveau type de couverture apparaît, à l'aide de losanges comprenant N losanges élémentaires et il n'y a aucune raison alors de douter de la conclusion à laquelle on a abouti au § 2: un canal donné sera répété à chacun des nœuds d'un réseau de losanges dont la plus courte diagonale est égale aux côtés et dont la surface est égale à $N\sqrt{3}/2$. On appellera ce losange «losange co-canal»; la longueur D de ses côtés est \sqrt{N} (soit \sqrt{N} fois le côté du triangle élémentaire). On va présenter les propriétés des réseaux de losanges à l'aide d'un exemple simple où $N = 13$ (voir Fig. 2).

- *Période*: tous les losanges co-canal sont identiques. Il apparaît une périodicité à 2 dimensions qui n'est pas sans rappeler celle des fonctions elliptiques.
- *Répartition des canaux*: à l'intérieur d'un losange co-canal, il serait possible de disposer les canaux de façon aléatoire pourvu qu'ils se trouvent dans chaque losange à des nœuds homologues. Toutefois, une telle répartition aléatoire ne convient pas s'il faut, ce qui est le cas le plus fréquent, prendre en considération d'autres brouillages que le brouillage dans le même canal. Etant donné qu'on peut estimer qu'un réseau homogène aboutira à l'utilisation la plus efficace des fréquences, il faut que, sur n'importe quel canal, les signaux brouilleurs aient le même niveau, où que soit situé l'émetteur.

Si donc, compte tenu du rapport de protection entre émetteurs sur des canaux adjacents (on les appellera émetteurs 1-canal); de même pour des écarts de 2 canaux: 2-canal, etc.), on a placé le canal 1 à un nœud qui se trouve à une distance suffisante du canal 0, on définit pour le canal 1 un losange co-canal décalé par rapport au losange co-canal du canal 0, du vecteur $\vec{01}$. Selon l'exigence d'homogénéité énoncée ci-dessus, le canal 2 sera placé en un nœud tel que $\vec{12} = \vec{01}$ et ainsi de suite pour les autres canaux, le canal N retombant sur le canal 0. Si on considère le réseau à 13 canaux de la Fig. 2, on se rend compte que quelqu'un qui se déplacerait selon les droites du réseau élémentaire trouverait des numéros de canal en progression arithmétique, modulo 13. Partant du canal 0 et marchant vers l'ouest, il trouverait les canaux: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 0, etc. Il est donc très facile de définir tout le réseau à partir du pas de progression dans deux directions distinctes: +2 en allant vers la gauche, +5 en allant vers le coin supérieur droit.

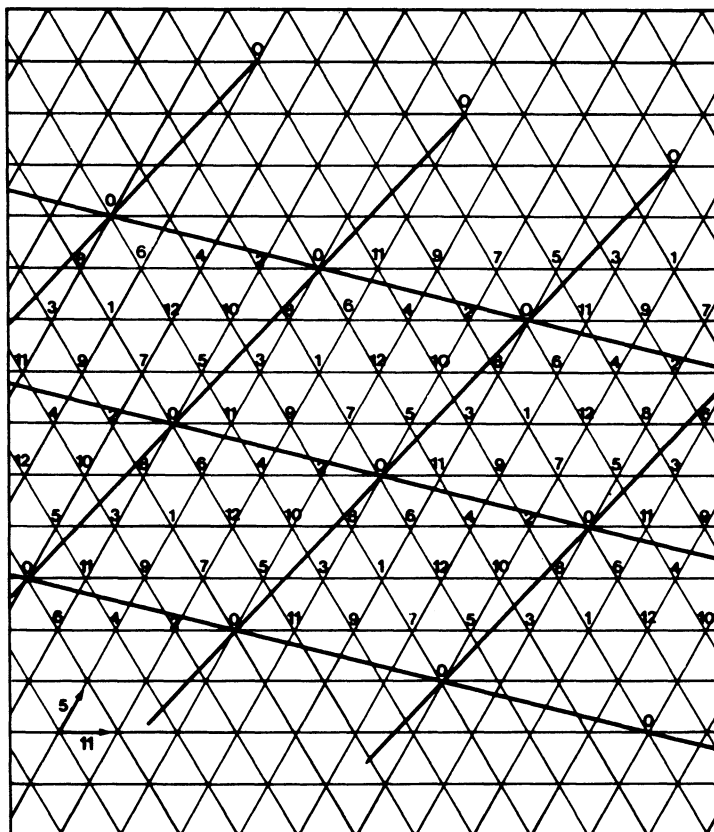


FIGURE 2 - Exemple de réseau régulier à 13 canaux

4. Réseaux idéaux et non idéaux

Pour simplifier les calculs, il est commode de rapporter le plan à deux axes normés mais formant entre eux un angle de 60° au lieu de 90° , comme d'habitude (voir Fig. 3).

On sait déjà que le côté du losange co-canal a pour longueur \sqrt{N} mais il faut aussi que les sommets du losange coïncident avec les intersections du réseau élémentaire. Dans le système de coordonnées obliques, la distance d'un point de coordonnées x, y à l'origine est égale à:

$$(x^2 + xy + y^2)^{1/2}*$$

S'il existe deux nombres entiers a et b tels que $a^2 + ab + b^2 = N$ (nombre de canaux), il existe un losange co-canal dont les sommets coïncident avec les intersections du réseau élémentaire. $N = 13$ correspond au cas où $a = 3$ et $b = 1$. Dans ce qui suit, de tels nombres seront appelés «nombres losanges». On en trouvera quelques-uns sur la Fig. 4.

* Toutes les distances dans cette section sont calculées sur la base de cette formule et exprimées en multiples des unités égales à la longueur d'un côté d'un triangle élémentaire.

Le choix de a et b est soumis à d'autres restrictions: il faut qu'ils soient premiers entre eux et avec N , et nuls ni l'un, ni l'autre. Si, par exemple, ils étaient tous pairs, seuls apparaîtraient les canaux d'ordre pair. L'autre restriction sera envisagée ci-après. La théorie s'applique d'ailleurs si N n'est pas un nombre losange. On n'a plus alors affaire à un losange co-canal mais à un parallélogramme co-canal, de surface N . Le parallélogramme a évidemment des côtés inégaux et l'un d'eux est donc inférieur à \sqrt{N} ; cette distance co-canal est donc légèrement plus courte que pour le losange.

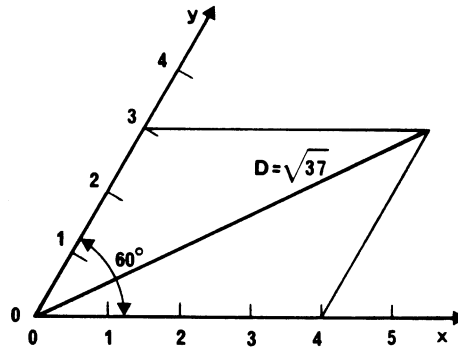


FIGURE 3 - Système de coordonnées pour un réseau régulier

a \ b	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	3	7	13	21	31	43	57	73	91	111	133	157
2			19		39		67		103		147	
3				37	49		79	97		139		
4					61		93		133			
5						91	109	129	151			
6							127					

FIGURE 4 - Table des nombres losanges

Le réseau de la Fig. 5 comprend 26 canaux, 26 n'étant pas un nombre losange. Cependant, dans ce cas particulier, on observe que la plus courte des distances co-canal est le petit côté du parallélogramme dont la longueur est égale à 4,358. Ce nombre n'est pas très inférieur à la distance $\sqrt{N} = 5,099$ qu'on aurait obtenue si 26 avait été un nombre losange. Les longueurs des autres distances co-canal (tel que le grand côté du parallélogramme ou sa petite diagonale) sont 5,291 et 6,082, respectivement. Le nombre losange suivant est 31 pour lequel la Fig. 6 donne un exemple de réseau.

La Fig. 7 présente un réseau de 120 canaux, 120 n'étant pas un nombre losange. Toutefois, dans ce cas particulier, on constate que la plus courte des distances dans le même canal est la diagonale dont la longueur est égale à 10,58. Celles des côtés sont de 11,53 et 10,82, respectivement. Aucun de ces nombres ne s'écarte de la distance $\sqrt{N} = 10,95$ qu'on aurait obtenue si 120 avait été un nombre losange. Il se peut que ce réseau ne soit pas optimal pour la planification à ondes métriques.

Les trois possibilités suivantes s'offrent dans le cas où N n'est pas un nombre losange:

- ne pas tenir compte de cette valeur N et déterminer le nombre losange le plus proche qui puisse la remplacer (par exemple 111; voir Fig. 4);
- examiner la grille régulière qui en résulte, bien qu'elle se compose de parallélogrammes co-canal;
- déformer la grille de façon que les parallélogrammes co-canal deviennent des losanges. Dans ce cas, les losanges élémentaires se transformeront en parallélogrammes et l'efficacité du réseau diminuera. Cette diminution sera faible si N est assez important.

Le meilleur choix parmi ces trois possibilités dépend des circonstances dont il faut tenir compte.

Il n'est pas toujours facile de trouver les pas de progression avec lesquels le canal assigné à l'origine du réseau réapparaît bien aux sommets du losange ou parallélogramme co-canal. En rapportant la Fig. 2 au système de coordonnées de la Fig. 3, on trouve que le pas p dans l'axe x et le pas q dans l'axe y doivent vérifier les équations suivantes:

$$1 \cdot p + 3 \cdot q = kN \quad \text{et} \quad 4 \cdot p - 1 \cdot q = k'N$$

où k et k' sont des nombres entiers.

Sur la Fig. 2, $p = 11$, $q = 5$, $k = 2$ et $k' = 3$, pour $N = 13$. On y a indiqué les pas. Avec les nombres non losange, il y a plus d'un parallélogramme et on ne trouve le meilleur que par tâtonnement [Arnaud, 1962]. Même avec les nombres losange, il existe parfois plus d'un losange co-canal, ce qui est le cas pour $N = 91$ (voir Fig. 4 pour les couples 9 et 1 ou 6 et 5).

Si l'un ou l'autre des nombres a et b est nul, le résultat n'a pas d'intérêt. Si, par exemple, $b = 0$, les côtés du losange co-canal sont portés par les axes x et y et $a = \sqrt{N}$. Comme la somme des pas le long des axes doit être égale à N d'un sommet à l'autre, leur valeur est un multiple de \sqrt{N} et seuls les canaux aux numéros multiples aussi de \sqrt{N} se placent sur la grille.

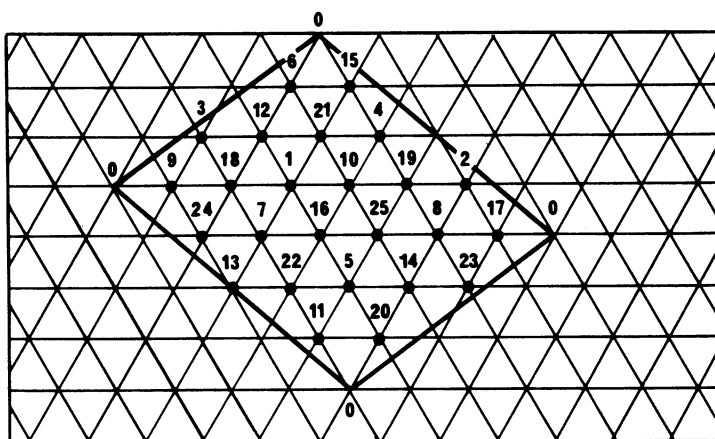


FIGURE 5 - Réseau à 26 canaux

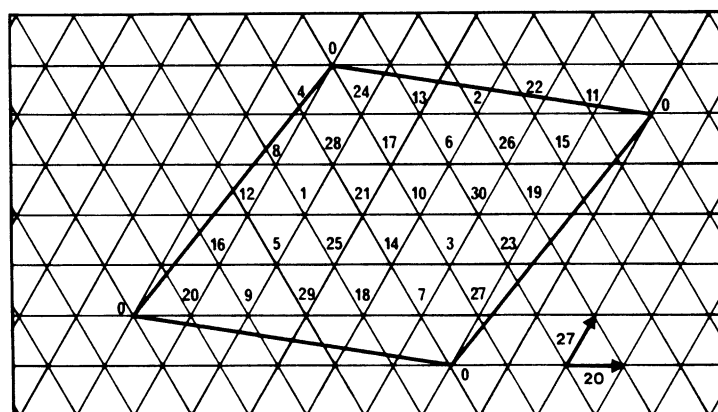


FIGURE 6 - Exemple de réseau régulier optimal à 31 canaux

5. Calcul des brouillages

5.1 Brouillage dans le même canal

Au § 3, on a expliqué comment on calculait le nombre minimal de canaux nécessaires à partir des rapports de protection et des courbes de propagation mais en ne tenant compte que d'un seul émetteur brouilleur. La Fig. 8 représente un certain nombre de losanges co-canal de côté D ; l'émetteur utile se trouve au centre et les 18 qui l'entourent sont des émetteurs brouilleurs. En radiodiffusion en ondes métriques et décimétriques, la zone de couverture est évaluée à l'aide des courbes de propagation de la Recommandation 370 donnant le champ dépassé pendant 50% ou 1% du temps (pour l'émetteur utile ou brouilleur, respectivement), en tenant strictement compte des caractéristiques de l'émetteur (p.a.r., hauteur de l'antenne, fréquence) et du champ minimal utilisable (voir la

Recommandation 412). On a trouvé au § 2 que le rayon de la zone de couverture était égal à $\sqrt{3}/3$ fois le côté du losange élémentaire. La dimension de la maille est donc connue. Les six premiers émetteurs brouilleurs se trouvent à la distance $D = \sqrt{N}$ et, en première approximation, on admettra que D est assez grand pour que le champ brouilleur soit à peu près le même à l'emplacement de l'émetteur brouillé et à la limite de sa zone de couverture. Dans une étude plus précise, il faudrait calculer le rapport signal utile/signal brouilleur en limite de zone, au moins aux six points repérés à l'aide des chiffres romains I à VI sur la Fig. 8.

Il faut que D soit assez grande pour que la différence (en décibels) champ utile dépassé pendant 50% du temps, moins champs brouilleurs combinés dépassés pendant 1% du temps, soit supérieure ou égale au rapport de protection dans le même canal. On s'assurera ensuite que les douze émetteurs situés sur le second hexagone (voir Fig. 8) n'ont aucune influence, ce qui est généralement le cas, sauf si D est très faible.

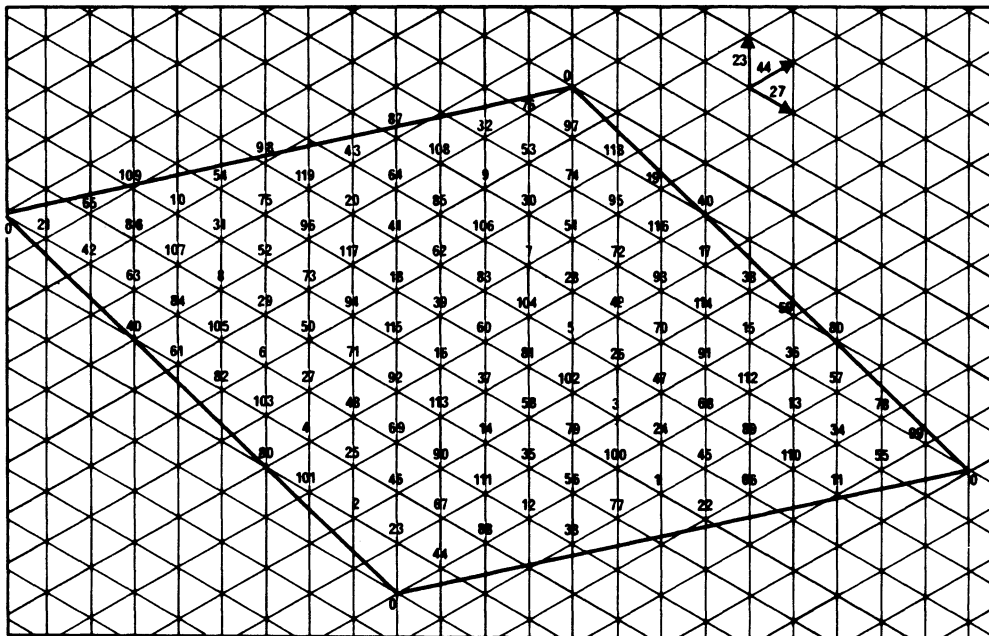


FIGURE 7 - Réseau à 120 canaux

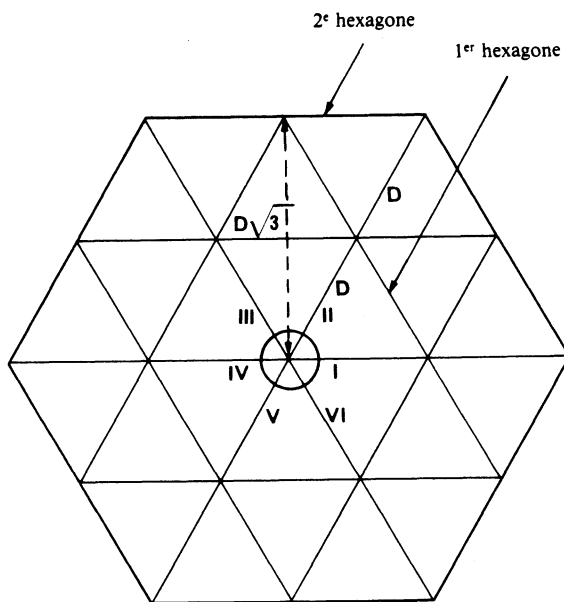


FIGURE 8 - Emplacements des émetteurs co-canal

5.2 Brouillage par le canal adjacent

On se reportera, à titre d'exemple, au réseau de la Fig. 2. Supposons donc qu'on ait trouvé $D = \sqrt{13}$. Comme le réseau est régulier, on peut étudier n'importe lequel des canaux. Considérons, par exemple, le canal 7. Les canaux adjacents se situent aux distances 2 et $\sqrt{3}$. Il y a 4 émetteurs brouilleurs principaux sur les canaux adjacents. Comme pour le brouillage dans le même canal, on étudiera d'abord la situation à l'emplacement même de l'émetteur et, ensuite, si on obtient un rapport signal utile/signal brouilleur qui n'est que légèrement différent du rapport de protection, aux points les plus critiques situés à la limite de la zone de couverture. Les autres émetteurs du canal adjacent sont nettement plus lointains. Leurs distances sont $\sqrt{7}$, $\sqrt{12}$, $\sqrt{13}$, etc.

Dans tout losange co-canal, il y a au moins deux émetteurs sur des canaux adjacents $C + 1$ et $C - 1$ susceptibles de brouiller l'émetteur du canal C . Le réseau sera d'autant meilleur que ces émetteurs $C + 1$ et $C - 1$ seront loin des sommets du losange co-canal C ; les positions idéales seront les centres de gravité des deux triangles équilatéraux qui forment le losange. Si donc l'émetteur $C + 1$ se trouvait exactement à un de ces centres de gravité, $C + 2$ serait situé exactement à l'autre, et $C + 3$ coïnciderait avec C , ce qui est absurde. Cette particularité apparaîtrait avec le réseau à $N = 21$ canaux. Si la coïncidence d'un nœud du réseau avec un des centres de gravité ne se produit qu'approximativement, le canal $C + 2$ sera deux fois plus loin du centre de gravité du triangle. Le canal $C + 3$ restera cependant assez proche du canal C , ce qui est un inconvénient en radiodiffusion sonore en modulation de fréquence, car cela correspond à un espacement entre porteuses de 300 kHz (dans certaines parties de l'Europe) pour lequel le rapport de protection n'est que faiblement négatif (-7 dB).

5.3 Brouillage multiple

Tant en théorie qu'en pratique, il faut tenir compte de plus d'un émetteur brouilleur. A l'emplacement de l'émetteur utile dans le réseau de la Fig. 2, il y a 6 émetteurs brouilleurs dans le même canal avec une intensité pratiquement identique auxquels s'ajoutent 4 émetteurs brouilleurs dans le canal adjacent. On ne doit pas oublier qu'il faut aussi tenir compte d'émetteurs à au moins 2 et 3 canaux. Dans la pratique, il s'est révélé intéressant de calculer par ordinateur le champ utile, en se basant au moins sur les 16 brouilleurs qui présentent le plus grand risque de brouillage. Il n'entre cependant pas dans le cadre de cette description d'une méthode de planification, de préconiser l'une ou l'autre méthode de calcul par ordinateur des effets du brouillage multiple.

6. Contraintes de planification

Lors de la planification d'un service particulier, il faut garder à l'esprit un certain nombre de contraintes qui, pour la plupart, résultent de la conception du récepteur. On distinguera ici les contraintes internes et les contraintes externes. Ces contraintes et leurs mécanismes de formation sont décrits dans le Rapport 946.

7. Utilisation des réseaux théoriques

Ces réseaux peuvent s'avérer utiles pour choisir au mieux, en vue de la planification, les caractéristiques des émetteurs [Sauvet-Goichon, 1980], les caractéristiques de modulation et l'écartement entre canaux. Il y a de fortes chances que la solution qui se révèle la meilleure pour un réseau théorique le soit également pour un réseau réel. En tout état de cause, elle se prêtera mieux à un traitement informatique.

7.1 Réseau simple

La bande disponible, de 16 MHz de large, est divisée en 159 canaux. Le plus grand nombre losange inférieur à 159 est 157 (12 et 1; voir Fig. 4). Il reste donc deux canaux non utilisés qui pourront éventuellement remplacer ceux qu'interdiraient des incompatibilités locales (voir § 6) ou combler des lacunes apparaissant dans des régions montagneuses ou au voisinage des frontières. En fait, à partir de chaque centre d'émission sont diffusés plusieurs programmes; à cette fin, plusieurs assignations voisines seront amenées au même point. Les Fig. 9 et 10 présentent deux exemples de tels groupements: les assignations que le réseau théorique attribue aux angles des zones ombrées seront concentrées en un seul point. Il faudra s'assurer qu'il n'en résulte pas une augmentation inadmissible des brouillages.

La Fig. 11 indique comment est constitué un réseau à 157 canaux. L'Annexe I explique comment on y est arrivé. Le Plan de Stockholm 1961 pour la télévision en ondes décimétriques est fondé sur le groupement C , $C + 3$, $C + 6$.

7.2 Réseaux multiples

Lorsque les canaux sont très nombreux (plus d'une cinquantaine) et si, comme c'est l'usage, chaque centre comprend plusieurs émetteurs, il est possible de diviser la bande disponible totale en sous-bandes, chacune d'entre elles contenant le même nombre de canaux et étant éventuellement réservée à un programme distinct. On notera que les canaux du Plan africain ont un espacement de 86 kHz. Il y a alors dans 16 MHz 185 canaux, soit 6 réseaux à 31 canaux ou 5 réseaux à 37 canaux (37 est un nombre losange).

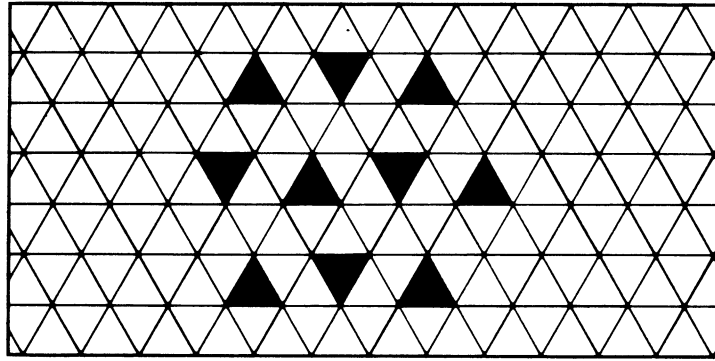


FIGURE 9 – Groupement de canaux voisins

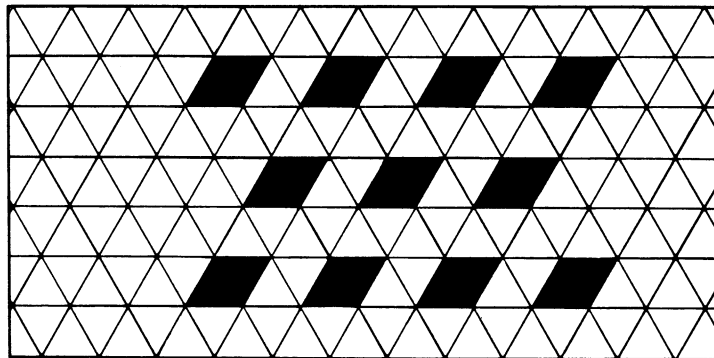


FIGURE 10 – Groupement de canaux voisins

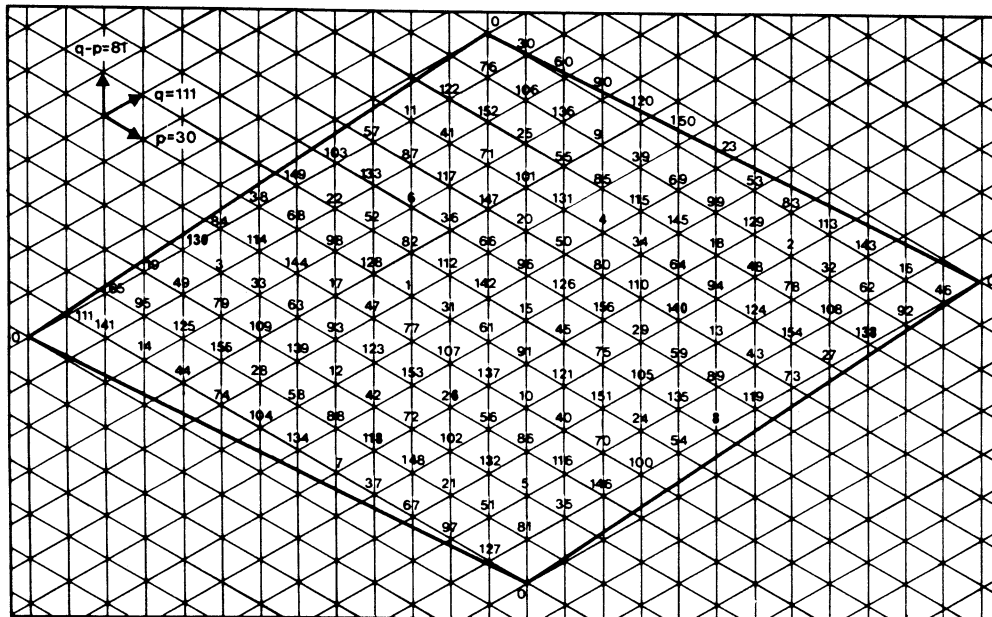


FIGURE 11 – Exemple de réseau régulier optimal à 157 canaux

8. Nombre de canaux nécessaires pour assurer une couverture de zone complète avec un programme de radiodiffusion sonore en ondes métriques

8.1 *Considérations générales*

En se fondant sur la méthode décrite plus haut, on a évalué le nombre de canaux nécessaires pour la diffusion d'un programme radiophonique en ondes métriques avec une couverture complète.

Les études sont effectuées pour différentes distances moyennes entre les émetteurs, pour deux hauteurs d'antenne (300 et 600 m), pour deux facteurs de couverture (90% et 100%) et pour une puissance apparente rayonnée de 100 kW. On a pris en considération les services monophoniques et stéréophoniques. Les brouillages ont été calculés par la méthode de multiplication simplifiée (voir le Rapport 945).

Cette méthode a déjà été utilisée au cours des conférences suivantes:

- Conférence européenne de radiodiffusion sur ondes métriques et décimétriques, Stockholm, 1961;
- Conférence africaine de radiodiffusion sur ondes métriques et décimétriques, Genève, 1963.

8.2 *Calculs*

8.2.1 *Hypothèses de base*

Les recherches sont fondées sur des réseaux idéalisés avec un treillis régulier d'émetteurs, une répartition linéaire des canaux et des triangles équilatéraux dans le même canal. Les triangles dits élémentaires qui sont formés par 3 émetteurs voisins ne sont pas dans ce cas équilatéraux en général, ils le sont seulement pour un certain nombre de canaux [UER, 1960].

Les calculs sont fondés sur les conditions suivantes:

- Champ $E(50, 50)$ (Recommandation 370);
- Champ $E(50, 1)$ (Recommandation 370);
- Rapports de protection (Recommandation 412);
- Variation locale du champ: 8,3 dB;
- Antenne de réception
 - monophonie : équidirective
 - stéréophonie : directive avec un rapport avant/arrière de 12 dB;
- Champ minimal utilisable (Recommandation 412)
 - monophonie : 48 dB(μ V/m)
 - stéréophonie : 54 dB(μ V/m);
- Espacement des canaux: 100 kHz.

8.2.2 *Calcul du champ utilisable*

8.2.2.1 *Méthode de calcul*

Le calcul de ces brouillages a été effectué à l'aide de la méthode de multiplication simplifiée.

L'expérience acquise dans certains pays a montré que la couverture pratique réelle concorde, en moyenne, de façon acceptable avec les résultats obtenus à l'aide de la méthode de multiplication simplifiée. Dans les paragraphes qui suivent, on n'a utilisé que cette dernière méthode pour déterminer le nombre de canaux requis.

8.2.2.2 *Nombre d'émetteurs brouilleurs*

Pour le calcul des brouillages dans le treillis théorique, on a tenu compte des 18 émetteurs brouilleurs les plus puissants dans le même canal et des 40 émetteurs brouilleurs les plus puissants dans les canaux adjacents, avec des espacements de fréquence allant jusqu'à 400 kHz. (Le nombre relativement important d'émetteurs brouilleurs dans les canaux adjacents n'est applicable qu'avec de petits espacements entre les canaux.)

8.2.3 *Variation des paramètres*

La distance moyenne entre les émetteurs varie entre 40 et 120 km, par échelons de 10 km. On a choisi pour l'antenne de l'émetteur une hauteur équivalente de 300 m et de 600 m, ce qui correspond à la hauteur moyenne des antennes dans de nombreux pays européens. La puissance apparente rayonnée a été fixée à 100 kW, pour s'assurer que le brouillage, et non le bruit, limite la zone de couverture. Cette condition garantissant une utilisation efficace du spectre (voir le Rapport 414 (Kyoto, 1978)). Cependant, pour de petites distances entre émetteurs, une puissance beaucoup moins importante assurerait le même pourcentage de couverture avec le même nombre de canaux.

8.2.4 *Résultats*

Les Fig. 12 à 15 indiquent le nombre de canaux nécessaires dans un réseau théorique, pour différentes conditions. Pour un service monophonique avec une antenne de réception équidirective et pour un service stéréophonique avec une antenne de réception directive (rapport avant/arrière de 12 dB), le nombre de canaux nécessaires est presque le même.



Dans un réseau théorique idéalisé, fondé sur les hypothèses précédentes, avec une hauteur équivalente de 300 m pour l'antenne de l'émetteur, une puissance apparente rayonnée de 100 kW et une distance moyenne entre émetteurs supérieure à 70 km :

- il faut environ 25 canaux pour une couverture de 90% (Fig. 12);
- il faut environ 31 canaux pour une couverture de 100% (Fig. 13).

Les Fig. 5 et 6 montrent des exemples de répartition des canaux pour des nombres correspondants de canaux.

Le nombre de canaux nécessaires pour un programme dans un réseau théorique ne constitue qu'une approximation du nombre de canaux nécessaires dans un réseau réel. Moins le réseau réel examiné est uniforme, plus il faudra de canaux supplémentaires. Comme l'a montré l'expérience acquise avec les réseaux existants dans la gamme 87,5 à 100 MHz en Europe continentale, il est possible de transmettre jusqu'à 4 programmes dans cette gamme.

D'après les résultats de l'étude théorique et les données de l'expérience pratique, on peut admettre que, pour la totalité de la gamme 87,5 à 108 MHz, on devrait pouvoir obtenir :

- une couverture de 90% avec environ 7 programmes;
- une couverture de 100% avec environ 6 programmes.

Dans les réseaux réels, il convient de régler la puissance et la hauteur équivalente de l'antenne de n'importe quel émetteur à la valeur la plus petite possible qui permet d'obtenir la couverture recherchée.

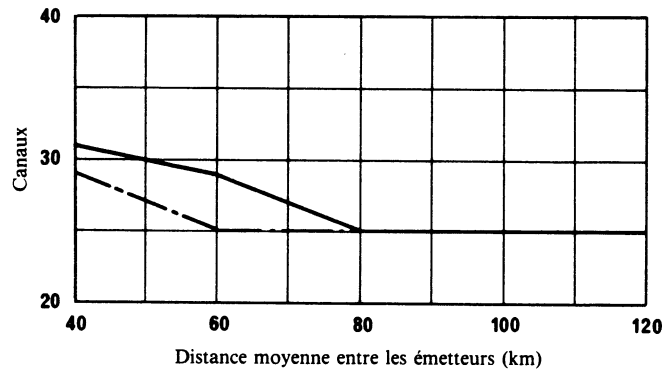


FIGURE 12 - Nombre de canaux nécessaires dans un réseau théorique pour une couverture de 90 % et une hauteur de l'antenne de 300 m

--- : monophonie (gain d'antenne 0 dB)
 — : stéréophonie (rapport avant/arrière de l'antenne 12 dB)

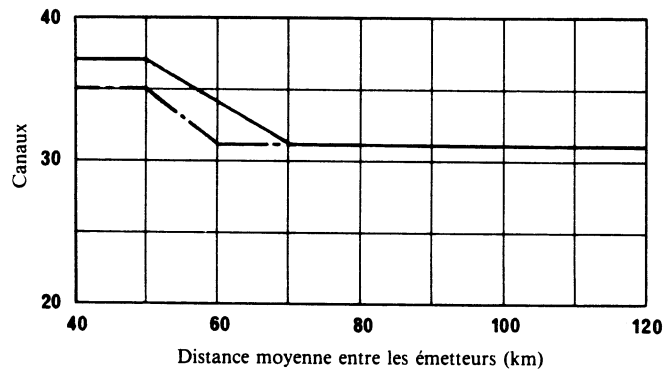


FIGURE 13 - Nombre de canaux nécessaires dans un réseau théorique pour une couverture de 100 % et une hauteur de l'antenne de 300 m

--- : monophonie (gain d'antenne 0 dB)
 — : stéréophonie (rapport avant/arrière de l'antenne 12 dB)

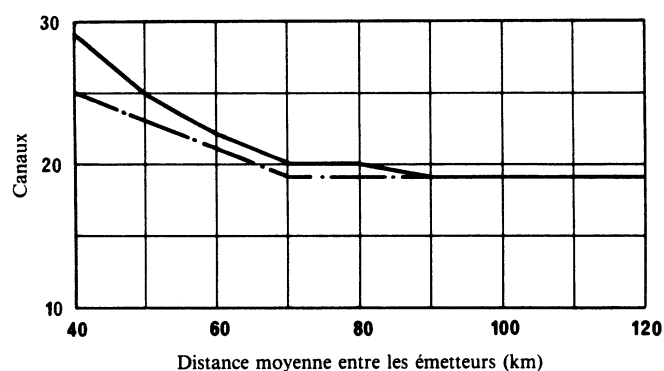


FIGURE 14 – Nombre de canaux nécessaires dans un réseau théorique pour une couverture de 90 % et une hauteur de l'antenne de 600 m

— — — : monophonie (gain d'antenne 0 dB)
 — — — : stéréophonie (rapport avant/arrière de l'antenne 12 dB)

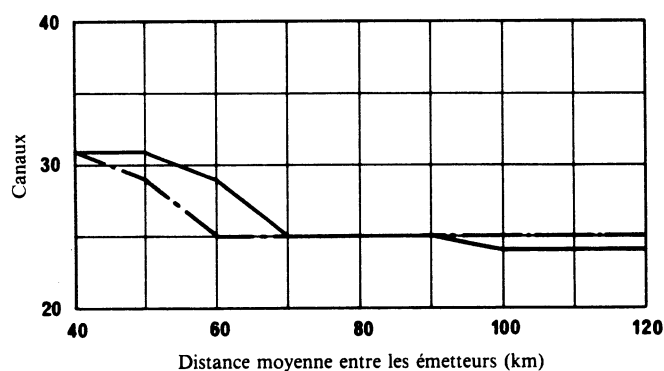


FIGURE 15 – Nombre de canaux nécessaires dans un réseau théorique pour une couverture de 100 % et une hauteur de l'antenne de 600 m

— — — : monophonie (gain d'antenne 0 dB)
 — — — : stéréophonie (rapport avant/arrière de l'antenne 12 dB)

9. Conclusions

Avec un grand nombre de canaux, il semble difficile d'obtenir une utilisation optimale du spectre par des moyens purement empiriques. La théorie des réseaux réguliers paraît être un instrument efficace pour parvenir à un optimum. De plus, dans une région où le terrain est divisé entre un grand nombre de pays, cette théorie est un bon moyen pour garantir un partage équitable du spectre entre ces pays. Il peut également être utile de prendre en considération la planification de réseaux irréguliers dans des cas spéciaux où ceux-ci peuvent être mieux appropriés.

ANNEXE I

CHOIX DES PAS DE PROGRESSION
DANS UN RÉSEAU OPTIMAL A 157 CANAUX

On a étudié systématiquement tous les nombres losanges inférieurs à 160 en calculant les distances 1-, 2- et 3-canaux pour tous les jeux de valeurs de p et q .

On indique au Tableau I ci-dessous quelques résultats qui ont paru intéressants (pour simplifier l'écriture, on a donné les carrés des distances). Le tableau est limité à $N = 100$ pour qu'il ne soit pas de dimension excessive.

TABLEAU I

	p	q	Adjacent	2-canaux	3-canaux
$N = 19$ ($a = 3, b = 2$)	6	10	4	3	3
$N = 31$ ($a = 5, b = 1$)	7	27	7	7	3
$N = 37$ ($a = 4, b = 3$)	6 9	29 25	9 9	3 7	7 3
$N = 39$ ($a = 5, b = 2$)	4	29	7	7	9
$N = 43$ ($a = 6, b = 1$)	5	13	12	7	3
$N = 49$ ($a = 5, b = 3$)	12	29	13	9	3
$N = 57$ ($a = 7, b = 1$)	11	37	13	7	9
$N = 61$ ($a = 5, b = 4$)	6 15	23 27	13 16	7 13	12 3
$N = 67$ ($a = 7, b = 2$)	4 8 21	53 39 27	13 19 12	13 13 7	12 3 13
$N = 73$ ($a = 8, b = 1$)	5 6 7 11	33 25 17 58	19 13 19 12	7 9 19 13	12 16 3 19
$N = 79$ ($a = 7, b = 3$)	4 6 11 22	17 65 27 54	13 16 19 21	19 7 9 19	21 19 12 3
$N = 91$ ($a = 6, b = 5$)	4 9 15	68 62 73	16 21 25	19 13 21	21 12 3
$N = 91$ ($a = 9, b = 1$)	4 6 8	55 37 19	19 19 27	21 9 19	12 21 3
$N = 93$ ($a = 7, b = 4$)	5 17	61 40	25 16	13 13	9 21
$N = 97$ ($a = 8, b = 3$)	6 13 26	81 30 60	19 21 28	13 19 21	21 12 3

A titre d'exemple, on indique en détail ci-après les calculs qui permettent de trouver les meilleurs pas pour $N = 157$ canaux.

Etant donné que $157 = 12^2 + 12 \times 1 + 1^2$, les pas p et q doivent vérifier:

$$12p + q = 0 \text{ modulo } 157$$

et être supérieurs à 3 afin que les zones de couverture des canaux C et $C + 1$, $C + 2$ ou $C + 3$ ne se recouvrent pas.

Essayons donc $p = 4$ et $q = 109$. Alors $q - p = 105$ (voir sur la Fig. 11 les définitions de p , q , $p - q$). La question qui se pose alors est de savoir où apparaît le canal 1 (ou 156) car on part ici du losange co-canal 0. Le réseau étant homogène et régulier, on peut partir de n'importe quel canal. La position idéale du canal 1 serait au centre de gravité d'un des 2 triangles qui forment le losange co-canal. Sa distance au canal 0 serait alors:

$$\sqrt{157} \times \sqrt{3}/3 = 7,23$$

Pour $p = 4$ et $q = 109$, le canal 1 tombe à 3 pas dans la direction $q - p = 105$ et $3 \times 105 = 315 = 1$ modulo 157. Cette distance de 3 pas est bien plus courte que le maximum 7,23.

Pour $p = 5$ et $q = 97$ (alors $q - p = 92$), le canal 156 se retrouvera après avoir parcouru 5 pas $q - p$ et 2 pas p ; en effet, $5 \times 92 + 2 \times 5 = 470 = 156$ modulo 157. La distance du canal adjacent est alors $\sqrt{19}$. Il y a lieu d'espérer qu'il existe une meilleure solution.

Pour $p = 6$ et $q = 85$ (alors $q - p = 79$), le canal 1 se trouve à 2 pas car $2(q - p) = 158 = 1$ modulo 157. C'est beaucoup trop près.

Pour $p = 7$ et $q = 73$ (alors $q - p = 66$), le canal 156 se trouve à 3 pas p plus 4 pas q , $3 \times 7 + 4 \times 73 = 313 = 156$ modulo 157. La distance 1-canal est alors $\sqrt{37} = 6,08$; les canaux 156 et 1 sont près des centres de gravité des triangles ainsi que les canaux 155 et 2; les canaux 154 et 3 sont à $\sqrt{12}$ du canal 0. Une recherche systématique parmi toutes les paires (p, q) montre que seules certaines d'entre elles donnent une distance 1-canal supérieure ou égale à 6. Les résultats figurent au Tableau II ci-après, accompagnés des distances 2-canaux et 3-canaux.

TABLEAU II

p	q	Adjacent	2-canaux	3-canaux
7	73	$\sqrt{37}$	$\sqrt{39}$	$\sqrt{12}$
11	25	$\sqrt{48}$	$\sqrt{37}$	$\sqrt{3}$
20	74	$\sqrt{37}$	$\sqrt{21}$	$\sqrt{21}$
24	26	6	1 ⁽¹⁾	
30	111	$\sqrt{39}$	$\sqrt{19}$	$\sqrt{21}$
33	75	$\sqrt{39}$	$\sqrt{7}$	$\sqrt{48}$

(1) Cela élimine la combinaison.

Le choix définitif dépend des rapports de protection pour 2 et 3 canaux. La paire (24, 26) ne conviendra pas.

Si on désire rassembler les canaux par groupe de 3 ou 4 (voir Fig. 9 et 10) il vaudrait mieux que les pas soient supérieurs à 20, par exemple, pour éviter des difficultés de multiplexage [Arnaud, 1962]. La Fig. 11 représente un tel réseau, correspondant à $p = 30$ et $q = 111$. Si aucun groupement n'est envisagé, ou si un écart de 20 est acceptable pour des émetteurs situés au même emplacement, le réseau $p = 20$ et $q = 74$ est légèrement meilleur.