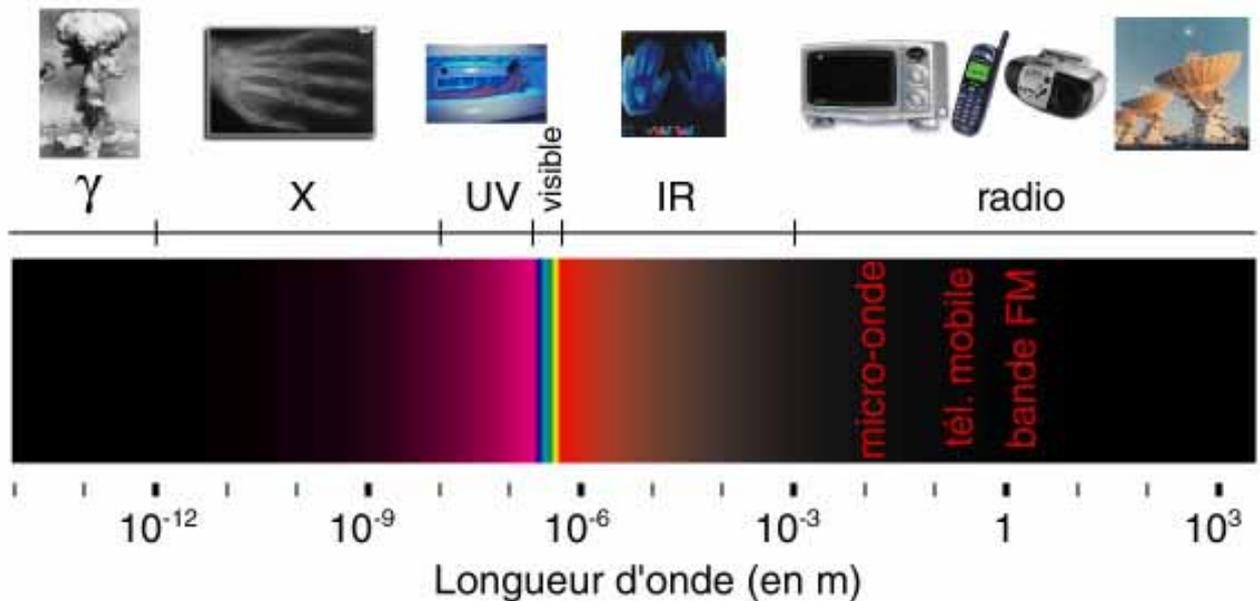




# Radio-Navigation & Radio-Communication 1



LICENCE 3 MAI MA – Lpro - DEST

Denis Michaud

2006-2007

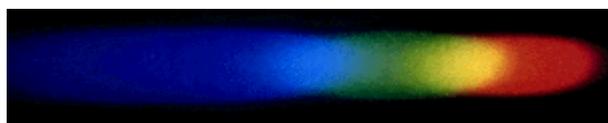
V4.2.3



## Sommaire :

Sommaire :	2
A. Réglementation Aéronautique.....	4
A.1. Réglementation concernant la radionavigation et la radiocommunication.....	4
A.1.1. OPS1.....	5
A.1.2. Radionavigation : .....	5
A.1.3. Radiocommunication : .....	6
B. Généralités ; ondes électromagnétiques.....	6
B.1. Histoire : .....	6
B.1.1. Evolution des technologies: .....	6
B.1.2. La lumière.....	6
B.1.3. Loi de Snell-Descartes .....	7
B.1.4. Incidence sur un Conducteur ou un isolant.....	8
B.2. Définitions : Fréquence et longueur d'onde.....	9
B.3. Introduction : l'atmosphère et les ondes .....	9
B.3.1. Exemple de Liaison.....	10
B.3.2. Spectre électromagnétique : .....	10
B.3.3. Micro-onde et hyperfréquences .....	12
B.3.4. Utilisations et propriétés des ondes hyperfréquences et lumineuses.....	13
B.3.4.a. Télécommunications .....	13
B.3.4.b. Interactions avec la matière .....	13
B.3.4.c. Propagation dans l'espace .....	13
B.3.4.d. Remarques dimensionnelles.....	14
B.3.5. Rayonnement ionisant – radiation .....	14
B.3.6. Particularités des ondes hyperfréquences .....	16
B.3.7. Radiomètre satellite météosat 7 .....	17
B.3.8. Absorption des Ultra Violet dans les couches atmosphériques .....	17
B.3.9. La communication HF/VHF.....	18
B.3.10. Propagation des ondes radioélectrique dans l'atmosphère : .....	19
B.3.11. Généralités sur la propagation : .....	21
B.3.12. Les ondes : Maxwell .....	22
B.3.12.a. Définition : Champ et induction : .....	22
B.3.12.b. Les paramètres du milieu .....	22
B.3.12.c. Isotrope et homogène .....	23
B.3.12.d. Notations complexes .....	23
B.3.12.e. Puissance rayonnée.....	23
B.3.12.f. Coefficients de Réfraction et de réflexion .....	24
B.3.12.g. Polarisation d'une onde.....	24
B.3.13. Antenne.....	26
B.3.13.a. Gain d'une antenne .....	26
B.3.13.b. Rayonnement d'un antenne, directivité .....	26
B.3.13.c. Puissance captée par une antenne.....	26
B.3.13.d. Angle d'ouverture .....	26
B.3.13.e. Bruit et rayonnement .....	27
B.3.13.f. Température de Bruit .....	28
B.3.13.g. Parasites naturels .....	28
C. CEM : LES NORMES .....	28
D. Spectres usuels.....	30
E. Systèmes de communications et atténuations.....	31
E.1. Les transmissions de données .....	31
E.2. Amplification et atténuation : dB et dBm.....	33
E.3. Structure générale d'un système de radiocommunication.....	34
F. Modulation – Démodulation .....	35
F.1.1. Introduction : .....	35

F.1.2. Pourquoi module – t'on ?.....	35
F.1.3. Les différents types de modulation : .....	35
F.1.3.a. - La modulation d'amplitude ( AM ).....	35
F.1.3.b. - La modulation de fréquence ( FM ) .....	38
F.1.3.c. La modulation a bande latéral unique ( BLU ) .....	42
F.1.3.d. - La modulation de phase ( PM ).....	43
F.1.3.e. - La modulation Numérique .....	43
F.1.3.g. -La modulation de phase à deux états BPSK : .....	45
F.1.3.h. -La modulation de phase à quatre états QPSK : .....	45
F.1.3.i. -La modulation à saut de phase minimal MSK : .....	45
F.1.3.j. -La modulation de phase différentielle DPSK : .....	45
F.1.3.k. -Les modulations combinées amplitude-phase MAQ : .....	45
F.1.3.l. Analyseur de réseau et Constellation : .....	45
G. Equipements de navigation (suite) .....	45
G.1. Radio VHF sur aéronef.....	45
G.1.1.Exemple sur A340 .....	45
G.2. Les Systèmes d'aide à l'atterrissage : .....	46
G.2.1.Généralités V.O.R. (VHF Omnidirectional Range).....	46
G.2.2.Signaux modulant VOR .....	46
G.3. D.M.E. ( Distance Measuring Equipment ).....	46
G.4. Système I.L.S - Récepteur ILS ( Instrument Landing System ) .....	47
G.5. Radiocompas ADF : Automatic Direction Finder .....	47
G.6. Radioaltimètre.....	48
G.7. Le Spatial : Bandes de fréquences mises en oeuvre pour les communications par satellite : .....	49
G.8. <i>Communications par satellite : les principales missions:</i> .....	49
G.9. Les circuits intégrés monolithiques hyperfréquences .....	50
H. Fréquence utilisées en aéronautique.....	52
I. Glossaire : sigles & acronymes.....	52
J. Bibliographie : .....	52
K. Utilisation de phénomènes physique pour le CND: Contrôles Non Destructifs.....	53
L. Résumé : Propagation d'une onde sinusoïdale .....	59
M. Quelques avions : aéronefs .....	60



*Spectre de la lumière BLANCHE*

*MERCI à Jacques Moreau et Franck Cazaurang pour leurs contributions...*

## A Réglementation Aéronautique

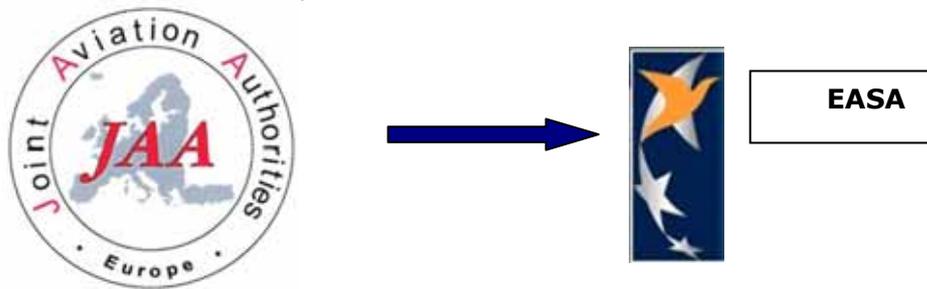
### A.1 Réglementation concernant la radionavigation et la radiocommunication

La réglementation concernant les équipements de radionavigation et de radiocommunication est contenue pour le continent européen dans la **JAR-OPS 1** pour les avions et dans la JAR-OPS 3 pour les hélicoptères.

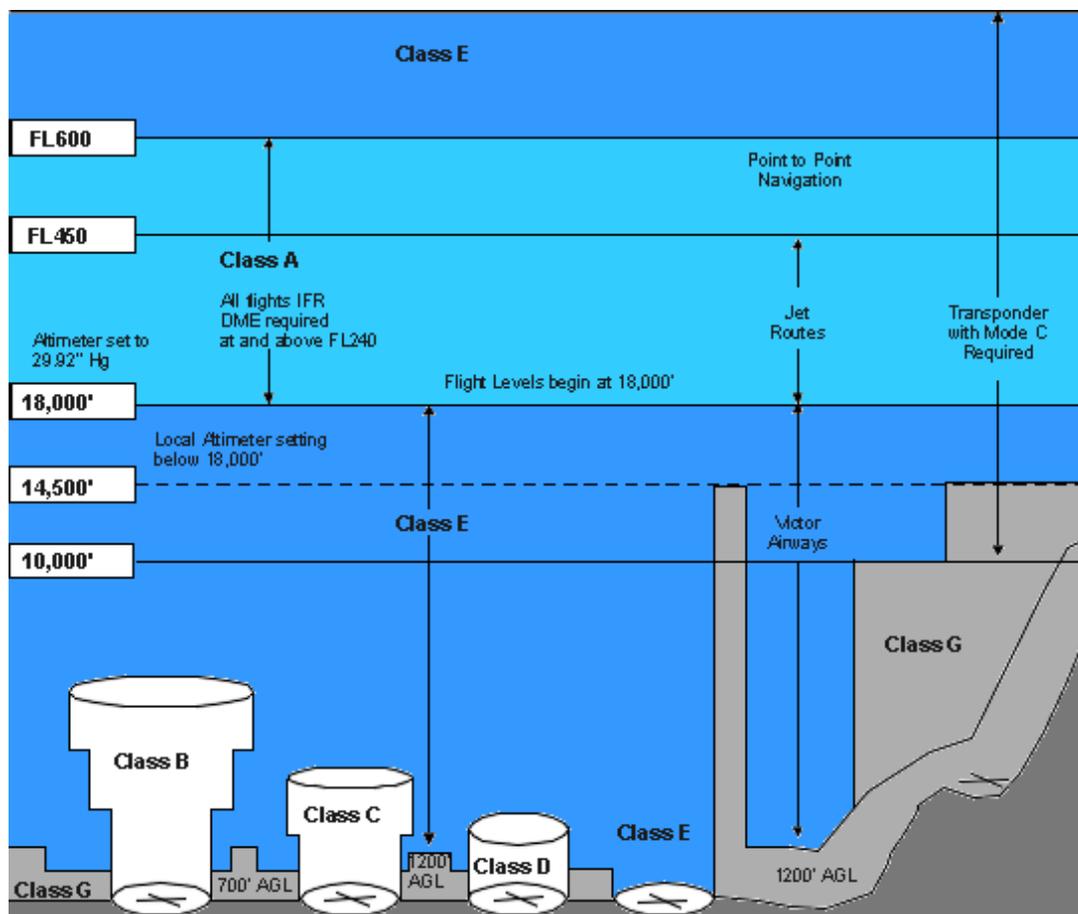
Ces documents sont édités par la **JAA** (Joint Aviation Authorities), ce sont les autorités européennes de l'aéronautique. La **JAA** est en fait une partie de l'**ECAC** (European Civil Aviation Conference) qui représente les autorités de l'aviation civil d'un certain nombre d'états européens qui se sont regroupés pour développer et améliorer une réglementation commune sur les procédures et les standards de sécurité. Le but étant également de d'harmoniser cette réglementation avec notamment la **FAA** (Federal Aviation Authorities), autorités des Etats-Unis.

La **JAA** a pour objectifs principaux :

- L'amélioration de la sécurité aéronautique.
- De consolider les standards communs.
- De participer à l'amélioration de la sécurité aéronautique mondiale par une coopération avec d'autres organisations.
- De faciliter la transition de la **JAA** vers l'**EASA** (European Aviation Safety Agency) nouvelle agence européenne des autorités aéronautiques.



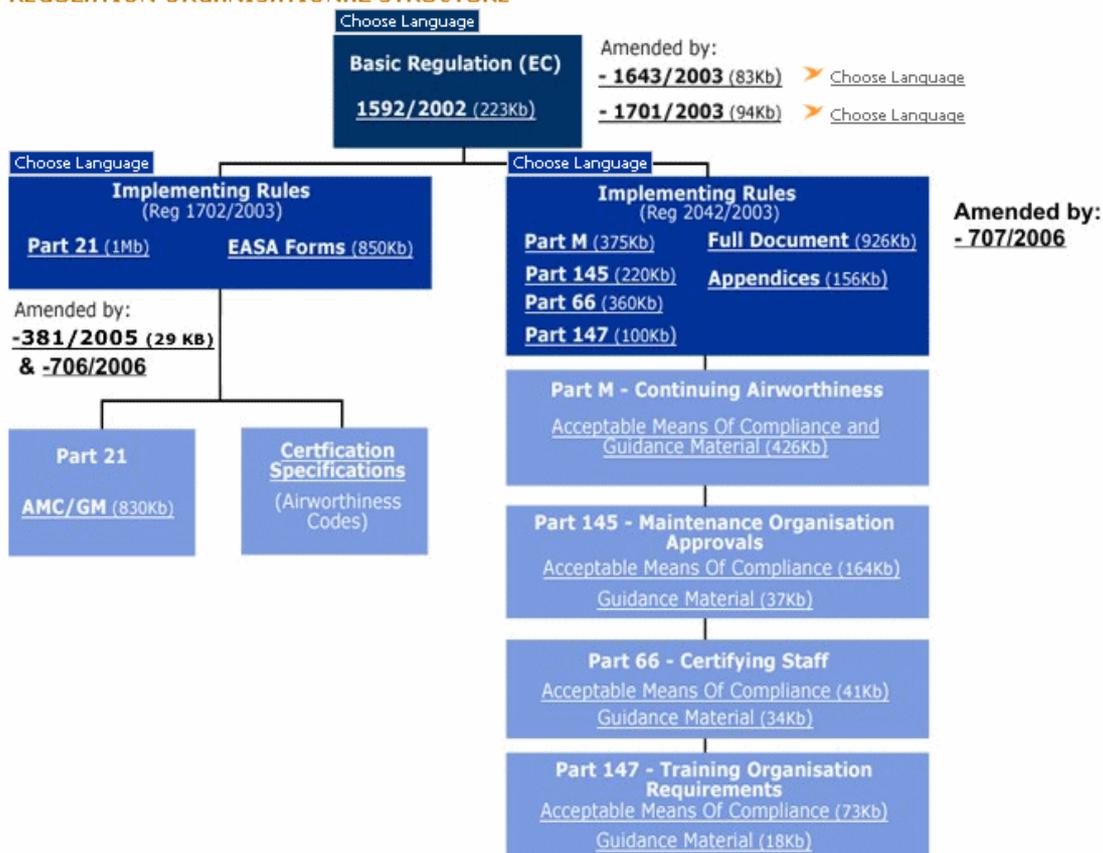
<http://www.jaa.nl/>



Home
About EASA
<b>Regulations</b>
Certification
Maintenance
Rulemaking
Agency Measures
Quality & Standardisation
Environmental Protection
EASA Networking
Management Board
Careers
Procurement

## Regulations

### REGULATION ORGANISATIONAL STRUCTURE



### A. 1.1 OPS1

La **JAR OPS1** est un document qui décrit les exigences réglementaires concernant les opérations commerciales pour lesquelles un opérateur doit se conformer afin de pouvoir faire voler un avion.

On trouve ainsi dans ce document les exigences concernant les personnels navigants techniques (pilotes), les personnels navigant commerciaux (hôtesses), les opérations tout temps, la maintenance, les instruments et équipements, les équipements de navigation et de communication ou encore le transport de marchandises dangereuses, ...

Dans notre cas, on s'intéressera aux **sous-parties K et L** concernant respectivement les instruments et équipements, et les équipements de navigation et de communication.

### A. 1.2 Radionavigation :

Pour des avions de plus de 5700 kg, les avions doivent posséder un nombre minimum d'équipements de radionavigation.

L'avion doit comporter :

- Un système de réception **VOR**,
- Un système de réception **ADF**,
- Un système de réception **DME**,
- Un système **ILS** ou **MLS**,
- Un système de réception balise de position pour les phases d'approche,
- Un system **RNAV** (Area Navigation) si nécessaire.

Il est à remarquer qu'un système de réception **DME** additionnel est nécessaire où la navigation est basée seulement sur des signaux **DME**.

De la même manière pour les systèmes de réception **VOR** et ADF où un système additionnel est nécessaire si la navigation est seulement basée sur respectivement les signaux **VOR** et sur les signaux **ADF**.

Il est à noter qu'un avion qui n'est pas équipé avec les équipements de navigation spécifiés ci-dessus mais qui est équipé avec un équipement alternatif autorisé par les autorités compétentes pour le type de trajet emprunté a le droit de voler tout en sachant que cet équipement doit avoir une précision et une fiabilité suffisante pour permettre d'effectuer une navigation en toute sécurité.

Concernant le transpondeur, l'avion doit être équipé d'un transpondeur **SSR** (Secondary Surveillance Radar) indiquant l'altitude-pression ainsi que toutes les autres capacités nécessaires et répondant aux exigences des routes empruntées.

### **A. 1.3 Radiocommunication :**

La réglementation **JAR OPS1** stipule que l'équipement radio de l'aéronef ne doit pas posséder moins de deux systèmes de radiocommunication indépendants lors de conditions d'opération normales.

Chaque système doit posséder sa propre installation d'antenne, le système de radiocommunication doit également permettre les communications sur la **fréquence d'urgence aéronautique** de **121.5 MHz**.

Il est également indiqué que l'aéronef doit être équipé d'un panneau de sélection radio accessible à chaque personnel navigant technique.

*Remarque générale :*

Chaque opérateur doit s'assurer que les équipements VHF, ILS Localizers, VOR doivent respecter les standards de performance d'immunité FM.

## **B Généralités ; ondes électromagnétiques**

### **B.1 Histoire :**

#### **B.1.1 Evolution des technologies:**

1906 Invention de la triode  
1915 Première liaison avec amplificateurs  
1938 Principes de la numérisation  
1948 Découverte de l'effet transistor  
1950 Découverte de l'effet laser  
1962 Première liaison numérique  
1971 Invention du microprocesseur



#### **B.1.2 La lumière**

Comprendre les divers phénomènes lumineux a amenés les scientifiques à s'interroger sur la nature même de la lumière et son mode de propagation.

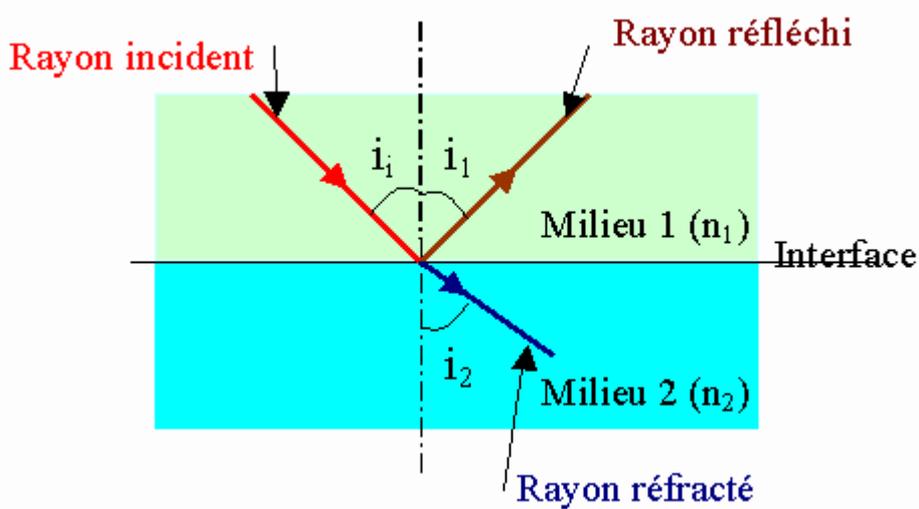
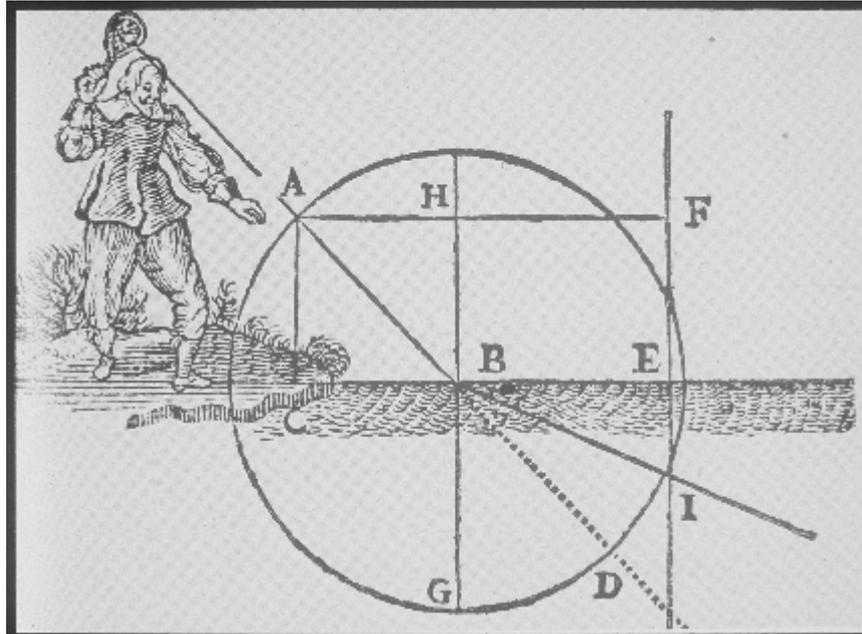
- 1620s: Snell and Descartes, **Snell's Law**,  $n_1 \sin a_1 = n_2 \sin a_2$
- 1665... Newton, **theory of color**, used prisms to show that white light is a combination of different colors.

Ces recherches ont permis de présenter la lumière sous deux aspects :

- le modèle ondulatoire (ou vibratoire) de la théorie de Maxwell (1873) sur les hypothèses d'Huygens (1678) reprises par Fresnel (1819).

- le modèle corpusculaire de la théorie d'Einstein (1905) sur les hypothèses de Planck (1900).

**B. 1.3 Loi de Snell-Descartes**

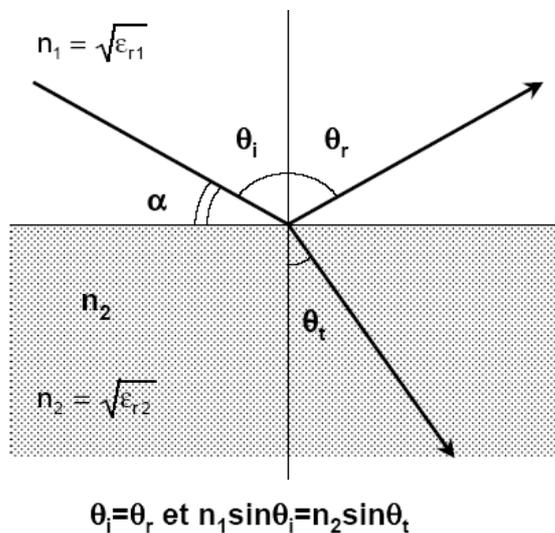


**n<sub>1</sub> sin i<sub>1</sub> = n<sub>2</sub> sin i<sub>2</sub>**

On montre que, si le milieu 1 est l'air, les coefficients de réflexion en polarisation verticale et horizontale valent :

$$K_{v_r} = \frac{\epsilon'_r \sin \alpha - \sqrt{\epsilon'_r - \cos^2 \alpha}}{\epsilon'_r \sin \alpha + \sqrt{\epsilon'_r - \cos^2 \alpha}}$$

$$K_{h_r} = \frac{|\sin \alpha - \sqrt{\epsilon'_r - \cos^2 \alpha}|}{\sin \alpha + \sqrt{\epsilon'_r - \cos^2 \alpha}}$$



**B. 1.4 Incidence sur un Conducteur ou un isolant**

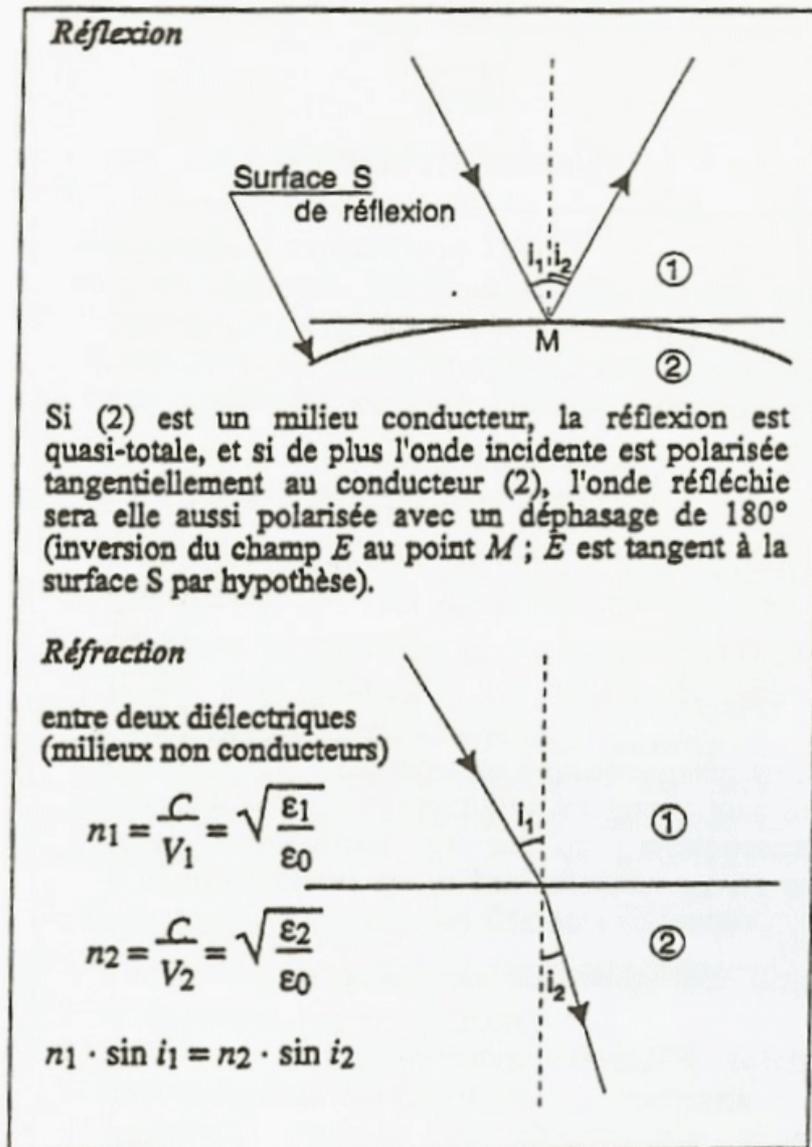


Fig. 31

Par définition, l'indice  $n$  d'un milieu est égal au rapport  $C/v$ ,  $C$  et  $v$  désignant respectivement les vitesses de propagation dans le vide et dans le milieu matériel considéré.

$$n = C/v = \sqrt{\epsilon \mu} / \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = \sqrt{(\epsilon/\epsilon_0) * (\mu/\mu_0)}$$

où  $\epsilon$  et  $\epsilon_0$  désignent respectivement les permittivités du milieu considéré et du vide,  $\mu$  et  $\mu_0$  les perméabilités du milieu et du vide. Etant donné que pour la plupart des diélectriques,  $\mu = \mu_0$ , on a :

$$n = \sqrt{\epsilon/\epsilon_0}$$

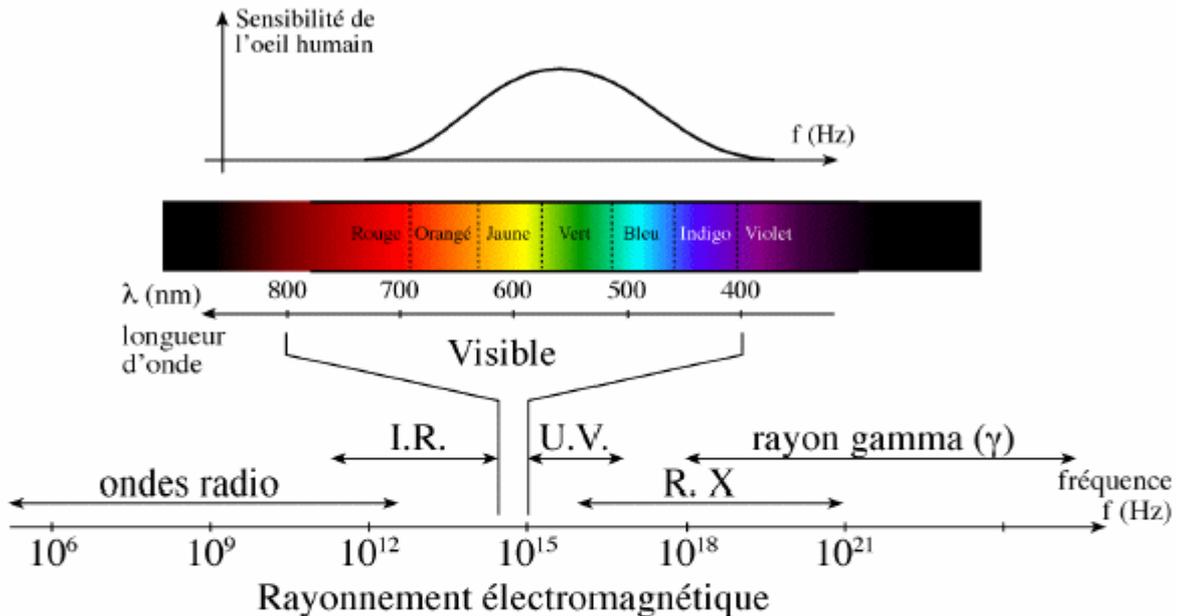
## B.2 Définitions : Fréquence et longueur d'onde.

**Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ?** C'est la propagation, à la vitesse de la lumière, d'une déformation harmonique des propriétés électriques et magnétiques de l'espace. L'amplitude de cette déformation est ce que l'on appelle la longueur d'onde. On définit également une onde par sa fréquence F, c'est-à-dire le rapport entre sa vitesse C et sa longueur d'onde notée  $\lambda$ .

La fréquence (en Hertz) représente la quantité d'ondes passant en un point donné en une seconde.

$\lambda = C / F$  avec Célérité  $C \approx 300\ 000\ \text{km/s}$

## Spectre électromagnétique et décomposition de la lumière blanche



### Relation fondamentale :

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}$$

$c$  : célérité de la lumière dans le vide

$$c = 300\ 000\ \text{km.s}^{-1} = 3 \cdot 10^8\ \text{m.s}^{-1}$$

$\lambda$  : longueur d'onde (m)

$T$  : période (s)

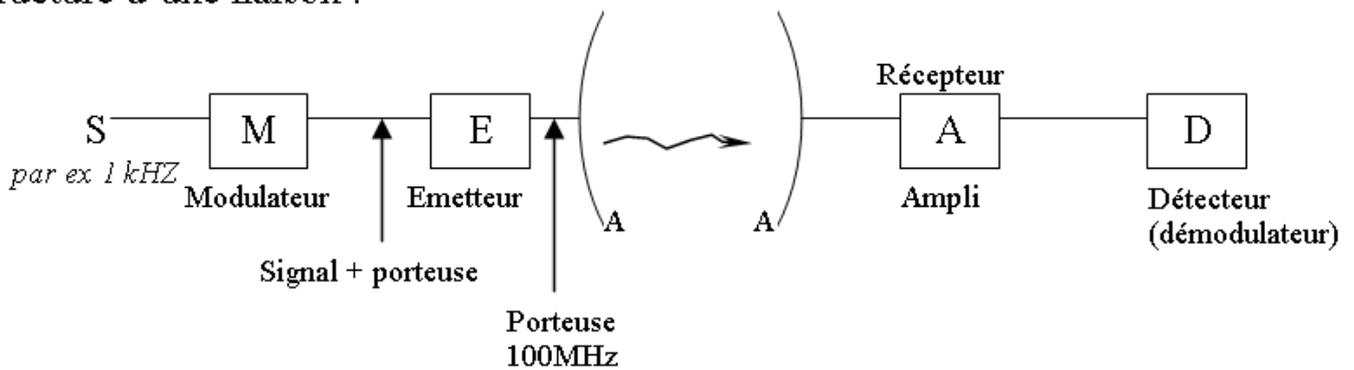
$f$  : fréquence (Hz)

## B.3 Introduction : l'atmosphère et les ondes

A travers ce fascicule il sera principalement développé les caractéristiques des signaux électromagnétiques utiles aux systèmes aéronautiques et spatiaux.

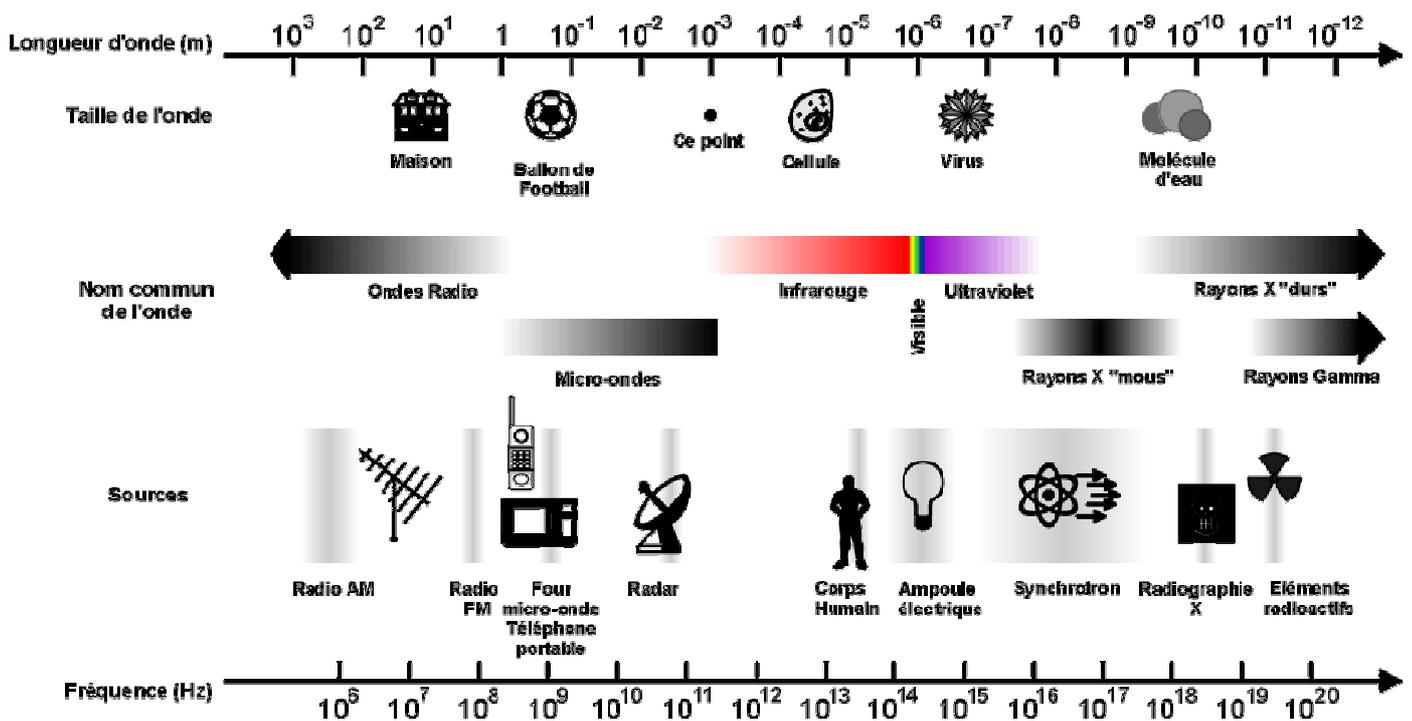
### B.3.1 Exemple de Liaison

Structure d'une liaison :



### B.3.2 Spectre électromagnétique :

La figure I-1 décrit les différentes radiations du spectre électromagnétique. Leur dénomination tient à des raisons historiques mais également à la façon dont elles ont été générées. Les frontières entre les différentes radiations sont toutes artificielles. En allant des ondes radio vers les rayons gamma, la longueur d'onde devient plus courte (les ondes deviennent plus pénétrantes), la fréquence augmente (les oscillations nécessaires pour les produire deviennent plus rapides), et l'énergie devient plus élevée (cela demande plus d'énergie pour produire des rayons gamma que cela n'en demande pour les ondes radio). Notons qu'au-delà des rayons gamma se trouvent les rayons cosmiques dont la longueur d'onde est de l'ordre de  $10^{30}$  Hertz.



# Spectre radioélectrique

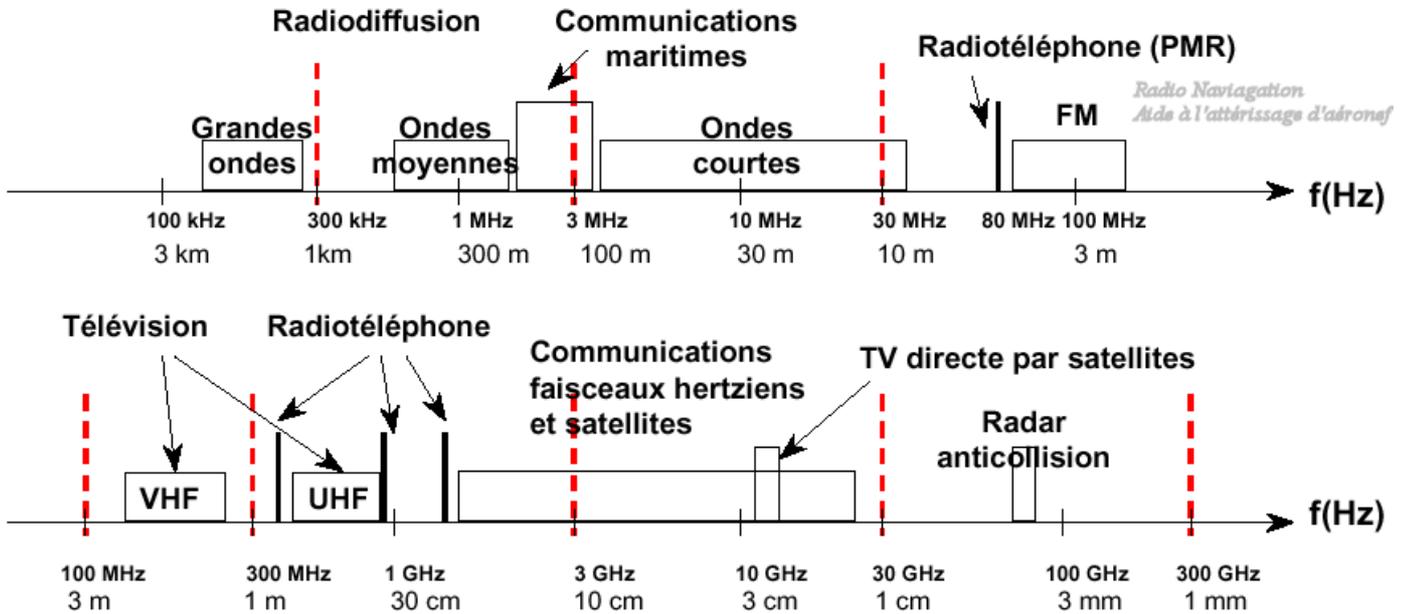
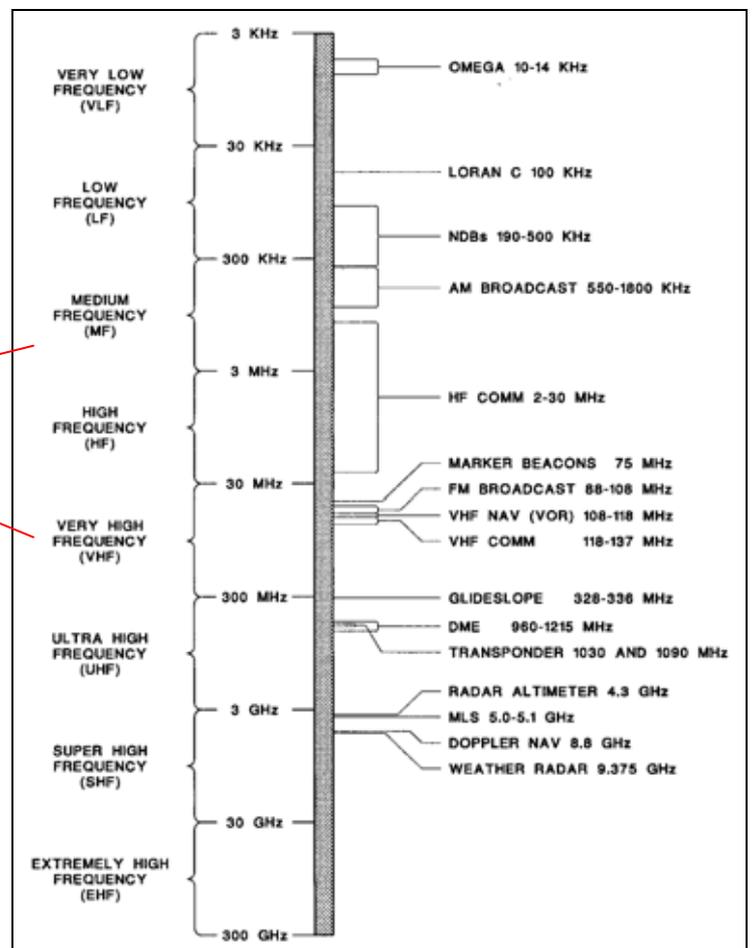


figure I-1 : spectre électromagnétique.

Plage fréquentielle de Radiocommunication



### B.3.3 Micro-onde et hyperfréquences

Intéressons nous plus en détail au domaine qui se situe à cheval entre les ondes radio et l'infrarouge : le domaine **micro-onde**. Bien que la définition du domaine des micro-ondes puisse prêter à contestation, nous le situons comme appartenant à une bande de fréquences comprises entre 300 MHz et 300 GHz, soit des longueurs d'onde dans l'air ou le vide comprises entre 1 m et 1 mm. Analysons la place qu'occupent les micro-ondes dans le spectre des fréquences des ondes électromagnétiques.

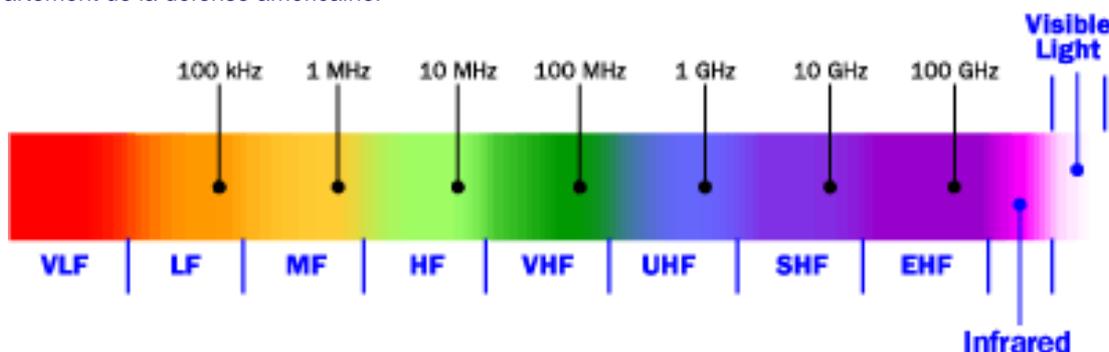
On peut y distinguer trois zones pour lesquelles ces ondes, pour être de même nature, ne se distinguent pas moins dans leur manifestation physique. De ce fait, le paramètre d'usage pour caractériser les ondes en question peut varier. De la fréquence de distribution de l'énergie électrique (50 Hertz) jusqu'à celle des télécommunications, on utilise effectivement le terme de fréquence. Dans le domaine de l'infrarouge et de l'optique en revanche, jusqu'aux rayons X, c'est la longueur d'onde dans le vide que l'on considère. Enfin, l'énergie quantique associée à l'onde est plus volontiers utilisée pour caractériser les rayonnements ionisants.

A ces trois domaines, sont bien sûr associées deux frontières qui, loin d'être des ruptures, sont de larges zones de recouvrement. En effet, de même que l'ultraviolet et les rayons X relèvent de la double description de l'optique et des rayonnements ionisants, les micro-ondes se situent à une autre frontière, celle des ondes électriques et de l'optique. Cette double appartenance confère aux micro-ondes une richesse particulière : des caractéristiques électriques pour leur production par exemple, des propriétés qui relèvent de l'optique pour leur propagation.

L'image populaire des micro-ondes restera sans doute celle du four du même nom apparu en 1950 dont le principe est de générer des ondes capables de faire vibrer des molécules d'eau assez rapidement pour les échauffer (*L'interaction des micro-ondes avec la matière est largement dominée par le mécanisme d'absorption diélectrique, celle-ci étant due aux interactions entre les molécules ou éléments polaires*). Ainsi seul les aliments contenant de l'eau sont concernés [1]. Ces fours fonctionnent dans la gamme de fréquence 915 MHz -2,45 GHz.

Les différentes sources de génération d'ondes électromagnétiques sont illustrées sur la [figure I-1](#). Les micro-ondes peuvent quant à elles être créées par le mouvement des électrons dans une petite boîte en métal sous vide. C'est ce qu'on appelle un magnétron, élément présent dans tous les fours micro-ondes.

Un découpage plus précis du domaine hyperfréquence a été réalisé : ce sont les bandes IEEE (*Institute of Electrotechnical and Electrical Engineers*) données par le [tableau I-1](#). Notons qu'il existe d'autres désignations, moins utilisées, comme celles du département de la défense américaine.



Désignation	Domaine de fréquences (GHz)
VHF	0,03 - 0,30
UHF	0,30 - 1,00
Bande L	1 - 2
Bande S	2 - 4
Bande C	4 - 8
Bande X	8 - 12
Bande Ku	12 - 18
Bande K	18 - 26,5
Bande Ka	26,5 - 40
Bande Q	33-50
Bande U	40 - 60
Bande V	50 - 75
Bande E	60 - 90
Bande W	75 - 110
Bande F	90 - 140
Bande D	110 - 170
Bande G	140 - 220

**Tableau I-1 : les bandes de fréquences IEEE.**

CLASSEMENT DES LONGUEURS D'ONDES ET DES FREQUENCES				
ONDES	$\lambda$	GAMME D'ONDES	FREQUENCES	GAMME DE FREQUENCES
Kilométriques	30.000 à 10.000 m.	O.L.	10 à 30 KHZ	V.L.F.
"	10.000 à 1.000 m.	G.O.	30 à 300 KHZ	L.F.
Hectométriques	1.000 à 600 m.	O.M.	300 à 500 KHZ	M.F.
"	600 à 200 m.	P.O.	500 à 1500 KHZ	M.F.
"	200 à 100 m.	O.I.	1,5 à 3 MHZ	M.F.
Décamétriques	100 à 50 m.	O.I.	3 à 6 MHZ	H.F.
"	50 à 10 m.	O.C.	6 à 30 MHZ	H.F.
Métriques	10 à 1 m.	O.T.C.	30 à 300 MHZ	V.H.F.
Décimétriques	1 à 0,1 m.	O.U.C.	300 à 3000 MHZ	U.H.F.
Centimétriques	10 à 1 cm.	O.U.C.	3000 à 30000 MHZ	S.H.F.

O.L.	ondes longues	V.L.F.	très basses fréquences
G.O.	grandes ondes	L.F.	basses fréquences
O.M.	ondes moyennes	M.F.	moyennes fréquences
P.O.	petites ondes	H.F.	hautes fréquences
O.I.	ondes intermédiaires	V.H.F.	très hautes fréquences
O.C.	ondes courtes	U.H.F.	ultra hautes fréquences
O.U.C.	ondes ultra courtes	S.H.F.	hautes fréquences supérieures

Les conditions de propagation de ces diverses gammes seront étudiées au paragraphe 9.

### B.3.4 Utilisations et propriétés des ondes hyperfréquences et lumineuses

#### A.1.1.a Télécommunications

Le débit d'informations qui peut être transmis sur un canal (voie aérienne ou ligne électrique) est directement **proportionnel à la bande passante du système**. Ainsi, une bande passante de 1% autour de 1 GHz permet d'acheminer 1000 fois plus d'informations en un temps donné qu'une bande passante de 1% autour de 1 MHz.

#### A.1.1.b Interactions avec la matière

Lorsqu'une onde électromagnétique rencontre un échantillon de matière, elle est absorbée de façon préférentielle à certaines fréquences. Ces fréquences sont liées à la composition moléculaire du matériau. Ainsi, l'eau à l'état liquide absorbe les ondes autour de 18 GHz selon un phénomène dit de « relaxation diélectrique », alors que dans le domaine de l'infrarouge, à certaines fréquences les ondes sont absorbées selon un phénomène dit de « résonance ».

En hyperfréquences, cette propriété est utilisée pour le chauffage par microondes. En dehors des échanges énergétiques onde-matière, il est souvent utile de rechercher les caractéristiques électromagnétiques des matériaux en vue de leur utilisation dans les technologies électriques ou électroniques ; il est même possible de modifier certains comportements biologiques de cellules vivantes. Le rayonnement des hyperfréquences est non ionisant ; en revanche, à partir du domaine du visible, les ondes sont ionisantes.

#### A.1.1.c Propagation dans l'espace

Les différents gaz qui composent la troposphère jusqu'à 10 km d'altitude et les différents corps en suspension n'influencent pratiquement pas les signaux électromagnétiques dont la fréquence est inférieure à 10 GHz environ. Des signaux de fréquence plus élevée sont en revanche soumis à plusieurs effets indésirables : absorption, dépolarisation et scintillement.

Entre 10 et 100 km d'altitude, les ondes ne sont pas affectées mais au-delà, la ionosphère présente des propriétés opposées aux précédentes. La ionosphère est un ensemble de couches ionisées (plasma d'électrons) produites par le rayonnement solaire. Elles fluctuent en fonction du jour, de la nuit, des saisons et de l'activité solaire. Les signaux de fréquence inférieure à 40 MHz (fréquence de coupure) sont partiellement ou totalement réfléchies, ce qui permet de réaliser les liaisons à réflexions multiples en ondes courtes. Les signaux de fréquence supérieure traversent la ionosphère mais subissent une distorsion qui décroît avec la fréquence. Les signaux hyperfréquences ne sont pratiquement pas affectés tant que leur amplitude reste faible. Ils sont de ce fait utilisés pour les télécommunications par satellites et l'étude des rayonnements et de étoiles (radioastronomie).

L'essor des hyperfréquences est intimement lié au développement du RADAR (RADAR (RADIO DETECTION AND RANGING)) durant la seconde guerre mondiale. La fréquence de l'onde porteuse située entre 3 et 10 GHz permet de s'affranchir des phénomènes atmosphériques. En l'absence de vapeur d'eau il est possible d'aller jusqu'à 30 GHz.

### A.1.1.d Remarques dimensionnelles

La longueur d'onde d'un signal hyperfréquence est du même ordre de grandeur que les éléments employés pour le produire ou le transmettre. Il n'est donc pas possible de supposer ces éléments ponctuels, comme on le fait dans les approximations de théorie des circuits. La notion de tension n'est d'ailleurs pas définie de façon univoque, puisque le champ électrique ne dérive pas d'un scalaire.

En optique géométrique, on suppose que les éléments d'un montage sont grands devant la longueur d'onde. Mais lorsqu'on considère des fibres optiques, leurs dimensions transversales sont comparables à la longueur d'onde utilisée.

Il est donc généralement nécessaire de considérer de façon complète les champs électriques et magnétiques définis par le modèle de Maxwell.

Les lois de l'électromagnétisme peuvent tenir compte des caractéristiques des matériaux utilisés :

- Permittivité diélectrique  $\epsilon$
- Perméabilité magnétique  $\mu$
- Conductivité  $\gamma$
- Charge volumique  $\rho$

## B.3.5 Rayonnement ionisant – radiation

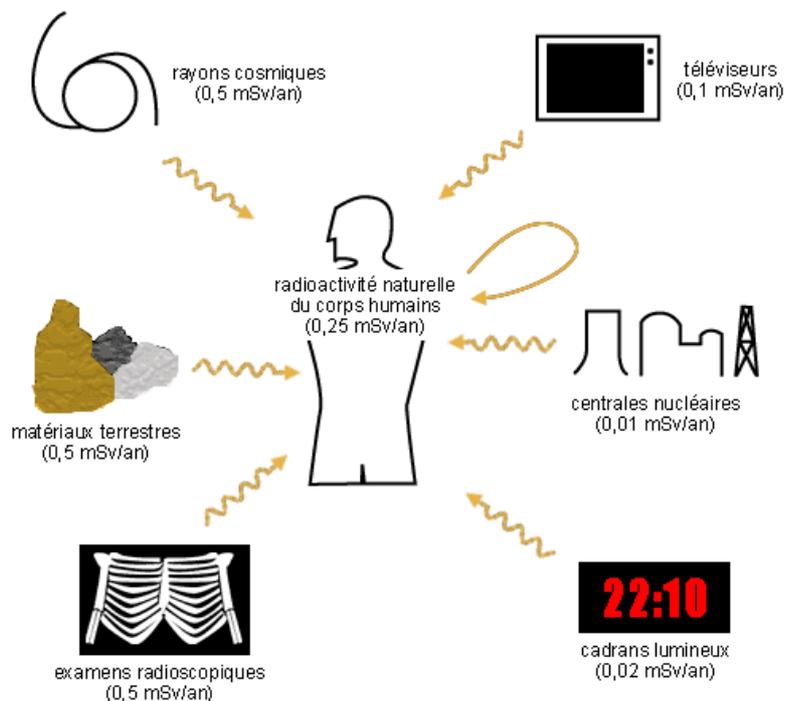
### Le phénomène de la radioactivité

La radioactivité a été découverte en 1896 par le physicien français Henri Becquerel. C'est une propriété des noyaux instables, c'est-à-dire des noyaux ayant un excès de protons ou de neutrons. Ces noyaux se "transforment" (ils émettent des particules) jusqu'à ce qu'ils soient stables. On dit que les noyaux se désintègrent. Ces désintégrations s'accompagnent de l'émission de rayonnements. Il en existe trois :

le rayonnement alpha ;

le rayonnement bêta ;

le rayonnement gamma.



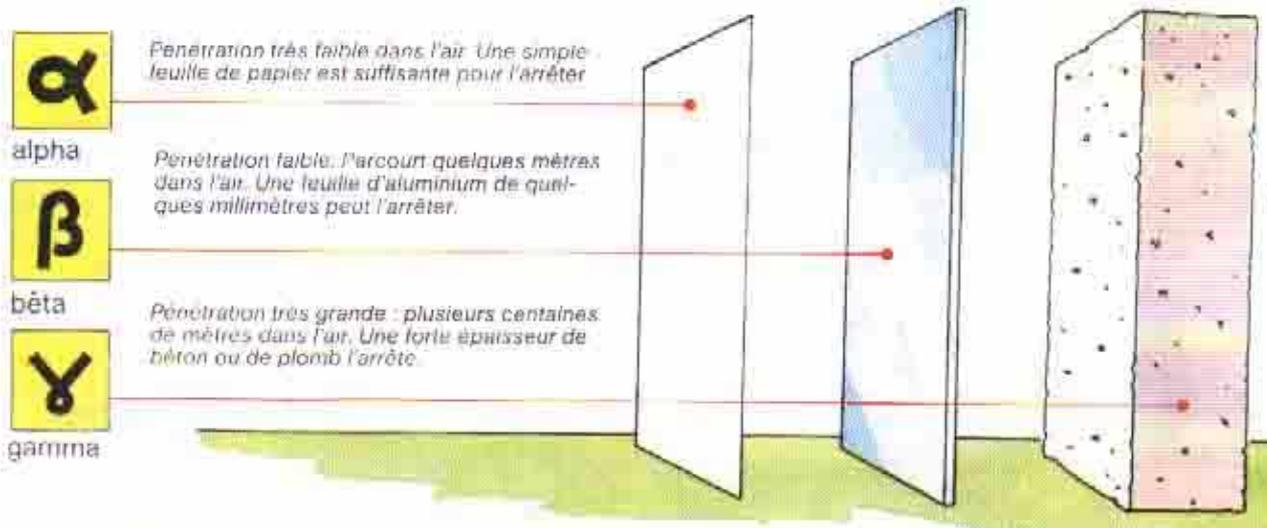
Le rayonnement alpha et le rayonnement bêta sont dus à un réarrangement interne du noyau et correspondent à une éjection de particules. Le rayonnement alpha est arrêté par une simple feuille de papier tandis que le rayonnement bêta est arrêté par une feuille d'aluminium de quelques millimètres d'épaisseur.

Le rayonnement gamma est un rayonnement électromagnétique (de même nature que la lumière). Il correspond à une libération d'énergie par le noyau. Il est atténué par une forte épaisseur de plomb ou de béton et est généralement consécutif à un rayonnement alpha ou bêta.

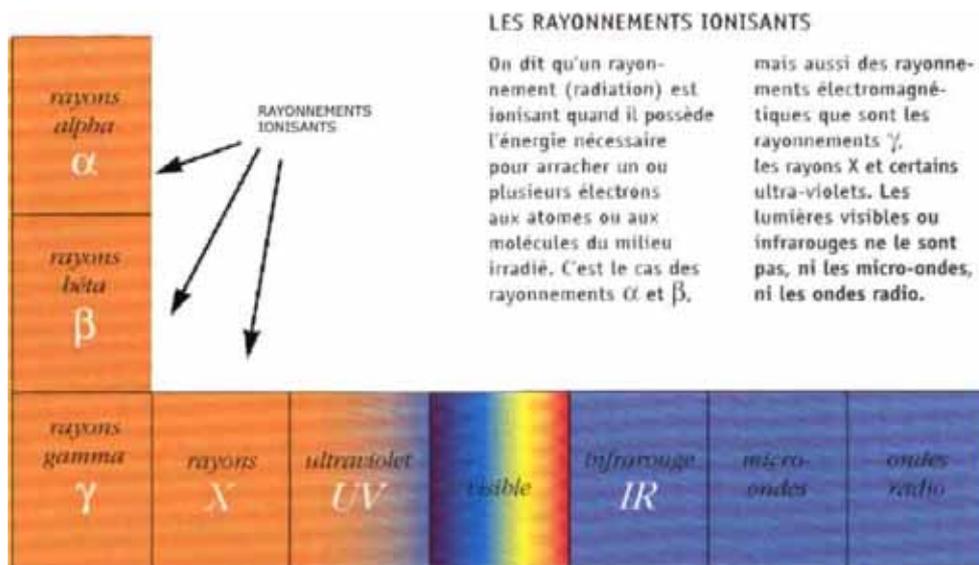
D'après une norme française, la dose maximale admissible pour le public est de 5 mSv pour le corps et de 15 mSv pour la thyroïde. Cette norme est très basse quand on regarde la radioactivité naturelle. En effet, si on s'intéresse aux rayons cosmiques, leur effet au niveau du sol est de 0.5 mSv par an. Or, il augmente avec l'altitude. Ainsi, à 4500 mètres, on reçoit 4 mSv par an soit quasiment la dose limite admissible. Donc, les habitants de certaines villes comme La Paz en Bolivie (3658 m), par exemple, reçoivent plus de la moitié de la dose maximale admissible uniquement par les rayons cosmiques.

**Quant aux hôtesse de l'air, stewards et pilotes, ils dépassent largement la dose fixée rien qu'avec les rayons cosmiques.**

## POUVOIR DE PÉNÉTRATION DES RAYONNEMENTS



La dose maximale admissible est donc inférieure à la dose que le corps humain peut supporter.



**Activité radioactive** : C'est le nombre de transformations que subit une source radioactive par unité de temps.

La radioactivité d'un corps (on parle aussi d'activité radioactive) se mesure en **Becquerel (Bq)** ; cette unité est assez naturelle car 1 Bq correspond à une désintégration par seconde. Cependant 1 Bq est vraiment tout petit. Dans le passé, on utilisait le **Curie (Ci)** : 1 Ci correspond à la radioactivité d'un gramme de radium soit 37 milliards de désintégrations par seconde.

Le curie est une unité énorme et on utilisait généralement le micro-curie ( $1\mu Ci = 3.7 \times 10^4$  Bq).

### Dose Absorbée, Dose Équivalente et Dose Efficace

- La **dose absorbée** donne une mesure de la quantité de radiation absorbée par la matière ; elle se mesure en **Gray (Gy)**. **Un Gray = 1 joule absorbé par kilogramme de matière**. La dose absorbée ne dépend pas du type de radioactivité (alpha, beta, gamma). On utilisait avant le **Röntgen** ( $1 R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$ ) et plus récemment le **Rad** (abréviation de "radiation absorbed dose",  $1 rad = 10^{-2} Gy$ )
- La **dose équivalente** permet de prendre en compte l'effet des différents types de radioactivité sur les tissus vivants ; par exemple, 1 gray de radiation alpha aura plus d'effets qu'un gray de radiation beta. La **dose équivalente** se mesure en **Sievert (Sv)** ; c'est en fait la dose absorbée multipliée par un **facteur de pondération du rayonnement**. Un sievert représente une dose très élevée et on parle généralement de milli-sievert ( $1 mSv = 10^{-3} Sv$ ).

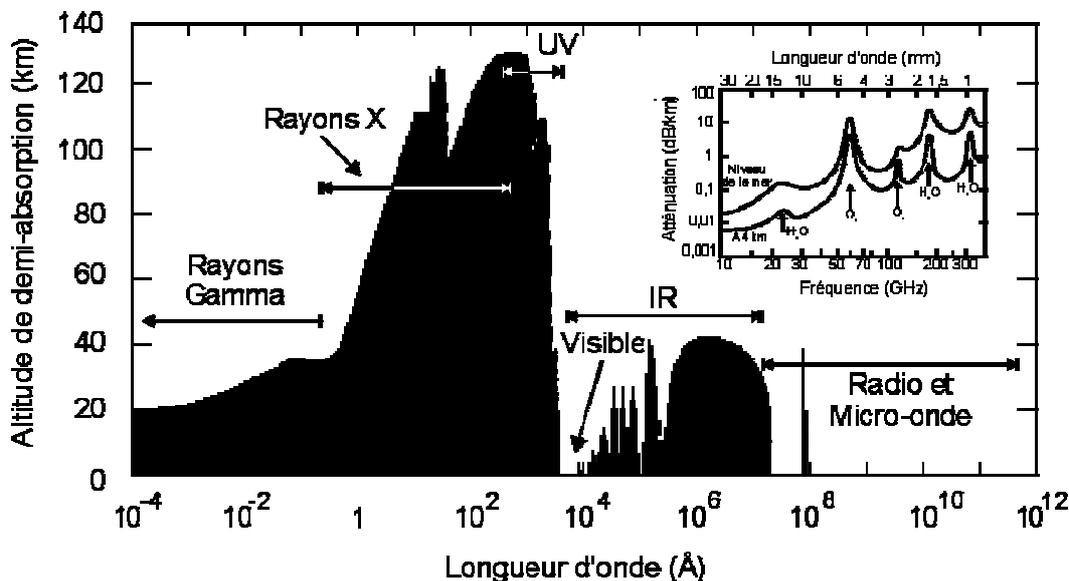
On utilisait avant le **Rem** (abréviation de "röntgen equivalent man",  $1 rem = 10^{-2} Sv$ )

- La **dose efficace** permet de prendre en compte le type de tissus soumis à la radiation. Elle se mesure aussi en sievert. C'est la dose équivalente multipliée par un **facteur de pondération tissulaire**. Ce facteur dépend non seulement de la radiosensibilité de chaque organe, mais aussi de la gravité (donc de la mortalité) des cancers radio-induits.

### B.3.6 Particularités des ondes hyperfréquences

Mais pourquoi utiliser des micro-ondes pour les télécommunications et la détection ? Les diverses raisons, qui incitent à l'utilisation d'ondes courtes, peuvent être illustrées par l'exemple de la détection RADAR, dont le principe est d'illuminer une "cible" par des impulsions électromagnétiques pour en récupérer l'écho. Tout d'abord, il y a la concentration de l'énergie rayonnée : plus la longueur de l'onde est faible par rapport aux dimensions de l'aérien, plus le faisceau est étroit, c'est-à-dire meilleure est la directivité de l'onde et donc sa "précision". Le second point a été évoqué précédemment : des obstacles ne peuvent être détectés que si leurs dimensions sont au moins comparables à la longueur d'onde, sinon, l'énergie rayonnée devient trop faible. Pour déceler des éléments petits, les micro-ondes sont donc très appropriées. D'une façon générale, les micro-ondes sont appréciées pour leur large bande passante, leur résolution spatiale élevée et leur grande immunité aux interférences.

Toutefois, une conséquence pratique importante de l'interaction des ondes électromagnétiques avec la matière et les différents composés de l'atmosphère est que, seuls certains domaines d'ondes peuvent pénétrer facilement l'atmosphère. Ces régions sont appelées des fenêtres atmosphériques. La **figure 1-2** illustre cette absorption pour différentes longueurs d'ondes dans l'atmosphère. Ces fenêtres correspondent aux régions où l'altitude de demi-absorption (ou l'atténuation) de l'atmosphère est très faible. Les fenêtres dominantes dans l'atmosphère sont dans le domaine visible, le domaine radio et micro-onde, alors que les rayons X et ultraviolet sont fortement absorbés, et les rayons gamma et l'infrarouge le sont un peu moins.



**figure I-2 : absorption des ondes électromagnétiques par l'atmosphère.**

Les micro-ondes apparaissent donc comme très intéressantes pour les télécommunications, la détection, etc. Soulignons toutefois que ce domaine possède ses propres fenêtres atmosphériques, données en médaillon de la [figure précédente](#). Ces fenêtres vont déterminer les fréquences utilisées pour diverses applications.

**B.3.7 Radiomètre satellite météoat 7**

**Caractéristiques du radiomètre**

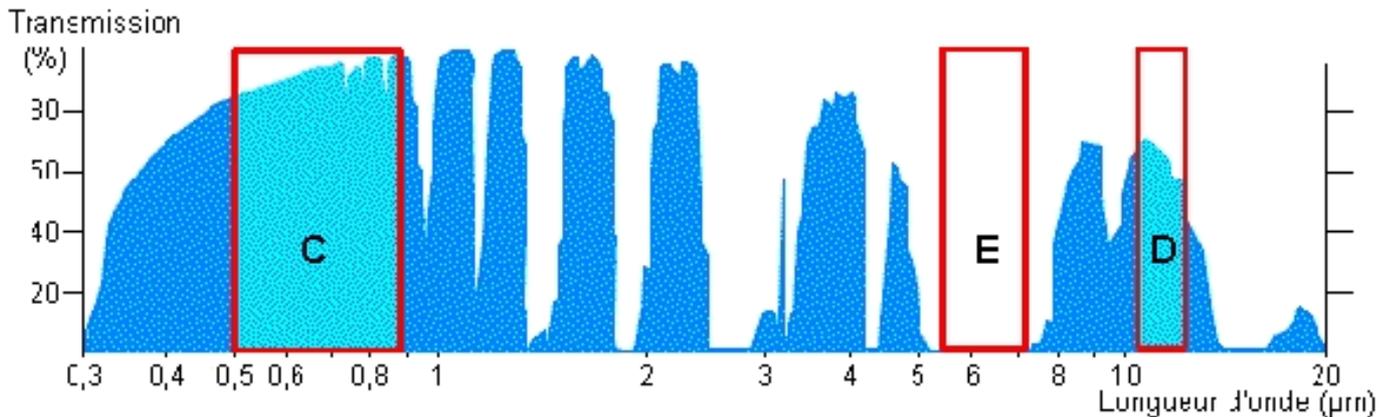
Champ total d'observation : 12500 \* 12500 km.

*Satellite METEOSAT*

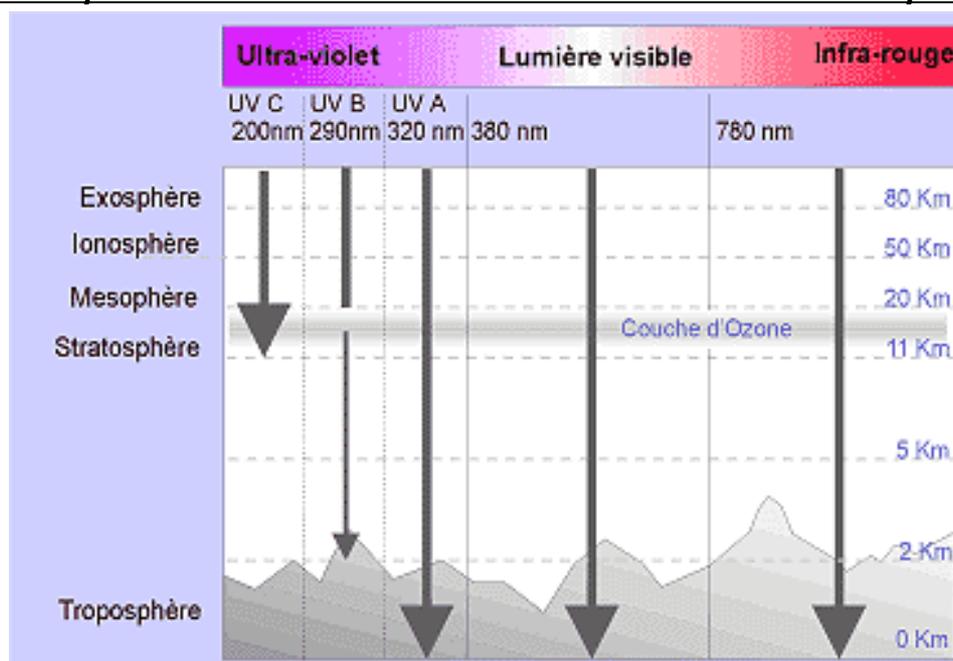
Bande spectrale	Domaine de longueur d'onde	Dimensions de la tache élémentaire (*)
C (visible et proche infrarouge)	de 0,5 à 0,9 µm	2,5 km ~ 2,5 km
E (canal "vapeur d'eau")	de 5,5 à 7,1 µm	5 km ~ 5 km
D (canal "infrarouge thermique")	de 10,5 à 12,5 µm	5 km ~ 5 km

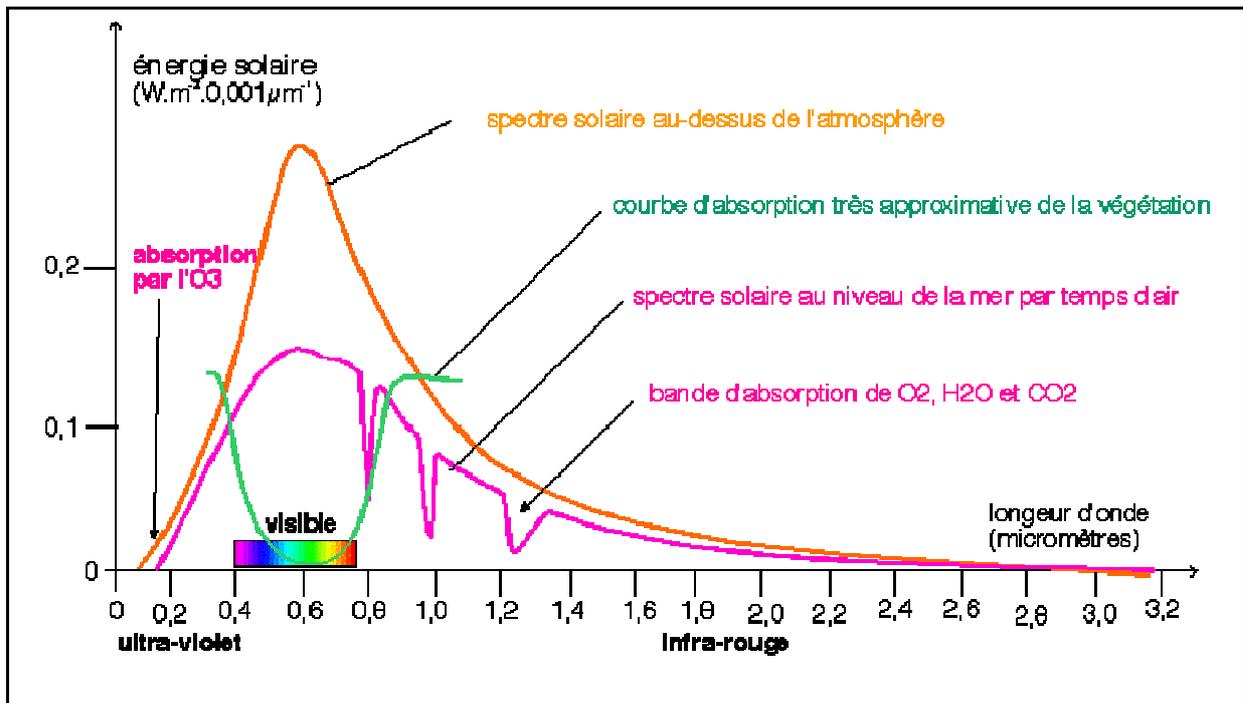
(\*) au point sous-satellite

**Courbe de transmission de l'atmosphère et bandes spectrales METEOSAT.**



**B.3.8 Absorption des Ultra Violet dans les couches atmosphériques**





### B.3.9 La communication HF/VHF

#### Généralités

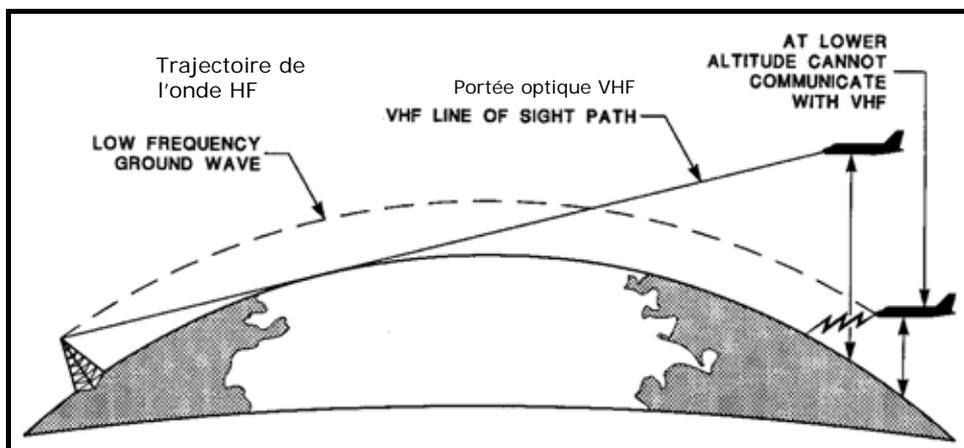
Les premiers systèmes de communication installés à bord des appareils étaient de type unilatéral et permettaient aux pilotes de recevoir des instructions et des informations en provenance du sol relatives au trafic aérien ou aux conditions météorologiques. Pendant la seconde guerre mondiale, deux types d'équipement firent leur apparition, les systèmes **HF** et **VHF**.

Un net avantage de la transmission **VHF** repose sur la clarté de l'information à la réception du fait des faibles perturbations lors de la propagation atmosphérique. Cependant, ce type d'équipement se trouve limité à la portée optique tel que la distance de propagation soit :

$$d(NM) = 1.23\sqrt{h(ft)}$$

Les fréquences attribuées à la communication VHF s'étendent de 118 à 137MHz par incrémentation de 25kHz (120.15, 120.175, 120.20...) et cette technique de transmission repose sur la modulation d'amplitude.

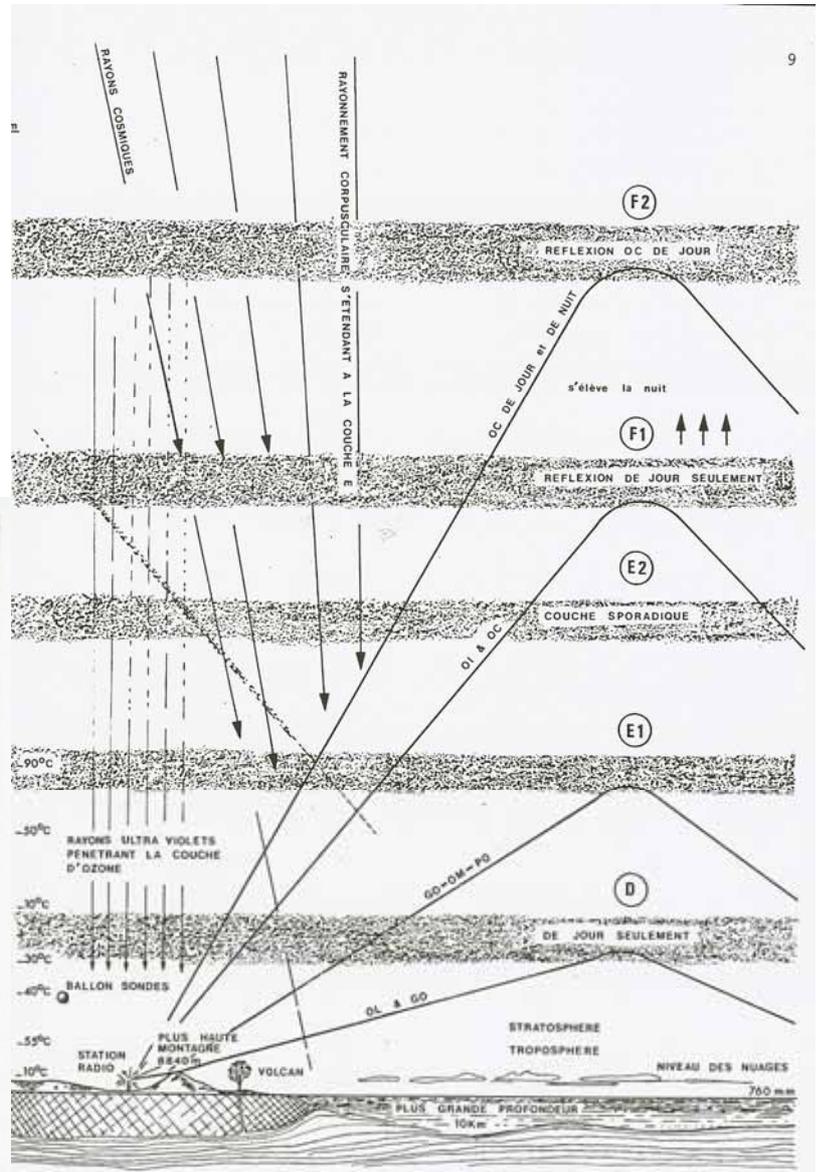
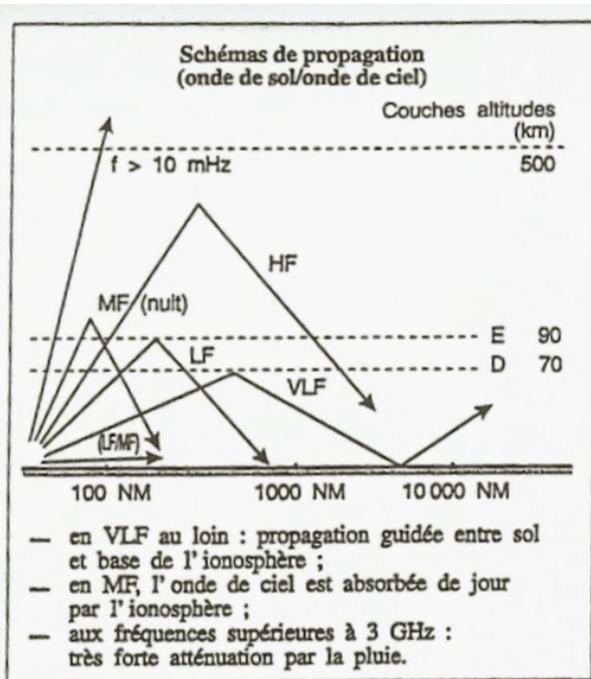
La communication HF, quant à elle, utilise les bandes de fréquences comprise entre 2 et 30MHz et elle est utilisée pour des communications au-dessus des océans ou pour des régions lointaines. En effet, les ondes HF ont une portée de 1500 à 2000 NM en comparaison aux ondes VHF qui ne portent que sur 250NM environ. Cette différence de propagation repose sur le principe de transmission HF réalisé en réflexion entre le sol et les couches de l'atmosphère ce qui permet une plus grande portée mais une clarté nettement diminuée (possibilité de perte de communication au-dessus des océans).



Communication VHF  
Interrompue à basse  
Altitude

Enfin, les antennes HF sont équipées d'un dispositif d'ajustement et de couplage dès que la fréquence varie. Certain appareil plus petit utilise comme antenne réceptrice un câble tendu de l'avant de l'appareil jusqu'à la dérive, système ne pouvant bien sur être utilisé sur avion à réaction du fait de la rapidité d'avancement.

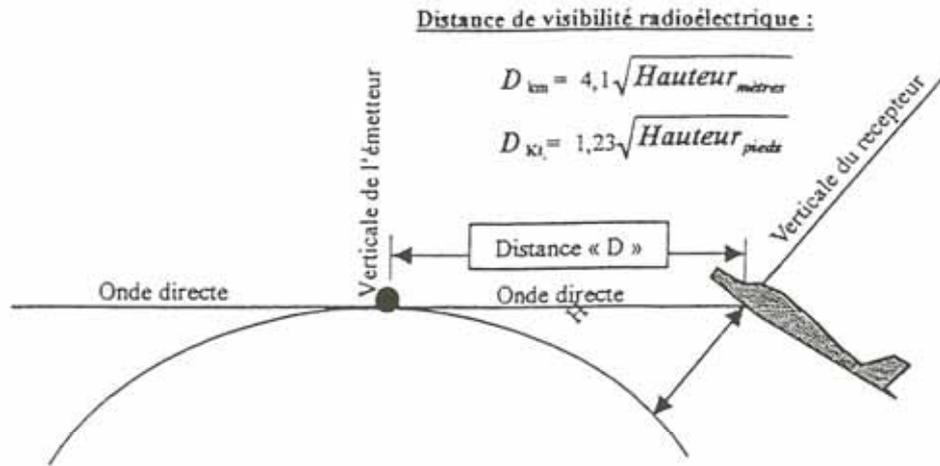
**B.3.10 Propagation des ondes radioélectrique dans l'atmosphère :**



La propagation des ondes électromagnétiques obéit aux lois de l'optique (réflexion, réfraction, diffraction et absorption), à ceci près qu'il faut tenir compte de la polarisation.

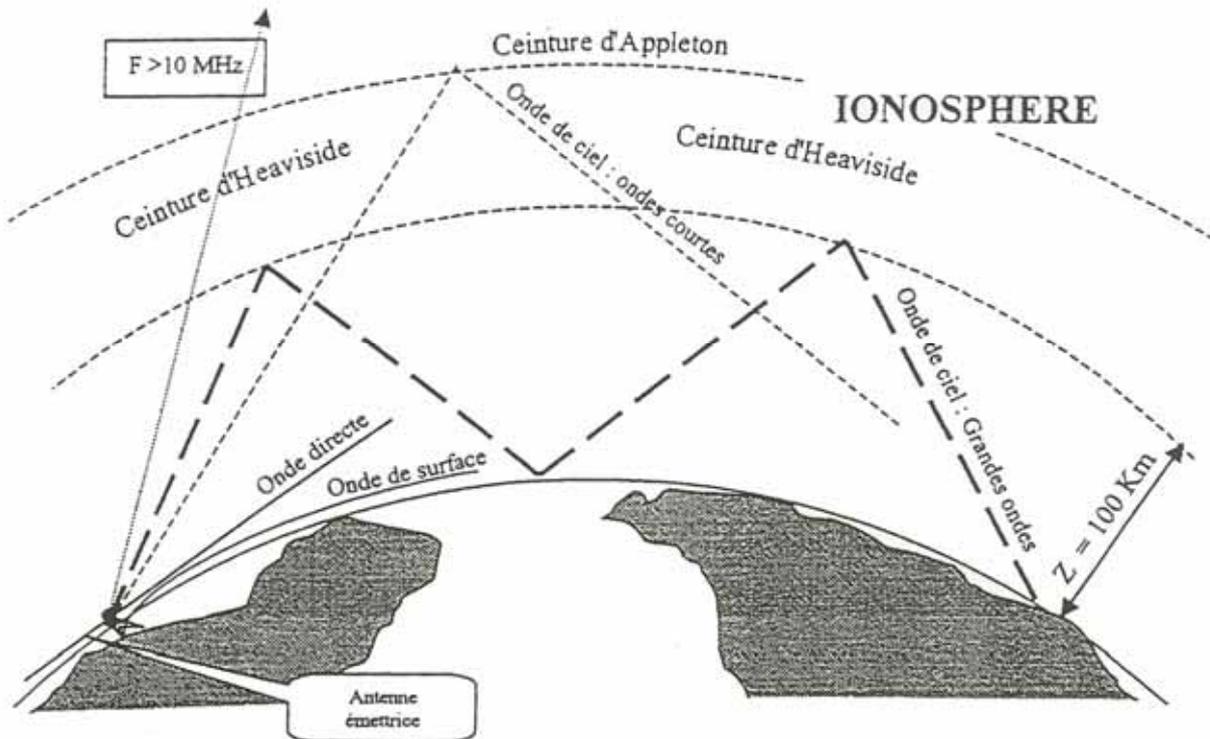
**MODES DE PROPAGATION**

Onde directe : ondes à propagation rectiligne directe : ondes très hautes fréquences (> 30 MHz).



Onde de surface ou de sol : onde de basses ou moyennes fréquences (LF ou MF). La polarisation est verticale et la propagation est de type orthodromique. Elle est favorisée par un sol conducteur mais s'affaiblit avec la distance suivant la nature du sol (Meilleure conduction sur mer) et jusqu'à une distance maximale d'environ 300 Km.

Ondes de ciel ou d'espace : ondes réfléchies par l'atmosphère ionisée : moyennes fréquences « MF » (uniquement la nuit) et Hautes fréquences « HF »



**SOURCES DE PERTURBATIONS (bruits ou parasites radioélectriques)**

La réception peut être parasitée par :

- émissions de fréquences voisines (brouilleurs)
- parasites atmosphériques et cosmographiques
- parasites radioélectriques des systèmes de bord
- masses métalliques

### B.3.11 Généralités sur la propagation :

Une onde électromagnétique est caractérisée par la présence d'un champ électromagnétique. Ce dernier est composé d'un champ électrique  $\vec{E}$  (généralisé par les particules dites 'chargées' (essentiellement les [électrons](#) et les [protons](#) dans la matière qui nous entoure). Ces particules sont aussi celles qui lui sont sensibles) et d'un champ magnétique  $\vec{H}$  (généralisé par le déplacement de [charges](#) ([courant électrique](#)) et par les mouvements magnétiques permanents des particules ou des [molécules](#).) indissociables et perpendiculaires entre eux . Ces deux champs alternatifs sinusoïdaux sont également perpendiculaire à la direction de propagation Z de tel sorte à ce que le trièdre ( $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$ , Z) soit direct (Fig.1).

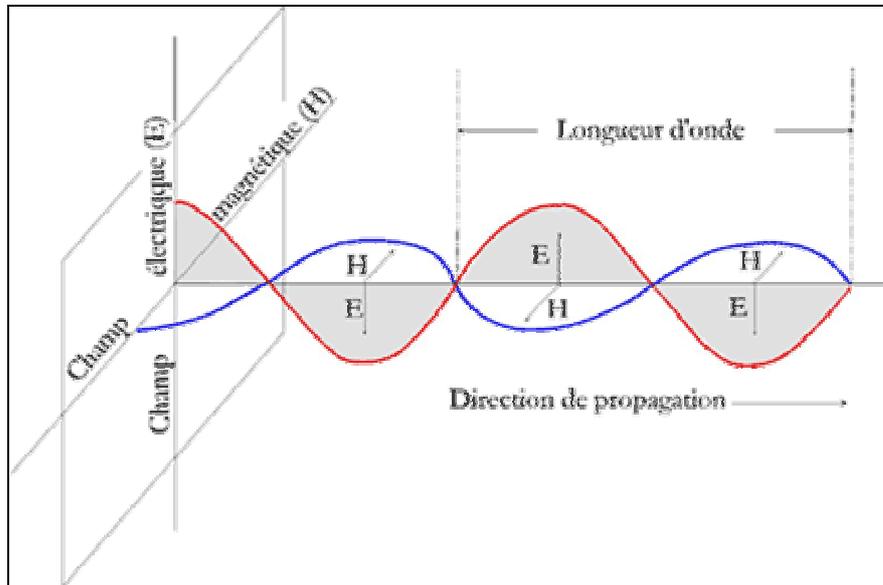


Fig.1: représentation de la propagation d'une onde électromagnétique

Mathématiquement les champs électriques et magnétiques s'écrivent :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp jw(t - \frac{z}{v}) \quad \vec{H} = \vec{H}_0 \exp jw(t - \frac{z}{v})$$

Les ondes électromagnétiques sont caractérisées par un certain nombre de propriétés physiques qui sont:

- **la période T** (exprimée en seconde)
- **la fréquence F** (exprimée en Hertz)
- **la vitesse de propagation dans le milieu V** (exprimée en m.s<sup>-1</sup>) : Cette dernière est

déterminée en fonction de la perméabilité et de la conductivité du milieu telle que :

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

C : 3.10<sup>8</sup> m.s<sup>-1</sup>

- **la longueur d'onde λ** (exprimée en mètre) : Cette grandeur correspond à la plus petite distance pour laquelle le déphasage telle que

$$\varphi = 2\pi$$

$$\lambda = VT$$

### B.3.12 Les ondes : Maxwell

#### A.1.1.e Définition : Champ et induction :

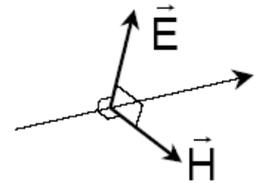
La propagation par ondes planes est modélisée par les équations de Maxwell. Elles s'appliquent aux vecteurs :

$\vec{H}$ , champ magnétique

$\vec{B}$ , induction magnétique

$\vec{E}$ , champ électrique

$\vec{D}$ , induction électrique



$|\vec{E}|$  et  $|\vec{H}|$  sont orthogonaux et perpendiculaires à la direction de propagation.

En polarisation verticale, le vecteur  $E$  est dans un plan vertical contenant l'axe de propagation

L'onde électromagnétique est caractérisée par la présence d'un champ électromagnétique. Composé d'un champ électrique  $\vec{E}$  et d'un champ électromagnétique  $\vec{H}$  indissociables et perpendiculaires entre eux.

Ils sont généralement tous les deux perpendiculaires à la direction de propagation  $\vec{P}$ .

#### A.1.1.f Les paramètres du milieu

Un milieu est caractérisé par :

sa constante diélectrique ou permittivité  $\epsilon$  (F/m)

sa perméabilité magnétique  $\mu$  (H/m)

sa conductibilité  $\sigma$  (ohms<sup>-1</sup>/m ou mhos/m)

Le rapport entre  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  est de **377 ohms** et la vitesse de propagation  $c = 3.10^8$  m/s

A.1.1.g Isotrope et homogène

Un milieu isotrope homogène est défini par les deux constantes  $\epsilon$  et  $\mu$  :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{H} = \mu \vec{B}$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ F / m}$$

constante diélectrique du vide

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H / m}$$

perméabilité magnétique du vide

$$\text{avec } \epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$$

A.1.1.h Notations complexes

Dans le cas des milieux isotropes homogènes

$$\text{rot } \vec{H} = (\sigma - j\omega_0 \epsilon) \vec{E} \quad \text{rot } \vec{E} = j\omega_0 \mu \vec{H}$$

$$\text{div } \epsilon \vec{E} = \rho \quad \text{div } \mu \vec{H} = 0$$

$$\epsilon' = \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega_0} \quad \text{constante diélectrique complexe}$$

$$\epsilon'_r = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} = \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega_0} = \epsilon_r - j 60 \sigma \lambda \quad \text{constante diélectrique relative complexe}$$

Un milieu peut être diélectrique en HF et conducteur en BF, selon la valeur de  $f$  par rapport à

$$\frac{\sigma}{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}$$

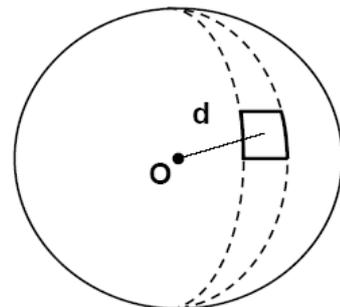
A.1.1.i Puissance rayonnée

Soit  $P$  la puissance intrinsèque rayonnée équivalente par une source ponctuelle isotrope (PIRE). La densité surfacique de puissance peut donc s'écrire :

$$p_{(W/m^2)} = \frac{P_{(W)}}{4\pi d^2}$$

Si  $d$  est suffisamment grand, l'onde est plane et le champ électrique a pour module :

$$|\vec{E}| = \frac{\sqrt{30P}}{d}$$

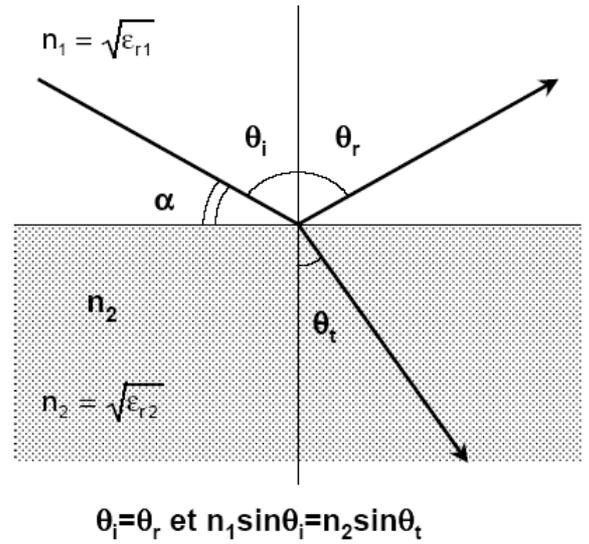


A.1.1.j Coefficients de Réfraction et de réflexion

On montre que, si le milieu 1 est l'air, les coefficients de réflexion en polarisation verticale et horizontale valent :

$$K_{v_r} = \frac{\epsilon'_r \sin \alpha - \sqrt{\epsilon'_r - \cos^2 \alpha}}{\epsilon'_r \sin \alpha + \sqrt{\epsilon'_r - \cos^2 \alpha}}$$

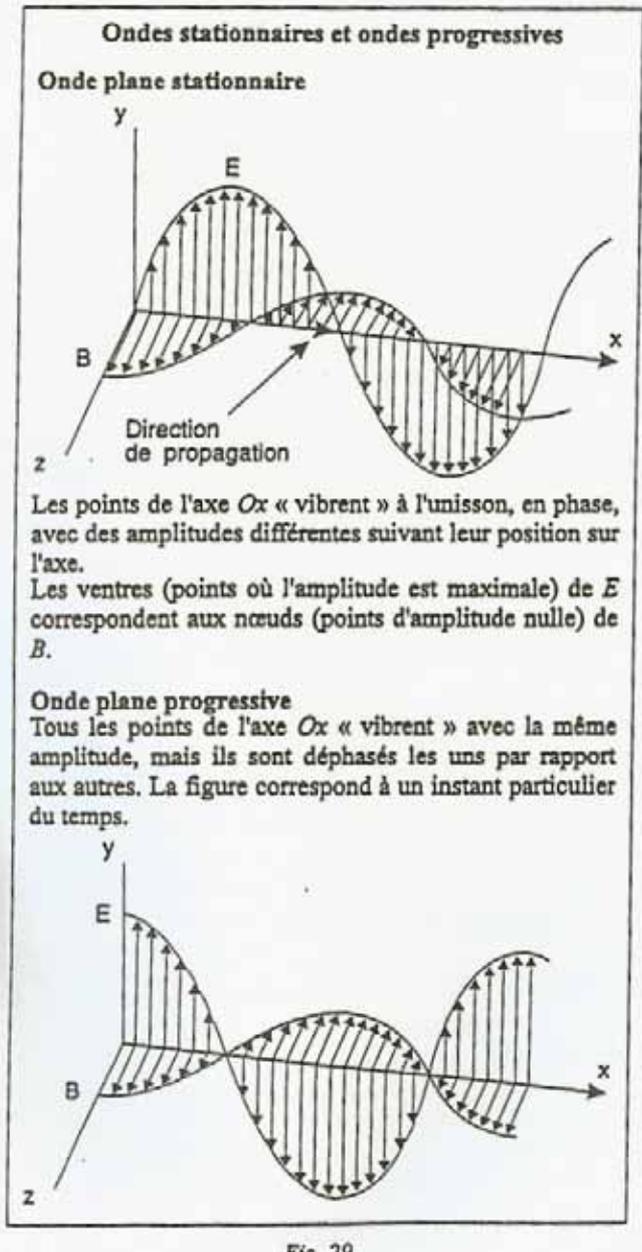
$$K_{h_r} = \frac{\sin \alpha - \sqrt{\epsilon'_r - \cos^2 \alpha}}{\sin \alpha + \sqrt{\epsilon'_r - \cos^2 \alpha}}$$



A.1.1.k Polarisation d'une onde

### 3.4.3. Ondes progressives et ondes stationnaires

L'onde stationnaire est un cas très particulier où tous les points de l'espace vibrent en phase, à l'unisson. Par opposition, l'onde non stationnaire est dite progressive. Les « régimes » d'ondes stationnaires sont engendrés par composition d'ondes incidentes et réfléchies à l'intérieur d'une cavité résonante.



### B.3.13 Antenne

#### A.1.1.1 Gain d'une antenne

$$P = E.H \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad \text{pour une antenne de gain unité}$$

Comme  $E/H=120\pi$ ,

$$P = E^2 \frac{\lambda^2}{480\pi^2}$$

$$E^2 = 480\pi^2 \frac{F^2}{C^2} P$$

Avec  $E$  en  $\mu\text{V/m}$ ,  $F$  en  $\text{MHz}$  et  $P$  en  $\text{mW}$

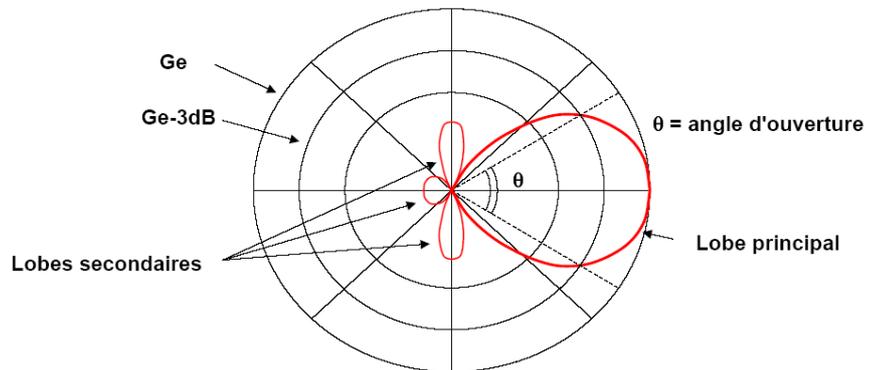
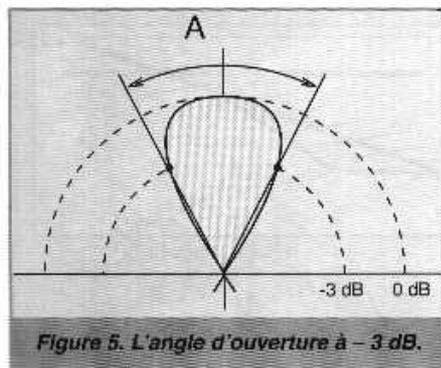
$$\frac{E^2}{10^{12}} = 480\pi^2 10^{12} F^2 \frac{1}{9 \cdot 10^{16}} \frac{P}{10^3}$$

$$E_{\text{dB}\mu\text{V/m}} = P_{\text{dBm}} + 20 \log F_{\text{MHz}} + 77,21$$

Si l'antenne a un gain  $G$ , il vient :

$$E_{\text{dB}\mu\text{V/m}} = P_{\text{dBm}} - G_{\text{dBm}} + 20 \log F_{\text{MHz}} + 77,21$$

#### A.1.1.m Rayonnement d'un antenne, directivité



#### A.1.1.n Puissance captée par une antenne

La puissance captée par une antenne en un point de densité surfacique  $p$  est de la forme  $P_r = pS_r$  où  $S_r$  représente la surface équivalente de l'antenne. Cette surface est liée au gain  $G_r$  par la relation :

$$S_r = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad S_0 = \frac{\lambda^2}{4\pi} \text{ est donc la surface équivalente de l'antenne isotrope (pour laquelle } G_r = 1)$$

La surface équivalente n'a donc aucun lien avec la surface physique de l'antenne.

Les antennes paraboliques de diamètre  $D$  ont une ouverture angulaire  $\lambda/D$  (cas idéal) et un gain

$$G = \eta \frac{S}{S_r} = \eta S \frac{4\pi}{\lambda^2} = \eta \pi^2 \frac{D^2}{\lambda^2}$$

#### A.1.1.o Angle d'ouverture

L'amplitude du champ est concentrée et en dehors de cette 'bulle' d'émission, le signal est considéré comme insuffisant.

Des antennes alignées en réseau créent un diagramme d'autant plus directif (angle d'ouverture faible) que le nombre d'antennes est important.

En plaçant une deuxième réseau (réseau réflecteur) on peut supprimer un lobe.

Utilisé par les ILS.

On peut augmenter la directivité en augmentant le nombre de brins directeurs (utilisé en VHF et UHF).

Les antennes a **parabole** augmentent encore plus la directivité (utilisé en radar).

Les antennes a fente sont utilisées en ondes très courtes. Un grand nombre de fentes est équivalent à un réseau et permet un effet directif très prononcé.

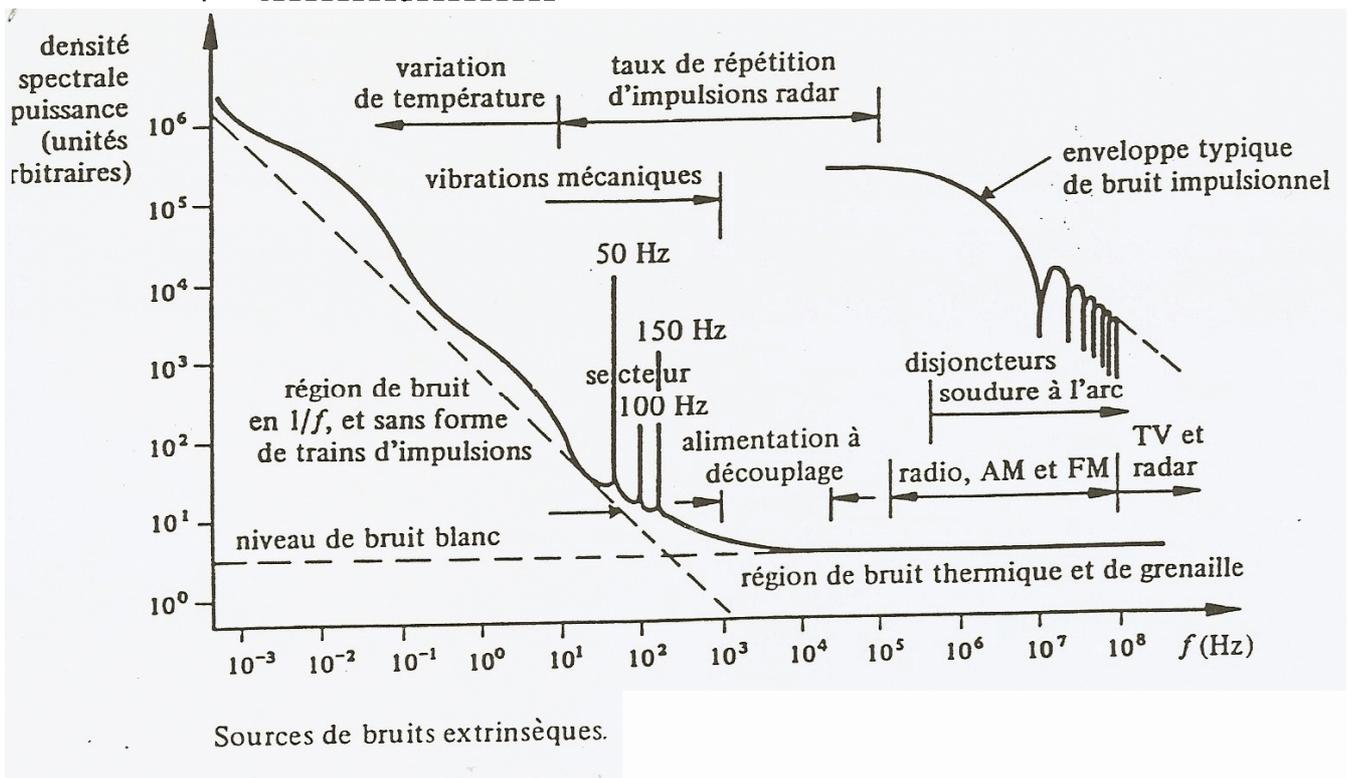
Le diagramme directif peut être déplacé en modifiant la phase d'alimentation.

Le rendement max des antennes est obtenus lorsque l'antenne travaille en **ONDES STATIONNAIRES** (courant max. au point d'alimentation et nul a l'extrémité et inversement pour la tension).

Si l'antenne ne travaille pas en courant stationnaire, une partie du signal n'est pas émis et retourne vers l'émetteur.

A fréquences élevées, l'antenne est quasi adaptée pour toute la bande de fréquence d'utilisation. L'accord de l'antenne (self, capacité) est nécessaire pour les fréquences plus basses.

### A.1.1.p Bruit et rayonnement



### A.1.1.q Température de Bruit

La température de bruit d'une antenne dépend de la façon dont elle est orientée. En effet, la Terre est un corps noir qui rayonne à 300°K, le ciel ayant quant à lui une température de bruit très basse, sauf en direction de certains corps célestes (pour le Soleil, 10<sup>5</sup>K à 4 GHz).

Pour un FH, la température de bruit sera pratiquement égale à 300°K, ce qui ne sera pas le cas pour une antenne "satellite".

L'antenne étant la source de bruit, il est nécessaire d'avoir le moins de pertes possible entre elle et le préamplificateur, donc de soigner la connectique.

### A.1.1.r Parasites naturels

**Parasites extra-terrestre** Produit par le soleil, la voie lactée ou d'autres étoiles et de régions éloignées

**Parasites de précipitations** Dus aux décharges statiques lorsque l'avion vole dans les précipitations. Peuvent interdire momentanément les communications.

**Parasites atmosphériques** Perturbations oscillatoires fortement amorties. De durée brève. Sont produits par des décharges électriques dans les orages. Amplitude importante.

## C CEM : LES NORMES

Les normes : ce sont des textes qui stipulent :

- Le mode de déroulement des tests
- Les valeurs maximums du champ électrique devant être appliqués aux systèmes à tester sans dysfonctionnement de ces derniers
- Les fréquences du champ électriques.....

Pour les tests d'immunité, il existe plusieurs normes :

EN 61000-4-2 :  
Essais d'Immunité aux Décharges Electro-Statiques

EN 61000-4-3 :  
Essais d'immunité aux champs électromagnétiques

EN 61000-4-4 :  
Essais d'immunité aux transitoires électriques rapides en salve

EN 61000-4-5 :  
Essais d'immunité aux ondes de chocs (type foudre)

**Exemple : test d'immunité se référant à la norme 61000-4-3 :**

ESSAIS D'IMMUNITÉ AUX CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES RAYONNES AUX FREQUENCES RADIOELECTRIQUES :  
(CEI 1000-4-3)

**Equivalents** : ENV 50 140 : 1993 modifiée par ENV 50 204 ; EN 61000-4-3 ; version précédente CEI 801-3 ; NF C 91-004-3

**Essais** : Champ rayonné aux fréquences radioélectriques produit par des antennes dans une enveloppe anéchoïde blindée, en utilisant la méthode de substitution (champ pré calibré), balayage de 80 MHz à 1 GHz à moins de 0.0015 décade / seconde, ou avec un pas inférieur à 1% de la fondamentale et un temps de passage suffisant pour que l'équipement à tester puisse réagir. Huit (douze) tests sont à réaliser, un dans chaque polarisation, avec l'antenne face à chacun des quatre côtés de l'équipement à tester (plus le dessous et le dessus si ils peuvent être affectés).

On exige de la chambre l'uniformité entre 0 et 6 dB sur 12 points sur 16, à l'intérieur d'une surface, sur la face avant de l'objet technique à tester.

D'autres méthodes pour créer le champ peuvent être adoptées pour la génération du champ ; Ligne tri plaque ou cellule TEM (en remplacement de la chambre et de l'antenne).

**Niveau** : Niveau de sévérité de 1, 3 ou 10 V/mètre (ou plus) selon l'environnement futur prévu (médical, aviation, grand public...).

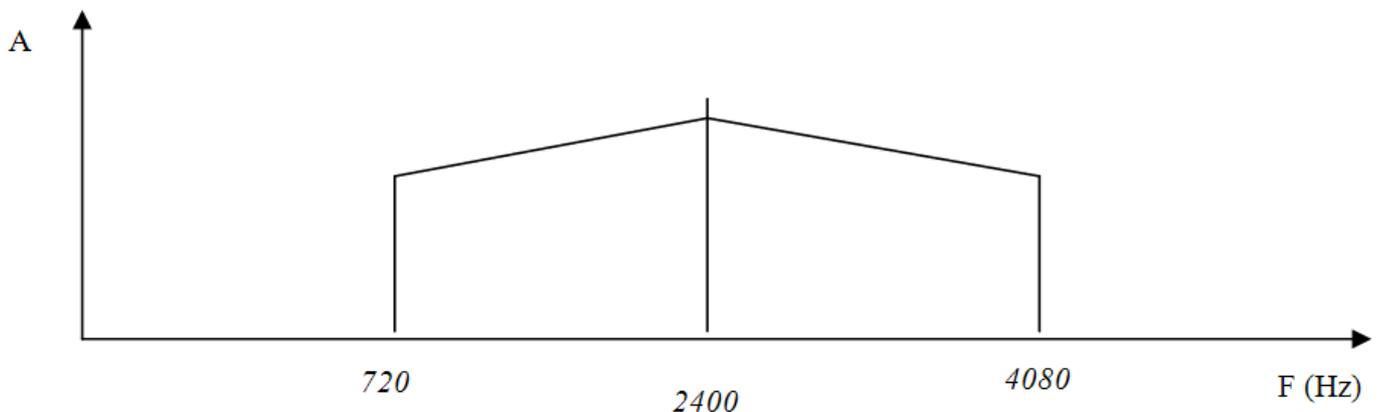
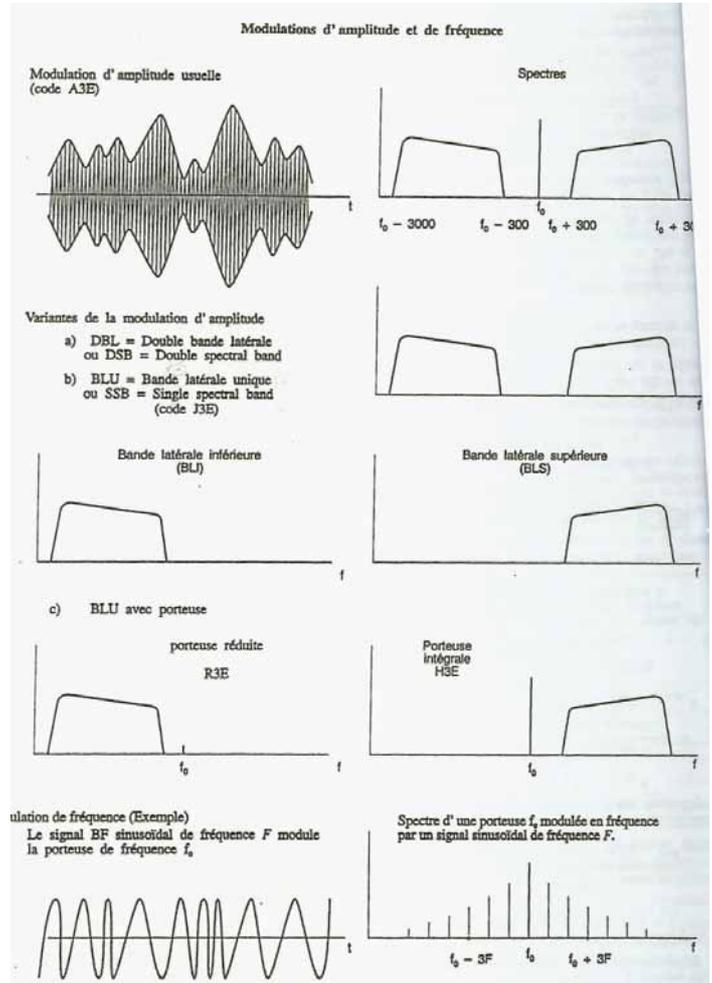
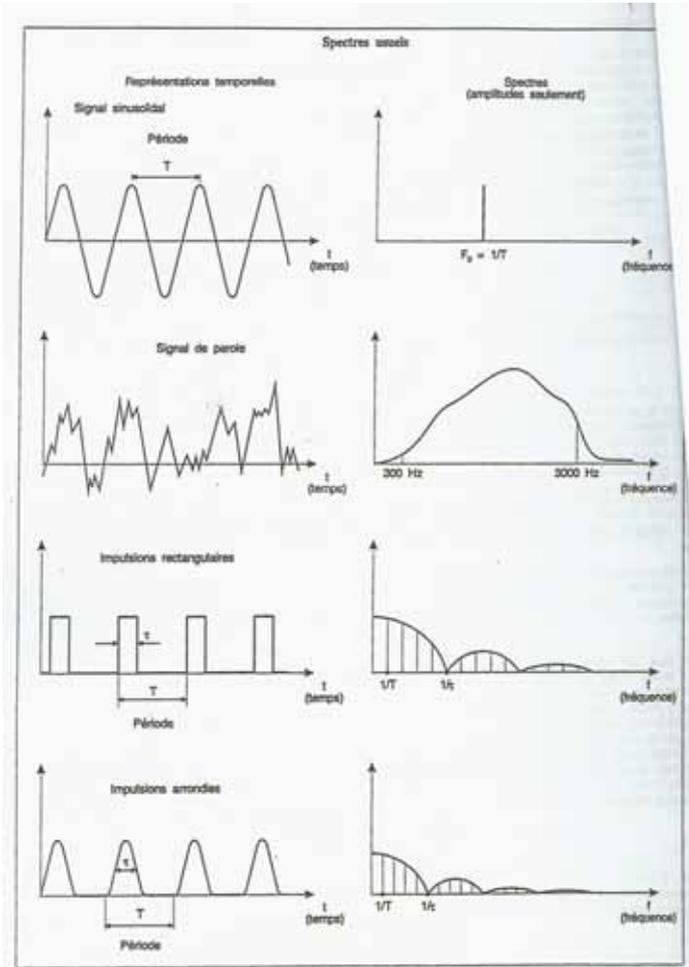
Ce signal doit être modulé en amplitude avec une profondeur de 80% avec une sinusoïde à 1 kHz.

*Source : CEM de la conception à l'homologation par T.Williams (Edition Publitrone / Elektor).*

## D Spectres usuels

Le théorème de **Fourier** démontre que tout signal périodique correspond à la somme d'un ou de plusieurs signaux sinusoïdaux.

Une des composantes a la même fréquence que le signal est la **FONDAMENTALE**  
 Les autres composantes ont des fréquences multiples ce sont les **HARMONIQUES**.  
 La représentation graphique est appelée **SPECTRE DE FRÉQUENCE**.



Spectre signal BF ("entrée carte son" pour logiciel WXsat) démodulé APT - WEFAX

## E Systèmes de communications et atténuations

### E.1 Les transmissions de données

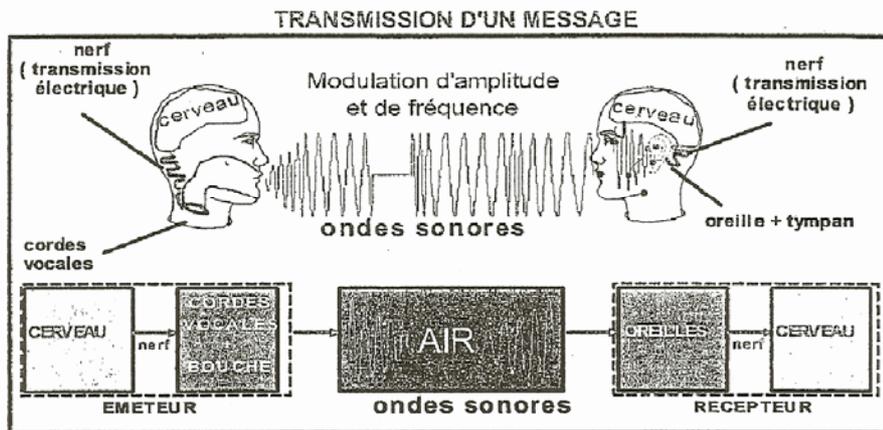
Dossier ressource

LES TRANSMISSIONS DE DONNEES

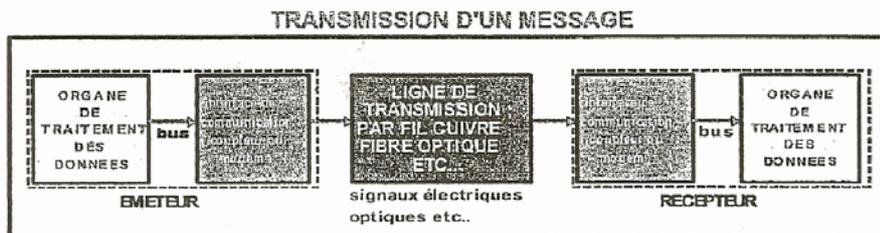
#### PRINCIPE

Analogie avec la communication humaine :

La communication humaine met en oeuvre une chaîne d'organes permettant d'envoyer des messages à un interlocuteur.



Tout comme la communication humaine, la communication entre systèmes s'effectue à travers une chaîne d'éléments .



Bus : il s'agit d'une série de fils électriques par lesquels sont véhiculées, sous forme numérique ( des Octets ), les informations à transmettre.

Coupleur de communication : unité de traitement autonome ayant pour unique fonction de gérer des transmissions de données ( envoie, réception, gestion de la ligne de transmission, vérification d'erreur ETC...).

Modem : fonction identique au coupleur de communication mais adapté aux lignes téléphoniques. Pour faire communiquer plusieurs organes de traitement, il est indispensable de définir un support et un langage compréhensible par ces organes.

Deux organismes ont pour rôle d'éditer les spécifications techniques précises des différents supports physiques de communication : c'est la **NORME**

Ces organismes sont : l' EIA ( Electronic Industries Association ) ( USA )

le CCITT ( Comité consultatif International de télégraphie et téléphonie ) ( Europe )

C'est pour cette raison que certains standards possèdent deux noms différents (ex : RS232 et V24).

Les standards les plus utilisés sont :

RS 232C, RS 422A, RS 485, CENTRONICS, IEEE 488, Boucle de Courant

Dossier ressource

LES TRANSMISSIONS DE DONNEES

TRANSMISSION SERIE / PARALLELE :

La transmission de données consiste à coder des informations de façon à pouvoir être véhiculées sur un support adapté. Dans le cas des transmissions numériques, le codage se fait par des 0 et des 1 logiques. Chaque niveau logique correspondant à un niveau de tension ou courant.

Les différentes normes spécifient les niveaux du 0 et du 1 logique ( niveau de tension, de courant, de fréquence, de front ).

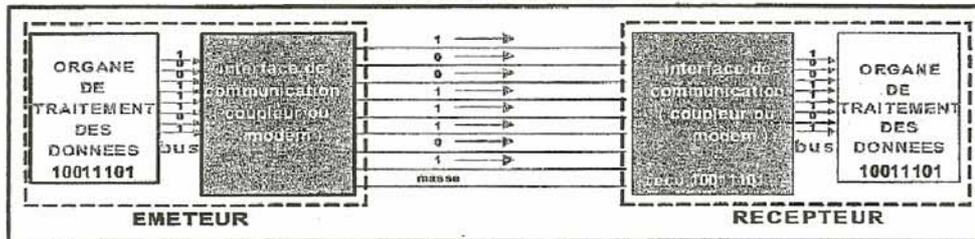
La transmission des bits de données peut être véhiculée de deux façons différentes :

en PARALLELE ou en SERIE .

Transmission parallèle :

Les données en sortie des organes de traitement de l'information sont présentées généralement sous forme de mots de n bits. La transmission parallèle consiste à émettre simultanément ces n bits d'information et nécessite par conséquent une ligne de transmission de n fils appelée bus, associée à des fils de contrôle et de commande .

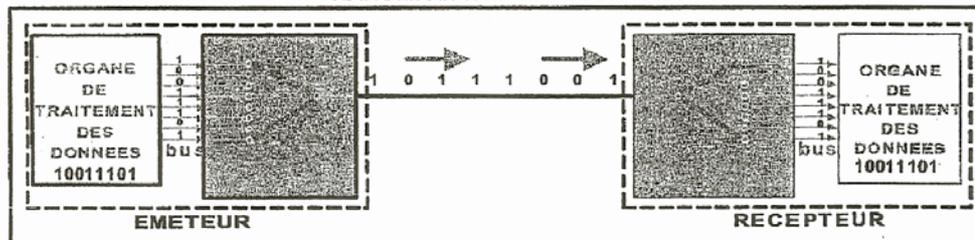
TRANSMISSION D'UN MESSAGE :



Transmission série asynchrone :

En environnement industriel on préfère Utiliser la transmission Série asynchrone plus simple à mettre en oeuvre et moins coûteuse. La ligne ne comporte qu'un fil; les éléments binaires d'informations (bits) d'un mot ou caractère sont alors envoyés successivement les uns après les autre (sérialisation) au rythme d'un signal d'horloge. Le récepteur effectue l'opération inverse: transformation Série/parallèle à partir de son horloge ayant la même fréquence que celle de l'émetteur.

TRANSMISSION D'UN MESSAGE :



- SIMPLEX
- HALF-DUPLEX
- FULL-DUPLEX

## E.2 Amplification et atténuation : dB et dBm

Electronique	Système de transmission de données	Page 1/3
Affaiblissement et niveau		Décibel

### 1 Affaiblissement et gain: définitions générales

D'une manière générale l'*affaiblissement*  $A$  ou le *gain*  $G$  sont définis par le logarithme du rapport de deux puissances apparentes  $P_1$  et  $P_2$  caractérisant l'une les conditions à l'entrée d'un quadripôle (ligne, circuit, filtre, etc.), l'autre celles à la sortie:

$$A = 10 \text{ Log } \frac{P_1}{P_2} \quad \text{dB (décibel)} \qquad A = \text{Log } \frac{P_1}{P_2} \quad \text{B (bel)}$$

$$A = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad \text{Np (néper)}$$

$$G = -A$$

- \* On parle de gain lorsque  $P_2 > P_1$  ( $G > 0$  et  $A < 0$ )
- \* Le *bel* (logarithme en base 10) ou le *néper* (logarithme en base  $e$ ) sont des *pseudo-unités* (sans dimension) semblables.

On peut passer de l'une à l'autre par les relations

$$1 \text{ Np} = 20 \text{ Log } e \text{ dB} \approx 8,68 \text{ dB}$$

$$1 \text{ Np} = \quad \quad \quad \text{B} \approx \quad \quad \quad \text{B}$$

$$1 \text{ B} = \frac{\ln 10}{2} \text{ Np} \approx 1,15 \text{ Np}$$

$$1 \text{ dB} = \quad \quad \quad \text{Np} \approx \quad \quad \quad \text{Np}$$

<p><i>Rappels mathématiques</i></p> $\log_x (a.b) = \log_x a + \log_x b$ $\log_x a^n = n \cdot \log_x a$ $\log_x a = \frac{\log_y a}{\log_y x} = \log_x y \cdot \log_y a$	□
---	---

- \* L'intérêt d'une représentation logarithmique réside dans la possibilité *d'additionner les affaiblissements et gains partiels* au lieu de multiplier les rapports de puissances.

### 2 Notion de niveau: définition

Le niveau  $L_x$  est l'expression sous forme logarithmique d'une grandeur, généralement une puissance  $P_x$ , et d'une grandeur de référence de même nature, par exemple une puissance  $P_{ref}$ :

$$L_x = 10 \text{ Log } \frac{P_x}{P_{ref}} \quad \text{dB}$$

Nota: dans la suite de l'exposé on ne traitera que des dB qui sont plus utilisés que les Np.

Sur une impédance donnée, la puissance est proportionnelle au carré de la tension. On peut donc écrire:

$$L_x = 10 \text{ Log } \frac{U_x^2}{U_{ref}^2} = 20 \text{ Log } \frac{U_x}{U_{ref}} \quad \text{dB}$$

$$P = E.H \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad \text{pour une antenne de gain unité}$$

Comme  $E/H=120\pi$ ,

$$P = E^2 \frac{\lambda^2}{480 \pi^2}$$

$$E^2 = 480 \pi^2 \frac{F^2}{C^2} P$$

Avec E en  $\mu\text{V/m}$ , F en MHz et P en mW

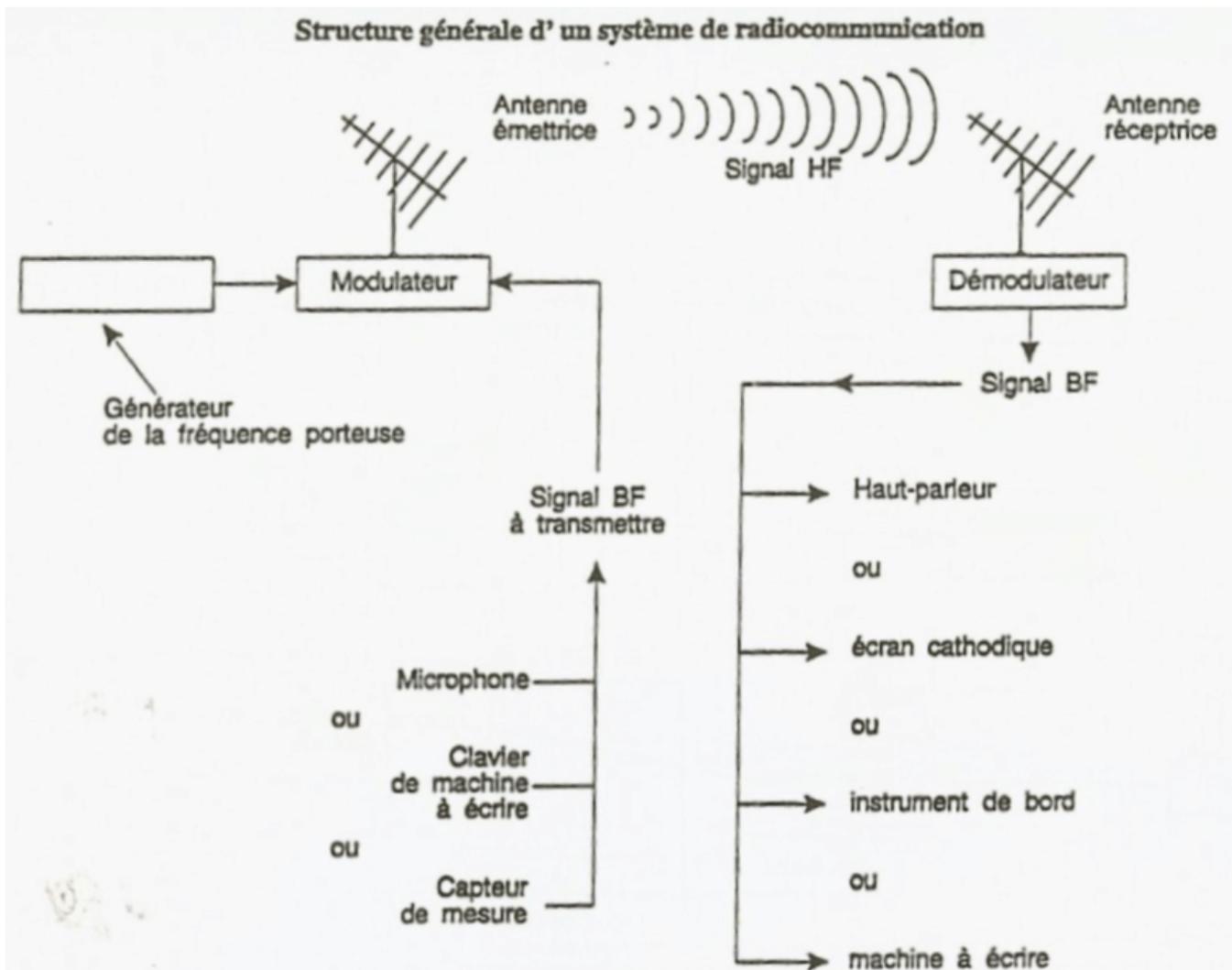
$$\frac{E^2}{10^{12}} = 480 \pi^2 10^{12} F^2 \frac{1}{9.10^{16}} \frac{P}{10^3}$$

$$E_{\text{dB}\mu\text{V/m}} = P_{\text{dBm}} + 20 \log F_{\text{MHz}} + 77,21$$

Si l'antenne a un gain G, il vient :

$$E_{\text{dB}\mu\text{V/m}} = P_{\text{dBm}} - G_{\text{dBm}} + 20 \log F_{\text{MHz}} + 77,21$$

### E.3 Structure générale d'un système de radiocommunication



## F Modulation – Démodulation

### F.1.1 Introduction :

L'un des premiers soucis du physicien, est de transmettre une information à distance. Cela peut aller de quelques mètres à plusieurs millions de kilomètres. L'un des moyens implicite mais réel est la radiocommunication basée sur trois des cinq sens que sont la parole et l'ouïe et depuis quelques dizaines d'années la vue, les radiocommunications connaissent un tel essor de nos jours que certaines restrictions deviennent nécessaires. Le principe de la transmission est la modulation.

### F.1.2 Pourquoi module – t'on ?

La réception d'un signal nécessite des antennes dont les dimensions dépendent de la longueur d'onde du signal (en général de l'ordre de  $\lambda/2$ ). Un signal haute fréquence HF sera facilement transmissible [ H.F correspond à des fréquences  $F > 100$  MHz soit des longueurs d'onde  $\lambda = c / F$  donc  $\lambda < 3.10^8 / 10^8 = 3$  m ; soit une antenne de longueur inférieure à 3 m . Par contre, pour les signaux B.F ( $f < 20$  Hz) la longueur d'onde sera beaucoup plus grande et cela nécessiterait des antennes démesurées et le signal serait rapidement atténué.

#### Exemple :

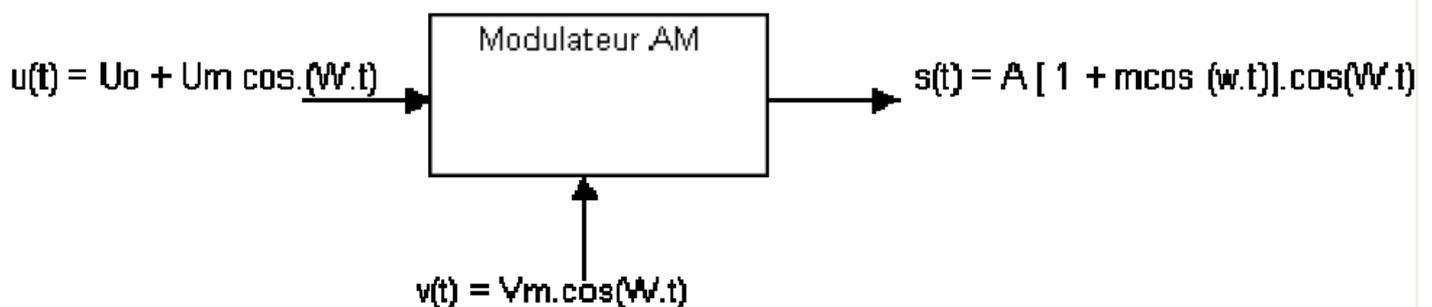
Pour  $f = 10$  Hz,  $\lambda = 3.10^4$  m soit une antenne de 15 km. Le but de la modulation est de translater le spectre d'un signal B.F (sons, musique, parole) vers les H.F pour pouvoir le transmettre facilement par voie hertzienne. La radio, la Télévision, les lignes téléphoniques utilisent le procédé de modulation. Le signal H.F est appelé PORTEUSE. Le signal B.F est appelé Signal Modulateur.

### F.1.3 Les différents types de modulation :

#### A.1.1.s - La modulation d'amplitude ( AM )

La modulation AM : Comme son nom l'indique, ce type de modulation correspond à une modification de l'amplitude de l'onde porteuse par le signal information.

( On considère le coefficient multiplicateur égal à 1 )



$u(t) \Rightarrow$  Signal B.F à moduler ( un signal sinusoïdal dans notre cas )

$v(t) \Rightarrow$  Porteuse , signal H.F

$s(t) \Rightarrow$  Signal modulé en amplitude

La modulation d'amplitude consiste à multiplier le signal B.F et le signal H.F.

$$s(t) = u(t).v(t)$$

$$s(t) = [U_0 + U_m \cos(\omega t)].V_m \cos(Wt) = U_0 [ 1 + (U_m / U_0) \cos(\omega t)].V_m \cos(Wt)$$

On pose :

$$m = U_m / U_0 \quad (\text{taux de modulation})$$

$$A = U_0 \cdot V_m$$

On a donc :

$$s(t) = A[1 + m \cos(wt)].\cos(Wt)$$

L'amplitude du signal modulé est elle varie entre :

$$A[1 + m \cos(wt)]$$

$$U_{max} = A[1 + m] \text{ pour } \cos(wt) = 1$$

$$U_{min} = A[1 - m] \text{ pour } \cos(wt) = -1$$

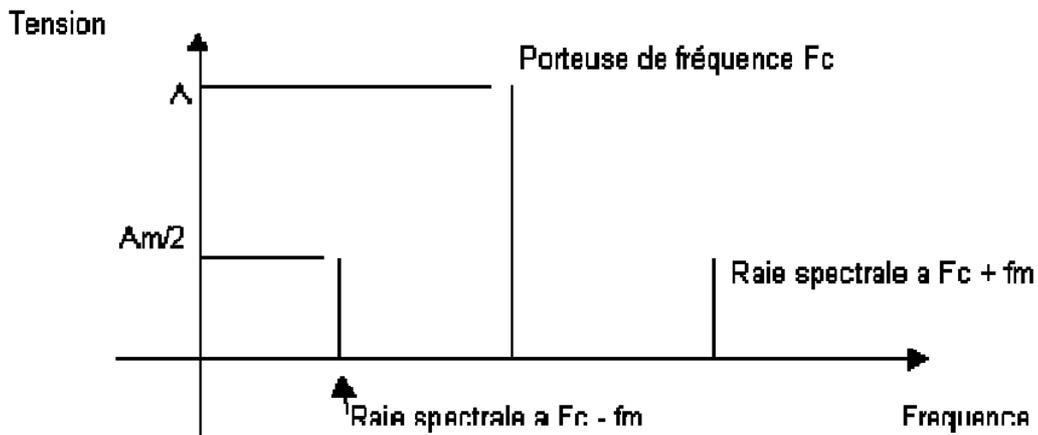
D'après la formule :

$$\cos(a) \cdot \cos(b) = \frac{1}{2} \cdot [\cos(a+b) + \cos(a-b)]$$

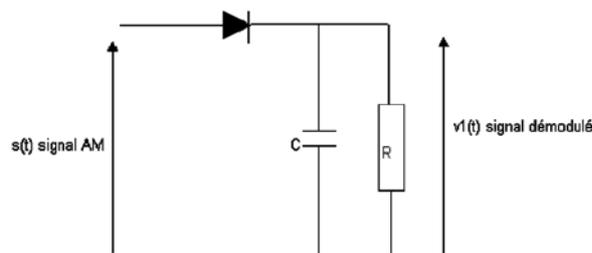
On aura donc une somme de fonctions sinusoïdales :

$$s(t) = A \cdot \cos(W \cdot t) + \frac{1}{2} A \cdot m \cdot \cos[(W + w) \cdot t] + \frac{1}{2} \cdot A \cdot m \cdot \cos[(W - w) \cdot t]$$

### 1er Représentation spectrale du signal modulé AM :



### 2e Schéma d'un démodulateur par détection d'enveloppe :



Condition nécessaire pour une démodulation convenable :

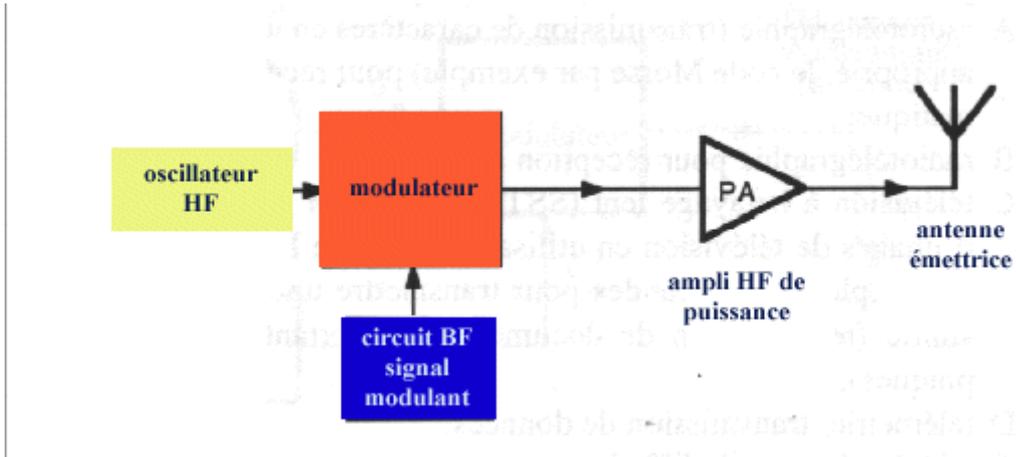
$$m < 1 \quad \text{et} \quad F_c \gg f_m$$

La diode permet de conserver l'enveloppe supérieur du signal. Le passe bas permet d'isoler le signal B.F.

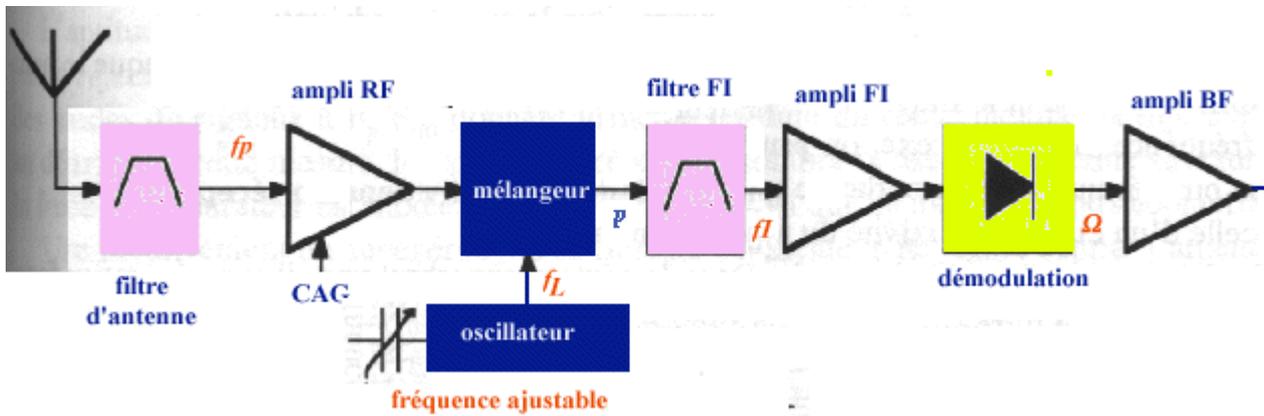
Conditions :

- Pour suivre les variations de la B.F (enveloppe de s(t)), la constante de temps RC doit être petite par rapport à  $T_c = 2 \pi / W$ .
- Pour filtrer la H.F RC doit être grand par rapport à  $T_m = 2 \pi / w$

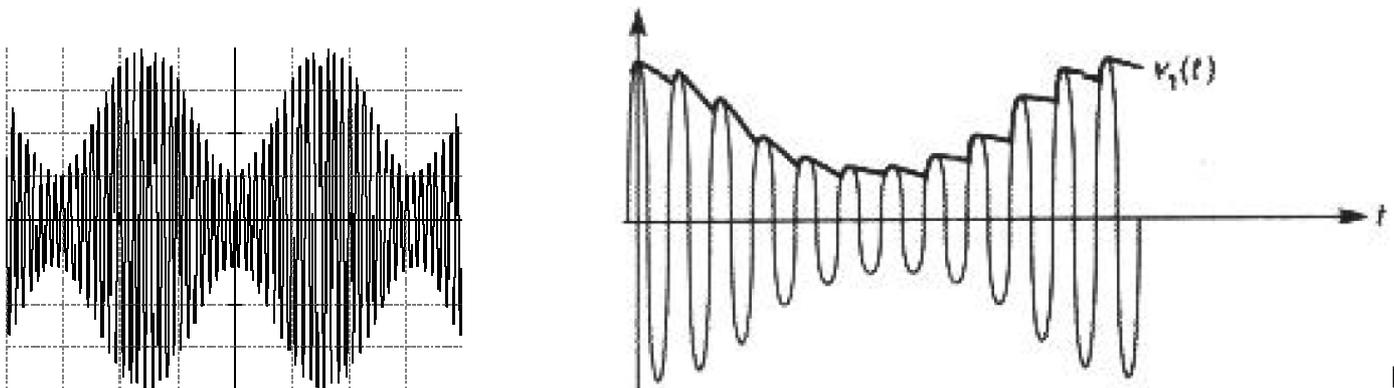
**3e Modulateur**



**4e Récepteur**

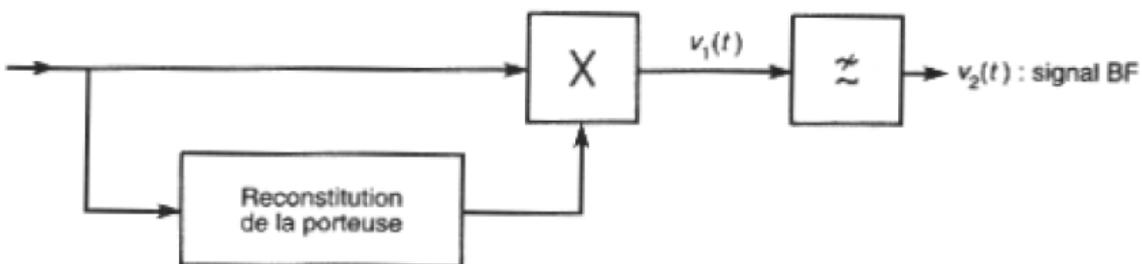


**5e Représentation du signal  $V_1(t)$  démodulé :**



**6e Démodulation cohérente :**

$$s(t) = U_0 [ 1 + (U_m / U_0) \cdot \cos(\omega t) ] \cdot V_m \cdot \cos(Wt)$$



PLL:  $v(t) = V_m \cos(Wt)$

$$\begin{aligned}
 v_1(t) &= S(t) \cdot v(t) \\
 &= U_0 (1 + m \cos wt) V_m \cos Wt \cdot V_m \cos Wt \\
 &= U_0 V_m^2 (1 + m \cos wt) \cos^2 Wt \\
 &= U_0 V_m^2 (1 + m \cos wt) (1 + \cos 2Wt) / 2 \\
 &= U_0 V_m^2 [ (1 + m \cos wt + \cos 2Wt + m \cos wt \cdot \cos 2Wt) ] / 2 \\
 &= ( U_0 V_m^2 [ (1 + m \cos wt + \cos 2Wt) + \frac{m}{2} ( \cos(2W+w)t + \cos(2W-w)t) ] ) / 2 \\
 &= (U_0 V_m^2 (1+m \cos wt) + U_0 V_m^2 \cos 2Wt + \frac{U_0 V_m^2 m}{2} ( \cos(2W+w)t + \cos(2W-w)t) ) / 2
 \end{aligned}$$

Composante HF éliminée par le filtre passe-bas

$$v_2(t) = \frac{U_0}{2} V_m^2 (1 + m \cos wt) = \frac{U_0}{2} \frac{V_m^2}{U_0} (1 + \frac{U_m}{U_0} \cos wt)$$

$$v_2(t) = \frac{V_m^2}{2} (U_0 + U_m \cos wt) = \frac{V_m^2}{2} u(t)$$

On obtient  $v_2(t)$  image du signal BF.

### A.1.1.t - La modulation de fréquence ( FM )

La modulation FM : Comme son nom l'indique ce type de modulation correspond à une variation de la fréquence de l'onde porteuse par le signal information.

HF : porteuse	$A_p \cos W_p t = A_p \cos 2\pi f_p t$
BF : Message $v(t)$	fréquence $f$ pulsation $w = 2\pi f$

Lorsque le message agit sur la fréquence de la porteuse, on obtient un signal à fréquence modulé (FM)

On considère  $v_{fm}(t) = A_p \cos \Theta(t)$

$\Theta(t)$  = Phase instantanée qui dépend de  $v(t)$

$W_p(t)$  = Pulsation instantanée =  $\frac{d\Theta(t)}{dt}$

$f_p(t)$  = Fréquence instantanée =  $\frac{1}{2\pi} W_p(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Theta(t)}{dt}$

=> Expression de la porteuse modulée en fréquence

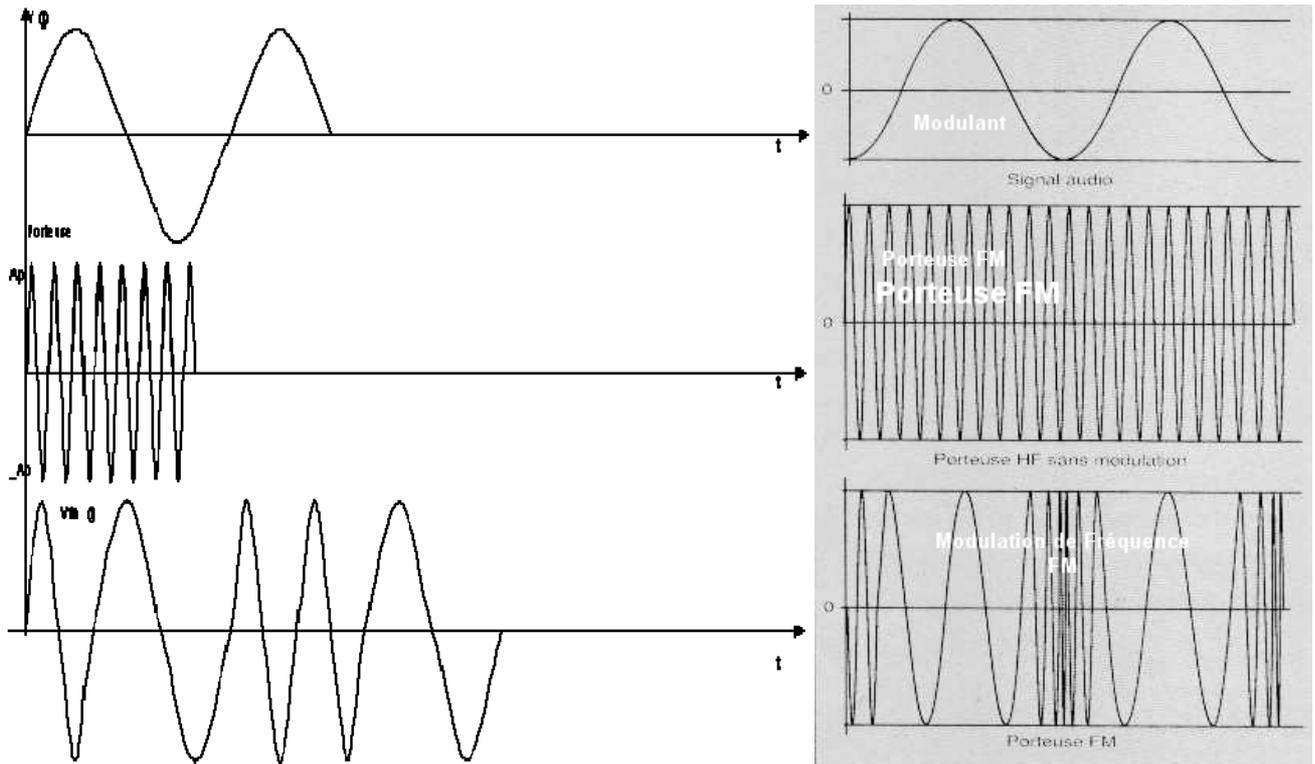
=> On ajoute  $k \cdot v(t)$  à la porteuse

=> La fréquence instantanée est donc  $f_p(t) = f_p + k \cdot v(t)$

=> La pulsation instantanée :  $W_p(t) = W_p + 2k\pi v(t)$

=> Phase instantanée :  $\Theta(t) = \int W_p(t) dt = W_p t + 2k\pi \int v(t) dt$

Donc :  $v_{fm}(t) = A_p \cos [ W_p t + 2k\pi \int v(t) dt ]$



$$V_{fm}(t) = A_p \cos \Theta(t) = A_p \left[ \cos \left( W_p t + 2 k \pi \int v(t) dt \right) \right]$$

cas d'un message sinusoïdal :  $v(t) = V_o \cos w t$

$$\begin{aligned} V_{fm}(t) &= A_p \cos \left[ W_p t + 2k\pi V_o \int \cos(w t) dt \right] \\ &= A_p \cos \left[ W_p t + \frac{2 k \pi V_o}{w} \sin w t \right] \\ &= A_p \cos \left[ W_p t + \frac{k V_o}{f} \sin w t \right] \end{aligned}$$

avec  $\frac{k V_o}{f} = m$  indice de modulation

$$\begin{aligned} \text{d'où } V_{fm}(t) &= A_p \cos \Theta(t) \\ &= A_p \cos \left[ W_p t + m \sin w t \right] \\ &= A_p \cos \left[ 2\pi F_p t + m \sin 2\pi f t \right] \end{aligned}$$

La fréquence instantanée de la porteuse :  $F_p(t) = F_p + k v(t)$   
 varie entre:  $F_p(t) = F_p \pm k V_o$

\* L'**excursion** en fréquence, ou écart max de la fréquence est  $\Delta F_{max} = k V_o$

\* L'indice de modulation  $m = \frac{k V_o}{f} = \frac{\Delta F_{max}}{f}$

\* Propriétés spectrales :

$$\begin{aligned} V_{fm} &= A_p \cos \left[ W_p t + m \sin w t \right] \\ &= A_p \cos(W_p t) \cos(m \sin(wt)) - A_p \sin(W_p t) \sin(m \sin(wt)) \end{aligned}$$

$$V_{fm} = A_p * \cos(W_p * t) * f(t) - A_p * \sin(W_p * t) * g(t)$$

avec : **f(t)** fonction PAIRE et **g(t)** IMPAIRE

$$f(t) = \cos(m \sin w t) = J_0(m) + J_2(m) * \cos(2 * w * t) + J_4(m) \dots$$

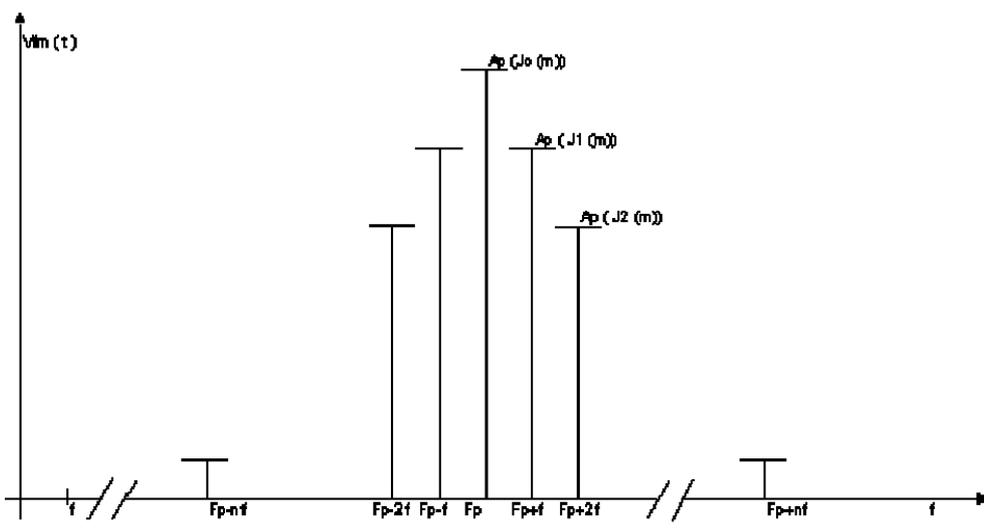
$$f(t) = J_0(m) + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} J_{2n}(m) * \cos(2 * n * w * t)$$

$$g(t) = 2 \sum_{n=0}^{+\infty} J_{2n+1}(m) * \sin((2n+1) * w * t)$$

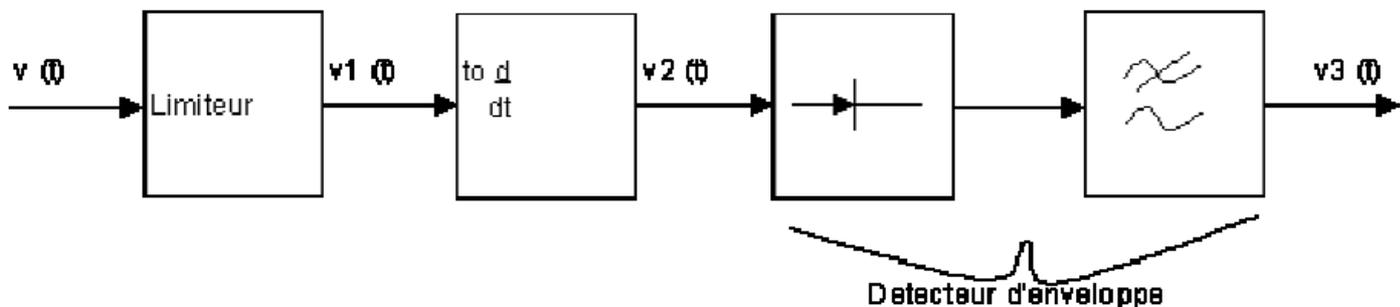
$$V_{fm}(t) = A_p * \cos(W_p * t) * [ J_0(m) + 2 * J_2(m) * \cos(2 * w * t) + 2 * J_4(m) * \cos(4 * w * t) + \dots ] - A_p * \sin(W_p * t) * [ 2 J_1(m) * \sin(w * t) + 2 J_3 * \sin(3 * w * t) \dots ]$$

$$V_{fm} = A_p * [ J_0(m) \cos W_p t - J_1(m) ( \cos(W_p - w)t - \cos( W_p + w )t ) + J_2(m) ( \cos( W_p - 2w ) + \cos( W_p + 2w ) ) - J_3(m) ( \cos( W_p - 3w )t - \cos( W_p + 3w)t ) \dots ]$$

D'où le spectre :



### 1er La démodulation de fréquence par dérivation :



Le signal FM doit être démodulé de telle sorte que les variations en fréquence soit converties en variations d'amplitude.

- Le limiteur est utilisé pour éliminer les fluctuations de l'amplitude dus aux parasites.

On a donc à sa sortie :  **$v_1(t) = V_1 \cos(W_p t + m \cdot \sin(wt))$**

- Le dérivateur permet de séparer les hautes et basses fréquences du signal et aussi d'ajouter une composante continue afin de ne pas être confronté à un recouvrement d'enveloppe par la suite.

On a alors :  $v_2(t) = \tau \cdot \frac{dv_1}{dt} = -\tau \cdot V_1 (W_p + m \cdot w \cdot \cos wt) \cdot \sin(W_p t + m \cdot \sin wt)$

- Le détecteur d'enveloppe est constitué d'une diode (ou d'un pont de diodes) et d'un filtre RC de type passe-bas. La diode permet d'isoler une des deux enveloppes. Le filtre élimine les hautes fréquences.

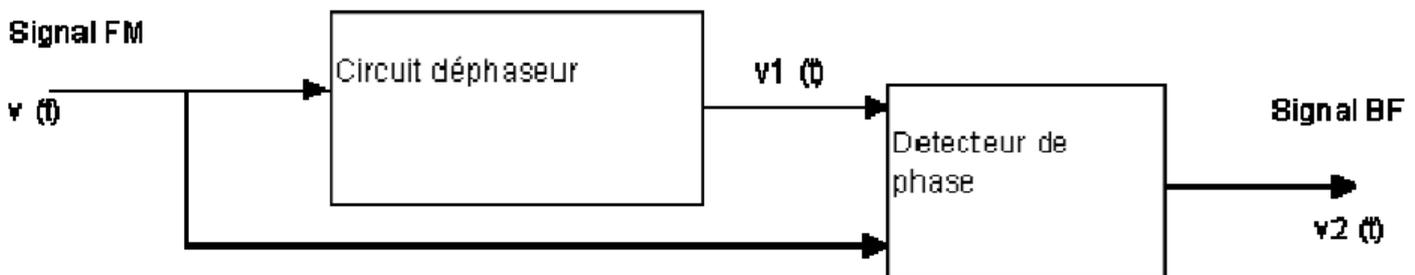
D'où :  $v_3(t) = V_1 \tau W_p + V_1 \tau w \frac{\Delta f}{F} \cdot \cos wt$

Ou encore :  $v_3(t) = V_1 \tau W_p + V_1 \cdot 2\pi \tau k_f \cdot (\Delta f \cdot \cos wt)$

Composante Signal BF continue

$v_3(t) = \Gamma + \mu \cdot \Delta f \cdot \cos wt$

2e Démodulation FM par déphasage :



- Le circuit déphaseur produit un signal  $v_1(t)$  tel que son déphasage soit proportionnel à l'écart de fréquence par rapport à la porteuse.

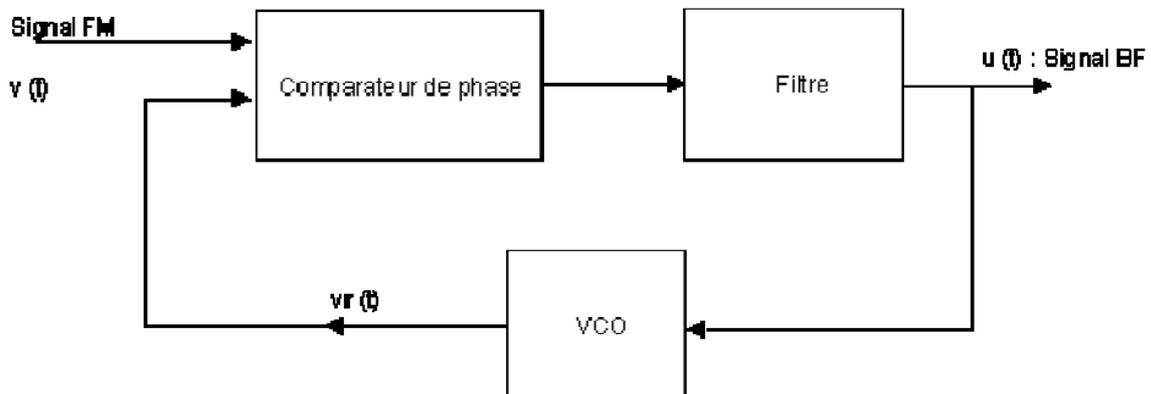
Le signal est de la forme :  $v_1(t) = V \cdot [ \varphi(t) + K_f \cdot \Delta f \cdot \cos(w \cdot t) ]$

- Le détecteur de phase fournit un signal image du déphasage entre  $v_1(t)$  et  $v(t)$ .

**Donc :  $v_2(t) = \lambda \cdot S \cdot \cos wt$  (Rappel:  $V_{fm}(t) = A_p [ \cos W_p t + 2 k_f \int v(t) dt ]$ )**

Signal BF

3rd Démodulation FM par PLL ( Phase Locked Loop ) :



Ce système comporte trois parties. Tout d'abord, le signal  $V_{fm}$  voit sa phase être comparée avec celle délivrée par l'oscillateur commandé en tension (V.C.O).

Ce signal est alors filtré pour reconstituer une image de  $V_{fm}$ .

On obtient alors  $u(t) = \frac{k}{K_0} \cdot A_p \cdot \cos \omega t$

Avec  $f(t) = f_0 + k A_p \cdot \cos \omega t$ , la fréquence de  $V_{fm}$ .

Le V.C.O fournit un signal  $V_r(t)$  qui a pour fréquence  $f_r(t) = f_0 + K_0 u(t)$ .

C'est cet oscillateur commandé en tension qui permet de transformer les diverses variations de fréquences en variations d'amplitudes.

La démodulation par PPL rend une image du signal BF :  **$u(t) = \mu \cdot A_p \cdot \cos(\omega \cdot t)$**

#### A.1.1.u La modulation à bande latérale unique (BLU)

C'est une modulation d'amplitude comportant **une seule raie spectrale**.

La modulation d'amplitude à bande latérale unique ou BLU a le même principe que la modulation d'amplitude simple sauf qu'elle utilise qu'une des deux raies spectrales :

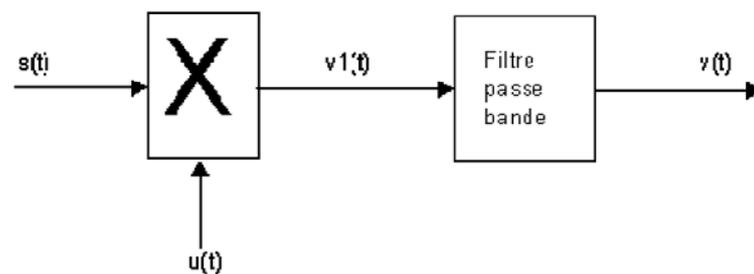
**- l'inférieur**

OU

**- la supérieur**

Il faut nécessairement **f<sub>0</sub>** très grand devant F. Ce système de modulation est utilisé dans les radiocommunications marines et dans la constitution de multiplex analogique par répartition de fréquences pour la téléphonie.

#### 1er Production d'un signal BLU par filtrage :



A la sortie du multiplieur de constante 1 on obtient :

$$v_1(t) = S U \cos \omega_0 t \cdot \cos W t$$

$$= \frac{S U}{2} [ \cos(\omega_0 - W)t + \cos(\omega_0 + W)t ]$$

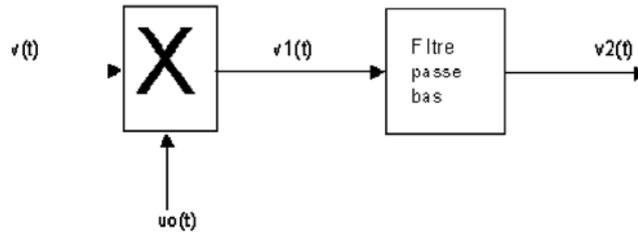
A la sortie du filtre passe bande centré sur  $\omega_0 + W$  on obtient :

$$v(t) = \frac{S U}{2} \cos(\omega_0 + W)t$$

Pour réaliser un filtrage passe bande efficace il faut :

- Que le signal BF ne contienne pas de composante de trop BF.
- Que le filtre ait un coefficient de qualité élevé (utilisation de filtres céramiques).

**2e** Démodulation BLU :



$v(t) = A \cos(\omega_0 + W)t$  : Signal BLU supérieur avec  $A = \frac{SU}{2}$

$u_o(t) = U_o \cos(\omega_0.t)$  : Signal synchrone avec la porteuse  
 A la sortie du multiplieur de constante 1 on obtient :

$$v_1(t) = v(t) \cdot u_o(t) = (A \cos((\omega_0 + W)t) \cdot (U_o \cos(\omega_0.t) ) \\ = \frac{A U_o}{2} (\cos \omega t + \cos(2\omega_0 + W)t)$$

Le filtre passe bas élimine la composante HF d'où :

$$v_2(t) = \frac{A U_o}{2} \cos \omega t = \frac{A U_o}{2} s(t)$$

$v_2(t)$  est l'image du signal BF.

**A.1.1.v** - La modulation de phase ( PM )

La modulation de phase : Comme son nom l'indique ce type de modulation correspond à une variation par saut de phase de l'onde porteuse.

**A.1.1.w** - La modulation Numérique

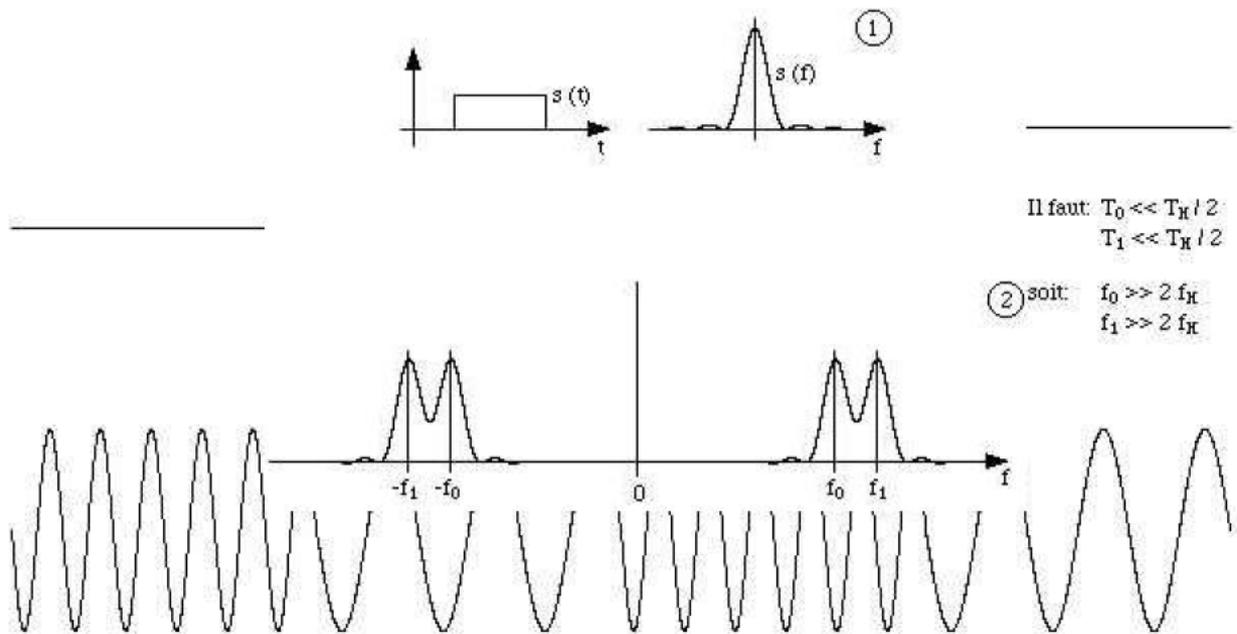
La modulation numérique : Comme son nom l'indique ce type de modulation correspond à une variation de fréquence de l'onde porteuse d'une information numérique (par exemple signal échantillonné)

Cette méthode consiste à émettre un signal sinusoïdal, soit de fréquence  $f_0$  lorsque le bit du signal numérique à transmettre vaut 0, soit de fréquence  $f_1$  dans le cas contraire. Afin que la largeur de la bande de fréquences soit aussi faible que possible, il faut que  $f_0$  et  $f_1$  soient proches l'une de l'autre. Typiquement, l'on retient que  $(f_1-f_0)/2$  doit être de l'ordre de 10% de  $(f_0+f_1)/2$ .

D'autre part, afin que le signal de fréquence  $f_0$  ou  $f_1$  soit défini sans ambiguïté (*i.e.* que ce signal soit émis suffisamment longtemps à cette fréquence pour que le récepteur puisse sans ambiguïté récupérer un signal à cette fréquence), il est nécessaire que la période correspondant à  $f_0$  ou  $f_1$  soit nettement plus petite que la durée d'un état électrique stable du signal numérique initial

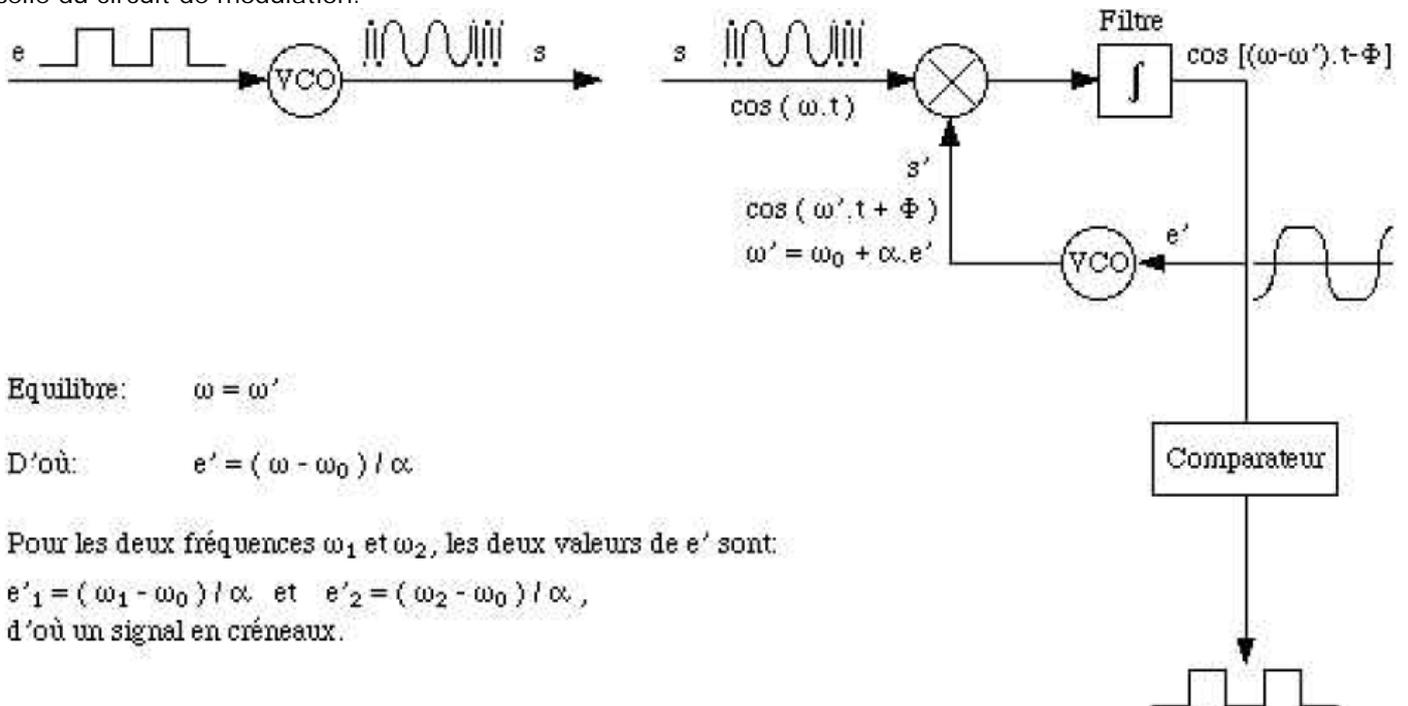
$f_H$  représente la fréquence du signal numérique initial. Ce qui nous amène à prendre  $f_0$  et  $f_1$  de l'ordre de 1MHz.

Modulation en fréquence du signal :



Portrait de phase d'une modulation en fréquence par FSK; Le 1 représente le portrait de phase d'un signal "porte", et le 2 représente le signal binaire après la modulation

Bien sûr, si l'émetteur module de la sorte le signal qu'il transmet, le récepteur doit pouvoir effectuer l'opération inverse, c'est-à-dire la démodulation. Mais cette opération n'est pas, *a priori*, évidente! Aussi une astuce permet-elle de s'en sortir très avantageusement: il s'agit d'employer, là encore, une boucle de phase. Le principe de ce montage est de prendre le même circuit pour la démodulation que celui qui a été employé pour la modulation (circuit à base de V.C.O.), puis d'asservir le circuit de démodulation de telle sorte que sa sortie égale celle du circuit de modulation.



Equilibre:  $\omega = \omega'$

D'où:  $e' = (\omega - \omega_0) / \alpha$

Pour les deux fréquences  $\omega_1$  et  $\omega_2$ , les deux valeurs de  $e'$  sont:

$e'_1 = (\omega_1 - \omega_0) / \alpha$  et  $e'_2 = (\omega_2 - \omega_0) / \alpha$ ,  
d'où un signal en créneaux.

Dès lors, puisque les circuits sont les mêmes, on peut inférer que si leur sortie sont égales, leur entrée le sont aussi: on retrouve ainsi à l'entrée du circuit récepteur le signal qui était à l'entrée du circuit émetteur, c'est-à-dire le signal numérique, qui se retrouve ainsi démodulé!

A.1.1.x -La modulation de fréquence FSK :

Cette modulation permet de distinguer le symbole zéro de l'absence d'information ce qui permet la transmission asynchrone. En revanche, la bande occupée est importante et ne permet pas de transmettre des informations avec un débit important.

A.1.1.y -La modulation de phase à deux états BPSK :

La modulation est simple, mais la démodulation est plus complexe puisqu'il faut récupérer la phase de la porteuse.

A.1.1.z -La modulation de phase à quatre états QPSK :

Cette modulation permet de diviser la largeur de spectre par 2 par rapport à la BPSK.

A.1.1.aa -La modulation à saut de phase minimal MSK :

Les modulations dites à saut de phase minimal sont des modulations à 4 états de phase qui n'autorisent que les transitions d'un état à un état voisin, les composantes spectrales sont considérablement réduites hors de la bande utile (cette propriété est utilisée dans les GSM).

A.1.1.bb -La modulation de phase différentielle DPSK :

Cette modulation est plus simple que la précédente, mais elle est plus sensible au bruit.

A.1.1.cc -Les modulations combinées amplitude-phase MAQ :

Cette modulation est performante et surtout utilisée pour les applications de transmission radioélectriques.

A.1.1.dd Analyseur de réseau et Constellation :

G Equipements de navigation (suite)

G.1 Radio VHF sur avion

G.1.1 Exemple sur A340



## G.2 Les Systèmes d'aide à l'atterrissage :

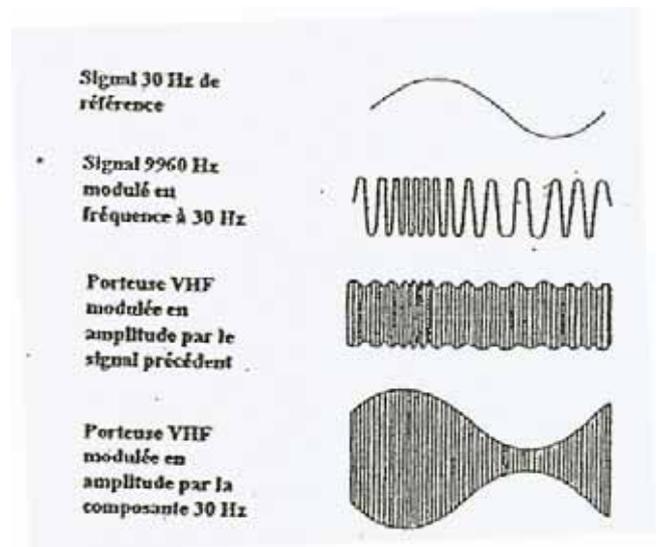
Lorsqu'un avion entame la phase d'approche finale de la piste d'atterrissage, le pilote doit gérer un certain nombre de paramètres ; ceux-ci dépendent du type de l'aéronef et des différentes installations de l'aéroport («ground facilities»).

### G.2.1 Généralités V.O.R. (VHF Omnidirectional Range)

Une antenne sur l'avion capte un signal radio (dans la bande de fréquence de 108 à 118 MHz) émis par un émetteur au sol appelé VOR. L'information délivrée au pilote est présentée par une aiguille qui indique le cap à suivre pour se diriger (ou s'éloigner, selon la sélection) vers cette station.

Toutes les 30 secondes, une modulation à 1020 Hz se superpose permettant la transmission de l'indicatif de la balise en morse (3 lettres).

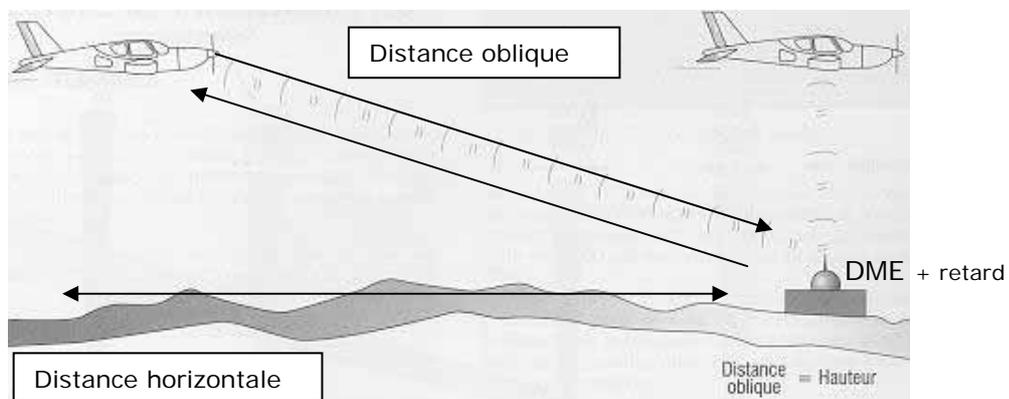
### G.2.2 Signaux modulant VOR



## G.3 D.M.E. ( Distance Measuring Equipment )

Un équipement sur l'avion échange un signal radio (dans la bande de fréquence de 960 à 1215 MHz) avec une station au sol. L'information délivrée au pilote est la distance à cette station, sa vitesse de rapprochement (ou d'éloignement) ainsi que le temps nécessaire pour la rejoindre.

Gamme des UHF (960 à 1215MHz. Espacées de 1MHz)



## G.4 Système I.L.S - Récepteur ILS ( Instrument Landing System )

Une antenne sur l'avion capte deux signaux radio (dans la bande de fréquence VHF de 108,1 à 111,95 MHz pour le localiser, et UHF pour le GLIDE) lors des approches.

L'information délivrée au pilote est l'écart de sa trajectoire par rapport à l'axe de la piste et la pente qu'il doit tenir pour aboutir au seuil.

L'ILS est utilisé pour les atterrissages tous temps en [IFR](#).

## G.5 Radiocompas ADF : Automatic Direction Finder

Une antenne sur l'avion capte un [signal radio](#) (dans la bande de [fréquence](#) de 190 kHz à 1750 kHz) émis par un émetteur au sol appelé NDB (Non Directional Beacon). L'information délivrée au pilote est présentée par une aiguille qui indique la direction de cette station.



Equation des télégraphistes :

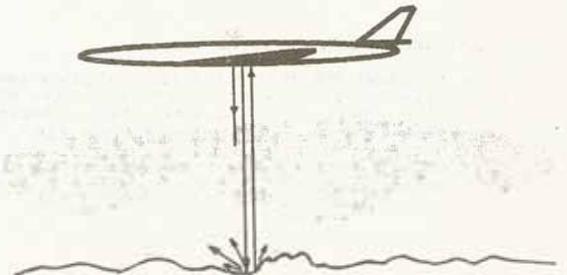
La propagation de l'onde, depuis l'antenne d'émission, jusqu'à l'antenne de réception, après une réflexion partielle par le sol, suit la loi:

$$\frac{Pr}{Pe} = \frac{1}{Kp} \cdot \frac{Ge \cdot Gr \cdot l^2}{16 \cdot z^2}$$

Pe = Puissance émise  
 Pr = Puissance reçue  
 kp = coefficient de pertes  
 Ge = Gain de l'antenne émettrice  
 Gr = Gain de l'antenne réceptrice  
 l = longueur de l'onde émise  
 z = altitude

Le coefficient de pertes tient compte de deux facteurs principaux:

- la variation du milieu de propagation du signal émis en fonction des conditions météorologiques (air sec, pluie, brouillard, neige, ...)
- la variation de la réflexion du sol en fonction de sa nature (plaine, montagne, plan d'eau, roche, végétation, agglomération, ...)

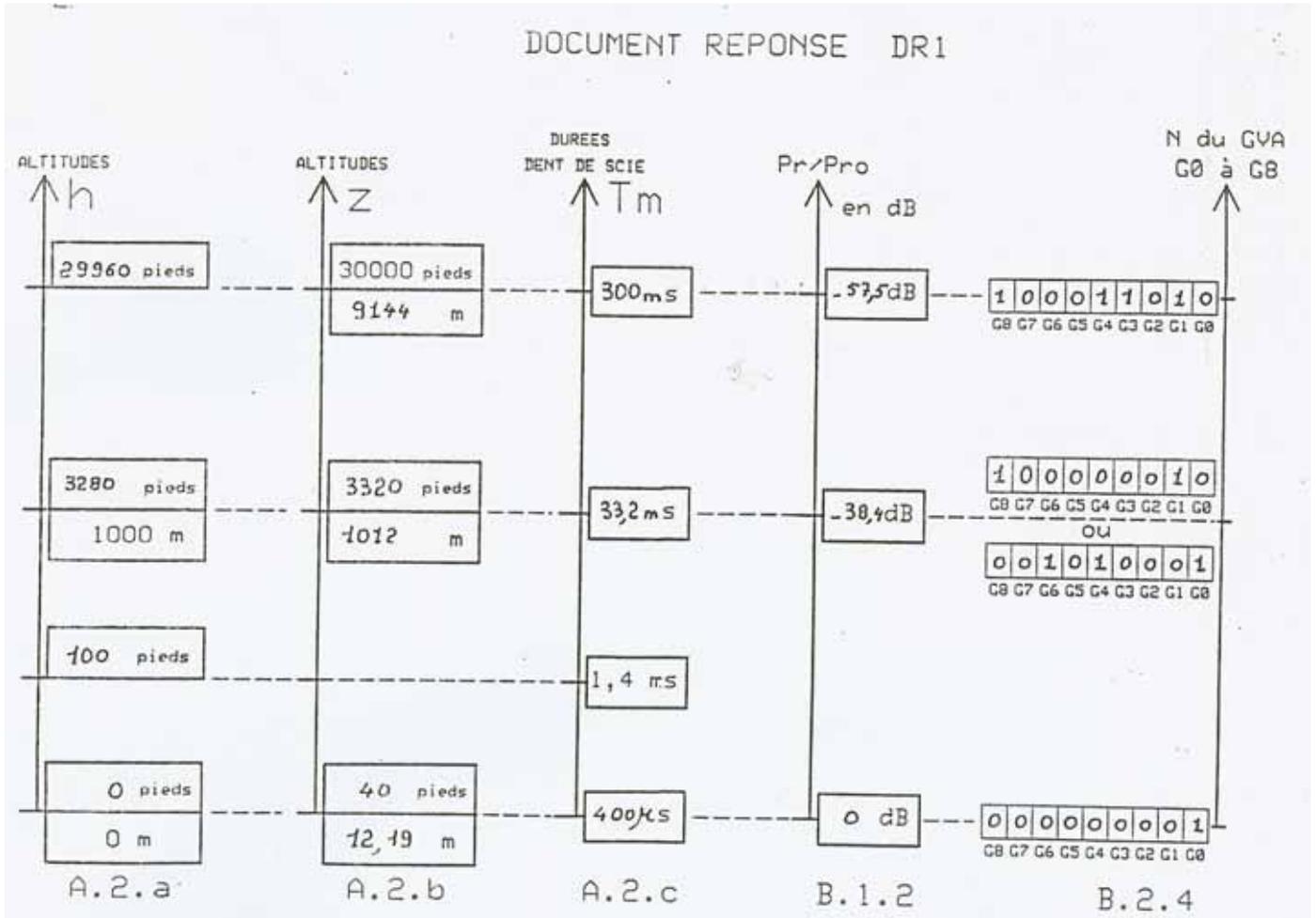


En résumé, le rapport des puissances peut s'écrire:

$$Pr/Pe = K/(Kp \cdot z^2)$$

Pour que le traitement soit effectué avec des signaux électriques de niveau sensiblement constant, il faut utiliser un amplificateur à gain variable en fonction de l'altitude (GVA), dont la valeur  $G(z)$  sera fixée automatiquement à partir de la mesure de l'altitude.

G.6 Radioaltimètre



## G.7 Le Spatial : Bandes de fréquences mises en oeuvre pour les communications par satellite :

Elles sont le plus souvent comprises entre 1 et 30 GHz.. En dessous de 1 GHz les ondes sont principalement réfléchies et diffusées par l'atmosphère. Au dessus de 30 GHz les liaisons satellitaires sont possibles mais l'absorption atmosphérique est importante et la technologie d'amplification plus complexe. La bande de fréquence 1-30 GHz est divisée en sous bandes désignées par des lettres :

Bande Fréquences Services

<b>L</b>	<b>1-2 GHz communications avec les mobiles</b>
<b>S</b>	<b>2-3 GHz communications avec les mobiles</b>
<b>C</b>	<b>4-6 GHz communications civiles internationales et nationales</b>
<b>X</b>	<b>7-8 GHz communications militaires</b>
<b>Ku</b>	<b>11-14 GHz communications civiles internationales et nationales</b>
<b>Ka</b>	<b>20-30 GHz nouveaux systèmes d'accès au réseau large bande</b>
<b>EHF</b>	<b>21-45 GHz communications militaires</b>

Globalement on peut "résumer" les phénomènes de propagation en considérant que plus la fréquence est basse meilleure est la propagation car l'atténuation due aux précipitations croît avec la fréquence. Cette atténuation, causée par l'absorption d'énergie par les gouttes d'eau est ainsi pratiquement inexistante en **bande L** et devient sensible à partir de 4 GHz.

### **La bande C**

Le sens montant (terre vers satellite) est compris entre 5.9 et 6.4 GHz, le sens descendant entre 3.7 et 4.2 GHz. Cette bande est partagée avec d'autres systèmes (faisceaux hertziens) et demande une coordination. La pluie n'a que peu d'effet. Il y a par contre des interférences provenant de systèmes terrestres (les radars par exemple).

### **La bande Ku**

Le sens montant (terre vers satellite) est compris entre 14 et 14.5 GHz, le sens descendant entre 10.7 et 11.7 GHz ainsi que 12.5 GHz et 12.75 GHz. Cette bande est partiellement dédiée aux systèmes de transmission par satellites et ne nécessite pas de coordination. Il y a peu d'interférences de systèmes terrestres. Par contre l'atténuation par la pluie peut être importante (> à 10 dB)

## G.8 Communications par satellite :les principales missions :

- Service fixe :
  - \* Téléphonie, transmission de données : 4 - 6 GHz (Intelsat, Arabsat) et 12 - 14 GHz (Eutelsat, Astra, Telecom 2)
  - \* Télévision directe - radiodiffusion : 12 - 14 GHz (TDF, TeleX)
- Liaisons avec les mobiles : 1,5 - 1,6 GHz et 4 - 6 GHz (Inmarsat)
- Localisation ( GPS, Galileo...) : 1,5 - 2,6 GHz
- Observation, radiodétection...Spot, NOAA, Meteor, Meteosat....

## Principales fréquences utilisées dans les systèmes par satellite

Liaison	Montante	Descendante
Télémessure / Télécommande	2 GHz	2,2 GHz
Télécommunications	6 GHz 8 GHz 14 GHz	4 GHz 7 GHz 11 GHz
Nouveaux systèmes	30 GHz	20 GHz
Radiodiffusion / Télévision	10,7 à 11,7 GHz	11,7 à 12,7 GHz
Liaison avec les mobiles	1,6 GHz	1,5 GHz

### G.9 Les circuits intégrés monolithiques hyperfréquences

La micro-électronique hyperfréquence s'est largement développée dans les années 1970 à 1980, couvrant l'ensemble des domaines d'applications : militaire, civil (professionnel et grand public) et spatial. Remplaçant avantageusement des parties encombrantes en guide d'ondes et/ou lignes coaxiales, elle a consisté dans une première étape à assembler sur un substrat adéquat (verre Téflon, céramique, etc.) les composants actifs et passifs nécessaires à la propagation (amplification, distribution, etc.) des signaux hyperfréquences. La seconde étape a permis de rassembler tous ces composants sur un même substrat et de donner ainsi naissance au Circuit Intégré Monolithique Hyperfréquence (ou MMIC dans sa dénomination anglaise : **MMIC** *Monolithic Microwave Integrated Circuit*), démarche déjà largement engagée avec les Circuits Intégrés Numériques ou Analogiques Basse Fréquence [9, 10]. Les solutions hybrides à composants discrets s'effacent progressivement au profit de solutions monolithiques dont les avantages sont une meilleure reproductibilité, fiabilité et des performances élevées, pour un coût et un encombrement plus faible [11].

## Domaines d'applications des MMIC

### → Les télécommunications La réception satellite

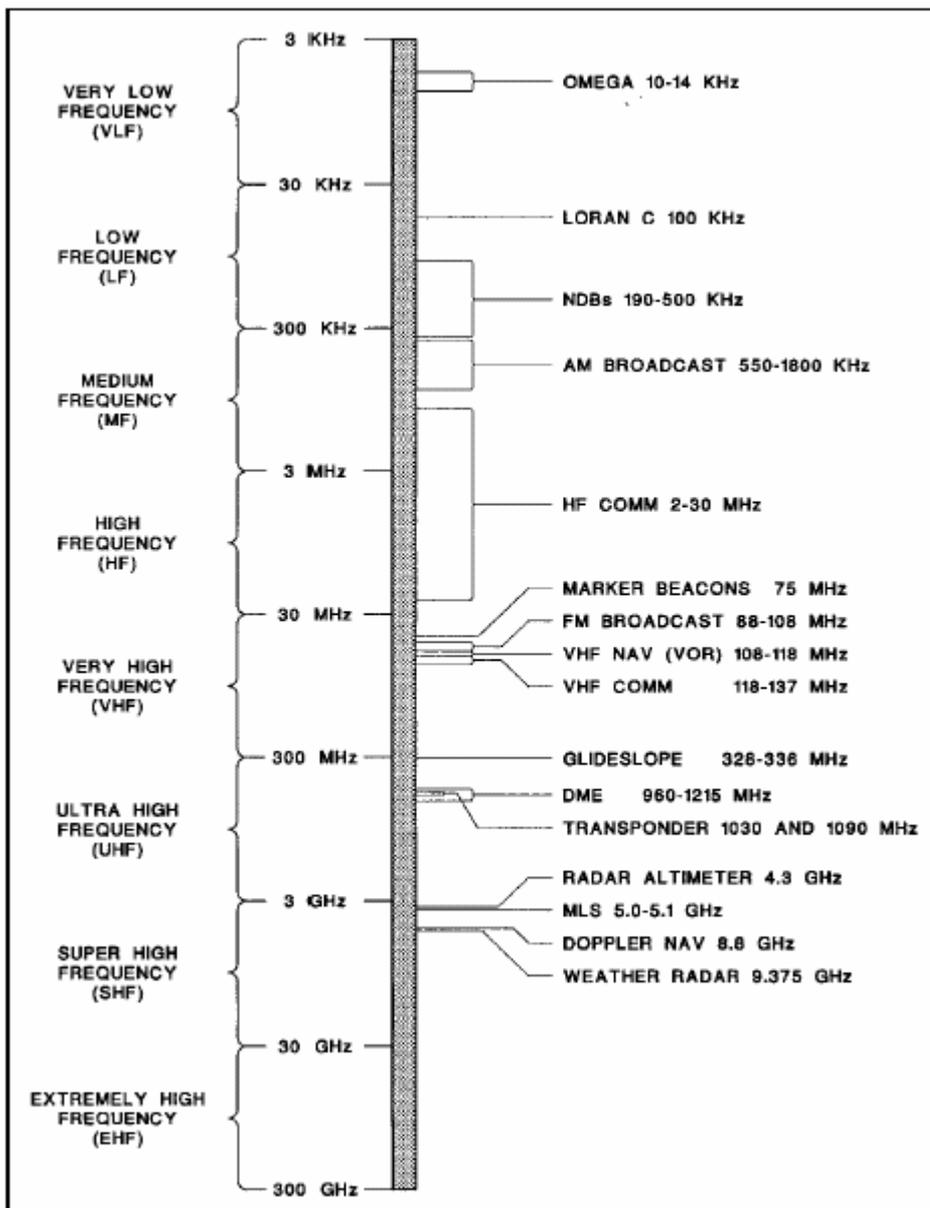
Les communications satellites prennent de plus en plus d'essor avec le lancement de projets ambitieux visant à couvrir notre planète d'une gigantesque toile d'araignée satellitaire [16]. Les diverses applications visées (téléphonie sans fil, transports, multimédia, etc.) dépassent largement le cadre des communications entre individus. Cependant elles reposent toutes sur le transfert de données en ondes hyperfréquences. Parmi les applications existantes, on peut citer les systèmes permettant à une société de transports d'être en contact permanent avec une flotte de camions via des terminaux mobiles VSAT (*Very Small Aperture Terminal*) fonctionnant dans la bande des 20-30 GHz, mais également le système GPS (*Global Positioning System*). A l'origine, développé pour les besoins de l'armée américaine, le récepteur GPS, travaillant autour de 1,5 GHz, utilise trois signaux codés synchronisés émanant de trois satellites pour localiser le point de réception à mieux que 15 m dans les trois dimensions. Cette dernière application avantage le GaAs par rapport au silicium au niveau du facteur de bruit, car la sensibilité du récepteur doit être élevée compte tenu de la faible taille de l'antenne, et également au niveau de la consommation qui doit être la plus faible possible pour un système portable. Le récepteur comprend un amplificateur faible bruit, un mélangeur et une source de fréquence synthétisée. On citera également la balise SART (*Search And Rescue Transponder*) fonctionnant à 9,5 GHz : cette balise renvoie automatiquement un train d'impulsions de localisation lorsqu'elle est interrogée par les radars maritimes ou aéroportés. Enfin, l'application qui a été la première en volume pour les MMIC (circuits

convertisseurs de fréquence à 12 GHz) est le récepteur DBS (*Direct Broadcast Satellite*) développé pour la télévision par satellite [17].

### → **Le spatial**

D'une part la technologie MMIC est théoriquement plus fiable qu'une version hybride des mêmes composants actifs et passifs du fait de l'intégration des interconnexions. D'autre part la réduction de la surface et du poids est également pour le domaine spatial un avantage déterminant. Ainsi le premier démonstrateur d'antenne active pour radar spatial en bande X : le projet SPOT RADAR [19] du CNES, nécessitait une antenne bande X à balayage électronique de 2,3 x 7,2 m<sup>2</sup>, comportant plus de 6000 commandes de phase. La seule solution réaliste consistait à utiliser autant de modules actifs, incluant déphaseurs et amplificateurs (émission et réception), réalisés en série en technologie MMIC, connectés immédiatement derrière les éléments rayonnants. L'exemple précédent concerne l'observation de la terre [20, 21, 22], mais le spatial comprend également le domaine de l'astrophysique et de la radioastronomie. Dans ces domaines, la détection de molécules demande, comme pour les applications météorologiques, le développement de circuits fonctionnant en gamme d'ondes millimétriques et sub-millimétriques [23].

## H Fréquence utilisées en aéronautique



## I Glossaire : sigles & acronymes.

## J Bibliographie :

<http://www.jaa.nl/>  
<http://www.easa.eu.int/>

<http://ama.asso.free.fr/>  
<http://matthieu.papin.free.fr/>  
<http://www.meroweather.com/>  
<http://tipeoloide.free.fr/>

K Utilisation de phénomènes physique pour le CND: Contrôles Non Destructifs

CND = **C**ontrôle **N**on **D**estructif

**RESUME DES DIFFERENTES TECHNIQUES CND**

METHODE	BUT	MATERIAUX	ORIENTATION PREFERENTIELLE	AVANTAGES	INCONVENIENTS
ULTRASONS	- Défauts internes et sous-jacents - Mesures épaisseurs matériaux	Tous	Perpendiculaire au faisceau ultrasonore	- Dimensionnement défauts - Possibilité sondage par face opposée - Facilement automatisable	- Méthode ponctuelle - Nécessité couplage avec pièce
COURANTS DE FOUCAULT	- Défauts débouchants, sous-jacents et internes - Mesure conductivité - Mesure épaisseur couches minces de protection	Conducteur d'électricité	Perpendiculaire aux Courants de Foucault	- Dimensionnement défauts - Contrôle interne rapide des alésages - Possibilité sondage par face opposée	- Méthode ponctuelle
RAYONS X	- Défauts internes et débouchants	Tous	Parallèle au faisceau Rayons X	- Dimensionnement défauts - Détection interne présence corps étranger	- Mise en œuvre lourde (sécurité radioprotection opérateurs) - Méthode semi-globale - Accès des deux cotés de la pièce
THERMOGRAPHIE	- Défauts internes	Matériaux non réflecteurs et non absorbants des infrarouges	Aucune	- Evaluation dimension défauts - Enregistrement image défauts - Contrôle rapide grandes surfaces	- Nécessité chauffage pièce - Méthode semi-globale
MAGNETOSCOPIE	- Défauts débouchants et sous-jacents	Ferromagnétique	Perpendiculaire au champ magnétique	- Méthode globale	- Nécessité préparation soignée de la surface - Aimantation résiduelle à maîtriser
RESSUAGE	- Défauts débouchants et sous-jacents	Sauf matériaux poreux (absorbants)	Aucune	- Méthode globale	- Nécessité préparation soignée de la surface (retrait protection)
FOKKER BOND TESTER	- Décollements internes	Tous	Perpendiculairement au faisceau ultrasonore de résonance	- Evaluation dimension zone décollée	- Méthode ponctuelle - Nécessité couplage avec pièce

## Méthode optique :

**examen visuel de la pièce à l'aide d'instruments** (loupe, microscope pour amplifier les défauts visibles ; miroir, endoscope pour vérifier les zones inaccessibles à l'œil nu).

## Ressuage :

**détection des défauts de surface par pénétration d'un liquide dans défaut.** (méthode qui permet de détecter les plus petits défauts (largeur = 1µm).

**Méthode :** dégraissage, décapage, application du pénétrant, pénétration, nettoyage, pulvérisation du révélateur (agit comme un buvard absorbant le pénétrant), examen sous lumière blanche (pénétrant coloré) ou noire (pénétrant fluorescent).

*Attention :* - ne pas trop pulvériser de révélateur → risque de masquer des indications  
- ne pas traiter ou gratter la surface → risque de fermer les lèvres des criques.

## Magnétoscopie :

**détection des défauts en surface ou au voisinage de la surface sur des matériaux ferromagnétiques** (uniquement) par application d'un liquide contenant de la limaille de fer et par magnétisation de la pièce. Les défauts détectés sont les défauts normaux aux lignes de champ.

**Méthode :** création d'un champ magnétique dans la pièce, application d'un liquide contenant de la limaille de fer, observation de la matérialisation des lignes de champs à la lumière blanche ou noire).

### Champ longitudinal :

- la pièce est entourée d'une bobine parcourue par un champ électrique
- la pièce est placée entre les pôles magnétiques d'un aimant fer à cheval

### Champ transversal :

on fait passer un courant électrique dans la pièce

→ création d'un champ magnétique circulaire dont les lignes de forces sont canalisées par la pièce.

Les lignes de force sont canalisées par la pièce. La présence d'un défaut normal à l'axe est un obstacle à la propagation des lignes de force dont une partie va contourner l'obstacle en créant un flux de fuite. Les particules magnétiques sont attirées par le flux de fuite et leur accumulation donne une forme représentative du défaut.

## Courants de Foucault :

**courant électrique induit dans la pièce** (par un champ magnétique alternatif) qui engendre un champ magnétique secondaire qui tend à s'opposer au primaire (loi de Lenz). Les défauts perturbent le champ induit.

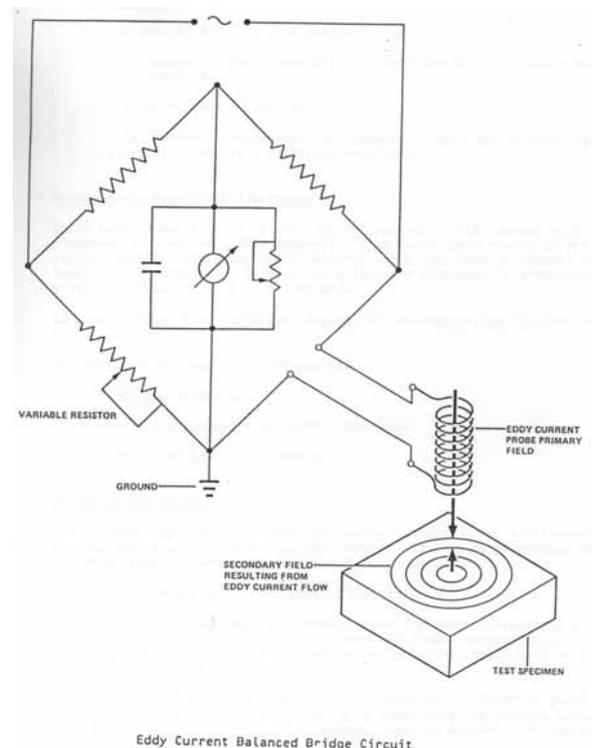
**Appareillage :** bobine de mesure montée sur un palpeur qui est parcouru par un courant alternatif de fréquence connue. Appliqué sur la pièce, il y engendre des courants de Foucault qui dépendent de la conductivité de la pièce et qui agissent sur les caractéristiques électriques de la bobine de mesure.

Défaut → perturbation des courants de Foucault au niveau des endroits défectueux (déviation de l'aiguille du galvanomètre).

### Applications :

- **Mesure de la conductivité électrique** (qui dépend de la composition chimique et thermique du matériau → tri des matériaux, vérification des traitements thermiques, détection des zones brûlées)
- **Détection des défauts :** criques de fatigue, criques de corrosion sous tension en maintenance aéronautique (alliages légers notamment). **Hautes fréquences** (2 à 3 MHz) : détection des défauts débouchant ou proches de la surface ; **Basses fréquences** (≥ 100 Hz) : détection des défauts situés profondément dans la matière.

La profondeur de pénétration des courants de Foucault est donnée par :



$$P = \frac{500}{\sqrt{f \cdot \sigma}} \quad \text{ou} \quad P = \frac{500}{\sqrt{f \cdot \sigma \cdot \mu_R}}$$

Avec :  
 f : fréquence du courant d'alimentation  
 $\mu_R$  : perméabilité du milieu  
 $\sigma$  : conductivité

- Mesures d'épaisseur de couches minces (vernis, couches d'oxydation anodique, peinture).

### Ultrasons :

Utilisés pour la détection de défauts internes et pour la mesure dimensionnelle.

Ondes élastiques de même nature que celle du son dont la fréquence  $f \geq 16\text{KHz}$ . (oscillations régulières des molécules de part et d'autre de leur position d'équilibre, provoquées par une succession de compressions et de dépressions.). Les ultrasons sont basés sur l'effet piézoélectrique (Chaque fois qu'un matériau piézoélectrique est soumis à un état de contrainte donné, il apparaît naturellement une polarisation électrique et inversement).

- **relation entre fréquence (f), longueur d'onde (λ), et vitesse (v) :**

- **formules pour un quartz circulaire** formé de

- une partie cylindrique appelée « zone turbulente de Fresnel » dont la longueur est donnée par :

$$\lambda = \frac{V}{f} = V \cdot T \quad \text{car} \quad f = \frac{1}{T}$$

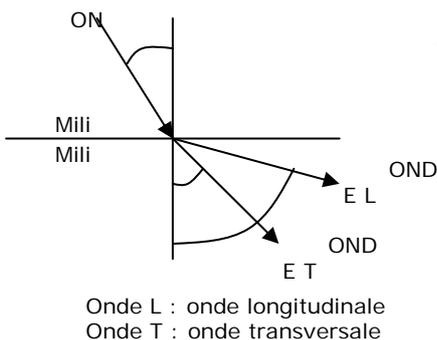
$$L = \frac{D^2}{4\lambda} \quad D: \phi \text{ du quartz}$$

$$\sin \alpha = \frac{1,22\lambda}{D} = \frac{1,22V}{D \cdot f}$$

- une partie conique dont le demi angle au sommet est tel que :

L'idéal pour la détection est d'avoir en même temps un quartz de petit diamètre et un angle  $\alpha$  faible. Il faudra trouver un compromis car D et  $\alpha$  varient en sens inverse.

- **Loi de transmission ou loi de Snell :** à l'interface de 2 milieux, une grande partie de l'énergie est généralement réfléchi. (1 $\mu\text{m}$  d'air réfléchit 90% de l'énergie). → difficulté de couplage (continuité entre le quartz et le milieu de propagation) ⇒ **Utiliser un couplant liquide.**



### Loi de Snell

Concerne les palbeurs dont l'angle d'émission est  $< 90^\circ$  ( $35^\circ$  à  $70^\circ$ )

$$\frac{\sin i}{V_{L1}} = \frac{\sin r_L}{V_{L2}} = \frac{\sin r_T}{V_{T2}}$$

- i : angle d'incidence dans le premier milieu
- $r_L$  : angle de réfraction des ondes L dans le second milieu
- $r_T$  : angle de réfraction des ondes T dans le second milieu
- $V_{L1}$  : vitesse des ondes L dans le premier milieu
- $V_{L2}$  : vitesse des ondes L dans le second milieu
- $V_{T2}$  : vitesse des ondes T dans le second milieu

On tient compte de la caractéristique du milieu de propagation à l'aide de son **impédance acoustique Z**. Elle traduit la résistance au passage des ultrasons dans un milieu.

$$Z = \rho \cdot V \quad \rho : \text{densité} \quad V : \text{vitesse du son}$$

« orbite » : trajectoire résultant du déplacement des éléments.

- **Ondes longitudinales ou de compression :** orbites parallèles à la direction de propagation dont la vitesse

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-\sigma)}} \quad E: \text{module d'Young}$$

$\rho$  : masse spécifique  
 $\sigma$  : coefficient de Poisson

Soit environ 6000m/s

vaut :

- **Ondes transversales ou tangentielles de cisaillement :** orbites perpendiculaires à la direction de propagation et dont la vitesse vaut :

$$v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

G : module de Coulomb  
Soit environ 3000 m/s

Ne se propagent que dans des corps solides car les gaz n'ont pas de module de cisaillement.

- **Ondes de surface ou de Rayleigh :** suivent la surface quelle que soit sa forme. Elles ne se propagent que

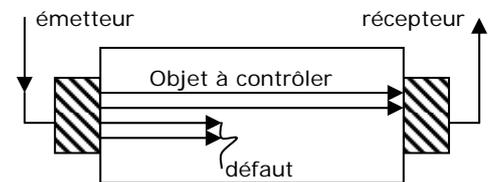
$$v_s \approx \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Soit 9/10

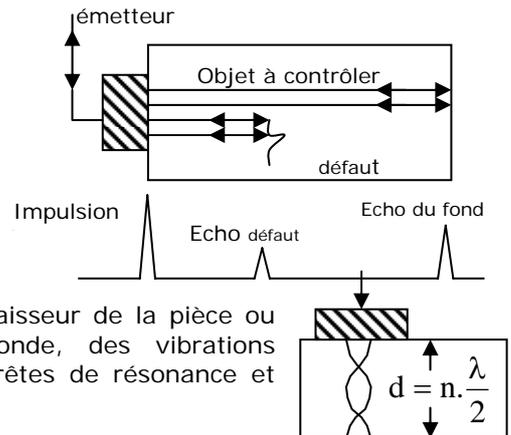
dans des corps solides. Vitesse de propagation :

- **Ondes de Lamb :** oscillation dans toute l'épaisseur du matériau lorsque ses dimensions sont petites par rapport à la longueur d'onde X ou comparables à l. → propagation des ondes sous forme de variations périodiques de l'épaisseur ou bien sous forme d'oscillations de flexion.

- **Méthode d'examen par transparence :** 2 palpeurs (un émetteur et un récepteur) sont placés face à face à chaque extrémité de la pièce. L'émetteur envoie un train d'ondes vers le récepteur. L'énergie recueillie par le récepteur est traduite par une déflexion lumineuse sur l'écran d'un tube cathodique. Le défaut intercepte une partie des ondes émises → baisse de l'amplitude de l'écho de réception.



- **Méthode d'examen par écho ou par réflexion :** le palpeur est à la fois émetteur et récepteur. Il envoie des impulsions très brèves et joue le rôle de récepteur entre deux émissions. Le train d'onde émis se réfléchit sur le fond de la pièce ou sur un défaut. Une partie de l'énergie se réfléchit de nouveau et repart vers le fond de la pièce → réflexions successives possibles. L'énergie de retour est visualisée sur un oscillographe.



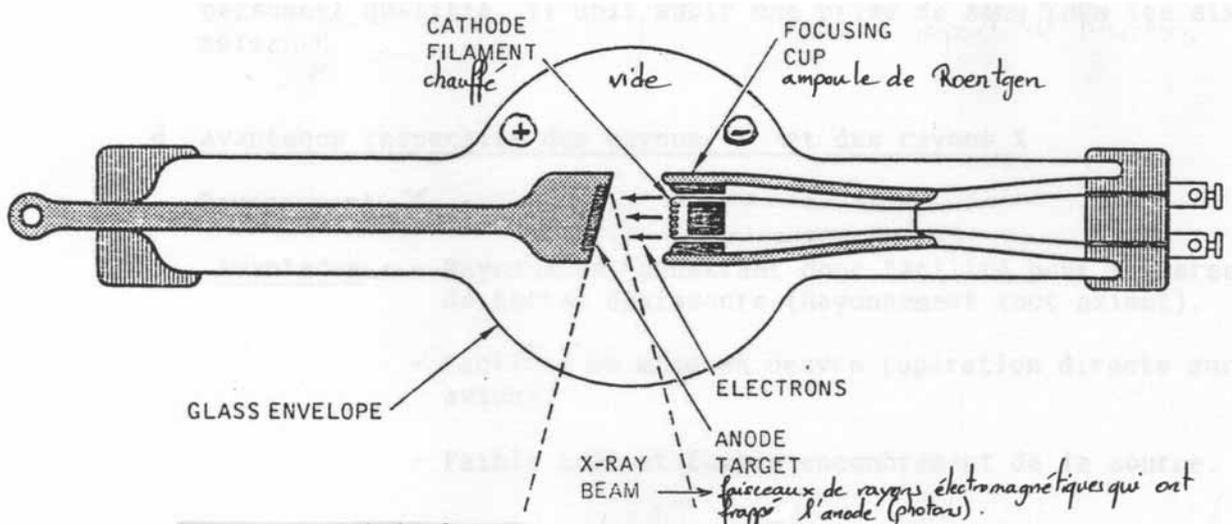
- **Méthode par résonance (Fokker – Bond Tester) :** Le palpeur émet des ondes ultrasonores continues tout en diminuant de façon continue la longueur d'onde. Lorsque l'épaisseur de la pièce ou l'épaisseur jusqu'à un défaut vaut n demi longueur d'onde, des vibrations harmoniques sont engendrées. On peut ainsi observer des crêtes de résonance et déterminer l'épaisseur de la pièce.

**Applications :** contrôle des collages (une zone décollée se traduit par un amortissement moins marqué des échos), détection des criques, mesure des épaisseurs (précision : 1%).

**Étalonnage :** méthode comparative. Nécessité : de connaître la position du palpeur, la fréquence et l'angle d'incidence ; d'identifier les différents échos (parois ou défauts) ; de pouvoir juger l'importance des défauts. ⇒ étalonnage sur un bloc étalon possédant des anomalies de valeur connue.

## Rayons X et $\gamma$ :

**Détection des défauts internes.** Des e- accélérés à grande vitesse viennent frapper une anti-cathode (foyer) de tungstène → émission de rayons X. les rayons émis sont limités à un faisceau de 40° d'ouverture. Le film est placé le plus près possible de la pièce. Unité de mesure : le Roentgen # rem.



Les rayons sont en partie absorbés par la pièce (dépend de la nature du matériau et de l'épaisseur traversée. (épais → clair ; fin → foncé).

**Paramètres de contrôle :** tension d'alim en kV, intensité (qq mA), temps d'exposition (1 à 5mn ou +), distance entre source et film, type de film).

**Sécurité :** salles équipées de mur en plomb (7mm), zone évacuée autour de l'avion pendant l'irradiation.

	Rayons $\gamma$	Rayons X
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>- rayonnement pénétrant (tout azimut. Faciliter de traverser les fortes épaisseurs</li> <li>- facilité de mise en œuvre (directement sur avion)</li> <li>- faible coût et faible encombrement de la source</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- très bonne qualité d'image due au choix du rayonnement</li> </ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>- temps de pose long</li> <li>- faible durée de vie</li> <li>- contraste sur cliché moins bons qu'avec rayons X</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Equipement non autonome</li> <li>- Equipement encombrant</li> <li>- Nécessité de gros investissements</li> </ul>

**Applications :** détection de criques, retassures, inclusions sur pièces de fonderie ; inspection des soudures (pénétration, collages) ; détection de corrosion intérieure sur tubes et châssis ; recherche de corrosion intérieure, écrasement des cellules, jonctions des pains sur panneaux de structures composés.

## Choix du procédé de contrôle et types d'endommagement

Il n'existe pas de méthode universelle de CND. Plusieurs CND sur une pièce peuvent donner des résultats similaires. Le choix sera donc un compromis entre fiabilité de contrôle, facilité d'exécution, coût, rapidité, ...

**Défauts dus à l'usage ou le montage :** inclusions, porosités (fonderie, laminage) ; tapures (traitements thermiques) ; criques (usage, montage).

**Défauts dus au vieillissement et aux efforts encaissés, initiés à partir de la surface des pièces :** corrosion (endroits confinés, corps creux (cdes de vol), liaisons (empilages métalliques collés ou rivés), seuils de porte, planchers, zone des toilettes), fissures de fatigue (zones de concentration d'efforts, attaches de voilures, train d'atterrissage, articulations des cdes de vol).

Il existe des documents concernant les CND : manuel des CND, Bulletin service, Technical Order, ... qui définissent le type de défaut recherché, la zone à contrôler, la méthode de CND à utiliser, les périodicités d'inspection, les critères d'acceptation et de rebut.

## CND des matériaux composites

Les composites sont des matériaux non homogènes (en épaisseur car constitués de plusieurs plis ; dans le plan car constitués de nappes ou de tissus avec des orientations privilégiées des fibres) et non isotropes (dans le plan et en épaisseur car les caractéristiques mécaniques et donc acoustiques varient suivant les 3 directions).

La composition résine + fibres tend à absorber les ondes ultrasons par absorption « mécanique » (frottement) ou par absorption « acoustique » (diffraction). Nécessité de préparer la surface avant le contrôle car l'état de surface du composite influe sur les conditions de couplage.

### Défauts recherchés :

- **dé laminages** = fine lamelle d'air entre 2 plis (dus à une mauvaise application de la pression lors de la mise en forme, ou à la présence d'un séparateur ou d'un agent démoulant, ou à des contraintes statiques ou de fatigue),
- **porosités** = bulles d'air entre 2 plis (dus à un non respect des cycles pression/température au cours de la polymérisation, ou à des plis ou nappes n'ayant pas été conservés dans de bonnes conditions). La porosité peut être répartie sur l'épaisseur du composite, ou concentrée sur quelques plis.
- **Chocs** = combinaisons de dé laminages et de ruptures de fibres perpendiculairement au drapage (produits lors de l'assemblage (chute d'outil), ou du service (grêle, oiseau)). Les défauts résultant de chocs à faible énergie ne sont pas visibles extérieurement ou seulement sur la face opposée ; il seront assimilés et traités comme des dé laminages.
- **Dé colléments** (structure sandwich peau/nida normex/peau ou des inserts titane ou alu). Dus à la présence d'un agent démoulant, ou à une mauvaise préparation de la surface, ou à une mauvaise répartition de la colle entre les deux matériaux, lors de la fabrication. Le comportement aux ultrasons est équivalent à celui des dé laminages → traités comme tels.

Les critères de choix de la méthode de contrôle dépend de la forme de la pièce et de son accessibilité, de son épaisseur et de sa structure, du type et de la taille du défaut recherché.

**Méthode par réflexion :** sur pièces planes pour la recherche de dé laminage ou de porosité ou de chocs. Le capteur doit être perpendiculaire pour un bon contrôle, et il doit être placé tel que la limite de son champ proche  $Y_0$  soit sur la surface de la pièce. Sur site, couplage localisé avec un film d'eau ou utilisation d'un capteur à relais (relais en plexi permettant de comprimer le champ proche) (le temps de recouvrement dans le relais supérieur à celui dans la pièce pour éviter les recouvrements des séquences ultrasonores).

Le capteur est composé :

- D'une céramique piézoélectrique (0,1 à 5 mm d'épaisseur suivant la fréquence utilisée). A chaque épaisseur correspond une fréquence.
- D'une face arrière pour amortir les vibrations et obtenir des durées variables des oscillations. Mais absorbe également l'énergie → amplitude plus faible ⇒ sensibilité plus faible.
- D'une couche en face avant (relais, ou protection d'usure, ou milieu favorisant la propagation des ondes, ou lentille focalisante)
- D'un boîtier et sa prise.

L Résumé : Propagation d'une onde sinusoïdale

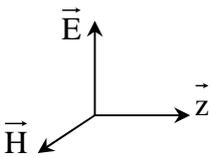
- z : espace
- t : temps
- v : vitesse de phase
- β : constante de phase
- λ : longueur d'onde
- ε : permittivité
- μ : perméabilité

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \cos\left[\omega\left(t - \frac{z}{v}\right)\right]$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \cos(\omega t - \varphi) \Rightarrow \varphi = \frac{\omega \cdot z}{v} = \beta \cdot z = \frac{2 \cdot \pi \cdot z}{\lambda}$$

A différents endroits, l'onde reçue (le signal reçu) n'est pas la même. On peut donc faire de la localisation.

Les ondes électromagnétiques sont régies par **l'équation de Maxwell** :



$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ célérité (vitesse dans le vide)}$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \text{ permittivité } \epsilon_0 = \frac{1}{36 \cdot \pi \cdot 10^9}$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \text{ perméabilité}$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \cdot r}} \quad \text{indice optique : } n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon \cdot r}$$

$$Z_c = \frac{E_{\text{progressif}}}{H_{\text{progressif}}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

Impédance caractéristique de l'espace :

$$Z_{C_{\text{vide}}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 376,6 \Omega$$

## M Quelques avionneurs : aéronefs

- Airbus
- Boeing
- Bombardier Aerospace
- Embraer
- Fairchild Dornier
- ATR
- Iae
- Gulfstream
- EADS Eurocopter
- NH Industries
- Agusta Bell
- Bell
- Agusta Westland
- Denel
- Dassault Aviation
- MiG
- BAE Systems
- Eurofighter
- EADS Casa
- Marshall Aerospace
- Sukhoi
- EADS Space
- MBDA

