

Chapitre 3

Quelques exemples de capteurs

1. Capteurs résistifs

1. 1 Capteur à base de jauge d'extensométrie

La jauge est un petit élément résistif qui est collé sur une pièce au point où on veut mesurer la déformation. Cet élément est fait d'un fil fin enroulé selon une direction préférentielle et collé à la pièce par l'entremise d'un support d'isolation. Lorsque la pièce est soumise au chargement, sa déformation est transmise à travers la colle et le support à la jauge. Un changement proportionnel de la résistance en résulte.

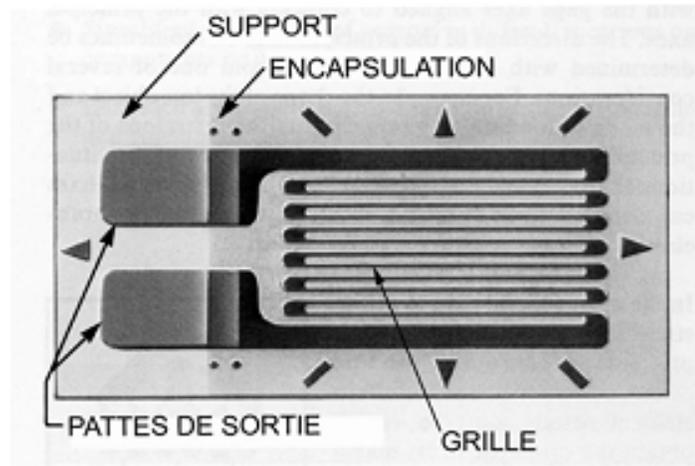


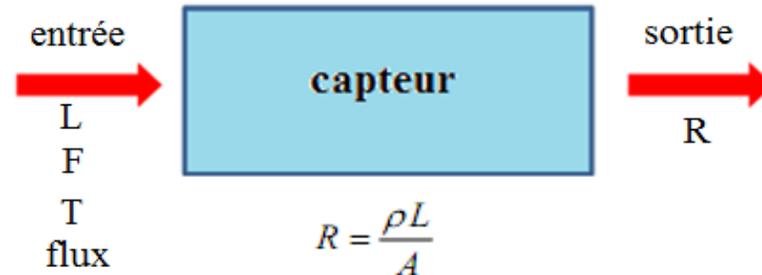
Diagramme d'une jauge

Changement de résistance provoqué par la déformation

La résistance d'un conducteur est définie comme étant:

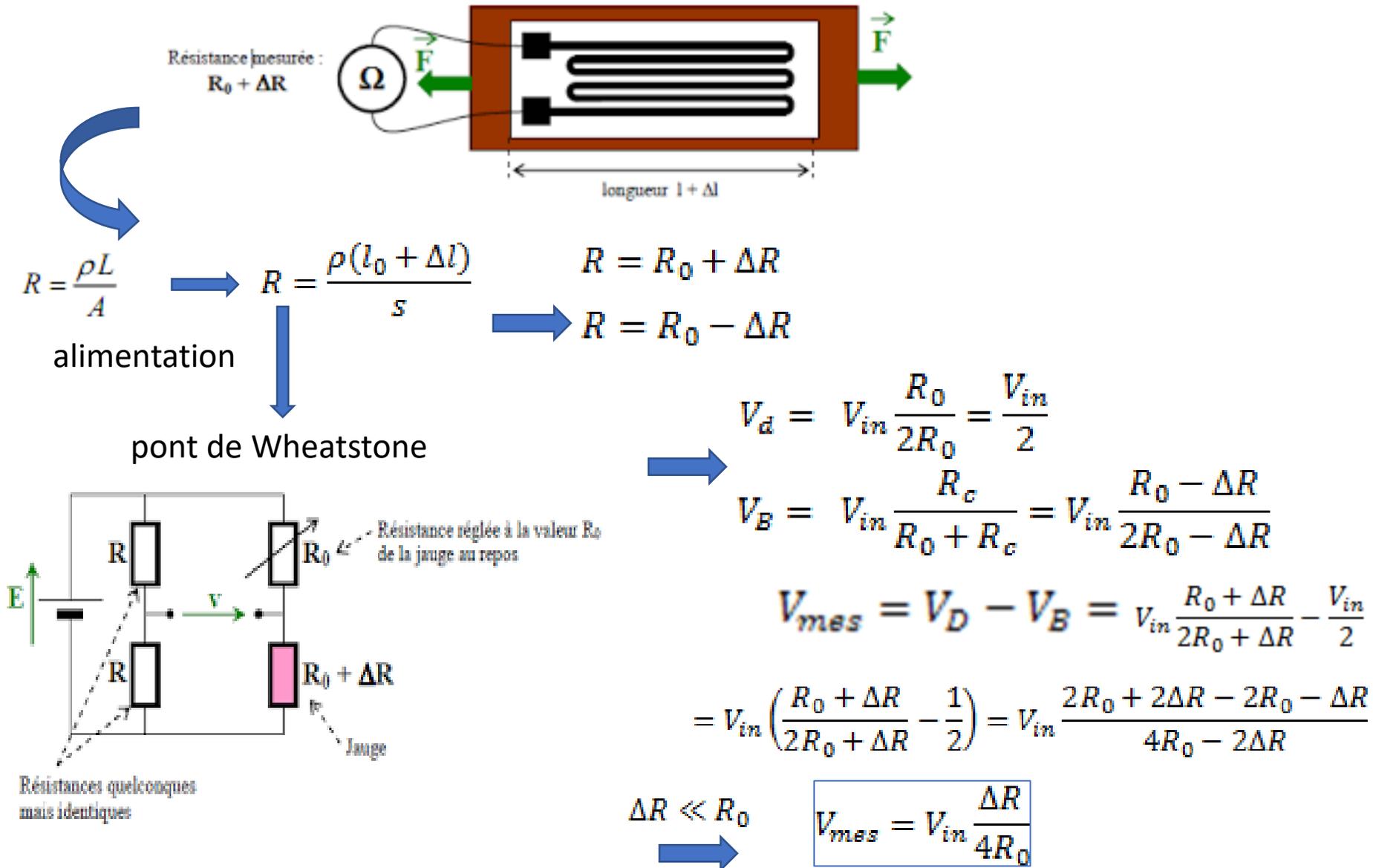
$$R = \frac{\rho L}{A}$$

où ρ = résistivité ($\Omega.m$)
 L = longueur du conducteur (m)
 A = section du conducteur (m^2)



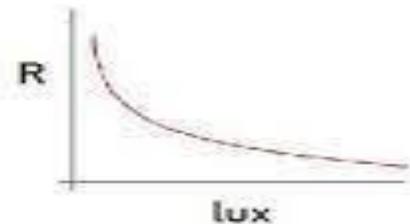
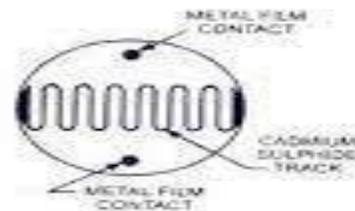
En mesurant donc la résistance, on va pouvoir remonter à ces grandeurs physiques.

1. 1 .1 Capteur de force



1. 1 .2 Capteur de lumière (photorésistance)

- Une photo-résistance est un composant dont la valeur en ohms dépend de la lumière à laquelle il est exposé. On la désigne aussi par LDR (Light Dependent Resistor = résistance dépendant de la lumière).
 - La principale utilisation de la photo-résistance est la mesure de l'intensité lumineuse (appareil photo, systèmes de détection, de comptage et d'alarme...)
- Les matériaux utilisés sont généralement du sulfure ou du sélénure de cadmium qui se comportent comme des semi-conducteurs



Capteurs photographiques (CCD) (dispositifs à couplage de charge)

❖ Un capteur photographique est un composant électronique servant à convertir un rayonnement électromagnétique (UV, visible ou IR) en un signal électrique analogique. Ce signal est ensuite amplifié, puis numérisé par un convertisseur analogique-numérique et enfin traité pour obtenir une image numérique.

❖ Si on voudrait faire une analogie avec les appareils photographiques **argentiques**, les films de ces derniers sont remplacés par les **capteurs**.

1 – Historique, domaine d’application et généralités

❖ Les CCDs (Charge Coupled Devices) ont été inventées au laboratoire Bell en **1969** par George Smith and Willard Boyle (prix Nobel de physique 2009).

❖ Les CCDs sont utilisées dans de nombreuses applications (commerciales, scientifiques & militaires).



Caméscope numérique



Camera numérique

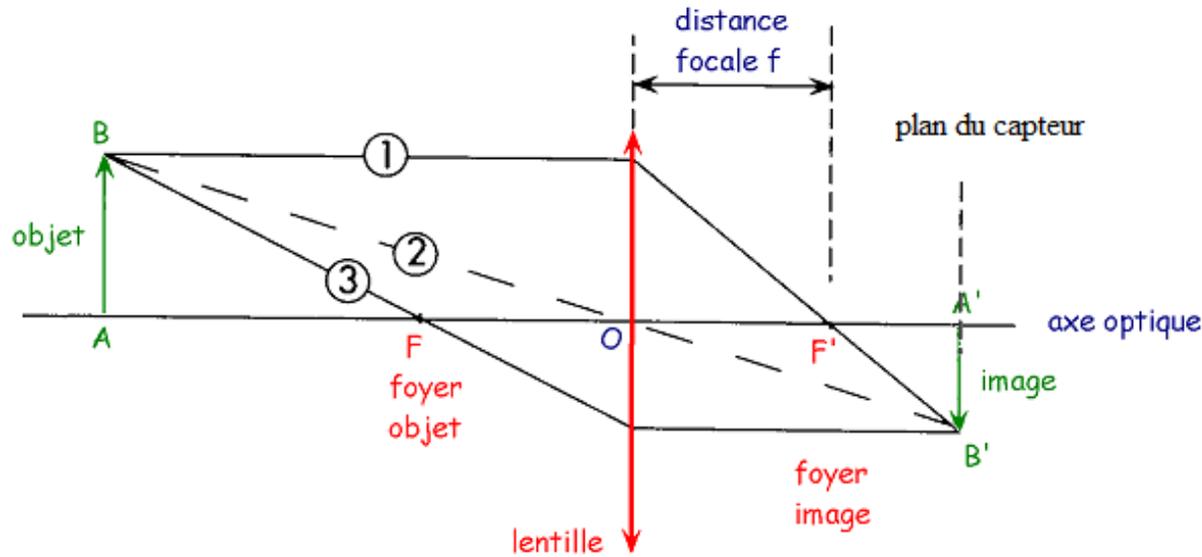


Smartphone

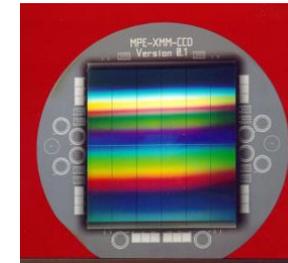
La formation de l'image sur le capteur

Le capteur photographique fonctionne comme un appareil photo classique

La scène à photographier peut être projetée simplement sur le capteur à l'aide d'une lentille convergente définie par sa distance focale f .



Création d'une image par une lentille convergente.

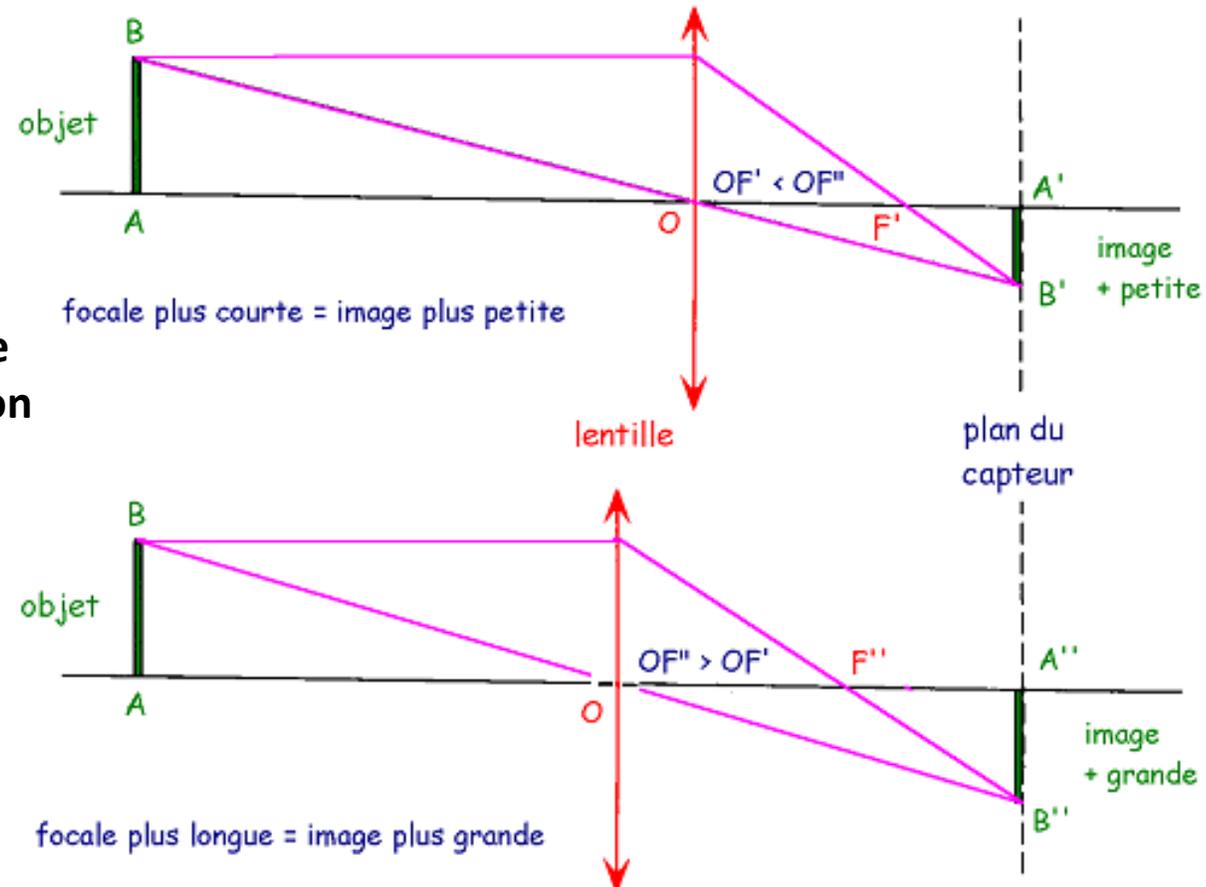


La localisation et la taille de cette image est simple :

- l'objet AB est projeté en une image $A'B'$ renversée
- le rayon (1) parallèle à l'axe optique sort de la lentille en passant par le foyer F'
- le rayon (2) passant par le centre optique n'est pas dévié
- Le point B' se trouve à l'intersection des rayons (1) et (2)
- remarque : le rayon (3) passe par l'autre foyer F , ressort parallèle à l'axe et passe aussi par B'

Pour faire varier la taille de l'image projetée sur le capteur, il faut pouvoir changer la distance focale de la lentille.

Ajustement de la taille de l'image par variation de la focale.



En changeant la distance focale et en déplaçant la lentille pour refaire la mise au point, la taille de l'image varie et permet d'utiliser au mieux la surface du capteur. Pour cela, on peut

:

- * changer d'objectif et passer d'une courte focale à une longue focale.
- * utiliser un objectif à focale variable ou « zoom »

Le principe de base d'un capteur repose sur deux concepts importants

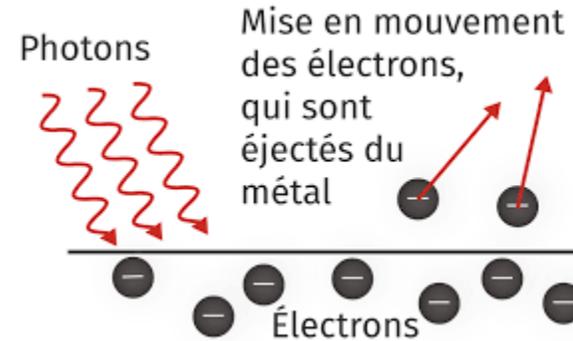
condensateur



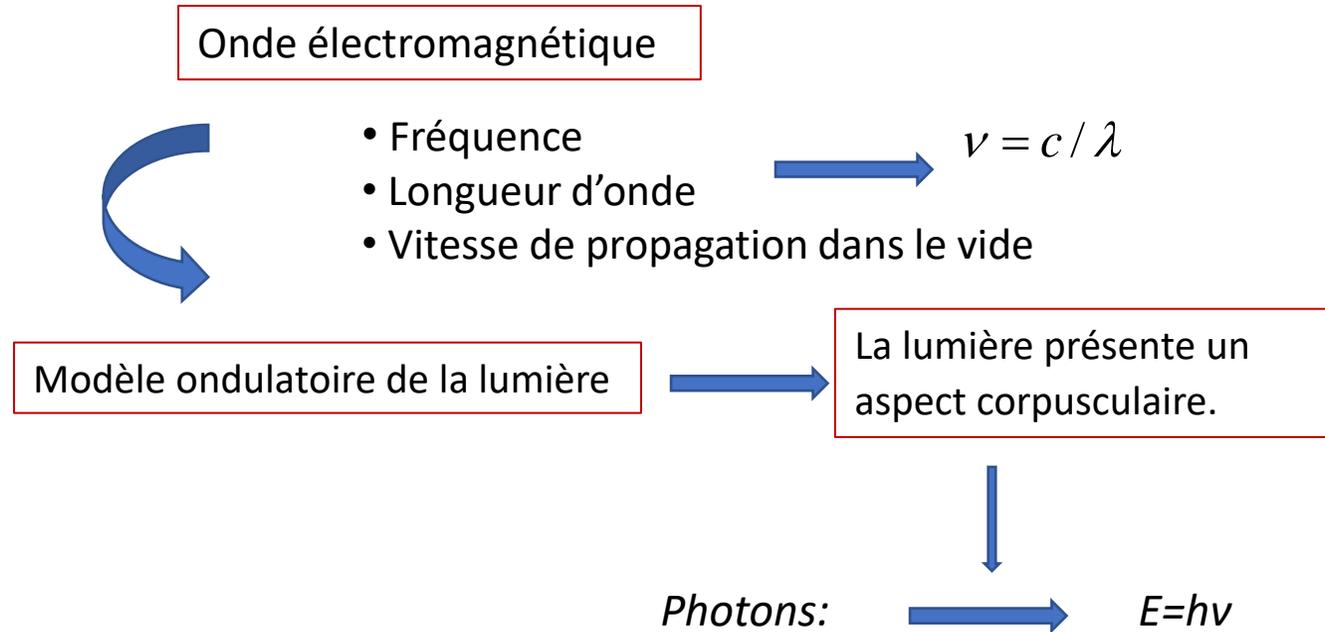
Pouvoir stoker de l'énergie électrique où $Q=CV$

l'effet photoélectrique

En physique, l'effet photoélectrique désigne en premier lieu l'émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière.



Effet photoélectrique



Exemple: Silicium : semi-conducteur



Semi-conducteur = propriétés intermédiaires entre isolant et conducteur / un e- puisse passer dans la bande de conduction par agitation thermique ou par l'application d'un champ électrique.

Lorsqu'un e- passe dans la bande de conduction, une "lacune" se crée dans la bande de valence. Cette "lacune" peut être assimilée à une particule virtuelle appelée trou (charge opposée à celle de l'e-).

Pour le silicium, $E_g = 1,12$ eV à 300 K.

Principe de fonctionnement

1. La génération de charges

2. La collection et stockage des charges

3. Le transfert de charges (la lecture)

4. La mesure des charges (chaîne de lecture)

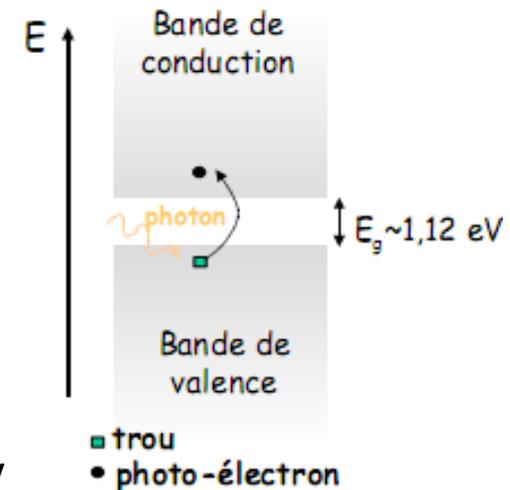
1. La génération des charges

- * Les interactions des photons avec le silicium du CCD se font dans le domaine photo-électrique.
- * Lors de ces interactions, un photon cède toute son énergie à un électron appartenant à un atome de silicium.
- * Ceci donne naissance à une ou plusieurs paires électron (e)/trou (h)
- * Le nombre de paires e-/h formés dépend de l'énergie des photons incidents.

A partir de quelle **énergie** est-il possible de former des photo-électrons ?



- * L'énergie nécessaire pour produire une paire e-/h est $w=1.12$ eV pour le silicium à $T = 300$ K.



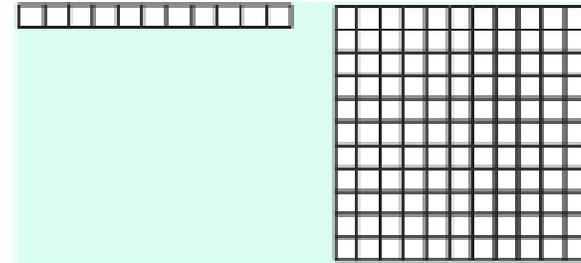
Mouvement des charges

Un capteur photographique complet est un assemblage de capteurs en Silicium selon un pavage régulier.

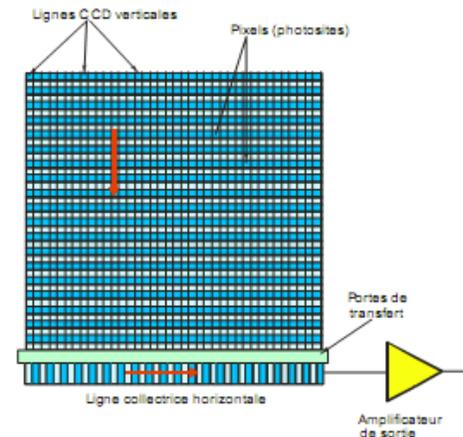
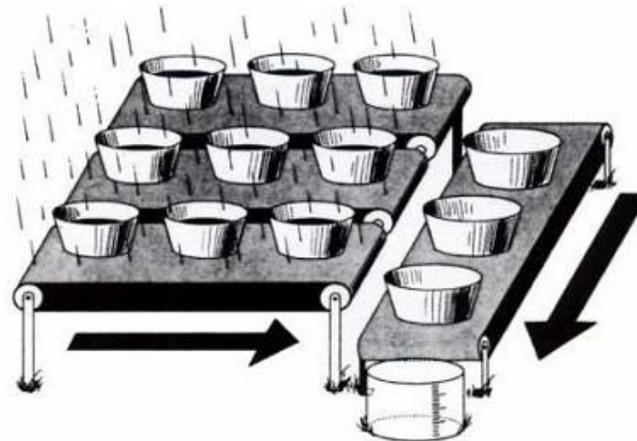
Chaque capteur individuel correspondant à un pixel (photo site)

* En associant plusieurs pixels les uns à la suite des autres, on constitue une ligne CCD ; plusieurs lignes verticales vont pouvoir réaliser une matrice CCD capable de capter une image.

* les charges de chaque pixel, tels des coupelles remplies d'eau qui se déverseraient les unes dans les autres. Puis elles sont envoyées dans un registre de sortie..



Ligne et matrice CCD

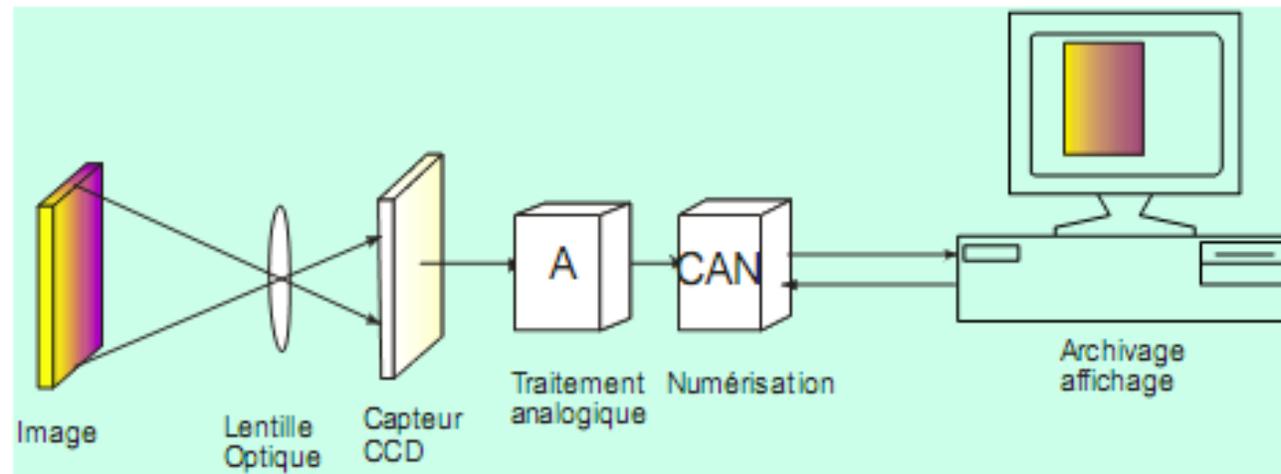


Capteur CCD FFT (Full Frame Transfert)

Enfin les charges sont transformées en tension proportionnelle au nombre d'électrons. Ce signal sera, à l'extérieur du CCD, amplifié et numérisé.

Signal de sortie; Exploitation.

Pour chaque pixel, la tension obtenue en sortie du CCD doit être convertie à l'aide d'un convertisseur A/N afin de reconstruire l'image (ou la ligne) correspondante à partir d'un fichier d'ordinateur.



Chaîne de traitement de l'information

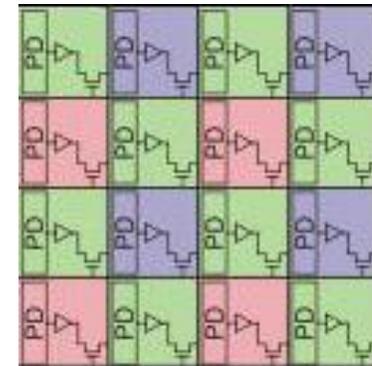
La quantité de charges de chaque pixel est représentative de l'intensité lumineuse de chaque point de l'image captée.

Capteurs CMOS

- Les capteurs CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor ou en français Semi-conducteur à Oxyde de Métal Complémentaire) fonctionnent différemment, même si le principe de base reste le même.
- Les photosites, comme sur un CCD sont sensibles à la lumière et acquièrent une certaine charge électrique en fonction de la quantité de lumière reçue.
- Une différence majeure vient du fait que chaque pixel contient une photo-diode (qui sert à la conversion photon-charge et au stockage des charges) et un amplificateur qui va permettre de convertir les charges en tension dans le pixel lui-même.

* L'information de chaque pixel peut ainsi être lue de manière indépendante sans faire de transfert. Ce qui fait que le temps de lecture est fortement réduit.

* Une autre différence majeure vient du fait que la photo-diode peut être constituée d'un matériau autre que le silicium. Ceci permet une grande diversité d'applications à différentes longueurs d'onde.



Capteurs CCD

Points positifs:

- Qualité d'images élevée
- Bruit très faible

Le bruit est faible avec un capteur CCD puisqu'il y a moins d'électronique composant le capteur.

- Haute sensibilité

Cela permet l'emploi de ces capteurs où il y a peu de lumière.

Points négatifs:

Saturation du capteur aux fortes luminosités

Cela peut créer des taches circulaires blanches, appelées blooming, qui peuvent être compensées par un logiciel de retouche d'image ou bien réduire au minimum le temps de pose.

Les capteurs de son (les microphones)

Le son

- Ce sont les molécules qui en se serrant puis en s'espçant permettent au son de se propager.
- Sur la lune, il n'y a pas d'air donc pas de son. Le premier microphone a été inventé le 4 mars 1877 par Emile Berliner, mais c'est Alexandre Graham Bell qui inventa le premier microphone réellement utilisable.



Les ondes acoustiques sont des ondes mécaniques que l'on classe selon leur fréquence f

- infrasons : $f < 20 \text{ Hz}$;
- sons audibles : **$20 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$** ;
- ultrasons : $20 \text{ kHz} < f < 200 \text{ MHz}$;
- hyper sons : $f > 200 \text{ MHz}$.

Comment le son peut être transmis d'une personne à l'autre?

En parlant, il va faire vibrer les molécules d'air



Ces vibrations vont être transmises étape par étape jusqu'à l'oreille d'auditeur

Trois éléments essentiels qui caractérisent le son

1. L'amplitude
2. Hauteur du son
3. Timbre

1. Définition

- Un **microphone** est un transducteur **électroacoustique**, c'est-à-dire un appareil capable de convertir un signal acoustique en signal électrique.
- **La conversion des variations de pression acoustique en variations mécaniques** : c'est le rôle de la membrane/cavité ouverte ou fermée.  fonctionnement **acoustique** du micro.
- Puis, ces variations mécaniques doivent être transformées en un signal électrique. C'est le fonctionnement **électrique** du micro.

Nous pouvons représenter schématiquement un microphone par les trois " parties " A B C de la figure.

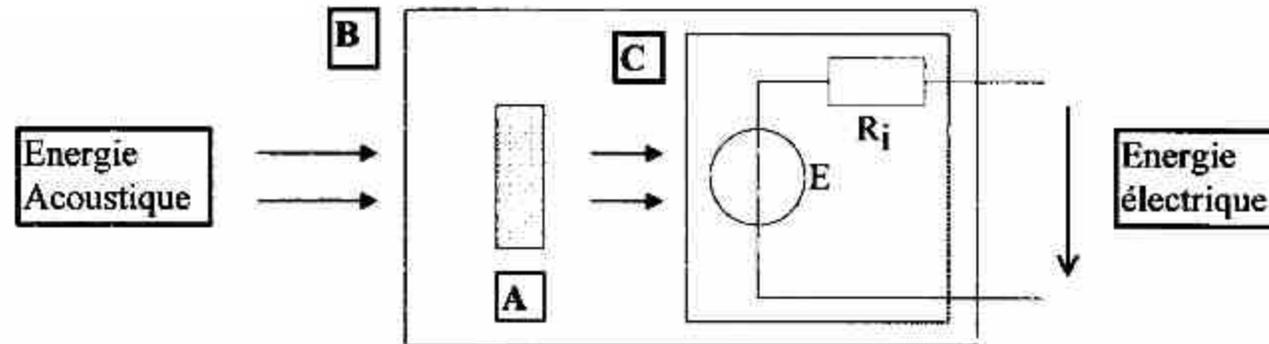


Schéma d'un microphone

Classification des microphones

On peut choisir les microphones selon plusieurs critères:

- **Par leurs modes d'utilisations :**

- * les microphones de service (téléphone et prothèses auditives).

- * les microphones de prise de son (micros de sonorisation, de radiodiffusion, de studio d'enregistrement).

- * **Par leurs modes de conversion de transducteur** : électrodynamique (à bobine mobile, à ruban), électrostatique,

- * **Par leurs modes de directivité** : micros omnidirectionnels, micros bidirectionnels

- * **Par leurs modes d'action ou mode d'attaque du diaphragme**

2. Les différents types de microphones

2.1 Le microphone dynamique

IL est constitué d'une membrane tendue sur un cadre mobile. Les vibrations de l'[air](#) se communiquent à la membrane, sur laquelle est monté une bobine. Cette dernière va devenir le siège d'un [courant induit](#) en se déplaçant par rapport à un aimant fixe. Cette tension électrique est acheminée vers le système d'[amplification](#) ou d'enregistrement auquel le micro est branché.

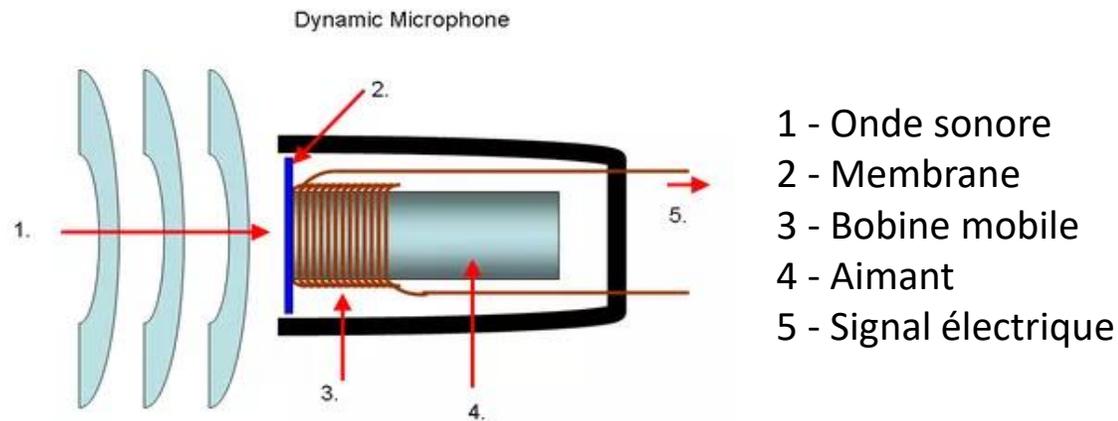
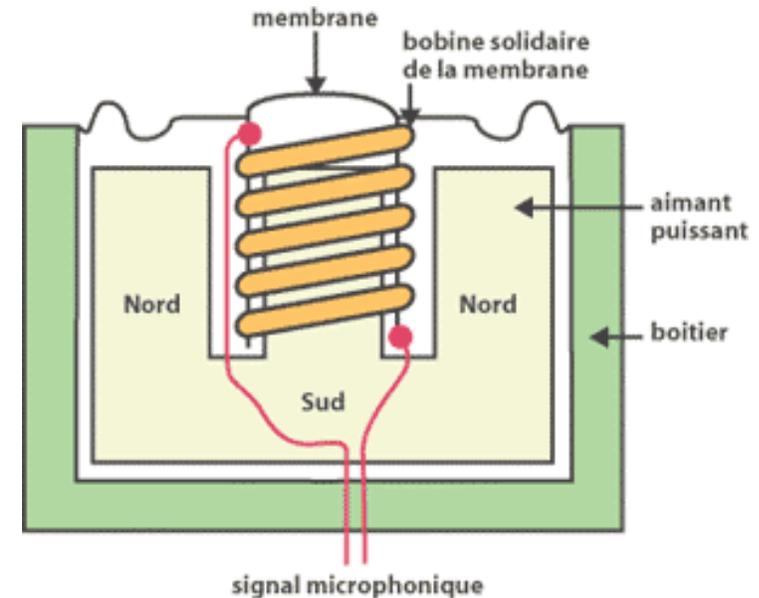


Schéma du microphone dynamique



Fonctionnement d'un micro dynamique

Ce type de micro ne nécessite pas d'alimentation la tension image du son et produite directement par la bobine.

Exemples

Les SM57 et SM58 de la marque **Shure** sont probablement **les deux microphones les plus célèbres** et les plus utilisés dans le monde.



avantages

Robuste et résistant

N'est pas affecté par la température

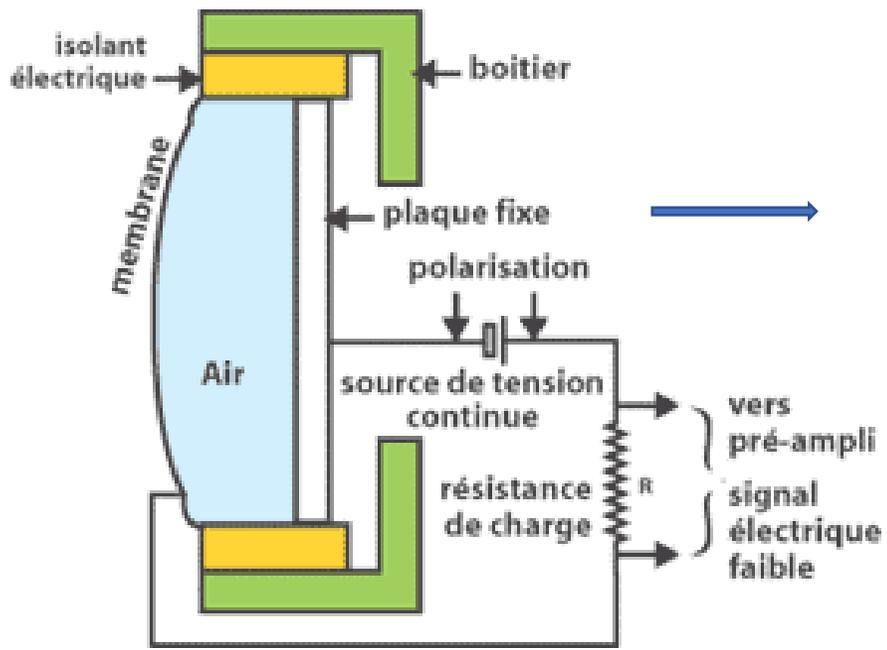
Prix raisonnable

Inconvénients

Réponse fréquentielle limitée

Le Shure SM-58 SM -57

2.2 Le microphone à condensateur (électrostatiques)



Ce système électronique requiert une alimentation, souvent appelée « *alimentation fantôme* » d'une valeur de 48V en tension continue. Cette alimentation sert aussi à la polarisation de la membrane.

Fonctionnement d'un micro électrostatique

Exemples

Des dizaines de marques ont fait leurs preuves dans la production de micros électrostatiques, parmi lesquelles : Neumann, AKG, Schoeps, DPA, Blue, Coles, Audio-Technica.



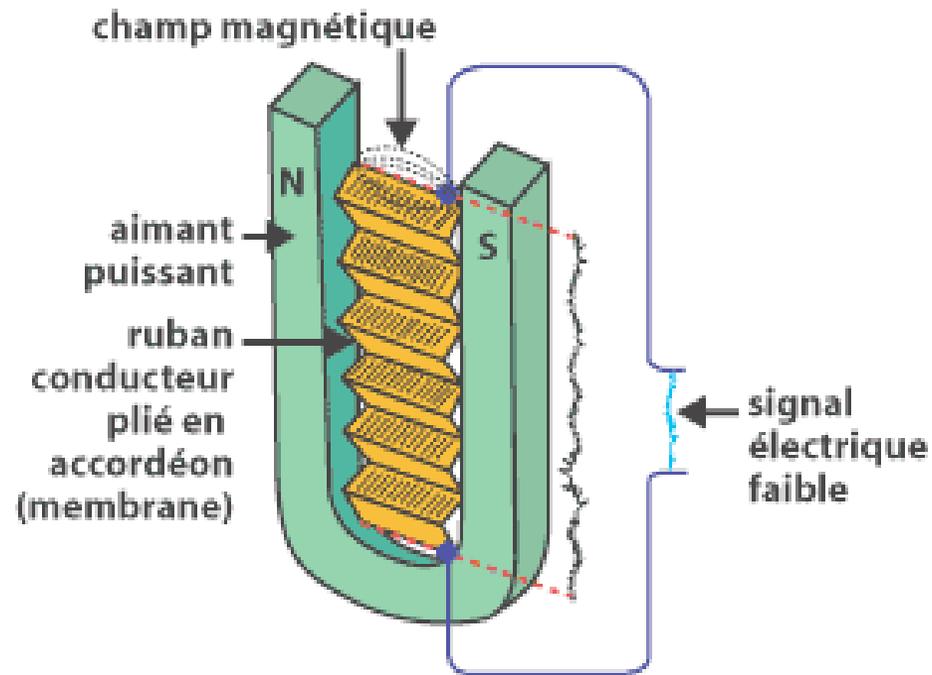
Avantages

- ❖ Son très détaillé
- ❖ Sensible aux variations d'aire

inconvénients

- ❖ Plus couteux (de quelques centaines d'euros à quelques milliers) et surtout beaucoup plus sensibles au chocs, au vent et aux fortes pressions sonores qui peut les endommager. Il est donc difficile de les utiliser en extérieur ou en sonorisation de concert.

2.2 Le microphone à ruban



Fonctionnement d'un micro à ruban



- ❖ Ce type de micro offre des aigües très doux.
- ❖ Il est aussi extrêmement sensible aux chocs, au vent et aux surpressions acoustiques. Ce qui fait qu'il est de moins en moins utilisé. Il donne cependant de très bons résultats sur certains instruments comme les cordes.
- ❖ La marque haut de gamme Royer en a fait sa spécialité, notamment avec les micros R-121 et R-122.

3. LES CARACTÉRISTIQUES D'UN MICROPHONE

* **Sa technologie de fabrication :**

C'est ce que nous avons vu ci-dessus.

* **Sa directivité :**

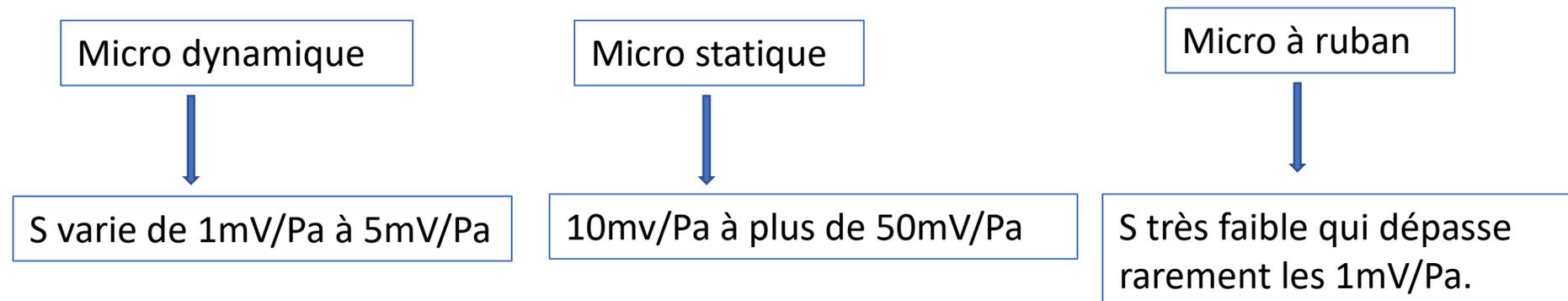
La directivité d'un microphone caractérise sa sensibilité en fonction de la provenance du son, selon son axe central.

* **Sa courbe de réponse en fréquence :**

Il s'agit du niveau électrique théorique en dB en fonction de la fréquence. Cette courbe donne donc une idée du domaine d'application du micro en question.

* **Sa sensibilité :**

C'est le niveau de sortie pour une pression donnée mesuré en mV/Pa. Il varie énormément selon la technologie et les caractéristiques du micro.



* **Sa pression acoustique maximale admissible :**

Mesurée en **dB SPL** désigne le Sound Pressure Level (niveau de pression acoustique), c'est le niveau max avant saturation de la membrane, voire de sa dégradation. Elle dépend aussi du type de micro. Exemples :

- * Le micro électrostatique à large membrane Neumann U87 a une pression max de 117 dBSPL
- * Le micro électrostatique à petite membrane Schemo MK4 a une pression max de 132 dBSPL
- * Le micro à électret AKG C535 a une pression max de 130dBSPL.

* **La taille de sa membrane :**

Une grande membrane est plus sensible qu'une petite membrane. Il en découle qu'elle accepte des pressions maximales moins élevées.

* **Le niveau de bruit :**

Chaque micro a un niveau de bruit propre, indépendant du niveau de pression sonore qu'il reçoit. Ce bruit est généralement très faible et ne posera pas de problème lors d'une utilisation normale.

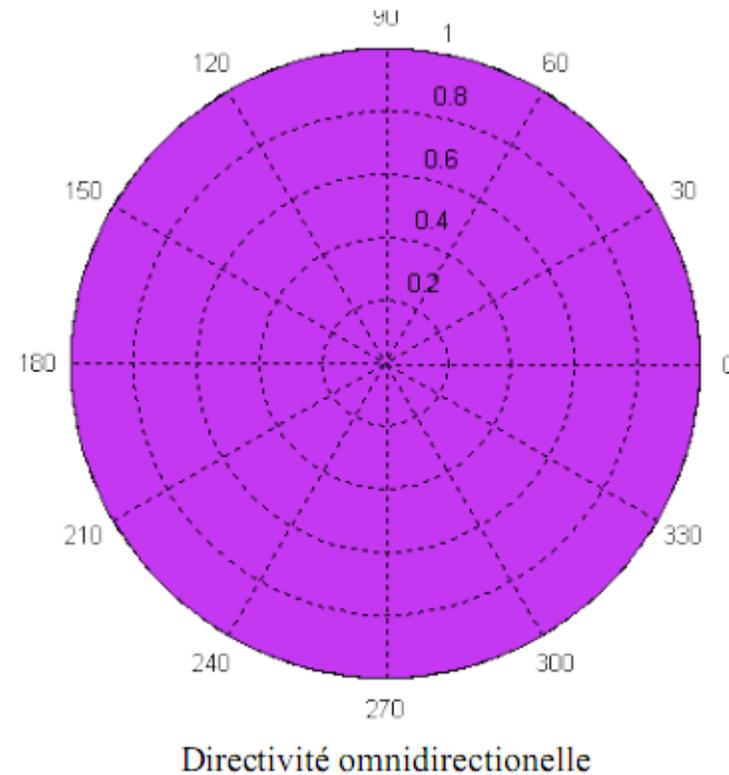
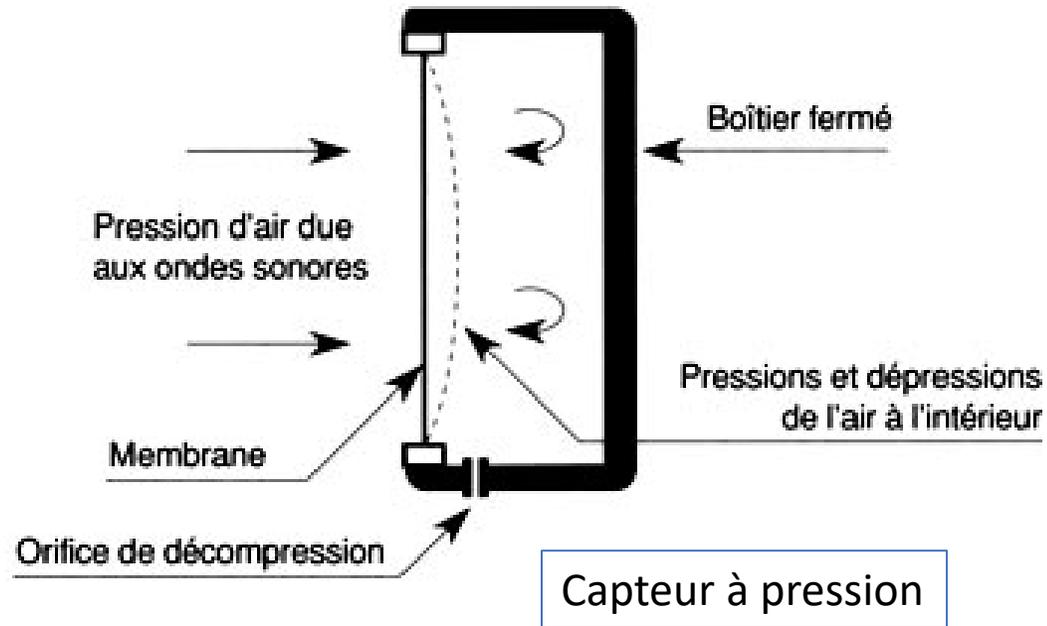
• **Filtrage, anti-pop et atténuateur :**

on peut intégrer au micro un dispositif **anti-pop**, souvent en mousse, qui assurera le rôle de « coupe-vent ». Cela ne s'applique qu'aux micros pour voix sur scène.

4. Type de capteur et directivités

1. Le capteur à pression

Le capteur à pression est constitué d'une membrane et d'une cavité fermée : Une seule des faces de la membrane reçoit les vibrations sonores.



En théorie

Le capteur est à directivité **omnidirectionnelle**

↪ Rapporté dans l'espace à 3 dimensions, le capteur à pression a une directivité **sphérique**.

En pratique

la sensibilité d'un capteur à pression dépend:

- * de la taille de la membrane
- * de la fréquence de l'onde incidente et de son angle d'incidence.

1- Lorsque la longueur de l'onde est **grande** par rapport aux dimensions de la membrane

↓ basses fréquences

le capteur est bien omnidirectionnel. On estime que c'est le cas pour des fréquences allant jusqu'à **1KHz** environ.

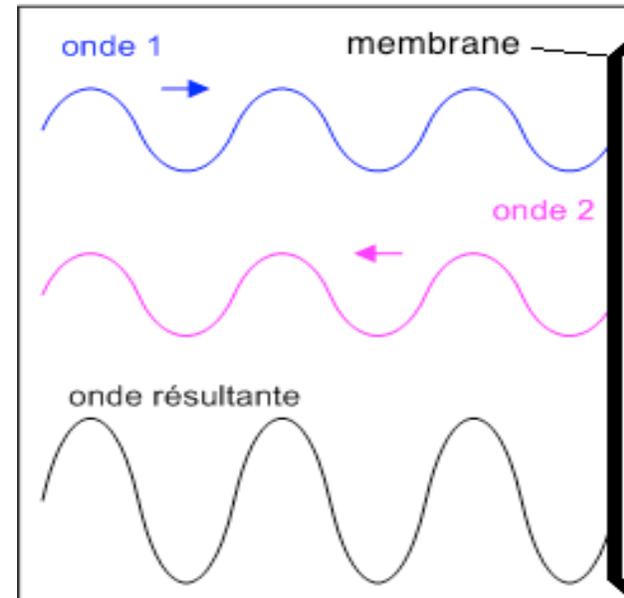
2- Lorsque la longueur de l'onde est **de l'ordre** de la taille de la membrane, ou inférieure

↓ fréquences moyennes et élevées

Un phénomène de **réflexion et de diffraction** va **apparaître lorsque les ondes** de longueur courte ou moyenne vont frapper la membrane

3- Pour les hautes fréquences

↓ un resserrement de la directivité d'autant plus important que la fréquence est élevée et que l'angle d'incidence est grand.

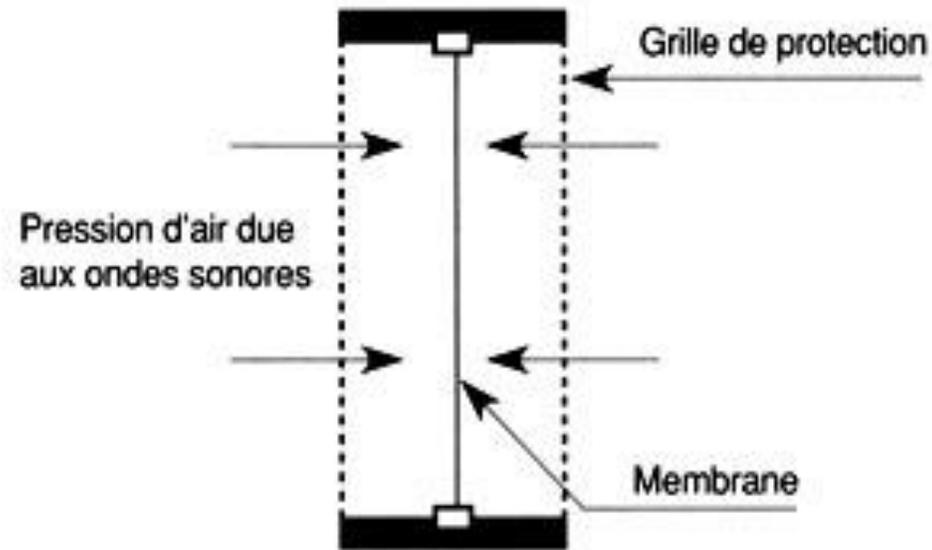


En résumé

les capteurs **omnidirectionnels** le sont surtout pour les fréquences inférieures à 1kHz environ. Jusqu'à 10KHz ils sont un **peu plus directifs**, et au dessus de 10KHz, ils sont très **directifs**.

2. Le capteur à gradient de pression

Dans ce cas, la membrane est à l'air libre (il n'y a plus de cavité isolante), les vibrations sonores atteignent donc les deux côtés de la membrane. Le signal résultant est donc la différence (*gradient*) entre les signaux arrivant au même moment sur chaque face de la membrane.



Capteur à gradient de pression

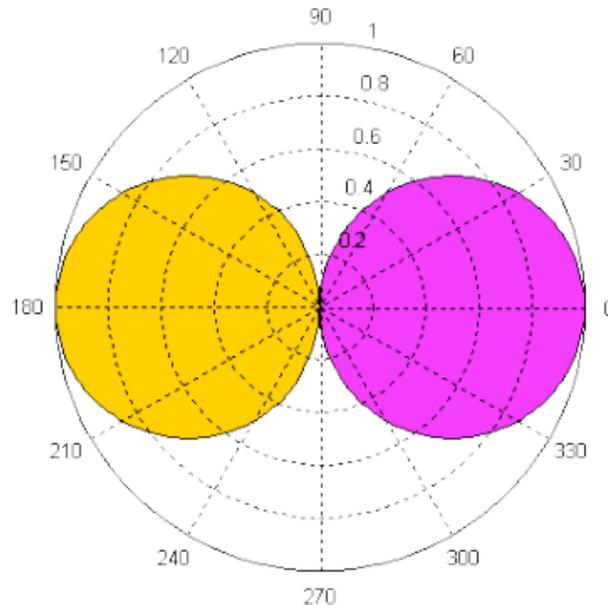
La directivité d'un tel système est facilement déductible lorsqu'on étudie des cas précis :

1. le signal arrive en même temps (en phase) sur les deux faces de la membrane et donc, s'annule.
2. Si la source est située dans l'axe du micro (à 0° ou 180°), l'onde sonore arrive alternativement sur les deux faces de la membrane et donc la différence de pression entre les deux faces de la membrane est maximale. C'est donc sur cet axe que la sensibilité du micro est la plus forte.



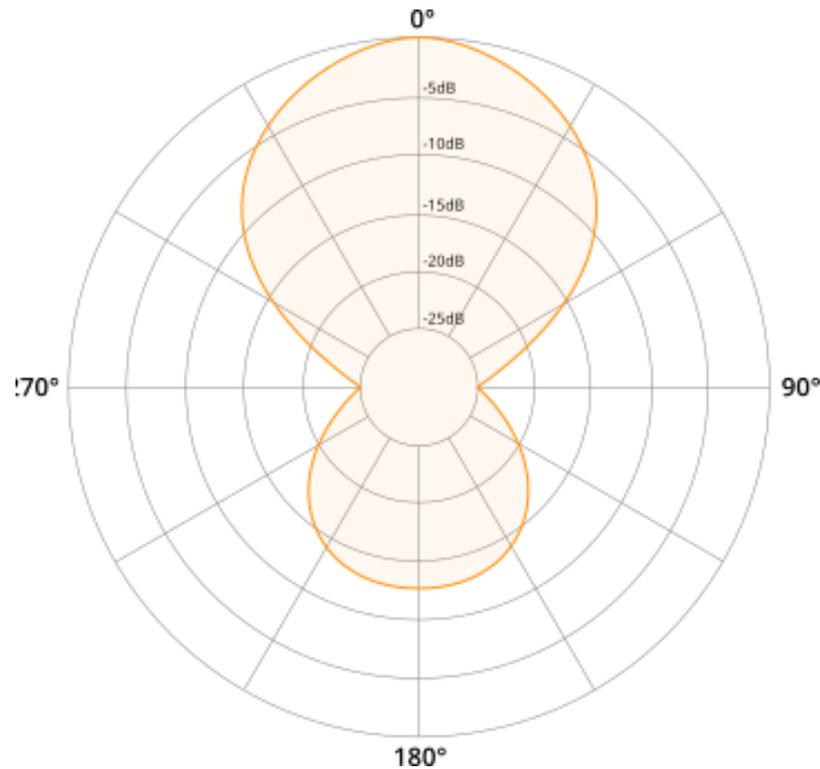
une directivité symétrique de chaque côté de la membrane, et on l'appelle directivité **bidirectionnelle (ou directivité en 8)**.

Directivité bidirectionnelle



3. Représentation de la directivité

On utilise ce qu'on appelle **des diagrammes polaires**, comme celui-ci :



↓
* il faut imaginer, au centre, le microphone que l'on étudie.

* Les cercles représentent l'espace acoustique qui l'entoure, à 360 degrés :
0° = devant le microphone
180° = derrière le microphone

Exemple du diagramme polaire d'un hypothétique microphone

3.1 Les microphones omnidirectionnels

Ils se caractérisent par une sensibilité égale dans toutes les directions, quelle que soit la position de la source sonore enregistrée.

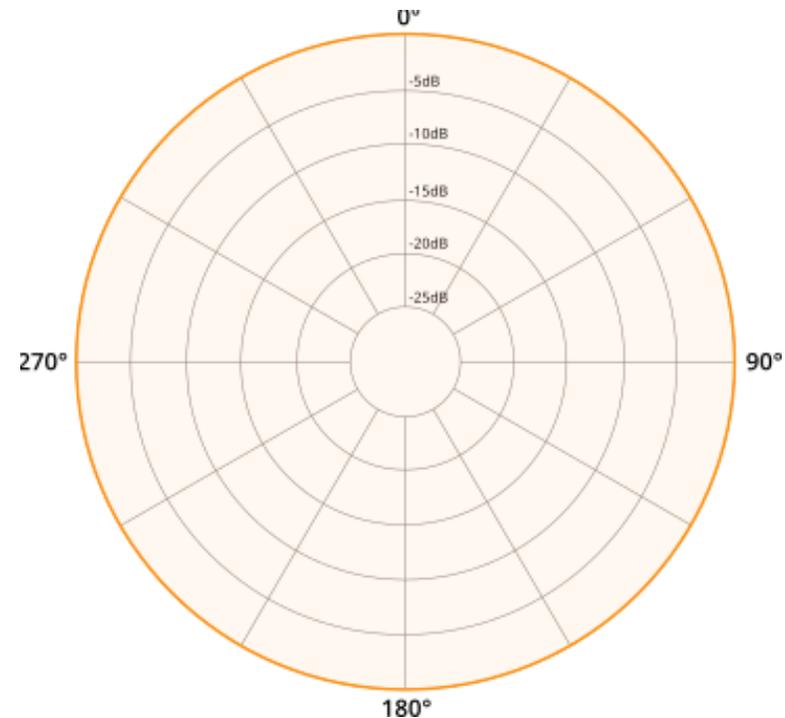
Leur directivité implique toutefois qu'ils sont très sensibles :

- * à l'ambiance de la pièce dans laquelle ils sont utilisés ;
- * aux autres sons environnants

Utilisations

• la directivité omnidirectionnelle leur permet de capter le son de façon identique, peu importe la façon dont ils sont attachés sur le vêtement.

* Pour ce qui est de l'utilisation en studio, ce ne sont pas nécessairement les plus courants. Toutefois, de nombreuses applications sont possibles **tant que vous enregistrez dans une pièce avec une acoustique de bonne qualité.**



3.2 Les microphones bidirectionnels

Les micros « figure en 8 », contrairement aux omnidirectionnels, fonctionnent comme des **capteurs de gradient de pression**.



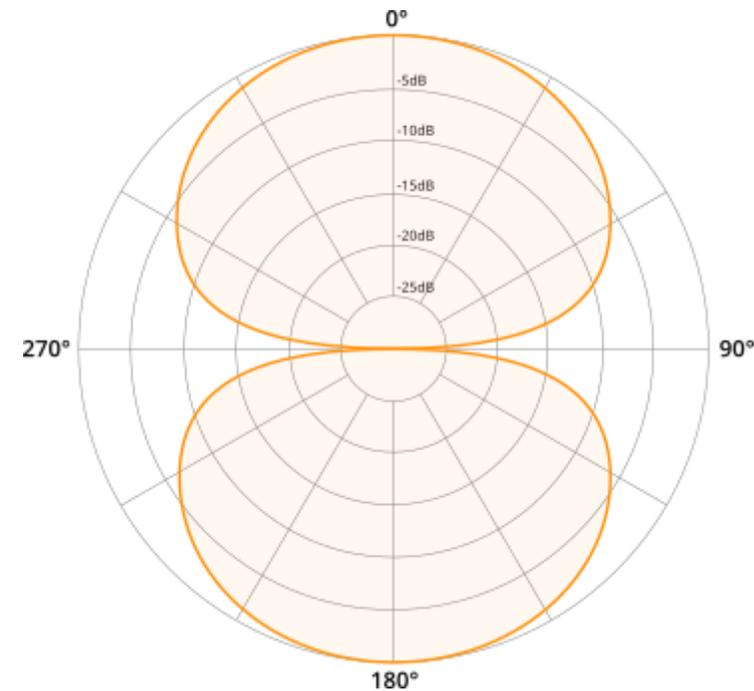
Conséquence

Ils sont sensibles aux sources sonores situées devant et derrière le micro, tandis que **les sons provenant des côtés se retrouvent dans un angle mort**. C'est ce que l'on constate sur le diagramme polaire ci-contre.

Utilisations

- Enregistrement simultané de deux chanteurs/chanteuses ;
- Enregistrement d'un chanteur jouant en même temps de la guitare ;

* Techniques de prises de son Mid/Side (Milieu/Côté)



3.3 Les microphones cardioïdes

Les microphones cardioïdes possèdent un diagramme polaire en forme de cœur, d'où leur nom. Ceci s'explique par le fait qu'ils sont uniquement sensibles aux sons provenant de l'avant, ce qui simplifie grandement leur utilisation.



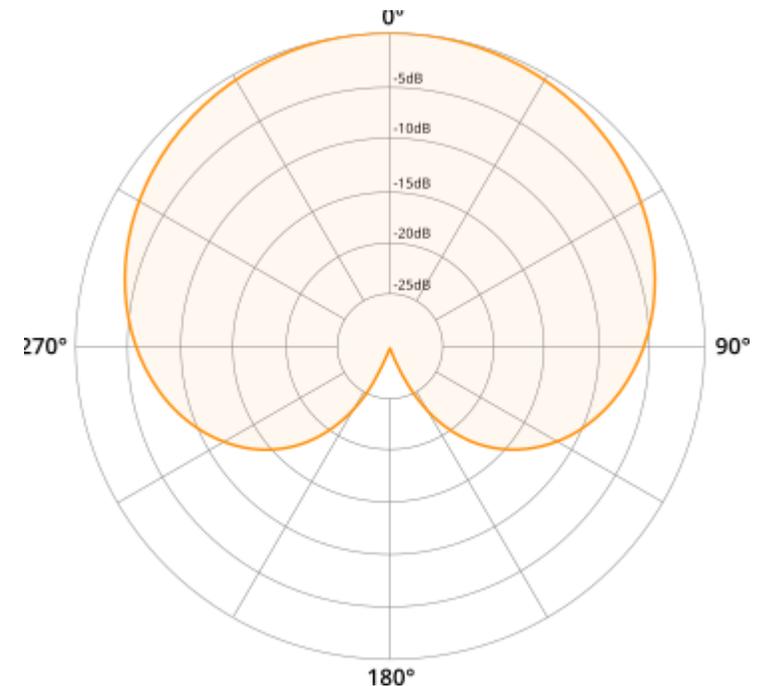
Conséquence

moins sujets aux phénomènes de feedback, on peut facilement les isoler de sources sonores qu'on ne souhaiterait pas enregistrer.

Utilisations

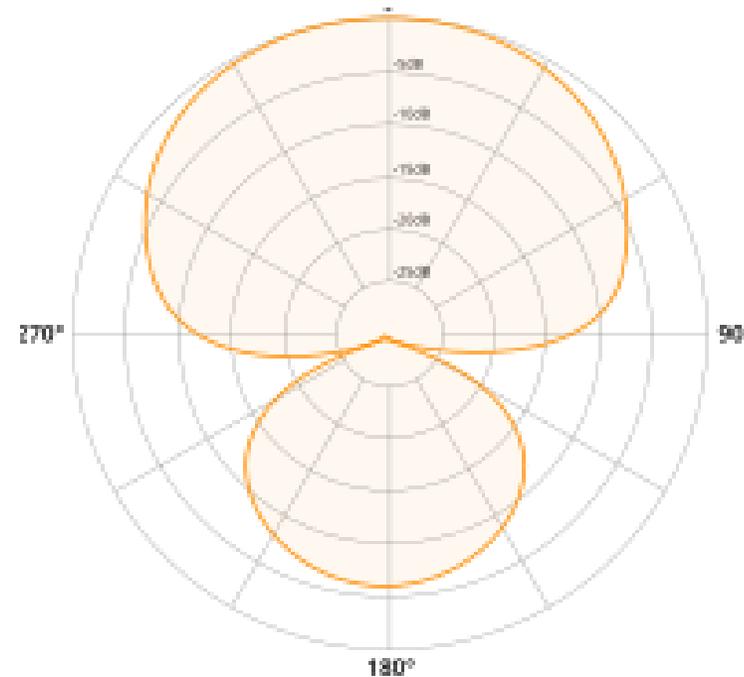
• Sans surprise, on va utiliser principalement les microphones cardioïdes lorsque l'on souhaite enregistrer une source sonore directionnelle : chanteur, ampli guitare, éléments d'une batterie, etc.

* Par exemple, on utilise très souvent le Shure SM57 (cardioïde) pour enregistrer les caisses claires, car il n'est pas sensible aux sons provenant de l'arrière.



Supercardioides, Hypercardioides

- * Les microphones supercardioides et hypercardioides sont tout simplement des variations de la directivité cardioïde.
- * Ils se caractérisent par une sensibilité vers l'avant plus restreinte en terme d'angle, mais en contrepartie on retrouve plus de sensibilité vers l'arrière.
- * Autrement dit, leur diagramme polaire pourrait être tracé ainsi que représenté ci-contre.



En résumé, les trois principales directivités sont les suivantes :

Cardioïde

la plus utilisée en studio et en home studio, elle correspond à des microphones sensibles uniquement aux sons provenant de l'avant ;

Omnidirectionnelle

ces microphones sont sensibles au son de façon identique à 360°, peu importe la position de la source sonore ;

Figure en 8

le microphone capte le son provenant de l'avant et de l'arrière mais n'est pas sensible aux sources sonores latérales.

Bien sûr, à chaque directivité correspond un certain nombre d'utilisations possibles, même si en home studio la directivité cardioïde est la plus courante pour des raisons évidentes de conditions d'enregistrement.