CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES

Sciences Techniques Jeunesse

ASSOCIATION NATIONALE SCIENCES TECHNIQUES JEUNESSE

Secteur ESPACE

16 Place Jacques Brel - 91130 RIS ORANGIS

Téléphone : 01-69-02-76-10 / Télécopie : 01-69-43-21-43

E-Mail : espace@anstj.mime.univ-paris8.fr

Web: http://anstj.mime.univ-paris8.fr

Edition Octobre 1999

Principe du codage par multiplexage en fréquence

Note technique ANSTJ

ANSTJ

NOTE TECHNIQUE 3

PRINCIPE DU CODAGE par multiplexage en fréquence

par M. Combier (GETS)

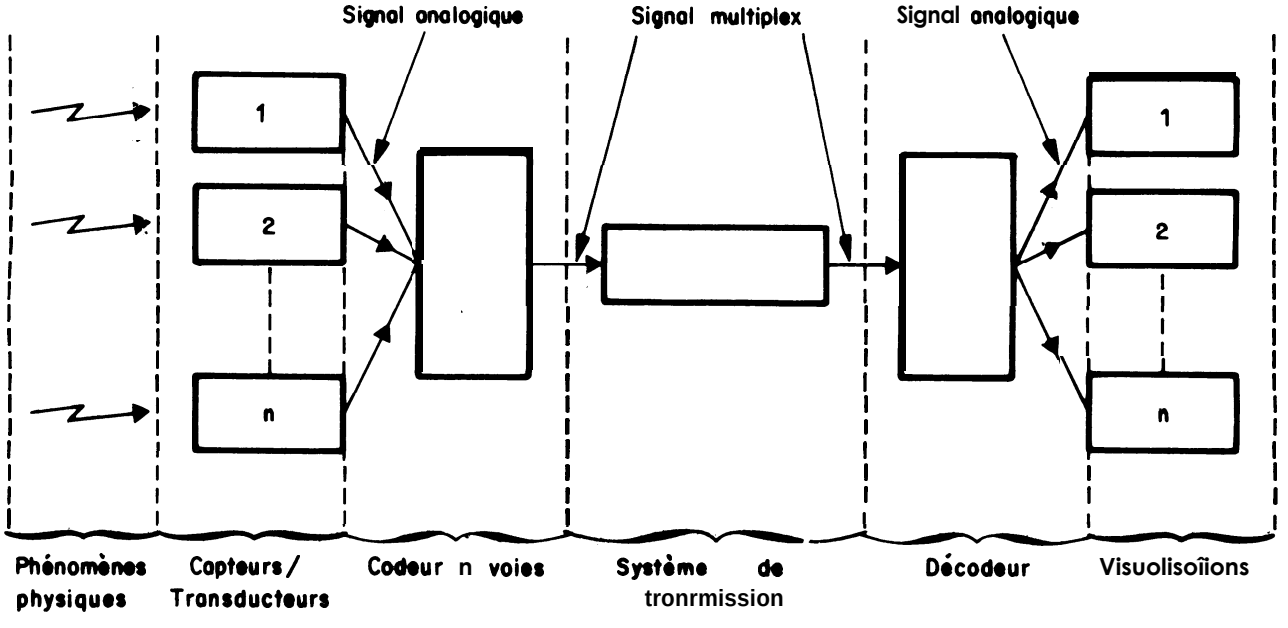
1 - INTRODUCTION

- But du codage :

Lorsque l on désire effectuer des mesures à distance, il est nécessaire d élaborer une "chaîne de télémesure c'est à dire un assemblage de systèmes qui a pour fonction de :

- Mettre en évidence les phénomènes physiques : Capteurs.
- Les convertir en signaux électriques : Transducteurs.
- Permettre, au besoin, la transmission de plusieurs mesures par le même canal (milieu matériel ou non dans lequel se propagent les signaux). Cette opération s appelle le multiplexage et est effectuée par le codeur.
- Transmettre le signal multiplex issu du codeur jusqu'au lieu d'exploitation par fil, émetteur-récepteur ou autre.
- Séparer les informations reçues. C est l opération inverse du codage : le décodage.
- Les visualiser.

Nous allons nous intéresser au problème du codage, et plus particulièrement au codage par multiplexage en fréquence.

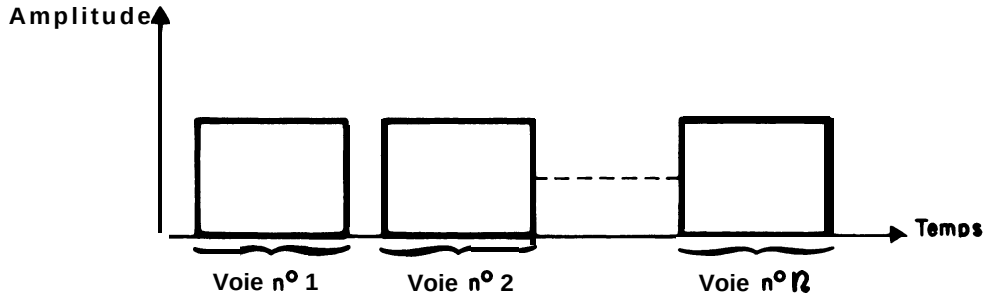


- **Principaux systèmes de codage :**

Il existe deux méthodes de multiplexage :

- Le multiplexage en temps :

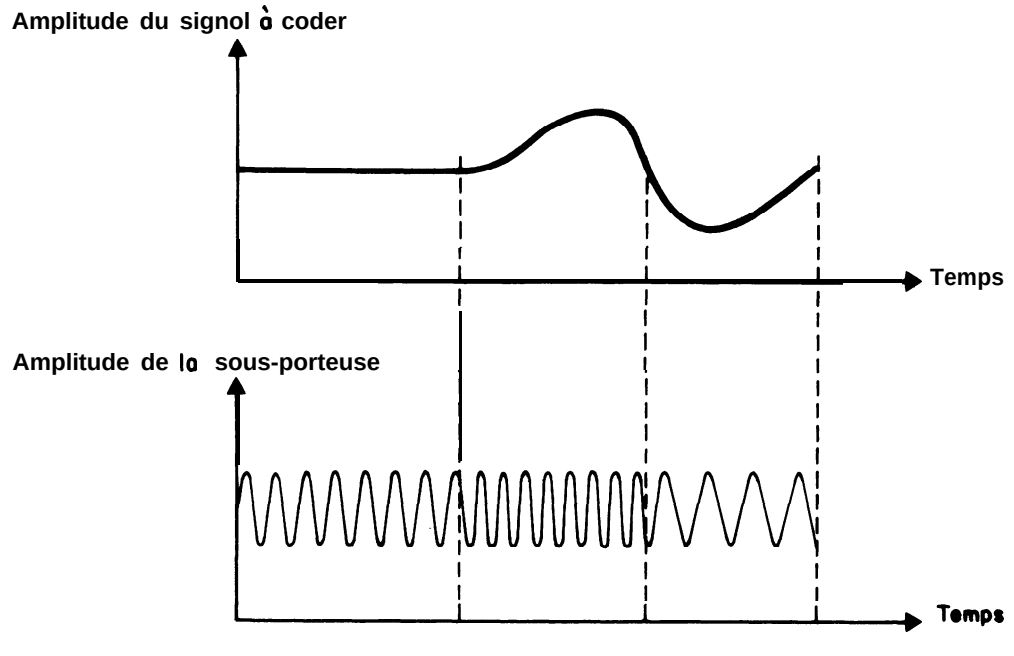
Il consiste à transmettre les voies de mesure séquentiellement, c'est à dire l'une après l'autre d'une manière cyclique.



Multiplexage en temps

- Le multiplexage en fréquence :

Chaque voie d'information module en fréquence des signaux sinusoïdaux appelés "sous-porteuses". A chaque voie correspond une sous-porteuse dont la fréquence, qui, en l'absence de modulation, se nomme fréquence centrale, varie dans une gamme bien définie et telle qu'elle ne risque pas de se superposer aux sous-porteuses des autres voies. Le multiplexage consiste à mélanger linéairement (additionner) toutes les sous-porteuses pour donner le signal multiplex.



Sous-porteuse modulée en f riquence

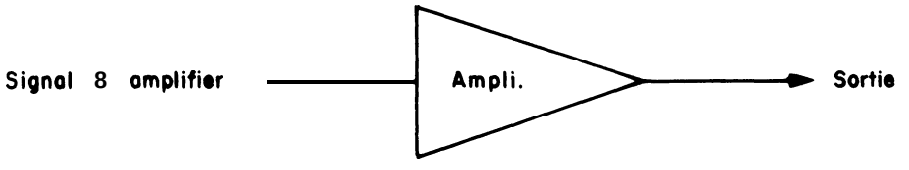
2 - PRINCIPE du CODAGE

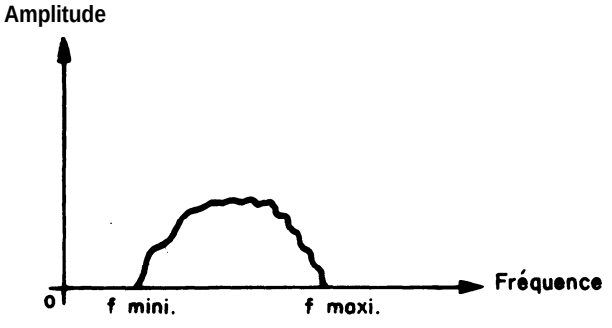
par MULTIPLEXAGE en FREQUENCE

Avant d'analyser fa structure et Les caractéristiques d'une chaîne de multiplexage en fréquence, il est utile de définir un certain nombre de termes :

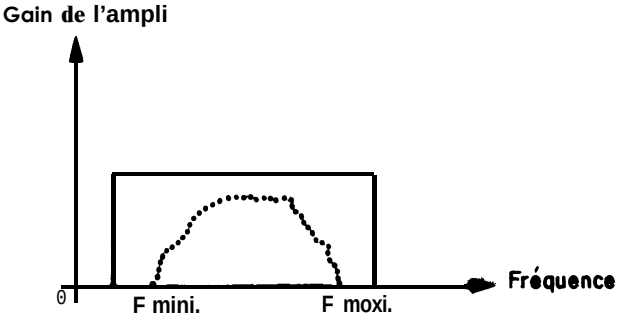
- Bande passante d'un système : c'est la bande de fréquences à laque lle peut fonctionner ou que peut transmettre ce système.
- Spectre en fréquence d'un signal : c'est la représentation de toutes les fréquences composant ce signal.

Si l'on désire qu'un système fonctionne correctement avec un signal donné, il est nécessaire que la bande passante de ce système soit égale ou supérieure au spectre en fréquence du signal qui lui est appliqué.





Spectre du signal à amplifier



Gain de l'ampli

- Excursion en fréquence : Ecart entre la fréquence maximum(ou minimum) et la fréquence centrale d'une sous-porteuse, généralement exprimé en % de la fréquence centrale.
- Taux de modulation en fréquence : Rapport de l'excursion en fréquence et de la fréquence centrale d'une sous-porteuse.

$\lambda = \frac{\Delta f}{f_0}$ où f_0 est la fréquence centrale de la sous-porteuse.

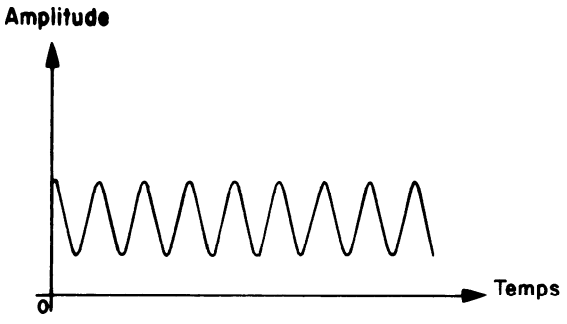
- Indice de modulation : Rapport de l'excursion en fréquence d'une sous-porteuse et de la fréquence du signal modulant la sous-porteuse.

$m = \Delta f / F$ où F = fréquence du signal de modulation.

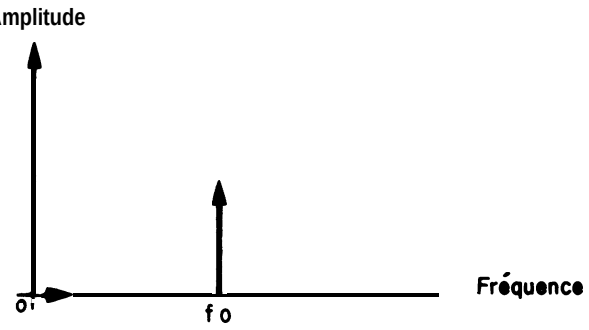
- Intermodulation : Réaction d une voie sur l'autre.

- Cas où les sous-porteuses sont parfuitement **sinusoïdales:**

Un signal **sinusoïdal** de fréquence constante peut se représenter par un spectre constitué par un "pic" **situé** en f_0, f_0 étant la fréquence de ce signal.



Sinusoïde de fréquence f o

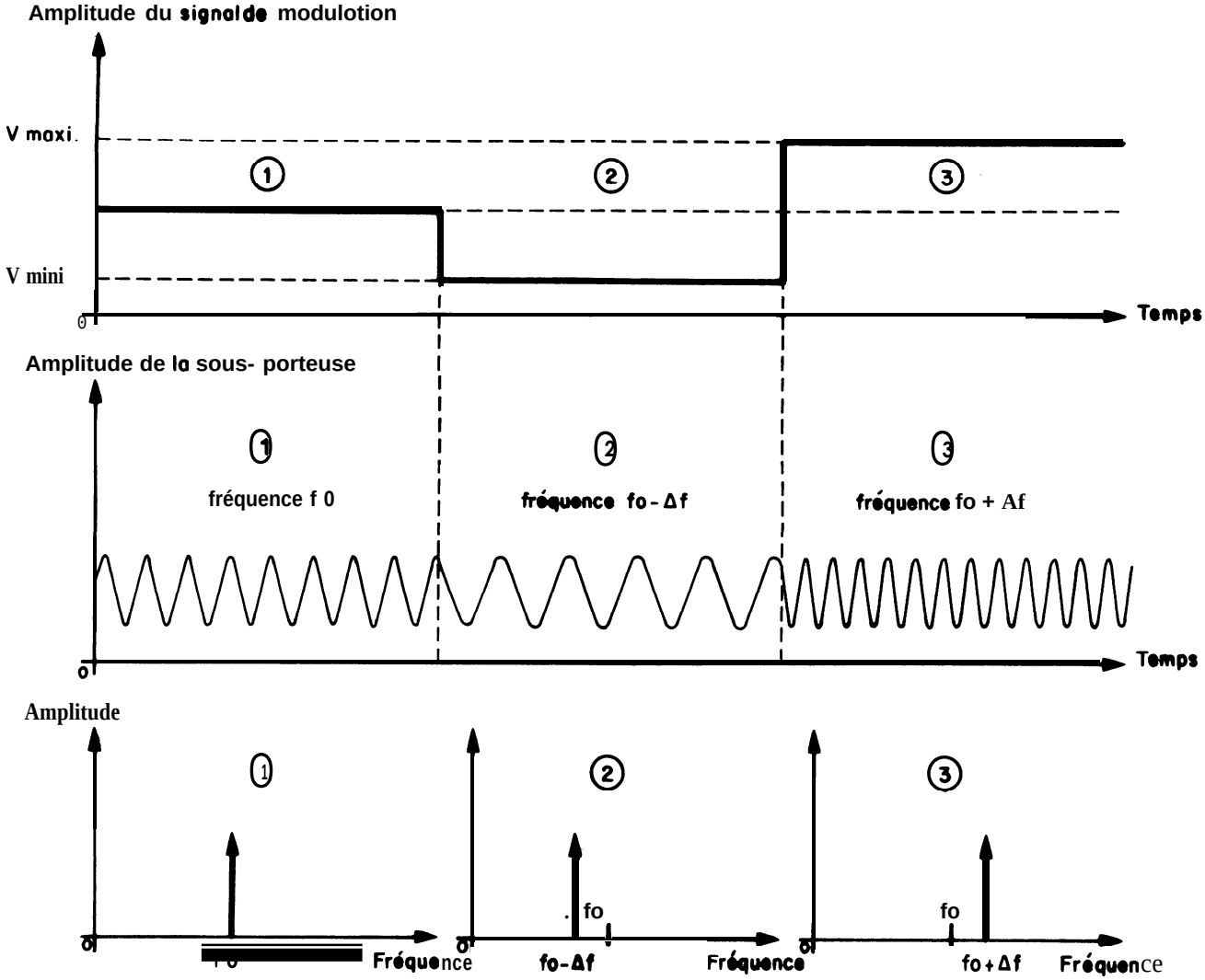


Spectre en fréquence de la sinusoïde

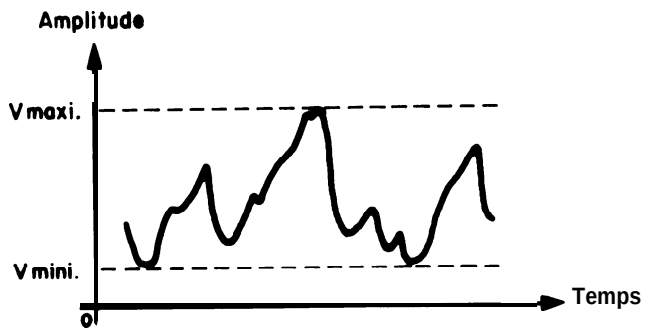
Lorsque ce signal est modulé en fréquence, son spectre **s'élargit,** et on peut distinguer deux cas :

- la fréquence de modulation est très basse :

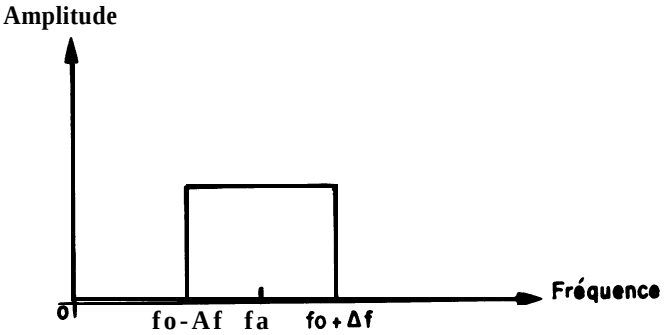
La figure représente une sous-porteuse modulée en fréquence par un signal prenant successivement sa valeur moyenne, minimale, puis maximale. Durant ces trois phases, le "pic" constituant le spectre de la **sous-**porteuse se trouve situé en f_0 , $f_0 - \Delta f$ puis $f_0 + \Delta f$.



Quelle que soit l'amplitude du signal de modulation (entre V min et V max) il lui correspondra une fréquence de la sous-porteuse située entre $f_o - \Delta f$ et $f_o + \Delta f$. On peut donc représenter le spectre total de la sous-porteuse modulée, par un rectangle centré en f_o et de largeur $2\Delta f$, Δf étant l'excursion en fréquence.



Signal de modolotion

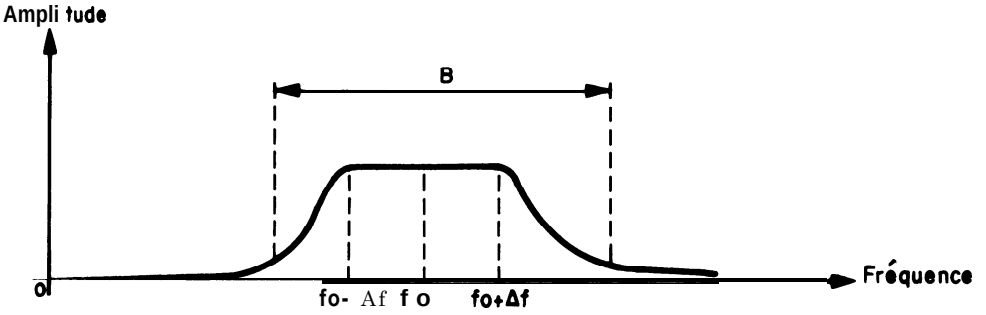


Spectre en fréquence de la sous-porteuse

Spectre d'une sous-porteuse **modulée** por un **signal** voriont lentement

- La fréquence de modulation n'est plus négligeable :

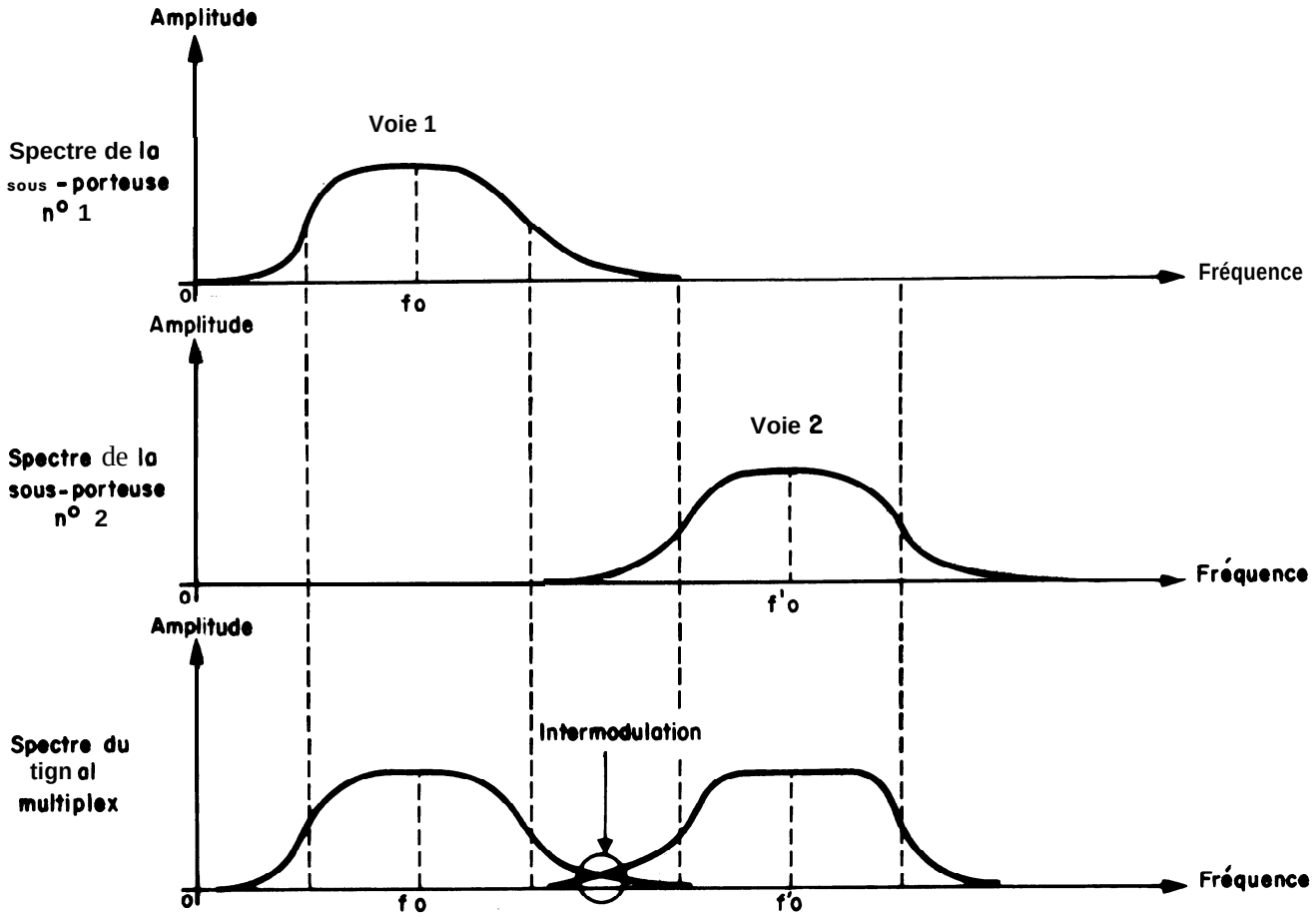
Le spectre de la sous-porteuse s'élargit et devient théoriquement infini. Cependant, son amplitude décroît rapidement lorsque l'on s'éloigne de f_o. On peut considérer que sa largeur est égale à $2 (\Delta f + F \text{ max})$ où Δf est l'excursion en fréquence et F max la fréquence maximum du signal de modulation.



$B \approx 2 (\Delta f + F \text{maxi})$

Spectre dûne sous-porteuse modulée por un **signal** de fréquence **élevée**

Le multiplexage en fréquence consistant à mélanger l inéairement les sous-porteuses, le spectre du signal multiplex résultant s'obtient en additionnant les spectres de chaque sous-porteuse. Les fréquences centrales des sous-porteuses doivent donc être suffisamment éloignées afin d'éviter une intermodulation trop importante entre deux voies consécutives.

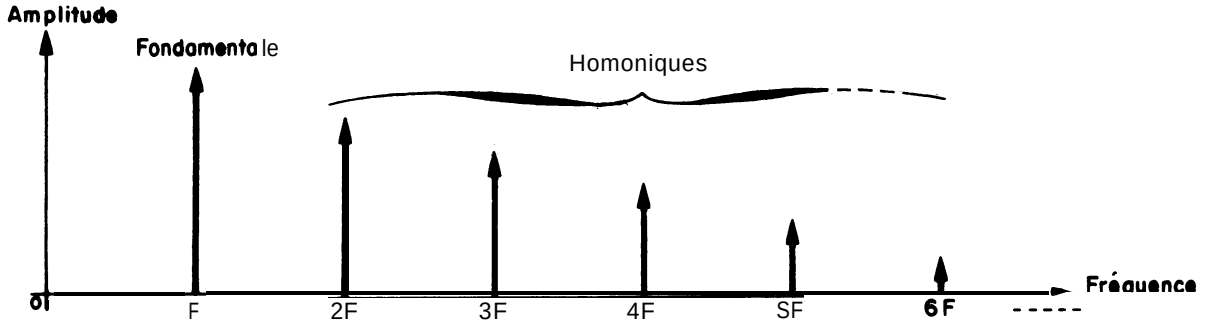


- Bande passante d'une voie :

La largeur du spectre en fréquence d'une sous-porteuse augmente avec la fréquence du signal de modulation (signal à transmettre). Or celle-ci doit être limitée afin de pouvoir disposer d'un nombre important de voies sans que la fréquence des sous-porteuses correspondantes ne soit trop élevée (supérieure à 200 KHz). On doit donc limiter la fréquence maximum du signal à transmettre. Cette fréquence maximum est la bande passante de la voie considérée.

- Cas où les sous-porteuses ne sont plus sinusoïdales:

Les signaux constituant les sous-porteuses ne sont jamais parfaits et sont toujours légèrement déformés (distorsion). On démontre que tout signal périodique non sinusoïdal de fréquence F peut se décomposer en une série de signaux sinusoi'daux de fréquence F, 2 F, 3 F.. , etc et d'amplitude décroissant avec la fréquence. Les fréquences 2 F, 3 F. , .etc sont appelées "harmoniques" du signal; F est la fréquence fondamentale. Si un tel signal est utilisé comme sous-porteuse, ses harmoniques viendront perturber les autres voies (Intermodulation).



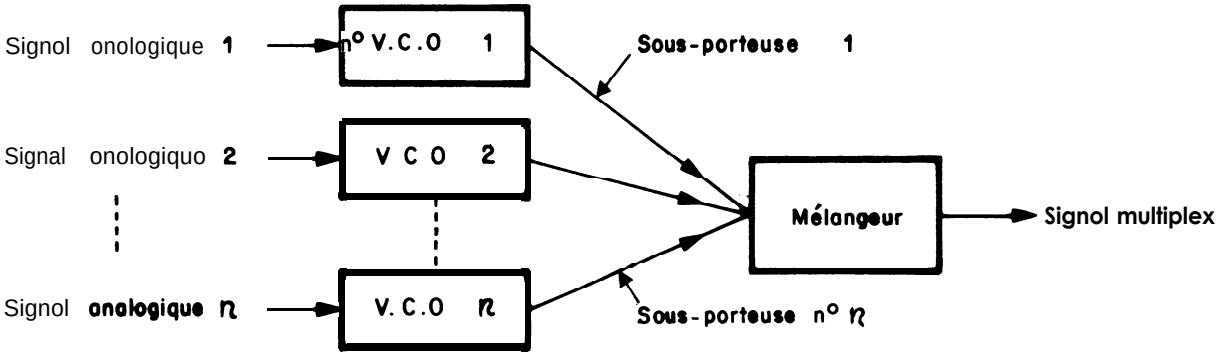
Spectre d'un signal périodique non sinusoïdal de fréquence F

On en déduit que si les sous-porteuses sont très rapprochées, les signaux les constituant doivent avoir le minimum de distorsion. Dans la pratique, si le nombre de voies est réduit, on cherchera à les éloigner au maximum pour limiter l'intermodulation.

3 - ELEMENTS d'une CHAINE de MULTIPLEXAGE en FREQUENCE :

- Codage :

Le codeur comprend deux sortes d'organes : les V.C. O. et le mélangeur.

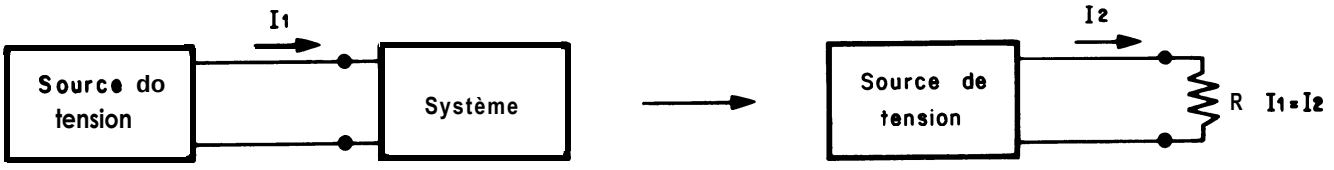


- Les V.C.O. : (Voltage Control led Oscillator).

Les V.C.O. encore appelés "traducteurs tension-fréquence" sont des oscillateurs généralement sinusoïdaux dont la fréquence de fonctionnement peut être modifiée, dans une certaine gamme, par une tension variable appliquée à leur entrée.

- Impédance d'entrée :

L'impédance d'entrée d'un système fonctionnant à une fréquence donnée est égale à la valeur de la résistance qui, branchée à la place du système consommerait le même courant.



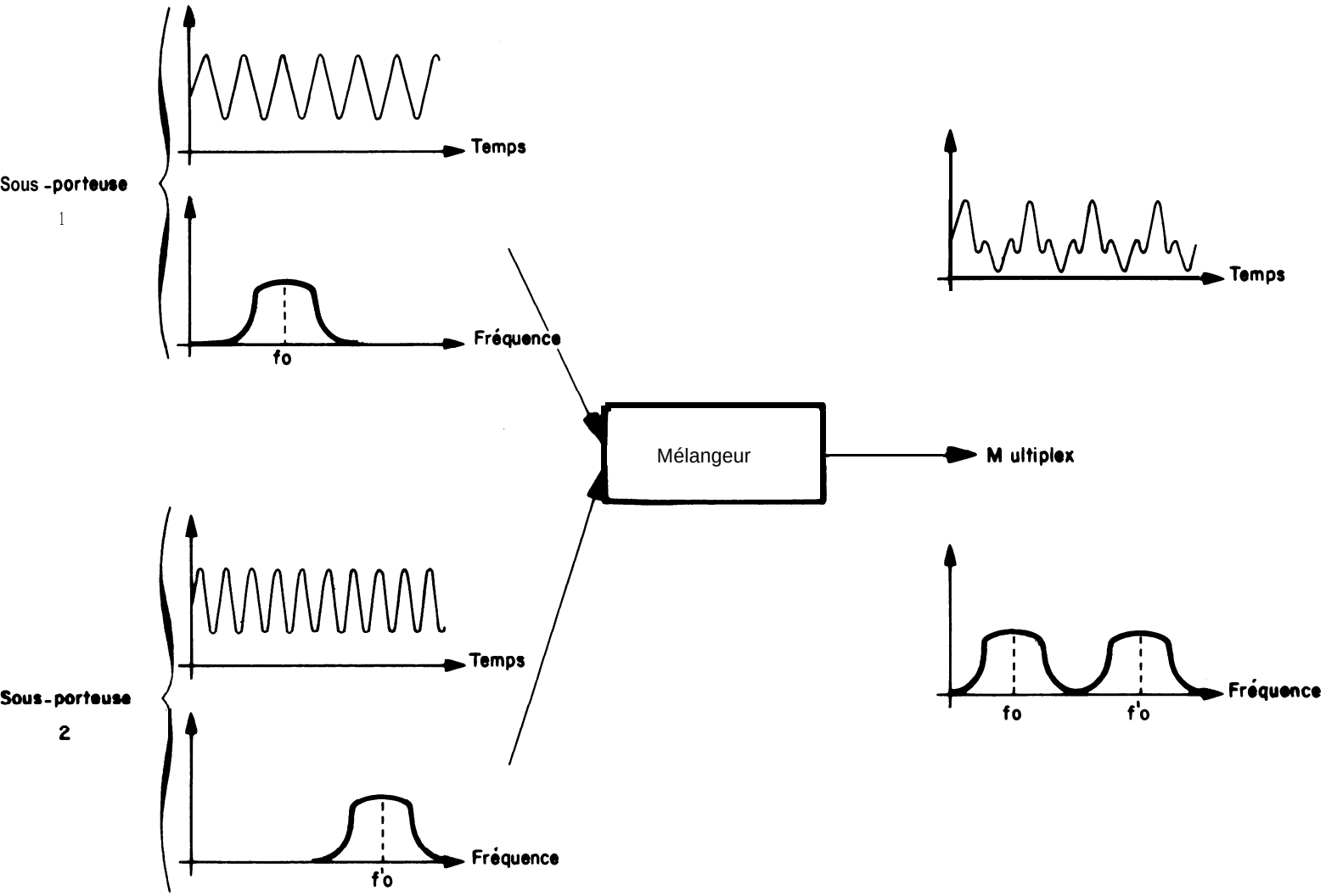
R = impédance d'entrée du système

L'impédance d'entrée des V.C. 0. est généralement élevée de sorte que leur branchement à la sortie d'un circuit ne perturbe pas son fonctionnement.

D'autre part, la variation de fréquence de la sous-porteuse est proportionnel le à la tension d'entrée de manière à avoir une chaîne linéaire permettant un étalonnage aisé.

- Le mélangeur :

C'est un amplificateur à haute impédance d'entrée qui doit être linéaire (tension de sortie proportionnelle à la tension d'entrée). Le but du mélangeur est d'additionner les spectres des signaux présents à ses entrées. S'il n'est pas linéaire, il génèrera non seulement la somme des signaux l'attaquant, mais aussi un produit donnant naissance à des fréquences nouvelles et provoquant une intermodulation entre les différentes voies.



Mélange de deux sous-porteuses.

La sortie du mélangeur étant à basse impédance, il peut attaquer directement un modulateur ou un enregistreur.

Enfin, il faut éviter d'appliquer à l'entrée du mélangeur des tensions trop élevées qui pourraient être écrêtées et faire apparaître des fréquences parasites.

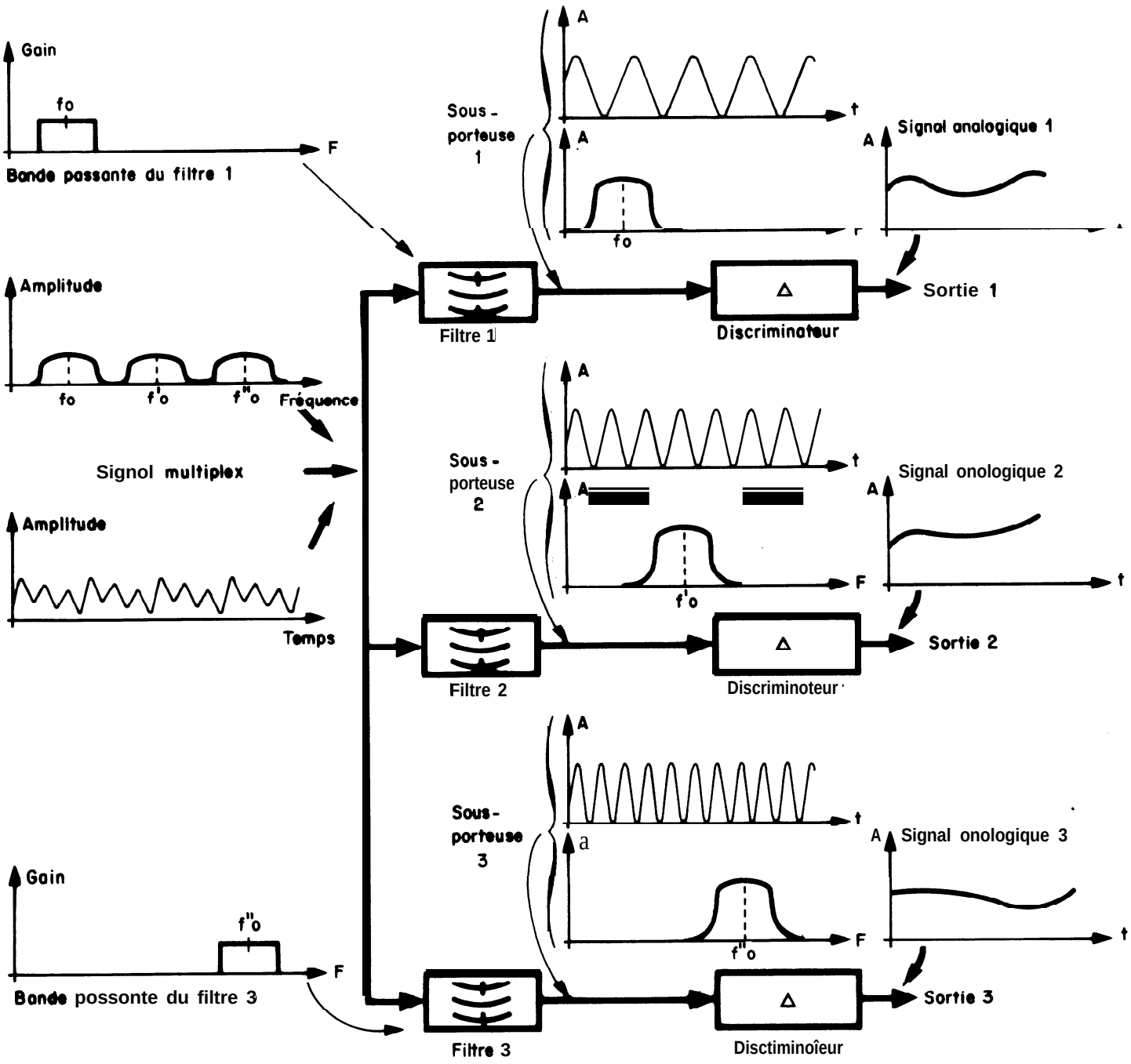
La chaîne complète : V.C. O., mélangeur, modulateur, émetteur doit être parfaitement linéaire afin de minimiser les erreurs dues à l'intermodulation.

- Décodage :

Après le récepteur, on retrouve le signal multiplex tel qu'il était à la sortie du mélangeur; il s'agit alors d'effectuer l'opération inverse du codage, c'est à dire séparer les différentes sous-porteuses puis les démoduler,

- Séparation des sous-porteuses :

Le signal multiplex est envoyé sur des filtres ne laissant passer que certaines bandes de fréquences correspondant aux spectres en fréquence des différentes sous-porteuses.



- Démodulation :

La démodulation consiste à transformer une fréquence en tension proportionnelle à celle-ci. Le démodulateur fournit donc une tension pratiquement proportionnelle à la tension présente à l entrée du V.C.O. correspondant.

4 - Le STANDARD IRIG

(Inter Range Instrumentation Group)

Le standard IRIG fixe les paramètres de la plupart des systèmes de codage : **PAM**, PDM, **PPM**, **PCM** et dans notre cas : **FM**.

Les paramètres fixés sont :

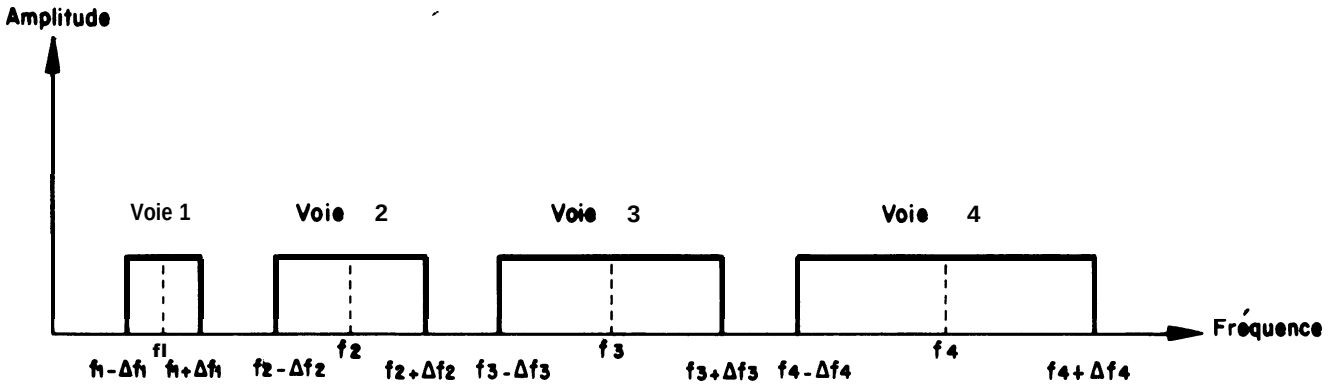
- Nombre de voies.
- Fréquences centrales.
- Excursions en fréquence.
- Indices de modulation.
- Fréquences d'émission.

Il existe, en FM, quatre standards différents :

- Bandes passantes proportionnelles, excursion en fréquence : $f = \pm 7,5\%$
- " " " " " $f = \pm 10\%$
- " " " " " $f = \pm 15\%$
- Bandes passantes constantes.

- Bande passante proportionnelle :

Le taux de modulation est constant (7,5% ou 10% ou 15%). L'excursion en fréquence est donc proportionnelle à la fréquence centrale.



Spectre d'un multiplexage de sous-porteuses à bonde passante proportionnelle

Le niveau d'intermodulation a encore une valeur acceptable lorsque l'indice de modulation m est égal à 5. La bande passante de la voie considérée s'en déduit par la formule :

$$m = \frac{\Delta f}{F\,max}$$ (F max = fréquence maxi de modulation)

Sous porteuses IRIG à bandes passantes proportionnelles
Excursion de fréquence: 7,5% de la fréquence centrale

Voie	F.minimum (Hz)	F.centrale (Hz)	F.maximum (Hz)	bande passante (m.s.)
1	370	400	430	6
2	518	560	602	8
3	675	730	785	11
4	888	960	1032	14
5	1202	1300	1398	20
6	1572	1700	1828	25
7	2127	2300	2473	35
8	2775	3000	3225	45
9	3607	3900	4193	59
10	4995	5400	5805	81
11	6799	7350	7901	110
12	9712	10500	11288	160
13	13412	14500	15588	220
14	20350	22000	23650	330
15	27750	30000	32250	450
16	37000	40000	43000	600
17	48562	52500	56438	790
18	64750	70000	75250	1050
19	86025	93000	99975	1395
20	114700	124000	133300	1860
21	152625	165000	177375	2475

Sous porteuses IRIG à bandes passantes proportionnelles
Excursion de fréquence: 15% de la fréquence centrale

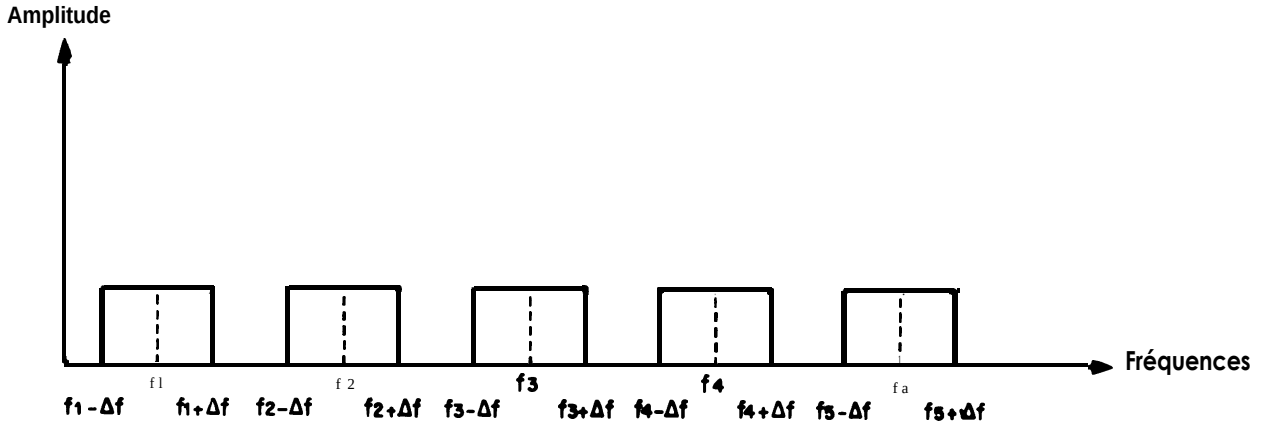
Voie	F.minimum (Hz)	F.centrale (Hz)	F.maximum (Hz)	bande passante (m.s.)
A	19700	22000	25300	660
B	25500	30000	34500	900
C	34000	40000	46000	1200
D	44625	52500	60375	1575
E	59500	70000	80500	2100
F	79050	93000	106950	2790
G	105400	124000	142600	3720
H	140250	165000	189750	4950

Sous porteuses IRIG à bandes passantes proportionnelles
Excursion de fréquence: 10% de la fréquence centrale

Voie	F.minimum (Hz)	F.centrale (Hz)	F.maximum (Hz)	bande passante (m.s.)
G1	11250	12500	13750	2500

- **Bande passante constante :**

Les caractéristiques des sous-porteuses sont calculées de manière à ce qu'elles aient toutes la même bande passante. L'indice de modulation étant pris égal à 2, l'excursion en fréquence est la même pour toutes les sous-porteuses.



Spectre dun multiplexage de sous- porteuses 8 bonde -passante constante

Le spectre des sous-porteuses s'élargissant proportionnel lement à la fréquence de modulation, celles-ci sont plus ou moins espacées selon que l'on désire une bande passante de 1 KHz, 2 KHz ou 4 KHz.

m = 2	Groupe A	Groupe B	Groupe C
Bande passante (F.max.)	1kHz	2kHz	4kHz
Excursion en fréquence (Δ f)	±2kHz	±4kHz	±8kHz

$$m = \frac{\Delta f}{F.max.}$$

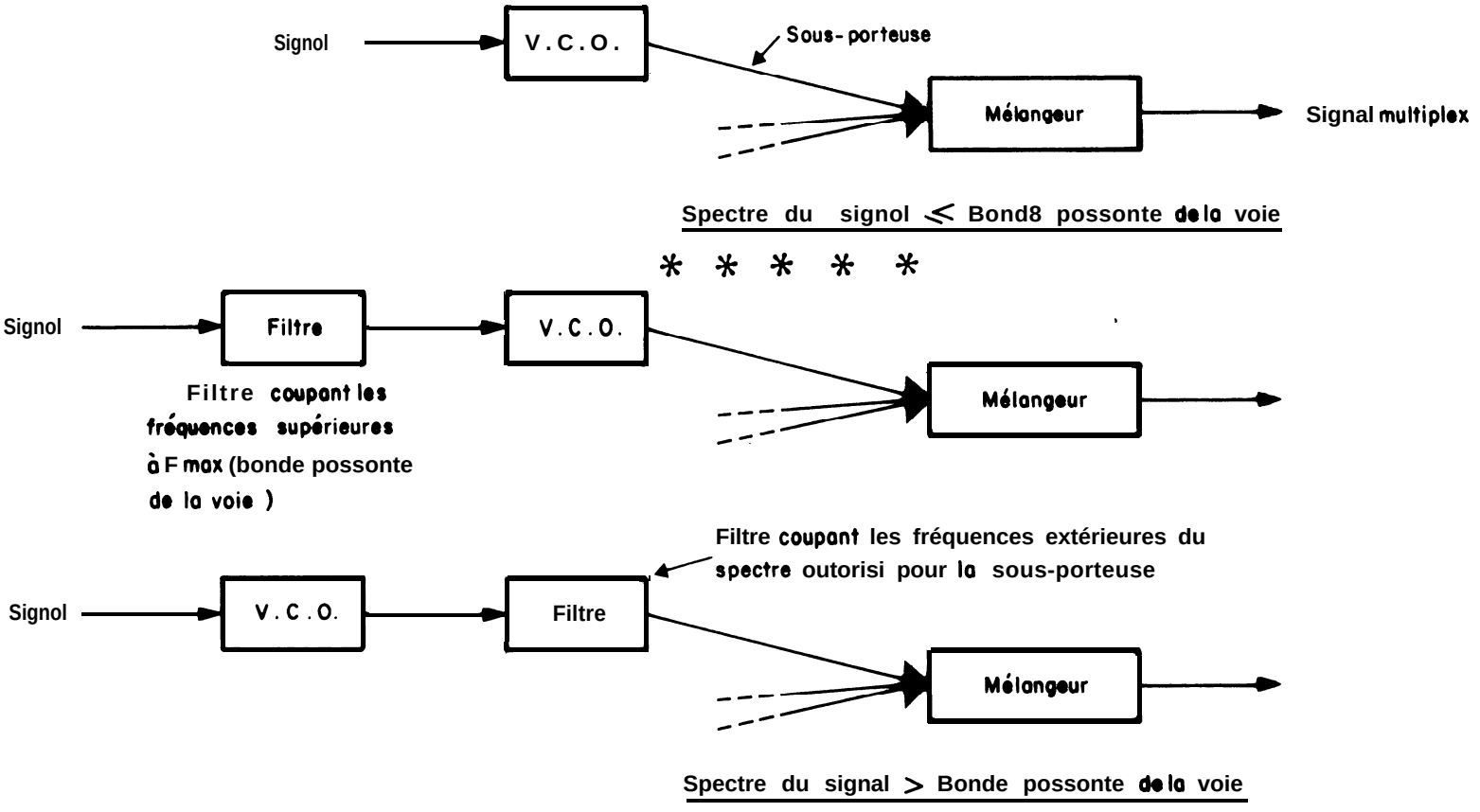
Excursion en fréquence des sous porteuses à bande passante constante

Sous porteuses IRIG à bandes passantes constantes

(indice de modulation m=2)

GROUPE _ A _ Bande passante = 1kHz		GROUPE _ B _ Bonde passante = 2 kHz		GROUPE _ C _ Bande passante= 4kHz	
Voie	Fréquence centrale (kHz)	Voie	Fréquence centrale (kHz)	Voie	Fréquence centrale(kHz)
1 A	16				
2A	24				
3A	32	3B	32		
4A	40				
5A	48	5B	48		
6A	56				
7A	64	7 B	64	7C	64
8A	72				
9A	80	9B	80		
10 A	88				
11A	96	11B	96	11C	96
12A	104				
13A	112	13B			
14A	120				
15 A	128	15B	128	15C	128
16A	136				
17A	144	17B	144		
18A	352				
19A	160	19B	160	19c	160
20A	168				
21A	176	21B	176		

Remarque : Par "bande passante de la voie" on entend : "fréquence maximum autorisée pour le spectre du signal modulant". Si le spectre du signal est plus large, il sera toujours transmis, mais provoquera une intermodulation sur les voies proches. Il faut donc limiter le spectre du signal avant d'attaquer le V.C. 0. ou limiter le spectre de la sous-porteuse avant d'attaquer le mélangeur, ceci à l'aide d'un filtre approprié.



- **Choix des standards et des fréquences des sous-porteuses :**

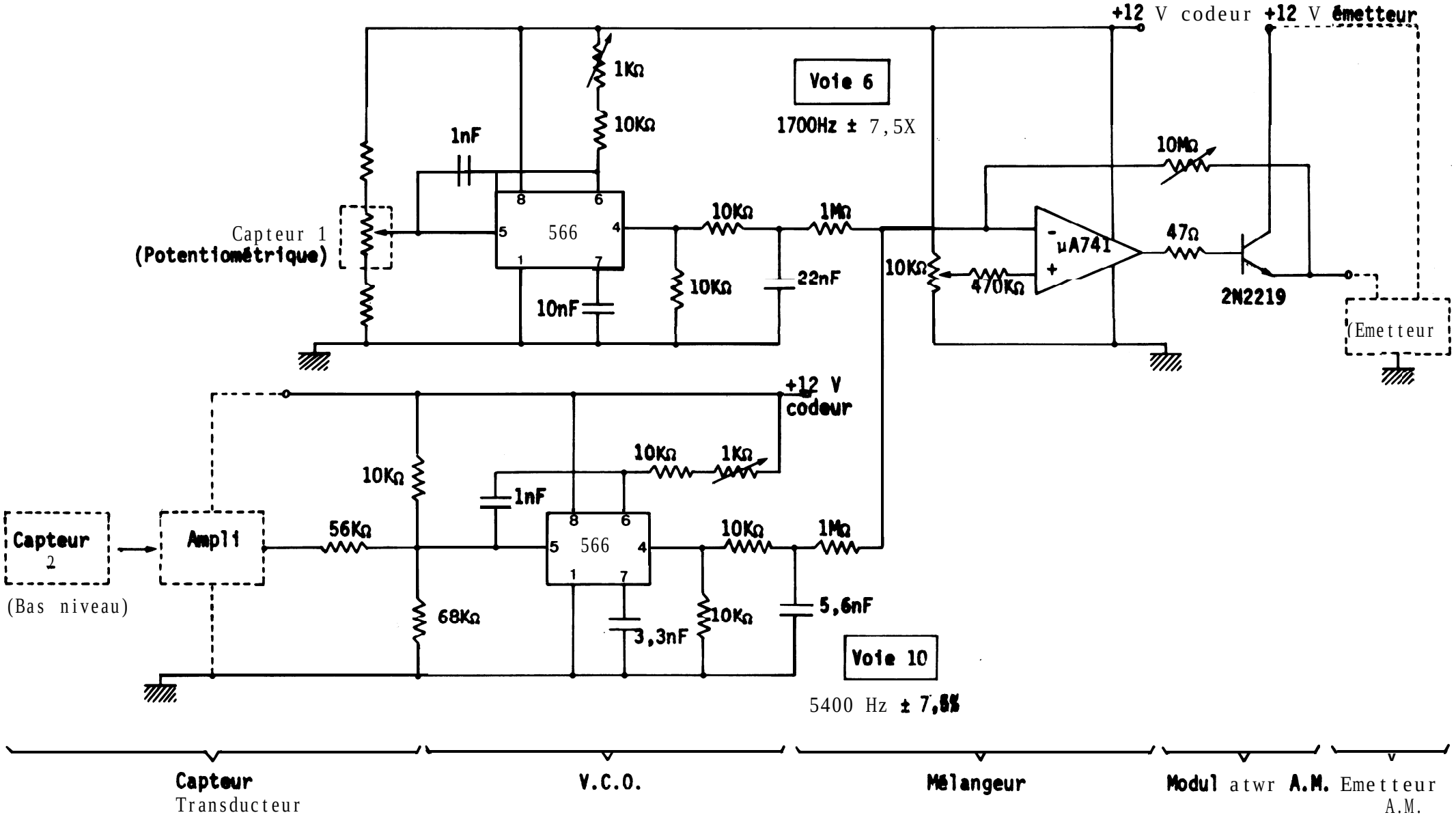
Il est conseillé aux clubs aérospatiaux d'utiliser le standard à bandes passantes proportionnelles d'excursion en fréquence ±7,5%, les décodeurs disponibles au C. N.E.S. fonctionnant sur ce standard. Les fréquences centrales les plus utilisées s'étendent de 960 Hz à 14.500 Hz (Voies 4 à 13), les voies 1 à 3 ayant une bande passante trop réduite et les voies 14 à 21 une fréquence centrale trop élevée conduisant à des difficultés d'enregistrement et de transmission. Il est, d'autre part, préférable d'espacer le plus possible les voies. Par exemple, pour une télémesure à 4 voies, il faut prendre les canaux 4, 7, 10, 13. On minimisera, ainsi, les réactions d'une voie sur l'autre.

Remarque : L'emploi des voies A à H impose la suppression des voies adjacentes
======== Par exemple : pour utiliser la voie E, il faut supprimer les voies D et F.

✸5- REFERENCES✸

Note Technique n° 23 : Le VCO à circuit intégré ICL 8038

Note Technique n° 24 : Le VCO à circuit intégré LM 566



Exemple de codeur 2 voies