



Radio navigation et équipements sol :  
**DME** : Principe, Emission et  
Maintenance



Eric SOLER

## Table des matières

I.)	Généralités.....	3
I.1	Définition et normalisation.....	3
I.2	Erreur de distance oblique.....	3
I.3	Domaines d'application .....	4
I.3.1	Navigation en route : DME/N .....	4
I.3.2	Atterrissage DME/P .....	5
I.4	Exploitation à bord .....	5
I.4.1	Sélection d'une station DME .....	5
I.4.2	Visualisation.....	5
II.)	Principe de la définition radioélectrique d'une distance.....	6
II.1	Principe général.....	6
II.2	Estimation de l'instant d'arrivée de l'impulsion.....	7
II.2.1	Instant associé à la mi amplitude du signal DME/N .....	9
II.2.2	Méthode "DAC" en DME/P mode FA .....	10
III.)	Nombre d'impulsions émises.....	12
III.1	Capacité du système .....	12
III.2	Fréquence de répétition des impulsions d'interrogation.....	12
III.2.1	DME/N.....	12
III.2.2	DME/P.....	12
III.3	Régime d'émission du transpondeur sol.....	12
III.4	Rendement en réponses du transpondeur .....	13
III.4.1	Identification du transpondeur .....	13
III.4.2	Temps mort du récepteur.....	14
III.4.3	Ordre de priorité pour émettre.....	14
IV.)	Fréquences radio électriques et répartition des canaux .....	15
IV.1	Définition du canal .....	15
IV.2	DME/N : canaux X et Y .....	15
IV.3	DME/P : canaux X, Y, Z et W .....	16
V.)	Synoptique général d'un DME .....	17
VI.)	Retard systématique .....	18
VI.1	Définitions .....	18
VI.2	Chronogrammes .....	19
VII.)	Format du signal.....	20
VII.1	Exemples de forme d'impulsion et du spectre associé .....	20
VII.2	DME/N.....	21
VII.3	DME/P.....	22
VII.4	Spécification impulsions DME/N et P .....	23
VIII.)	Bilan de liaison.....	24
VIII.1	Rappel : équation des télécommunications .....	24
VIII.2	Sens Sol/Air.....	25
VIII.3	Sens Air/Sol.....	26
IX.)	Contrôle des DME.....	27
IX.1	Contrôle au sol .....	27
IX.2	Contrôle en vol.....	28
IX.3	Normes concernant le DME .....	29

## I.) Généralités

### I.1 Définition et normalisation

Le DME, acronyme de "Distance Measuring Equipment", est le système de mesure de distance normalisé par l'OACI depuis 1960. Les normes et pratiques recommandées concernant le DME sont résumées dans l'annexe 10 de l'OACI. Elles s'appliquent aux :

- DME/N : dispositif de mesure de distance répondant principalement aux exigences opérationnelles de la navigation en route. La lettre N (Narrow) signifie spectre étroit.
- DME/P : élément de mesure de distance de précision du système d'atterrissage hyperfréquence MLS (Microwave Landing System). La lettre P signifie : mesure précise de distance. De plus, il a les mêmes caractéristiques de spectre que le DME/N.

Le système DME permet la mesure à bord de la distance oblique entre un aéronef équipé et le point de référence d'une installation sol dûment sélectionnée et identifiée (transpondeur sol).

### I.2 Erreur de distance oblique

L'information la plus intéressante pour le pilote n'est pas la distance oblique  $D_s$ , mais la distance en projection sur l'horizontale  $D$ . Une correction peut être effectuée par l'ordinateur de bord à partir de la connaissance de la différence d'altitude entre l'avion et le transpondeur sol. Mais la distance affichée par le transpondeur bord reste la distance oblique.

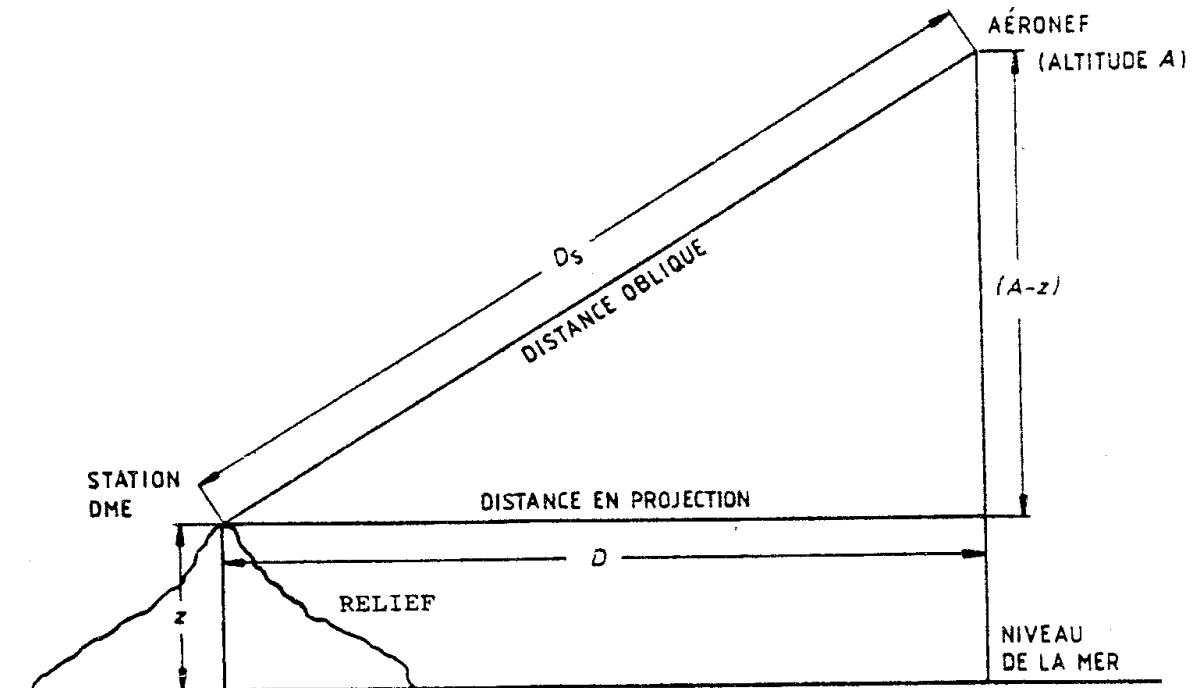


Figure 1 : Illustration de la distance oblique

$$D^2 = D_s^2 - (A-Z)^2 \Leftrightarrow D = D_s \left[ 1 - \frac{(A-Z)^2}{D_s^2} \right]^{1/2}$$

$$D \cong D_s \left[ 1 - \frac{(A-Z)^2}{2D_s^2} + \dots \right] \text{ (développement limité d'ordre 1).}$$

L'erreur absolue est :  $D_s - D = \frac{(A-Z)^2}{2D_s}$ . Soit en erreur relative :  $\frac{D_s - D}{D_s} = \frac{(A-Z)^2}{2D_s^2}$

L'erreur relative en fonction de la distance oblique  $D_s$  et de la différence d'altitude  $(A-Z)$  est donnée sur la courbe suivante :

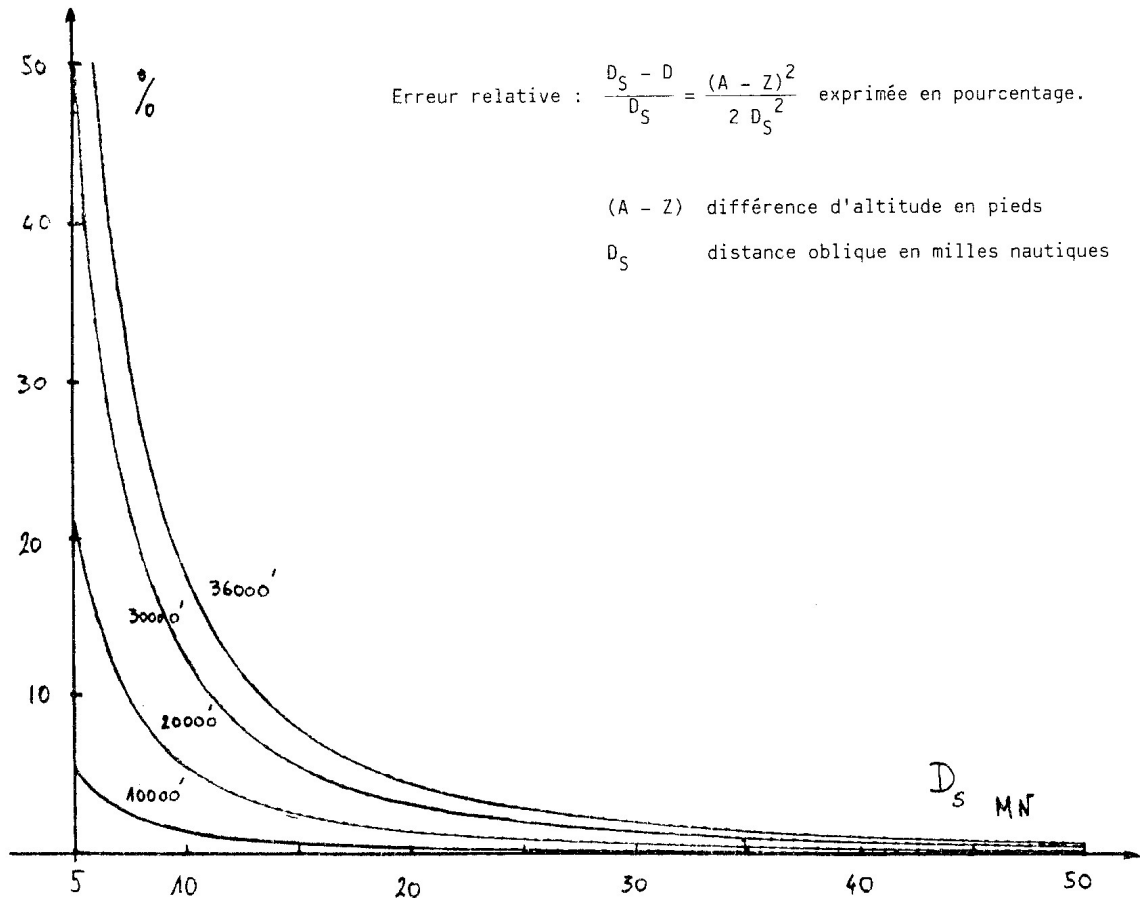


Figure 2 : Erreur relative en fonction de la distance oblique

### I.3 Domaines d'application

#### I.3.1 Navigation en route : DME/N

Les performances exigées sont les suivantes :

- Couverture au moins égale à celle d'un VOR, soit 200 NM.
- Précision : l'erreur totale du système ne dépassera pas  $\pm 0,5$  NM ou 3% de la distance.

### a) VOR-DME

L'information distance DME associée à une information azimuth VOR permet au pilote qui navigue suivant une radiale de connaître sa progression sur celle-ci. En général, les stations VOR et DME sont co-implantées et leurs fréquences sont appariées.

### b) DME-DME

Le calcul de la position s'effectue à partir de mesure de distances à plusieurs stations sol. En navigation horizontale, trois mesures sont nécessaires pour résoudre l'ambiguïté. La position de l'avion est donnée en coordonnées polaire par rapport à une station sol de référence. Dans 95% de l'espace aérien français au dessus de 20 000 pieds, la couverture multi DME est suffisante pour cette utilisation.

## **I.3.2 Atterrissage DME/P**

Le DME/P fait partie intégrante du système d'atterrissage MLS. Le format de signal du DME/P définit deux modes de fonctionnement. Le mode approche initiale (IA) et le mode approche finale (FA). Le mode IA est compatible avec le DME/N et sert à assurer une précision accrue dans les phases initiales de l'approche. Le mode FA assure une précision améliorée dans la zone d'approche finale. Les deux modes sont associés dans une seule installation au sol DME/P et les caractéristiques du système sont telles que les fonctions DME/N et DME/P peuvent être combinées dans un interrogateur unique. Les modes IA et FA sont identifiés par des codes de modulation d'impulsions.

Dans le secteur d'approche du MLS, la couverture du DME/P s'étend au minimum à 22 NM du transpondeur sol. L'interrogateur ne fonctionne pas en mode FA à plus de 7 NM du lieu d'implantation du DME.

## **I.4 Exploitation à bord**

### **I.4.1 Sélection d'une station DME**

Une station DME est caractérisée par :

- Un point de référence sur la carte.
- Un canal DME, c'est à dire deux fréquences UHF d'utilisation (une pour l'interrogation, l'autre pour la réponse). On sélectionnera et on affichera la fréquence VHF Nav (VOR/ILS) qui lui est associée.
- Un indicatif : 2 ou 3 lettres qui identifient le transpondeur sol et qui sont émises périodiquement sous la forme de points et de traits en code morse.

### **I.4.2 Visualisation**

L'affichage de la distance est numérique sur un indicateur simple ou double. La distance est exprimée en miles nautiques (NM). La précision d'affichage est généralement de 0,1 NM. Cet affichage fait souvent partie d'un affichage intégré multifonction.

## II.) Principe de la définition radioélectrique d'une distance

### II.1 Principe général

L'information de distance est obtenue à partir de la mesure à bord de l'avion du temps de propagation aller-retour d'une onde électromagnétique. Le schéma de liaison fait intervenir à bord et au sol un émetteur, un récepteur et deux fréquences UHF :  $f_{\text{int}}$  fréquence d'interrogation et  $f_{\text{rép}}$  fréquence de réponse.

Le temps mesuré  $T_m$  est l'intervalle de temps entre l'instant d'émission d'un signal d'interrogation et l'instant de réception d'un signal de réponse.

$$T_m = 2t + \Delta t \Leftrightarrow t = \frac{1}{2}[T_m - \Delta t]$$

$d$  est la distance oblique qui vaut :  $d = c.t$  avec  $c$  vitesse de la lumière =  $300.10^6$  m/s

Soit :  $d = \frac{c}{2}[T_m - \Delta t]$  avec :  $d$  distance oblique

$T_m$  intervalle de temps mesuré  
 $\Delta t$  retard systématique

On peut réduire la formule générale précédente en une formule pratique :

$$d_{(m)} = 150[T_{m(\mu s)} - \Delta t_{(\mu s)}]$$

Le principe de la mesure de  $T_m$  est donné sur le chronogramme suivant :

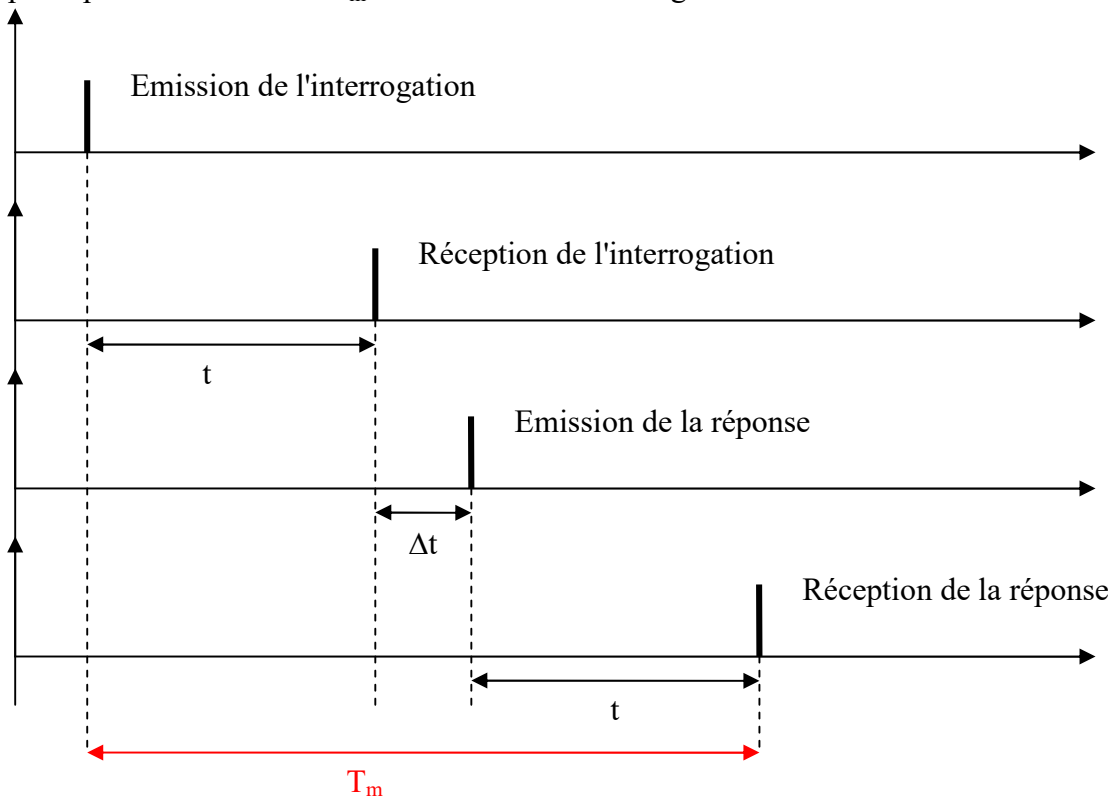


Figure 3 : Principe de mesure radioélectrique d'une distance

## II.2 Estimation de l'instant d'arrivée de l'impulsion

Les différentes caractéristiques de l'enveloppe de l'impulsion, encore appelée signal vidéo, sont définies par l'OACI :

- $A$  : amplitude crête de l'impulsion.
- $\tau$  : durée de l'impulsion. C'est l'intervalle de temps entre le point mi-amplitude du bord avant de l'enveloppe de l'impulsion et le point mi-amplitude du bord arrière.
- $t_m$  : temps de montée de l'impulsion. Intervalle de temps entre les points d'amplitude  $0,1A$  et  $0,9A$  du bord avant de l'enveloppe de l'impulsion.
- $t_d$  : temps de descente de l'impulsion. Intervalle de temps entre les points d'amplitude  $0,1A$  et  $0,9A$  du bord arrière de l'enveloppe de l'impulsion.
- $t_{mp}$  : temps de montée partielle. Intervalle de temps entre les points d'amplitude  $0,05A$  et  $0,3A$  du bord avant de l'enveloppe de l'impulsion.
- Origine virtuelle : point où la droite (ih) passant les points  $0,3A$  et  $0,05A$  de bord avant de l'enveloppe coupe l'axe d'amplitude nulle.

Ce n'est pas l'enveloppe de l'impulsion dans son ensemble qui va nous intéresser ici, mais un point de son front de montée en tant qu'instant de décision et point de mesure du temps.

Les différents points d'amplitude sont représentés sur le schéma suivant :

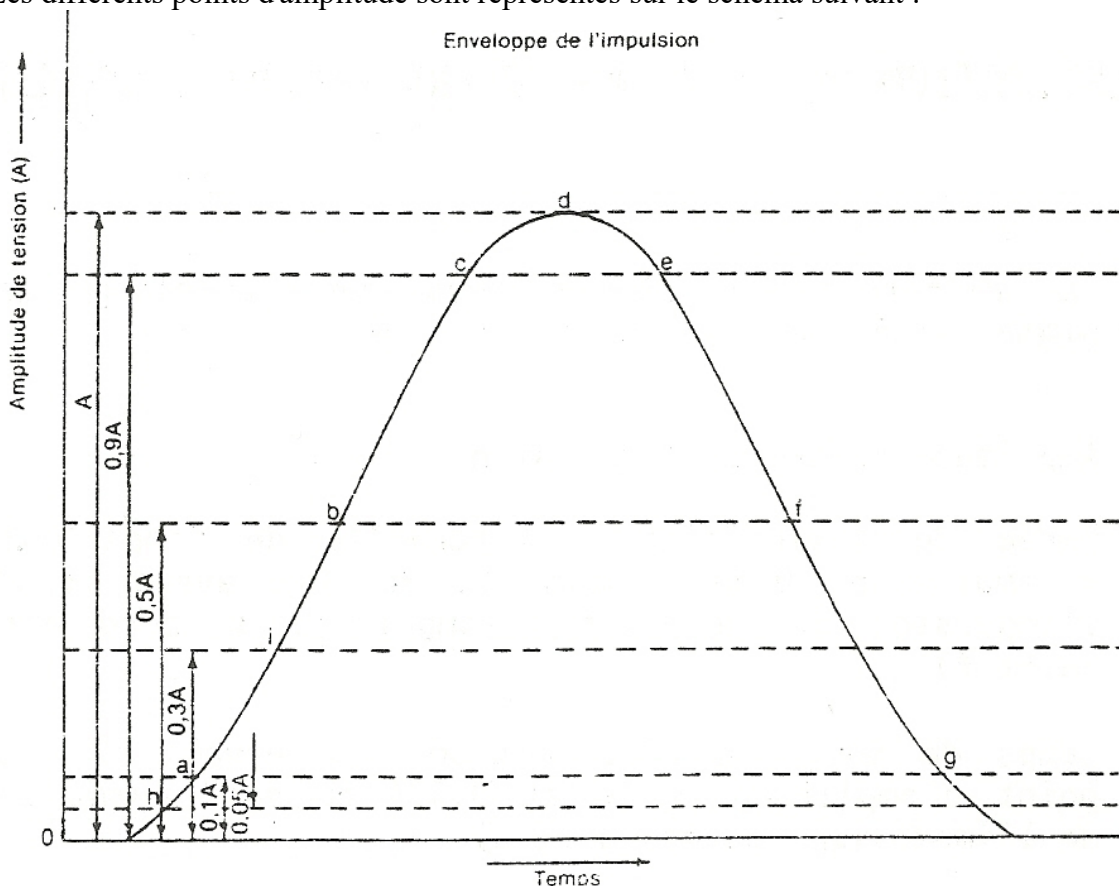


Figure 4 : Enveloppe de l'impulsion DME

L'origine virtuelle précédemment définie est représentée sur la figure suivante :

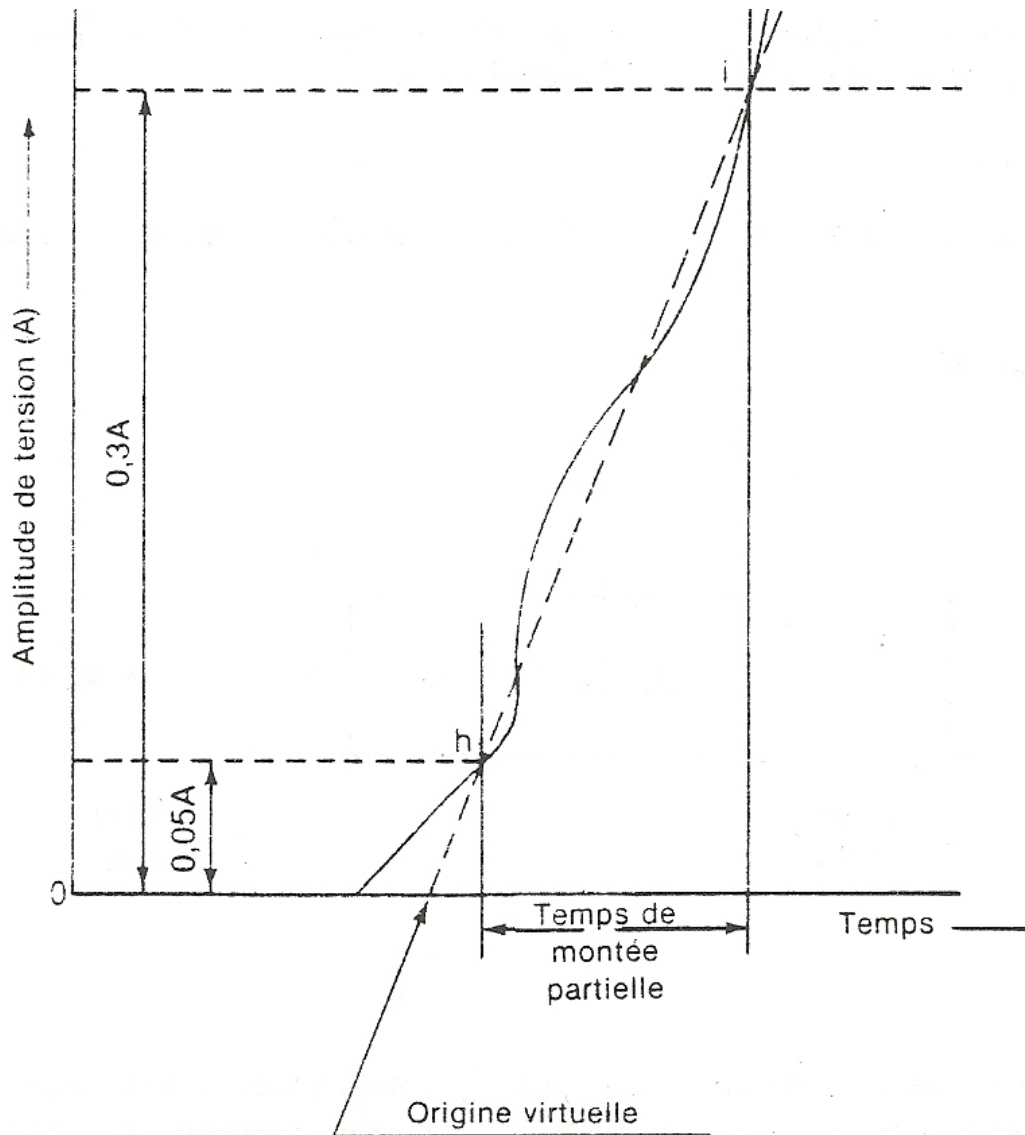


Figure 5 : Définition de l'origine virtuelle

Les facteurs qui affectent la précision de l'estimation sont :

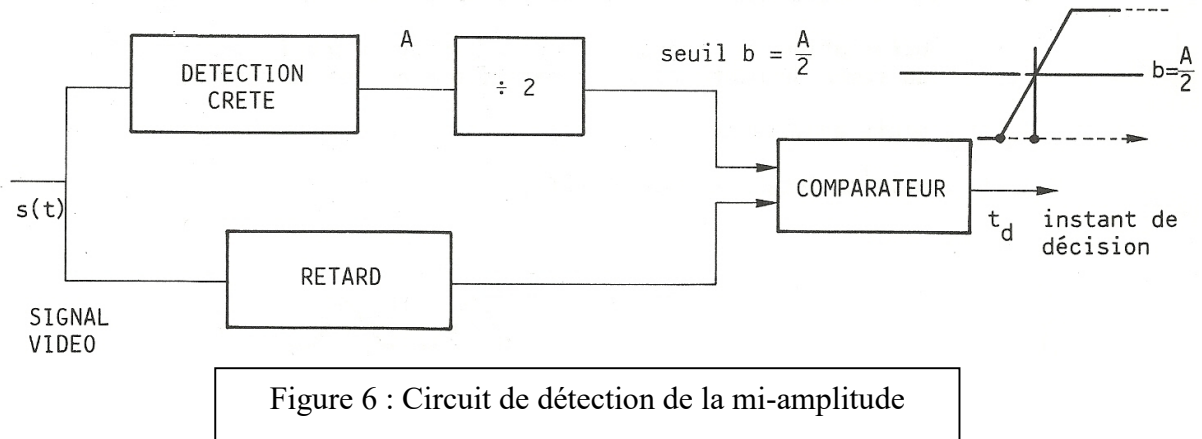
- Déformation du signal : variation de l'amplitude, variation du temps de montée (non linéarité des étages de réception ...).
- Bruit additionnel.
- Multitrajets (échos proches ...).
- Instabilité du seuil de mesure.

Deux méthodes d'estimation de l'instant d'arrivée de l'impulsion sont utilisées :



## II.2.1 Instant associé à la mi amplitude du signal DME/N

Le circuit utilisé est le suivant :



Cette méthode permet de s'affranchir d'une variation de l'amplitude du signal (ce qui ne serait pas le cas pour une détection à seuil constant) mais elle est influencée par une variation du temps de montée.

La figure suivante décrit l'erreur induite par une variation de l'amplitude d'entrée dans le cas d'une détection à seuil constant et celle due à une variation du temps de montée dans le cas d'une détection à mi-amplitude.

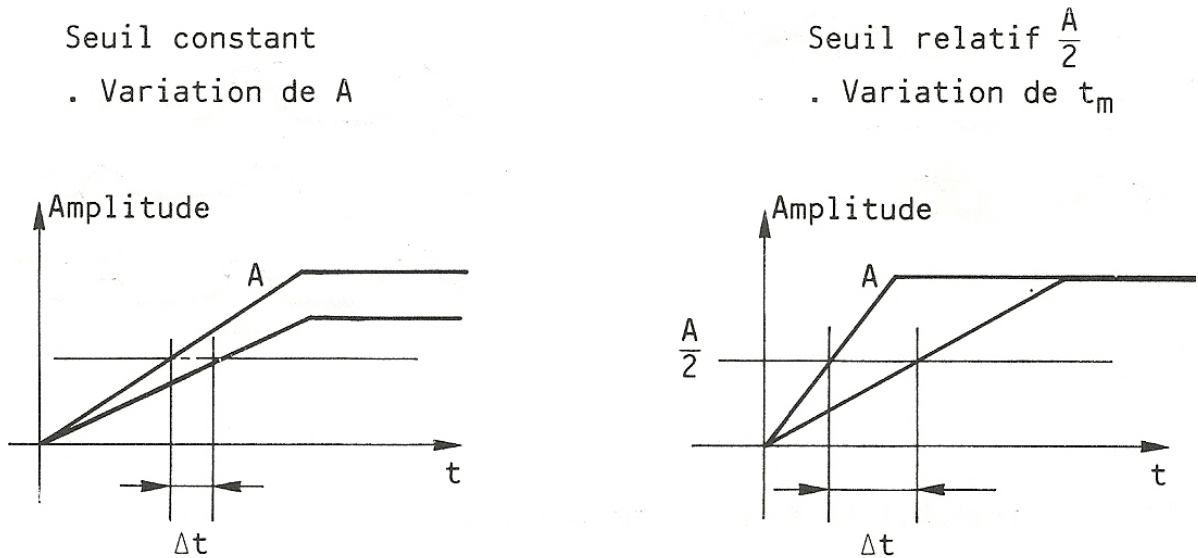


Figure 7 : Erreur d'estimation de l'instant d'arrivée pour deux cas différents

## II.2.2 Méthode "DAC" en DME/P mode FA

DAC : Delay Attenuate Compare (retard, atténuation, comparaison).

L'idée est de mesurer l'origine virtuelle du front avant d'une enveloppe d'impulsion quelle que soit son amplitude et son temps de montée. La mesure doit avoir lieu pendant le temps de montée partielle de l'impulsion et donc avant l'arrivée des échos parasites (dont la majorité ont un retard supérieur à  $t_{mp}$ ). L'instant de décision est  $t_D$ , quand l'impulsion retardée coupe l'impulsion atténuée. L'intervalle de temps  $[0, t_D]$  est indépendant de la forme de l'impulsion.

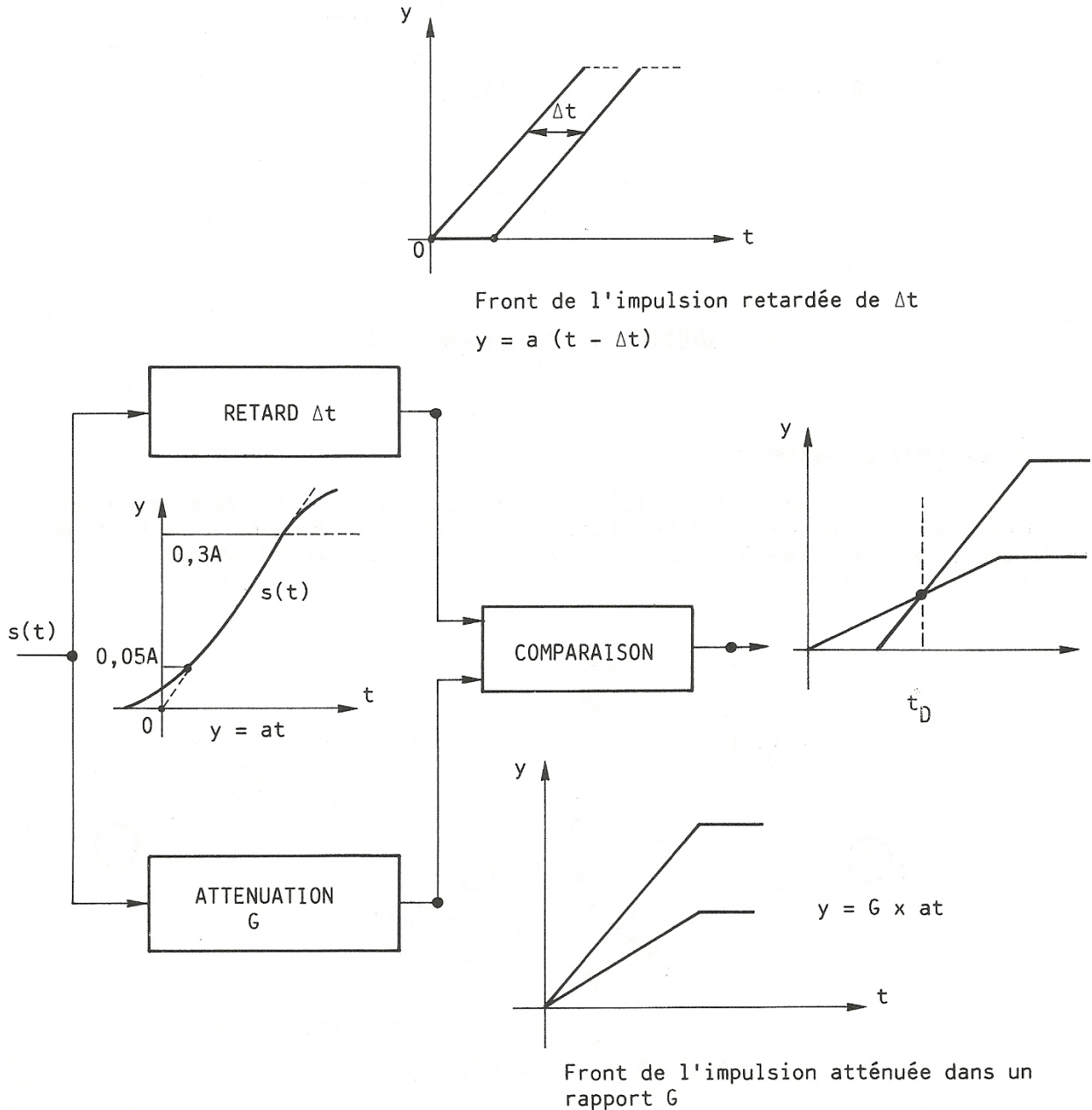


Figure 8 : Principe de la méthode DAC

La valeur "a" est représentative de la forme de l'impulsion.

Ici, à  $t = t_D$ , on a :

$$a.(t_D - \Delta t) = G.a.t_D \Leftrightarrow t_D.a.(1 - G) = a.\Delta t .$$

$$\text{D'où : } \boxed{t_D = \frac{\Delta t}{(1 - G)}}$$

On s'aperçoit que l'estimation de l'instant d'arrivée  $t_D$  de l'impulsion est indépendante de "a" (donc de la forme de l'impulsion) et de son amplitude.

## III.) Nombre d'impulsions émises

### III.1 Capacité du système

Pour rappel, le DME est un système coopératif avec les avions. Ces derniers posent la même question : "quelle est ma distance ?". Le transpondeur sol doit répondre à tous et les traitera séquentiellement l'une après l'autre. La participation active du transpondeur sol qui n'a pas une capacité infinie fait du DME un système qui peut saturer. L'AOCI recommande que le transpondeur soit capable de traiter une centaine d'aéronefs.

### III.2 Fréquence de répétition des impulsions d'interrogation

#### III.2.1 DME/N

La fréquence moyenne de répétition des impulsions d'interrogation doit être inférieure à 30 paires par seconde. Cette fréquence peut être augmentée pendant la période de recherche (période pendant laquelle l'interrogateur tente d'accrocher les réponses à ses propres interrogations) tout en restant inférieure à 150 paires par seconde. Un chiffre moyen de 25 paires par seconde est tout à fait réaliste.

#### III.2.2 DME/P

La fréquence de répétition des impulsions de l'interrogateur ne dépassera pas les valeurs suivantes :

	Paires / seconde
Recherche	40
Avion au sol	5
Poursuite en mode IA	16
Poursuite en mode FA	40

### III.3 Régime d'émission du transpondeur sol

Quel est le nombre moyen de paires d'impulsions émises par le transpondeur sol ?

Le régime minimal est de 700 pps (paires par seconde). L'existence d'un régime minimal impose l'émission de paires d'impulsions aléatoires de remplissage quand le nombre de paires d'impulsions de réponse n'atteint pas ce minimum.

Le régime maximal est de 2700 pps. Ce régime permet de traiter environ 100 aéronefs. La charge des interrogations dépend :

- Du nombre d'avions, du nombre d'interrogeurs en service à bord de chaque avion, du mode de fonctionnement des interrogeurs en service (recherche, poursuite, approche initiale ou finale...).

- De la sensibilité du récepteur. Celle-ci est réduite automatiquement quand la charge du transpondeur atteint 90% du régime d'émission maximal d'émission (il n'y a pas de réduction de la sensibilité en mode DME/P FA).

### III.4 Rendement en réponses du transpondeur

C'est le rapport entre le nombre de réponses émises par le transpondeur et le nombre total d'interrogations valides reçues. L'OACI exige 70% pour le DME/N et le DME/P IA et 80% pour le DME/P FA.

Le rendement du transpondeur est altéré essentiellement par l'émission d'un signal d'identification prioritaire et l'existence d'un temps mort du récepteur (mise hors service du récepteur)

#### III.4.1 Identification du transpondeur

Tout transpondeur émet un signal d'identification sous forme de points et de traits (code morse). Pendant ces périodes de manipulation, on a l'émission de paires d'impulsions à la fréquence de répétition de 1350 pps. La fréquence 1350 Hz peut être utilisée par l'équipement bord comme signal auditif destiné au pilote. Les normes pour un groupe codé d'indentification sont les suivantes :

- Renouvellement : 40s.
- Durée totale maximale d'émission : 10s.
- Durée du point : 0,1 à 0,16s.
- Durée du trait : 3 fois la durée du point.
- Durée de l'intervalle : durée du point.
- Durée de l'intervalle entre lettre : durée du trait.

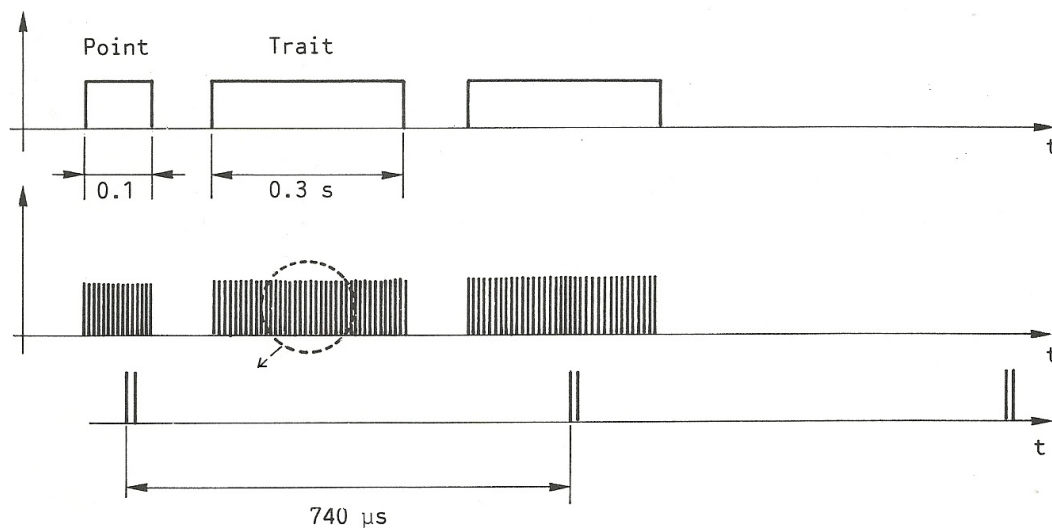


Figure 9 : Identification du DME

Entre les temps d'émission d'un point ou d'un trait, les impulsions de réponse sont émises. En DME/P FA, les paires d'impulsions de réponse ont priorité par rapport aux paires d'identification.

### **III.4.2 Temps mort du récepteur**

C'est une période d'interruption du récepteur destinée :

- A le protéger pendant l'émission des réponses.
- A lui éviter de répondre à des échos résultant de multitrajets (l'équipement ne saurait pas reconnaître le signal reçu et son écho).

Ce temps mort ne dépassera pas 60  $\mu$ s après qu'une interrogation correcte ait été décodée. Cependant, dans des cas extrêmes, lorsque le lieu d'implantation du transpondeur est tel que les réflexions indésirables posent problèmes, on pourra rallonger le temps mort, mais seulement de la quantité minimal nécessaire pour permettre la suppression des échos dans le cas du DME/N et du DME/P IA.

### **III.4.3 Ordre de priorité pour émettre**

Compte tenu de ce qui précède, le transpondeur respectera les priorités d'émission suivants :

1. Emission de l'indicatif.
2. Réponse aux avions (sauf cas du DME/P en mode FA qui devient la priorité 1).
3. Réponses aux moniteurs (fréquence d'interrogation  $\leq$  1200 pps).
4. Emission de remplissage (également appelé "squitter").

## IV.) Fréquences radio électriques et répartition des canaux

### IV.1 Définition du canal

La bande de fréquence attribuée au DME s'étend de 962 MHz à 1213 MHz. Le système DME n'est pas le seul à utiliser cette bande. Le radar secondaire utilise les fréquences allant de 1030 à 1090 MHz. Les fréquences d'interrogation et de réponse sont assignées de manière à assurer un espacement de 1 MHz entre les canaux et pour simplifier les équipements, on fait en sorte que  $|f_{\text{int}} - f_{\text{rép}}| = 63\text{MHz}$ .

Toutes les impulsions d'interrogation et de réponse sont émises par paire. Cette méthode de codage des émissions DME par espacement entre impulsions d'une même paire permet d'utiliser chaque fréquence plus d'une fois et permet une discrimination suffisante contre les espacements d'impulsions indésirables ou les impulsions isolées.

Un canal DME est défini par :

- Une fréquence d'interrogation :  $f_{\text{int}}$ .
- Une fréquence réponse :  $f_{\text{rép}}$ .
- Un espacement entre impulsion d'une même paire d'interrogation :  $\theta_{\text{int}}$ .
- Un espacement entre impulsion d'une même paire de réponse :  $\theta_{\text{rép}}$ .

$f_{\text{int}}$ , fréquence UHF d'interrogation est à la fois la fréquence d'émission de l'équipement de bord et la fréquence de réception du transpondeur sol. De même,  $f_{\text{rép}}$ , fréquence UHF de réponse, est à la fois la fréquence d'émission du transpondeur sol et la fréquence de réception de l'équipement de bord.

### IV.2 DME/N : canaux X et Y

Les créateurs du DME ont d'abord inventé 126 canaux en utilisant les 252 fréquences de la bande espacées de 1 MHz. Ces canaux sont numérotés de 1 à 126 et affectés d'un suffixe X.

Pour les canaux X, le codage de l'interrogation et de la réponse est le même, soit :

$$\theta_{\text{int}} = \theta_{\text{rép}} = 12\mu\text{s}$$

126 canaux supplémentaires réutilisent la moitié de la bande DME (1025 - 1150 MHz) avec un espacement entre les paires d'impulsion différent à l'interrogation et à la réponse. On parle alors du mode Y. Dans le cas du mode Y, on a :

$$\begin{array}{l} \theta_{\text{int}} = 36\mu\text{s} \\ \theta_{\text{rép}} = 30\mu\text{s} \end{array}$$

### IV.3 DME/P : canaux X, Y, Z et W

Pour les besoins du DME/P, il a été nécessaire de créer 200 canaux supplémentaires sur la même bande de fréquence DME. L'interopérabilité a été assurée en utilisant un certain nombre de canaux X et Y pour le DME/P avec un codage différent en mode FA. Il s'agit des canaux suivants :

- 20 canaux X : de 18X à 56X (numéros de canaux pairs)  
 en DME/P FA  $\theta_{int} = 18\mu s$  et  $\theta_{rép} = 12\mu s$

- 80 canaux Y : de 17Y à 56Y et de 80Y à 119Y  
 en DME/P FA  $\theta_{int} = 42\mu s$  et  $\theta_{rép} = 30\mu s$

Deux nouveaux codes Z et W ont été créés à l'usage exclusif du DME/P :

- 20 canaux W : DME/P IA  $\theta_{int} = 24\mu s$  et  $\theta_{rép} = 24\mu s$   
 DME/P FA  $\theta_{int} = 30\mu s$  et  $\theta_{rép} = 24\mu s$

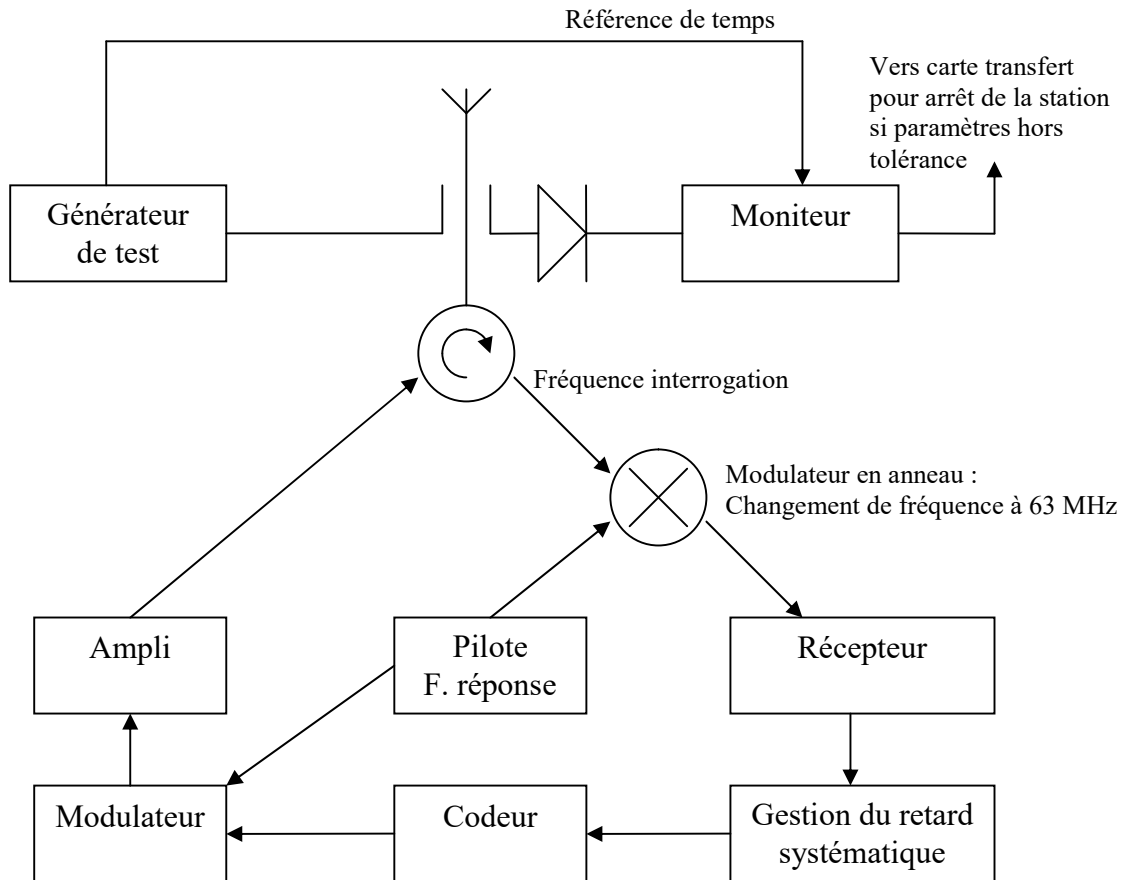
- 80 canaux Z : DME/P IA  $\theta_{int} = 21\mu s$  et  $\theta_{rép} = 15\mu s$   
 DME/P FA  $\theta_{int} = 27\mu s$  et  $\theta_{rép} = 15\mu s$

Les codes utilisés et le retard systématique du transpondeur sont donnés dans le tableau suivant :

Code de canal	Mode de fonctionnement	Espacement entre impulsion d'une même paire ( $\mu S$ )		Retard systématique ( $\mu s$ )	
		Interrogation	Réponse	Séquencement sur 1 <sup>ère</sup> impulsion	Séquencement sur 2 <sup>ème</sup> impulsion
X	DME/N	12	12	50	50
	DME/P IA	12	12	50	
	DME/P FA	18	12	56	
Y	DME/N	36	30	56	50
	DME/P IA	36	30	56	
	DME/P FA	42	30	62	
W	DME/N				
	DME/P IA	24	24	50	
	DME/P FA	30	24	56	
Z	DME/N				
	DME/P IA	21	15	56	
	DME/P FA	27	15	62	



## V.) Synoptique général d'un DME



L'impulsion provenant de l'avion est reçue au niveau de l'antenne est transmise vers le modulateur en anneau grâce au circulateur. Le rôle de ce modulateur est de faire baisser la fréquence à 63 Mhz avant de l'envoyer vers le récepteur.

Le rôle du récepteur est de valider ou non l'interrogation reçue. Si c'est une bonne interrogation, on déclenche un top et on effectue un retard de manière à pouvoir émettre la réponse avec le bon retard systématique. Une fois le temps nécessaire passé, on envoie une information vers le codeur.

Le rôle du codeur est de générer la bonne enveloppe pour former l'impulsion qui sera modulée avec le signal DME pour former la réponse.

Un pilote calé à la fréquence réponse sera modulé avec l'enveloppe du signal au niveau du modulateur afin de générer les paires d'impulsion. Une seconde sortie va vers le modulateur en anneau pour assurer la transposition de fréquence pour le récepteur.

Un amplificateur permet d'obtenir la puissance voulu avant d'émettre la réponse du DME.

Un système de contrôle existe. Grâce à un coupleur présent dans l'antenne, le signal émis est détecté (on garde juste l'enveloppe du signal) puis envoyé vers le moniteur. Ce dernier vérifie que la forme d'impulsion et les codages sont corrects. Sinon il envoie un signal pour arrêter la station.

Pour vérifier que la valeur du retard systématique est bien respectée, un générateur de test interne à la baie envoie des paires d'interrogation vers le transpondeur via un coupleur. Il envoie au moniteur un top de synchronisation qui déclenche chez celui-ci un compteur. Le moniteur attend la réponse de la baie, la détecte et regarde si la valeur du retard systématique est dans les tolérances.

## VI.) Retard systématique

### VI.1 Définitions

#### Définitions OACI (1989) :

- Le retard systématique en DME/N et DME/P IA sera l'intervalle entre le point de demi tension du bord avant de la première impulsion de la paire d'impulsions d'interrogation et la point de demi tension du bord avant de la première impulsion de la paire d'impulsions de réponse.

- Le retard systématique en DME/P FA sera l'intervalle entre l'origine virtuelle de la première impulsion de la paire d'impulsions d'interrogation et l'origine virtuelle de la première impulsion de la paire d'impulsions de réponse. Les points de mesure du temps d'arrivée seront compris dans le temps de montée partielle de la première impulsion de la paire d'impulsions dans chaque cas.

NOTE : Cependant, il est bon de noter qu'avant, la mesure se faisait sur la deuxième impulsion. Cette méthode s'explique par le fait qu'il est plus facile de faire une mesure sur cette impulsion. En effet, à l'époque (année 1960 environ) une ligne à retard UHF était très onéreuse. On se servait de la première impulsion pour connaître le niveau crête, on divisait par deux puis on déterminait l'intersection de cette valeur avec la seconde impulsion pour mesurer la mi-amplitude. Il fallait pour cela que la différence d'amplitude entre la première et la seconde impulsion soit minime (d'où les normes qui existent toujours sur cette différence). Mais cette mesure pouvait être régulièrement parasitée par des échos. La valeur du retard systématique était fixer à 50  $\mu$ s entre les deuxièmes impulsions interrogation et réponse en mode X et Y. Et tout était "chronométré" par rapport à cette référence.

Lorsque l'OACI a changé la définition du retard systématique et pris comme "référence" les premières impulsions, on se rend compte que pour rester compatible avec les 50  $\mu$ s sur les secondes impulsions, la valeur du retard systématique doit varier en fonction du mode lors d'une mesure sur les premières impulsions.

C'est ce que l'on va voir sur le chronogramme suivant.

## VI.2 Chronogrammes

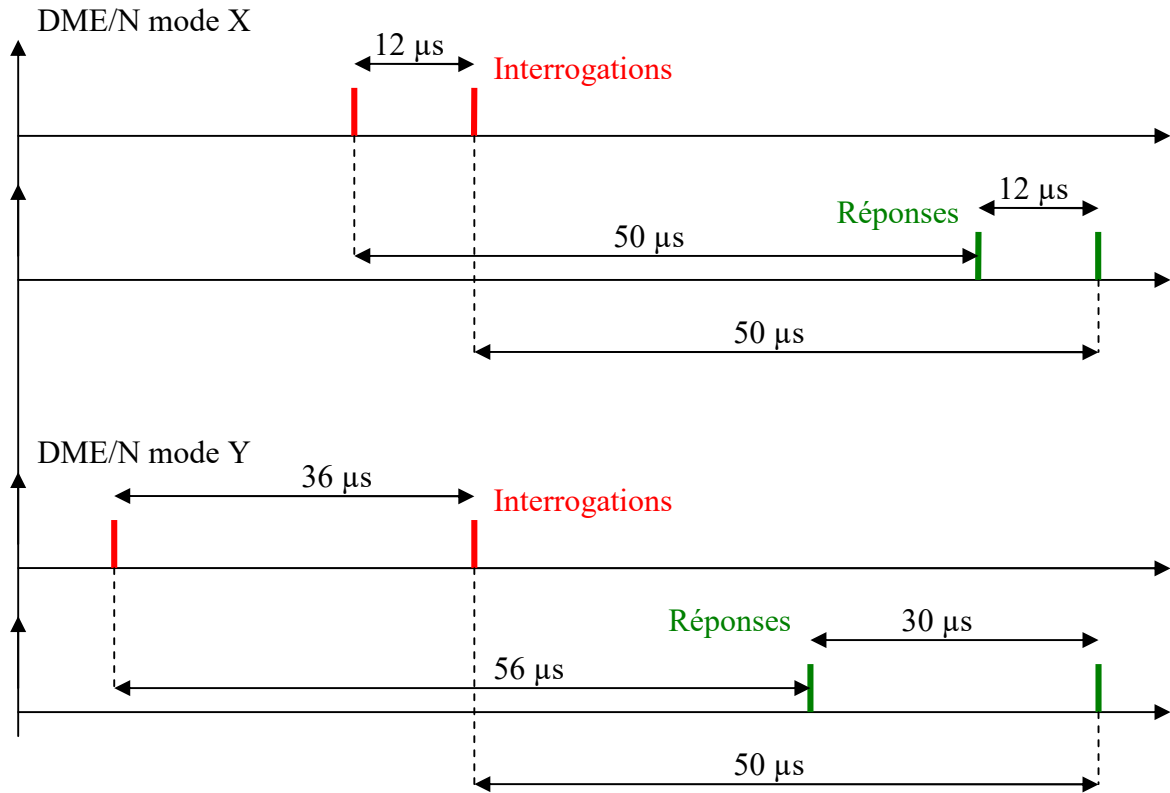


Figure 10 : Chronogramme pour le retard systématique

## VII.) Format du signal

Le problème du DME est de choisir le meilleur compromis entre plusieurs contraintes contradictoires qui sont :

- La précision qui exige une impulsion à temps de montée rapide, donc un spectre large.
- La portée maximum à assurer qui exige l'émission d'une puissance suffisante.
- L'occupation spectrale : l'émission d'une puissance importante avec une bande large peut polluer les canaux voisins.

Les normes OACI concernant le spectre du signal émis spécifient la puissance apparente maximum que l'on peut rayonner dans les bandes voisines. La norme est identique pour le DME/P et le DME/N.

Dans une bande de fréquence de  $\pm 0,5$  MHz centrée sur  $F_0 \pm 0,8$  MHz, la puissance apparente rayonnée ne dépassera pas 200mW.

Dans une bande de fréquence de  $\pm 0,5$  MHz centrée sur  $F_0 \pm 2$  MHz, la puissance apparente rayonnée ne dépassera pas 2mW.

### VII.1 Exemples de forme d'impulsion et du spectre associé

Nous allons voir ici plusieurs formes d'impulsion avec le spectre correspondant pour avoir une idée des avantages et des inconvénients de chaque solution.

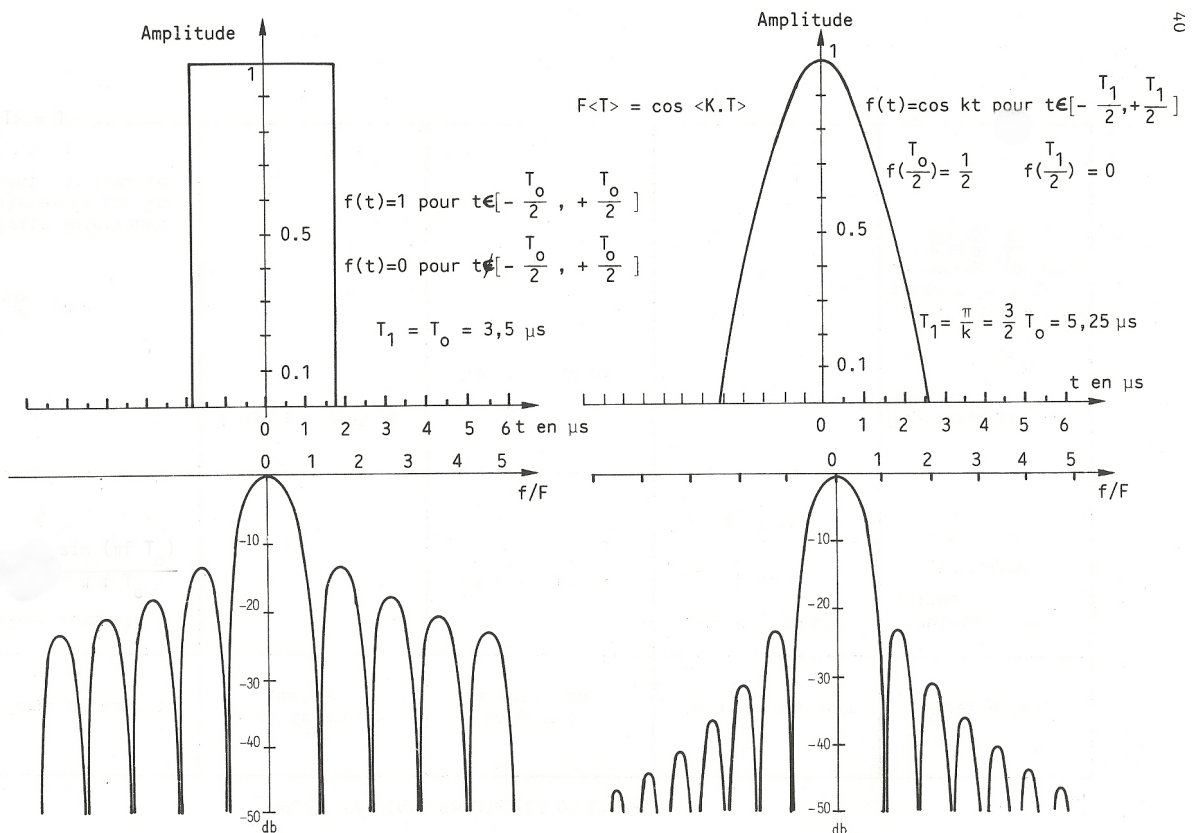


Figure 11 : Impulsions rectangulaire et cosinus

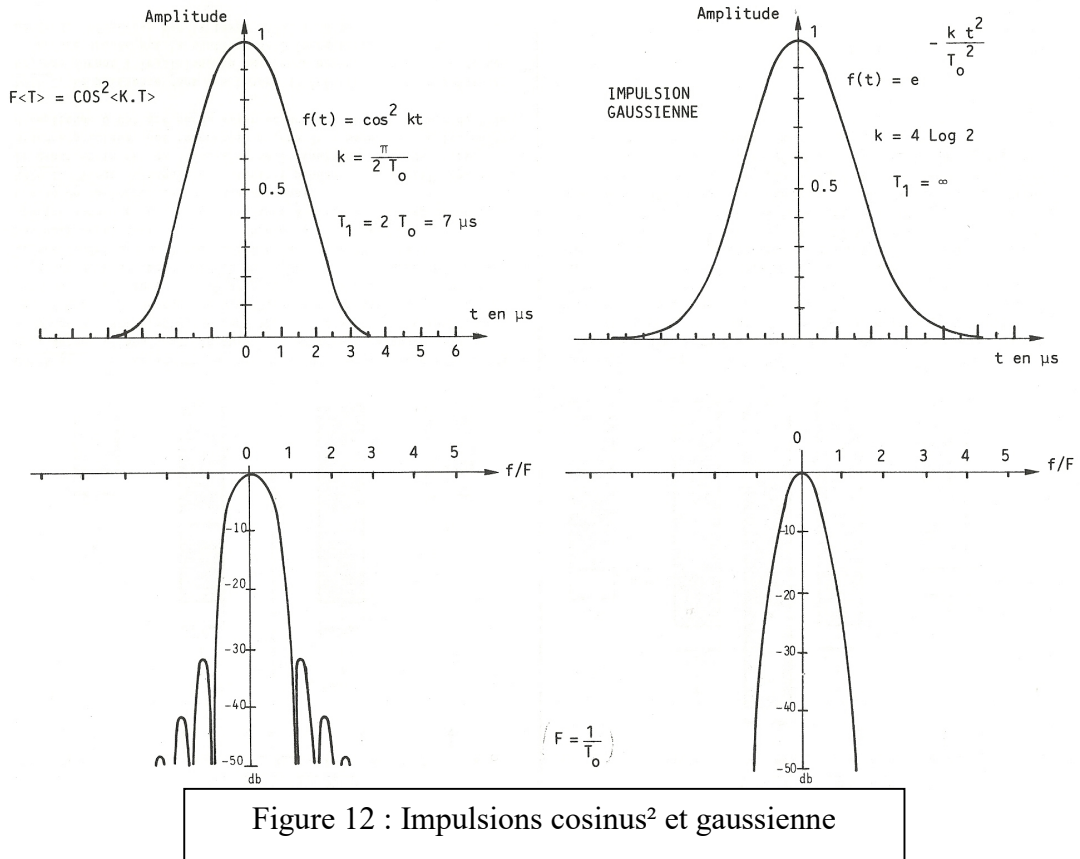


Figure 12 : Impulsions cosinus<sup>2</sup> et gaussienne

En conséquence, en fonction du type de DME (N ou P), voici les solutions adoptées.

### VII.2 DME/N

C'est une impulsion symétrique de type gaussienne ou cos<sup>2</sup>.

Le temps de montée est relativement lent (2,5 μs) ce qui permet de rayonner la puissance nécessaire pour assurer la couverture demandée en service "en route" tout en respectant les spécifications spectrales de l'OACI.

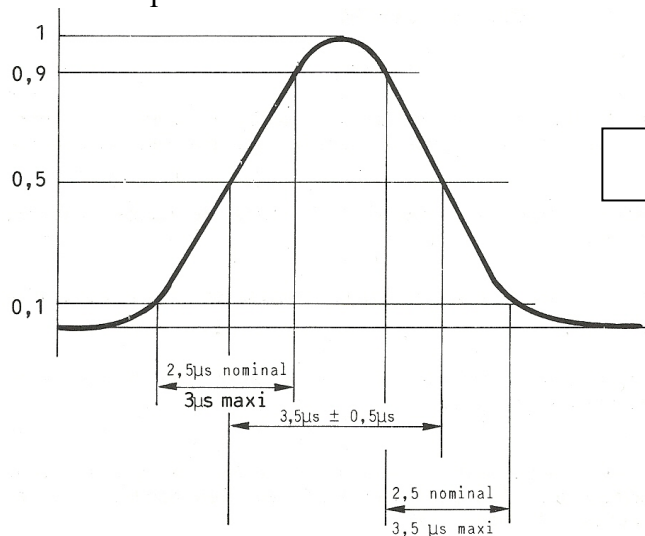


Figure 13 : Impulsion DME/N

### VII.3 DME/P

L'augmentation de la précision est obtenue grâce à un front de montée beaucoup plus raide. Pour limiter l'occupation spectrale, le temps de descente sera plus lent.

On aura une impulsion dissymétrique en  $\cos - \cos^2$ .

De plus, les exigences OACI concernant la puissance apparente rayonnée dans les canaux adjacents sont respectées, par le fait que ce type de DME est utilisée pour les approches, donc leur portée est réduite et par conséquent la puissance rayonnée est plus faible.

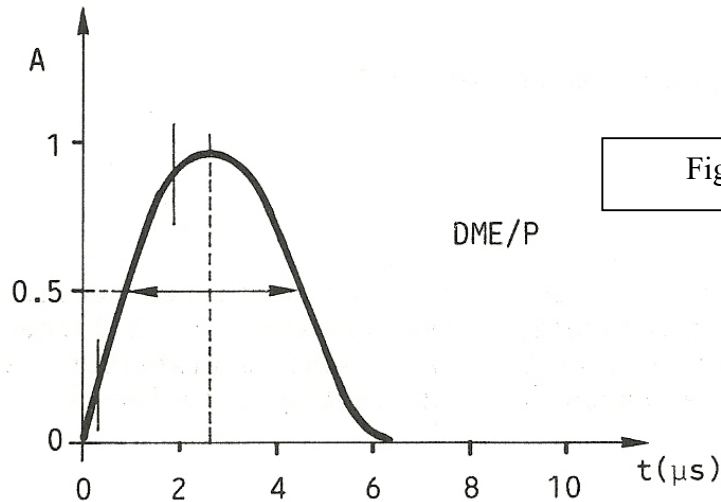


Figure 14 : Impulsion DME/P

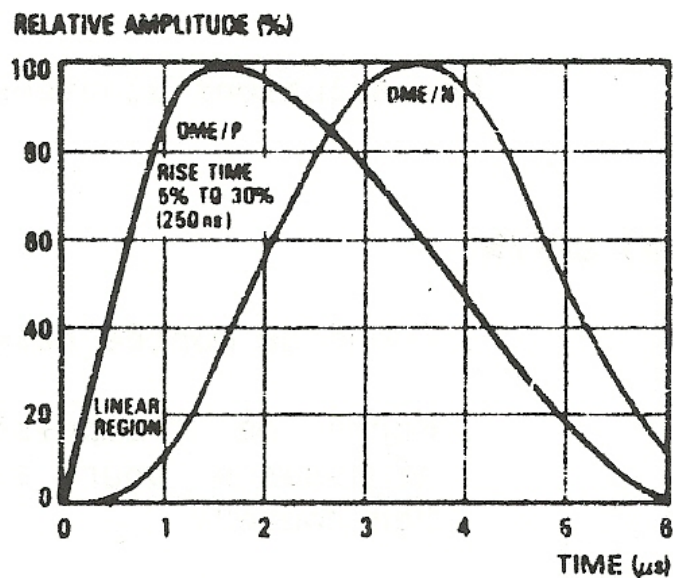


Figure 15 : Comparaison impulsions DME/N et DME/P

## VII.4 Spécification impulsions DME/N et P

Les spécifications des impulsions DME/N et P sont résumées dans le tableau suivant :

	Temps de montée	Temps de montée partiel	Largeur à mi amplitude	Temps de descente	Observations
DME/N	Valeur nominale $t_m = 2,5 \mu s$ $\leq 3 \mu s$		$3,5 \mu s \pm 0,5 \mu s$	Valeur nominale $t_m = 2,5 \mu s$ $\leq 3 \mu s$	Impulsion symétrique gaussienne ou $\cos^2$
DME/P	$t_m \leq 1,6 \mu s$ Limite inférieure déterminée par les spécifications de spectre : $0,8 \mu s$	$0,25 \mu s \pm 0,05 \mu s$	$3,5 \mu s \pm 0,5 \mu s$		Impulsion dissymétrique. Variation linéaire pendant le temps de montée partiel

## VIII.) Bilan de liaison

### VIII.1 Rappel : équation des télécommunications

Cette équation s'écrit de la manière suivante en linéaire :

$$\frac{P_R}{G_R} = P_E \cdot G_E \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2$$

avec :  $P_E \cdot G_E$  puissance apparente rayonnée.

$\left( \frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2$  affaiblissement d'espace ( D la distance entre émetteur et récepteur).

$\frac{P_R}{G_R}$  signal disponible à l'antenne du récepteur.

Je peux l'écrire sous forme logarithmique en multipliant les 2 cotés de l'égalité par  $10 \log( )$  :

$$10 \log \left[ \frac{P_R}{G_R} \right] = 10 \log \left[ P_E \cdot G_E \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2 \right] \text{ et avec : } \log(a \cdot b) = \log(a) + \log(b) \text{ on obtient :}$$

$$10 \log(P_R) - 10 \log(G_R) = 10 \log(P_E) + 10 \log(G_E) + 10 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2$$

On note :

$P_{R(dB)} = 10 \cdot \log(P_R)$  : puissance reçue en **dBm**.

$G_{R(dB)} = 10 \cdot \log(G_R)$  : gain de l'antenne de réception et affaiblissement des câbles coté récepteur en **dB**.

$P_{E(dB)} = 10 \cdot \log(P_E)$  : puissance d'émission en **dBm**.

$G_{E(dB)} = 10 \cdot \log(G_E)$  : gain de l'antenne émission et affaiblissement des câbles coté émission en **dB**.

$$Att_{(dB)} = 20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi D} \right) : \text{Atténuation d'espace en } \mathbf{dB}.$$

La formule peut donc s'écrire de manière logarithmique de la façon suivante :

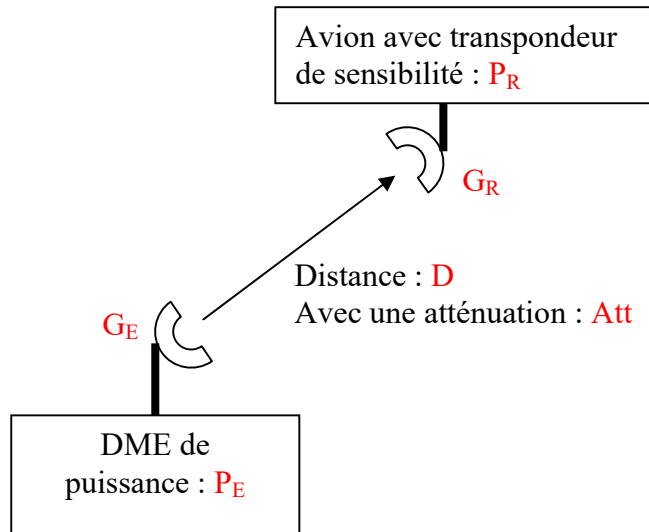
$$P_{R(dB)} - G_{R(dB)} = P_{E(dB)} + G_{E(dB)} + 20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi D} \right)$$

En général cette équation permet de calculer la puissance à émettre  $P_E$  pour qu'à une certaine distance, la puissance à l'entrée du récepteur  $P_R$  soit supérieur à sa sensibilité afin que la liaison fonctionne.

Elle permet aussi de calculer aussi la portée maximale D d'une liaison ou de la sensibilité nécessaire d'un récepteur (dans ce cas, ça revient à calculer  $P_R$ ).



## VIII.2 Sens Sol/Air



Dans ce cas le transpondeur sol est en émission et l'interrogateur avion en réception.

Le point de départ est la sensibilité du récepteur de bord. Elle représente la puissance minimale qui doit être présente à l'entrée du récepteur bord afin que celui-ci puisse traiter le signal. Dans ce cas, la valeur de cette sensibilité représente donc la puissance reçue  $P_{R(dB)}$ .

Dans l'exemple ci-dessous, on prendra un DME/N en route.

La sensibilité du transpondeur bord est généralement :  $P_{R(dB)} = -87 \text{ dBm}$ .

$G_R$  est le gain de l'antenne avion et l'affaiblissement des câbles à bord :  $G_{R(dB)} = -7 \text{ dB}$ .

Calcul de l'affaiblissement d'espace Att en dB en considérant  $f = 1088 \text{ MHz}$  soit  $\lambda = 0,275 \text{ m}$  et que l'on se trouve en limite de portée, soit 200 NM ou 370 km.

$$Att_{dB} = 20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi D} \right) = 20 \log \left( \frac{0,275}{4\pi \cdot 370000} \right) = -144 \text{ dB}$$

On peut considérer qu'entre le gain d'antenne (9 dB) et les pertes dues aux câbles (-2 dB) que :  $G_{E(dB)} = 7 \text{ dB}$

On a donc :

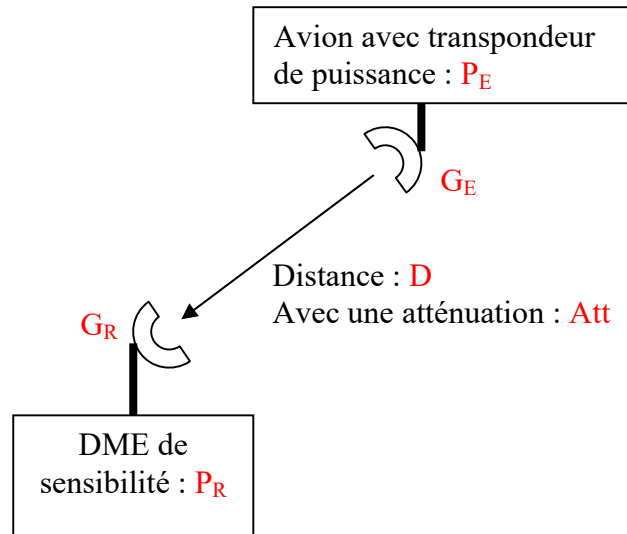
$$P_{R(dB)} - G_{R(dB)} = P_{E(dB)} + G_{E(dB)} + 20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi D} \right) \Rightarrow P_{E(dB)} = P_{R(dB)} - G_{R(dB)} - G_{E(dB)} - 20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi D} \right)$$

La puissance  $P_{E(dB)}$  du DME/N pour assurer une couverture à 200 NM est :

$$P_{E(dB)} = -87 \text{ dBm} + 7 \text{ dB} + 7 \text{ dB} + 144 \text{ dB} = 57 \text{ dBm} \text{ soit } 500 \text{ W.}$$

**NOTE :** Pour couvrir 200 NM, la puissance nominale des transpondeurs sol est de 1 kW. Sachant que l'alarme puissance est à -3 dB (soit la moitié de la puissance) on s'aperçoit qu'en étant en limite d'alarme (c'est à dire à 500 W), on couvre toujours les 200 NM.

### VIII.3 Sens Air/Sol



Dans ce cas le transpondeur avion est en émission et la station sol en réception.  
Le point de départ est la sensibilité du récepteur au sol.

Pour le DME/N, la sensibilité du récepteur est :  $P_{R(dB)} = -89 \text{ dBm}$ .

Le gain de l'antenne DME et les pertes dues aux câbles sont toujours de  $G_{R(dB)} = 7 \text{ dB}$ , soit :

L'affaiblissement d'espace est le même :  $-144 \text{ dB}$ .

Et on considère que  $G_{E(dB)} = -7 \text{ dB}$  (gain de l'antenne avion et affaiblissement des câbles à bord de l'avion).

On peut écrire :

$$P_{E(dB)} = P_{R(dB)} - G_{R(dB)} - G_{E(dB)} - 20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi D} \right)$$

La puissance  $P_{E(dB)}$  du transpondeur avion pour assurer une couverture à 200 NM est :

$$P_{E(dB)} = -89 \text{ dBm} + 7 \text{ dB} + 7 \text{ dB} + 144 \text{ dB} = 55 \text{ dBm} \text{ soit environ } 316 \text{ W.}$$

## **IX.) Contrôle des DME**

Pour garantir à l'utilisateur que le DME est d'une précision d'emploi suffisante, il est associé au système un certain nombre de contrôles à caractères permanents et périodiques.

### **IX.1 Contrôle au sol**

Il revient à contrôler les performances de la station DME sol.

Un contrôle permanent est assuré par un monitoring interne à la baie : un générateur de test émet des impulsions vers le récepteur du DME (il joue le rôle d'un avion). La station traite ces impulsions (dont le régime d'émission ne doit pas dépasser 120 pps) et renvoie des impulsions de réponses. Deux détecteurs situés dans l'antenne permettent de renvoyer une image des ces impulsions vers le moniteur du DME et ainsi pouvoir vérifier la qualité des signaux émis par la station :

- Retard systématique.
- Espacement entre impulsion.
- Puissance.
- Efficacité ou rendement du transpondeur sol.

En cas de fonctionnement hors tolérances, il y a déclenchement d'une alarme qui provoque le basculement sur l'ensemble secours (si ce dernier est présent) ou l'arrêt de la station.

Un contrôle périodique (opération de maintenance) consiste à vérifier et régler la station DME : mesure des alimentations et de la puissance, des antennes, vérifications des signaux émis (mesure du retard systématique, de l'espacement entre impulsions, du rendement, de la fréquence, passage correcte de l'indicatif, spectre ...) et vérification des moniteurs de contrôle.

Chaque maintenance de la station est consignée dans un compte rendu et doit vérifier les éléments décrits dans le PROMESS DME (PROcédure de Mise En Service et de Suivi des stations sol DME). Ce document décrit les méthodes de réglage, les cadences de maintenance, les normes à appliquer en France tout en respectant les recommandations de l'annexe 10 de l'OACI. Le PROMESS est un document officiel faisant l'objet d'un arrêté du 05 décembre 2008 relatif à la mise en service et au suivi des DME.

Sur l'image suivante, voici un exemple de mesure: celui du spectre émis par le transpondeur sol du DME/N de Cognac avec le gabarit à ne pas dépasser :

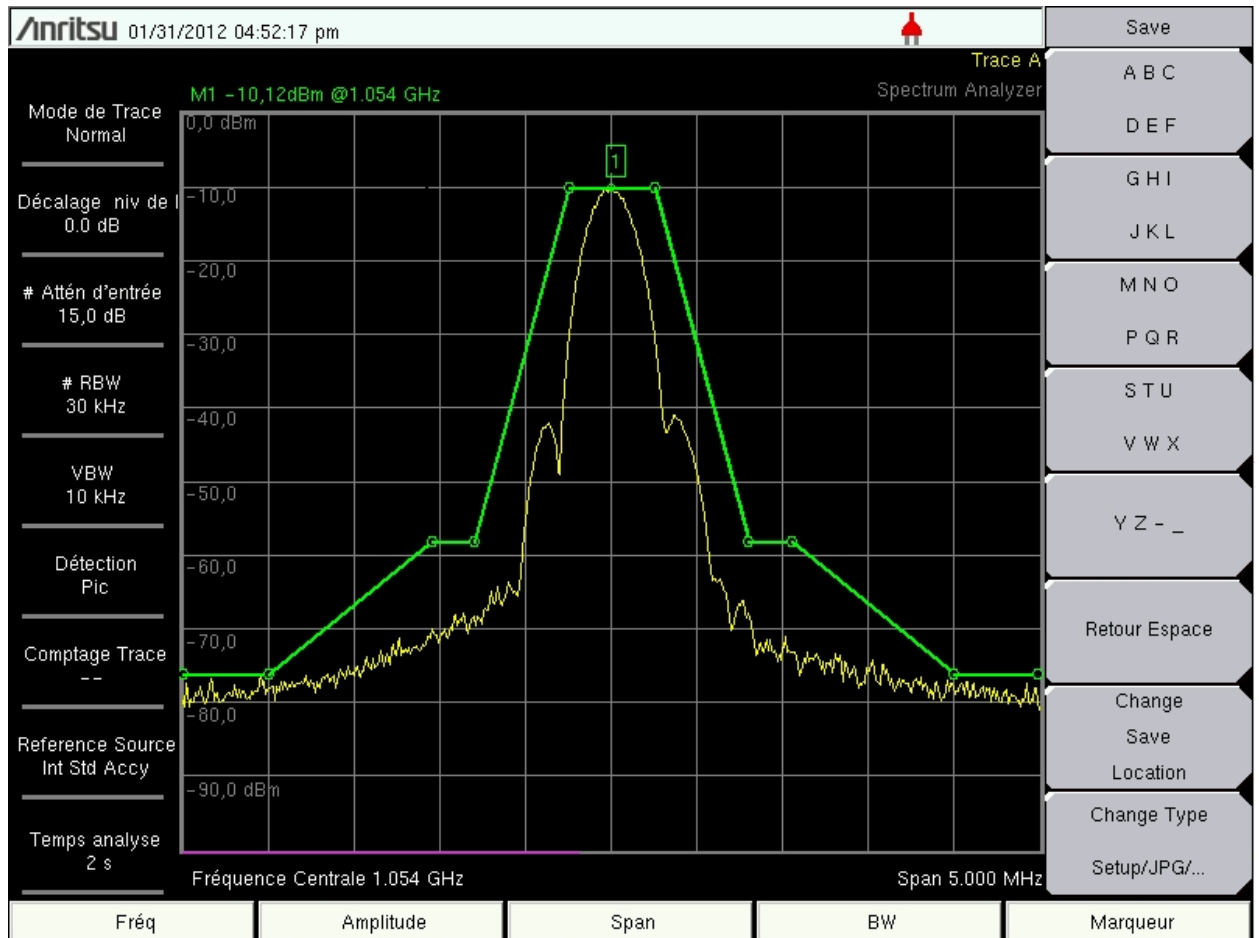


Figure 16 : Spectre d'émission du DME/N de Cognac

## IX.2 Contrôle en vol

Le contrôle en vol d'un DME est plutôt sommaire. En effet, l'équipe à bord ne vérifie que sa portée et l'erreur moyenne de distance, ce qui revient à vérifier que le retard systématique est bien réglé.

### IX.3 Normes concernant le DME

Les normes sur le DME sont définies dans l'annexe 10 de l'OACI.

On y retrouve notamment des informations sur :

- La portée (qui détermine la puissance de la station) : le DME est en général associé à un autre système de navigation (VOR ou ILS) et il devra avoir la même couverture que ce dernier. Si il est associé à un VOR, sa portée sera de 200 MN, si il est associé à un ILS, elle sera d'au minimum 25 MN.

- La précision attendue du système : erreur inférieure ou égale à la plus grande valeur :  $\pm 0.5$  NM ou 3% de la distance. Il est à noter que cette valeur tient compte de toutes les erreurs possibles (équipement sol et bord, propagation, brouillage ...). La précision de la seule station DME/N doit être de 150 mètres lorsqu'il est associé avec un VOR et de 75 mètres avec un ILS.

- Le retard systématique : 50  $\mu$ s en mode X et 56  $\mu$ s en mode Y par exemple en DME/N ...

- Le spectre : la vérification du spectre permet de s'assurer que le DME n'émet pas sur les canaux DME adjacents.

- La forme de l'impulsion : largeur mi-amplitude égale à 3,5  $\mu$ s, temps de descente nominal à 2,5  $\mu$ s et temps de montée inférieur à 3  $\mu$ s en DME/N et 1,6  $\mu$ s en DME/P.

- Le codage : l'espacement entre impulsion de 12  $\mu$ s en mode X et 30 et 36  $\mu$ s en mode Y en DME/N...

- Décodage : une paire d'impulsion d'interrogation dont l'espacement différera de  $\pm 2$   $\mu$ s ou davantage de la valeur nominale sera rejetée.

- Efficacité ou rendement : le transpondeur répondra avec un rendement d'au moins 70% en DME/N et DME/P mode IA et 80% en DME/P mode FA.

- Stabilité en fréquence : la fréquence radioélectrique de fonctionnement ne s'écartera pas de plus de 100 kHz de la fréquence assignée.

- Le système de contrôle : une alarme se déclenchera dans les conditions suivantes :

\* le retard systématique du transpondeur s'écarte de 1  $\mu$ s (pour un DME associé à un VOR) ou de 0,5  $\mu$ s (pour un DME associé à un ILS) de la valeur fixée.

\* une chute de 3 dB ou davantage de la puissance émise par le transpondeur.

\* une chute de 6 dB ou davantage de la sensibilité minimale du récepteur du transpondeur.

\* une variation de 1  $\mu$ s ou davantage de l'espacement entre impulsion.

\* une variation de la fréquence d'émission de plus de 100 kHz.