

CHAPITRE 15

LES RADARS TRANSHORIZON

1	GENERALITES	2
2	PRINCIPES GENERAUX DE LA PROPAGATION IONOSPHERIQUE	3
2.1	L'IONOSPHERE.....	3
2.2	INTERACTION DES ONDES AVEC L'IONOSPHERE	4
2.2.1	Ionisation du milieu de propagation.....	4
2.2.2	Effet du champ magnétique terrestre.....	4
2.3	PROPAGATION DANS L'IONOSPHERE.....	5
2.3.1	Phénomène prépondérant	5
2.3.2	Condition de réflexion.....	5
2.4	TEMPS DE PROPAGATION D'UN SIGNAL	7
2.5	CONDITIONS THEORIQUES DE PROPAGATION	8
2.6	CONDITIONS PRATIQUES DE PROPAGATION	9
2.7	ABSORPTION DES ONDES	11
3	PRINCIPE ET CONSTITUTION DES RADARS TRANSHORIZON	13
3.1	PRINCIPE DE BASE.....	13
3.2	LES ANTENNES.....	14
3.3	LES EMETTEURS	16
3.4	LES RECEPTEURS	16
3.5	TRAITEMENT DE L'INFORMATION.....	17
4	CIBLES DETECTABLES	17
4.1	DONNEES GENERALES	17
4.2	LES BATEAUX.....	18
4.3	LES AVIONS.....	18
4.4	LES MISSILES OU LANCEURS.....	18
5	LES ECHOS DE SURFACE	19
5.1	POUVOIR REFLECTEUR	19
5.2	SPECTRE.....	20
6	FACTEURS LIES A LA PROPAGATION IONOSPHERIQUE.....	21
6.1	EQUATION DU RADAR TRANSHORIZON	21
6.2	BRUIT RECUEILLI PAR LE RADAR	22
6.3	MILIEU DE TRANSMISSION.....	23
6.3.1	Choix de la fréquence émise	23
6.3.2	Performances de propagation	24
6.4	INFLUENCE DU MILIEU SUR LA DETECTION	25
6.4.1	Phénomènes pris en cause	25
6.4.2	Combinaison des effets faraday et multi-trajets.....	25
6.4.3	Effet des évolutions lentes de propagation.....	27
6.4.4	Résultats pratiques.....	28
6.5	DIMENSIONNEMENT TYPE	29
6.6	SIGNAUX TRAITES, POUVOIR DISCRIMINATEUR, PRECISION	30
7	REALISATIONS EXISTANTES	31
8	RADARS TRANSHORIZON A ONDES DE SURFACE	33
8.1	CONCEPTION GENERALE.....	33
8.2	PERFORMANCES TYPES	34

1 GENERALITES

L'intérêt des systèmes de détection transhorizon est de permettre l'observation à de très grandes distances d'objets évoluant à basse altitude. En effet, les solutions classiques de radars hyperfréquences (*microwaves radars*) ne permettent pas la détection des objets en dessous de l'horizon radar, soit (cf. chapitre 11 § 3.2) :

$$D_{\text{km}} = 4,1 \cdot \sqrt{Z_m}$$

Soit pour un radar sol dont l'antenne est située entre 10 et 30 m au dessus du relief, un horizon radar distant de 13 à 23 km. Ceci lié au profil de gain des aériens et à l'effet de sol conduit à des volumes de détection très limités (environ 20 à 40 km) des cibles évoluant à basse altitude.

Pour augmenter ce volume de détection on peut alors faire appel, soit à des systèmes de détection aéroportés, soit à des phénomènes particuliers de propagation qui se rencontrent dans le domaine des hautes fréquences (de 3 à 30 MHz) et très hautes fréquences (jusqu'à 100 MHz), qui utilisent des propriétés particulières du milieu de propagation (ondes de surface) ou la faculté des ondes hautes fréquences de se réfléchir ou plus exactement de se rétrodiffuser sur les couches supérieures de l'atmosphère (rétrodiffusion ionosphérique).

On arrive ainsi à deux concepts de radars transhorizon :

- les RADAR TRANSHORIZON A ONDES DE SURFACE (*Ground-waves or surface-waves radars*)
- les RADARS TRANSHORIZON A RÉTRODIFFUSION IONOSPHERIQUE (*Skywave radars or OTH (over the horizon) radars*).

Les radars à onde de surface ont une portée liée à leur longueur d'onde : jusqu'à 50 km en très haute fréquence (30 à 100 MHz) et jusqu'à 400 km dans la partie basse des hautes fréquences (2 à 18 MHz), avec des puissances émises de quelques dizaines à quelques centaines de kW. Leur domaine d'utilisation est la surveillance maritime, les meilleures propagations étant obtenues au niveau de la mer.

Les radars à rétrodiffusion ionosphérique permettent d'atteindre des portées bien supérieures de 1 000 à 3 000 km en hautes fréquences (5 à 30 MHz) avec des puissances émises élevées, de plusieurs centaines à quelques milliers de kilowatts. Conçus à l'origine pour la surveillance lointaine des zones stratégiques (détection de départs de missiles) puis pour la surveillance lointaine des aéronefs évoluant à basse altitude, ils trouvent également des applications pour la surveillance maritime et l'étude de phénomènes climatiques par l'analyse des échos de mer (vents, courants maritimes, état de la mer...).

L'emploi des longueurs d'ondes décimétriques en détection n'est pas nouvelle, on peut citer en particulier (cf. Historique) les radars de la CHAIN HOME (23 MHz) qui furent en 1939 le système de base de la défense aérienne anglaise.

Mais il a fallu attendre le développement des technologies ultrarapides de traitement du signal, pour rendre possible leur application opérationnelle, compte tenu de la complexité du traitement du signal (élimination des échos parasites...) et du traitement de l'information (prédiction de propagation, balayage électronique...) imposée par le milieu de propagation.

Les progrès réalisés leur ouvrent maintenant un large champ d'applications à la surveillance aérienne et maritime avec une performance très intéressante concernant le domaine surveillé (par exemple, 11 millions de km² de 900 à 3 500 km pour le réseau OTH.B de l'US Air Force) en faisant des concurrents sérieux des systèmes aéroportés (AWACS-HAWKEYE) pour la surveillance lointaine de zones étendues.

Le tableau ci après résume les caractéristiques principales que l'on peut attendre des deux types de radars transhorizon.

Désignation	Ondes de surface HF	Rétrodiffusion Ionosphérique
Fréquence Puissance émise Portée	2 à 18 MHz 50 à 500 KW jusqu'à 500 km	5 à 30 MHz 200 à 2 000 kW 800 à 3 500 km
Antennes d'émission Antennes de réception Secteur couvert Surface couverte	L : 100 à 300 m H : 30 à 50 m L : 100 à 500 m H : 10 à 30 m 60° par antenne** jusqu'à 13 000 km ² par secteur	L : jusqu'à 1 000 m H : 30 à 50 m L : 1 000 à 7 000 m* H : 20 à 30 m 60° par antenne** jusqu'à 600 000 km ² par secteur
Résolution distance Résolution angulaire Précision distance Précision angulaire	2 à 10 km 2,5 à 10° 2 à 10 km 2 à 10°	4 à 30 km 0,25 à 2,5° 4 à 40 km 1 à 2°
Résolution Doppler Temps d'intégration	0,2 à 2 nœuds 10 à 100 sec	1 à 30 nœuds*** 1 à 10 sec***
Disponibilité (propagation)	100 %	90 % limité par l'ionosphère

* jusqu'à 7 000 m : JINDALEE

** réseaux linéaires

*** jusqu'à 100 sec (0,1 nœud à $\lambda = 10$ m) sur échos de mer

Dans le présent chapitre, un examen détaillé du principe et des performances des radars transhorizon à rétrodiffusion ionosphérique, que nous nommerons radars transhorizon, sera effectué.

Des notions générales sur les performances des radars à onde de surface seront exposées en fin de chapitre.

2 PRINCIPES GENERAUX DE LA PROPAGATION IONOSPHERIQUE

2.1 L'IONOSPHERE

Les couches supérieures de l'atmosphère contiennent des ions et des électrons libres en quantité suffisante pour affecter la propagation des ondes électromagnétiques. La densité électronique, quasi nulle au niveau du sol devient importante à des altitudes supérieures à 50 km, dans la région de l'atmosphère dite ionosphère.

Les processus qui provoquent l'ionisation de la haute atmosphère sont par ordre d'importance décroissante :

- les rayonnements ultra violets et X en provenance du soleil ;
- le rayonnement corpusculaire du soleil.

Le soleil joue donc le rôle principal dans la constitution de l'ionosphère dont les caractéristiques varieront de ce fait selon un cycle journalier (diurne-nocturne), saisonnier et comportant une composante d'une période d'environ 11 ans liée à l'évolution de l'activité solaire.

La densité électronique dans l'ionosphère passe par plusieurs maxima dans des régions particulières ou couches. On distingue :

- la couche D située entre 50 et 90 km dans laquelle la densité électronique atteint 10^7 à 10^9 électrons/m³ le jour et disparaît presque complètement la nuit ;
- la couche E située entre 90 et 150 km dans laquelle la densité électronique peut aller jusqu'à 10^{11} électrons/m³ le jour et de 3 à $4 \cdot 10^{10}$ électrons par m³ la nuit ;
- la couche F située entre 200 et 400 km dans laquelle la densité électronique varie de 10^{11} à 10^{12} électrons/m³ le jour vers 350 km d'altitude et $5 \cdot 10^{10}$ électrons/m³ la nuit vers 250 km d'altitude. Elle peut se diviser en deux sous-couches F₁ et F₂ en été, et présenter des hétérogénéités : F diffus.

Diverses théories permettent d'expliquer le mécanisme de la formation des couches et de déterminer des modèles ou profils de l'ionosphère. Mais ces modèles ne peuvent tenir compte de tous les phénomènes (activité solaire, orages magnétiques, traînées de météorites...) provoquant les variations rapides de cette structure.

2.2 INTERACTION DES ONDES AVEC L'IONOSPHERE

2.2.1 Ionisation du milieu de propagation

Lorsqu'une onde électromagnétique se propage dans un milieu ionisé, il se produit une interaction entre l'onde et le milieu de propagation, due à la présence de particules électrisées, d'où une variation de la constante diélectrique du plasma.

Ceci a pour conséquence une variation de l'indice de réfraction relatif du milieu, qui prend la valeur :

$$n = \sqrt{1 - (f_p/f)^2}$$

f_p , valeur de la fréquence de l'onde pour laquelle $n = 0$ est appelée fréquence de plasma.

$$f_p \approx 9 \cdot \sqrt{N}$$

- f_p en Hz ;
- N en électrons/m³ ;
- dans la couche D : $f_p \approx 0,1$ MHz ($\lambda = 3\ 000$ m) ;
- dans la couche E : $f_p = 2$ à 4 MHz le jour ($75\ \text{m} < \lambda < 150\ \text{m}$), $0,5$ à 1 MHz la nuit ($300\ \text{m} < \lambda < 600\ \text{m}$) ;
- dans la couche F :
 - en hiver : 6 à 12 MHz le jour ($25\ \text{m} < \lambda < 50\ \text{m}$), 4 à 6 MHz la nuit ($50\ \text{m} < \lambda < 75\ \text{m}$) ;
 - en été : le jour F₁ : 4 à 5 MHz ($60\ \text{m} < \lambda < 75\ \text{m}$), F₂ : 5 à 8 MHz ($40\ \text{m} < \lambda < 60\ \text{m}$) ; la nuit F : 3 à 5 MHz ($75\ \text{m} < \lambda < 100\ \text{m}$).

Ces valeurs doivent être recalées par une observation en temps réel du milieu de propagation.

2.2.2 Effet du champ magnétique terrestre

Le champ magnétique terrestre agit également sur les particules électrisées et infléchit leurs trajectoires. Les électrons décrivent alors des trajectoires hélicoïdales de période :

$$T_H = 1/f_H.$$

Sous nos latitudes $f_H \approx 1,3$ MHz, f_H est proportionnel à la valeur de l'induction magnétique du lieu. Il en résulte, comme dans les ferrites, une variation des conditions de propagation dans le milieu dont les principales sont :

- variation de la perméabilité magnétique donc de l'indice de réfraction « n »,
- effet Faraday,
- atténuation gyromagnétique à la fréquence f_H .

L'onde électromagnétique communique un mouvement aux électrons en échangeant de l'énergie avec eux. Cet échange est d'autant plus important que le mouvement des électrons sera freiné par le milieu de propagation.

Ce phénomène peut être observé dans les régions relativement denses de l'ionosphère (couche D), les électrons libres étant freinés par chocs contre les particules neutres.

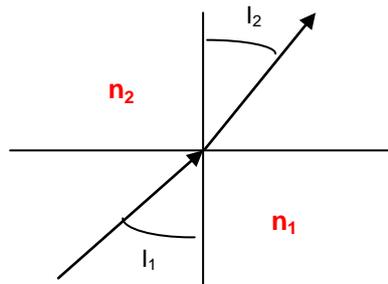
Il en résulte une atténuation de l'onde qui peut prendre des valeurs très importantes (10 à 30 dB).

2.3 PROPAGATION DANS L'IONOSPHERE

2.3.1 Phénomène prépondérant

La propagation ionosphérique conduit à une réfraction des ondes du fait de la variation de l'indice de réfraction du milieu. La variation de la constante diélectrique est l'effet prépondérant.

Lorsqu'une onde se propageant dans un milieu d'indice n_1 rencontre un milieu d'indice n_2 , il se produit une variation de direction de l'onde transmise dans le milieu 2 suivant la loi :



$$\sin i_1 / \sin i_2 = v_1 / v_2 = n_2 / n_1$$

où v_1 et v_2 sont les vitesses de phase des ondes transmises. Ou encore :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

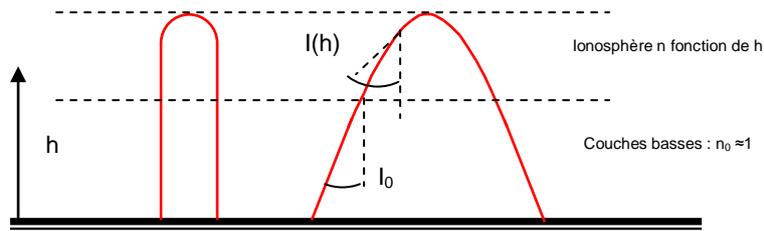
Dans le cas d'une variation continue de l'indice de réfraction, la direction de l'onde varie continûment et la relation précédente reste valable en tous points.

En particulier, elle peut être appliquée entre deux points quelconques sur la trajectoire de l'onde. Nous allons en déduire deux propriétés importantes de la propagation de l'onde.

2.3.2 Condition de réflexion

Dans ce qui va suivre, nous négligerons la variation de l'indice de réfraction de l'air dans les couches basses de l'atmosphère, et considérerons l'ionosphère comme localement plane, approximations suffisantes pour expliquer les propriétés fondamentales de la propagation dans l'ionosphère.

Schématiquement l'atmosphère sera ainsi découpée en deux zones : les couches basses pour lesquelles $n = n_0 \approx 1$ et les couches hautes ou ionosphère dans lesquelles n est une fonction de l'altitude h du lieu, soit : $n(h)$.



Nous aurons donc à chaque point de la trajectoire de l'onde :

$$n_0 \sin i_0 = n(h) \sin i(h)$$

La condition de réflexion s'écrit alors :

$$i(h) = \frac{\pi}{2}$$

ce qui amène ($n_0 \approx 1$) :

$$\sin(i_0) = n(h) = \sqrt{1 - (f_p(h)/f)^2}$$

Deux cas sont alors à considérer :

a Propagation verticale

Si la propagation est verticale $i_0 = 0$, la condition de réflexion se réduit à

$$n(h) = 0$$

Soit f_v la fréquence du signal émis à la verticale, ce signal subira une réflexion s'il existe une région de l'ionosphère où :

$$f_v = f_p(h)$$

Condition de réflexion en propagation verticale

b Propagation oblique

i_0 est quelconque. La condition de réflexion s'écrit :

$$\sin i_0 = n(h)$$

Si f_0 est la fréquence du signal émis à l'incidence i_0 , ce signal subira une réflexion s'il existe une région de l'ionosphère où :

$$\sin(i_0) = \sqrt{1 - (f_p(h)/f)^2}$$

Soit :

$$f_p(h) = f_0 \cdot \cos(i_0)$$

Condition de réflexion en propagation oblique

En particulier, si une onde en propagation oblique et une onde en propagation verticale se réfléchissent à la même altitude h , leurs fréquences sont reliées entre elles par la relation :

$$f_0 \cdot \cos i_0 = f_v$$

2.4 TEMPS DE PROPAGATION D'UN SIGNAL

Reprenons la relation :

$$\frac{\sin(i_1)}{\sin(i_2)} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

dans laquelle v_1 et v_2 sont les vitesses de phase de l'onde.

Dans les couches basses de l'atmosphère :

$$i_1 = i_0 ; n_1 = n_0 = 1 ; v_1 = c, \text{ vitesse de la lumière}$$

Dans l'ionosphère $n_2 = n(h)$ et v_2 est une fonction de h : $v_\phi(h)$, d'où la relation :

$$n(h) = \frac{c}{v_\phi(h)}$$

soit :

$$v_\phi(h) = \frac{c}{\sqrt{1 - (f_p/f)^2}}$$

Cette expression est la même que celle de la vitesse de phase d'une onde dans un guide de fréquence de coupure $f_c = f_p$.

Le plasma se conduit donc de ce point de vue comme un guide d'onde.

Par analogie, la vitesse de groupe v_g , ou vitesse de propagation du signal dans le plasma, s'écrira :

$$v_g \cdot v_\phi = c^2$$

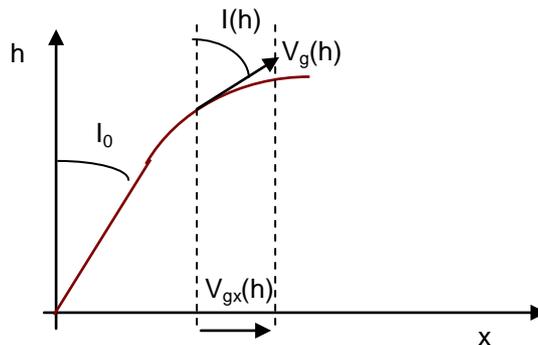
soit :

$$v_g(h) = c \cdot \sqrt{1 - (f_p/f)^2} = c \cdot n(h)$$

Plaçons-nous dans le cas d'une propagation oblique et définissons :

- une incidence de sortie i_0 de la couche basse de l'atmosphère pour laquelle la vitesse de groupe de l'onde est c ;
- une incidence $i(h)$ en un point quelconque de l'ionosphère pour laquelle la vitesse de groupe de l'onde est $v_g(h)$.

Nous avons :



$$\sin i_0 = n(h) \cdot \sin i(h)$$

Et la projection de la vitesse de groupe $v_g(h)$ sur un axe horizontal OX s'écrit :

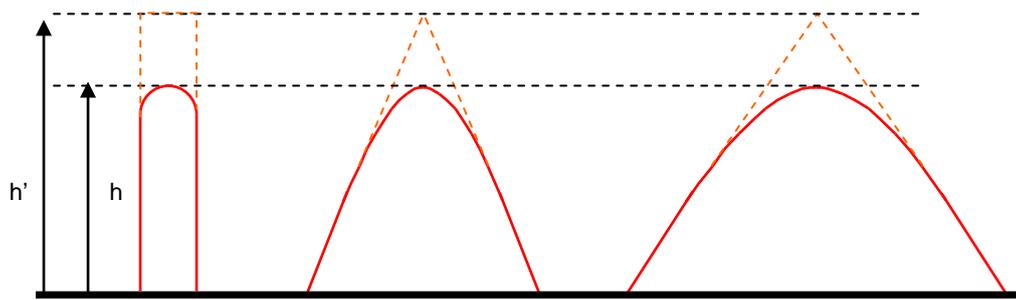
$$v_{gx} = v_g(h) \cdot \sin(i(h)) = v_g(h) \cdot \frac{\sin(i_0)}{n(h)}$$

soit comme $v_g(h) = c \cdot n(h)$:

$$v_{gx} = c \cdot \sin(i_0)$$

Le temps de trajet de l'onde dans l'ionosphère est le même que si l'onde avait suivi à la vitesse C un trajet rectiligne d'incidence constante i_0 .

D'où le schéma suivant :



En particulier si des ondes de fréquences et d'incidences différentes, abordent l'ionosphère de telle manière que leurs points de réflexion soient tous à la même hauteur h , ce qui entend quelle que soit l'incidence initiale i_0 :

$$f_p(h) = f_0 \cos i_0$$

tout se passe du point de vue du temps de propagation comme si elles se réfléchissaient à la même hauteur fictive h' en suivant deux trajets rectilignes.

Cette propriété reste valable pour tous i_0 et en particulier à la limite pour les ondes en propagation verticale.

Ceci permet la détermination directe de la hauteur fictive de réflexion h' par des sondages verticaux de l'atmosphère, en fonction de la fréquence de l'onde émise f_v .

2.5 CONDITIONS THEORIQUES DE PROPAGATION

Pour résumer les résultats précédents, plaçons-nous dans une région où l'indice de réfraction décroît constamment puis passe par un minimum, donc où la fréquence de plasma f_p croît constamment puis passe par un maximum $f_{p \max}$ appelé également fréquence critique f_c .

Dans cette hypothèse, la condition de réflexion des ondes s'écrit :

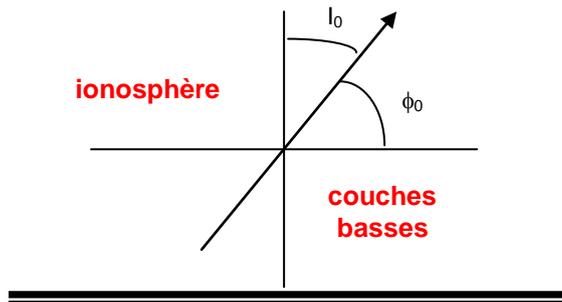
- en propagation verticale :

$$f_v \leq f_{p \max}$$

- en propagation oblique :

$$f_0 \cos i_0 \leq f_{p \max}$$

En particulier, en faisant apparaître la pente ϕ_0 des ondes à l'entrée dans l'ionosphère :



Si on se fixe ϕ_0 , la fréquence maximale utilisable est :

$$\text{MUF} = \frac{f_{p.\text{max}}}{\cos(i_0)} = \frac{f_c}{\sin(\phi_0)}$$

Si on se fixe f_0 la portée minimale est définie par :

$$\cos(i_0) = \frac{f_{p.\text{max}}}{f_0} = \sin(\phi_0)$$

En particulier, on peut retenir les règles simples suivantes :

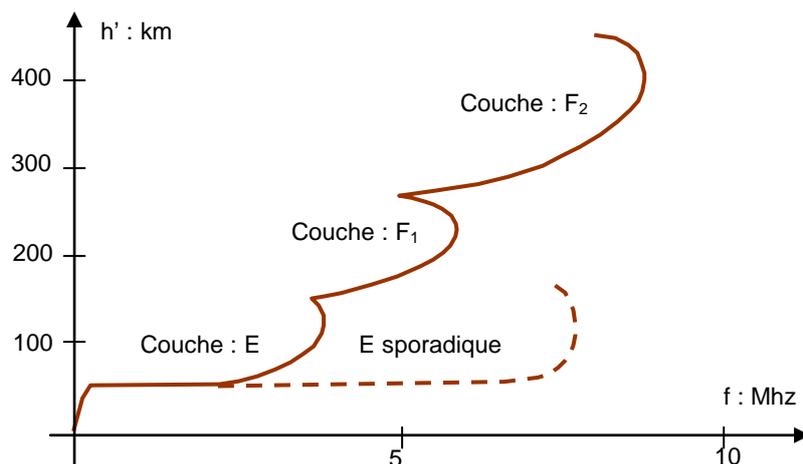
- la fréquence critique étant plus élevée de jour que de nuit et donc aussi les fréquences maximales utilisables, les fréquences employées seront plus élevées de jour (7,5 à 30 MHz) que de nuit (5 à 15 MHz) ;
- à hauteur h' donnée plus la fréquence est élevée plus la pente des ondes est faible
L'emploi des fréquences les plus élevées correspond aux portées maximales.

2.6 CONDITIONS PRATIQUES DE PROPAGATION

Nous avons vu, au paragraphe 2.2 que l'ionosphère se décompose en plusieurs couches : D, E, F dans lesquelles la densité électronique et la fréquence de plasma (f_p) passent par plusieurs maxima.

Les valeurs limites de f_p peuvent être évaluées soit par le calcul, soit expérimentalement, ainsi que les hauteurs h' correspondantes.

On aboutit ainsi au tracé « d'ionogrammes » ; h' en fonction de f_p ou f_v , dont un exemple est donné ci après :



Sur l'ionogramme présenté, on voit apparaître les couches E, F₁ et F₂. Dans certaines conditions, la couche E peut être l'objet d'une suractivité intense, on voit alors apparaître une couche E sporadique (en pointillé sur la figure). La couche D (non visible sur ce diagramme) n'agit que pour les très basses fréquences

L'ionogramme définit la condition limite de réflexion en propagation verticale en propagation oblique, deux conditions sont à remplir :

a Condition géométrique

Relation entre la portée D à atteindre, la hauteur h' de réflexion apparente et l'angle φ₀.

b Condition de réflexion

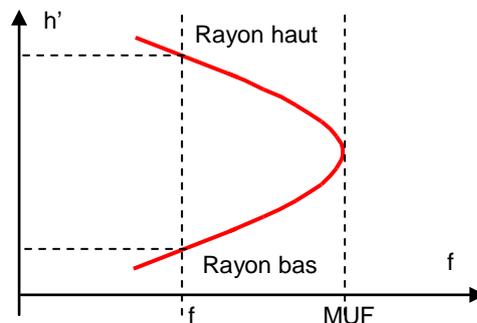
$$f_p(h') = f_0 \cos i_0 = f_0 \sin \phi_0$$

On aboutit, en éliminant φ₀, à une relation générale entre f₀, f_p, h' et D :

- en fixant D on obtient un réseau h' = F(f₀, f_p) dont les intersections avec l'ionogramme donnent pour chaque f₀ les valeurs de h' répondant au problème ;
- en fixant f₀ on obtient un réseau h' = H(D, f_p) dont les intersections avec l'ionogramme donnent pour chaque distance D les valeurs de h' correspondantes.

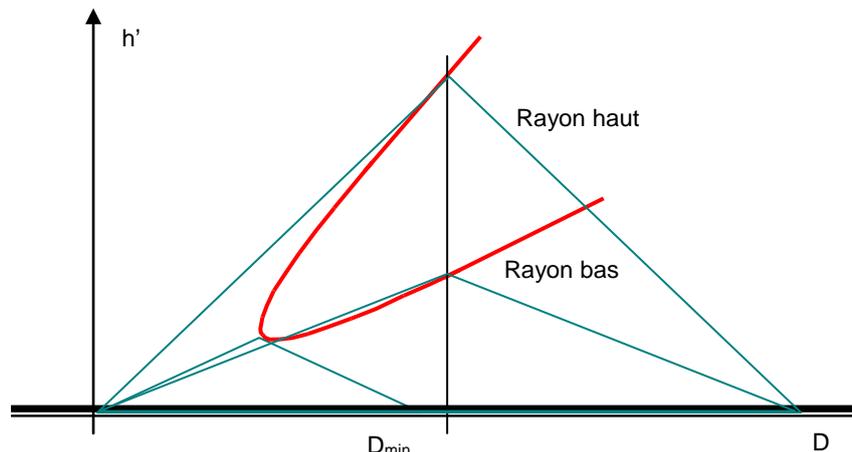
Dans les cas les plus courants, les solutions sont doubles. Elles sont présentées sur les graphiques suivants.

Portée D fixée :



Au-delà d'une fréquence limite : MUF, la propagation n'est plus possible. Pour des fréquences inférieures, la propagation peut suivre deux trajets : haut et bas.

Fréquence f₀ fixée :



La courbe h' en fonction de $D/2$ représente le lieu des points de réflexion. Sur cette courbe, dite **réflectrice**, on voit apparaître les deux rayons possibles pour atteindre une distance D donnée.

Une solution limite existe, qui donne la distance minimale de propagation à la fréquence considérée ; elle correspond au cas où f_0 est la MUF pour la distance D_{\min} .

En général, le rayon bas est placé dans de meilleures conditions de propagation. Le rayon haut, dont la fréquence est proche des fréquences de plasma du milieu qu'il traverse (*dans la région correspondant au point de réflexion, cf. 2.6*), subira sur son trajet des atténuations plus importantes.

Pour la même raison, les trajectoires utilisées devront avoir une pente limitée sous peine de voir apparaître des atténuations prohibitives.

Ceci, compte tenu de la directivité en site des antennes, limite les sites maxima de visée entre 25 et 35°. D'où des distances minimales assez importantes, liées à la hauteur de la couche de réflexion utilisée, de l'ordre de 500 km de jour et de 800 km la nuit.

Il n'en reste pas moins vrai qu'un écho en provenance d'une distance donnée peut avoir suivi deux chemins différents à l'aller et autant au retour. D'où :

- interférences des échos de retour amenant une fluctuation ;
- difficulté d'obtenir une mesure de distance très précise.

Par ailleurs, outre les deux trajets principaux définis ci-dessus, le profil de l'ionogramme peut permettre d'autres trajets, surtout en présence de phénomènes particuliers de propagation (*couches F diffus, E sporadiques, perturbations ionosphériques*).

En général, c'est toujours le trajet le plus bas qui est prépondérant, la présence des conditions de réflexion à basse altitude « *occultant* » les trajets faisant appel à des réflexions sur des couches supérieures.

En pratique, les trajets à une fréquence donnée pourront varier assez rapidement au cours du temps.

Il existe donc un problème important de prédiction et de contrôle des trajets d'ondes.

2.7 ABSORPTION DES ONDES

Il existe deux sortes d'absorption :

- **absorption réfringente** (dans le milieu créant la courbure des ondes)
- **absorption non réfringente** (dans les milieux inférieurs).

L'absorption réfringente est très sélective en fréquence ; elle se produit dans le cas où la fréquence utilisée est suffisamment élevée pour que l'indice de réfraction n tende vers zéro, c'est-à-dire lorsque le milieu est traversé par une onde de fréquence proche de sa fréquence de coupure.

C'est ce qui explique l'atténuation des rayons hauts cités en 2.5, car dans ce cas :

$$i_0 \rightarrow 0 \quad \text{et} \quad f_0 \rightarrow f_p$$

C'est aussi le cas des sondages verticaux et justifie la limitation du site de visée.

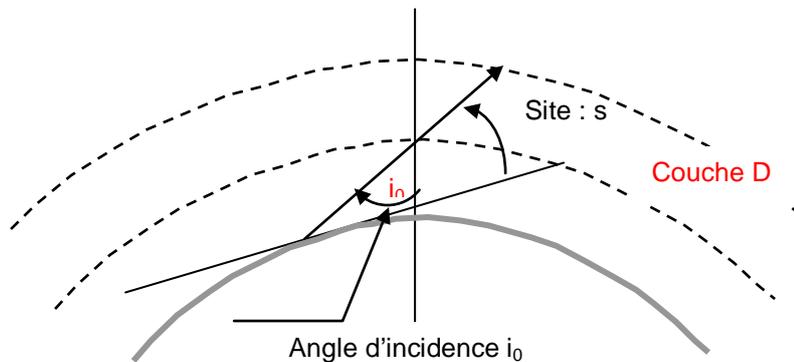
L'absorption non réfringente est moins sélective. Elle est due surtout aux chocs entre particules dans les zones relativement denses, couche D dans laquelle :

$$f \gg f_p$$

La perte par absorption non réfringente (ou non déviative) est donnée par une relation de la forme :

$$L = \frac{\mu (\text{SSN}, \Psi)}{(f_0 + f_H)^2 \cos(i_0)}$$

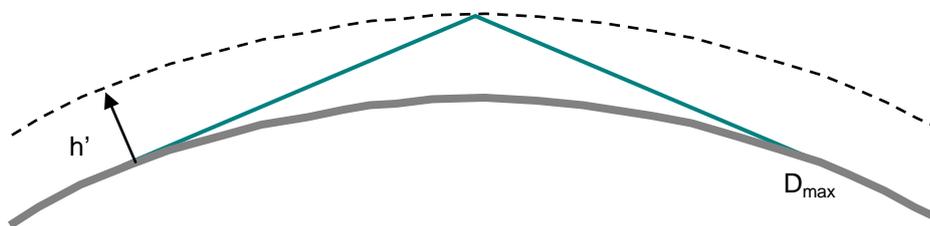
- SSN activité solaire (Solar Spot Number) ;
- Ψ : hauteur zénitale du soleil ;
- f_0 : fréquence utilisée ;
- f_H : fréquence gyromagnétique du milieu ;
- i_0 : angle « d'incidence » suivant le schéma ci après.



μ est une fonction croissante du SSN et de Ψ . A « μ » donné, L décroît avec f_0^2 et croît avec i_0 . A « f_0 » donné, l'atténuation est d'autant plus grande que le site est faible. Par contre, compte tenu de l'absorption réfringente, le bilan est pratiquement toujours en faveur du rayon bas.

Il en résulte une limite pratique au maximum de portée par rétrodiffusion ionosphérique, d'autant plus que :

- il est difficile d'obtenir des gains d'antenne élevés au site bas, ce qui limite les sites minima de visée à quelques degrés ;
- la rotondité de la terre vient limiter la portée maximale par réflexion sur une zone d'altitude h' , comme le montre le schéma suivant :



Au-delà de certaines portées, on pourra utiliser des propagations à bonds multiples incluant une ou plusieurs réflexions sur le sol.

L'absorption peut, pendant des durées plus ou moins grandes (quelques heures), en particulier dans les régions polaires, atteindre des niveaux considérablement plus élevés que la normale. Ces événements sont liés à l'activité solaire et à l'apparition d'orages magnétiques.

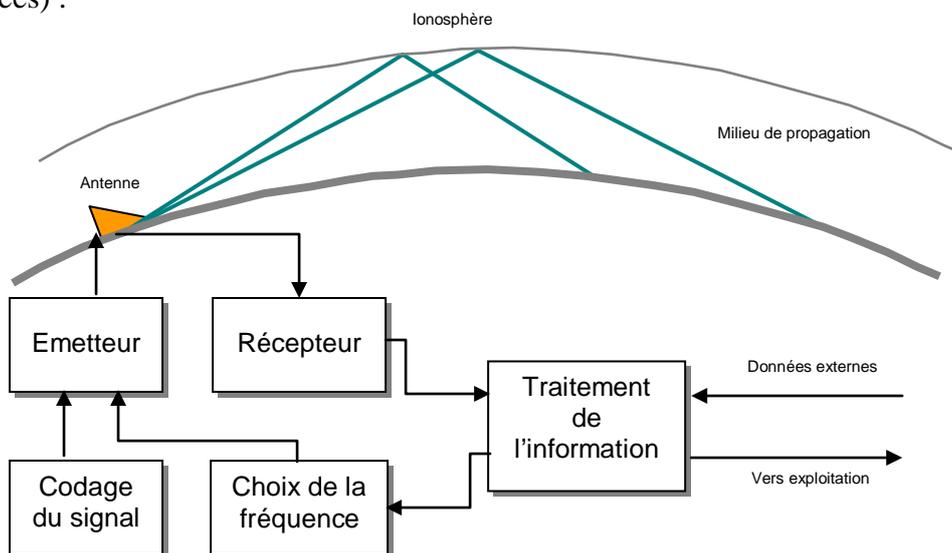
Dans les conditions normales, la perte totale sur le trajet aller et retour des ondes varie de 10 à 20 dB, elle peut atteindre la centaine de décibels.

3 PRINCIPE ET CONSTITUTION DES RADARS TRANSHORIZON

Les systèmes utilisant la rétrodiffusion ionosphérique sont connus sous l'appellation de radars transhorizon. Ils fonctionnent dans la bande 5 à 35 MHz. Le choix de la fréquence émise conditionne comme nous l'avons vu le chemin suivi par l'onde en fonction de la nature de l'ionosphère.

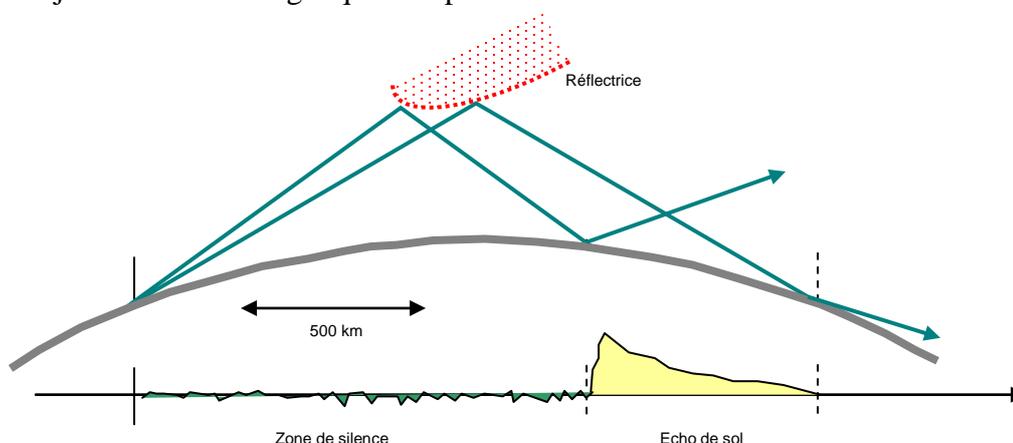
3.1 PRINCIPE DE BASE

Le schéma de principe d'un tel radar est le suivant (les antennes émission et réception pouvant être séparées) :



En fonction de la fréquence émise et de l'état de l'ionosphère, l'onde émise se focalisera dans un domaine de site bien déterminé.

Les phénomènes de propagation étudiés précédemment fixent la région de focalisation de l'onde. Un exemple de propagation est donné ci après ; seuls les rayons bas ont été tracés, car ce sont les trajets de bilans énergétiques les plus favorables.



On voit apparaître deux zones distinctes, du point de vue traitement du signal :

- la zone de silence, qui correspond à la région de l'espace dans laquelle la propagation n'a pas lieu, aucune onde réfléchie ne pouvant atteindre le sol ;
- la zone dans laquelle les ondes émises rencontrent le sol.

Deux phénomènes principaux se produisent au niveau du sol :

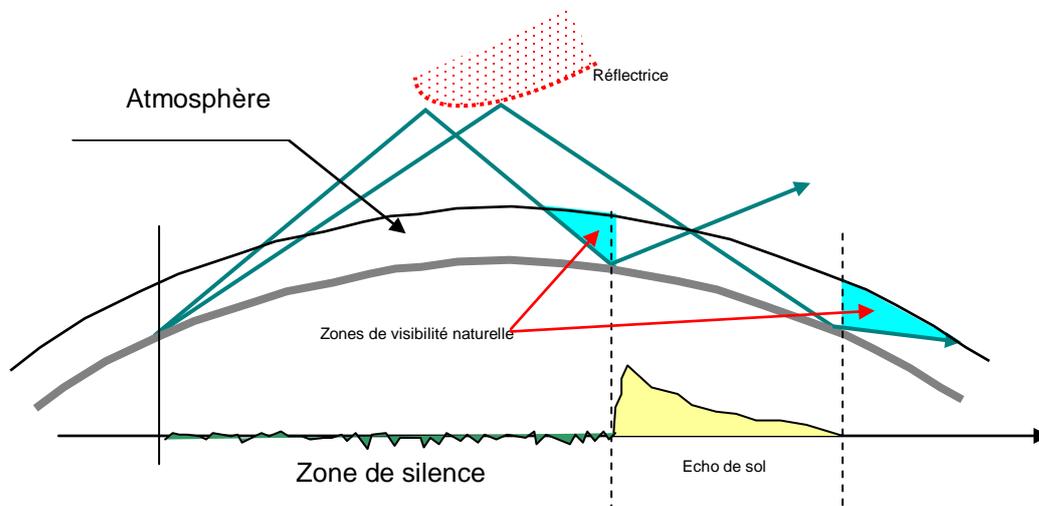
- réflexion spéculaire qui renvoie une très grande part de l'énergie interceptée (80 à 95 %) vers les distances supérieures, et peut ainsi amener à la formation d'un ou plusieurs bords supplémentaires, le sol jouant alors le rôle « *d'émetteur* » ;
- diffusion et diffraction du reste de l'énergie dans toutes les directions et, en particulier dans la direction initiale de rayonnement, provoquant ainsi un écho de retour.

L'amplitude des échos de sol, maximale au premier point de réflexion et, diminue avec la distance. Les raisons en sont multiples :

- atténuation aux sites bas dans la couche D ;
- diminution du gain des aériens aux sites bas ($< 5^\circ$) ;
- existence d'un rayon limite géométrique ;
- etc...

L'étendue de l'écho de sol (ou de mer) est de l'ordre de 500 à 1000 km suivant les conditions de propagation.

Pour être naturellement visibles, les cibles devraient donc se trouver en dehors des échos de sol, soit à des distances inférieures au trajet le plus court, soit à des distances supérieures au trajet le plus long, vers ces échos de sol.



On voit que dès que l'on cherche à détecter des objets évoluant à basse altitude ces zones deviennent très limitées. On sera donc pratiquement toujours confronté à un problème de détection en présence de clutter, donc de filtrage doppler.

3.2 LES ANTENNES

Les antennes utilisées sont des aériens à très large bande, capables de couvrir le domaine des fréquences émises. Des antennes classiques dans cette bande de fréquence sont utilisables telles que les :

- antennes log - périodiques ;
- antennes losange ou demi losange ;
- antennes Yagi ;

mais les réalisations opérationnelles font appel à des antennes réseaux à polarisation verticale associant des antennes élémentaires de type :

- monopôles ;
- dipôles ;
- antennes biconiques.

Ceci, généralement sous la forme de réseaux linéaires (avec réflecteur). Les sites couverts sont assez larges, de quelques degrés (aussi proche que possible de zéro degré compte tenu de l'effet de sol) à environ 35° , ce qui correspond à des hauteurs relativement faibles (20 à 40 m).

Dans de nombreux cas, les antennes émission et réception sont séparées, ce qui permet l'utilisation d'émissions continues et une optimisation séparée des diagrammes émission et réception.

Compte tenu des directivités désirées, les largeurs des antennes sont assez variables.

Par exemple à l'émission :

- pour les fréquences utilisées de jour., un réseau de largeur 500 m permet d'obtenir une directivité de $3,5^\circ$ (à 12 MHz) à $1,5^\circ$ (à 30 MHz) ;
- Pour les fréquences utilisées de nuit, ce même réseau de 500 m permet d'obtenir une directivité de $8,5^\circ$ à 5 MHz.

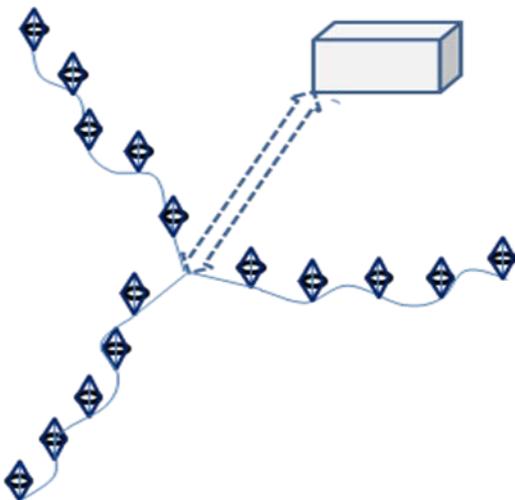
Par contre à la réception on recherchera une directivité plus élevée ($0,5$ à $2,5^\circ$) les largeurs d'antenne seront encore plus importantes, de un à plusieurs kilomètres.

Selon leurs dimensions ces antennes auront des gains de 20 à 30 dB. Conventionnellement à ces longueurs d'ondes, les gains des aériens sont donnés dans leurs conditions d'installation, donc avec effet de sol.

Les angles de balayage des réseaux linéaires sont de l'ordre de 60° ($\pm 30^\circ$) les antennes élémentaires des réseaux sont alors espacées d'environ $0,6 \lambda$ pour assurer une bonne qualité de diagramme, soit de l'ordre de 250 antennes élémentaires pour un réseau de 1 500 m de large.

Dans certains cas les antennes de réception peuvent être multifaisceaux comme par exemple sur le radar AN/FPS 118 DE L'US AIR FORCE (OTH-B) combinant un faisceau de $7,5^\circ$ à l'émission et cinq faisceaux de $1,5^\circ$ à la réception (à 10 MHz).

Pour aboutir à cette performance il faut disposer d'un récepteur par antenne (réseau actif réception selon chapitre 5 § 13.6), les faisceaux simultanés étant obtenus soit par des combineurs multiples, soit par formation de faisceau par le calcul.



L'antenne de conception originale du radar OTH français NOSTRADAMUS, est formée de trois branches espacées de 120° , chacune d'elle étant un réseau linéaire de dipôles biconiques, de 120 m de rayon en émission (émetteurs répartis de 2 à 5 kW ; puissance totale de 500 à 1 200 kW) ; et de 400 m de rayon en réception, à formation de faisceau par le calcul.

Cette configuration qui lui permet une observation sur 360° en gisement, ainsi qu'un positionnement du faisceau en site.

3.3 LES EMETTEURS

Selon les missions imposées aux radars transhorizon les puissances moyennes totales à réaliser varieront de 100 kW à plusieurs méga-watts. Pour cette raison il est fréquent de fractionner cette fréquence émise en pilotant chaque antenne d'émission par un émetteur élémentaire constituant ainsi des réseaux actifs émission, la formation du faisceau à l'émission étant alors effectuée à bas niveau par contrôle des amplitudes et phases émises.

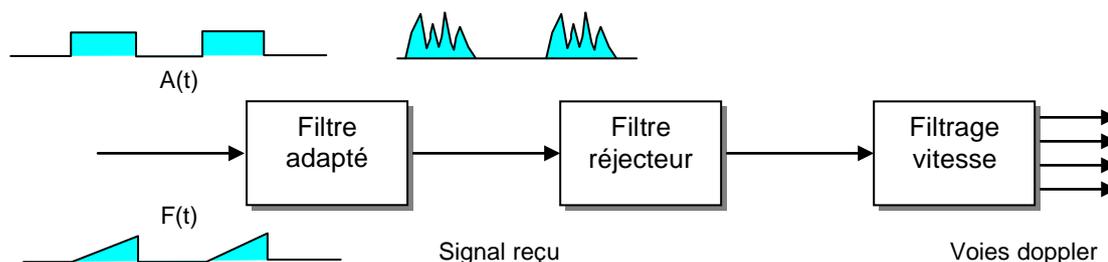
Les émetteurs utilisés sont donc du type à chaîne d'amplification, leur étage final utilisant des tubes classiques (triode, tétrode) ou des composants état solide.

Les contraintes imposées aux émetteurs sont des variations rapides de la fréquence émise pour contrôler la propagation et une grande pureté spectrale liée à une grande stabilité, tant pour éviter la pollution de la bande de fréquence que pour permettre un filtrage doppler à bande très étroite (0,01 Hz à 1 Hz) des signaux reçus. Le pilotage de ces émetteurs s'avérera donc très complexe et exigera des synthétiseurs de très hautes performances.

La bande instantanée d'émission est relativement faible, typiquement 10 kHz pour un pouvoir séparateur en distance de 15 km, mais la bande totale d'émission s'étend de 5 à 30 MHz ce qui impose, outre la limitation du bruit d'émission dans la bande instantanée, des contraintes sévères sur l'élimination des parasites rayonnés sur des fréquences harmoniques du signal émis.

3.4 LES RECEPTEURS

Outre l'amplification du signal les récepteurs devront jouer le double rôle de filtre adapté (au niveau des impulsions pour traiter les modulations émises) sur la durée de codage du signal, typiquement 5 à 50 millisecondes, et de filtre doppler à bande étroite sur la durée totale de cohérence désirée, 1 à 10 secondes sur aéronefs, 10 à 100 secondes pour la surveillance maritime et les études climatologiques. Ce traitement sera généralement fait en deux ou trois étapes, selon le schéma de principe ci-après :



Dans la plupart des cas, ces divers traitements, ainsi que la formation des faisceaux en réception, sont effectués en numérique après codage du signal. La nécessité de travailler en présence d'un clutter élevé et de s'adapter à des variations importantes de conditions de propagation exige des dynamiques de l'ordre de 100 dB, soit un codage à 16 bits. En effet, la dynamique totale de codage référée au bruit de quantification s'écrit :

$$\Delta = 12 \cdot 2^{2n}$$

ou n est le nombre de bit de codage et 1/12 la variance du bruit de quantification (équiréparti entre -1/2 et + 1/2) soit en décibels :

$$\Delta_{dB} \approx 6n + 10$$

Un codage à 15 bits plus signe permet donc de tenir une dynamique de 100 dB. La cadence de codage nécessaire (2 voies de codage, X et Y du signal vidéo équivalent, échantillonnage tous les 1/(2.ΔF) sera d'environ 40 KHz par voie de réception pour un spectre émis de 10 kHz, si le

codage est fait après formation du faisceau ou par récepteur, si la formation de faisceau est réalisée par le calcul.

3.5 TRAITEMENT DE L'INFORMATION

Outre les traitements classiques du signal, l'information recueillie doit être exploitée afin de déterminer les conditions de propagation au moment de la mesure.

En effet, la connaissance des conditions de propagation est, comme nous le verrons plus loin, indispensable à la localisation précise des objets détectés. Des méthodes de prédiction du trajet des ondes ont été mises au point à partir de modèles théoriques d'ionosphère. Elles peuvent permettre de dégrossir le problème, et en particulier, de choisir la fréquence à émettre pour un trajet donné à partir d'ionogrammes relevés ou prédits par des moyens extérieurs.

Néanmoins, les profils de l'ionosphère sont en général mal connus et des variations rapides imprévisibles peuvent se produire. Le radar devra donc compléter son information à partir de l'analyse des signaux qu'il reçoit ou dans la plupart des cas par des mesures complémentaires réalisées par des sondeurs ionosphériques.

La prédiction et l'analyse des caractéristiques de l'ionosphère est un problème d'un haut degré de complexité, qui exigera, surtout pour un traitement en temps réel, d'importants moyens de calcul.

4 CIBLES DETECTABLES

4.1 DONNEES GENERALES

Aux longueurs d'ondes utilisées : 10 m à 60 m, on peut considérer que nombre d'éléments rayonnants ont des dimensions comparables à la longueur d'onde ou faibles devant la longueur d'onde, ce qui devient le cas opposé à celui des radars hyperfréquence où l'on pouvait toujours considérer la longueur d'onde comme faible devant la taille des objets observés.

Selon qu'ils soient ou non dans leur domaine de résonance les éléments rayonnants auront des comportements très différents :

- un dipôle accordé à $\lambda/2$ présente une surface équivalente : $\sigma \approx \lambda^2$ soit 100 à 3 600 m² dans la bande utilisée,
- un demi dipôle présente une surface équivalente $\sigma \approx \lambda^2/4$ soit 25 à 900 m² s'il est accordé à $\lambda/4$,
- une sphère accordée ($\lambda \approx 2\pi r$) présente une surface équivalente $\sigma \approx \lambda^2/\pi$ soit 30 à 1 200 m²,
- une demi sphère accordée présente une surface équivalente $\sigma \approx \lambda^2/4\pi$ soit 8 à 300 m²,
- par contre, une sphère de 1 m de rayon ($2\pi r \approx 6$ m) présentera, se trouvant dans la zone de Rayleigh, une surface équivalente de 1/1 000 m² à 1 m².

Il faut noter en outre que la résonance ne peut se produire que si le dipôle est orienté selon le champ électrique de l'onde ; la surface équivalente d'un objet pourra donc varier dans de très grandes proportions (rapport 1 à 10 000) en fonction de son orientation par rapport à la polarisation de l'onde. Pour cette raison, les valeurs données ci-après ne peuvent être considérées que comme très indicatives.

4.2 LES BATEAUX

Dans le domaine des ondes décimétriques, compte tenu de la très grande probabilité de rencontrer des résonances on pourra retenir des surfaces équivalentes de 100 à 10 000 m² comme valeurs typiques.

La fréquence doppler de ces cibles peut atteindre 1 à 10 Hz.

4.3 LES AVIONS

Les avions peuvent présenter des résonances en ondes décimétriques. Dans le cas des radars à onde de surface (Cf. § 8) où la polarisation est verticale, les dimensions résonnantes restent relativement faibles. Les surfaces équivalentes peuvent varier de 1 à 50 m² avec une moyenne typique vers 10 m².

Dans le cas des radars à rétrodiffusion ionosphérique la polarisation est quelconque (effet Faraday) et tous les développements perpendiculaires à la propagation peuvent résonner à un moment donné. On considérera alors des surfaces équivalentes de 10 à 500 m² avec une moyenne typique vers 100 m².

La fréquence doppler de ces cibles peut atteindre 10 à 100 Hz.

4.4 LES MISSILES OU LANCEURS

De formes très simples (assimilables à un cylindre) les missiles ou lanceurs présenteront une surface équivalente très différente selon que la polarisation des ondes est parallèle à leur axe ou perpendiculaire. Leur surface équivalente peut donc varier de 1/1 000 m² à 100 m² (ou plus) en fonction de leur trajectoire relative par rapport aux ondes.

La fréquence doppler des missiles peut atteindre 400 Hz à 800 Hz.

Par ailleurs, dans leur phase propulsée les missiles ou lanceurs peuvent voir leur surface équivalente renforcée de manière importante par la traînée ionisée laissée par les gaz de propulsion.

Altitudes basses : 0 à 50 km

A ces altitudes où l'atmosphère est encore dense, se produit une traînée de très courte durée de vie ($\approx 0,1$ sec). Cette traînée a une longueur proportionnelle à la vitesse de l'engin et donc une surface équivalente variable le long de sa trajectoire.

La surface équivalente totale varie ainsi de 100 m² au sol à 1 000 m² à l'altitude 50 km. On peut considérer que la vitesse de l'ensemble traînée-fusée, compte tenu de la faible persistance, est sensiblement celle de la cible. Les fréquences doppler rencontrées sont comprises entre 0 et 400 Hz.

Altitudes moyennes 50 à 100 km

La pression atmosphérique devenant de plus en plus faible, la traînée s'allonge considérablement et augmente de volume, sa surface équivalente est comprise entre 10³ et 10⁵ m².

Elle reste attachée au propulseur, mais, compte tenu de l'augmentation de la persistance, sa vitesse au point le plus bas diminue et tend vers zéro. L'ensemble traînée-fusée se conduit comme une cible de vitesse moitié de celle du véhicule. Sa fréquence doppler maximale est comprise entre 100 et 400 Hz. A l'arrêt de la combustion, une traînée subsiste donnant lieu à une altitude supérieure à 100 km à une surface équivalente de l'ordre de 10² à 10³ m².

Altitudes élevées, supérieures à 100 km

Si la phase de propulsion se poursuit à des altitudes supérieures à 100 km, la traînée ionisée diffuse dans l'ionosphère et forme alors un nuage de très grande surface équivalente (10^6 à 10^8 m²) au bout d'un temps de quelques minutes (3 à 5 minutes) ; sa persistance peut atteindre 10 à 15 minutes, sa fréquence doppler est quasi nulle (inférieure à 3 Hz).

Ces deux derniers types d'échos, qui ne se produisent que si la propulsion dure assez longtemps pour les engendrer, sont à considérer comme des perturbations ionosphériques dues au passage des véhicules propulsés dans les couches hautes de l'atmosphère et peuvent également être dus à d'autres causes (météorites, nuages de diffusion ionosphérique). Ils ne paraissent donc pas devoir être pris en compte comme éléments principaux de détection.

5 LES ECHOS DE SURFACE

5.1 POUVOIR REFLECTEUR

La surface terrestre interceptée par les radars transhorizon est considérable. En effet, la résolution en distance de tels radars est en moyenne de 15 km (4 à 30 km), en raison des irrégularités de la propagation, et la résolution angulaire moyenne de 1,5° (0,25 à 2,5°), compte tenu de la propagation et de la taille des aériens, soit 50 km pour une portée moyenne de 2 000 km.

La surface terrestre interceptée est donc typiquement de 800 km² ou $8 \cdot 10^8$ m² (ou 89 dB/m²).

Pour ce qui concerne le pouvoir réflecteur, des mesures effectuées sur les échos en mer en polarisation verticale ont fait apparaître des σ_0 compris entre -25 et -35 dB dans la bande de fréquence 5 à 30 MHz, une valeur de -30 dB pouvant être prise comme référence pour un vent axial (longitudinal sea).

Cette valeur peut descendre à -40 dB pour un vent transversal (transverse sea).

Dans le cas des radars transhorizon, à rétrodiffusion ionosphérique, deux phénomènes sont en outre à prendre en compte :

- l'effet Faraday qui vient modifier la polarisation des ondes ce qui entraîne une baisse du pouvoir réflecteur de 3 à 4 dB ;
- l'effet multi-trajets des ondes (cf. § 6.4 ci-après) qui, dans le cas d'un clutter étendu, vient renforcer les crêtes des échos parasites de 12 dB lorsque les différents trajets des ondes se conjuguent positivement, ce qui sur une grande surface se produira systématiquement.

On retiendra donc comme valeur crête du pouvoir réflecteur combinant ces deux effets un σ_0 de -20 dB pour un vent axial et -30 dB pour un vent transversal.

Pour ce qui concerne les échos de sol, leur comportement est très dépendant du relief et de la nature des terrains. Par rapports aux valeurs citées précédemment, un sol peu accidenté (plaine, lande...) peut présenter un pouvoir réflecteur inférieur de -10 dB à l'écho de mer, mais un relief accidenté ou une zone habitée peuvent présenter un pouvoir réflecteur supérieur de 10 dB à l'écho de mer. De plus, compte tenu de la grande taille de la cellule de résolution les zones de clutter de sol ne sont pas toujours homogènes.

On retiendra donc, en prenant comme référence **l'écho de mer** une surface équivalente « crête » tous effets confondus de :

$$89 - 20 = 69 \text{ dB/m}^2 (8 \cdot 10^6 \text{ m}^2)$$

à 1 500 km à comparer dans le cas de la détection des **avions** à une surface équivalente de 10 à 100 m²

soit un contraste de 60 à 70 dB à rétablir par filtrage doppler pour obtenir en finale un rapport signal sur clutter de l'ordre de 10 dB.

5.2 SPECTRE

Le spectre des échos de mer aux longueurs d'ondes considérées est principalement lié aux mouvements des vagues de gravitation (périodicité de 10 à 100 m) dont la vitesse de phase peut s'écrire :

$$V = \left(\frac{g \cdot L}{2\pi} \right)^{1/2}$$

où :

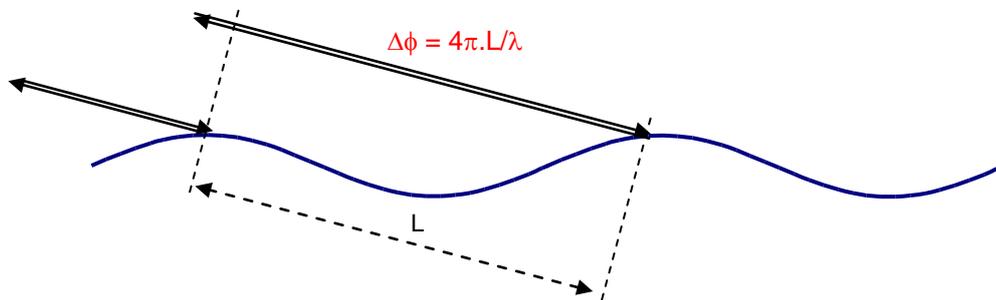
- V : vitesse de phase des vagues ;
- g : accélération de la pesanteur ;
- L : périodicité (appelée aussi longueur d'onde) des vagues.

En moyenne un océan sans houle formée contient toutes les périodicités entre 0 et L et son spectre se répartit sur un domaine doppler tel que :

$$f_d = \pm \frac{2V}{\lambda} = \pm \left(\frac{2g \cdot L}{\pi \lambda^2} \right)^{1/2}$$

si λ est la longueur d'onde émise. Soit une largeur de spectre de $\pm 0,4$ Hz à $\pm 2,5$ Hz aux longueurs d'ondes radar considérées (10 m à 60 m) pour une vitesse de phase maximale de l'ordre de 10 m/s à 15 m/s.

Ce spectre n'est pas uniforme, en effet, lorsque la période des vagues est égale à une demi-longueur d'onde radar il se produit un phénomène de résonance connu sous le nom d'effet Bragg, les échos issus des vagues successives se retrouvant en phase du fait du trajet aller et retour de l'onde :

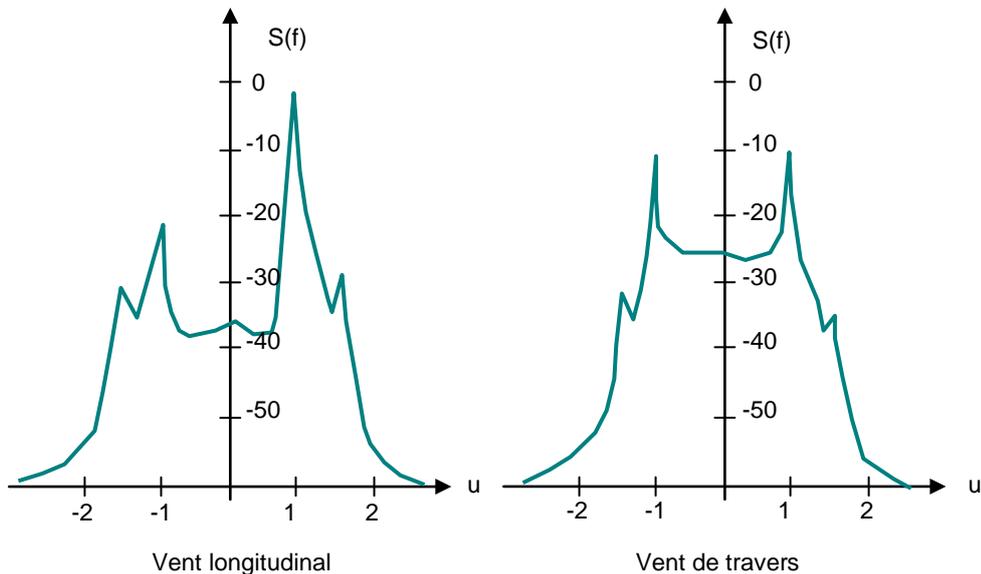


D'où une fréquence de résonance, pour $L = \lambda/2$, dépendant de la longueur d'onde émise :

$$f_{dr} = \left(\frac{g}{\pi \lambda} \right)^{1/2}$$

soit 0,2 Hz à 0,6 Hz aux longueurs d'ondes radar de 60 m à 10 m. L'allure du spectre du clutter de mer est donné page suivante.

Les valeurs des σ_0 cités au paragraphe précédent tiennent compte de ce phénomène de résonance et sont donc à considérer comme des valeurs crêtes.



Allure du spectre des échos de mer

$$u = \text{doppler normalisé} = f_d / (g/\pi\lambda)^{1/2}$$

Le spectre des échos de sol est en général plus étroit. Cependant dans les zones à forte densité de végétation, les mouvements induits par le vent peuvent faire apparaître des vitesses de phase allant jusqu'à 5 m/s (0,15 à 1 Hz) et les véhicules terrestres former des échos parasites entre 0,8 Hz et 5 Hz (à 90 km/h). En outre, les variations rapides des conditions de rétrodiffusion entraînent un élargissement spectral des échos pouvant atteindre plusieurs Hertz.

6 FACTEURS LIES A LA PROPAGATION IONOSPHERIQUE

6.1 EQUATION DU RADAR TRANSHORIZON

L'équation du radar transhorizon a rétrodiffusion ionosphérique se présente comme celle du radar classique à un facteur près lié à la focalisation des ondes sur l'ionosphère, soit :

$$\frac{S}{B} = \frac{P_e \cdot T \cdot G_e \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot F_p}{(b_0 + b_c) \cdot (4\pi)^3 \cdot D^4 \cdot L_p \cdot L_s}$$

- P_e : puissance émise (W) ;
- T : durée du signal traité (s), $T = n \cdot \tau$ si n impulsions de durée τ ;
- G_e : gain à l'émission (compté avec effet de sol) ;
- G_r : gain à la réception (compté avec effet de sol) ;
- λ : longueur d'onde émise (m) ;
- σ : surface équivalente de la cible (m^2) ;
- F_p : facteur de propagation (environ 6 dB) ;
- b_0 : bruit radar (W/Hz) d'origine thermique ou industrielle ;
- b_c : résidu de bruit de clutter (W/Hz),
- D : distance radar-cible (m) ;
- L_s : pertes système (liaisons antennes, traitement du signal) ;
- L_p : pertes de propagation.

Certains de ces paramètres vont être précisés dans les paragraphes ci-après.

6.2 BRUIT RECUEILLI PAR LE RADAR

Le bruit radar comprend :

- le bruit interne de réception,
- le bruit recueilli par l'aérien du radar.

Compte tenu des technologies disponibles, le bruit interne de réception peut être considéré comme négligeable.

Le bruit recueilli par l'aérien ou bruit externe peut lui-même être décomposé par nature.

Bruit atmosphérique

Variable selon l'heure de la journée, la figure suivante représente les valeurs typiques moyennes de jour et de nuit pour une station située dans l'hémisphère nord (latitude $\approx 40^\circ$).



Bruit de surface

Rayonné par la surface éclairée, ce bruit dépend de la nature des zones interceptées. Les mesures effectuées montrent qu'il est de la forme $b = a.f^{-2,8}$,

Soit en échelle logarithmique :

- zones résidentielles : $b_{dB} = -122,5 - 28.\log_{10}(f_{MHz})$;
- zones rurales : $b_{dB} = -134,5 - 28.\log_{10}(f_{MHz})$;
- bruit de fond (zones non habitées) : $b_{dB} = -150,5 - 28.\log_{10}(f_{MHz})$.

Bruit galactique

Le bruit galactique peut également être assimilé à une fonction linéaire en échelle logarithmique :

$$b_{dB} = -154,5 - 22.\log_{10}(f_{MHz})$$

Il est à prendre en compte à la place du bruit de surface pour les ondes qui traversent l'ionosphère.

Outre ces bruits naturels et industriels, le spectre des hautes fréquences est largement occupé par des émissions diverses : liaisons radio fixes et mobiles, radios amateurs, liaisons marines et aéronautiques, distribution du temps...

Une analyse temps réel des fréquences disponibles est en pratique nécessaire pour choisir une bonne fréquence d'émission. Inversement le choix d'un codage du signal assurant une bonne pureté du spectre émis sera nécessaire pour ne pas perturber les autres utilisateurs.

6.3 MILIEU DE TRANSMISSION

6.3.1 Choix de la fréquence émise

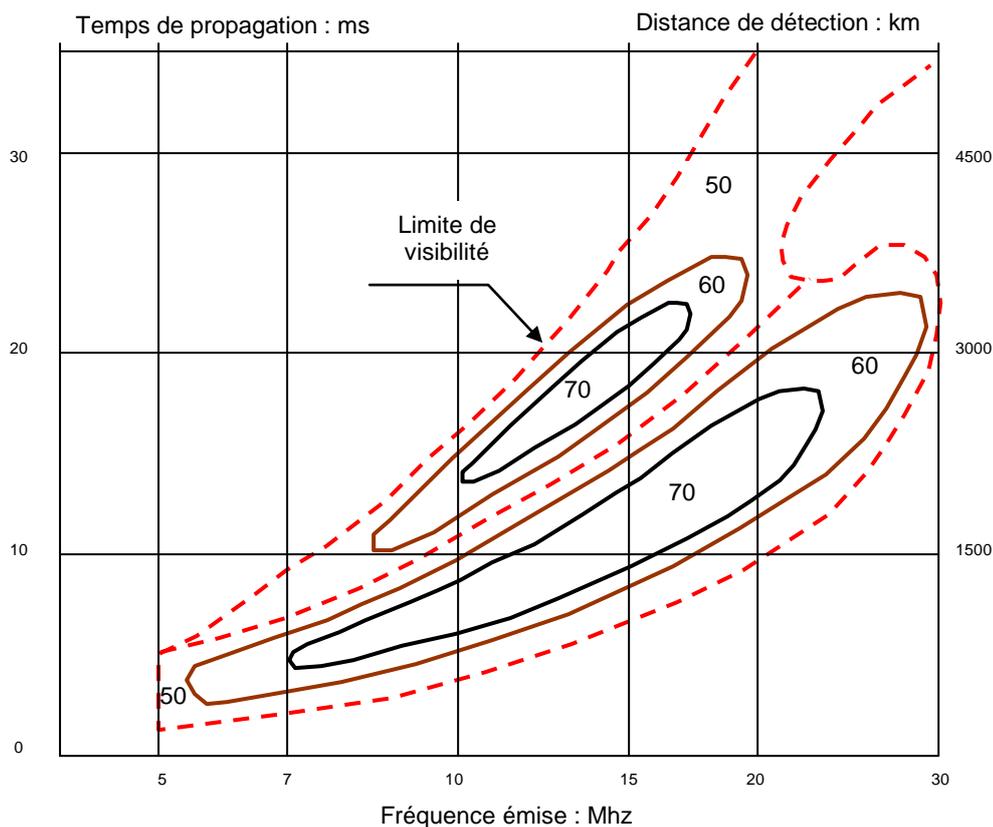
Comme il l'est indiqué au paragraphe 2, les fréquences de plasma des diverses couches évoluent avec les saisons et l'heure de la journée (§ 2.2) venant modifier les conditions de rétrodiffusion (§ 2.5). Il en résulte en pratique :

- de jour : des possibilités de réflexion sur la couche E ($h' \approx 100 \text{ km}$) et la couche F ou les couches F_1 et F_2 ($h' = 200 \text{ à } 400 \text{ km}$) ;
- de nuit : des possibilités de réflexion sur la seule couche F ($h' \approx 300 \text{ km}$).

Des modèles d'ionosphère permettent de prédire ces conditions de rétrodiffusion. Ils sont complétés par des mesures en temps réel, notamment par des sondages obliques qui, en relevant la puissance recueillie sur les échos de surface, donnent un indicateur des zones qui peuvent être éclairées en fonction de la fréquence émise.

Ce type de paramètre, caractéristique de la qualité du rapport signal sur « bruit radar » n'est cependant pas suffisant pour qualifier une bonne propagation pour un radar opérant un filtrage doppler, la propagation pouvant venir perturber le spectre des échos reçus (fluctuation rapide du milieu, trajets multiples...).

Une autre caractéristique importante est le taux de visibilité (*ou sub clutter visibility*) du radar, c'est à dire son rapport maximal signal utile sur bruit de phase clutter, qui peut être estimé par une mesure directe du rapport clutter sur bruit.



Carte schématique de taux de visibilité

Pour ce faire, en ayant éliminé la composante principale du clutter par filtrage doppler, on peut dresser une carte « clutter résiduel sur bruit radar » soit b_c/b_0 (cf. § 6.1) et en prenant cette carte comme référence de bruit calculer une carte « taux de visibilité », pris égal (en décibel) à la différence entre le rapport clutter sur bruit et le rapport clutter résiduel sur bruit, pour obtenir un rapport clutter sur clutter résiduel (bruit de phase).

Cette dernière carte, dont un exemple est donnée à la page précédente, est caractéristique d'une bonne propagation au plan de la qualité spectrale des signaux reçus et vient apporter un critère supplémentaire pour le choix de la fréquence à émettre.

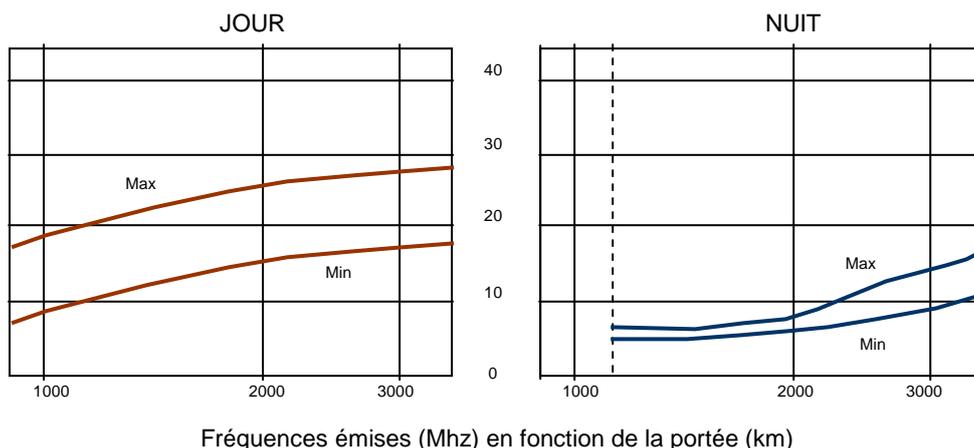
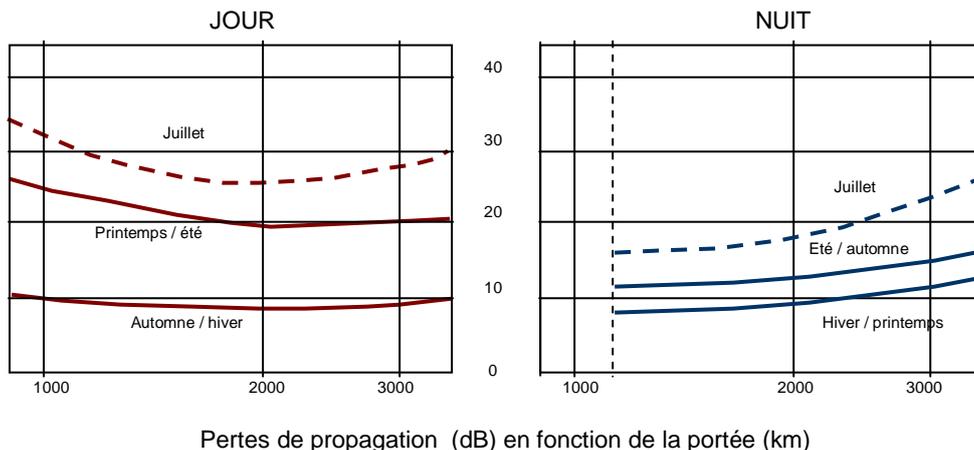
Ce type d'analyse exige des temps d'intégration assez importants sur chaque fréquence émise pour pouvoir effectuer le filtrage doppler. Seuls des fréquences discrètes seront alors utilisées, la carte étant reconstituée par interpolation.

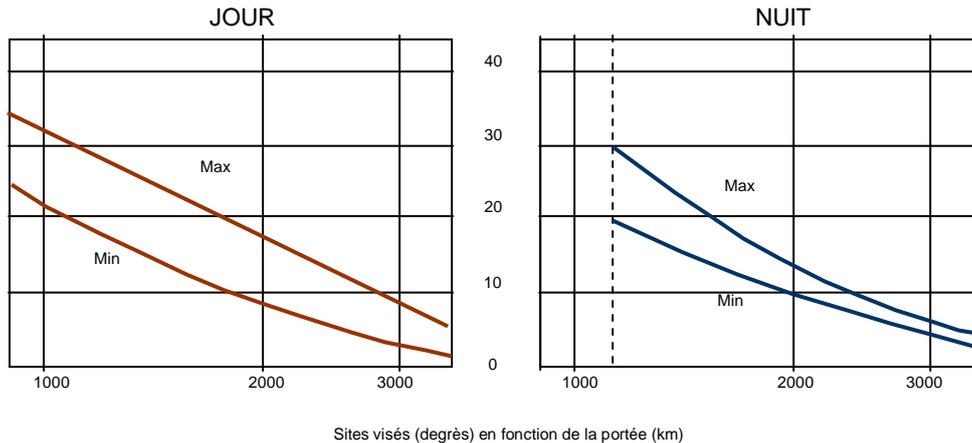
6.3.2 Performances de propagation

Les prédictions du comportement du milieu de propagation et les mesures temps réel associées par sondages à large bande, permettent de choisir la fréquence à émettre pour une portée désirée et de prévoir le site de visée.

Les courbes suivantes présentent un exemple de conditions moyennes de propagation pour une station située dans l'hémisphère nord (latitude $\approx 40^\circ$).

CONDITIONS MOYENNES DE PROPAGATION (hémisphère nord)





Les pertes de propagation sont très variables selon les conditions, elles sont (sauf en automne) supérieures de jour que de nuit. On peut retenir une moyenne de 16 dB de jour et 11 dB de nuit mais les écarts possibles sont élevés.

Les sites visés peuvent atteindre 35° de jour et 30° de nuit. Pour tenir compte de ce facteur dans l'équation de propagation on pourra prendre au premier ordre :

$$D = D_0 / \cos(s)$$

où :

- D : portée radar ;
- D₀ : portée au sol ;
- s : site visé.

Pour les distances les plus élevées, on peut dans certains cas limites être amené à prévoir une propagation à double bond. Dans ce cas les conditions sont voisines de celles donnant la moitié de la portée visée, sauf la perte qui est à multiplier par deux environ, l'ionosphère étant traversée deux fois et le rendement de réflexion sur le sol se trouvant à peu près compensé par le second effet de focalisation.

6.4 INFLUENCE DU MILIEU SUR LA DETECTION

6.4.1 Phénomènes pris en cause

Par rapport au radar hyperfréquence où les seuls événements à considérer sont les fluctuations de la cible et du bruit, le radar transhorizon se voit soumis à d'autres effets pouvant influencer sur la propagation :

- la rotation de Faraday du plan de polarisation des ondes,
- l'effet de la propagation multi-trajets ;
- la fluctuation des pertes de transmission ;
- la fluctuation du bruit externe du radar.

6.4.2 Combinaison des effets faraday et multi-trajets

Pour atteindre la cible et revenir au radar, les ondes peuvent prendre quatre trajets différents, combinaison :

- du trajet direct de site θ et rotation de Faraday ψ ;
- du trajet avec réflexion sur le sol de paramètres θ' et ψ' .

On définit :

- la matrice de transmission de l'antenne, en polarisation verticale :

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- la matrice de réflexion de la cible en bistatique dépendant des angles d'incidence θ_i et de réflexion θ_r et de la polarisation : H ou V :

$$= [N(\theta_p, \theta_r)] = \begin{bmatrix} N_{VV}(\theta_p, \theta_r) & N_{VH}(\theta_p, \theta_r) \\ N_{HV}(\theta_p, \theta_r) & N_{HH}(\theta_p, \theta_r) \end{bmatrix}$$

- la matrice de rotation de Faraday du plan de polarisation :

$$[F] = \begin{bmatrix} \cos \Psi & \sin \Psi \\ -\sin \Psi & \cos \Psi \end{bmatrix}$$

si ψ est la rotation de Faraday, et une expression identique pour $[F'](\psi')$;

- les longueurs des trajets direct L et indirect L' ,
- la matrice de réflexion de la terre prenant en compte uniquement la réflexion spéculaire :

$$[\rho] = \begin{bmatrix} \rho_V & 0 \\ 0 & \rho_H \end{bmatrix}$$

- le coefficient global de propagation K ,
- la variance du bruit $\sigma^2 = B$

Pour les quatre trajets possibles, l'amplitude du signal reçu a pour expression :

- Aller et retour avec réflexion sur la cible :

$$A_1 = K \cdot [T]^T \cdot [F] \cdot [N(\theta, \theta + \pi)] \cdot [F] \cdot [T] \cdot \exp\{-j4\pi L / \lambda\}$$

- Réflexion sur le sol puis sur la cible :

$$A_2 = K \cdot [T]^T \cdot [F'] \cdot [\rho] \cdot [N(\theta, \theta - \pi)] \cdot [F] \cdot [T] \cdot \exp\{-j2\pi(L + L') / \lambda\}$$

- Réflexion sur la cible puis sur le sol :

$$A_3 = K \cdot [T]^T \cdot [F] \cdot [N(-\theta, \pi + \theta)] \cdot [\rho] \cdot [F'] \cdot [T] \cdot \exp\{-j2\pi(L + L') / \lambda\}$$

- Aller et retour avec réflexion sur le sol :

$$A_4 = K \cdot [T]^T \cdot [F'] \cdot [\rho] \cdot [N(-\theta, \pi - \theta)] \cdot [\rho] \cdot [F'] \cdot [T] \cdot \exp\{-j4\pi L' / \lambda\}$$

L'amplitude du signal reçu sera à chaque instant la somme des amplitudes des ondes issues des quatre trajets soit :

$$A(\theta, \psi, \psi', \ell, \ell') = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$$

Son expression se simplifie dans les hypothèses suivantes :

- la rotation de Faraday est prise égale sur les deux trajets $\psi = \psi'$;
- la ré-émission en cros-polarisation de la cible est négligeable ;

$$n_{VH} = n_{HV} = 0$$

- la matrice de réflexion de la cible admet des symétries en θ :

$$[N(\theta, \theta + \pi)] = [N(\theta, \theta - \pi)] = [N(-\theta, \pi + \theta)] = [N(-\theta, \pi - \theta)].$$

Dans ces conditions l'expression précédente devient, en posant :

$$\phi = 2\pi(L-L')/\lambda$$

$$A(\phi, \psi) = K(n_{VV} \cos^2 \psi (1 + \rho_V^{ej\phi})^2 - n_{HH} \sin^2 \psi (1 + \rho_H^{ej\phi})^2) \exp\{j.4\pi L/\lambda\}$$

A comparer au signal reçu par le trajet direct sans rotation de polarisation

$$A_1 = Kn_{VV} \exp\{j.4\pi L/\lambda\}$$

Le signal reçu par une cible vue sous un site θ peut ainsi dans certaines conditions devenir d'une amplitude quatre fois supérieure au signal reçu du trajet direct, ce qui recoupe les résultats obtenus par une méthode plus globale dans l'étude des réflexions sur le sol au chapitre 11 (§ 3.1.3) dans le cas des radars hyperfréquence ($D_{max} \leq 2D$) et justifie le terme correctif de 12 dB (rapport 16 en puissance) pris sur la valeur crête du coefficient de réflexion de la mer au paragraphe 5.1, ces conditions locales pouvant être acquises en de nombreux points de la cellule de confusion du radar.

Il en résulte que la probabilité de détection de la cible devient pour une présentation donnée (θ fixé) une fonction de ϕ et ψ :

- le seuil de détection du paragraphe 11.3 du chapitre 10 :

$$-t = 2^{0,5} ((k - 0,5)^{0,5} - A)$$

devenant une fonction de ϕ et ψ dans le cas de la **cible non fluctuante** avec $S/B = A^2/2B$,

- le rapport S/B de l'expression de la probabilité de détection :

$$P_d = \exp\{-k/(S/B + 1)\}$$

pour la **cible fluctuante** selon le premier cas de fluctuation (chapitre 10 § 12.4) devenant également une fonction de ϕ et ψ , ainsi que l'expression équivalente pour le second cas de fluctuation (chapitre 10 § 12.5).

Il en résulte que l'on peut écrire à K et B donnés, en considérant ϕ et ψ comme équirépartis entre 0 et 2π :

$$P_d(K, \sigma) = \int_0^{2\pi} \frac{d\phi}{2\pi} \int_0^{2\pi} p_d(K, \sigma, \phi, \Psi) \cdot \frac{d\Psi}{2\pi}$$

6.4.3 Effet des évolutions lentes de propagation

Des mesures statistiques sur le comportement de l'ionosphère montrent que K et σ évoluent selon des lois log-normales corrélées entre elles.

On peut ainsi calculer la densité de probabilité du couple (K, σ) : $f(K, \sigma)$ et écrire toutes valeurs de K et σ confondues :

$$\overline{P_d} = \int_0^{\infty} dK \int_0^{\infty} f(K, \sigma) \cdot P_d(K, \sigma) \cdot d\sigma$$

La méthode calcul résumée ci avant est due aux travaux Ronald R. FANTE et S DHAR.

6.4.4 Résultats pratiques

Les résultats issus de ces calculs sont présentés ci après. Les rapports S/B y sont exprimés en décibels, les lois de fluctuation sont celles du chapitre 10.

Cible non fluctuante (cf. chapitre 10)

$P_{fa} \backslash P_d$	0,5	0,7	0,8	0,9
10^{-2}	6,1	7,6	8,4	9,3
10^{-4}	9,4	10,4	11,0	11,7
10^{-6}	11,2	12,1	12,6	13,2

Cibles symétriques non fluctuantes, prise en compte des effets Faraday et multi-trajets

$P_{fa} \backslash P_d$	0,5	0,7	0,8	0,9
10^{-2}	1,2	4,2	6,6	11,6
10^{-4}	3,6	6,6	9,2	14,2
10^{-6}	5,2	8,2	11,0	16,0

Cibles symétriques fluctuantes, prise en compte des effets Faraday et multi-trajets

$P_{fa} \backslash P_d$	0,5	0,7	0,8	0,9
10^{-2}	2,5	7,0	10,5	15,5
10^{-4}	6,0	10,5	14,0	19,0
10^{-6}	8,0	12,5	16,0	21,0

Cibles symétriques (non fluctuantes) fluctuation du milieu

$P_{fa} \backslash P_d$	0,5	0,7	0,8	0,9
10^{-2}	1,0	6,0	9,5	15,0
10^{-4}	4,5	9,5	13,0	18,5
10^{-6}	6,5	11,5	15,0	20,5

Cibles polarisées verticalement, prise en compte des effets Faraday et multi-trajets

$P_{fa} \backslash P_d$	0,5	0,7	0,8
10^{-2}	12,0	22,0	32,0
10^{-4}	15,0	25,0	36,0
10^{-6}	16,0	28,0	–

Pour les cibles polarisées fluctuantes ajouter 2 dB au S/B nécessaire.

Les résultats précédents sont à considérer comme des ordres de grandeur. On peut en retirer les remarques suivantes :

- la combinaison des effets Faraday et multi-trajets améliore la détection aux P_d faibles, ceci est essentiellement dû à l'effet multi-trajet (terme en $(1 + pe^{j\phi})^2$) qui vient renforcer l'amplitude du signal reçu dans les 2/3 des cas pour ρ voisin de 1 (dès que $-120^\circ < \phi < 120^\circ$) ;
- l'effet Faraday pour sa part permet de placer la cible au cours de son évolution dans des conditions de réflexion résonnante selon la polarisation de l'onde reçue ;
- l'effet sur la détection de la fluctuation propre de la cible est à peu près équivalent à l'effet de fluctuation du milieu ;
- globalement toutes les conditions de détection se recoupent pour P_d voisin de 0,7 ; on peut retenir un renforcement du rapport signal sur bruit dû aux fluctuations de 3 dB environ pour $P_d = 0,8$ et de 6 à 8 dB pour $P_d = 0,9$;
- le comportement de la matrice de réflexion de la cible a une très grande importance, une cible fortement polarisée exigeant des rapports signal sur bruit supérieurs de 12 dB (pour $P_d = 0,7$) à 18 dB (pour $P_d = 0,8$) par rapport au cas moyen cité ci-avant. Il est vrai que ce type de cibles accordées (cf. § 4.1) peut présenter des surfaces équivalentes assez importantes.

6.5 DIMENSIONNEMENT TYPE

A titre d'exemple, les caractéristiques principales d'un radar transhorizon chargé de la détection des avions dans un secteur de 60° (+ ou -30°) pour des distances variant de 1 100 à 3 500 km.

PERFORMANCES TYPES DE RADARS TRANSHORIZON

	NUIT			JOUR		
	A	B	C	A	B	C
Portée moyenne : km	1 500	2 300	3 100	1 500	2 300	3 100
Fréquence de travail : MHz	5	8	11	15	20	25
Longueur d'onde : m	60	37,5	27,3	20	15	12
θ .réception : degrés	2,8	1,75	1,25	0,95	0,70	0,55
θ .émission : degrés	16	16	16	8	8	8
Nombre de voies réception	7	10	14	9	13	16
Temps d'intégration : sec	4	4	4	2	2	2
Nb de gisements observés	4	4	4	8	8	8
Temps d'exploration : sec	16	16	16	16	16	16
Temps total secteur : sec	48	48	48	48	48	48
Profondeur résolution : km	15	15	15	15	15	15
Largeur résolution : km	73	70	68	25	28	30
Surface équivalente clutter ($\sigma_0 = -20$ dB) : dB/m ²	70	70	70	66	66	66

PERFORMANCES TYPES DE RADARS TRANSHORIZON

	NUIT			JOUR		
	A	B	C	A	B	C
Gain réception : dB	24,5	26,5	28,0	29,0	30,5	31,5
Gain émission : dB	17	17	17	20	20	20
Pertes système : dB	6	6	6	6	6	6
Pertes propag. moy : dB	10	11	12	16	15	15
Pertes propag. max : dB	13	19	21	29	26	29
Bruit atmosph. : dB/W/Hz	-155	-164	-174	-170	-180	-200
Bruit surface moy : dB/W/Hz	-154	-159,8	-163,7	-167,4	-171	-173
Bruit total moy : dB/W/Hz	-151,5	-158,4	-163,3	-165,5	-170,5	-173
Puissance moyenne : kW	400	400	400	400	400	400
Sites visés : degrés	18	10	5	19	11	5
Distance corrigée : km	1 575	2 335	3 110	1 585	2 345	3 110
S/B moy sur 100 m ² : dB	20	16,5	14,5	22,5	20,5	17,5
S/B mini sur 100 m ² : dB	17	85	5,5	95	9,5	45

La largeur d'antenne réception est prise égale à 1 500 m et on suppose une possibilité de formation de faisceau à l'émission (lobe élargi) et à la réception (multilobes simultanés).

6.6 SIGNAUX TRAITES, POUVOIR DISCRIMINATEUR, PRECISION

Compte tenu des temps d'intégration proposés, le pouvoir séparateur en vitesse du radar varie :

- de nuit : de 3,5 m/s ($\lambda = 27,3$ m) à 7,5 m/s ($\lambda = 60$ m) ;
- de jour : de 3,0 m/s ($\lambda = 12$ m) à 5 m/s ($\lambda = 20$ m).

En émission continue (antennes émission et réception séparées) la fréquence de répétition du signal peut atteindre jusqu'à 40 Hz (à 3 500 km) à 70 Hz (à 1 900 km) sans ambiguïté de distance.

Si on se fixe une ambiguïté de vitesse de 240 m/s l'utilisation d'une fréquence de répétition unique de 20 Hz de nuit et 40 Hz de jour permet de remplir simultanément les conditions de non- ambiguïté distance et vitesse, entraînant l'utilisation de 80 filtres vitesse.

En émission discontinue (antenne unique émission réception) l'optimisation est plus délicate car il faut tenir compte des zones aveugles liées à l'emploi d'une seule antenne. Un compromis pourrait être trouvé autour d'un facteur de forme de 1/3, soit des couples $T - T_R$:

- de 7 et 21 ms pour la zone de portée 1 100 – 1 900 km ;
- de 9 et 27 ms pour la zone de portée 1 900 – 2 700 km ;
- de 12 et 36 ms pour la zone de portée 2 700 – 3 400 km.

La fréquence de répétition est alors à adapter à la portée visée. Elle peut varier de 27,5 Hz à 47,5 Hz (3 400 à 1 900 km) d'où une ambiguïté vitesse de 350 m/s de nuit ($\lambda = 27,3$ m) à 160 m/s de jour ($\lambda = 12$ m) et la nécessité d'adapter le nombre de filtres à la fréquence de répétition utilisée : 110 à 190 de nuit, 55 à 95 de jour, pour intégrer toute l'énergie émise.

Dans ces conditions la puissance crête à émettre serait de l'ordre de 1 200 kW.

Par ailleurs les chiffres indiqués dans le tableau permettent de situer le rapport clutter sur bruit à 70 dB, pour une dynamique de bruit de 20 dB environ. Soit, compte tenu d'une fluctuation générale du milieu de 10 dB : une dynamique totale de réception de 100 dB, ce qui justifie la valeur donnée au paragraphe 3.4.

On remarquera en outre que, le clutter étant présent dans toute la cellule d'observation, il faudra traiter le signal et l'exploiter en présence de nombreuses fausses alarmes.

Le pouvoir discriminateur en distance du radar est limité par les conditions de propagation et en particulier par les fluctuations du milieu réfléchissant. L'ordre de grandeur déjà cité de 15 km de pouvoir discriminateur correspond à la bande émise de 100 kHz.

Pour ce qui concerne la précision des mesures, si les précisions relatives pour des objets proches peuvent être élevées, les précisions absolues limitées elles aussi par les conditions de propagation, sont de 4 à 40 km en distance et de 1 à 2 degrés en gisement. Pour ce qui concerne les mesures doppler leurs performances dépendent du temps d'intégration choisi et du comportement du milieu de propagation d'où la nécessité d'une analyse préalable de la « qualité doppler » du milieu, citée au § 6.3.1.

7 REALISATIONS EXISTANTES

Les radars transhorizon ont fait l'objet de réalisations opérationnelles aux USA en Australie et en URSS et de recherches au Canada, en Grande Bretagne, en Chine et en France.

Aux USA

Après les projets ARPA et MADRE de 1960 des développements successifs commencés en 1975 ont abouti à la mise en service de matériels opérationnels.

Le système OTH-B ou AN-TPS 118 de l'US Air Force dont un premier réseau est entré en service en 1990 sur la côte Est des États-Unis. Il s'agit de trois ensembles bi statiques émission réception couvrant chacun un secteur de 60° en gisement et une zone de distance de 600 à 2 000 miles terrestres.

Le signal émis était un signal FM/CW à rampe continue de fréquence dans une bande de 10 kHz. Les antennes d'émission et de réception étaient séparées de 160 km. Les antennes d'émission de 1 100 m de large et 30 m de hauteur (de 10 à 40 m) étaient alimentées par 12 émetteurs de 100 kW continus reliés chacun à un sous réseau ce qui permettait un formage du faisceau à l'émission.

Les antennes de réception étaient également des réseaux linéaires, de 1 500 m de large et de 20 m de haut. Elles comportent environ 250 éléments et étaient compatibles de la formation de plusieurs faisceaux.

En 1992, l'US Air Force fit étendre la couverture du système le sud pour couvrir la frontière du sud-est. En 2002, le site de la côte est fut placés en « stockage chaud », seule une maintenance minimale était assurée. On commença alors à envisager son démantèlement. En juillet 2007, toutes les installations de la côte Est étaient démolies.

Le système ROTH de la Navy lancé en 1989 est destiné à la surveillance des bateaux et des avions de 500 à 1 800 miles terrestres sur un secteur de 60° allant de l'Amérique centrale au Venezuela et couvrant une grande partie des Iles Caraïbes. Ce système redéployable formé d'antennes modulaires (réseau linéaire) émet une puissance totale de 200 kW. Les ROTHs en Virginie et le Texas sont actuellement en cours d'utilisation à temps plein pour la lutte antidroque, et un troisième est prévu pour une installation à Porto Rico.

En URSS

Les soviétiques ont étudié des systèmes de radars transhorizon dès les années 1950. Le premier modèle, appelé le « VEYER » (éventail) a été construit en 1949.

Un prototype, le Duga-2 fut construit sur la côte de la Mer Noire à côté d'Odessa. Dirigé vers l'est, le Duga-2, mis en service le 7 novembre 1971, détecta avec succès des tirs de missiles lancés depuis l'extrême-orient et le Pacifique.

Le Duga-2 fut suivi du premier système opérationnel le Duga-3 en 1976, situé à proximité près de Tchernobyl et était dirigé vers le Nord pour couvrir les États-Unis d'Amérique. Ses impulsions puissantes et répétitives (100 μ s, 20 MW crête, 10 kHz) fonctionnant entre 5 et 20 MHz. l'ont fait surnommer le « WOODPECKER » (pic vert).

En AUSTRALIE

Le projet dont le développement a débuté en 1970 est celui d'un réseau de 3 stations (bi statiques) couvrant les distances de 900 à 3 500 km sur un secteur de 180°. Il est caractérisé par la grande taille des antennes de réception pour lui permettre d'atteindre des ouvertures de faisceau de l'ordre du degré dans tout le secteur de balayage et des temps d'intégration de l'ordre de 10 secondes pour des pouvoirs séparateurs en vitesse radiale d'environ 1 m/s.

Ce dernier projet prend la suite de plusieurs réalisations, la station de mesure GEEBUNG réalisée en 1970, le prototype JINDALEE STAGE-A de 1975 (antenne de 640 m en 128 éléments) et la version JINDALEE STAGE-B expérimentée entre 1980 et 1985 (antenne de 2 800 m en 924 éléments) à titre de démonstration de faisabilité.

La décision de construire un radar opérationnel le JORN été annoncé en Octobre 1986. Après quelques difficultés de développement, un système opérationnel a été commandé en 1997 et livré en Avril 2003. Système bi statique il se caractérise par la très grande taille de ses antennes réception : 7 000 m, à formation de faisceau par le calcul. Une étape du projet visant à moderniser les radars et à prolonger leur vie a été lancée en février 2004. Une nouvelle phase est à l'étude.

En FRANCE

Les premiers travaux universitaires, commencés à la fin des années 1960, ont amené à la station expérimentale de VALENSOL (antenne de 150 m de large en 16 éléments).

Ils se sont diversifiés, notamment sous l'impulsion du laboratoire d'études des transmissions ionosphériques, au CELAR de BRUZ.

Enfin, le projet NOSTRADAMUS de l'ONERA, dont le développement a été lancé en 1985, a abouti à la construction à DREUX SENONCHE d'un prototype opérationnel de station OTH, de conception originale, caractérisée par son antenne réseau surfacique émission réception sur trois branches de 400 m de rayon (cf. § 3.2) qui lui permet une observation sur 360° en gisement, ainsi qu'un positionnement du faisceau en site par effet de réseau.

Cette station, grâce à un traitement élaboré, tant dans la prédiction de la propagation que dans le traitement et l'exploitation du signal, s'est avérée capable de poursuivre des cibles à basse altitude dans un rayon de 800 à 1 500 km, notamment lors des opérations au Kosovo, démontrant ainsi l'intérêt opérationnel de ce type d'observation. Elle est en outre utilisée comme instrument scientifique pour l'étude de phénomènes naturels, que sa conception lui permet d'observer.

8 RADARS TRANSHORIZON A ONDES DE SURFACE

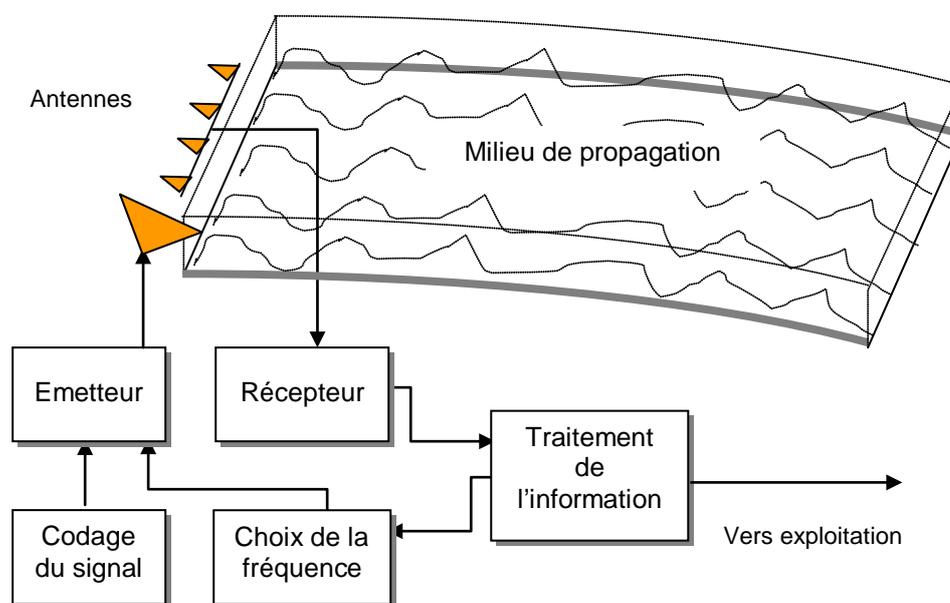
8.1 CONCEPTION GENERALE

Ces radars à onde de surface utilisent la propagation guidée par le dioptré mer-air. Leur polarisation est verticale et le trajet des ondes est un trajet direct le long de la surface de la mer, assorti d'une atténuation dépendant de la fréquence utilisée.

Ces radars sont de conception classique, à impulsion ou en onde continue. Ils peuvent faire appel à un codage du signal émis pour améliorer leurs performances de discrimination en distance et en vitesse.

Ils utilisent la propagation guidée par le dioptré mer-air. Leur polarisation est verticale et le trajet des ondes est un trajet direct le long de la surface de la mer, assorti d'une atténuation dépendant de la fréquence utilisée.

Ils travaillent constamment en présence de clutter, ce qui implique un filtrage doppler, sur des durées très longues compte tenu de la faible vitesse des cibles observées.



Les radars à onde de surface fonctionnent à des longueurs d'ondes assez basses (2 à 18 MHz). L'architecture commune à la plupart des radars HF à ondes de surface comprend ainsi :

- une émission sur une ou plusieurs antennes large bande adaptées, (par exemple de type log périodique verticales ou antennes biconiques avec réflecteur). Ces antennes ont des dimensions peu importantes (environ 20 m) ;
- une réception sur un réseau constitué d'antennes aux dimensions plus réduites (antenne de hauteur limitée à 4 m par exemple), qui par sa grande extension latérale apporte la directivité azimutale du radar.

Compte tenu du temps d'intégration nécessaires au filtrage doppler, ces antennes réception restent peu directives en gisement ($\approx 10^\circ$) pour conserver un temps de renouvellement de l'information raisonnable avec un temps d'intégration élevé. Par exemple un réseau de largeur 200 m permet d'obtenir une directivité de 8.5° (à 12 MHz).

8.2 PERFORMANCES TYPES

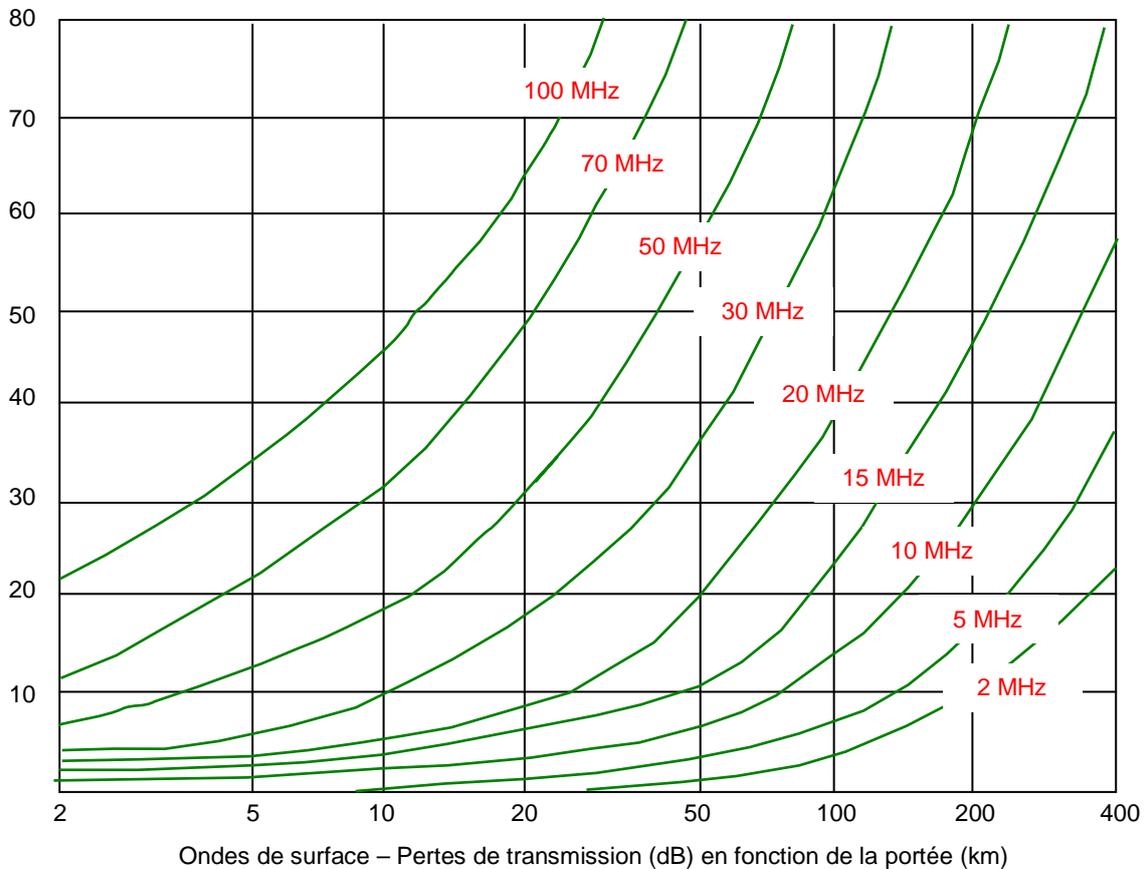
L'équation du radar s'écrit dans ce cas :

$$\frac{S}{B} = \frac{P_e \cdot T \cdot G_e \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(b_0 + b_c) \cdot (4\pi)^3 \cdot D^4 \cdot L_s \cdot L_{ps}}$$

où :

- P_e : puissance émise (W) ;
- T : durée du signal traité (s) ;
- G_e et G_r : gains émission et réception ;
- λ : longueur d'onde émise (m) ;
- σ : surface équivalente de la cible (m^2) ;
- b_0 : bruit radar (W/Hz) ;
- b_c : bruit du résidu de clutter (W/Hz) ;
- D : distance radar cible (m) ;
- L_s : pertes système ;
- L_{ps} : perte de propagation des ondes de surface.

La figure suivante présente une estimation de la perte de propagation L_{ps} .



Par exemple, pour un radar fonctionnant à 5 MHz ($\lambda^2 = 35,6$ dB) avec une puissance de 10 kW (40 dB) une durée d'intégration de 10 secondes (10 dB) un produit $G_e \cdot G_r$ de 15 dB, un bruit radar de -154 dB (cf. § 6.2 bruit de nuit) une portée de 140 km ($D^4 = 205,8$ dB, $L_{ps} = 10$ dB) une perte système de 6 dB le rapport signal sur bruit serait de : 20 dB environ sur une cible de surface équivalente $100 m^2$. Il descend à 9 dB à 200 km.

Compte tenu de la polarisation verticale, la surface équivalente des cibles dépend de leur développement vertical, elle sera inférieure pour les avions à celle vue par les radars à rétrodiffusion ionosphérique.

Le clutter de mer présentera un σ_0 plus faible du fait de l'absence d'effet multi-trajet mais sa surface équivalente totale restera de 60 à 70 dB/m² environ, compte tenu du faible pouvoir séparateur angulaire. Elle sera donc 40 à 50 dB plus élevée que la surface équivalente de la cible de 100 m² choisie dans l'exemple numérique ci-avant. D'où un rapport clutter sur bruit de 60 à 70 dB en limite de portée des cibles.

Pour observer des cibles à des distances faibles, la grande dynamique de réception, au moins 100 dB, devra être complétée par un GVT (gain variable dans le temps) aux distances courtes. Les temps d'intégration varient de 10 à 100 secondes selon l'usage fait de l'information radar. À 5 MHz il y correspond des pouvoirs séparateur en doppler de 3 m/s à 0,3 m/s.
