



YAMAHA
MUSIQUE FRANCE

DEPARTEMENT TECHNIQUE

LA SYNTHÈSE
PAR MODULATION
DE FRÉQUENCE

Une application du principe bien connue de la modulation de fréquence est utilisée, pour la synthèse sonore.

Cette technique fournit un moyen très simple de contrôler les composantes du spectre audio et leur évolution dans le temps. De tels spectres dynamiques peuvent être très variés et déterminent à la fois des sons connus et des sons inconnus.

INTRODUCTION

Un intérêt essentiel dans la recherche acoustique et dans la musique électronique réside dans la synthèse de sons naturels. Pour le chercheur il s'agit du meilleur test pour la théorie acoustique, tandis que pour le compositeur c'est un extraordinaire point de départ dans le domaine de recherche de sons. La synthèse de sons naturels a été évasive; cependant de récents travaux portant sur l'analyse et la synthèse par ordinateurs ont prouvé que le caractère de l'évolution temporelle des composantes spectrales est d'une importance critique dans la détermination du timbre.

Dans les sons naturels, les amplitudes des composantes harmoniques du spectre sont variables dans le temps, ou dynamiques. L'énergie de ces composantes évoluent de façons complexes; en particulier durant les périodes d'attaque et de descente ("decay") du son.

L'évolution temporelle du spectre dans certains cas est facile à suivre tel que les sons de cloches, tandis que dans d'autres cas pas du tout, car l'évolution se fait dans une période de temps très courte, mais néanmoins perçue, et donc d'un rôle important dans la reconnaissance du timbre. Beaucoup de sons naturels semble avoir une évolution des caractéristiques spectrales qui, en plus de leur "signature" est largement responsable de ce que nous jugeons être leur qualité vivante. Par opposition, c'est principalement la partie non variable du spectre de la plupart des sons synthétisés qui attribue leur couleur électronique souvent très fade.

L'application de l'équation de la modulation de fréquence, décrite plus bas, permet la production d'un spectre complexe avec une très grande simplicité. Le fait que l'évolution temporelle des composantes spectrales puisse être facilement contrôlée est peut-être l'attribut le plus frappant de la technique, car les spectres dynamiques sont générés avec grandes difficultés lorsqu'on utilise les techniques courantes de synthèses.

Une application du principe bien connue de la modulation de fréquence est utilisée, pour la synthèse sonore.

Cette technique fournit un moyen très simple de contrôler les composantes du spectre audio et leur évolution dans le temps. De tels spectres dynamiques peuvent être très variés et déterminent à la fois des sons connus et des sons inconnus.

INTRODUCTION

Un intérêt essentiel dans la recherche acoustique et dans la musique électronique réside dans la synthèse de sons naturels. Pour le chercheur il s'agit du meilleur test pour la théorie acoustique, tandis que pour le compositeur c'est un extraordinaire point de départ dans le domaine de recherche de sons. La synthèse de sons naturels a été évasive; cependant de récents travaux portant sur l'analyse et la synthèse par ordinateurs ont prouvé que le caractère de l'évolution temporelle des composantes spectrales est d'une importance critique dans la détermination du timbre.

Dans les sons naturels, les amplitudes des composantes harmoniques du spectre sont variables dans le temps, ou dynamiques. L'énergie de ces composantes évoluent de façons complexes; en particulier durant les périodes d'attaque et de descente ("decay") du son.

L'évolution temporelle du spectre dans certains cas est facile à suivre tel que les sons de cloches, tandis que dans d'autres cas pas du tout, car l'évolution se fait dans une période de temps très courte, mais néanmoins perçue, et donc d'un rôle important dans la reconnaissance du timbre. Beaucoup de sons naturels semble avoir une évolution des caractéristiques spectrales qui, en plus de leur "signature" est largement responsable de ce que nous jugeons être leur qualité vivante. Par opposition, c'est principalement la partie non variable du spectre de la plupart des sons synthétisés qui attribue leur couleur électronique souvent très fade.

L'application de l'équation de la modulation de fréquence, décrite plus bas, permet la production d'un spectre complexe avec une très grande simplicité. Le fait que l'évolution temporelle des composantes spectrales puisse être facilement contrôlée est peut-être l'attribut le plus frappant de la technique, car les spectres dynamiques sont générés avec grandes difficultés lorsqu'on utilise les techniques courantes de synthèses.

A la fin de l'article quelques simulations de cuivres, instruments à vent et percussions sont données.

L'importance de ces simulations joue plus au niveau de leur mise en oeuvre et de leur simplicité qu'au niveau de leur exactitude. La technique de la modulation de fréquence, bien que ce ne soit pas un modèle physique pour les sons naturels, est décrite comme étant très puissant pour du moins quelques uns de ces sons.

LA MODULATION DE FREQUENCE

La modulation de fréquence (FM) est bien connue dans l'application des transmissions radio, mais les équations n'ont pas été appliquées à la génération de spectre audio où les fréquences porteuses et modulantes se trouvent dans cette même bande.

En FM, la fréquence instantanée de la porteuse varie en fonction de l'onde modulante, ainsi le taux de variation de la porteuse est la fréquence de l'onde modulante, ou fréquence de modulation.

La variation totale de la porteuse autour de sa valeur moyenne, ou déviation maximale en fréquence, est proportionnelle à l'amplitude de l'onde modulante. Les paramètres d'un signal modulé en fréquence sont:

c = Fréquence porteuse ou fréquence moyenne

m = Fréquence de modulation

d = Déviation maximale

L'équation d'une onde modulée en fréquence d'amplitude max A , où porteuse et modulation sont sinusoidales est :

$$e = A \sin (\alpha t + I \sin \beta t) \quad (1)$$

où

e = l'amplitude instantanée de la porteuse modulée

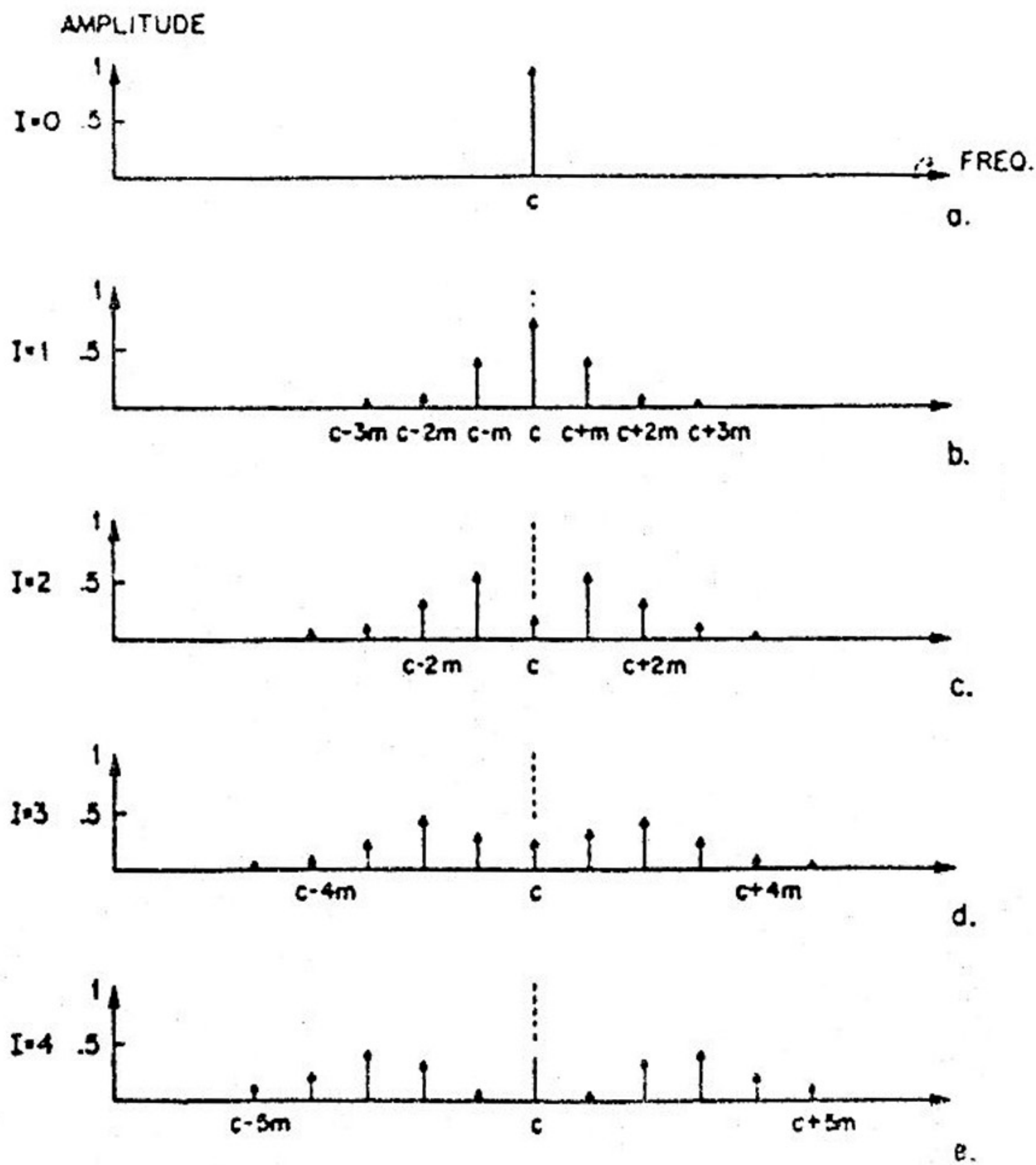
α = la pulsation de la fréquence porteuse en rd/s

β = la pulsation de la fréquence de modulation en rd/s

$I = d/m$ = l'index de modulation, rapport de la déviation maximale et de la fréquence de modulation.

Il est évident que lorsque $I = 0$ la déviation de fréquence doit être nulle et il n'y a pas de modulation.

Lorsque I est supérieur à zéro, des fréquences apparaissent dans le spectre de part et d'autre de la porteuse à intervalles de la fréquence de modulation.



$C = \text{CARRIER}$
 $M = \text{MODULATOR}$

Fig. 1 Exemple montrant l'augmentation de la largeur de bande en fonction d'un index de modulation croissant. Les fréquences latérales de gauche et de droite sont disposées à intervalles de la fréquence de modulation, m , et sont symétriques par rapport à la porteuse, c .

Le nombre de fréquence adjacentes ou "raies" qui apparaissent sont fonctions de l'index de modulation, de telle manière que lorsque I augmente depuis zéro, l'énergie est "volée" de la porteuse et distribuée sous forme de raies dont le nombre est croissant. La bande passante augmentant lorsque I augmente est représentée sur la figure 1 avec une fréquence de modulation constante.

L'amplitude de la porteuse et des composantes latérales est déterminée par les fonctions de Bessel de première espèce d'ordre n , $J_n(I)$, avec l'index comme argument.

Les six premières fonctions de Bessel, J_0 à J_5 , sont représentées dans la figure 2. La fonction d'ordre 0, $J_0(I)$ produit un coefficient d'amplitude pour la fréquence porteuse ; la fonction d'ordre 1, $J_1(I)$ produit un coefficient pour les 1ère composantes latérales supérieures et inférieures ; $J_2(I)$ pour les 2ème composantes, etc

Pour avoir des composantes latérales d'ordre élevé avec une amplitude significative il faut avoir un index élevé.

La bande passante totale est approximativement égale à deux fois la somme de la déviation en fréquence et de la fréquence de modulation, soit :

$$BP \approx 2(d + m)$$

Toutes les relations ci-dessus sont exprimées dans la formule trigonométrique :

$$\begin{aligned} e = & A J_0(I) \sin \alpha t \\ & + J_1(I) [\sin (\alpha + \beta) t - \sin (\alpha - \beta) t] \\ & + J_2(I) [\sin (\alpha + 2\beta) t + \sin (\alpha - 2\beta) t] \\ & + J_3(I) [\sin (\alpha + 3\beta) t - \sin (\alpha - 3\beta) t] \\ & + \text{-----} \end{aligned} \quad (2)$$

On peut remarquer dans l'équation (2) que les fréquences latérales gauches, d'ordre impair $\sin (\alpha - \beta)$, $\sin (\alpha - 3\beta)$, etc... sont précédées d'un signe moins, et que pour un index supérieur à 2,5, les fonctions de Bessel (Fig.2) produisent un coefficient négatif pour quelques composantes. Ordinairement, les signes négatifs sont ignorés dans la représentation graphique du spectre, (Fig.1), puisqu'elles indiquent simplement une inversion de phase des composantes, $-\sin (\theta) = \sin (-\theta)$.

Dans l'application de la FM décrit plus bas, cette information de phase est significative et doit être considérée dans la représentation graphique du spectre.

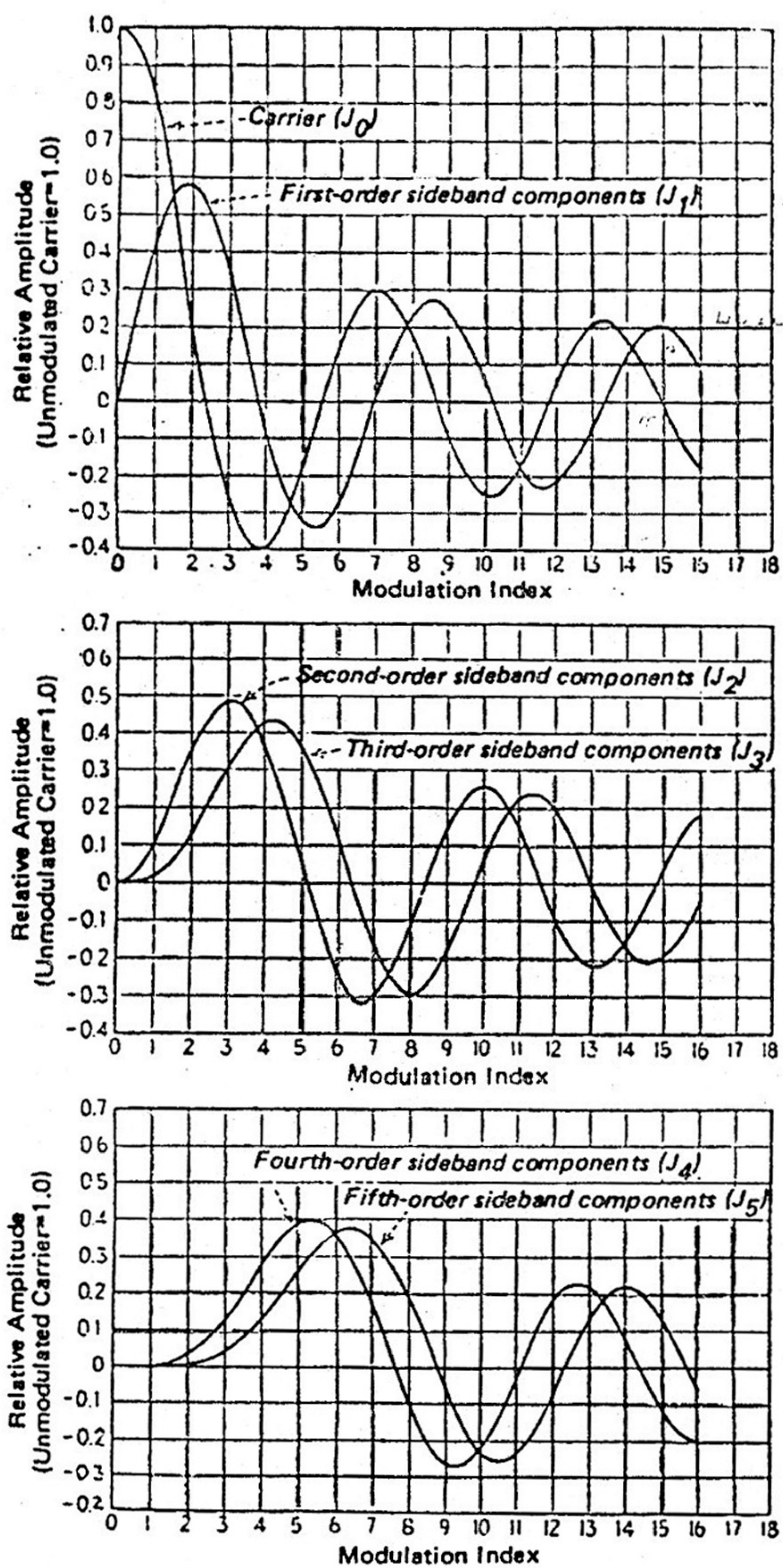


Fig. 2 Fonctions de Bessel qui détermine les amplitudes des composantes latérales;

A titre de démonstration, la Fig. 1e est représentée graphiquement, mais avec l'information de phase en Fig.3. La porteuse et la première composante à droite sont représentées avec une flèche dirigée vers le bas qui représente l'inversion de phase résultant du coefficient négatif de la fonction de Bessel. L'importance de la notation des inversions de phase sera vu dans le paragraphe suivant.

LES FREQUENCES LATERALES REFLECHIES

La richesse de la technique FM réside dans le fait qu'il y a les rapports des fréquences porteuses et de modulations ainsi que des valeurs de l'index qui génèrent des composantes latérales qui tombent dans le domaine négatif des fréquences du spectre.

Ces composantes négatives se "réfléchissent" autour de 0Hz et sont "mixées" aux composantes du domaine positif du spectre.

La variété des relations des fréquences qui résulte de ce mixage est vaste et inclus à la fois un spectre harmonique et non harmonique.

Un exemple simple mais très utile de fréquences latérales réfléchies apparaît si le rapport de la fréquence porteuse et de la fréquence de modulation est égal à 1. Pour les valeurs suivantes :

$$c = 100 \text{ Hz}$$

$$m = 100 \text{ Hz}$$

$$I = 4$$

un tracé du spectre est représenté à la Fig.4a. La composante à 0 Hz représente une constante. Les autres fréquences latérales de gauche sont réfléchies dans le domaine positif avec un changement de signe (inversion de phase) et sont additionnées algébriquement aux composantes déjà présentes (Fig. 4b).

Par exemple la seconde fréquence latérale de gauche est additionnée à la porteuse avec le même signe, augmentant ainsi l'énergie à 100 Hz, tandis que la troisième fréquence latérale est additionnée à la première fréquence latérale de droite avec un signe différent, diminuant l'énergie à 200 Hz. Le spectre réajusté pour les fréquences réfléchies et avec les raies toutes dirigées vers le haut pour donner l'enveloppe du spectre est montré dans la Fig. 4c.

SPECTRE HARMONIQUE ET NON HARMONIQUE

Dans l'exemple précédent, le rapport de la fréquence porteuse à la fréquence de modulation est 1/1, et fait partie de l'ensemble des rapports de nombres entiers.

$$c/m = N1/N2 \text{ avec } N1 \text{ et } N2 \text{ entier}$$

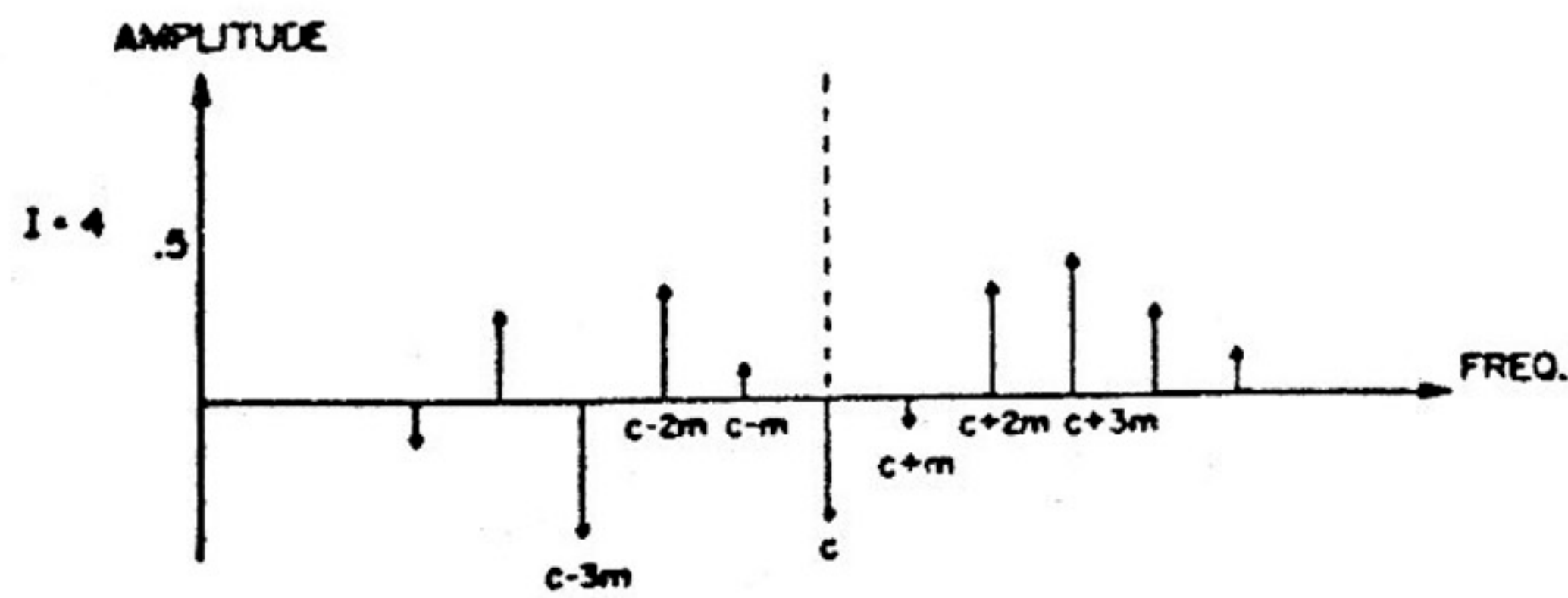


Fig. 3 Tracé du spectre de la fig. 1e mais comprenant ici l'information de phase (index de modulation = 4). Les flèches dirigées vers le bas représentent les composantes spectrales déphasées de 180° .

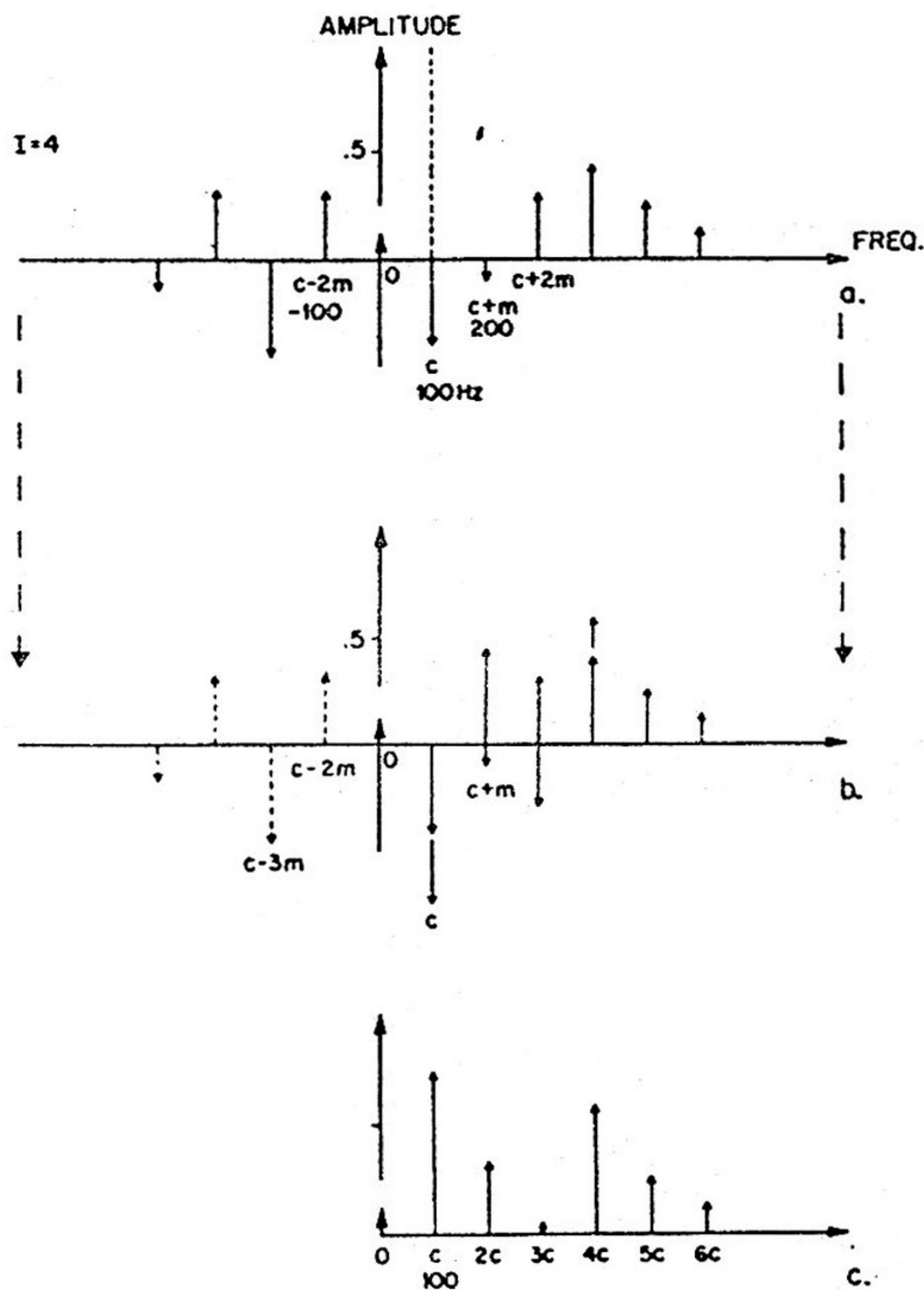


Fig. 4 La Fig. a représente le spectre avec des composantes qui sont situées dans le domaine négatif des fréquences ; b représente le spectre en a mais pour lequel les fréquences du domaine négatif sont "réfléchies" par rapport à 0 Hz avec une inversion de phase et additionnées aux composantes du domaine positif; c est la représentation des amplitudes des composantes de b.

Ces rapports déterminent un spectre harmonique. La fréquence fondamentale de l'onde modulée sera :

$$f_0 = \frac{c}{N1} = \frac{m}{N2}$$

La position des fréquences latérales dans la série harmonique peut-être déterminée à partir des relations suivantes,

$$k = N1 = n N2 \quad \text{pour} \quad n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$$

avec K = numéro de l'harmonique

n = l'ordre de la fréquence latérale

A l'exception de $n = 0$, la porteuse, il y a deux valeurs de K pour chaque ordre, correspondant aux composantes latérales de gauche et de droite.

Une généralisation peut-être faite à partir de rapports simples.

- 1) La porteuse est toujours le $N1$ ème harmonique dans la série.
- 2) Si $N2 = 1$, le spectre contient tous les harmoniques et la fondamentale est la fréquence de modulation ($c = 1/2, 2/1$).
- 3) Quand $N2$ est un nombre pair, le spectre contient seulement des harmoniques impairs ($c = 1/2, 1/4, 3/2, 3/4, 5/2$).

Comme nous l'avons fait remarquer auparavant, le nombre d'harmoniques qui ont une amplitude significative dépend de l'index de modulation. Pour de petits index et rapports où $N1 = 1$, la fondamentale peut ne pas être présente dans le spectre. Exemple Fig. 5 avec $c/m = 4/1$.

Le spectre montre l'évolution des harmoniques avec un index qui augmente. La fondamentale ne devient significative que lorsque l'index est supérieur à 2.

Un spectre non harmonique résulte de rapport de nombre irrationnels

$$(c/m = 1/\sqrt{2}, \pi/\sqrt{3}, 1/e).$$

Dans ce cas les fréquences latérales réfléchies tomberont entre les composantes positives, formant ainsi un spectre dont les composantes ne sont plus des multiples entiers de la fondamentale

La Fig. 6 montre un spectre où le rapport $c/m = 1/\sqrt{2}$ et l'index est égal à 5.

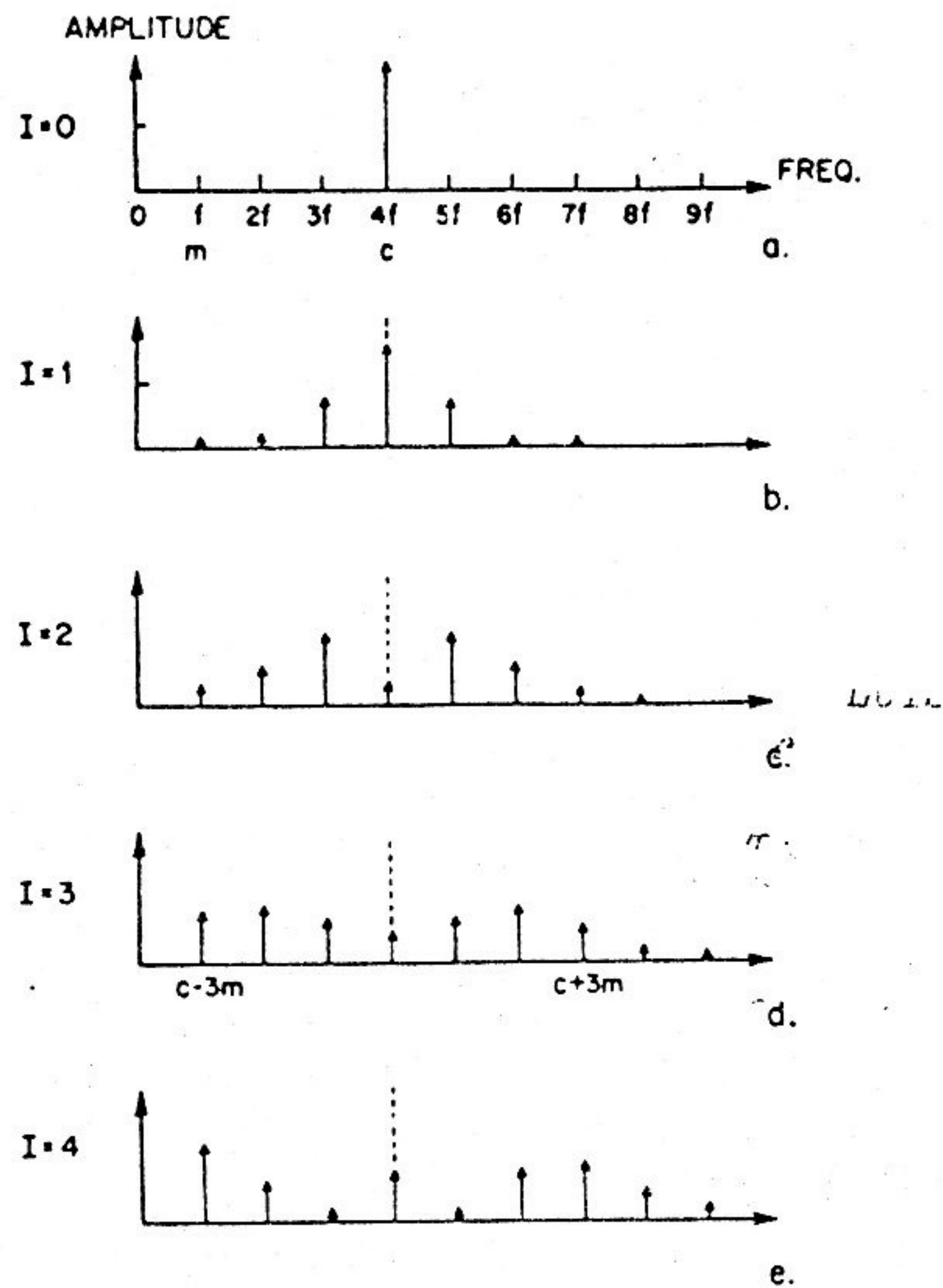


Fig. 5 Représentation du spectre avec un rapport $c/m = 4/1$. Lorsque l'index augmente, les fréquences latérales réfléchies commencent à affecter le spectre pour $I = 3$; la fondamentale, $c-3m$, est notablement plus grande que l'harmonique $c+3m$. En e, la symétrie par rapport à la porteuse n'existe plus.

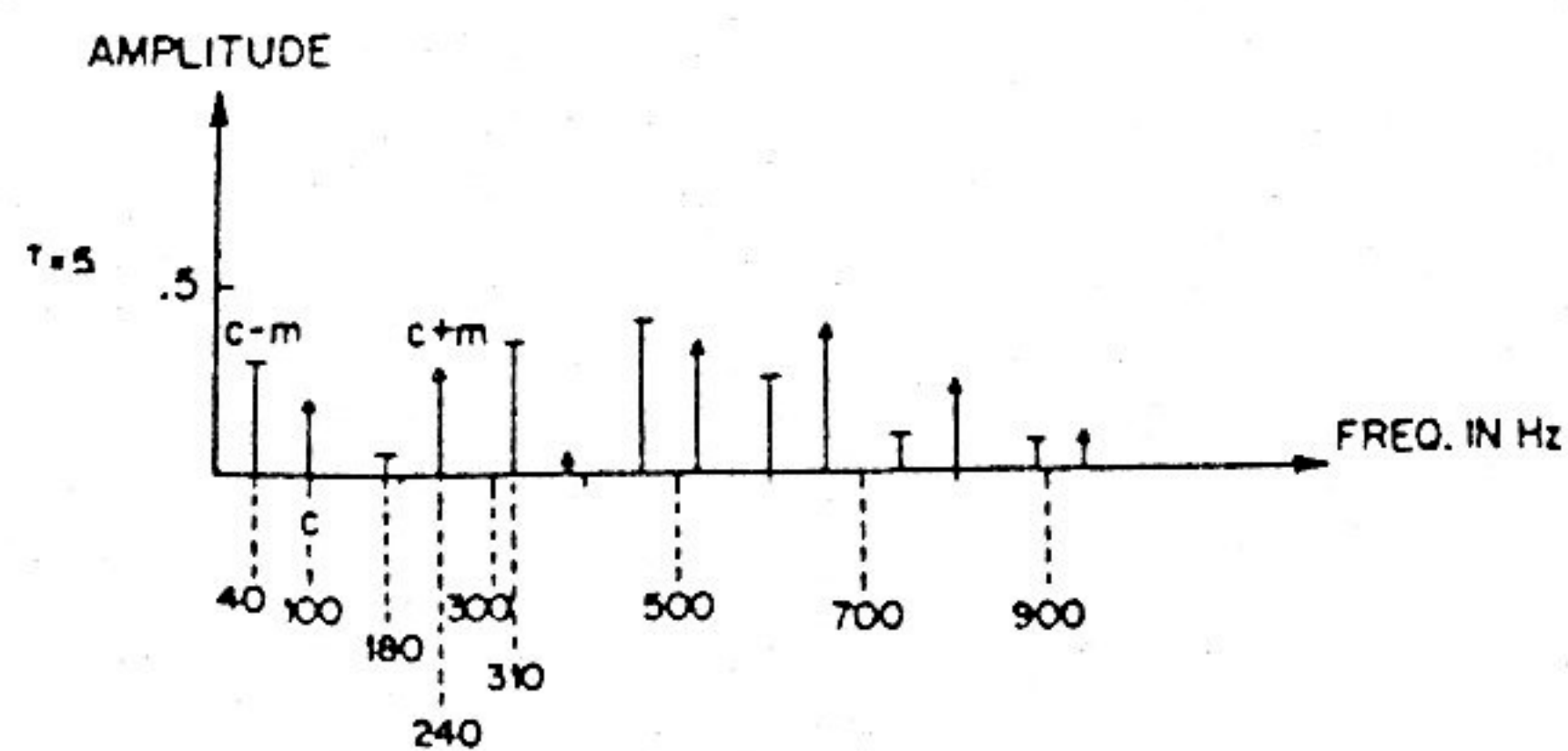


Fig. 6 Spectre non harmonique ou le rapport est $c/m = 1/\sqrt{2}$ et l'index de modulation = 5. Les composantes réfléchies, représentées ici avec une barre à leur extrémité, tombent entre les autres composantes.

En résumé, le rapport des fréquences porteuses et de modulation (c/m), détermine la position des composantes dans le spectre, quand il s'agit des fréquences latérales réfléchies, tandis que l'index (d/m) détermine le nombre des composantes qui ont une amplitude significative.

SPECTRE DYNAMIQUE

Comme cela a été démontré auparavant, l'équation de la FM a une propriété particulièrement intéressante : la complexité du spectre est directement liée à l'index de modulation, de telle manière que lorsque l'index augmente, la largeur du spectre augmente aussi. (Fig. 5)

Si l'index est alors fonction du temps, l'évolution de la largeur du spectre décrit la forme de la fonction.

L'évolution de chacune des composantes du spectre, est déterminée cependant par la forme des fonctions de Bessel. Donc, si l'index augmente avec le temps la totalité de la bande augmentera aussi, mais une composante donnée augmentera ou diminuera en amplitude en fonction du degré de la fonction de Bessel à un index précis. La Fig. 7 est une représentation tridimensionnelle du spectre dynamique FM avec $c/m = 1/1$ et avec une modulation de l'index de 0 à 4.

Si l'index se promène dans une plage importante, de 2 à 10 par exemple, les amplitudes des composantes oscilleront en amplitude autour de 0 pendant que la largeur de bande augmentera.

La présence de fréquences latérales réfléchies dans le spectre dynamique complique énormément l'évolution de chaque composante, dans la mesure où il est difficile de visualiser l'amplitude des fonctions avec précision. Il est possible d'obtenir une impression intuitive de leur variation, qui pour l'article présent est largement suffisant.

La complexité de l'évolution de chacune des composantes du spectre apporte une importante contribution à la qualité si vivante des sons FM.

Alors que l'évolution des composantes est rigidement déterminée, il est surprenant qu'elles peuvent tout de même produire des impressions aussi riches et variées.

IMPLEMENTATION

La détermination des caractéristiques sonores peut-être faites à partir de paramètres qui peuvent avoir dans le cas de la Fig. 4 les valeurs suivantes.

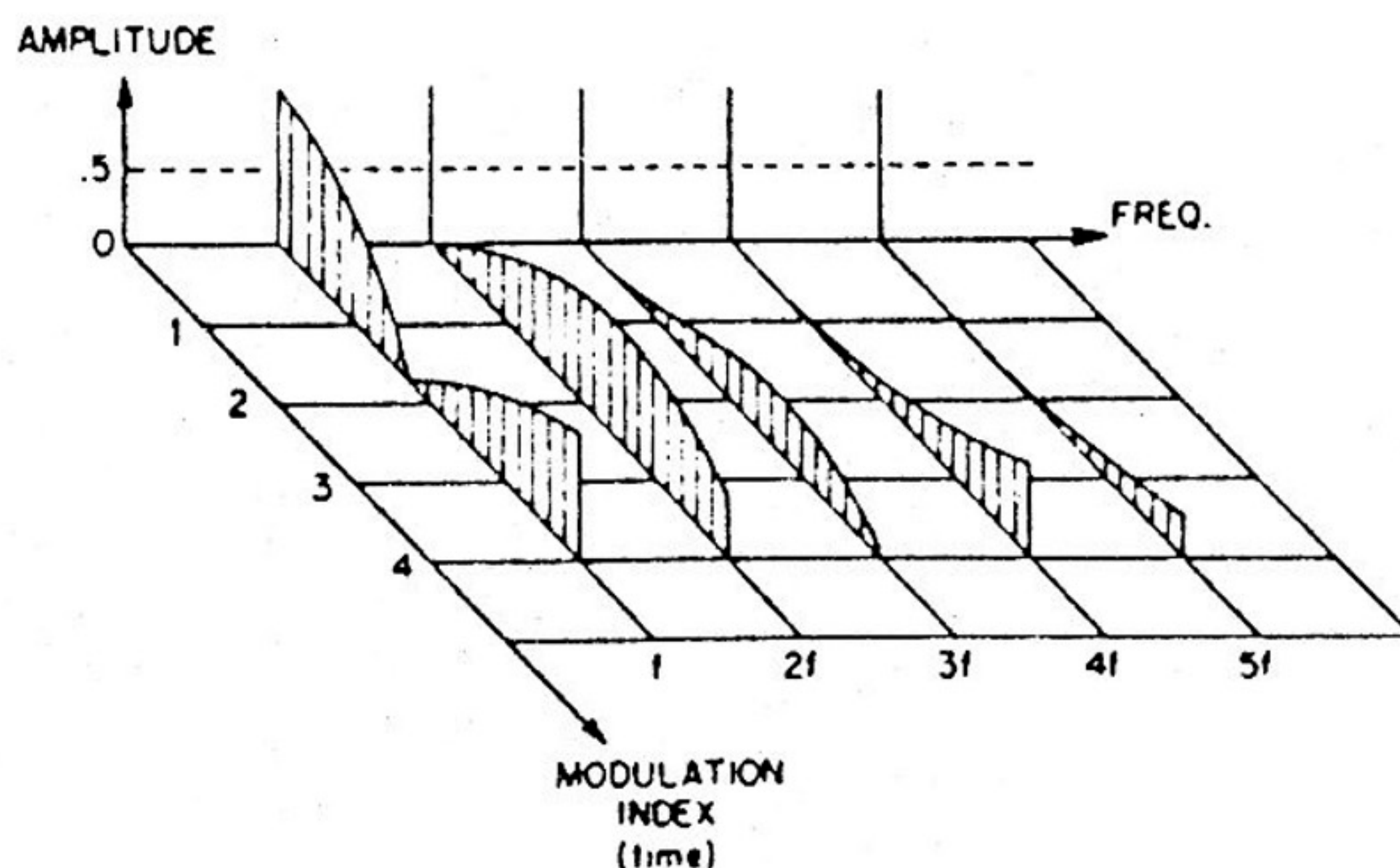


Fig. 7 Spectre dynamique ou le rapport $c/m = 1/1$ et l'index de modulation augmente continuellement de 0 à 4. On remarquera facilement la largeur de bande qui augmente; mais parce que le spectre contient des composantes latérales, réfléchies, l'évolution de chaque composantes séparée n'est pas toujours intuitivement évidente.

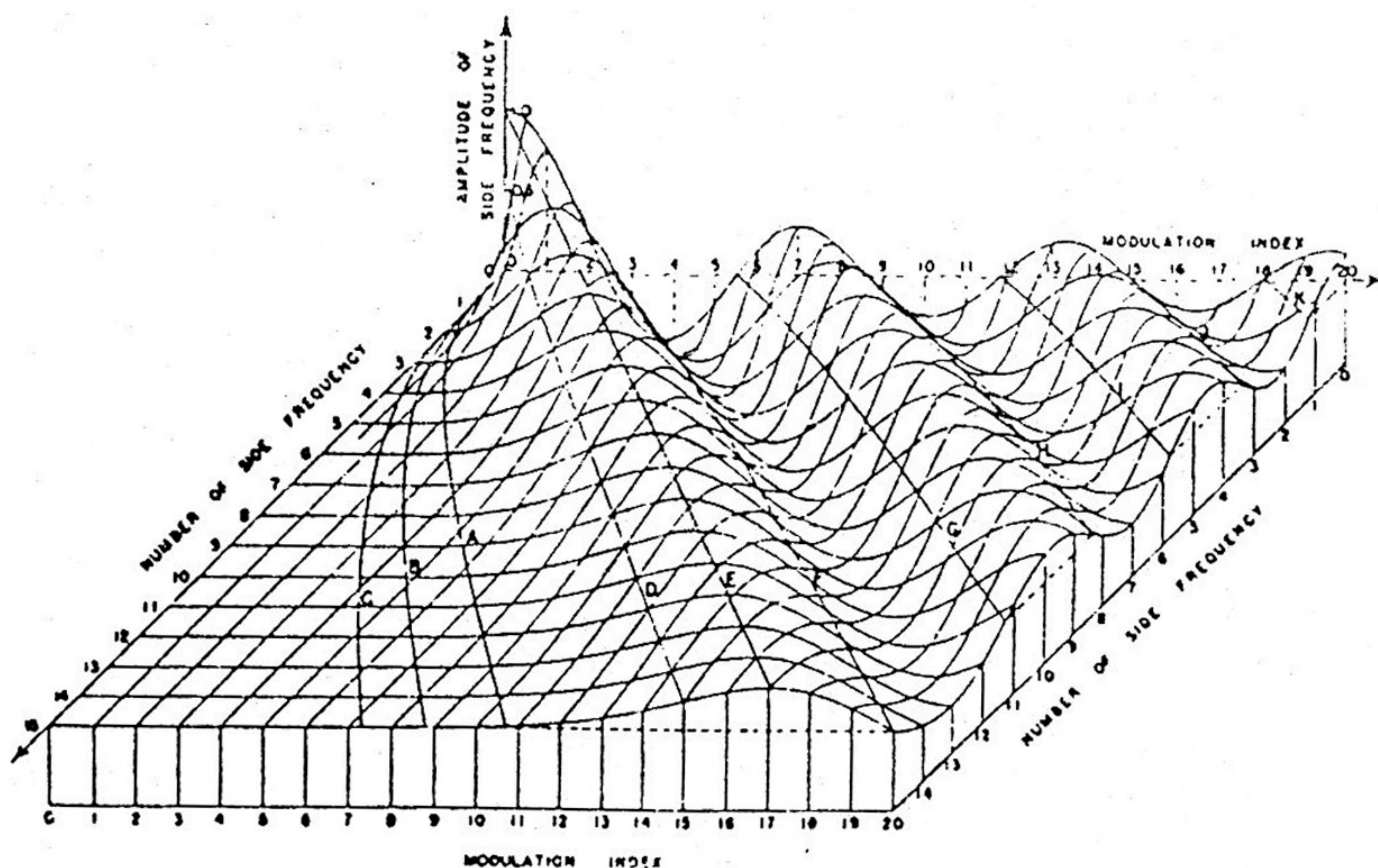


Fig. 8 Fonctions de Bessel J_0 à J_{15} et index de 0 à 20. Cette représentation permet une détermination rapide de la largeur de bande pour un index donné.

$P4 = 1000$ = amplitude de la porteuse modulée. (nombre arbitraire)

$P5 = 100 \text{ Hz}$ = fréquence porteuse

$P6 = 100 \text{ Hz}$ = fréquence modulante

$P7 = 400 \text{ Hz}$ = déviation en fréquence pour $I = 4$

Puisque $I = d/m$, alors $d = I.m$ et pour $I = 4$ la déviation max. = 400 Hz.

Dans le cas ci-dessus qui est typique pour une application FM, la fréquence instantanée de la porteuse modulée devient parfois négative. Ceci étant, de l'équation (1) la somme de αt , une fonction linéaire (rampe), et de $I \sin \beta t$, une sinusoïde d'amplitude I peut produire une courbe qui a une représentation graphique avec des points négatifs et donc un angle de phase qui décroît avec le temps ! Cette condition apparaît lorsque le rapport de la porteuse à la fréquence modulante est très petit ou lorsque l'index de modulation est très grand.

D'une manière plus générale, puisque l'index est une fonction du temps on peut définir 2 paramètres au lieu d'1 qui déterminent les limites de variation de la déviation en fréquence. ($P7$ et $P8$)

On obtient : déviation = $(P8 - P7) \times P6$

L'ensemble des paramètres nécessaire à la génération FM est donc :

$P3$ = durée de la note

$P4$ = amplitude du signal en sortie

$P5$ = fréquence porteuse

$P6$ = fréquence de modulation

$P7$ = index de modulation 1

$P8$ = index de modulation 2

SIMULATION D'INSTRUMENTS

Dans ce paragraphe nous décrirons les techniques pour la simulation de trois classes d'instruments différents.

LES CUIVRES

RISSET, dans son analyse sur les sons de trompettes, fit ressortir une caractéristique fondamentale sur cette classe d'instruments ; la totalité de l'énergie est répartie sur une largeur de bande qui croît pratiquement proportionnellement à l'intensité du son.

Une simulation est décrite dans ce qui suit :

- 1) Les fréquences du spectre sont des séries "harmoniques"
- 2) A la fois des composantes paires et impaires sont présentes par moment
- 3) Les très hautes harmoniques augmentent de façon importante avec l'intensité.
- 4) Le temps de montée de l'amplitude est rapide pour une attaque typique et doit "dépasser" l'état stable (fig. 9)

Les paramètres sont :

P3 = 0,6
P4 = 1000 (paramètre d'amplitude)
P5 = 440 Hz
P6 = 440 Hz (rapport de c/m = 1/1)
P7 = 0
P8 = 5

L'index de modulation (donc la déviation) change de façon directement proportionnelle à l'amplitude de l'onde porteuse modulée : le résultat donnant une croissance et une décroissance des fréquences latérales proportionnellement à l'enveloppe de l'amplitude du son. Le rapport $c/m = 1/1$, produit des composantes qui donnent des séries harmoniques. En changeant les valeurs des index (petites variations) et la forme de la fonction, un grand nombre de variations peuvent être obtenues.

Les bois

Il arrive souvent avec les bois et les orgues à tuyaux que les premières fréquences qui sont prévalantes pendant l'attaque soient les harmoniques les plus hautes. Celles-ci diminuent lors de l'état stable alors que les harmoniques basses augmentent. Ce type d'évolution spectrale peut être fait de différentes manières, par exemple en fixant la fréquence porteuse à un multiple entier de la fréquence modulante, ou en déterminant une fonction de l'index inversement proportionnelle à l'enveloppe de l'amplitude. Une simulation de cette classe de sons serait développée suivant les critères :

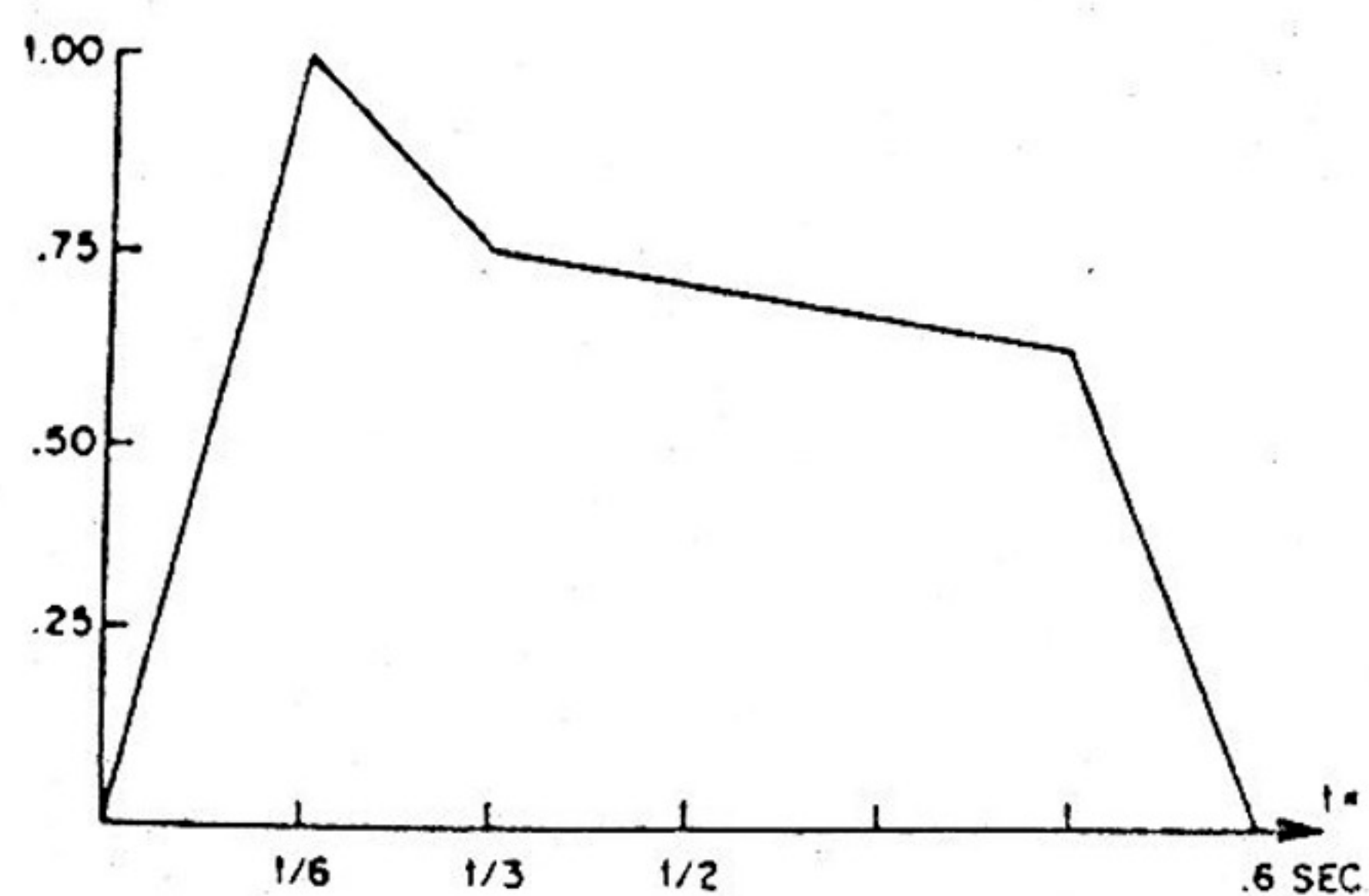


Fig. 9 Enveloppe pour des sons de cuivres.

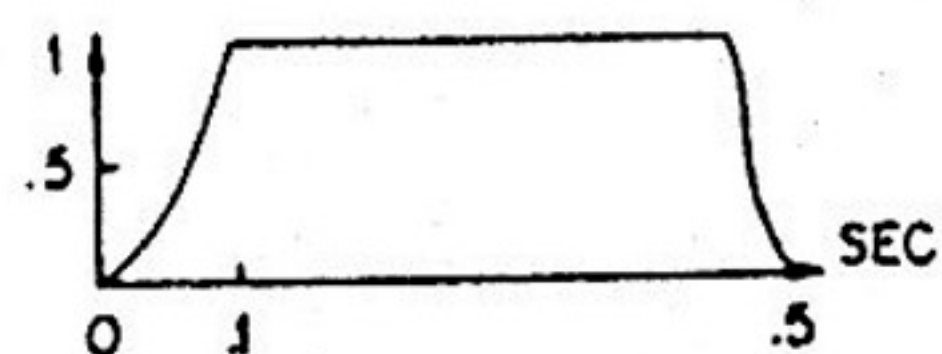


Fig. 10 Enveloppe pour des sons de bois

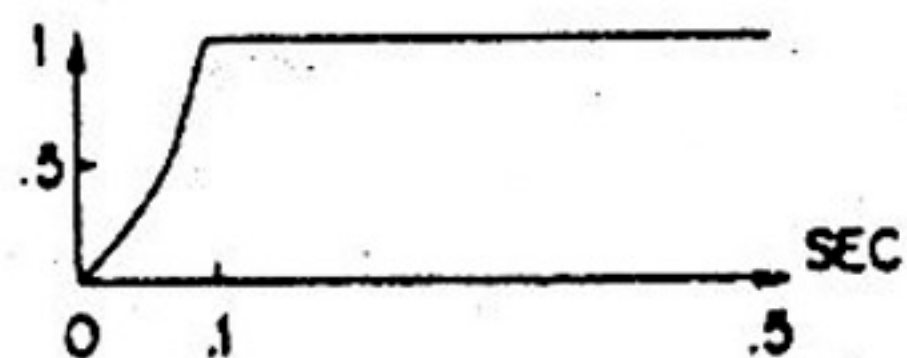


Fig. 11 Courbe d'évolution de l'index de modulation afin d'approcher de façon optimale les sons de bois.

- 1) Les fréquences du spectre tombent dans les séries harmoniques et quelques sons de bois sont à prédominances d'harmoniques impaires.
- 2) Les plus hautes harmoniques diminuent de façon significative avec l'attaque.

Dans le premier exemple, la fréquence porteuse est égale à trois fois la fréquence de modulation, $c/m = 3/1$, et l'enveloppe et la fonction de l'index sont représentées sur la fig. 10.

Puisque pendant l'attaque l'index augmente de 0 à 2, la porteuse (3e harmonique) sera apparente au début du son et diminuera rapidement pendant que les fréquences latérales rempliront le spectre. Les paramètres sont :

$$P5 = 900 \text{ Hz}$$

$$P6 = 300 \text{ Hz}$$

$$P7 = 0$$

$$P8 = 2$$

Un rapport de $c/m = 5/1$ produit un son de basson dans les octaves basses. Les fonctions sont les mêmes qu'auparavant et les paramètres sont :

$$P5 = 500 \text{ Hz}$$

$$P6 = 100 \text{ Hz}$$

$$P7 = 0$$

$$P8 = 1,5$$

Une variété d'instrument à anche peut être produite en choisissant un rapport c/m qui produit des harmoniques impaires. Les paramètres

$$P5 = 900 \text{ Hz}$$

$$P6 = 600 \text{ Hz}$$

$$P7 = 4$$

$$P8 = 2$$

produisent un son de clarinette où 300 Hz est la fondamentale et l'index est inversement proportionnel à l'enveloppe (amplitude). La largeur du spectre diminue alors que l'amplitude augmente durant l'attaque.

Dans tous les exemples ci-dessus, de petites modifications peuvent être faites qui rendent les sons plus intéressants et/ou réalistes.

Une amélioration peut être apportée en additionnant un signal TBF de faible valeur à la fréquence de modulation. Si la valeur 0,5 Hz était additionnée, par exemple, les fréquences latérales réfléchies, ne tomberaient pas exactement

sur les fréquences latérales supérieures, produisant une fréquence de battement ou tremolo de 1 c/s. Le réalisme peut être amélioré en rendant la fonction contrôlant l'index identique à l'enveloppe du son seulement lors de l'attaque et l'état stable, puis constante après. Si la figure 10 est la forme de l'enveloppe, la fig.11 sera la forme de la fonction contrôlant l'index. L'évolution du spectre pendant l'attaque n'est apparemment pas toujours l'inverse pendant le "decay" (descente).

Percussions

Une caractéristique générale des sons percussifs est que le "decay" de l'enveloppe est pratiquement exponentiel comme le montre la Fig. 12. Une simulation de cette classe de sonorités serait développée suivant les critères :

- 1) Les composantes spectrales ne tombent pas habituellement dans les séries harmoniques.
- 2) L'évolution du spectre varie de forme complexe à une forme simple.

Les sons de cloches peuvent être produits en faisant varier l'index de façon directement proportionnelle à l'enveloppe. La Fig. 12 représente à la fois l'amplitude et la fonction de l'index. Les paramètres peuvent être comme suit :

P3 = 15 secondes
P4 = 1000
P5 = 200 Hz
P6 = 280 Hz
P7 = 0
P8 = 10

Le rapport $c/m = 1/1,4$ donne une relation non harmonique des composantes en fréquences. Avec un index initial grand, le spectre est dense et comme l'amplitude décroît, le spectre devient graduellement assez simple. Alors que l'amplitude se rapproche de 0, la fréquence prédominante est la porteuse à 200 Hz. En modifiant la fonction de l'amplitude comme indiqué sur la figure 13, et avec les paramètres suivants, un son de batterie peut être produit.

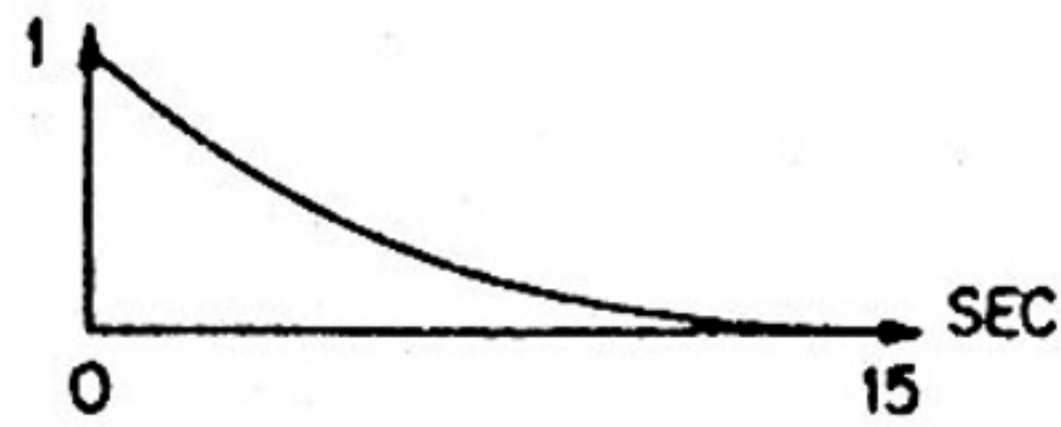


Fig. 12 Enveloppe exponentielle des sons de cloches.

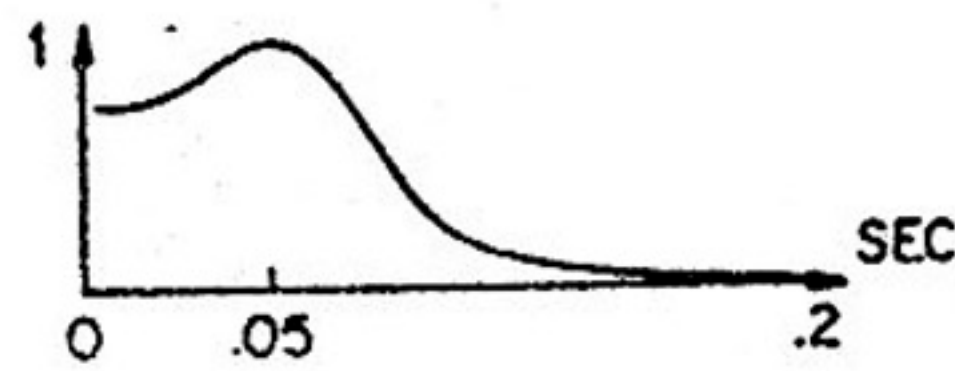


Fig. 13 Modifications de l'enveloppe exponentielle pour obtenir un son de batterie.

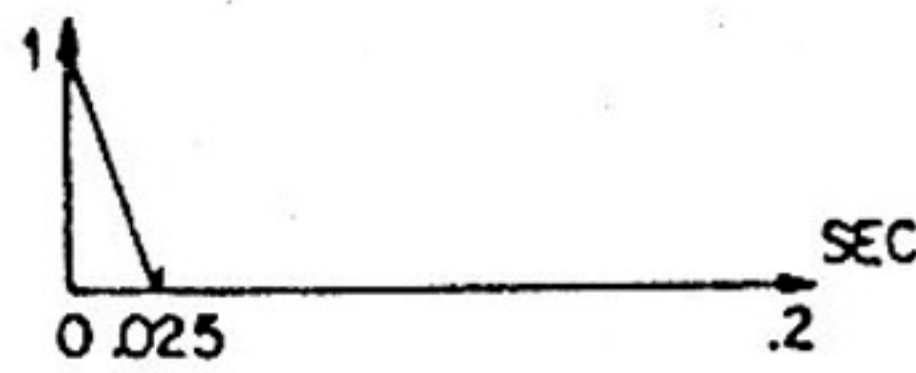


Fig.14 Enveloppe d'un son de caisse en bois.

$$\begin{aligned}
 P3 &= 0,2 \\
 P5 &= 200 \text{ Hz} \\
 P6 &= 280 \text{ Hz} \\
 P7 &= 0 \\
 P8 &= 2
 \end{aligned}$$

La principale différence qui existe avec le son de cloche, en plus de la courte durée, est la réduction importante de la bande passante initiale du spectre.

Un son de caisse en bois est généré en gardant la fonction de l'amplitude précédente, mais en modulant l'index suivant la fonction de la Fig. 14. Les paramètres sont :

$$\begin{aligned}
 P3 &= 0,2 \\
 P5 &= 80 \text{ Hz} \\
 P6 &= 55 \text{ Hz} \\
 P7 &= 0 \\
 P8 &= 25
 \end{aligned}$$

La variation de l'index produit un déploiement brusque d'énergie distribué sur une largeur de bande importante au début, suivi par un rétrécissement rapide du spectre jusqu'à la sinusoïde pure qui produit un effet de résonance prononcé. On peut noter aussi qu'il apparaît une modulation sur l'amplitude assez complexe. Du fait que les fonctions de Bessel sont quasi-périodiques autour de 0, les composantes subissent une modulation asynchrone due à la variation rapide de l'index sur une plage assez grande.

Les exemples ci-dessus sont censés donner une idée de la puissance et de l'économie que constitue la synthèse FM, sans pour cela épuiser le potentiel de cet instrument. En utilisant une deuxième fréquence porteuse associée à des générateurs supplémentaires (même fréquence de modulation), d'autres contrôles peuvent être apportés sur le spectre. Ainsi, cette deuxième porteuse qui peut être un multiple de la première ajoute des composantes dans une autre région du spectre augmentant ainsi les possibilités sonores.

CONCLUSION *****

La technologie de synthèse FM permet un contrôle temporel très simple sur la largeur de bande du spectre dont les composantes en fréquence peuvent avoir une variété de relations. Puisque la "nature" fait la majeure partie du "travail", la technique est de loin beaucoup plus simple que la synthèse additive ou soustractive pour la production d'un spectre identique.

Peut être l'aspect le plus surprenant de la technique FM est que le contrôle apparemment limité imposé par la "nature" sur l'évolution individuelle des composantes spectrales, montre qu'il n'y a pas de limitation tant que la subjectivité est concernée.

Ceci fait suggérer que la courbe précise d'amplitude pour chacune des composantes dans un spectre dynamique complexe n'est pas aussi importante que le caractère général de l'évolution de ces composantes en groupe.

Les applications sont certainement plus nombreuses dans le domaine des sons inconnus, que dans celui des sons connus.

Il y a cependant, un grand intérêt en se limitant d'abord à la simulation des sons naturels puisque nous avons été formés sur une perception de l'image sonore dont on peut mesurer le succès.