

Compléments Chapitre 1 Communication analogique

1) Fréquence

La fréquence, dans ce qu'elle a de plus accessible intuitivement, mesure un phénomène périodique.

Exemple :

Un rameur fait avancer son bateau en plongeant son aviron dans l'eau dans un mouvement cyclique qui se répète régulièrement 40 fois par minute. « 40 fois par minute » est l'expression de la fréquence de ce mouvement périodique en cycles par minute.

Inversement, pour mesurer le temps, on fait appel à des phénomènes périodiques qu'on sait stables.

Exemple :

Une horloge à balancier fait avancer ses engrenages d'un pas égal à chaque oscillation d'un pendule.

C'est ainsi que le système international d'unités définit la seconde comme « la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133^3 ».

En conséquence, on peut définir une fréquence comme le rapport entre deux unités de temps différentes, exprimée en général par le nombre d'unités de l'une pour une de l'autre⁴.

L'analyse spectrale

L'analyse spectrale montre que tout signal décrivant un phénomène périodique peut se décomposer en une somme de sinusoides, dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence du phénomène. Pour les phénomènes non périodiques, on peut considérer que leur période s'étend à l'infini, que leur fréquence est nulle, et que leur spectre est continu.

La transformation de Fourier permet de passer de la description d'un phénomène en fonction du temps à sa description en fonction des fréquences qu'il contient, appelée *spectre de fréquences*, et inversement.

La transformation de Fourier est un procédé mathématique qui suppose que la valeur qui décrit le phénomène est connue en tous temps et le temps existe de moins l'infini à plus l'infini. De même, elle suppose que les valeurs de la fréquence peuvent être quelconques, de moins l'infini à plus l'infini. Elle connaît donc des fréquences négatives.

Relation entre temps et fréquence

Les phénomènes ont à la fois une extension dans le temps, entre un début et une fin, et une dimension fréquentielle, dans la mesure où ils se répètent périodiquement entre ce début et cette fin. On peut les décrire par l'évolution de leur amplitude dans le temps, ou par les fréquences de leur spectre.

Une description temporelle ne contient aucune information fréquentielle ; une description fréquentielle ne contient aucune information temporelle. La transformation suppose qu'on connaisse le signal à l'infini.

Pour décrire adéquatement un phénomène, on peut le découper dans le temps en segments dont on puisse déterminer à peu près le spectre. La relation d'incertitude décrit le fait que plus la durée Δt du segment est longue, et donc plus l'incertitude sur la durée est grande, plus l'incertitude sur la fréquence Δf est faible, et vice-versa.

Cette approche mathématique décrit avec précision des faits connus de l'expérience. Pour définir avec précision une fréquence, il faut observer l'oscillation pendant une longue durée. C'est ainsi que l'horloger, pour régler la fréquence du balancier, doit observer la pendule, qui compte ces oscillations, pendant une longue durée. En procédant ainsi, il obtient la moyenne de la durée des balancements, mais perd toute information sur les éventuelles irrégularités. Inversement, en observant le mouvement pendant une brève période, en soumettant l'horloge à divers mauvais traitements comme le remontage du ressort, des courants d'air ou des vibrations, il reconnaît leur conséquence éventuelle sur le balancement, mais n'acquiert aucune notion précise de sa fréquence. En acoustique musicale, on a depuis longtemps remarqué qu'on ne peut définir la tonie des sons brefs. Identifier un ton implique de discriminer précisément une fréquence fondamentale, ce qui n'est possible qu'avec un minimum de temps d'écoute.

Pulsation

Parmi les phénomènes périodiques, le mouvement de rotation a un intérêt particulier. La vitesse angulaire d'un mouvement de rotation s'exprime souvent, en mécanique industrielle, en *tours par minute*. En physique, on utilise plutôt le radian par seconde, qui simplifie l'expression de toutes les relations. Un tour, considéré comme unité

d'angle, vaut $2 \times \pi$ radians ; par conséquent, un tour par minute équivaut à $\frac{2\pi}{60}$, soit à peu près $0,105 \text{ rd}\cdot\text{s}^{-1}$.

Quand le phénomène périodique est une rotation, la fréquence est liée à la vitesse angulaire, dite aussi *pulsation* ou *fréquence angulaire*.

$$\omega = 2 \pi f$$

où ω (la lettre grecque *omega*) est la pulsation en radians par seconde, π , la constante Pi et f , la fréquence en hertz.

Les coordonnées d'un point en rotation décrivent en fonction du temps des sinusoides de la forme

$$x = a \sin (\omega t) = a \sin (2 \pi f t)$$

où x est l'ordonnée, ω , la pulsation, f la fréquence et t le temps.

Dans le plan de la rotation, les coordonnées par rapport au centre du point en rotation sont $x = \cos t$ et $y = \sin t$. Dans de nombreux domaines de la physique, il est plus simple d'utiliser les nombres complexes pour cet usage, avec x comme partie réelle

et y comme partie imaginaire. D'après la formule d'Euler, $e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta$, où e est la constante de Neper, base du logarithme naturel et j l'unité imaginaire. Avec cette notation, la formule de De Moivre permet de traiter avec élégance les élévations à

une puissance, nécessaires dans de nombreux calculs. La position d'un point en rotation en fonction du temps peut ainsi s'écrire

où p est un nombre complexe, dont la partie réelle est l'abscisse et la partie imaginaire l'ordonnée du point, ω est la pulsation (dite aussi fréquence angulaire, ou fréquence tout court quand il n'y a pas d'ambiguïté), et t , le temps.

Dans cette expression, ω est un nombre complexe, ce qui rend compte de la phase de la rotation, c'est-à-dire de la possible différence de position entre deux points tournant à la même vitesse.

2) Ondes

Quand le phénomène périodique est une onde, la fréquence temporelle et la longueur d'onde sont liées par la vitesse de propagation (célérité) de l'onde:

$\lambda \times f = c$ où f est la fréquence de l'onde (en hertz), c la célérité de l'onde (en mètres par seconde) et λ , la longueur d'onde (en mètres).

Pour les Ondes électromagnétiques (OEM) ce produit est toujours constant.

Exemple :

On peut mesurer la période temporelle T d'une ondulation sur l'eau (des vagues) en se plaçant en un point de la surface de l'eau et en mesurant la durée nécessaire à une crête de vague (ou à un creux de vague) pour être remplacée par la crête suivante (ou le creux suivant) en ce point. Cette durée donne la période et en prenant son inverse on obtient la fréquence de l'ondulation.

En mesurant la durée de trajet d'une crête entre deux points de distance connue, on peut mesurer la vitesse de propagation de l'onde.

IMPORTANT

Dans le domaine de la physique ondulatoire on parlera d'une fréquence :

- d'oscillation mécanique
- de vibration (ressort, corde vibrante, vibration du réseau cristallin, vibration de molécules, etc.),
- d'oscillation acoustique dans le domaine audible (sonore) ou inaudible (infrasons, ultrasons, hypersons, etc.)
- d'oscillation électromagnétique (lumière visible, infrarouge, ultraviolet, etc.).

Dans le traitement du signal numérique, la fréquence d'échantillonnage détermine la bande passante admissible pour le système.

Dans les technologies numériques synchrones, les circuits communiquent entre eux en suivant un signal d'horloge dont la fréquence détermine les capacités de transfert du système, toutes choses étant égales par ailleurs.

3) Bande passante

En électronique, la **bande passante** ((en) *pass-band*) d'un système est l'intervalle de fréquences dans lequel l'affaiblissement du signal est inférieur à une valeur spécifiée (CEI). C'est une façon sommaire de caractériser la fonction de transfert d'un système, pour indiquer la gamme de fréquences qu'un système peut raisonnablement traiter (Dic. Phys.).

La bande passante doit être distinguée de la largeur de bande ((en) *bandwidth*), d'une définition plus générale et qui concerne aussi bien les systèmes que les signaux (CEI).

Par analogie, dans le domaine des réseaux informatiques, spécialement les accès à internet à haut débit, on utilise le terme *bande passante* pour désigner le **débit binaire** maximal d'une voie de transmission. La ligne de transmission jusqu'à l'utilisateur est le composant déterminant. La notion de bande passante s'applique mal aux lignes de transmission, qui atténuent progressivement les fréquences et connaissent des phénomènes de déphasage et de réflexion d'ondes, et dont le débit numérique dépend en outre du niveau de bruit de fond

Largeur de bande vs bande passante

On définit la largeur de bande d'un signal par l'analyse spectrale ou par tout autre moyen. On aboutit à un résultat qui peut être une densité spectrale de puissance ou toute autre représentation détaillée des fréquences qui peuvent se trouver dans le signal. La *largeur de bande* résume ces résultats par une expression du genre

« Les composantes fréquentielles d'amplitude supérieure à 1 % du maximum du signal sont toutes entre 20 Hz et 16 kHz. »

La limite d'amplitude des composantes exprime le fait que ce qui est hors de l'intervalle est négligeable. La plupart du temps, on ne l'indique pas, et on indique « largeur de bande : 20 Hz — 16 kHz »

Pour traiter convenablement ce signal, compte tenu de la tolérance, on doit utiliser un système dont la bande passante est similaire. Si la bande passante du système est plus étroite, le signal se trouve déformé, et pour le reconstituer, il faut lui appliquer un filtrage qui va augmenter le bruit de fond. D'autre part, augmenter la bande passante du système, c'est augmenter sa sensibilité aux interférences et son prix et diminuer sa stabilité.

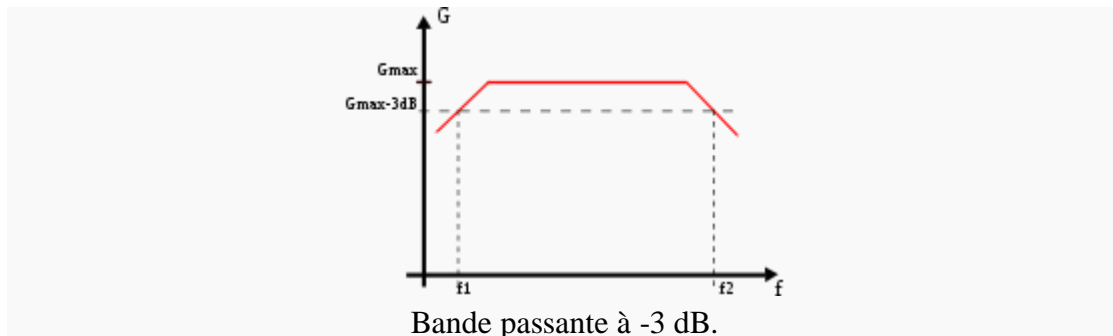
Exemple :

Un système dont la bande passante est 20 Hz — 20 kHz convient pour un signal dont la largeur de bande est 20 Hz — 16 kHz.

La petite marge assure que le système traite convenablement les plus hautes fréquences du signal.

Traitement du signal

La bande passante est l'intervalle, mesurée en hertz, entre la fréquence de coupure haute d'un système et la fréquence de coupure basse. Elle est habituellement notée *B* ou *BP*.



La bande passante dépend de la définition adoptée pour la fréquence de coupure. Quand on s'intéresse plus à la transmission correcte des signaux en deçà de la fréquence de coupure, qu'à la suppression des signaux au-delà, on définit souvent la fréquence de coupure comme celle où la puissance est divisée par deux (-3 décibels) par rapport au niveau nominal.

Bande passante à -3 dB

La bande passante à -3 décibels d'un amplificateur est la gamme de fréquences où le gain en puissance est au moins égal à la moitié du gain maximal. La valeur du gain en décibels est par définition dix fois le logarithme décimal du rapport des puissances. Une division par deux correspond donc à

Comme la puissance, sur une charge résistive, est proportionnelle au carré de la tension, cela correspond à la région où le gain en tension est au moins égal au gain maximum divisé par $\sqrt{2}$, soit -3 dB (Neffati 2006), puisque pour les grandeurs de champ, la valeur en décibels se calcule en multipliant le logarithme décimal du rapport par 20.

Autres définitions

Pour répondre à d'autres besoins, comme la suppression des signaux hors bande, ou une évaluation de l'importance perçue du signal transmis, on peut définir des bandes passantes plus larges ou plus étroites. Il faut alors le préciser.

De manière plus générale, la bande passante à -x dB est la gamme de fréquences où le gain du filtre est supérieur au gain maximum divisé par $10^{x/20}$, par exemple

pour -3 dB : $10^{0,15} \approx (\approx 1,41)$

La **largeur de bande** est la plage de fréquences d'une source de vibration. On peut aussi parler de largeur de spectre. Elle correspond à l'encombrement spectral, c'est-à-dire l'intervalle entre les fréquences basse et haute utilisées par la source de vibration (sonore, radio ou optique).

En électronique, on en parle, par exemple, pour exprimer le domaine de fréquence de travail (donc le domaine de fréquence amplifié) appelé bande passante défini par des filtres.

Exemple : bande passante d'un oscilloscope veut dire domaine de fréquence de travail

Fréquence de coupure

La **fréquence de coupure** d'un circuit électronique est la fréquence limite de fonctionnement utile d'un circuit électronique. La **pulsation de coupure** est la pulsation correspondante.

Les fréquences de coupure basse et haute définissent la bande passante.

Conventionnellement, cette limite est souvent fixée à la fréquence pour laquelle la puissance de sortie est réduite de moitié, pour un signal d'entrée de même amplitude, par rapport à la puissance de sortie à la fréquence de référence.

4) Définition et réglementation

Le domaine des radiocommunications est réglementé par l'Union internationale des télécommunications (UIT) qui a établi un règlement des radiocommunications dans lequel on peut lire la définition suivante :

Ondes radioélectriques ou ondes hertziennes : « ondes électromagnétiques dont la fréquence est par convention inférieure à 300 GHz, se propageant dans l'espace sans guide artificiel » ; elles sont comprises entre 9 kHz et 300 GHz qui correspond à des longueurs d'onde de 33 km à 1 mm¹.

Les ondes de fréquence inférieure à 9 kHz sont des ondes radio, mais ne sont pas réglementées.

Les ondes de fréquence supérieure à 300 GHz sont classées dans les ondes infrarouges car la technologie associée à leur utilisation est actuellement de type optique et non électrique, cependant cette frontière est artificielle car il n'y a pas de différence de nature entre les ondes radio, les ondes lumineuses et les autres ondes électromagnétiques (exemples : micro-onde, radar, etc.).

De nombreuses réglementations concernent le partage des fréquences pour différents usages, certains usages ou encore l'exposition de travailleurs à certains champs électromagnétiques, dont via la réglementation européenne².

Spectre radiofréquence (Terminologie officielle)

Une **onde radio** est classée en fonction de sa fréquence exprimée en Hz ou cycles par seconde ; l'ensemble de ces fréquences constitue le **spectre radiofréquence**. Le spectre est divisé conventionnellement en bandes d'une décade, dont les appellations internationales sont normalisées. Les appellations francophones équivalentes sont parfois également utilisées dans les textes français.

Désignation internationale	Désignation française	Fréquence	Longueur d'onde	Autres appellations	Exemples d'utilisation
ELF (<i>extremely low frequency</i>)	EBF (extrêmement basse fréquence)	3 Hz à 30 Hz	100 000 km à 10 000 km		Détection de phénomènes naturels
SLF (<i>super low frequency</i>)	SBF (super basse fréquence)	30 Hz à 300 Hz	10 000 km à 1 000 km		Communication avec les sous-marins
ULF (<i>ultra low frequency</i>)	UBF (ultra basse fréquence)	300 Hz à 3 000 Hz	1 000 km à 100 km		Détection de phénomènes naturels
VLF (<i>very low frequency</i>)	TBF (très basse fréquence)	3 kHz à 30 kHz	100 km à 10 km	ondes myriamétriques	Communication avec les sous-marins, Implants médicaux, Recherches scientifiques...
LF (<i>low frequency</i>)	BF (basse fréquence)	30 kHz à 300 kHz	10 km à 1 km	grandes ondes ou ondes longues ou kilométriques	Radionavigation, Radiodiffusion GO, Radio-identification

MF (<i>medium frequency</i>)	MF (moyenne fréquence)	300 kHz à 3 MHz	1 km à 100 m	petites ondes ou ondes moyennes ou hectométriques	Radio AM, Service maritime, Appareil de recherche de victimes d'avalanche
HF (<i>high frequency</i>)	HF (haute fréquence)	3 MHz à 30 MHz	100 m à 10 m	ondes courtes ou décamétriques	Organisations diverses, Militaire, Radiodiffusion, Maritime, Aéronautique, Radioamateur, Météo, Radio de catastrophe, etc.
VHF (<i>very high frequency</i>)	VHF (très haute fréquence)	30 MHz à 300 MHz	10 m à 1 m	ondes ultra-courtes ou métriques	Radio FM, Aéronautique, Maritime, Radioamateur, Gendarmerie nationale, Pompiers, SAMU, Réseaux privés, taxis, militaire, Météo, etc.
UHF (<i>ultra high frequency</i>)	UHF (ultra haute fréquence)	300 MHz à 3 GHz	1 m à 10 cm	ondes décimétriques	Réseaux privés, militaire, GSM, GPS, Wi-Fi, Télévision, Radioamateur, etc.
SHF (<i>super high frequency</i>)	SHF (super haute fréquence)	3 GHz à 30 GHz	10 cm à 1 cm	ondes centimétriques	Réseaux privés, Wi-Fi, Micro-onde, Radiodiffusion par satellite (TV), Faisceau hertzien, Radar météorologique, Radioamateur, etc.
EHF (<i>extremely high frequency</i>)	EHF (extrêmement haute fréquence)	30 GHz à 300 GHz	1 cm à 1 mm	ondes millimétriques	Réseaux privés, Radars anticollision pour automobiles, Liaisons vidéo transportables, Radioamateur, etc.

ncy)	ence)				
Téraherertz	Téraherertz	300 GHz à 3 000 GHz	1 mm à 100 µm	ondes submillimétriques	

Autres appellations

Pour éviter les ambiguïtés avec le vocabulaire de l'acoustique et de la sonorisation, on utilise le terme « audiofréquence » de préférence à « basse fréquence » pour désigner des ondes acoustiques (mécaniques) ou des signaux électriques (en rapport avec le son) dans la bande 30 Hz à 30 kHz.

D'autres appellations de bandes ou sous-bandes sont également utilisées en fonction des habitudes techniques :

- Les bandes des micro-ondes ou « hyperfréquences » entre 400 MHz et 30 GHz sont historiquement découpées en demi-octaves correspondant aux guides d'onde standards, appelées : bandes U, L, S, C, X, K (elle-même découpée en Ku et Ka). Cette terminologie est encore très utilisée.
- La bande comprise entre 1 605 et 3 800 kHz³ est souvent appelée « bande marine » et « bande chalutiers ».
- Le terme « moyenne fréquence » désignait la fréquence d'amplification fixe des récepteurs superhétérodynes : on lui préfère aujourd'hui le terme « fréquence intermédiaire » non ambigu.
- Les bandes de radiodiffusion et de télévision terrestre ont également des appellations standardisées :
 - LF : bande GO « grandes ondes »,
 - MF : bande PO « petites ondes »,
 - HF : bande OC « ondes courtes »,
 - VHF : bandes I, II, III,
 - UHF : bandes IV et V.
- Enfin, certaines bandes ont reçu l'appellation de leur usage réglementaire : ainsi, les bandes ISM sont les bandes allouées aux usages domestiques sans licence⁴.

Propagation

Comme toutes les ondes électromagnétiques, les ondes radio se propagent dans l'espace vide à la vitesse de la lumière C et avec une atténuation proportionnelle au carré de la distance parcourue selon l'équation des télécommunications. Cette vitesse diminuera dans un autre milieu que le vide.

Dans l'atmosphère, elles subissent des atténuations liées aux précipitations, et peuvent être réfléchies ou guidées par la partie de la haute atmosphère appelée ionosphère.

Elles sont atténuées ou déviées par les obstacles, selon leur longueur d'onde, la nature du matériau, sa forme et sa dimension. Pour simplifier, un matériau conducteur aura un effet de réflexion, alors qu'un matériau diélectrique produira une déviation, et l'effet est lié au rapport entre la dimension de l'objet et la longueur d'onde.