



Radio navigation et équipements sol :
ILS : Principe, Emission et
Maintenance



Eric SOLER

Table des matières

I.)	Généralités.....	4
I.1	Définition d'une trajectoire d'approche et d'atterrissage.....	4
I.2	Information à bord.....	5
I.2.1	Secteur d'alignement.....	5
I.2.2	Sensibilité d'écart.....	6
I.2.3	Flag alarme.....	6
I.3	Couverture volumétrique.....	7
I.3.1	Localizer : couverture en azimut.....	7
I.3.2	Localizer : couverture en site.....	7
I.3.3	Glide : couverture en azimut.....	7
I.3.4	Glide : couverture en site.....	8
I.4	Caractérisation d'un ILS.....	8
I.4.1	Fréquences.....	8
I.4.2	Indicatifs.....	9
I.4.3	Catégorie d'utilisation.....	10
I.5	Principe de la définition radioélectrique du plan vertical d'axe de piste.....	10
I.5.1	Signal rayonné : variation des taux de modulation d'espace.....	10
I.5.2	Récepteur de bord : DDM et SDM.....	11
I.5.3	Secteur d'alignement de piste : sensibilité d'écart linéaire et angulaire.....	12
I.5.4	Variation de la DDM et de la SDM en zone de couverture.....	14
I.6	Principe de la définition radioélectrique du plan oblique de descente.....	15
I.6.1	Signal rayonné : variation des taux de modulation d'espace.....	15
I.6.2	Récepteur de bord : DDM et SDM.....	15
I.6.3	Secteur d'alignement de descente : sensibilité d'écart angulaire.....	16
I.6.4	Variation de la DDM et de la SDM en zone de couverture.....	17
II.)	Localizer.....	18
II.1	Configuration typique d'une station sol.....	18
II.2	Génération des signaux.....	18
II.2.1	Signal porteuse modulée en amplitude rayonné selon un diagramme pair $P(\alpha)$	18
II.2.2	Signaux bandes latérales rayonnés selon un diagramme impair $F'(\alpha)$	19
II.2.3	Champ globalement rayonné.....	19
II.2.4	Expression de la DDM et de la SDM.....	20
II.2.5	Valeur maximale du rapport $\frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)}$	22
II.3	Réseau d'aériens.....	22
II.3.1	Localizer 3 antennes.....	22
II.3.2	Localizer 5 antennes.....	27
II.3.3	Réseau 13 antennes Thomson 381 / 389.....	30
II.4	Emission bifréquence.....	31
II.4.1	Objectif.....	31
II.4.2	Principe utilisé : effet de capture du récepteur.....	31
II.4.3	Diagrammes en azimut des quatre signaux.....	32
II.5	Multitrajets.....	35
II.5.1	Evaluation de l'apport du bifréquence.....	35
II.5.2	Gabarits du localizer.....	37
III.)	Glide.....	38
III.1	Principes généraux : Glide image.....	38

III.2	Glide "Null Reference"	39
III.3	Glide "Type M"	42
III.3.1	Objectif : norme catégorie III	42
III.3.2	Principe utilisé : effet de capture du récepteur	43
III.3.3	Signaux directifs	43
III.3.4	Réseau d'aériens	46
IV.)	Opérations de maintenance	49
IV.1	Opérations au sol	49
IV.1.1	Principe d'autocontrôle des signaux rayonnés	49
IV.1.2	Mesures de protection à l'attention des utilisateurs	49
IV.1.3	Différents types de maintenances périodiques	50
IV.1.4	Moyens de mesure utilisés	50
IV.1.5	Mesures sur la baie	51
IV.2	Mesure des signaux rayonnés	51
IV.2.1	Nécessité de la mesure sol (corrélation sol-sol)	51
IV.2.2	Moyens de mesure piste	51
IV.3	Contrôle en vol (calibration)	52
IV.3.1	Nécessité de la mesure avion	52
IV.3.2	Périodicité des mesures avions	52
IV.3.3	Mesures effectuées par l'avion	53

I.) Généralités

I.1 Définition d'une trajectoire d'approche et d'atterrissage

On peut définir la trajectoire d'approche et d'atterrissage comme l'intersection de plan vertical passant par l'axe de piste avec le plan oblique qui passe par le point d'impact (ou toucher des roues) et fait avec le plan horizontal de piste l'angle utilisé par l'avion pour effectuer sa descente.

- Le radioalignement de piste (R.A.P.) ou "Localizer" définit radioélectriquement le plan vertical passant par l'axe de piste.

- Le radioalignement de descente (R.A.D.) ou "Glide Path" définit le plan oblique de descente.

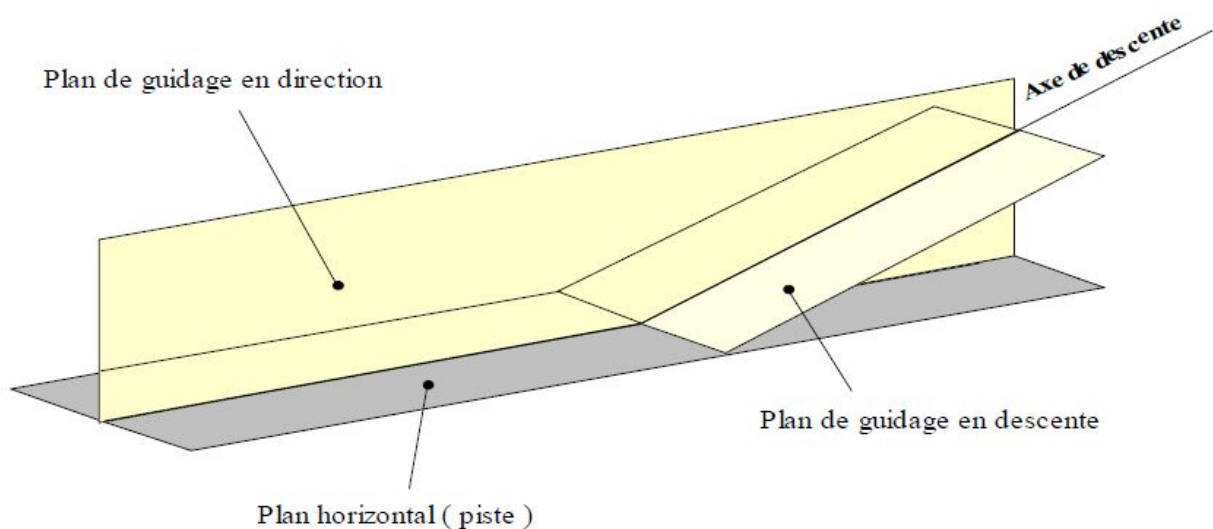


Figure 1 : Définition de l'axe ILS

L'avion aura aussi à connaître sa progression sur cette trajectoire, donc sa distance par rapport au seuil de piste (qui est la zone de toucher des roues) pour effectuer les changements de configuration de vol préparatoires à l'atterrissage (réduction de vitesse, train, volets ...).

De ce fait, la trajectoire d'approche est radioélectriquement balisée en 3 points par 3 radiobornes (ou "Markers") respectivement nommées "balise intérieure", "balise intermédiaire" et "balise extérieure" ("Inner, Middle et Outer Marker").

On peut remarquer qu'une telle information de distance est discontinue et n'est donc pas optimale. C'est pourquoi les radiobornes ont tendance à disparaître et à être remplacées par un D.M.E. (Distance Measuring Equipment) qui fournit une information de distance continue.

I.2 Information à bord

I.2.1 Secteur d'alignement

Les informations R.A.P. et R.A.D. se matérialisent à bord par une double information d'écart (regroupées sur le même indicateur).

Une aiguille verticale indique l'écart angulaire de la direction Localizer / avion par rapport au plan R.A.P. (ou axe de piste) et dévie dans le sens de la correction à effectuer pour rejoindre le plan. Une aiguille centrée correspond à une correction nulle : l'avion est sur l'axe de piste.

Au delà d'un certain écart, compris entre $\pm 1,5^\circ$ et $\pm 3^\circ$ (en fonction de la longueur de la piste), l'aiguille reste en butée à droite ou à gauche.

On distingue 2 zones d'utilisation :

- Le secteur de guidage proportionnel : appelé secteur d'alignement de piste. C'est la zone de l'espace de part et d'autre du plan à l'intérieur de laquelle l'indicateur dévie proportionnellement à l'écart angulaire.

- Le secteur de guidage complémentaire : appelé aussi couverture. C'est la zone de l'espace où les signaux Localizer continuent à être reçus normalement mais l'aiguille reste en butée.

De la même façon, une aiguille horizontale indique l'écart angulaire de la direction point d'impact / avion par rapport au plan R.A.D. Elle indique le sens de la correction à effectuer pour rejoindre le plan de descente.

On retrouve aussi les 2 mêmes zones d'utilisation vues précédemment.

Le volume commun aux secteurs d'alignement de piste et de descente définit une pyramide dite de sécurité, centrée sur l'axe d'approche et dont la section (par des plans verticaux perpendiculaires à la direction de l'axe de la piste) constitue la fenêtre d'approche.

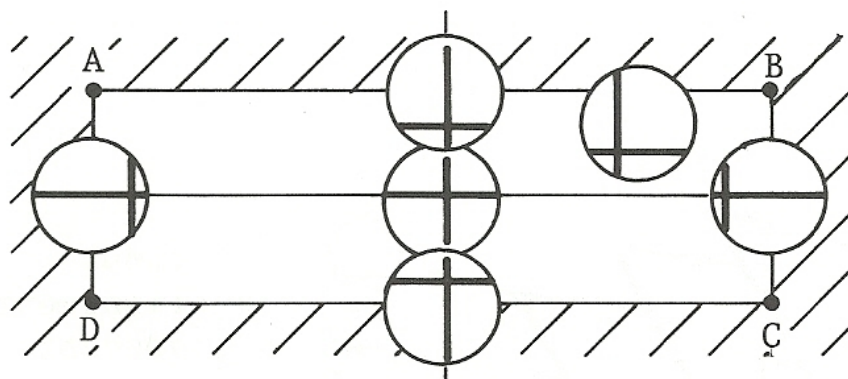


Figure 2 : Fenêtre d'approche

I.2.2 Sensibilité d'écart

Indication d'écart en azimut : $I_D(\alpha) = S_\alpha \cdot \alpha$

Indication d'écart de site : $I_D(\Delta\theta) = S_\theta \cdot \Delta\theta$

Où I_D est le courant de déviation de l'aiguille de l'indicateur de bord.

Les facteurs de proportionnalité S_α et S_θ sont respectivement les sensibilités d'écart angulaire R.A.P. et R.A.D.

Or une sensibilité angulaire constante a pour corollaire une sensibilité latérale et longitudinale croissante avec l'approche. En effet à des écarts longitudinaux $\pm l$ ou latéraux $\pm e$ donnés, correspondent de très faibles variations angulaire (donc d'aiguille) en début d'approche. Celles-ci deviennent par contre très importantes en finale pour les mêmes écarts.

Cet accroissement de sensibilité reste dans les limites exploitables pour le R.A.P. (car il subsiste toujours la distance de longueur de piste entre le Localizer et le point d'impact). Par contre pour le Glide, cette sensibilité devient excessive, rendant son utilisation quasiment impossible dans la phase ultime de l'atterrissage. Ce qui conduit en finale des atterrissage par très faible visibilité à relayer le Glide par la radiosonde de l'avion.

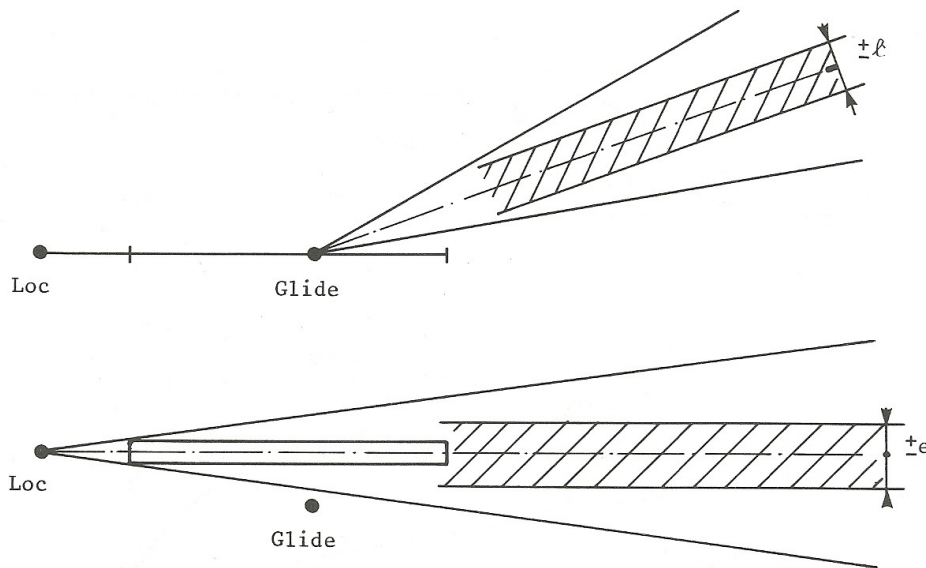


Figure 3 : Ecart longitudinal et latéral

I.2.3 Flag alarme

L'indicateur d'écart comporte deux indications d'alarme, respectivement associées à l'information Localizer et à l'information Glide. Dans l'hypothèse où le signal reçu n'est pas correct, un "drapeau" (ou "flag") apparaît, indiquant la non validité de l'information affichée. Ce dispositif ne réagit cependant qu'aux cas d'anomalies flagrantes et ne constitue donc pas une alarme absolue.

I.3 Couverture volumétrique

On désignera ainsi le volume délimité de l'espace où les signaux ILS sont normalement reçus.

I.3.1 Localizer : couverture en azimuth

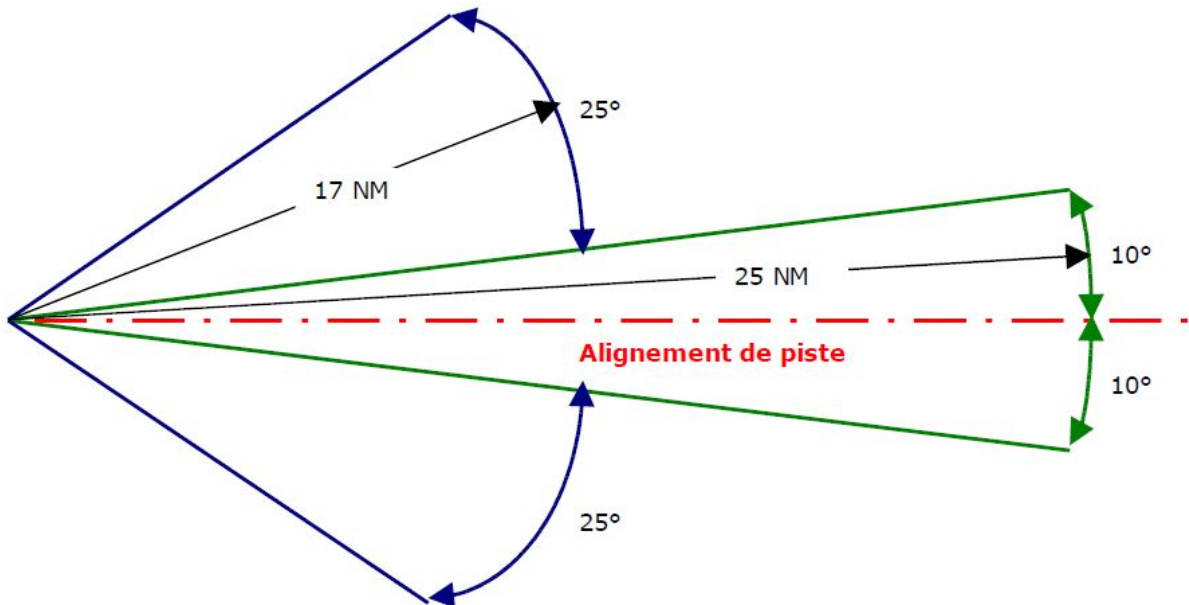


Figure 4 : Couverture azimuthale du Localizer

La couverture au delà du secteur $\pm 35^\circ$ par rapport à l'axe de piste n'est pas obligatoire. Si elle existe, la portée correspondante sera de 10 NM. Les portées indiquées sont des portées minimales.

I.3.2 Localizer : couverture en site

Les signaux Localizer doivent être reçus à l'intérieur du volume délimité par un plan incliné à 7° sur l'horizontale et aux distances spécifiées précédemment en azimuth.

I.3.3 Glide : couverture en azimuth

Les signaux Glide doivent être reçus dans un secteur de 8° de part et d'autre de l'axe de piste à 10 NM. Ce secteur est centré sur le point d'impact dans l'axe de piste.

I.3.4 Glide : couverture en site

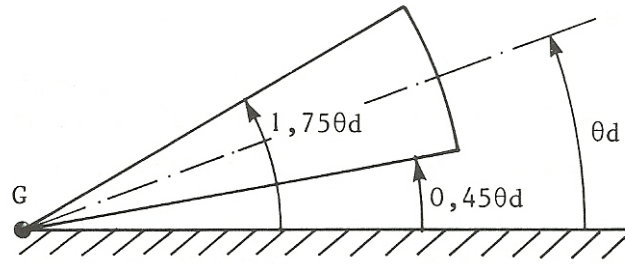


Figure 5 : Couverture en site du Glide

Limite de couverture basse : $0,45 \cdot \theta_d$ soit pour $\theta_d = 3^\circ \Rightarrow 1,35^\circ$.

Limite de couverture haute : $1,75 \cdot \theta_d$ soit pour $\theta_d = 3^\circ \Rightarrow 5,25^\circ$.

On pourra tolérer une couverture inférieure jusqu'à $0,3 \cdot \theta_d$ si les procédures locales d'interception du Glide l'exigent.

I.4 Caractérisation d'un ILS

Pour l'avion utilisant un ILS, celui-ci sera défini sans ambiguïté si l'avion connaît :

- Le QFU de la piste balisée.
- La fréquence du système.
- Son indicatif.

I.4.1 Fréquences

Le R.A.P. utilise la bande VHF de 108 à 111.95 MHz (qu'il partage avec les VOR). Cette bande autorise 40 canaux centrés sur tous les $1/10^{\text{ème}}$ de MHz impairs et sur tous les $1/10^{\text{ème}}$ de MHz impairs $+5/100^{\text{ème}}$ de MHz.

Le R.A.D. occupe la bande UHF de 326,8 MHz à 335,4 MHz et les 40 canaux de cette bande sont appariés aux canaux R.A.P. La sélection de fréquence des récepteurs de bord se fait alors grâce à un dispositif de commande unique.

Le tableau suivant donne le couplage entre les fréquences Loc et Glide.

Fréquence R.A.P. (MHz)	Fréquence R.A.D. (MHz)
108,1	334,7
108,15	334,55
108,3	334,1
108,35	333,95
108,5	329,9
108,55	329,75
108,7	330,5
108,75	330,35
108,9	329,3
108,95	329,15
109,1	331,4

109,15	331,25
109,3	332
109,35	331,85
109,5	332,6
109,55	332,45
109,7	333,2
109,75	333,05
109,9	333,8
109,95	333,65
110,1	334,4
110,15	334,25
110,3	335
110,35	334,85
110,5	329,6
110,55	329,45
110,7	330,2
110,75	330,05
110,9	330,8
110,95	330,65
111,1	331,7
111,15	331,55
111,3	332,3
111,35	332,15
111,5	332,9
111,55	332,75
111,7	333,5
111,75	333,35
111,9	331,1
111,95	330,95

I.4.2 Indicateurs

L'ILS est caractérisé par un indicatif propre à la piste et à la direction d'approche. Cet indicatif se compose de 2 ou 3 lettres, en code morse international avec une fréquence de modulation de 1020 Hz et un taux de modulation de 5 à 15%. Le tout à une cadence de 7 indicateurs à la minutes.

Le Localizer transmet seul l'indicateur pour l'ensemble Loc et Glide.

Exemple : L'ILS de la piste 23 de Bordeaux Mérignac

- Fréquence Loc : 110,3 MHz

- Fréquence Glide : 335,0 MHz

- Indicateur : BD (—●●● —●●)

I.4.3 Catégorie d'utilisation

En fonction de l'équipement en place et de l'environnement de la piste (balisage, mise à disposition d'informations météorologiques, etc...), on distingue plusieurs catégories d'utilisation des ILS. Ces différentes catégories sont définies par une portée visuelle de piste (PVP ou RVR : Runway Visibility Range) et une hauteur de décision (HD) minimale.

- Catégorie I : HD \geq 200 ft et PVP \geq 550 m.
- Catégorie II : HD comprise entre 100 ft et 200 ft et PVP \geq 350 m.
- Catégorie III : cette catégorie est elle-même divisée en 3 sous-catégories :
 - Catégorie III A : HD $>$ 100 ft et PVP \geq 200 m.
 - Catégorie III B : HD $>$ 50 ft et PVP comprise entre 50 et 200 m.
 - Catégorie III C : aucun minimum pour la HD et la PVP.

Un système ILS de catégorie III C doit être capable de fournir les informations nécessaires au pilote automatique pour poser l'avion et pour guider celui-ci le long de la piste pour le roulage.

Pour information, les 2 pistes de l'aéroport de Bordeaux - Mérignac sont équipées d'ILS.

- Un ILS catégorie III A sur la piste 23 (fréquence 110,3 MHz et indicatif BD).
- Un ILS catégorie I sur la piste 29 (fréquence 111,15 MHz et indicatif BEI).

Une fois établi en approche, le pilote automatique suit le signal ILS et descend le long de la pente Glide jusqu'à la hauteur de décision. A ce point, le pilote doit voir la piste ou, au moins, le balisage lumineux. Dans le cas contraire, le pilote doit entamer une procédure d'approche interrompue (ou remise de gaz) pour remonter à une altitude prédéfinie afin de procéder à une nouvelle approche ou de se dérouter sur un autre aéroport.

En France, nous n'utilisons que les ILS de catégorie I et III A.

I.5 Principe de la définition radioélectrique du plan vertical d'axe de piste

I.5.1 Signal rayonné : variation des taux de modulation d'espace

Le plan est défini à l'aide d'un signal VHF modulé en amplitude simultanément par du 90 Hz et du 150 Hz. Cette modulation respecte les critères suivants :

- La variation des taux de modulation \mathcal{M}_{90} et \mathcal{M}_{150} est symétrique de part et d'autre du plan vertical d'axe à définir.
- Dans ce même plan (sur l'axe de piste), les taux de modulation seront égaux : $\mathcal{M}_{90} = \mathcal{M}_{150} = 20\%$.
- Par convention, vu du sens d'approche, \mathcal{M}_{90} prédominera à gauche du plan. Inversement \mathcal{M}_{150} sera prédominant à droite du plan.

I.5.2 Récepteur de bord : DDM et SDM

Le récepteur de bord reçoit donc un signal VHF modulé en amplitude par du 90 Hz et du 150 Hz (l'indicatif n'est pas utilisé pour définir le plan). Ces deux fréquences BF mélangées en sortie de détection forment le signal Localizer composite. Il faut alors les séparer par filtrage. Les tensions alternatives 90 et 150 obtenues sont redressées et transformées en tensions continues V_{90} et V_{150} dont on fera la différence dans un premier circuit et la somme dans un second.

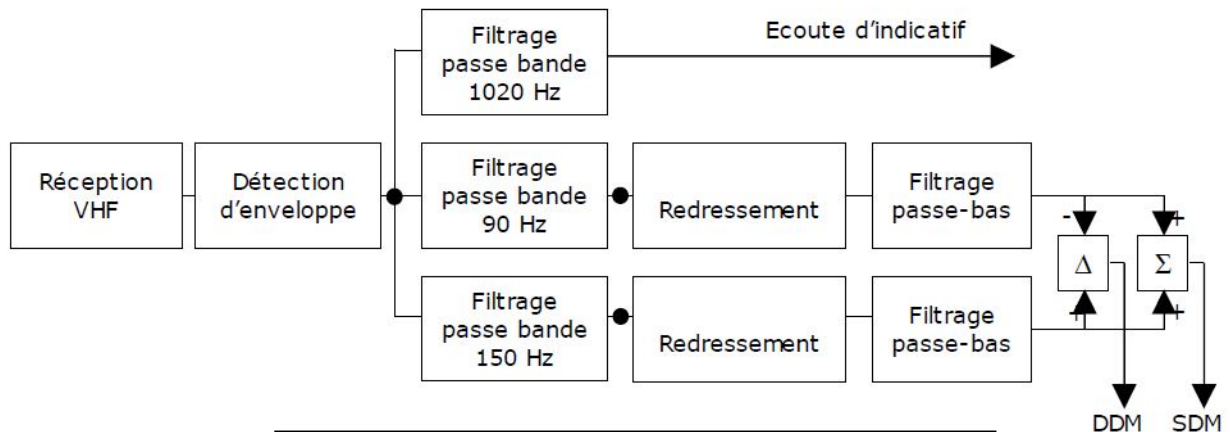


Figure 6 : Synoptique récepteur bord Localizer

Si le récepteur est réglé par une CAG efficace, les variations du niveau des fréquences 90 Hz et 150 Hz du signal composite ne résulteront que des variations des taux de modulation \mathcal{M}_{90} et \mathcal{M}_{150} du signal VHF d'entrée. Après redressement et filtrage, V_{90} et V_{150} varient comme les modules $|\mathcal{M}_{90}|$ et $|\mathcal{M}_{150}|$.

$$\text{D'où : } V_{90} = C \cdot |\mathcal{M}_{90}| \quad \text{et} \quad V_{150} = C \cdot |\mathcal{M}_{150}|$$

$$\Delta = V_{150} - V_{90} = C \cdot (|\mathcal{M}_{150}| - |\mathcal{M}_{90}|)$$

$$\Sigma = V_{90} + V_{150} = C \cdot (|\mathcal{M}_{150}| + |\mathcal{M}_{90}|)$$

La constante C est normalisée : pour une différence à l'entrée du récepteur de 15,5% entre les taux de modulation \mathcal{M}_{150} et \mathcal{M}_{90} , la tension Δ devra être de 150 mV aux bornes d'une résistance de 1000 Ω (ou 150 μA traversant ces 1000 Ω). La tension Δ obtenue en sortie de redressement et filtrage est directement représentative par sa valeur et son signe de la position du récepteur par rapport au plan (axe de piste).

Du fait de la relation normalisée entre V_{90} / V_{150} et $|\mathcal{M}_{90}| / |\mathcal{M}_{150}|$, la tension Δ prend le nom de **différence de modulation**, notée **DDM** :

$$\text{DDM} = |\mathcal{M}_{150}| - |\mathcal{M}_{90}|$$

De même, la tension Σ prend le nom de **somme de modulation**, notée **SDM** :

$$\text{SDM} = |\mathcal{M}_{150}| + |\mathcal{M}_{90}|$$

Les variations de la DDM et de la SDM en fonction de α (azimut) sont représentées sur la figure suivante. L'axe des ordonnées peut aussi être gradué en unités de courant de déviation (I_D en microampère)

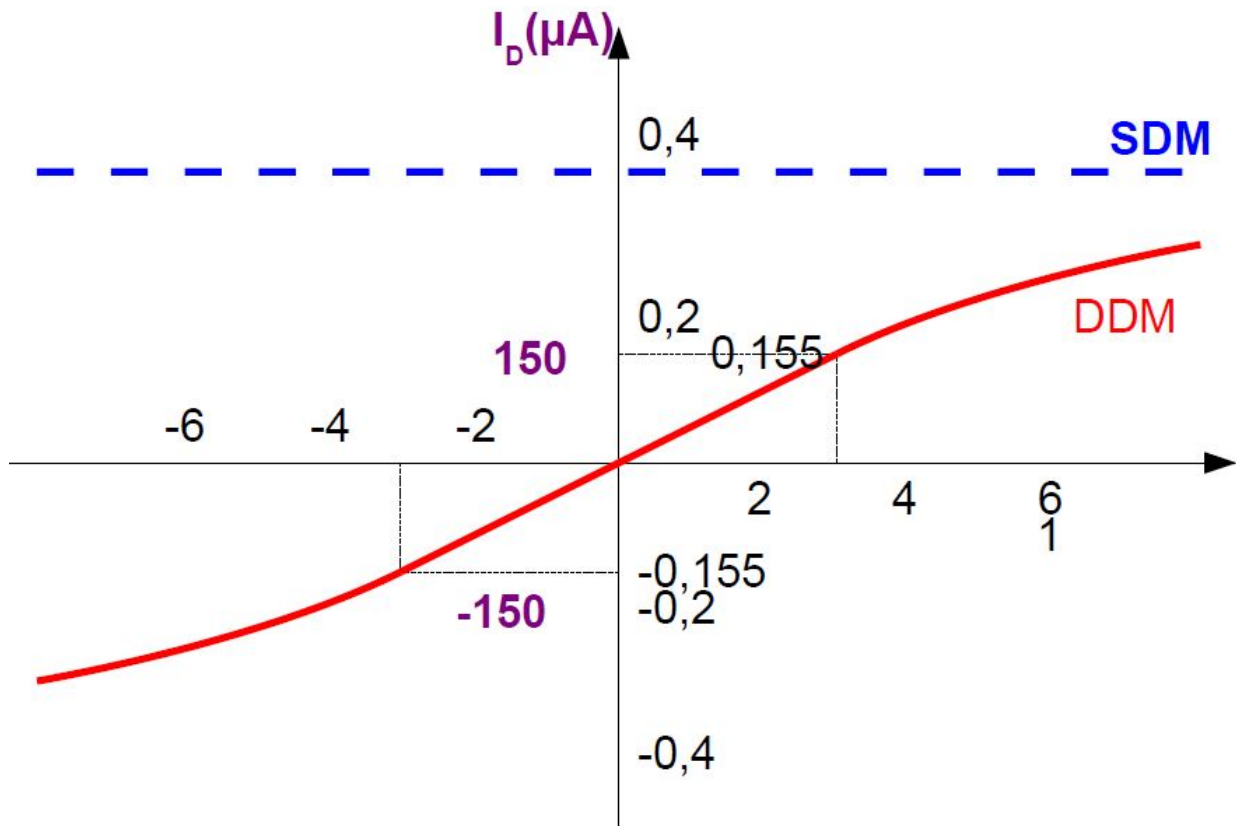


Figure 7 : Variation de la DDM et de la SDM en fonction de α

On peut remarquer que la SDM reste constante et égale à 0,4 (ou 40%) dans la zone d'azimut considérée. Toute diminution de la SDM ne peut résulter que d'une diminution de \mathcal{M}_{90} ou de \mathcal{M}_{150} . A toute diminution significative sera associé l'apparition d'un drapeau d'alarme (ou "Flag").

I.5.3 Secteur d'alignement de piste : sensibilité d'écart linéaire et angulaire

Les courants alimentant l'indicateur de déviation $\pm 150 \mu A$ correspondent à une DDM = $\pm 15,5\%$ (ou 0,155) et aussi à la mise en butée de l'aiguille de l'indicateur de bord à droite ou à gauche. Ils délimitent ainsi les bords droit et gauche du secteur d'alignement de piste. A l'intérieur de ce secteur, la DDM doit varier linéairement en fonction de l'écart latéral au seuil de piste.

$$DDM = S_e \cdot e$$

S_e est la sensibilité d'écart au seuil de piste.

e est l'écart latéral au seuil de piste exprimé en mètres.

Calcul de la sensibilité d'écart avec une DDM = 15,5 % (ou 150 μ A) pour un écart latéral de 105 mètres au seuil de piste.

D'où : $S_e = 15,5\%/105 = 0,148\% / \text{m}$ (ou 1,43 μ A / m).

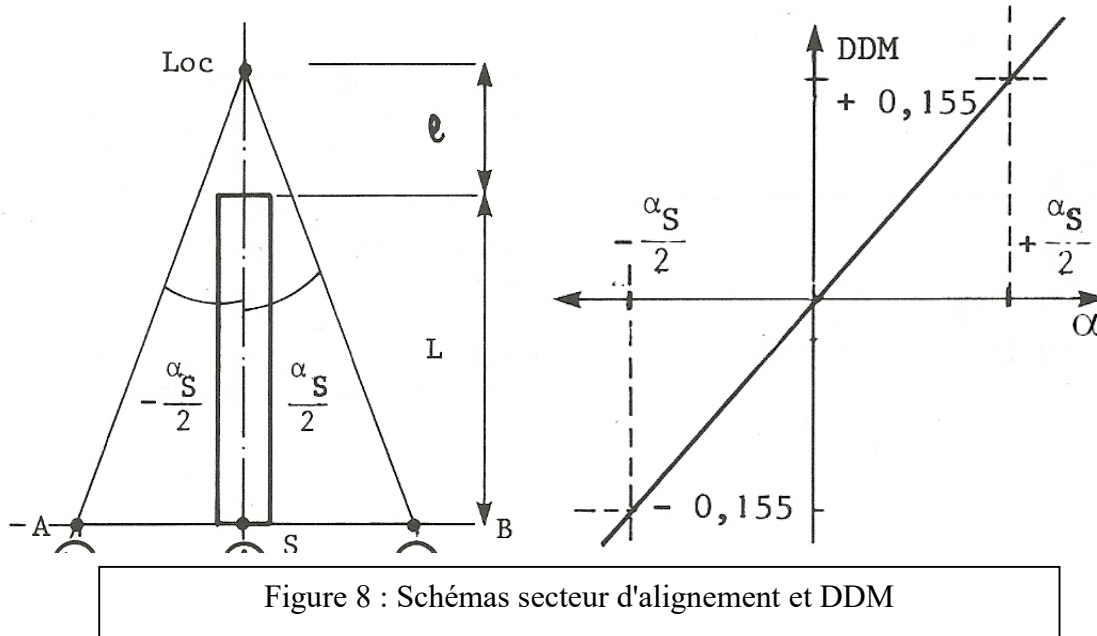


Figure 8 : Schémas secteur d'alignement et DDM

Comme la valeur de S_e est constante, il en résulte que la valeur angulaire du secteur d'alignement de piste dépend de la longueur de la piste L et de la distance l du localizer à l'extrémité de piste. On peut calculer la valeur de l'angle d'ouverture α_s du secteur localizer de la façon suivante :

$$\tan\left(\frac{\alpha_s}{2}\right) = \frac{105}{L+l}$$

Ce qui donne pour l'ILS de la piste 23 de Bordeaux Mérignac :

$L = 3100 \text{ m}$ et $l = 300 \text{ m}$.

Soit : $\alpha_s/2 = 1,76^\circ$

On convient toutefois, que pour des pistes courtes (distance localizer - seuil de piste inférieure à 2000 mètres), le demi secteur soit maintenu à 3° ($\alpha_s \text{ max} = 6^\circ$).

I.5.4 Variation de la DDM et de la SDM en zone de couverture

Les variations \mathcal{M}_{90} et \mathcal{M}_{150} ont été définies de part et d'autre du plan localizer à $\pm 3^\circ$. Il importe cependant que dans tout le reste de l'espace où le localizer est normalement reçu (voir figure 4), l'aiguille d'indicateur ne décolle jamais de sa butée (et donc ne puisse pas venir se recentrer) et que la SDM ne suscite jamais une indication d'alarme. On définira des valeurs minimales en dessous desquelles ces paramètres ne doivent pas descendre dans la zone d'espace où le localizer est normalement reçu.

La figure suivante montre la variation de la DDM de l'ILS 23 de Bordeaux Mérignac en fonction de l'azimut (mesure effectuée au sol à 200 mètres du localizer).

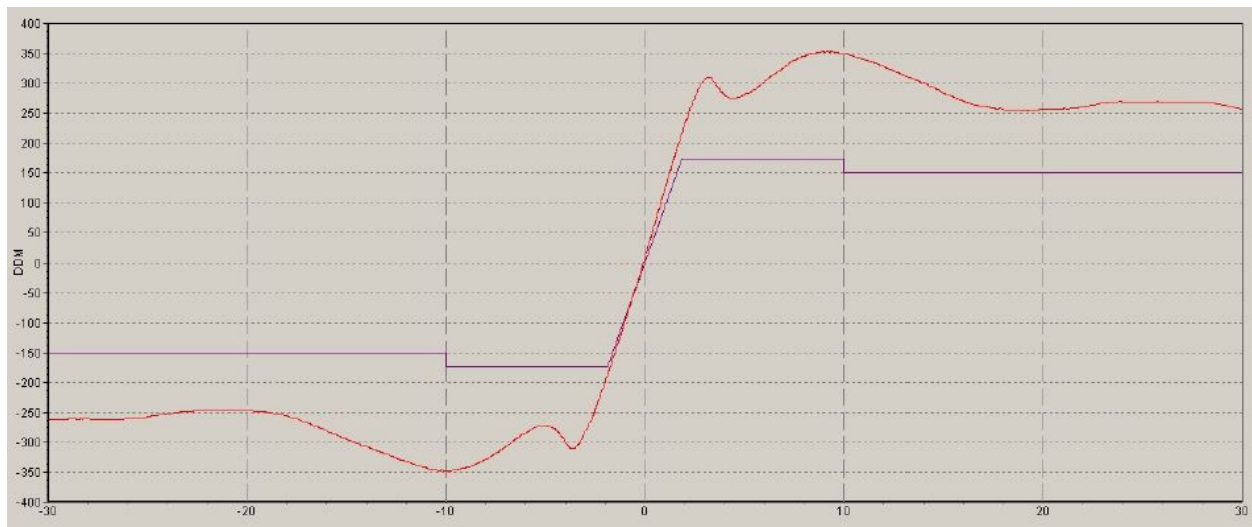


Figure 9 : Variation de la DDM en μA en fonction de l'azimut

Sur la figure, on voit la courbe de la DDM en rouge et en plus on visualise un gabarit (en violet) indiquant les valeurs minimales de DDM à respecter en fonction de l'azimut.

Ce gabarit est le suivant :

- Variation linéaire entre $\pm 150 \mu\text{A}$ à l'intérieur du secteur d'alignement de piste.
- Variation sensiblement linéaire jusqu'à la valeur de $\pm 175 \mu\text{A}$ et maintient de cette valeur jusqu'à $\alpha = \pm 10^\circ$
- De $\alpha = \pm 10^\circ$ jusqu'aux limites en azimut de la couverture VHF, la DDM sera toujours supérieure à $150 \mu\text{A}$.
- La SDM restera centrée autour de 40% sur toute l'étendue de la couverture VHF ($\pm 3\%$).

De même, voici un relevé de la variation de la SDM en fonction de l'azimut :



Figure 10 : Variation de la SDM en % en fonction de l'azimut

I.6 Principe de la définition radioélectrique du plan oblique de descente

I.6.1 Signal rayonné : variation des taux de modulation d'espace

Ce plan est défini à l'aide d'un signal UHF modulé en amplitude simultanément par du 90 Hz et du 150 Hz. Cette modulation respecte les critères suivants :

- La variation des taux de modulation \mathcal{M}_{90} et \mathcal{M}_{150} est symétrique par rapport au plan oblique de descente à définir.
- Dans ce même plan, les taux de modulation seront égaux : $\mathcal{M}_{90} = \mathcal{M}_{150} = 40\%$.
- Par convention, \mathcal{M}_{90} prédominera au dessus du plan et \mathcal{M}_{150} sera prédominant au dessous du plan de descente.

I.6.2 Récepteur de bord : DDM et SDM

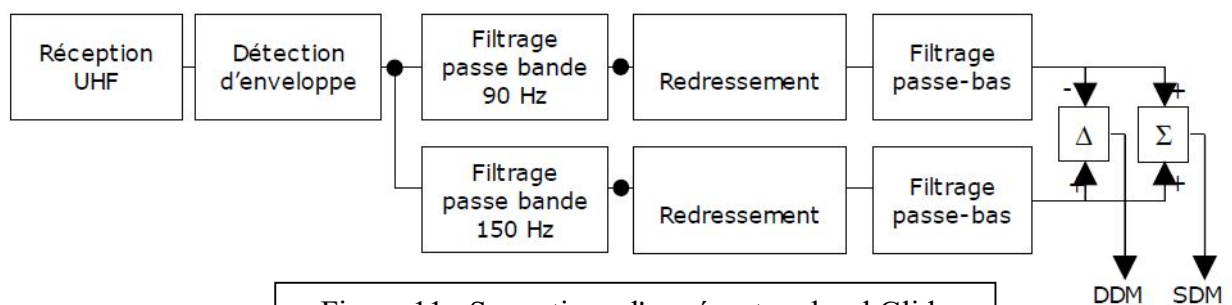


Figure 11 : Synoptique d'un récepteur bord Glide

La structure du récepteur Glide est la même que celle du Localizer à l'exception du filtre 1020 Hz qui a disparu (rappelant que l'indicatif n'est transmis que par le Localizer).

De plus, le dispositif de réception est en UHF et non plus en VHF.

De même que précédemment, on peut écrire :

$$V_{90} = C \cdot |\mathcal{M}_{90}| \quad \text{et} \quad V_{150} = C \cdot |\mathcal{M}_{150}|$$

$$\Delta = V_{150} - V_{90} = C \cdot (|\mathcal{M}_{150}| - |\mathcal{M}_{90}|)$$

$$\Sigma = V_{90} + V_{150} = C \cdot (|\mathcal{M}_{150}| + |\mathcal{M}_{90}|)$$

Toutefois, la constante C est définie différemment de celle du Localizer : les 150 mV aux bornes de la résistance de 1000 Ω seront obtenus pour une différence de taux de modulation $\mathcal{M}_{150} - \mathcal{M}_{90}$ de 0,175 (ou 17,5%).

I.6.3 Secteur d'alignement de descente : sensibilité d'écart angulaire

Les courants de $\pm 150 \mu\text{A}$ traversant l'indicateur d'écart provoquent une mise en butée inférieure et supérieure de l'aiguille et délimitent ainsi les bords supérieurs et inférieurs du secteur d'alignement de descente. Cependant, la variation linéaire de la DDM n'est obligatoire qu'à l'intérieur du demi secteur d'alignement de descente qui est délimité par le lieu des points où la $\text{DDM} = \pm 0,0875$. On ne définit pas pour le RAD une sensibilité d'écart linéaire mais seulement une sensibilité d'écart angulaire.

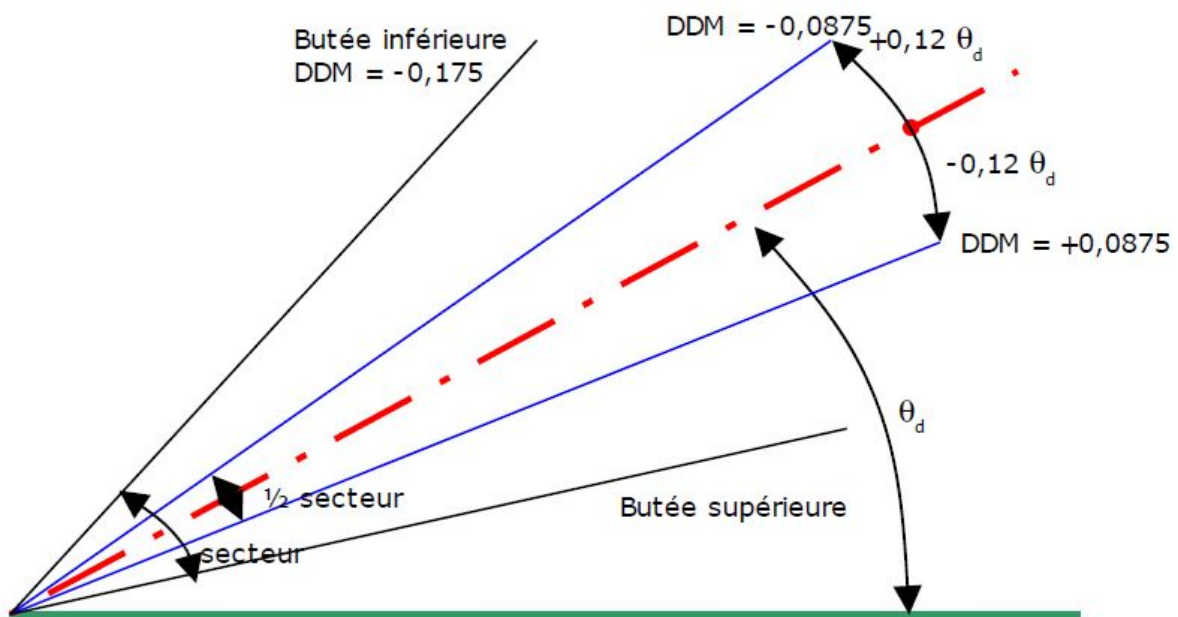


Figure 12 : Secteur d'alignement de descente

La valeur nominale du demi secteur d'alignement de descente est fixée à $0,12 \theta_d$. On en déduit la sensibilité angulaire S_θ :

$$S_\theta = \frac{0,0875}{0,12 \cdot \theta_d} \quad (\text{Ou } 75 \mu\text{A pour } 0,12 \theta_d).$$

I.6.4 Variation de la DDM et de la SDM en zone de couverture

Pour les angles de site faibles, la DDM est positive et forte. Au fur et à mesure que l'on s'approche de l'angle de descente, la DDM diminue et passe à zéro. Au dessus de l'alignement de descente, la DDM est négative et continue à diminuer au fur et à mesure que l'angle de site augmente

La DDM doit respecter le gabarit suivant :

- Pour les angles θ tels que $0,3.\theta_d < \theta < \theta_d - 0,3.\theta_d$: $DDM > 0,22$ (ou $190 \mu A$).
 \Rightarrow soit pour $\theta_d = 3^\circ \Rightarrow 0,9^\circ < \theta < 2,1^\circ$: $DDM > 190 \mu A$.
- Pour les angles tels que $\theta_d - 0,3.\theta_d < \theta < \theta_d + 0,24.\theta_d$: la DDM décroît de façon linéaire.
 \Rightarrow soit pour $\theta_d = 3^\circ \Rightarrow 2,1^\circ < \theta < 3,72^\circ$.
- Pour les angles tels que $\theta > \theta_d + 0,24.\theta_d$: $DDM < -0,175$ (ou $-150 \mu A$).

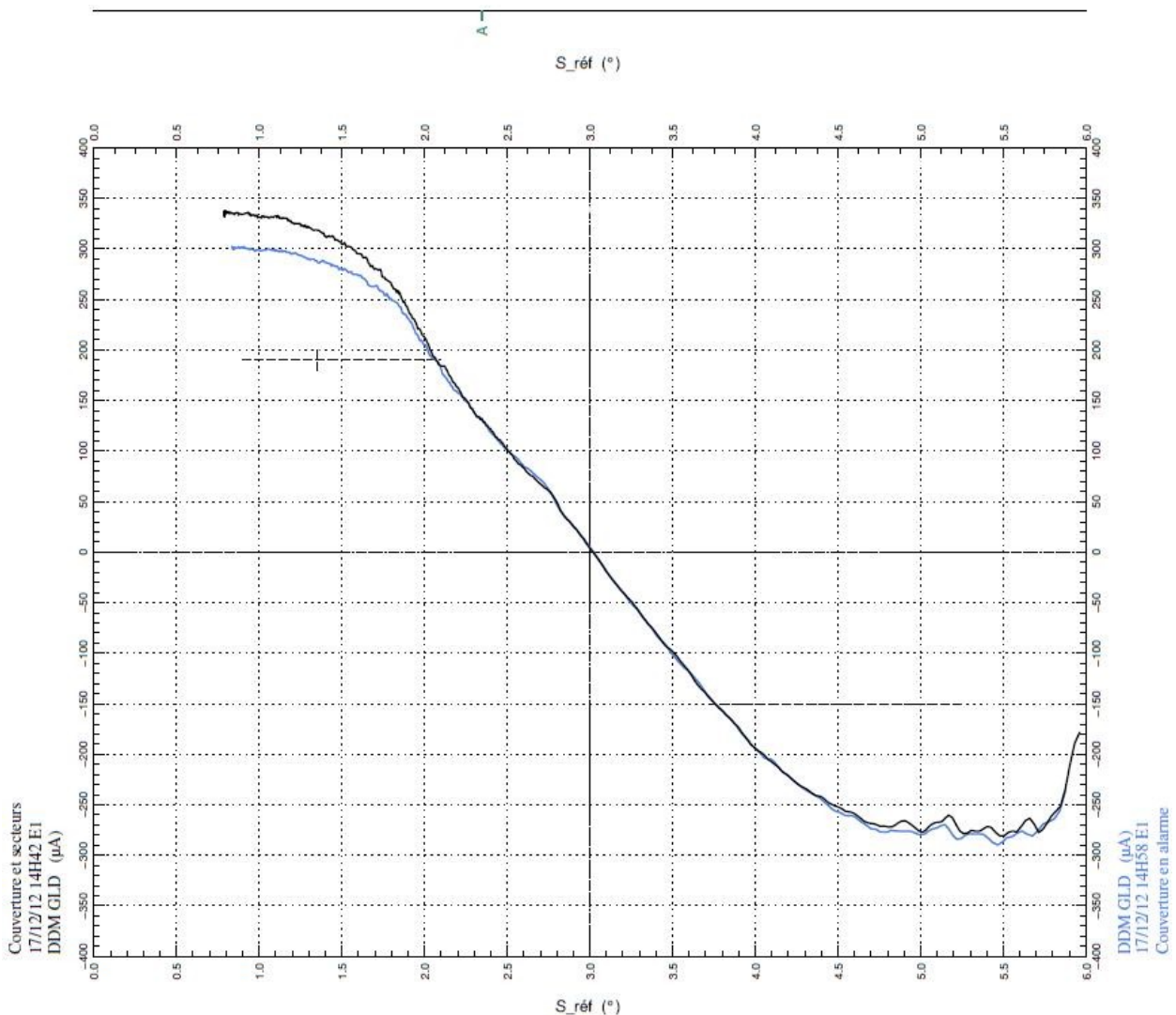


Figure 13 : Courbes de couverture du Glide de Bordeaux 29 par le CEV

Dans les 2 cas, la SDM doit rester au alentour des 80% ($\pm 3\%$).

II.) Localizer

II.1 Configuration typique d'une station sol

Vue de l'extérieur, une station Localizer sol est composée des éléments suivants :

- Un réseau d'aériens, centré sur le prolongement de l'axe de piste, à environ 300 mètres de l'extrémité de celle-ci.
- D'un shelter situé derrière le réseau d'antenne. Il comprend un coffret de distribution des signaux aux différentes antennes et un coffret de recombinaison permettant la surveillance des signaux émis.
- D'un second shelter décalé de l'axe de piste contenant :
 - * Les arrivées et la distribution d'énergie.
 - * La climatisation.
 - * La baie électronique générant les signaux P+BL et BLS à transmettre aux antennes et les dispositifs de contrôle de bon fonctionnement.

II.2 Génération des signaux

Dans tous les cas, le fonctionnement d'un RAP ou Localizer se ramène à l'émission de 2 types de signaux.

II.2.1 Signal porteuse modulée en amplitude rayonné selon un diagramme pair $P(\alpha)$

Un diagramme pair signifie que par rapport à l'axe de la piste (azimut $\alpha = 0$) $P(-\alpha) = P(\alpha)$

Le signal d'émission est de la forme :

$$s(t) = \cos \omega t [1 + M_{90} \sin 2\pi 90t + M_{150} \sin 2\pi 150t]$$

avec $M_{90} = M_{150} = 0,2$

Ce signal est souvent noté "P+BL" en français (Porteuse et Bandes Latérales) ou "CSB" (Carrier Side Band) en anglais.

Le champ rayonné est alors de la forme :

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_r \cdot P(\alpha) \cdot [1 + M_{90} \sin 2\pi 90t + M_{150} \sin 2\pi 150t]$$

Où $P(\alpha)$ est le diagramme pair dans lequel est rayonné ce champ

$$\text{et } \varepsilon_r = \frac{1}{r} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda}\right)$$

$$\text{ou encore } \varepsilon_0 = \varepsilon_r \cdot (P(\alpha) + 0,2P(\alpha) \cdot \sin 2\pi 90t + 0,2P(\alpha) \cdot \sin 2\pi 150t)$$

Le signal modulé en amplitude équivaut donc à l'émission simultanée :

- d'un champ de porteuse ε_p rayonnée selon le diagramme pair $P(\alpha)$
- d'un champ bandes latérales ε_{BL90} rayonné selon le diagramme pair $0,2P(\alpha)$
- d'un champ bandes latérales ε_{BL150} rayonné selon le diagramme pair $0,2P(\alpha)$

Les 3 champs sont en phase VHF entre eux.

II.2.2 Signaux bandes latérales 90 Hz et 150 Hz rayonnés selon un diagramme impair $F'(\alpha)$

Un diagramme impair signifie que par rapport à l'axe de la piste : $F'(-\alpha) = -F'(\alpha)$

Le signal d'émission est de la forme :

$$d(t) = k \cdot \sin 2\pi 150t \cdot \cos(\omega t) + k \cdot \sin 2\pi 90t \cdot \cos(\omega t - \pi)$$

$$\text{ou } d(t) = k \cdot \cos \omega t (\sin 2\pi 150t - \sin 2\pi 90t)$$

$d(t)$ est souvent noté "BLS" en français (Bandes Latérales Seules) ou "SBO" en anglais (Side Band Only) et il est rayonné par un diagramme $F'(\alpha)$ impair. Le champ rayonné est de la forme :

$$\text{Avec toujours : } \varepsilon_r = \frac{1}{r} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda}\right) \Rightarrow \varepsilon_{BLS} = \varepsilon_r \cdot k \cdot F'(\alpha) \cdot (\sin 2\pi 150t - \sin 2\pi 90t)$$

$$\varepsilon_{BLS90} = -k \cdot F'(\alpha) \cdot \sin(2\pi 90t) \cdot \varepsilon_r \quad \text{et} \quad \varepsilon_{BLS150} = k \cdot F'(\alpha) \cdot \sin(2\pi 150t) \cdot \varepsilon_r$$

Le diagramme $F'(\alpha)$ est en phase VHF avec le diagramme $P(\alpha)$ à droite de l'axe, et en opposition de phase VHF à gauche de l'axe.

II.2.3 Champ globalement rayonné

Le champ résultant rayonné est donc la somme des champs définis aux chapitres II.2.1 et II.2.2 :

$$\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_{BL150} + \varepsilon_{BL90} + \varepsilon_{BLS150} + \varepsilon_{BLS90}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot [P(\alpha) + (0,2P(\alpha) + kF'(\alpha)) \cdot \sin 2\pi 150t + (0,2P(\alpha) - kF'(\alpha)) \cdot \sin 2\pi 90t]$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot P(\alpha) \left[1 + \left(\frac{0,2P(\alpha) + kF'(\alpha)}{P(\alpha)} \right) \cdot \sin 2\pi 150t + \left(\frac{0,2P(\alpha) - kF'(\alpha)}{P(\alpha)} \right) \cdot \sin 2\pi 90t \right]$$

Cette expression est celle d'un signal modulé en amplitude par du 90 Hz et du 150 Hz avec les taux de modulation respectifs :

$$M_{90} = \frac{0.2P(\alpha) - kF'(\alpha)}{P(\alpha)} = 0,2 - \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)}$$

$$M_{150} = \frac{0.2P(\alpha) + kF'(\alpha)}{P(\alpha)} = 0,2 + \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)}$$

On remarquera que ces deux taux de modulation sont la somme des deux taux de modulation partiels :

- le premier est constant et vaut 0,2.
- le second est le rapport de la bande latérale émise selon le diagramme impair (F') par rapport au diagramme de la porteuse (P) multiplié par un coefficient k.

II.2.4 Expression de la DDM et de la SDM

Ces deux quantités sont élaborées dans le récepteur de bord, et par définition :

$$DDM(\alpha) = | \mathcal{M}_{150} | - | \mathcal{M}_{90} |$$

$$SDM(\alpha) = | \mathcal{M}_{150} | + | \mathcal{M}_{90} |$$

Plusieurs cas sont à considérer selon que $|0.2P(\alpha)| < |kF'(\alpha)|$ ou que $|0.2P(\alpha)| > |kF'(\alpha)|$

1^{er} cas : $-0,2 < \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)} < 0,2$ (cas si on est situé près de l'axe ou du secteur d'alignement en particulier)

$$|M_{90}| = \left| 0,2 - \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)} \right| > 0 \Rightarrow |M_{90}| = 0,2 - \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)}$$

$$|M_{150}| = \left| 0,2 + \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)} \right| > 0 \Rightarrow |M_{150}| = 0,2 + \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)}$$

$$\text{On en déduit : } DDM(\alpha) = |M_{150}| - |M_{90}| = \frac{2kF'(\alpha)}{P(\alpha)}$$

Comme $F'(\alpha)$ est en phase VHF avec $P(\alpha)$ à droite de l'axe, la DDM sera donc positive. Et inversement, $F'(\alpha)$ est en opposition de phase VHF avec $P(\alpha)$ à gauche de l'axe, donc la DDM sera négative.

$$\text{Et } SDM(\alpha) = |M_{150}| + |M_{90}| = 0,4$$

$$\underline{\text{2}^{\text{ème}} \text{ cas}} : \left| \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)} \right| > 0,2 \text{ (zone d'inversion)}$$

* **A droite de l'axe**, c'est à dire pour les $\alpha > 0 \Rightarrow F'(\alpha) > 0 \Rightarrow kF'(\alpha) > 0$.

$$\frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)} > 0 \Rightarrow \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)} > 0,2$$

$$\text{Donc : } |M_{90}| = \left| 0,2 - \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)} \right| < 0 \Rightarrow |M_{90}| = -0,2 + \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)}$$

$$|M_{150}| = \left| 0,2 + \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)} \right| > 0 \Rightarrow |M_{150}| = 0,2 + \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)}$$

$$DDM = |M_{150}| - |M_{90}| = 0,4$$

$$SDM = |M_{150}| + |M_{90}| = \frac{2kF'(\alpha)}{P(\alpha)}$$

Comme $F'(\alpha)$ est positif, la SDM est positive.

* **A gauche de l'axe**, c'est à dire pour les $\alpha < 0 \Rightarrow F'(\alpha) < 0 \Rightarrow kF'(\alpha) < 0$.

$$\frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)} < 0 \Rightarrow \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)} < -0,2$$

$$\text{Donc : } |M_{90}| = \left| 0,2 - \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)} \right| > 0 \Rightarrow |M_{90}| = 0,2 - \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)}$$

$$|M_{150}| = \left| 0,2 + \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)} \right| < 0 \Rightarrow |M_{150}| = -0,2 - \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)}$$

$$DDM = |M_{150}| - |M_{90}| = -0,4$$

$$SDM = |M_{150}| + |M_{90}| = -\frac{2kF'(\alpha)}{P(\alpha)}$$

Comme $F'(\alpha)$ est négatif, la SDM est positive.

Ces diverses relations dites équations fondamentales de l'ILS montrent que l'information de guidage (la DDM) dépend directement de l'allure des diagrammes pair $P(\alpha)$ et impair $F'(\alpha)$.

II.2.5 Valeur maximale du rapport $\frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)}$

Pour que l'ensemble du système RAP ne surmodule pas (ce qui altérerait la qualité des signaux 90 et 150 qui servent à la navigation), il faut que la somme des taux de modulation : indicatif + phonie + \mathcal{M}_{150} + \mathcal{M}_{90} < 1.

On a vu que la valeur de \mathcal{M}_{150} + \mathcal{M}_{90} , autrement dit la SDM, peut varier de 0,4 à $\frac{2kF'(\alpha)}{P(\alpha)}$ (valeur maximum).

$$\text{Soit : } 0,1 + 0,3 + \left| \frac{2kF'(\alpha)}{P(\alpha)} \right| < 1 \Leftrightarrow \left| \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)} \right| < 0,3$$

Sachant que la phonie n'est pas utilisée en France, on pourrait même aller jusqu'à : $\left| \frac{kF'(\alpha)}{P(\alpha)} \right| < 0,45$ au maximum.

II.3 Réseau d'aériens

II.3.1 Localizer 3 antennes

a) Disposition des antennes

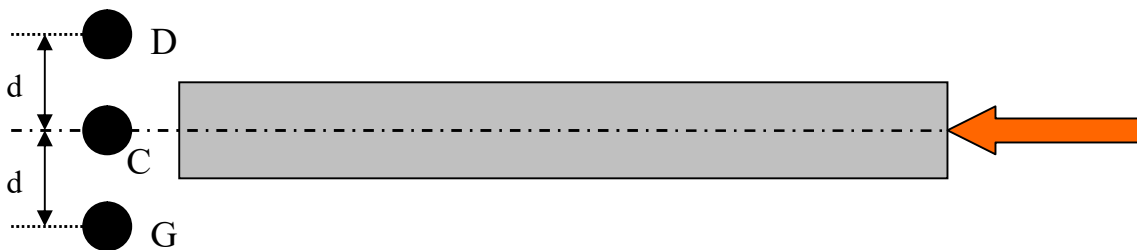


Figure 20 : Schéma de principe d'un localizer 3 antennes

Une antenne centrale C est placée au-delà de l'extrémité de piste dans le prolongement de l'axe. De part et d'autre de C, on trouve deux antennes D et G dites latérales. Elles sont disposées symétriquement à une distance d de l'axe. L'alignement DCG est perpendiculaire à l'axe de piste.

b) Tableau d'alimentation des antennes

Ces trois antennes ont des caractéristiques identiques et ont pour diagramme propre $f(\alpha)$. Le tableau des courants d'alimentation de ces antennes précise leurs natures, leurs amplitudes et leurs phases.

Antennes	P+BL		BLS	
	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase
D			k	$-\pi/2$
C	1	0		
G			k	$\pi/2$

Figure 21 : Tableau d'alimentation du réseau 3 antennes

Ce tableau signifie que l'on alimente l'antenne centrale avec le signal "P+BL". Ce dernier aura une amplitude de 1 et une phase VHF de 0. Ensuite, on alimente les antennes droite et gauche avec le signal "BL". Ce dernier aura une amplitude relative par rapport au signal "P+BL" de k (k<1). Et la phase VHF sera de $+\pi/2$ pour l'antenne gauche et de $-\pi/2$ pour la droite.

- Pour l'antenne centrale, le signal d'émission est de la forme :

$$s(t) = \cos \omega t [1 + 0,2 \sin(2\pi 90t) + 0,2 \sin(2\pi 150t)]$$

Et le champ rayonné $\epsilon_c = \epsilon_r \cdot f(\alpha) \cdot [1 + 0,2 \sin(2\pi 90t) + 0,2 \sin(2\pi 150t)]$

Avec $\epsilon_r = \frac{1}{r} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda}\right)$ et $f(\alpha) = P(\alpha) \Rightarrow P(\alpha)$ est le diagramme pair rayonné par l'antenne centrale.

- Pour les antennes latérales, les deux signaux d'émission sont de la forme :

$$e_D = k \cdot \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \cdot [\sin(2\pi 150t) - \sin(2\pi 90t)]$$

$$e_G = k \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \cdot [\sin(2\pi 150t) - \sin(2\pi 90t)]$$

Les antennes droite et gauche sont alimentées par un même signal mais déphasées de 180°.

Elles peuvent être assimilées à une seule antenne qui aurait le même diagramme de rayonnement que le deux réunies et dont le centre de phase est situé au milieu du segment [DG] (soit sur l'antenne centrale).

On appelle $F_g(\alpha)$ le facteur de directivité du groupement d'antenne. Il représente la résultante de l'action du groupement d'antenne sur le rayonnement. Dans le cas de deux antennes espacées d'une distance 2d, alimentées par un signal en opposition de phase mais ayant la même amplitude, on obtient :

$$F_g(\alpha) = 2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)$$

Les antennes ont aussi un diagramme de rayonnement propre (noté ici $f(\alpha)$) qu'il faut aussi prendre en compte. On notera donc $F'(\alpha) = F_g(\alpha) \cdot f(\alpha) = 2f(\alpha) \cdot \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)$ qui représente le diagramme de rayonnement des deux antennes droite et gauche (donc des "BLS")

Par conséquent le champ rayonné par les antennes droite et gauche peut s'écrire :

$$\varepsilon_{DG} = \varepsilon_r \cdot F'(\alpha) \cdot k \cdot [\sin(2\pi 150t) - \sin(2\pi 90t)]$$

$$\text{Avec } \varepsilon_r = \frac{1}{r} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda}\right)$$

Rayonnement simultané de "P+BL" et de "BLS" : ε_T

$$\varepsilon_T = \varepsilon_C + \varepsilon_{DG}$$

$$\varepsilon_T = \varepsilon_r \cdot P(\alpha) \cdot \left[1 + \left(\left(0,2 + k \cdot \frac{F'(\alpha)}{P(\alpha)} \right) \cdot \sin(2\pi 150t) \right) + \left(\left(0,2 - k \cdot \frac{F'(\alpha)}{P(\alpha)} \right) \cdot \sin(2\pi 90t) \right) \right]$$

c) Ecriture des modulations M_{150} et M_{90} ainsi que la DDM et SDM

On est déduit la modulation 150 et 90 :

$$M_{150} = 0,2 + k \frac{F'(\alpha)}{P(\alpha)} \text{ et } M_{90} = 0,2 - k \frac{F'(\alpha)}{P(\alpha)}$$

On retrouve les mêmes expressions qu'au chapitre II.2.4. On peut donc écrire la DDM et la SDM :

$$DDM(\alpha) = | \mathcal{M}_{150} | - | \mathcal{M}_{90} |$$

$$SDM(\alpha) = | \mathcal{M}_{150} | + | \mathcal{M}_{90} |$$

$$\underline{1^{\text{er}} \text{ cas}} : k \frac{F'(\alpha)}{P(\alpha)} < 0,2$$

$$DDM(\alpha) = \frac{2kF'(\alpha)}{P(\alpha)} \text{ et } SDM(\alpha) = 0,4$$

$$\underline{2^{\text{ème}} \text{ cas}} : k \frac{F'(\alpha)}{P(\alpha)} > 0,2 \text{ (zone d'inversion)}$$

$$\text{Pour les } \alpha > 0 : DDM = 0,4 \text{ et } SDM(\alpha) = \frac{2kF'(\alpha)}{P(\alpha)}$$

$$\text{Pour les } \alpha < 0 : DDM = -0,4 \text{ et } SDM(\alpha) = -\frac{2kF'(\alpha)}{P(\alpha)}$$

d) Calcul de k :

Hypothèses :

* L'espacement entre antenne : $2.d = 0,8\lambda$

* La piste a une ouverture secteur de 6° .

On sait que la DDM = 150 μ A ou 15,5% pour $\alpha = 3^\circ$.

$$\Rightarrow DDM = 2k \frac{F'(\alpha)}{P(\alpha)} = 2k \cdot \frac{2f(\alpha) \cdot \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)}{f(\alpha)} = 4k \sin(0,8\pi \sin \alpha) = 0,155$$

$$\text{En degré : } k = \frac{0,155}{4 \sin(144 \sin 3^\circ)} = 0,295$$

e) Calcul des modulations, de la DDM et de la SDM (avec α exprimé en degrés)

$$M_{150} = 0,2 + k \frac{F'(\alpha)}{P(\alpha)} = 0,2 + k \cdot \frac{2f(\alpha) \cdot \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)}{f(\alpha)} = 0,2 + 2k \sin(144 \sin \alpha)$$

$$M_{90} = 0,2 - k \frac{F'(\alpha)}{P(\alpha)} = 0,2 - k \cdot \frac{2f(\alpha) \cdot \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)}{f(\alpha)} = 0,2 - 2k \sin(144 \sin \alpha)$$

$$DDM(\alpha) = | \mathcal{M}_{150} | - | \mathcal{M}_{90} |$$

$$SDM(\alpha) = | \mathcal{M}_{150} | + | \mathcal{M}_{90} |$$

En zone de non inversion :

$$DDM(\alpha) = \frac{2kF'(\alpha)}{P(\alpha)} = 4k \sin(0,8\pi \sin \alpha)$$

$$SDM(\alpha) = 0,4$$

En zone d'inversion, c'est le contraire.

On démontre ici que les taux de modulation 90 et 150 (et donc la DDM et la SDM) ne dépendent pas du diagramme de rayonnement propre des antennes $f(\alpha)$ (C, D et G qui sont supposés identiques) mais des facteurs de directivité des groupements d'antenne (aussi bien pour le champ "P+BL" que "BLS").

f) Courbes des variations des modulations 150 et 90 ainsi que la DDM et SDM

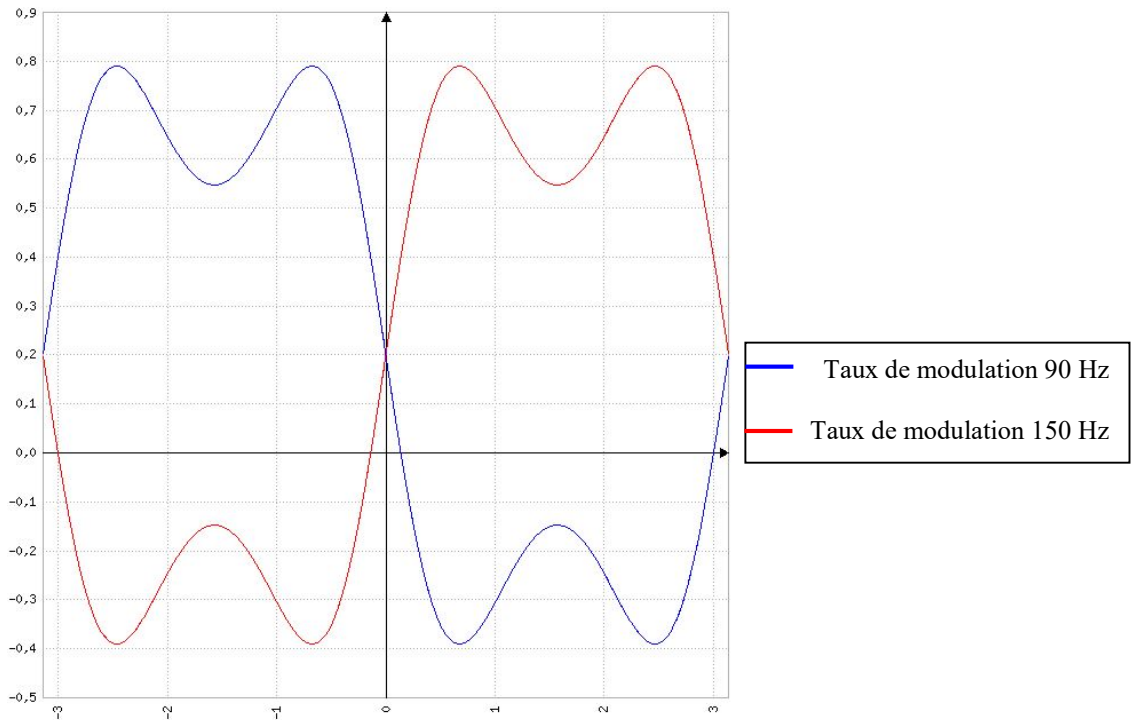


Figure 22 : Variation de M_{90} et M_{150} en fonction de l'azimut en radian

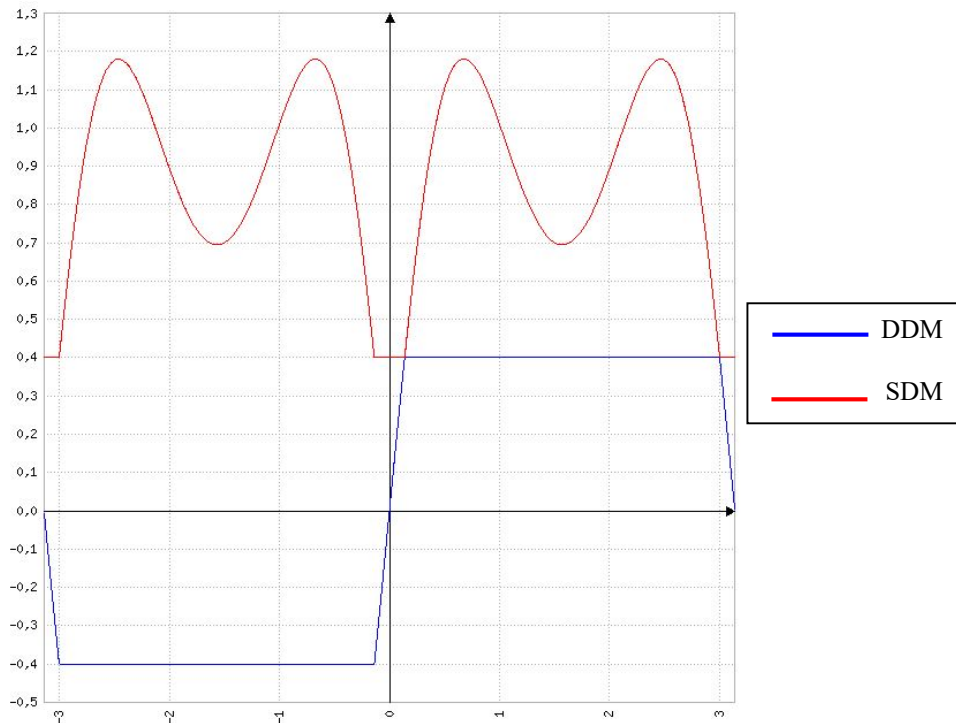


Figure 23 : Variation de la DDM et SDM en fonction de l'azimut en radian

e) Conclusions

A la lecture de ces courbes, on se rend compte que l'on a un problème dans la valeur de la SDM. Cette dernière augmente trop (environ 1,2) et par conséquent la somme des taux de modulation des différents signaux émis par le localizer est supérieur à 1. Nous sommes donc en surmodulation, ce qui n'est pas bon comme nous l'avons vu précédemment.

Pour rappel, la modulation de l'indicatif est de 10%; celle pour la phonie est de 30%.
La valeur de la SDM en zone d'inversion est :

$$SDM(\alpha) = 4k \sin(0,8\pi \sin \alpha) \text{ et donc sa valeur maximum est } 4k.$$

On en déduit : $0,1 + 0,3 + 4k < 1$ soit $k < 0,15$.

Si k doit changer, on remarque que l'on joue sur la valeur de la DDM sur les bords secteurs, et que cette valeur est normalisée à $150\mu A$ ou 15,5%.

On doit donc modifier notre réseau d'antenne pour pouvoir à la fois avoir la bonne valeur de DDM sur les bord secteur et ne pas surmoduler. En effet, comme on l'a vu, c'est le rapport entre le diagramme "BLS" et "P+BL" qui détermine la DDM.

On comprend qu'il faut augmenter le nombre d'antennes pour pouvoir agir sur le diagramme de rayonnement du "P+BL" et du "BLS".

II.3.2 Localizer 5 antennes

a) Disposition des antennes

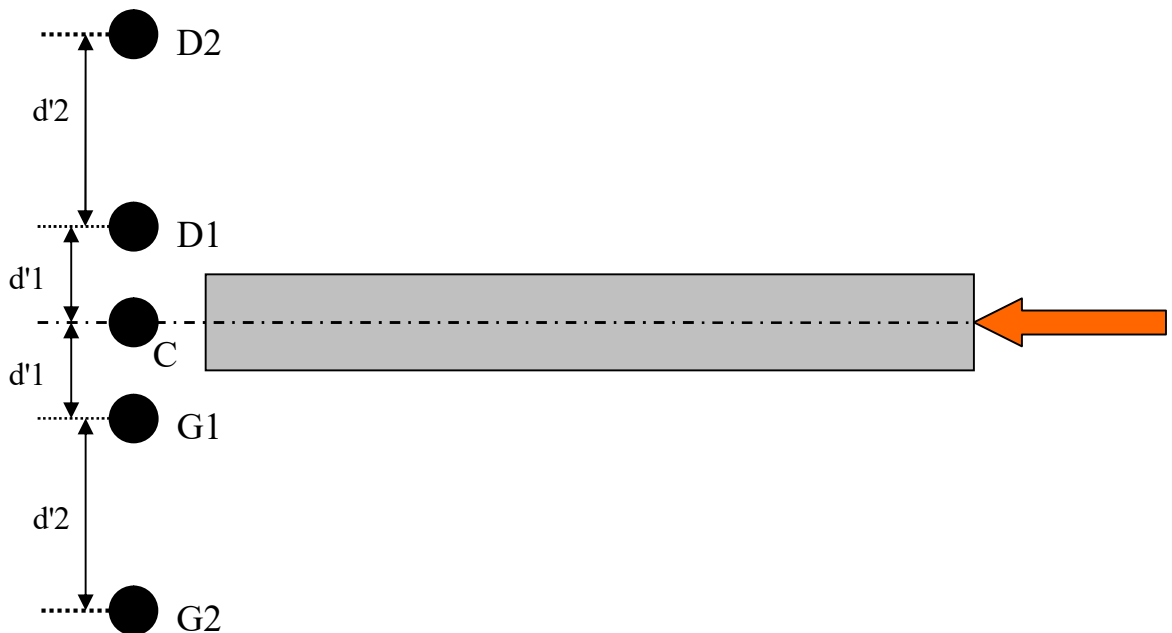


Figure 24 : Schéma de principe d'un localizer 5 antennes

Suivant le même principe que précédemment, on rajoute deux autres antennes (G2 et D2). On précise ci-dessous les conditions d'alimentations de ces antennes.

b) Tableau d'alimentation des antennes

Antennes	P+BL		BLS	
	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase
D2			k2	$-\pi/2$
D1			k1	$-\pi/2$
C	1	0		
G1			k1	$\pi/2$
G2			k2	$\pi/2$

Figure 25 : Tableau d'alimentation du réseau 5 antennes

Comme les antennes D1 et G1, les deux antennes D2 et G2 peuvent être considérées comme une seule antenne située en C selon le diagramme suivant :

$$F'_2(\alpha) = 2f(\alpha) \cdot \sin\left(\frac{2\pi d_2}{\lambda} \sin \alpha\right) \text{ avec } 2d_2 = 2d'_1 + 2d'_2$$

Ce diagramme se rajoutera à celui des antennes D1 et G1 :

$$F'_1(\alpha) = 2f(\alpha) \cdot \sin\left(\frac{2\pi d_1}{\lambda} \sin \alpha\right) \text{ avec } 2d_1 = 2d'_1$$

Suivant le même raisonnement que pour le localiser à 3 antennes, on peut en déduire la DDM et la SDM.

c) Ecriture de la DDM et de la SDM

En zone de non inversion :

$$DDM(\alpha) = \frac{\sum [2k \cdot F'(\alpha)]}{P(\alpha)} = 4 \left[k_1 \cdot \sin\left(\frac{2\pi d_1}{\lambda} \sin \alpha\right) + k_2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi d_2}{\lambda} \sin \alpha\right) \right]$$

$$SDM(\alpha) = 0,4$$

En zone d'inversion :

A gauche de l'axe ($\alpha < 0$), les expressions précédentes de DDM et SDM s'échangent et changent de signe.

A droite de l'axe ($\alpha > 0$), les expressions précédentes s'échangent et gardent le même signe.

d) Courbes des variations de la DDM et SDM

Le réseau est équidistant : ce qui veut dire que, hormis l'antenne centrale, toutes les antennes ont le même espacement entre elles.

Donc $d'_2 = 2d'_1$. En gardant $2.d'_1 = 0,8\lambda = 2d_1$, on a $2d_2 = 2d'_1 + 2d'_2 = 0,8\lambda + 1,6\lambda = 2,4\lambda$

On prend : $k_1 = 0,12$ et $k_2 = 0,06$

Vérification de la justesse des valeurs de k_1 et k_2 en calculant la DDM sur le bord secteur ($\alpha = 3^\circ$) qui doit être de 0,155.

$$DDM(3^\circ) = 4[0,12.\sin(144^\circ.\sin 3^\circ) + 0,06.\sin(432^\circ.\sin 3^\circ)] = 0,1552$$

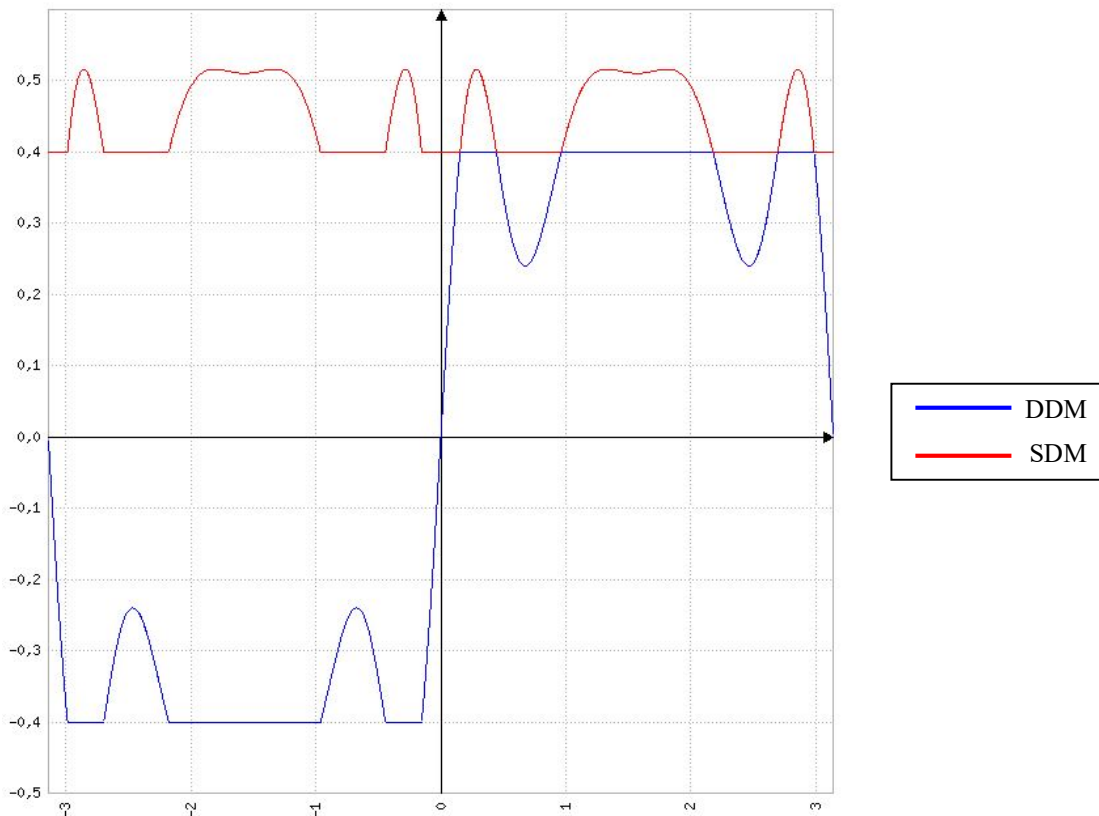


Figure 26 : Variation de la DDM et SDM en fonction de l'azimut en radian pour un réseau 5 antennes

e) Conclusions

Nous voyons ici que la SDM maximum est à moins de 52%. Si on rajoute les 10% de l'indicatif et les 30% de l'éventuelle phonie, nous sommes à 92% de modulation : donc nous ne sommes pas en surmodulation. De plus, nous avons calculé qu'avec les valeurs de k_1 et k_2 , nous avons aussi une bonne ouverture secteur.

Le réseau à cinq antennes constitue un réseau minimal pour faire fonctionner théoriquement un localiser. Mais plus nous augmenterons le nombre d'antennes, plus nous obtiendrons des fonctionnements de plus en plus performants.

L'extension à n antennes se calcule par des méthodes de synthèse des réseaux.

II.3.3 Réseau 13 antennes Thomson 381 / 389

C'est un ensemble de 13 antennes disposées devant un plan réflecteur. Les 2 X 6 antennes latérales sont équidistantes et espacées de 2,20 m. Une treizième antenne est située au centre du réseau. Le plan réflecteur est disposé à 0,68 m de l'alignement des antennes et il est constitué d'une nappe de fils horizontaux. Les antennes élémentaires, toutes identiques, sont des antennes cadre de périmètre λ .

On associe à ce réseau un ensemble de circuits de distribution VHF situés dans un coffret derrière les antennes. Ce circuit permet de diviser et déphaser les signaux "P+BL" et "BLS" pour qu'ensuite ils attaquent chaque antenne. L'alimentation de ces aériens permet la formation du diagramme pair $P(\alpha)$ et du diagramme impair $F'(\alpha)$.

$P(\alpha)$ est obtenu par le groupement de 11 antennes alimentées en phase.

$F'(\alpha)$ est obtenu par le groupement de 12 antennes alimentées par paire en opposition de phase.

Le tableau d'alimentation du réseau 13 antennes monofréquence est le suivant :

		G6	G5	G4	G3	G2	G1	C	D1	D2	D3	D4	D5	D6
P+BL	dB		-25	-17,3	-12,2	-9,2	-4,4	0	-4,4	-9,2	-12,2	-17,3	-25	
	°		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
BLS	dB	-15,2	-8,7	-5,1	-3,7	-3,1	0		0	-3,1	-3,7	-5,1	-8,7	-15,2
	°	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$		$-\pi/2$	$-\pi/2$	$-\pi/2$	$-\pi/2$	$-\pi/2$	$-\pi/2$

Figure 27 : Tableau d'alimentation du réseau 13 antennes monofréquence Thomson

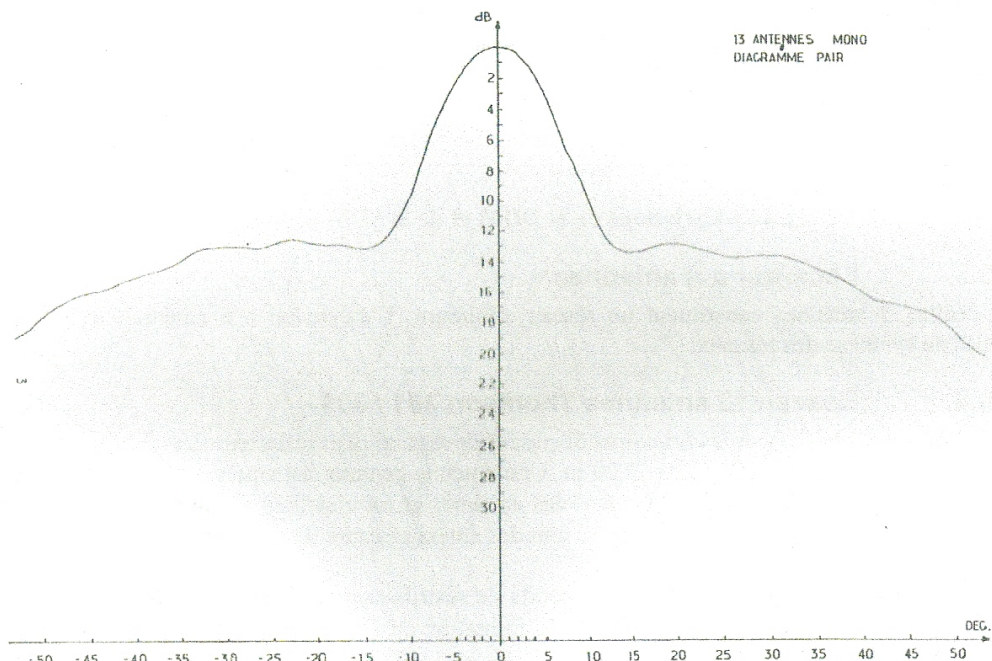


Figure 28 : Diagramme P+BL rétrodiffusé réseau 13 antennes monofréquence Thomson

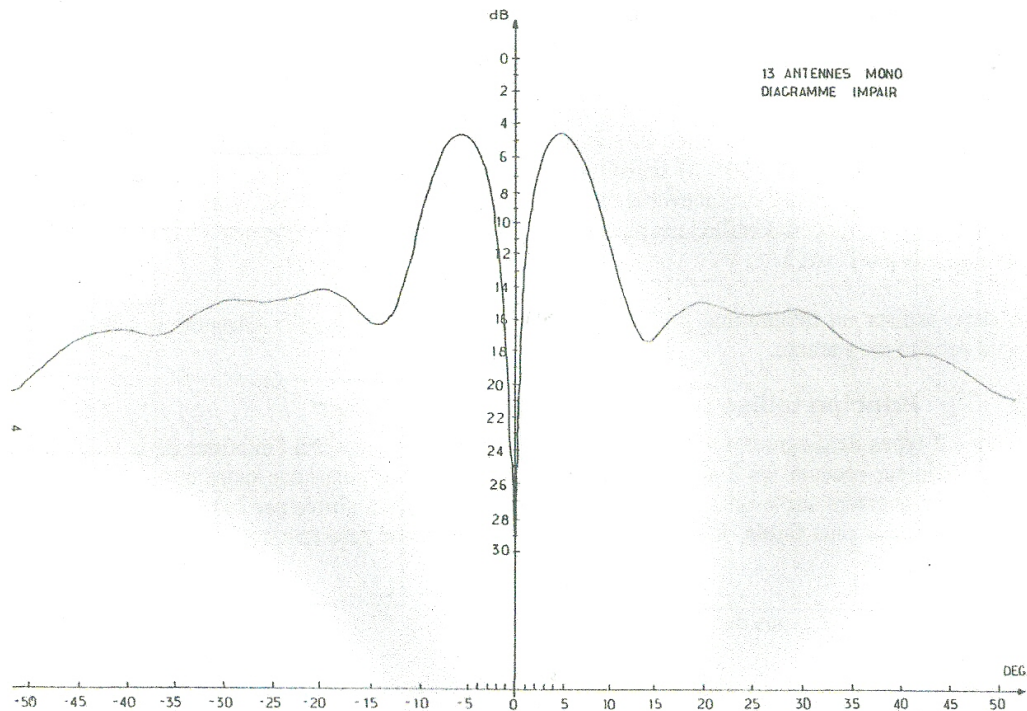


Figure 29 : Diagramme BLS réseau 13 antennes monofréquence Thomson

II.4 Emission bifrédence

II.4.1 Objectif

Une station localizer est implanté sur un aéroport. Or l'environnement de ce dernier est souvent très perturbé du point de vue du rayonnement. En effet, la présence de nombreux bâtiments à proximité de la piste (hangars, tour de contrôle, aérogare ...) constitue autant de plan de réflexions parasites pour le signal rayonné par le localizer. Il paraît inconcevable de supprimer ces bâtiments. Il faut donc trouver une solution permettant de limiter l'impact de ces réflexions parasites sur la structure de l'axe afin que cette dernière respecte les gabarits imposés par l'OACI.

On va donc utiliser un diagramme plus directif autour de l'axe, et afin d'assurer la couverture azimutale, on rayonnera un second diagramme pour couvrir cette zone.

II.4.2 Principe utilisé : effet de capture du récepteur

On rayonne deux types de diagrammes sur deux fréquences porteuse distinctes à l'intérieur de la voie VHF du localizer. Le récepteur de bord recevra les deux signaux, mais si la différence de puissance entre eux est supérieure à 10 dB, le récepteur se calera sur le plus puissant et rejettera l'information portée par l'autre signal. Dans le cas d'un écart de puissance plus faible, le signal décodé par le récepteur sera une combinaison des deux signaux reçus.

On va donc émettre deux types de signaux distincts :

- Un signal rayonné selon un diagramme directif autour de l'axe. Ce signal est appelé signal **directif**. Sa fréquence porteuse est $f = f_0 - \Delta f$. Le diagramme de rayonnement du directif sera calculé de façon à apporter la meilleure réjection possible des lobes secondaires. Les signaux directifs rayonnés sont du type "P+BL" et "BLS".

- Un signal qui permet d'assurer la couverture au delà de $|\alpha| = 10^\circ$. Le diagramme est atténué autour de l'axe afin d'assurer la prédominance du directif. Ce signal est appelé **clearance**. Sa fréquence porteuse est $f = f_0 + \Delta f$. Comme dans le cas du directif, les signaux émis sont de type "P+BL" et "BLS".

Δf est généralement compris entre 4 et 5 kHz.

II.4.3 Diagrammes en azimut des quatre signaux

Les diagrammes montrés plus bas sont issus du réseau Thalès bifréquence 12 et 20 antennes. Nous pourrons ainsi visualiser l'avantage du 20 antennes sur le 12 antennes.

Ce réseau d'antennes est différent de celui étudié pour le mono fréquence. En effet, il n'y a plus d'antenne centrale. Nous verrons ce que cela implique pour les diagrammes qui en découlent.

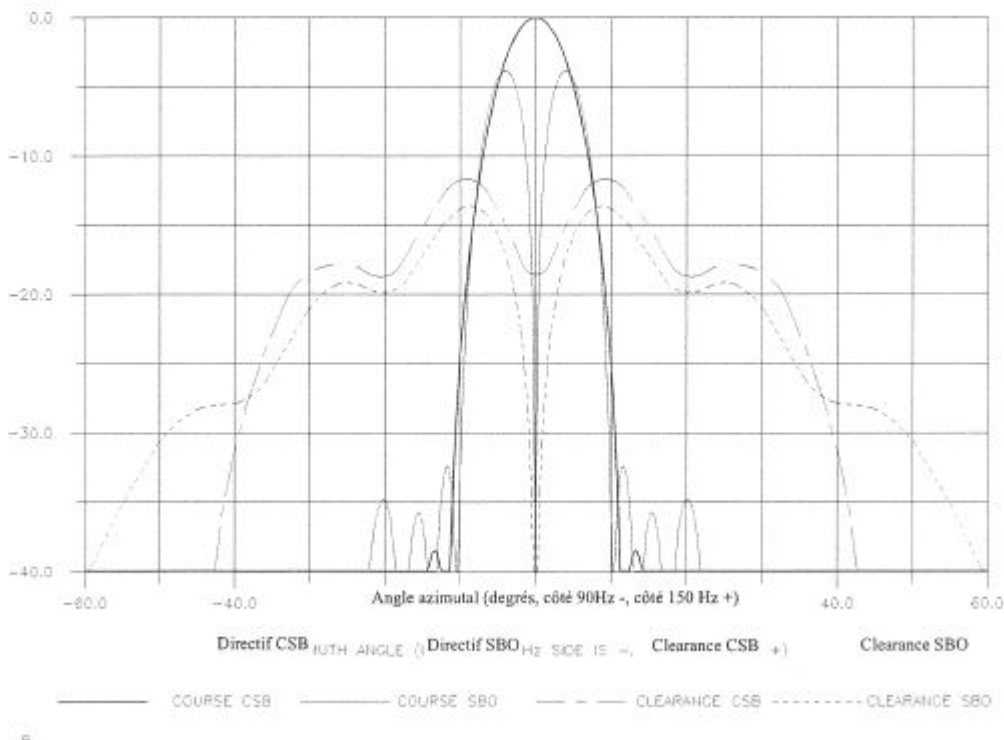


Figure 30 : Diagrammes réseau 10 antennes bifréquence Thalès

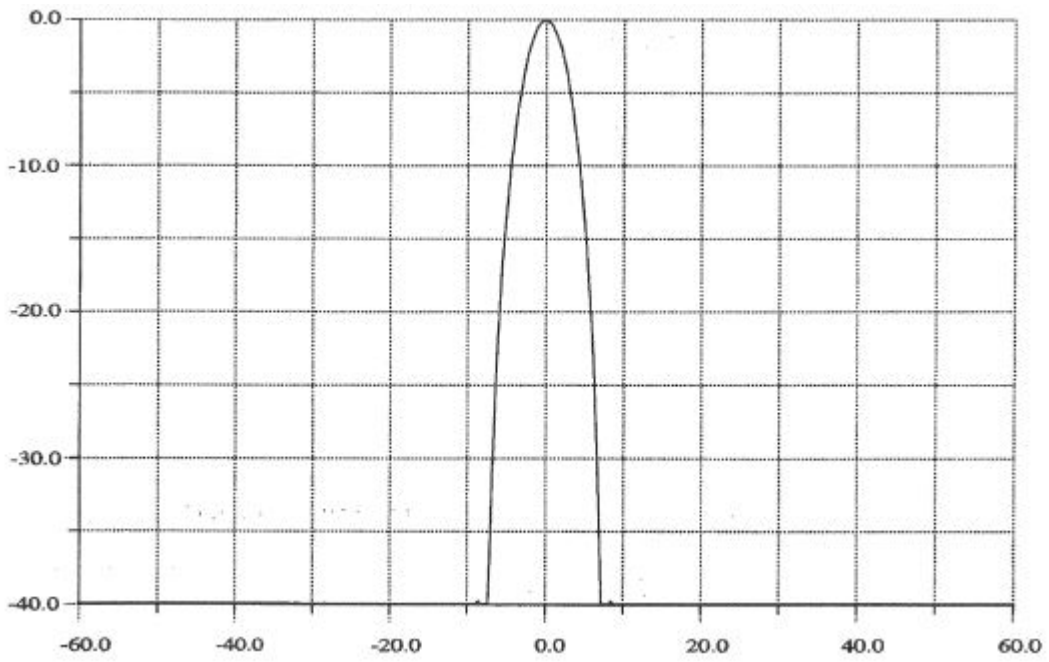


Figure 31 : Diagramme P+BL Directif réseau 20 antennes bifréquence Thalès

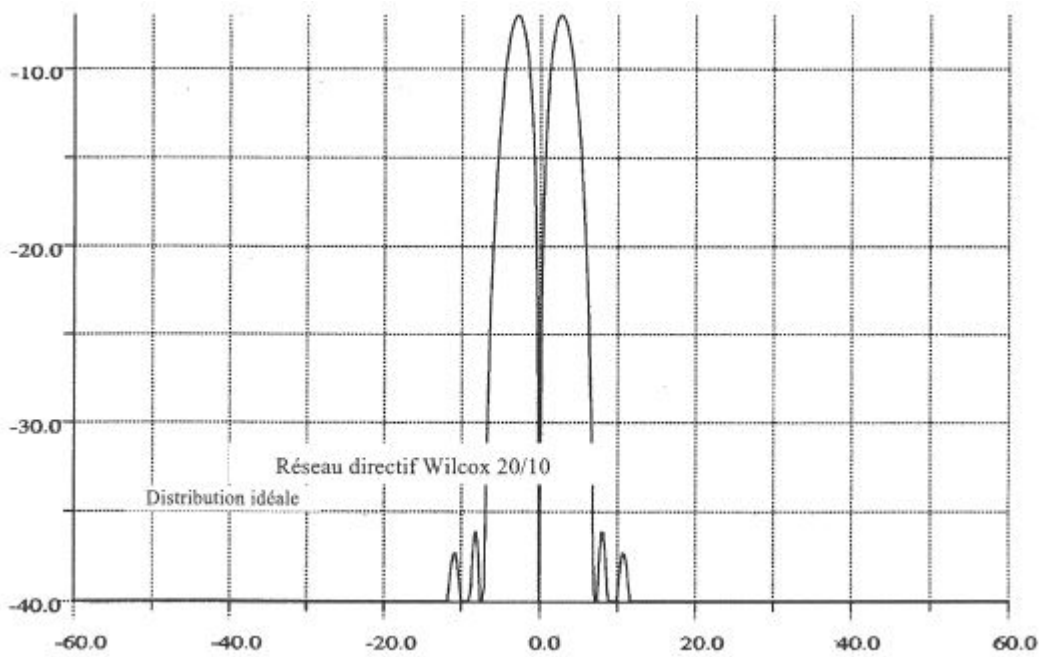


Figure 32 : Diagramme BLS Directif réseau 20 antennes bifréquence Thalès

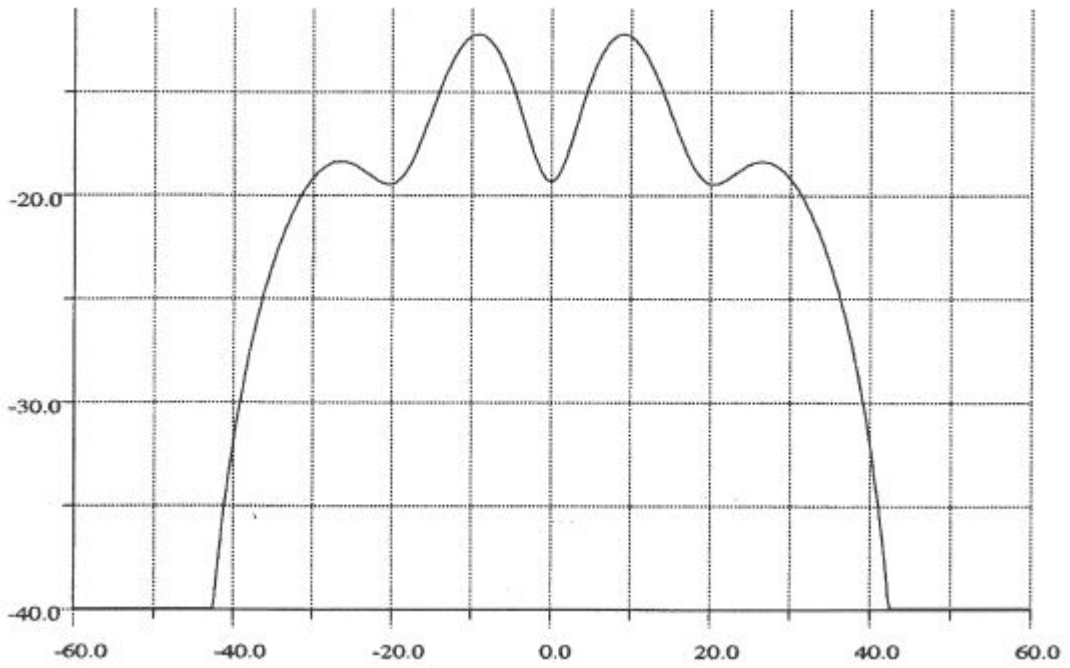


Figure 33 : Diagramme P+BL Clearance
réseau 20 antennes bifréquence Thalès

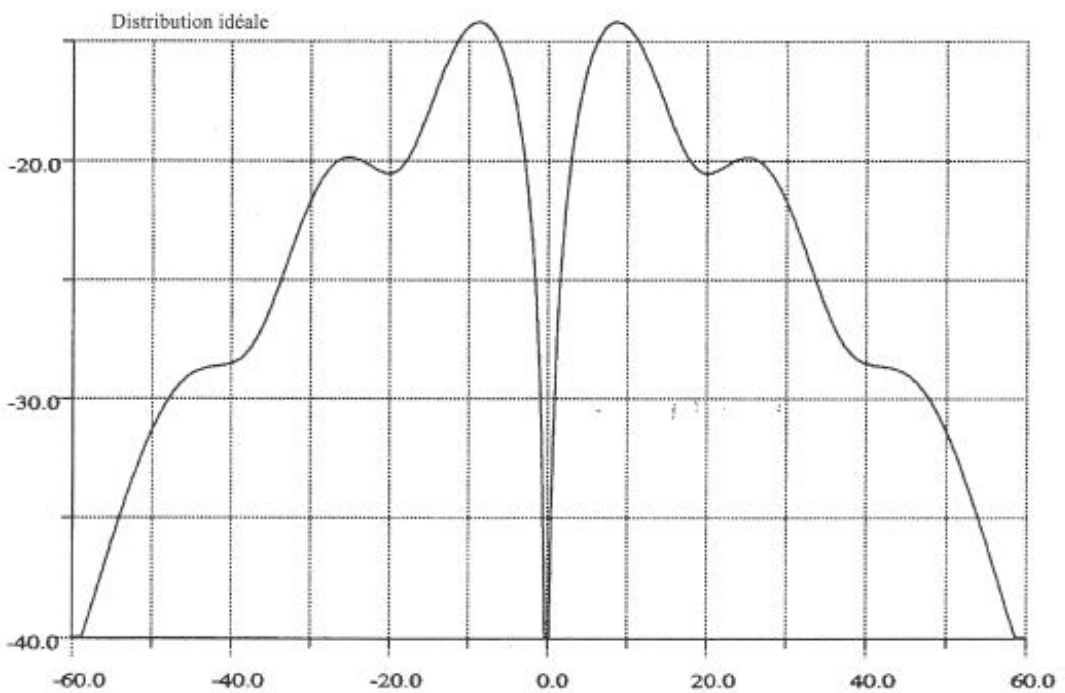


Figure 34 : Diagramme BLS Clearance
réseau 20 antennes bifréquence Thalès

Le fait qu'il n'y a plus d'antenne centrale entraîne un nul de champ dans le P+BL Clearance à environ $\pm 42^\circ$. Avec une antenne centrale on assure une couverture au-delà de $\pm 60^\circ$ d'azimut. L'OACI impose une couverture supérieure ou égale à $\pm 35^\circ$, donc on est dans les normes. Mais on s'aperçoit après un changement de réseau que les pilotes utilisaient l'ILS au-delà des $\pm 35^\circ$ préconisés.

Enfin, on s'aperçoit qu'avec le réseau 20 antennes, on arrive à fabriquer un diagramme P+BL et BLS Directif plus étroit (7° pour le 20 antennes au lieu de 12° pour le 10 antennes). Ce rétrécissement du faisceau permet de diminuer les perturbations dues au multitrajets, que nous allons étudier dans le prochain chapitre.

II.5 Multitrajets

II.5.1 Evaluation de l'apport du bifrèquence

On appelle amplitude de coude (A_c), la perturbation maximum en μA due à un signal réfléchi sur le signal direct (sur l'axe en général).

L'étude théorique permet de mettre en équation celle-ci et de poser en première approximation :

$$\text{En monofrèquence : } A_{c_{mono}} = \rho \cdot \frac{P_\alpha}{P_{axe}} \cdot DDM_\alpha$$

$$\text{En bifrèquence : } A_{c_{bi}} = \frac{1}{2} \cdot \rho^2 \cdot \left(\frac{P_\alpha}{P_{axe}} \right)^2 \cdot DDM_\alpha$$

Avec :

- ρ : coefficient de réflexion de l'obstacle ($\rho \leq 1$).
- P_α : puissance de la porteuse dans l'azimut de l'obstacle α .
- P_{axe} : puissance de la porteuse sur l'axe.
- DDM_α : valeur de la DDM dans l'azimut α .

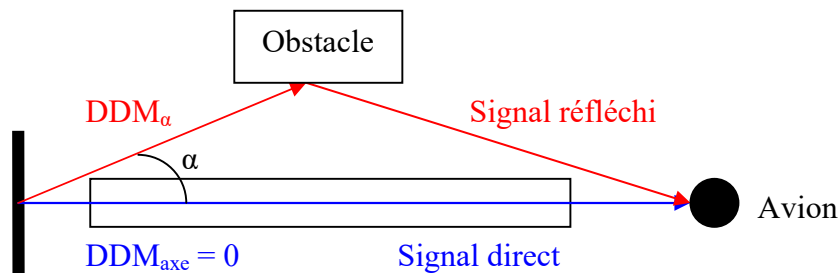


Figure 35 : Schéma d'un multitrajets

Sachant que $\rho \leq 1$ et que $\frac{P_\alpha}{P_{axe}} \leq 1$, on voit très vite que l'amplitude de coude va être nettement réduite en bifrèquence par rapport au monofrèquence.

Sur les schémas suivants nous allons comparer le résultat d'une simulation d'un obstacle en monofréquence et en bifréquence sur un réseau Thomson 13 antennes.

Obstacle : Bâtiment de 30m de haut et de 100m de long. Hypothèse $\rho = 1$.
Situation : à **600m** de la piste coté 90 et à 1500m du localizer (**azimut 22°**)

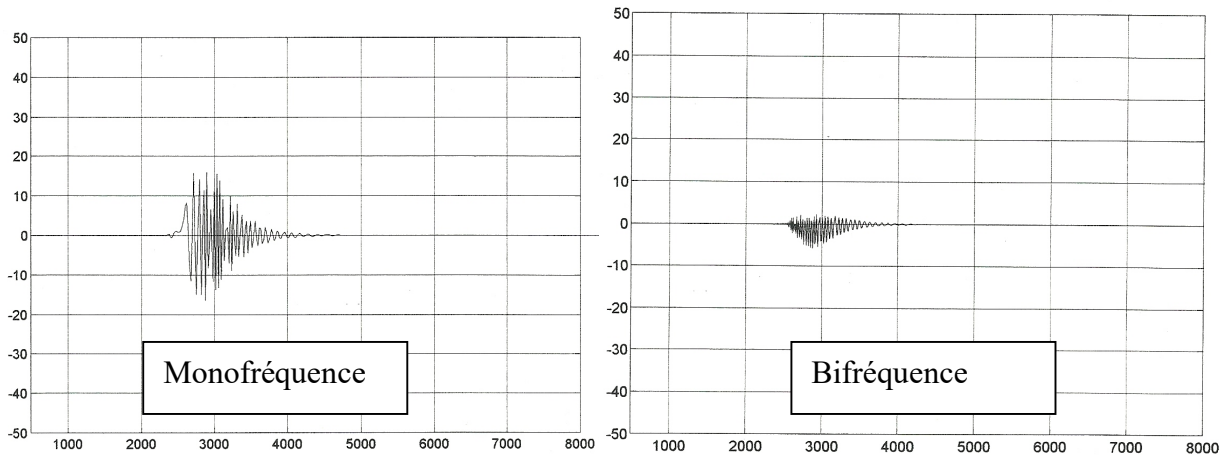


Figure 36 : Multitrajets : obstacle à 600 mètres

Obstacle : Bâtiment de 30m de haut et de 100m de long. Hypothèse $\rho = 1$.
Situation : à **300m** de la piste coté 90 et à 1500m du localizer (**azimut 11°**)

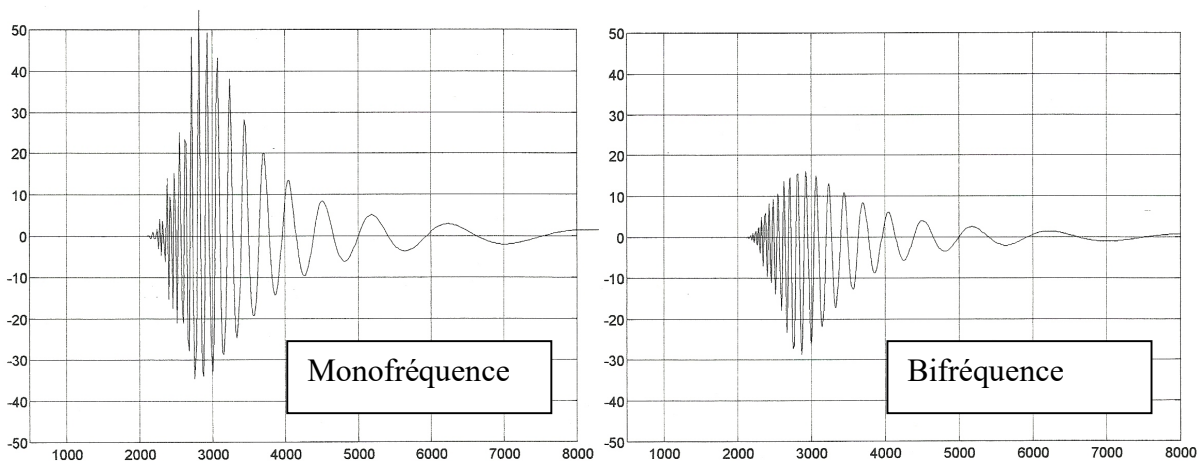


Figure 37 : Multitrajets : obstacle à 300 mètres

Dans cette simulation, nous avons pris le cas le plus défavorable : c'est à dire que le coefficient de réflexion ρ est à 1 (\Rightarrow bâtiment métallique) et donc on ne prend pas en compte le fait que sur le bifréquence, l'amplitude coude dépend de ρ^2 .

On voit néanmoins l'apport du bifréquence dans des cas difficiles.

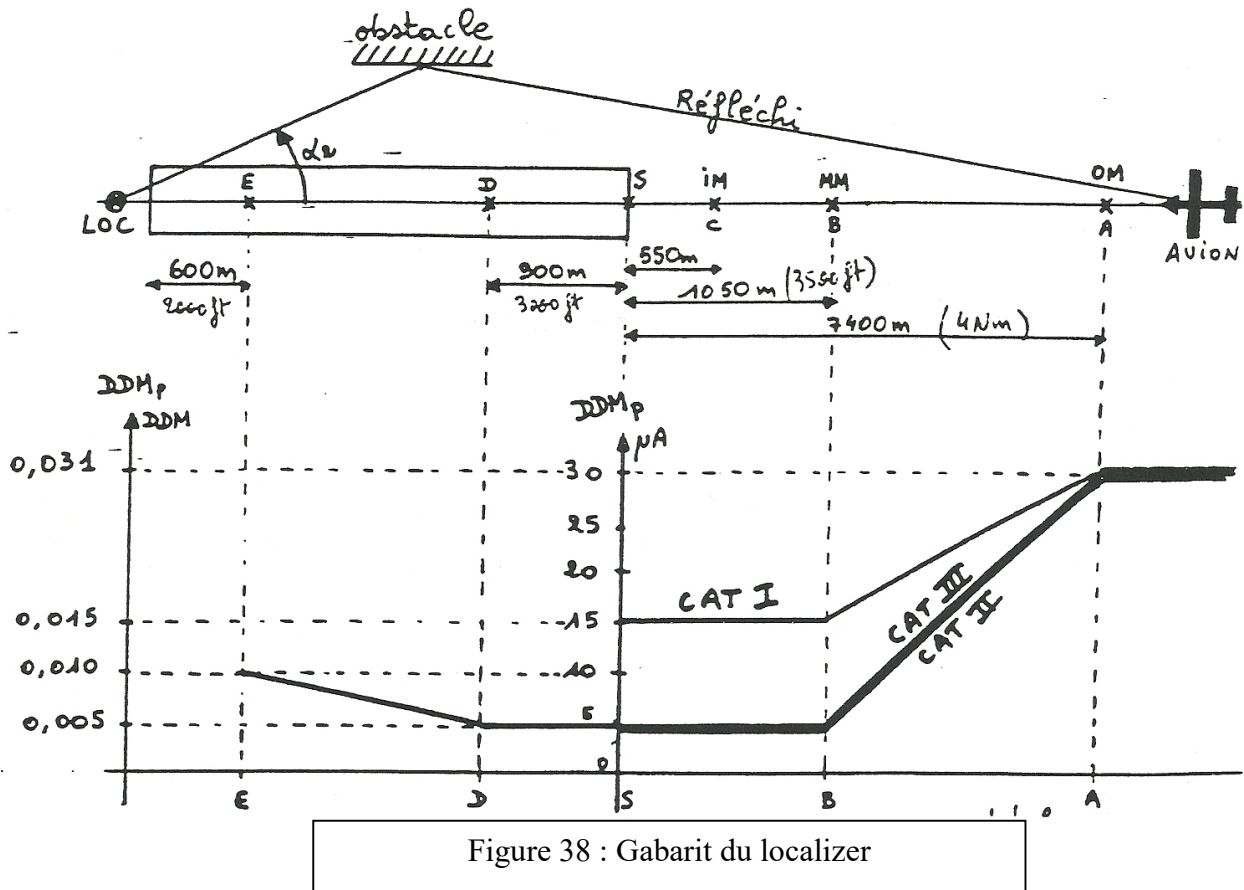
Evidement, plus le bâtiment est proche de l'axe de piste, plus les perturbations deviennent de plus en plus importantes.

II.5.2 Gabarits du localizer

Le choix d'un ILS (localizer ou glide / monofréquence ou bifréquence) et de son réseau d'aériens (13 antennes ou 25 antennes dans le cas du Thomson) dépend de la catégorie d'exploitation de celui-ci (CAT I ou III) et de l'environnement aéroportuaire autour de celui-ci.

En effet, il existe un gabarit sur la valeur de la DDM tout au long de l'approche de l'avion jusqu'à l'atterrissage. Ce gabarit dépend de la catégorie d'exploitation de l'ILS. Il est stipulé dans l'annexe 10 de l'OACI, que dans 95% du temps, la valeur de la DDM doit rester à l'intérieur du gabarit. Le respect de ce gabarit est synonyme de sécurité pour un atterrissage par faible visibilité.

Comme on l'a vu au dessus, l'environnement aéroportuaire est la cause principale des perturbations sur la valeur de la DDM (multitrajets). Si ces perturbations sont trop importantes et que la DDM dépasse le gabarit, on pourra mettre un ILS bifréquence, augmenter le nombre d'antennes.



Il faut savoir aussi qu'il y a des servitudes radioélectrique autour d'un ILS :

- Zone primaire : interdiction d'ouvrages dans une zone proche du localizer et du glide (rayon de 100 mètres centré sur le réseau du localizer).
- Zone secondaire : interdiction d'obstacles de toute nature limités à une hauteur de 2% de "d" (distance entre l'obstacle et les antennes). Pour un localizer CAT III bifréquence : rayon de 300 mètres centré sur le réseau du localizer.
- Secteur de dégagement : Obstacle limité à une hauteur de 12 mètres le long de la piste sur une largeur de 300 mètres de part et d'autre de l'axe de piste.

III.) Glide

III.1 Principes généraux : Glide image

Les trois principaux types de glide image (qui utilisent la réflexion au sol) sont :

- Null Reference (1939)
- Sideband Reference (Type B ou G) (1940) : non utilisé en France.
- Réseau Type M (1955)

Ces trois systèmes diffèrent par le nombre d'antennes et la distribution plus ou moins complexe des signaux sur le réseau. Ils sont appelés "glide image" car ils utilisent la réflexion du signal radioélectrique sur le sol. Ce qui donne pour le récepteur un signal composite (direct + réfléchi).

L'axe de descente sera défini dans le cas du Null Reference par le premier nul de champ du sol et dans le cas des types B, G et M par la somme dans l'espace de plusieurs diagrammes de champ.

On émet deux types de signaux :

- Une porteuse modulée en amplitude : signal "P+BL" ou "CSB"
- Un signal bandes latérales seules : "BLS" ou "SBO"

La combinaison des champs directs avec ceux réfléchis au sol permet de générer les diagrammes de rayonnement. Pour étudier le phénomène de réflexion au sol, on utilisera l'hypothèse d'une antenne image. On peut représenter l'effet de la réflexion au sol en considérant que le champ réfléchi est émis par une antenne fictive, image de l'antenne réelle par rapport au sol. On peut représenter l'ensemble antenne réelle - antenne image suivant le schéma ci-dessous :

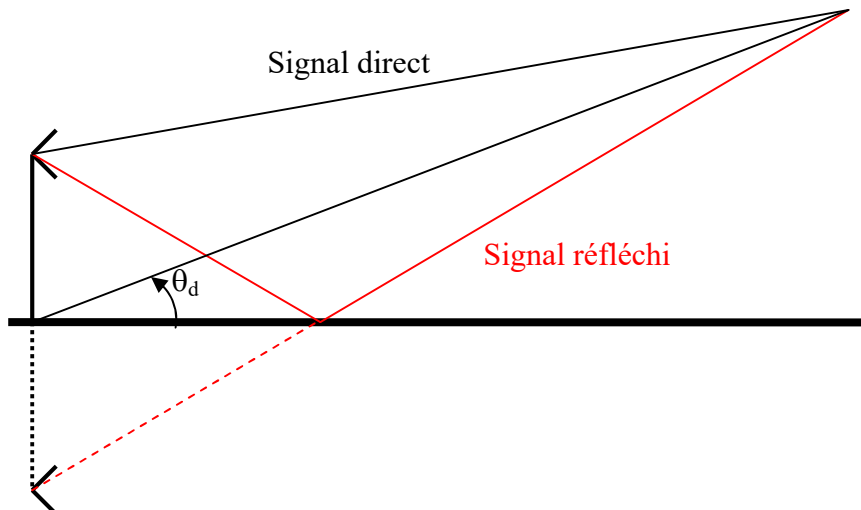


Figure 39 : "Principe de l'antenne image"

Les lois du rayonnement montrent que le rayonnement de l'antenne image est en opposition de phase de celui de l'antenne réelle si le champ rayonné est en polarisation horizontale. Le signal réfléchi a la même amplitude que le signal direct en polarisation horizontale.

En champ lointain (on se place dans l'hypothèse où l'on est suffisamment éloigné des antennes pour considérer que les rayons issus de l'antenne réelle et de l'antenne image sont parallèles), on peut écrire le facteur de directivité du groupement des 2 antennes en fonction de l'angle de site :

$$F_d = 2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi h}{\lambda} \cdot \sin \theta\right) \text{ où } h \text{ est la hauteur de l'antenne par rapport au sol.}$$

III.2 Glide "Null Reference"

Ce glide simple utilise deux antennes équiespacées. Il nécessite une importante surface de réflexion et l'absence d'obstacles devant lui à cause de sa grande sensibilité à ces derniers. On appellera A_1 l'antenne basse et A_2 l'antenne haute.

Le champ "P+BL" est rayonné par l'antenne basse et le champ "BLS" par l'antenne haute. Les hauteurs d'antennes sont calculées de façon à avoir un maximum de rayonnement de A_1 sur θ_d et un nul de champ de A_2 sur θ_d . Les hauteurs de A_1 et A_2 sont données par les formules suivantes :

A_1 : maximum de champ sur θ_d et h_1 hauteur de l'antenne A_1 .

On cherche donc h_1 tel que F_{dA1} soit maximum, soit que $\sin\left(\frac{2\pi h_1}{\lambda} \cdot \sin \theta_d\right) = 1$

$$\text{Donc que : } \frac{2\pi h_1}{\lambda} \cdot \sin \theta_d = \frac{\pi}{2} \Rightarrow h_1 = \frac{\lambda}{4 \cdot \sin \theta_d}$$

Son facteur de directivité : $F_{dA1} = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sin \theta}{\sin \theta_d}\right) \cong 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\theta}{\theta_d}\right)$ aux angles faibles.

Les nuls de champ se trouvent aux angles $2\theta_d, 4\theta_d, 6\theta_d \dots$

Les maximums de champ se trouvent en $\theta_d, 3\theta_d, 5\theta_d \dots$

Le diagramme de A_1 au dessus du sol est le suivant :

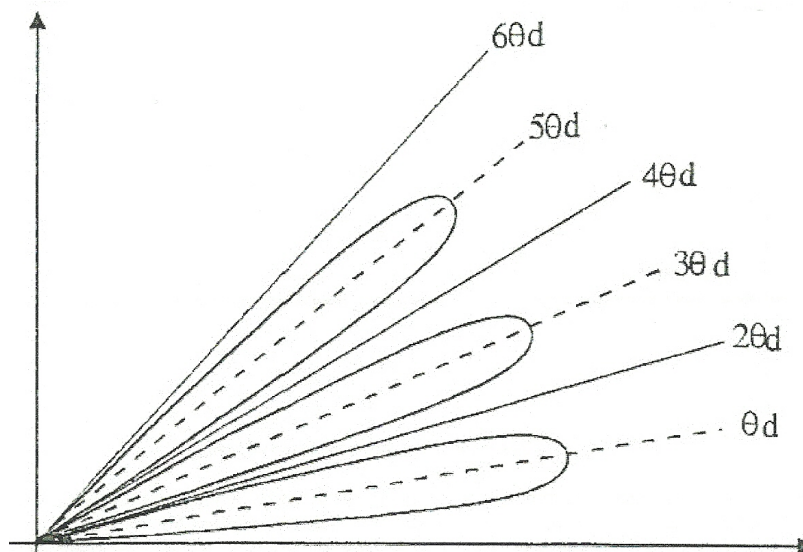


Figure 40 : Diagramme rayonnement en site de A_1

A2 : nul de champ sur θ_d et h_2 autour de l'antenne A2.

On cherche donc h_2 tel que F_{dA2} soit nul, soit que $\sin\left(\frac{2\pi h_2}{\lambda} \cdot \sin \theta_d\right) = 0$

Donc que : $\frac{2\pi h_2}{\lambda} \cdot \sin \theta_d = \pi \Rightarrow h_2 = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \theta_d}$

Son facteur de directivité : $F_{dA2} = 2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{\sin \theta}{\sin \theta_d}\right) \cong 2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{\theta}{\theta_d}\right)$ aux angles faibles.

Les nuls de champ se trouvent aux angles $\theta_d, 3\theta_d, 5\theta_d \dots$

Les maximums de champ se trouvent en $\theta_d/2, 3\theta_d/2, 5\theta_d/2 \dots$

Le diagramme de A2 au dessus du sol est le suivant :

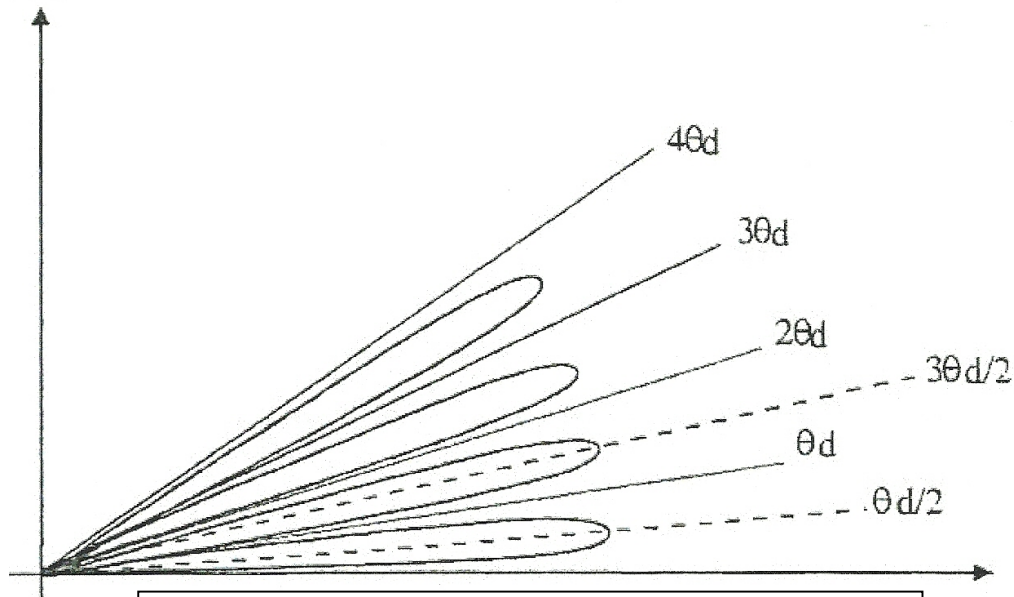


Figure 41 : Diagramme rayonnement en site de A2

Application numérique pour le calcul des hauteurs :

- Fréquence glide 334,7 MHz $\Rightarrow \lambda = 0,896$

- $\theta_d = 3^\circ$

$A_1 = 4,28$ m et $A_2 = 8,56$ m.

Les antennes sont alimentées selon le tableau suivant :

	P+BL		BLS	
	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase
A2			k	0°
A1	1	0°		

Figure 42 : Tableau d'alimentation d'un glide Null Reference

Le signal "P+BL" est une porteuse modulée en amplitude à 90 et 150 Hz avec un taux de modulation de 40% pour chacune des modulations.

$$s(t) = \cos(\omega t)[1 + 0,4 \sin 3\Omega t + 0,4 \sin 5\Omega t]$$

Son diagramme de rayonnement est pair autour de θ_d et sera noté P(θ).

Le signal "BLS" est composé de deux bandes latérales à 90 et 150 Hz en opposition de phase UHF.

$$d(t) = k \cdot \cos(\omega t)[\sin 5\Omega t - \sin 3\Omega t]$$

Son diagramme de rayonnement est impair autour de θ_d et sera noté F'(θ).

La DDM s'écrit à partir de la formule générale : $DDM = 2k \frac{F'(\theta)}{P(\theta)}$

$$\text{Ce qui donne : } DDM = 2k \frac{\sin\left(\frac{\pi \theta}{\theta_d}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \theta}{2 \theta_d}\right)}$$

On peut aussi écrire la DDM en fonction de l'écart angulaire $\Delta\theta$ par rapport à θ_d , on a alors (avec $\theta = \theta_d + \Delta\theta$) :

$$DDM = -2k \frac{\sin\left(\frac{\pi \Delta\theta}{\theta_d}\right)}{\cos\left(\frac{\pi \Delta\theta}{2 \theta_d}\right)}$$

On peut simplifier cette écriture en utilisant la formule $\sin 2a = 2 \cdot \sin a \cdot \cos a$:

$$DDM = -4k \cdot \sin\left(\frac{\pi \Delta\theta}{2 \theta_d}\right)$$

On a une symétrie rigoureuse de la loi de variation de la DDM autour de θ_d et cette variation est linéaire autour de θ_d .

Ce type de glide présente l'avantage d'être de conception très simple. en effet, il ne nécessite pas de circuit de distribution pour répartir les différents signaux aux antennes. Le réglage est toutefois délicat puisque le seul paramètre qui définit l'angle de descente est la hauteur des antennes par rapport au sol. Ce type de glide nécessite un plan de réflexion de très bonne qualité. Dans le cas contraire, l'axe est fortement perturbé. De plus, le plan de réflexion doit être étendu (minimum 700 à 800 mètres de long pour espérer satisfaire aux normes de la CAT III). L'utilisation de ce type de station sera donc limitée aux terrains ayant un plan de réflexion de très bonne qualité. Pour la plupart des sites, on sera obligé d'envisager un autre type de glide, moins sensible aux imperfections du plan de réflexion.

III.3 Glide "Type M"

III.3.1 Objectif : norme catégorie III

Il s'agit d'implanter un réseau glide en présence d'un environnement perturbé par un relief défavorable (irrégularités du sol, obstacles naturels, constructions autour de la piste) tout en respectant les spécifications OACI d'une installation ILS de catégorie III.

a) Alignement de descente

La valeur nominale de l'angle de descente recommandée est $\theta_d = 3^\circ$. Les angles de descente possible sont compris entre 2 et 4 degrés.

b) Sensibilité angulaire

La valeur nominale choisie S_N correspond à une DDM de $\pm 0,0875$ pour des écarts angulaires de $0,12\theta_d$ au dessus et au dessous de l'alignement de descente. On appelle cette partie le demi secteur d'alignement. En pratique, cette variation se traduit par la mesure d'un courant de $75 \mu A$ en bordure du demi secteur inférieur.

c) Structure de l'alignement de descente

Comme pour le localiser, l'évolution de la DDM du glide doit varier à l'intérieur d'un gabarit. C'est l'avion du contrôle en vol qui vérifie cette évolution sur l'alignement de descente.

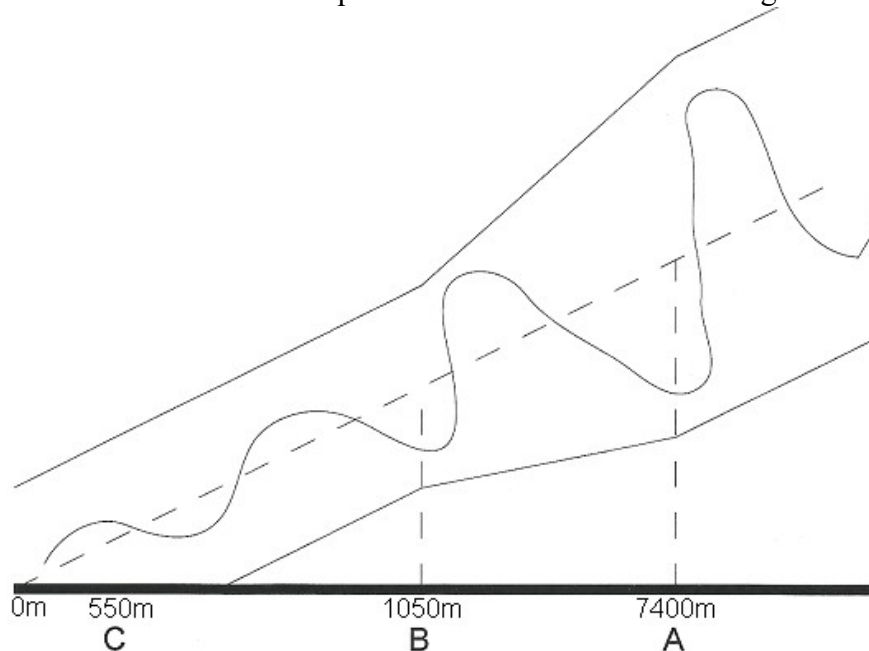


Figure 43 : Structure d'un axe glide

De la limite de couverture au point A (7400 mètres) : $DDM < 30 \mu A$.

Du point A au point B, diminution linéaire jusqu'à $20 \mu A$.

Du point B (1050 mètres) jusqu'à l'atterrissage : $DDM < 20 \mu A$.

III.3.2 Principe utilisé : effet de capture du récepteur

C'est le même principe que pour le localizer. On rayonne deux types de diagrammes sur 2 fréquences porteuses distinctes à l'intérieur de la voie UHF du glide :

- Les diagrammes directifs fournissent une information précise d'écart angulaire par rapport à l'axe de descente dans toute la zone du secteur d'alignement. Le rayonnement est réduit aux sites faibles.

- Le diagramme de couverture (ou "Clearance") est chargé d'assurer la couverture basse dans la zone située au dessous du radioalignement de descente. Le rayonnement est réduit dans la zone du secteur d'alignement de descente pour ne pas perturber l'information prépondérante due au directif et favoriser l'effet de capture.

La concrétisation d'un tel principe nous conduit à une émission bifréquence et à utiliser un réseau trois antennes.

Les fréquences du signal directif et du signal de couverture (Clearance) sont décalées symétriquement par rapport à la fréquence UHF assignée. L'espacement entre les deux porteuses doit être compris entre 4 kHz et 32 kHz. Les valeurs typiques rencontrées vont de 10 à 16 kHz.

III.3.3 Signaux directifs

a) Signal "P+BL"

La porteuse est modulé en amplitude par du 90 et 150 Hz avec des taux de modulation de 40%.

$$s(t) = \cos[(\omega + \Delta\omega)t] \cdot [1 + 0,4 \sin(2\pi 90t) + 0,4 \sin(2\pi 150t)]$$

Le diagramme de rayonnement sera pair mais asymétrique autour de θ_d . L'amplitude de ce champ doit être faible aux sites faibles. On le nomme $P_D(\theta)$ et son allure est donnée ci-dessous :

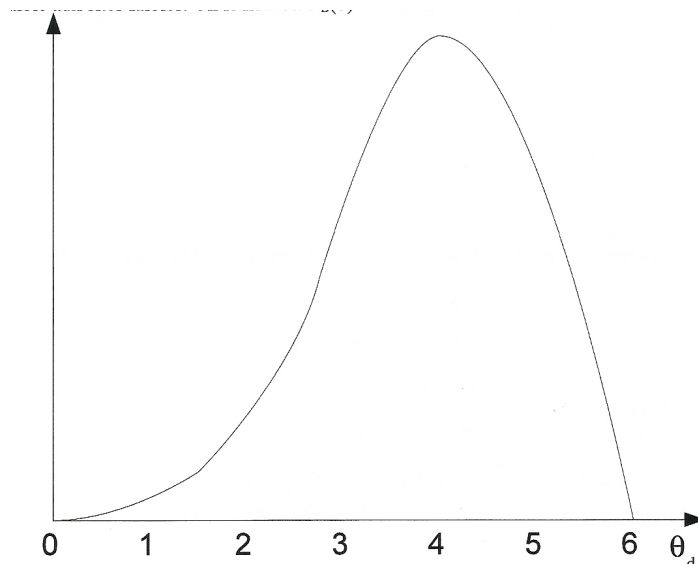


Figure 44 : Diagramme de rayonnement en site du P+BL

b) Signal "BLS"

Ce signal est composé de 2 bandes latérales à 150 et 90 Hz opposition de phase UHF.

$$d(t) = k \cdot \cos[(\omega + \Delta\omega)t] \cdot [\sin(2\pi 150t) - \sin(2\pi 90t)]$$

Le diagramme résultant de BLS sera impair autour de θ_d (nul de champ sur l'axe $\theta = \theta_d$) et asymétrique autour de θ_d (amplitude de champ réduit aux sites faibles). On le nomme $F'_D(\theta)$. Son allure est donnée sur la figure suivante :

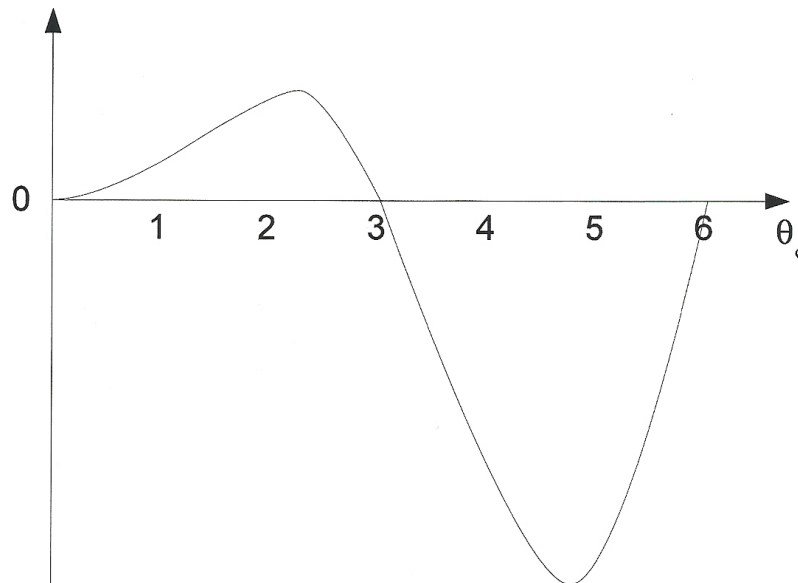


Figure 45 : Diagramme de rayonnement en site du BLS

c) Signal de couverture basse ou clearance

On assure une information de couverture basse grâce au rayonnement auxiliaire d'un signal clearance sur une fréquence porteuse $f - \Delta f$. La porteuse est modulée en amplitude par du 90 et 150 Hz avec des taux de modulation respectifs de 25 et 55% (pour le glide Thomson).

$$c(t) = K \cdot \cos[(\omega - \Delta\omega)t] \cdot [1 + 0,25 \sin(2\pi 90t) + 0,55 \sin(2\pi 150t)]$$

Ce signal est porteur d'une information de couverture basse, en dehors du secteur d'alignement de descente.

$$\mathcal{M}_{90} = 0,25$$

$$\mathcal{M}_{150} = 0,55$$

$$DDM = |\mathcal{M}_{150}| - |\mathcal{M}_{90}| = 0,3$$

$$SDM = |\mathcal{M}_{150}| + |\mathcal{M}_{90}| = 0,8$$

La DDM est donc constante et elle correspond à un courant de déviation de 260 μA .

Le diagramme résultant doit être tel que l'amplitude du champ soit important aux sites faibles pour favoriser l'efficacité de l'effet de capture du récepteur au profit de l'information de couverture basse. L'amplitude du champ doit être faible à proximité de l'axe et dans toute la zone du secteur d'alignement de descente afin de favoriser l'effet de capture du directif.

On nomme le diagramme $PCL(\theta)$ et son allure est la suivante :

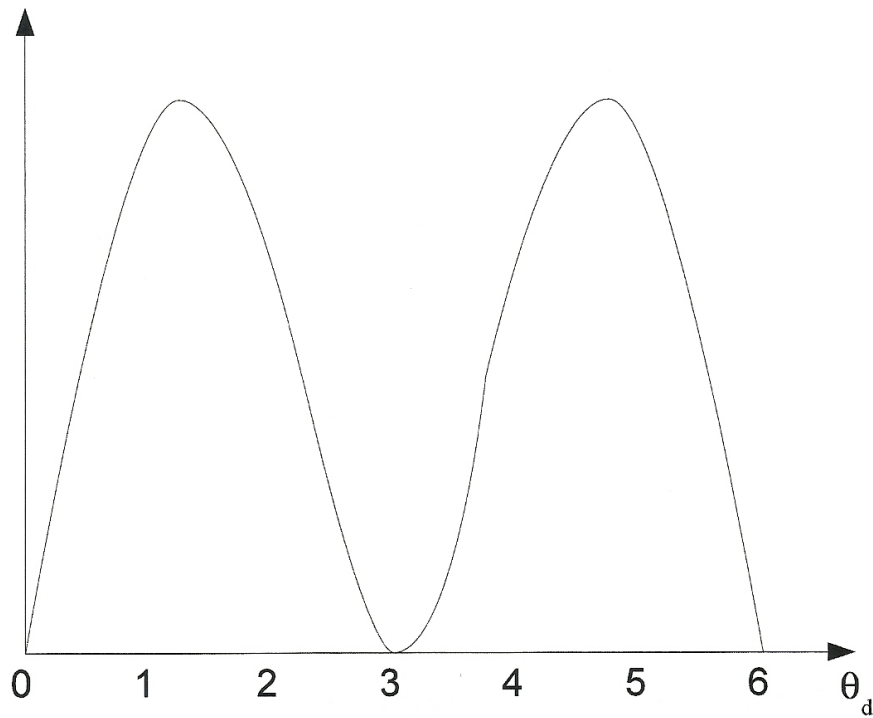
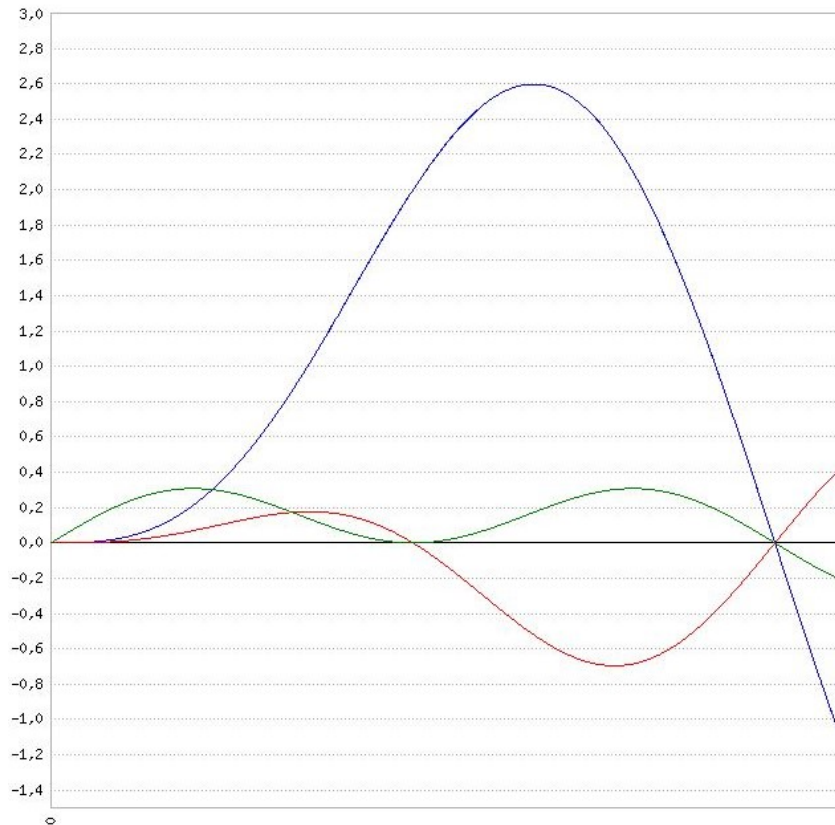


Figure 46 : Diagramme de rayonnement en site du Clearance

d) Récapitulatif de tous les diagrammes



III.3.4 Réseau d'aériens

Trois antennes A_1 , A_2 et A_3 sont alignées verticalement sur le même mât. Les hauteurs des antennes sont données par les relations suivantes :

$$h_{A1} = \frac{\lambda}{4 \sin \theta_d}$$

$$h_{A2} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_d} = 2h_{A1}$$

$$h_{A3} = \frac{3\lambda}{4 \sin \theta_d} = 3h_{A1}$$

Afin d'obtenir les diagrammes de rayonnement définis précédemment, il faut alimenter les antennes selon le tableau suivant :

	P+BL		BLS		CLR	
	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase
A_3			$k/2$	180°	K	0°
A_2	$1/2$	180°	k	0°		
A_1	1	0°	$k/2$	180°	K	0°

Figure 47 : Tableau d'alimentation d'un glide Type M

Pour le signal BLS, A1 et A3 sont alimentés en opposition de phase par rapport à A2, ce qui permet de rayonner peu de champ aux sites faibles. Il faut donc rayonner un autre signal aux sites faibles : le signal Clearance avec une DDM > 0. Aux sites élevés, la DDM clearance est dans le mauvais sens, mais dans ce cas, le champ P+BL est dominant et donc l'effet du Clearance est négligeable.

A partir des équations des signaux rayonnés, on peut calculer la DDM.

Pour rappel, voici le facteur de groupement (du à l'antenne image par réflexion sur le sol) des différentes antennes :

$$F_{A1} = 2 \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\theta}{\theta_d}\right) \quad F_{A2} = 2 \sin\left(\pi \cdot \frac{\theta}{\theta_d}\right) \quad F_{A3} = 2 \sin\left(\frac{3\pi}{2} \cdot \frac{\theta}{\theta_d}\right)$$

Dans le secteur d'alignement où le directif est prédominant :

$$DDM = 2k \cdot \frac{F'}{P} = 2k \cdot \frac{F'_{A1} + F'_{A2} + F'_{A3}}{P_{A1} + P_{A2}}$$

$$DDM = 2k \cdot \frac{-0,5 \cdot 2 \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\theta}{\theta_d}\right) + 2 \sin\left(\pi \cdot \frac{\theta}{\theta_d}\right) - 0,5 \cdot 2 \sin\left(\frac{3\pi}{2} \cdot \frac{\theta}{\theta_d}\right)}{2 \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\theta}{\theta_d}\right) - 0,5 \cdot 2 \sin\left(\pi \cdot \frac{\theta}{\theta_d}\right)}$$

Pour simplifier l'équation, on pose : $a = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\theta}{\theta_d}$

$$DDM = 2k \cdot \frac{\sin 2a - 0,5 \sin a - 0,5 \sin 3a}{\sin a - 0,5 \sin 2a}$$

En appliquant les propriétés des fonctions trigonométriques, à savoir :

$$- \sin(2a) = 2 \sin(a) \cdot \cos(a)$$

$$- \sin(3a) = \sin(a) \cdot (4 \cos^2(a) - 1)$$

On obtient :

$$DDM = 2k \cdot \frac{2 \cos a - 2 \cos^2 a}{1 - \cos a} = 4k \cdot \cos a$$

$$DDM = 4k \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\theta}{\theta_d}\right) \quad \text{On pose : } \theta = \theta_d + \Delta\theta$$

$$DDM = 4k \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta\theta}{\theta_d}\right) = -4k \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta\theta}{\theta_d}\right)$$

On retrouve ici la même expression de la DDM qu'en Null Réf.

Calcul de k pour $\theta_d = 3^\circ$:

On a vu que pour $\theta = \theta_d - 0,12.\theta_d \Rightarrow \text{DDM} = 0,0875$ ou $75 \mu\text{A}$.

On a donc : $0,0875 = 4k.\cos\left(\frac{\pi}{2}.\left(1 - 0,12\right)\right) \Rightarrow k = 0,1167$ ou $k = 100\mu\text{A}$

Pour répartir les différents signaux sur les 3 antennes, on doit utiliser un circuit de distribution. Le principe d'un circuit de distribution type M est donné sur le schéma suivant :

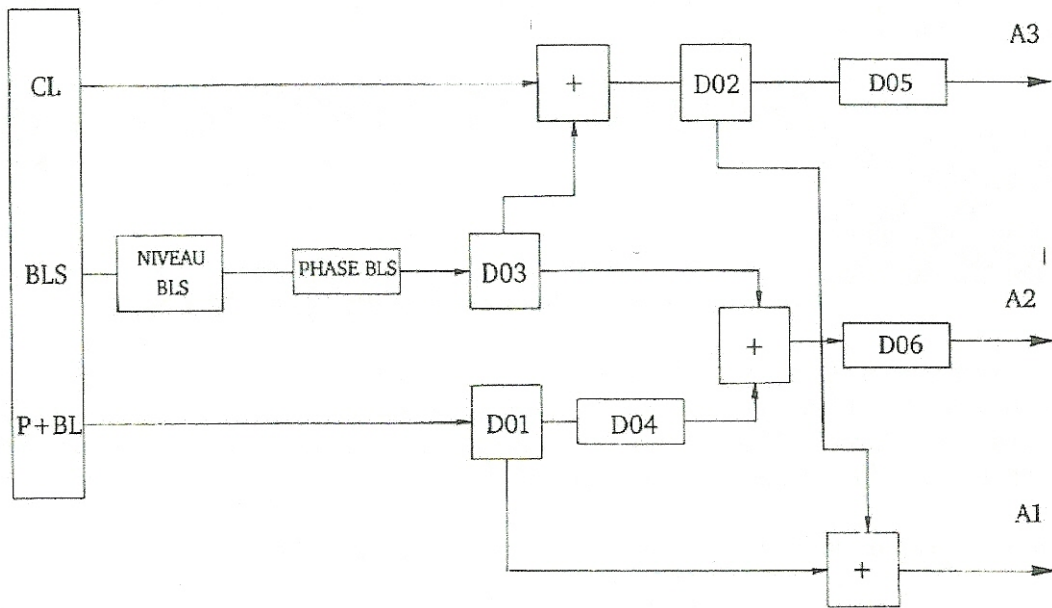


Figure 48 : Circuit de distribution d'un Type M

D02 permet de régler l'égalité des signaux BLS et CLR entre A1 et A3.

D05 assure la mise en phase entre A1 et A3.

D03 permet de régler le niveau relatif du BLS dans A2 par rapport à A1 et A3.

D06 permet de régler l'opposition de phase du BLS dans A2 par rapport à A1 et A3.

D01 permet de régler le niveau relatif du P+BL dans A1 par rapport à A2.

D04 permet de régler l'opposition de phase du P+BL dans A1 par rapport à A2.

IV.) Opérations de maintenance

IV.1 Opérations au sol

IV.1.1 Principe d'autocontrôle des signaux rayonnés

Cette fonction est primordiale. Des détecteurs placés dans l'antenne ou juste devant "prélèvent" une partie du signal rayonné par antenne. Ces signaux sont recombinaison dans un circuit de recombinaison qui permet à la sortie de celui-ci d'obtenir 3 types d'information :

- Une information "axe" qui représente l'image de ce qui se passe sur l'axe de piste (localizer) ou l'axe de descente (glide). On l'exprime en μA .
- Une information "faisceau" qui représente l'image de ce qui se passe sur le bord faisceau coté 150. On l'exprime aussi en μA .
- Une information "clearance" qui représente l'image de ce qui se passe sur un point d'azimut ou d'angle de site où le clearance est prédominant. On l'exprime en μA .

Ces trois signaux sont représentatifs de l'état de la station sol et si leurs valeurs sont dans les normes, on considère que l'ILS est conforme. Ces trois signaux entrent dans une carte détecteur afin d'en extraire les trois données essentielles qu'elles contiennent : la DDM, la SDM et leur niveau. Ensuite une carte alarme vient comparer ces données à leur référence. Si une anomalie est détectée, il y a basculement de la station sur l'ensemble secours (si elle en possède un) ou arrêt de celle-ci.

Les principales conditions d'alarme sont résumées ici :

- Diminution de puissance : -3 dB en monofréquence / -2 dB en bifréquence.
- Décalage de l'alignement de piste en localizer : $\pm 10 \mu\text{A}$ en Cat I et $\pm 6,5 \mu\text{A}$ en Cat III.
- Décalage de l'alignement de descente en glide : $\pm 22 \mu\text{A}$.
- Variation de la sensibilité d'écart : $\pm 25.5 \mu\text{A}$.
- Variation de la valeur du clearance : $\pm 45 \mu\text{A}$
- Durée maximum de rayonnement hors tolérance : 10 s en Cat I et 2 s en Cat III.

IV.1.2 Mesures de protection à l'attention des utilisateurs

Le rayonnement d'une station sol est autocontrôlé par la baie. Toutefois cette condition n'est valable que dans le cas d'un ILS en fonctionnement opérationnel. Pour les besoins des opérations de maintenance, les stations sont pourvues d'un mode dit de "maintenance". Dans cette configuration, le système de surveillance des signaux n'est plus opérant. Cela signifie que la baie continue à émettre même si les signaux rayonnés sont faux. Pour se prémunir de toute utilisation d'une station dans cette configuration par les aéronefs, deux mesures de précaution sont prises :

- En mode maintenance, la station n'émet pas l'indicatif, c'est pourquoi il est impératif pour un pilote d'écouter l'indicatif de la station avant de l'utiliser. Cette écoute lui garantit non seulement la certitude d'utiliser la bonne station, mais en plus que cette station est bien en fonctionnement opérationnel et ne risque pas de rayonner des signaux faux.

- De plus, un "NOTAM" (message d'information à l'attention des pilotes) est émis avant chaque maintenance indiquant que la station est hors service pour cause de maintenance. Il est précisé qu'il ne faut en aucun cas l'utiliser car il y a un risque de rayonnement faux. Ce NOTAM précise également les dates et heures de début et de fin d'intervention.

L'exemple suivant montre un message NOTAM pour la maintenance de l'ILS de La Rochelle du 3 au 4 mars 2009 :

```
LFFA-B0724/09
A) LFBH LA ROCHELLE ILE DE RE
B) 2009 Mar 03 08:30 C) 2009 Mar 05 17:00
E) ILS RWY28 HORS SERVICE CAUSE MAINTENANCE :
NE PAS UTILISER, FAUSSES INDICATIONS POSSIBLES
```

Figure 49 : Exemple de NOTAM

IV.1.3 Différents types de maintenances périodiques

On distingue 4 types de périodicité de maintenance classés de la plus complète vers la plus légère :

- annuelle
- semestrielle
- mensuelle
- hebdomadaire

Les deux dernières ne concernent que les ILS de catégorie III.

IV.1.4 Moyens de mesure utilisés

Afin de pouvoir effectuer les différentes mesures demandées, on utilise plusieurs appareils :

- Un générateur de signaux ILS programmable (fréquence, taux de modulation BF (DDM et SDM), niveau ...).
- Un récepteur de signaux ILS qui permet de mesurer les caractéristiques du signal reçu.
- Un analyseur de réseau vectoriel (utile surtout pour les mesures de vérification des coffrets de distribution et de recombinaison pour connaître les phases et les niveaux des signaux VHF/UHF entre eux et pour mesurer le TOS des antennes).
- Un analyseur de spectre.
- Un fréquencemètre.
- Un wattmètre.
- Un oscilloscope.
- Un voltmètre / pince ampèremétrique.

IV.1.5 Mesures sur la baie

Les mesures baies se déroulent en plusieurs étapes :

- Relevés des paramètres d'émission de la baie avant maintenance (valeurs moniteurs).
- Mesures du réseau d'antenne, de la distribution et de la recombinaison : TOS, couplage antenne/probe, caractéristiques de la distribution et de la recombinaison.
- Vérification des tensions d'alimentation de la baie.
- Vérification de la chaîne d'émission : générateur BF (fréquence 90 et 150 HZ, distorsion BF, indicatif), fréquence VHF ou UHF, gain des amplificateurs, spectre, vérification des asservissements ...
- Vérification des moniteurs : niveau RF reçu, sensibilité et dynamique du récepteur, centrage et seuils d'alarmes (DDM, SDM et niveau).
- Vérification de l'efficacité du système de commande : basculement ou arrêt sur une alarme, mesure du temps de rayonnement de signaux faux, détection des pannes cachées moniteurs.

IV.2 Mesure des signaux rayonnés

IV.2.1 Nécessité de la mesure sol (corrélation sol-sol)

Il est important de mesurer les signaux rayonnés par la station par un système extérieur à la baie : mesure sur la piste pour le localiser et mesure en bout de piste pour le glide. En effet, ces mesures permettent de valider les contrôles effectués sur la baie électronique et en particulier de valider les informations mesurées par les moniteurs internes de la baie, d'où le nom de corrélation sol-sol. Cette vérification permet de s'assurer que toute variation de rayonnement du signal sera détectée de façon cohérente par le système de contrôle de la baie.

IV.2.2 Moyens de mesure piste

Afin de procéder aux mesures piste, la maintenance régionale de Bordeaux possède 2 véhicules de type Mercedes Vito spécialement équipés. Un troisième véhicule de type Renault Kangoo est également utilisé pour les mesures sur Bordeaux mais il est doté d'un équipement plus léger. Ces voitures sont équipées d'un mât télescopique au sommet duquel est positionnée une antenne de réception (VHF ou UHF). Un récepteur ILS permet de démoduler les signaux reçus et d'en extraire les informations utiles (DDM, SDM, niveau, distorsion, fréquence ...). Un programme d'acquisition spécifique développé par la DGAC (logiciel "LEMING") est utilisé afin d'enregistrer les signaux provenant du localiser et d'en extraire différentes courbes de mesure.

Les mesures effectuées en piste sont les suivantes pour un localiser :

- DDM et SDM réf au seuil de piste (émission du P+BL directif seul).
- Contrôle de la phase BLS/P+BL.
- Distorsion des signaux BF.
- Contrôle de la position de l'axe en normal et en condition d'alarme.
- Contrôle de l'ouverture de secteur d'alignement en normal et en alarme.
- Contrôle de la couverture en normal et en alarme.
- Diagramme en champ (P+BL et BLS directif et clearance).

Pour le glide, les mesures s'effectuent sur un point fixe repéré (on fera les mesures toujours sur ce même point). On mesurera le rayonnement du glide dans différentes configurations (phase A1/A2 et A1/A3) que l'on comparera à des mesures de référence.



Figure 50 : Véhicule de mesure sur piste

IV.3 Contrôle en vol (calibration)

IV.3.1 Nécessité de la mesure avion

Les mesures au sol sont insuffisantes pour valider l'intégrité du rayonnement d'une station ILS. Ceci est d'autant plus vrai en glide où la possibilité de faire des mesures au sol sur le signal rayonné est limitée. En effet, au sol on ne prend en compte que le signal rayonné à proximité de la station. Les effets de la propagation et de l'environnement ne sont pas (ou très peu) pris en compte. L'utilisation d'un avion de calibration permet de vérifier le signal rayonné dans des conditions optimales d'utilisation en réel. On prend donc en compte non seulement les caractéristiques du signal rayonné mais aussi tous les effets dus à l'environnement (obstacle, plan de réflexion, brouillage éventuel ...).

IV.3.2 Périodicité des mesures avions

Il convient de distinguer 2 types de contrôle en vol :

- Les contrôles en vol de mise en service qui interviennent avant la mise en service opérationnelle de l'équipement juste après la phase de réglage au sol.
- Les contrôles en vol périodiques qui ont lieu après chaque opération de maintenance au sol.

L'OACI préconise un contrôle en vol périodique tous les 6 mois. Toutefois, la DGAC a fait valider le principe de corrélation sol - sol et sol - bord. A chaque contrôle en vol, on vérifie la cohérence des mesures entre les relevés sol et les relevés de l'avion (corrélation sol - bord). On vérifie également la cohérence des différentes mesures des paramètres au sol (relevés moniteurs, mesures piste, mesures au moniteur lointain pour la CAT III) : corrélation sol - sol. Cette méthode de travail, validée par l'OACI permet de déroger à la règle des 6 mois. En France, les contrôles en vol périodiques n'ont donc lieu que tous les ans, sauf quelques terrains où l'environnement joue un rôle. Par exemple, au glide de Bergerac, les différences de qualité du plan de réflexion entre l'hivers et l'été ne permettent pas de valider la corrélation pour une année. Il y a donc un contrôle en vol de ce glide tous les 6 mois, alors que le localizer associé est contrôlé une seule fois par an.

IV.3.3 Mesures effectuées par l'avion

Les mesures avion varient selon le cas d'un contrôle de mise en service ou d'un contrôle annuel.

a) CEV Localizer

Notes :

¹ : Sans objet pour les localizers décalés.

² : A l'appréciation du contrôleur en vol après concertation avec le personnel de la maintenance.

³ : Ces deux mesures sont synchronisées tous les 3 ans.

Sous Fonction	Condition Station	Configuration Avion	Zone de Mesure	CEV Périodique	CEV Correctif	CEV Mise en Service
Vérifications avant CEV ¹	Fonctionnement Normal	Remontée de piste	Du seuil de piste au QFU de l'ILS jusqu'au point E	X	X	X
DDM et SDM Réf	BLS sur charge et, pour les bifréquences, Clearance coupé	Zone de couverture du directif	Zone de couverture du directif	X	X	X
Phase BLS/P+BL	$\lambda/4$ dans les BLS et, pour les bifréquences, Clearance coupé	Traversée à 4 NM minimum du réseau Loc	$\pm 10^\circ$	X	X	X
Position d'axe	Fonctionnement Normal	Approche	Entre les Points A et B	X	X	X
Structure d'axe	Fonctionnement Normal	Approche	Depuis l'alignement sur le RAP jusqu'au point C en Cat I et T en Cat III	X	X	X
Secteur	Fonctionnement Normal	Approches décalées sur les bords G et D	Entre les Points A et B	X	X	X
Alarmes d'axe	Alarmes G et D	Approche	Segment d'approche représentatif de la valeur entre les points A et B	X	X	X
Alarmes Secteur	Alarmes large et étroite	Approches décalées sur les bords G et D	Segment d'approche représentatif de la valeur entre les points A et B	X	X	X
Couverture en alarme	Alarme large ou alarme couverture pour les monofréquences. Alarme basse Clearance pour les bifréquences	Arc de cercle à 4NM des aériens RAP et à 1300' QFE	$\pm 35^\circ$	X	X	X
Couverture	Fonctionnement Normal	Arc de cercle à 4NM minimum des aériens RAP	$\pm 35^\circ$		²	X

Sous Fonction	Condition Station	Configuration Avion	Zone de Mesure	CEV Périodique	CEV Correctif	CEV Mise en Service
Couverture et Portée à 17NM	Alarme puissance basse	Arc de cercle à 17NM des aériens	$\pm 35^\circ$	³	²	X
Couverture et Portée à 25NM		Arc de cercle à 25NM des aériens	$\pm 10^\circ$		²	X

b) CEV Glide (Type M)

Sous Fonction	Condition Station	Configuration avion	Zone de mesure	CEV Périodique	CEV Correctif	CEV de mise en Service	CEV à 6 mois
DDM et SDM Réf	BLS sur charge et Clearance coupé	Approche sur θ_d	Tout segment d'approche	X	X	X	X
Phase BLS/P+BL	$\lambda/4$ dans les BLS et Clearance coupé ¹	Palier	De $0,3\theta_d$ à $2\theta_d$	X	X	X	X
Position de l'angle de descente	Fonctionnement normal	Approche sur θ_d	Entre les points A et B	X	X	X	X
Structure de l'angle de descente	Fonctionnement normal	Approche sur θ_d	Depuis la descente sur le RAD jusqu'au point C en Cat I et T en Cat III	X	X	X	X
Position de l'angle de descente	Fonctionnement normal	Palier depuis $0,76\theta_d$ puis approche sur θ_d depuis le FAP pour au moins un ensemble	Entre les points A et B	X ⁵		X	
Structure de l'angle de descente	Fonctionnement normal	Palier depuis $0,76\theta_d$ puis approche sur θ_d depuis le FAP pour au moins un ensemble	Depuis la descente sur le RAD jusqu'au point C en Cat I et T en Cat III	X ⁵		X	
Demi secteur inférieur	Fonctionnement normal	Approche sur $0,88\theta_d$	Entre les points A et B	X	X	X	X
Demi secteur supérieur	Fonctionnement normal	Approche sur $1,12\theta_d$	Entre les points A et B		⁶	X	
Couverture	Fonctionnement normal	Palier	De $0,3\theta_d$ à $2\theta_d$ et depuis 10NM	X	X	X	X
Alarmes d'angle	Alarmes angles haut et bas	Approche sur θ_d	Segment d'approche représentatif de la valeur entre les points A et B	X	X	X	X ⁴

Sous Fonction	Condition Station	Configuration avion	Zone de mesure	CEV Périodique	CEV Correctif	CEV de mise en Service	CEV à 6 mois
Alarmes demi secteur inférieur	Alarmes large et étroite	Approche sur $0,88\theta_d$	Segment d'approche représentatif de la valeur entre les points A et B	X	X	X	X ⁴
Couverture en alarme	Alarme basse Clearance	Palier	De $0,3\theta_d$ à $2\theta_d$ et depuis 10NM	X	X	X	X ⁴
Contrôle de la couverture suite à un déphasage A1/A2	Avance de phase jusqu'à l'apparition d'une alarme ^{2 7}	Palier	De $0,3\theta_d$ à $2\theta_d$ et depuis 10NM		6	X	
Couverture à $\pm 8^\circ$	Fonctionnement normal ²	Palier à $\pm 8^\circ$ par rapport au point de toucher des roues	De $0,45\theta_d$ à $2\theta_d$ et depuis 10NM	s	6	X	
Nul de A1	Porteuse dans A1 ₂	Palier	De θ_d à $2\theta_d$		6	X	
Nul de A2	Porteuse dans A2 ₂	Palier	De $0,66\theta_d$ à $2\theta_d$		6	X	
Nul de A3	Porteuse dans A3 ₂	Palier	De $0,45\theta_d$ à $2\theta_d$		6	X	
Null Réf	P+BL dans A1 et BLS dans A2 ²	Approche sur θ_d	Depuis la descente sur le RAD jusqu'au point C en Cat I et T en Cat III		6	X	
Répartition A1/A3	A2 sur charge et Clearance coupé ²	Approche sur θ_d	Depuis la descente sur le RAD jusqu'à 200'		6	X	
Mesure de la couverture secteur d'alignement seul (« directif »)	Clearance coupé ²	Palier	De $0,3\theta_d$ à $2\theta_d$		6	6	
Mesure le zone de capture	BLS du directif sur charge et Clearance en marche ²	Palier	De $0,3\theta_d$ à $2\theta_d$		6	6	

Sous Fonction	Condition Station	Configuration avion	Zone de mesure	CEV Périodique	CEV Correctif	CEV de mise en Service	CEV à 6 mois
Couverture azimutale	Fonctionnement normal ²	Arc de cercle à $\pm 8^\circ$ d'azimut et à $0,45\theta_d$ de site	$\pm 8^\circ$ d'azimut par rapport au point de toucher des roues	5	6	X	
Mesure en champ du diagramme impair	Signal Clearance sur entrée BLS ^{2 3}	Palier	De $0,3\theta_d$ à $2\theta_d$		6	6	

Notes :

1 : Lors de la mise en service, il faut procéder aux réglages de toutes les phases intermédiaires et des levers de doutes en fonction de la distribution adoptée par le constructeur.

2 : Mesure à effectuer sur un seul ensemble dans le cas d'un RAD doublé.

3 : Atténuer si besoin le signal Clearance pour ne pas endommager la distribution BLS.

4 : Mesure à n'effectuer que si l'axe et le secteur sont supérieurs aux tolérances de réglage.

5 : Ces mesures sont synchronisées tous les 3 ans.

6 : A l'appréciation du contrôleur en vol après concertation avec le personnel de maintenance.

7 : Le déphasage est effectué jusqu'à l'apparition d'une alarme parmi les alarmes axe, faisceau ou clearance.