

Cours : Capteurs et Mesures en Télécommunications

Leçon 7 : Capteurs Acoustiques et d'Image

Durée : 1 heure 30 minutes

Prof. Abdelmalek Bouhadjera

1. Introduction & Objectifs d'Apprentissage

En télécommunications, une grande partie des informations que nous transmettons provient des sens humains — en particulier l'ouïe et la vision. Les capteurs acoustiques convertissent le son en signaux électriques, tandis que les capteurs d'image convertissent les motifs lumineux en informations numériques. Ces capteurs constituent la base de la communication vocale, de la visioconférence, de la messagerie multimédia et de nombreux autres services de télécommunication.

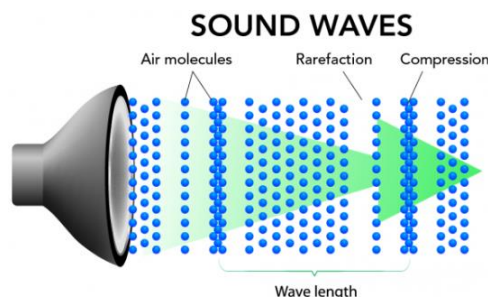
Objectifs de la séance :

À la fin de cette session, vous serez capables de :

- Expliquer les principes de fonctionnement des différents types de microphones et de capteurs d'image.
- Analyser les caractéristiques clés et les spécifications des capteurs acoustiques et d'image.
- Sélectionner des capteurs adaptés à des applications télécom spécifiques.
- Comprendre la chaîne de traitement du signal, du capteur jusqu'aux données transmises.
- Identifier les tendances émergentes dans les technologies acoustiques et d'imagerie utilisées en télécommunications.

2. Capteurs Acoustiques : Conversion du Son en Signaux

a) Physique Fondamentale du Son



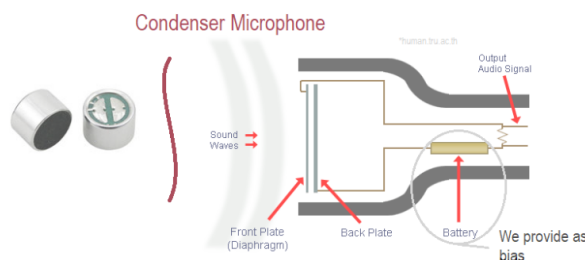
- **Ondes sonores** : variations longitudinales de pression se propageant dans un milieu (air, eau, solides)
- **Paramètres clés** :
 - **Fréquence** : 20 Hz – 20 kHz (plage auditive humaine)
 - **Niveau de pression acoustique (SPL)** : mesuré en décibels (dB)
 - **Impédance** : résistance acoustique du milieu

b) Types de Microphones et Principes de Fonctionnement



Type de Microphone	Principe de Fonctionnement	Caractéristiques Clés	Applications Télécom
Dynamique (bobine mobile)	Induction électromagnétique – bobine en mouvement dans un champ magnétique	Robuste, pas d'alimentation, supporte SPL élevé	Performances scéniques, enregistrements terrain
Condensateur	Variation de capacité entre une membrane et une plaque arrière	Haute sensibilité, large bande passante	Studios, téléconférence, smartphones
Électret	Matériau chargé en permanence	Petite taille, bonne qualité, nécessite une polarisation	Téléphones, casques, ordinateurs portables
MEMS	Détection capacitive sur silicium	Très petit, intégré, faible coût	Smartphones, IoT, aides auditives
Piézoélectrique	Tension générée lors de la déformation du matériau	Durable, bande limitée	Communications sous-marines, environnements sévères

Analyse technique : fonctionnement d'un microphone à condensateur



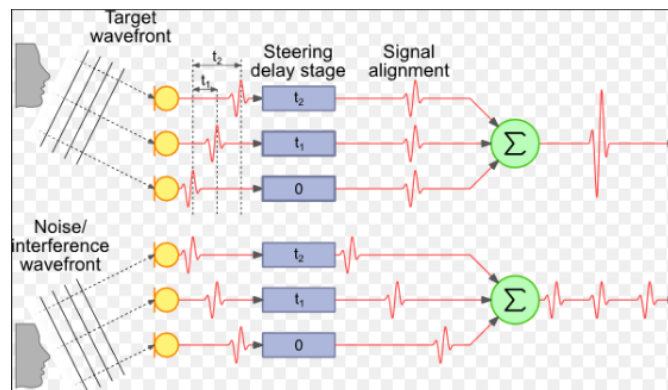
1. Ondes sonores $\rightarrow$ vibration de la membrane
2. Variation de distance avec la plaque arrière
3. Capacité $C = \epsilon A / d$ $\rightarrow$ ϵ change
4. La tension $V = Q / CV = Q / CV = Q / C$ varie
5. La tension alternative est proportionnelle à la pression sonore
Nécessite une alimentation fantôme (12–48 V).

c) Spécifications Importantes des Microphones

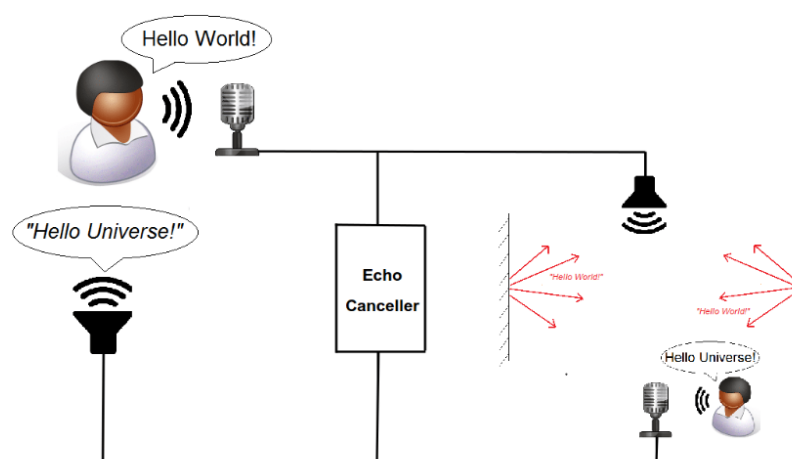
- Sensibilité (mV/Pa)
- Réponse en fréquence
- Rapport signal/bruit (SNR)
- Directivité : omnidirectionnelle, cardioïde, bidirectionnelle, canon (shotgun)

d) Systèmes Acoustiques Avancés

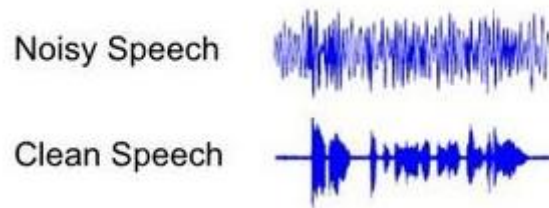
- Réseaux de microphones (beamforming, réduction de bruit)



- Annulation d'écho (AEC)



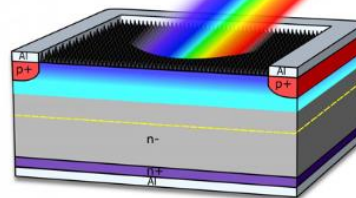
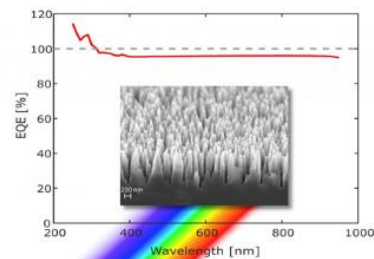
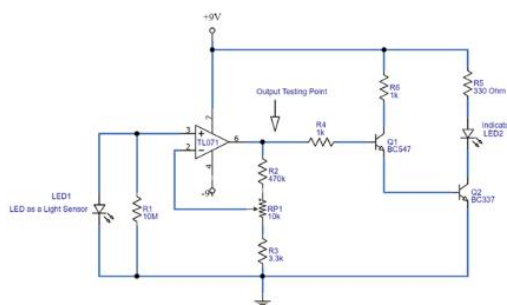
- Suppression de bruit



3. Capteurs d'Image : Conversion de la Lumière en Données Numériques

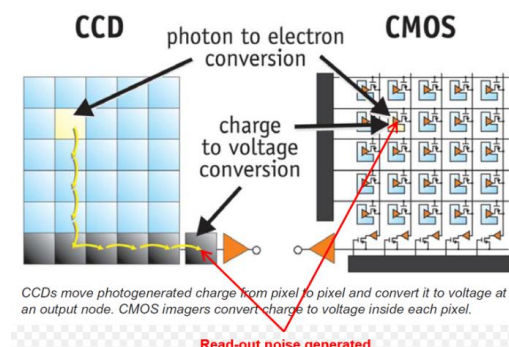
a) Physique Fondamentale de la Détection Lumineuse

LED as a Light Detector



- Effet photoélectrique : photons $\rightarrow$ électrons
- Efficacité quantique
- Réponse spectrale (visible, IR, UV)

b) CCD vs CMOS : Les Deux Technologies Principales



Paramètre	CCD	CMOS
Principe	Transfert de charge, sortie unique	Amplification par pixel, sorties multiples
Qualité d'image	Excellente, faible bruit	Bonne, en amélioration
Consommation	Élevée	Faible
Vitesse	Modérée	Très élevée
Intégration	Faible	Élevée (solution sur une puce)
Coût	Plus élevé	Plus faible
Applications	Visioconférence haut de gamme, broadcast	Smartphones, webcams, surveillance

Analyse technique : architecture d'un capteur CMOS

1. Photodiode → électrons
2. Transistor de reset
3. Amplificateur source follower
4. Transistor de sélection

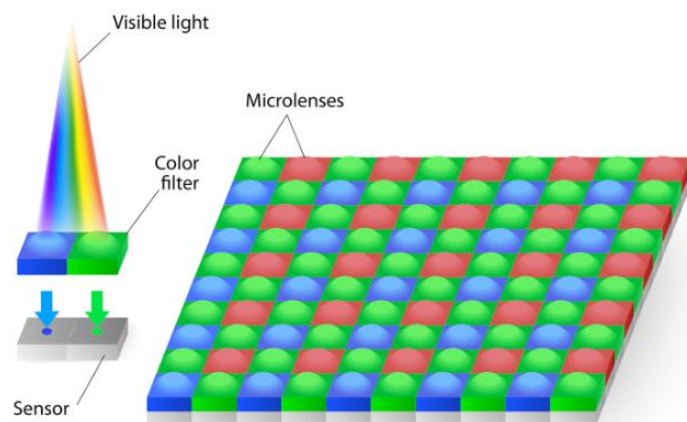
Backside Illumination (BSI) pour améliorer la capture de lumière.

c) Spécifications des Capteurs d'Image

- Résolution (ex. 12 MP)
- Taille des pixels (1,0–2,0 μm)
- Plage dynamique (dB)
- Fréquence d'images (fps)
- SNR
- Efficacité quantique (>60%)

d) Détection de Couleur : Motif Bayer et Alternatives

BAYER FILTER



- Filtre Bayer (RGB)
- Dématriçage

- Alternatives : Foveon X3, systèmes multi-capteurs

4. Applications en Télécommunications

a) Systèmes de Communication Vocale

Application	Exigences Acoustiques	Capteurs Typiques
Téléphones mobiles	300–3400 Hz, réduction de bruit	MEMS, électret
VoIP / Visioconférence	50–7000 Hz, annulation d'écho	Réseaux de microphones
Casques	Réduction de bruit, légèreté	Électret, MEMS
Enceintes intelligentes	Capture lointaine, beamforming	Réseaux de 4–8 micros

b) Systèmes d'Imagerie et Vidéo

Application	Exigences	Capteurs
Smartphones	Haute résolution, HDR	CMOS BSI, OIS
Visioconférence	Bonne sensibilité, 30 fps	CMOS 2–8 MP
Surveillance	Large plage dynamique, IR	CMOS à obturateur global
Broadcast	Qualité maximale	CCD/CMOS 3 capteurs

c) Applications Émergentes

AR, LiDAR, télémédecine, vision industrielle, etc.

5. Chaîne de Traitement du Signal

a) Chemin du Signal Acoustique

Son → Microphone → Préampli → ADC → DSP → Transmission

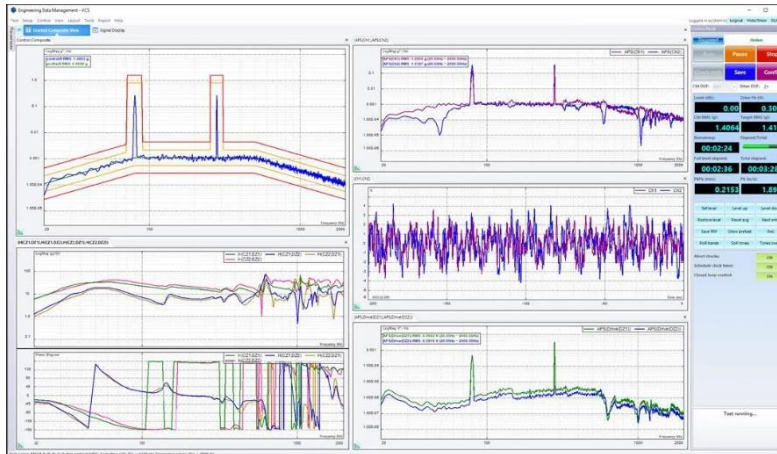
b) Chemin du Signal d'Image

Lumière → Lentille → Filtre couleur → Capteur → ADC → ISP → Transmission

c) Algorithmes Clés

- Acoustique : annulation d'écho, suppression de bruit, AGC
 - Image : balance des blancs, autofocus, stabilisation, compression
-

6. Méthodes de Mesure et Tests



a) Tests Acoustiques

- Réponse en fréquence
- Sensibilité (1 kHz, 94 dB SPL)
- Directivité
- THD

b) Tests des Capteurs d'Image

- Résolution (ISO 12233)
- Plage dynamique
- Précision des couleurs (ColorChecker)
- Bruit (dark frame, courbe de transfert)

c) Tests Système

- Qualité vocale : PESQ
- Qualité vidéo : PSNR, SSIM

7. Tendances Actuelles et Développements Futurs

a) Capteurs Acoustiques

- Audio améliorée par IA
- Ultrasons (gestes)
- Détection acoustique distribuée (fibre optique)
- Capteurs bio-acoustiques

b) Capteurs d'Image

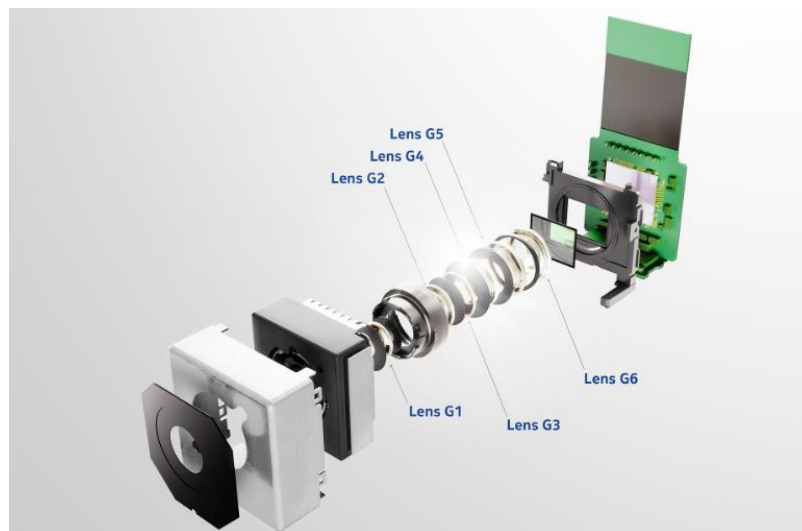
- Photographie computationnelle

- Vision événementielle
- Capteurs quantiques
- Vision neuromorphique
- Caméras sous écran

c) Intégration

- Fusion de capteurs
- IA embarquée
- Applications 5G

8. Étude de Cas : Système de Caméra de Smartphone



1. Matériel

- Plusieurs capteurs CMOS
- Lentilles stabilisées
- Flash LED/Xenon
- Capteurs ToF

2. Logiciel

- Photographie computationnelle
- HDR+
- Reconnaissance de scène
- Mode portrait

3. Télécommunications

- Compression vidéo en temps réel
- Streaming adaptatif

Performances :

- Photos : 12–200 MP
 - Vidéo : 4K–8K, 60–240 fps
 - Faible luminosité : mode nuit multi-expositions
-

9. Résumé & Perspectives

Points clés :

- Les capteurs acoustiques et d'image sont essentiels aux télécommunications modernes.
- Les technologies MEMS et CMOS dominent le marché.
- Le traitement du signal est tout aussi important que le capteur lui-même.
- Les tendances émergentes reposent sur l'IA et la fusion multisensorielle.

Prochaine séance : **Capteurs RF et Techniques de Mesure Sans Fil.**

10. Questions d'Auto-Évaluation

1. Comparez les avantages et inconvénients d'un réseau de microphones MEMS par rapport à un seul microphone à condensateur haute qualité dans un bureau bruyant.
 2. Analysez le choix entre un capteur 200 MP (0,8 μm) et 50 MP (1,6 μm) pour un smartphone.
 3. Proposez une procédure de test pour évaluer la qualité audio d'une application VoIP.
 4. Expliquez comment la photographie computationnelle permet aux smartphones de dépasser certains appareils photo dédiés.
 5. Proposez un système de fusion capteurs audio + image pour une application automobile.
-

“Les systèmes de télécommunications les plus sophistiqués servent finalement à étendre nos sens humains à travers l'espace et le temps, les capteurs acoustiques et d'image constituant le pont essentiel entre notre monde analogique et les réseaux numériques.”