



Institut  
Mines-Telecom

# Electronique des Systèmes d'acquisition

Chadi Jabbour

ELEC101



- ▶ Fournir une vision générale de l'électronique des systèmes d'acquisition, particulièrement pour la partie de traitement analogique du signal :
  - ▶ Intérêts et enjeux
  - ▶ Applications
  - ▶ Défis techniques
  - ▶ Principales fonctions
  
- ▶ Approche descendante:
  - ▶ Du système
  - ▶ Vers le composant



L'analogique, ça sert à quoi?

L'électronique et le traitement analogique sont nazes, aujourd'hui on est dans l'ère du numérique et en plus, Télécom Paris est l'école du numérique.

# Numérique vs Analogique

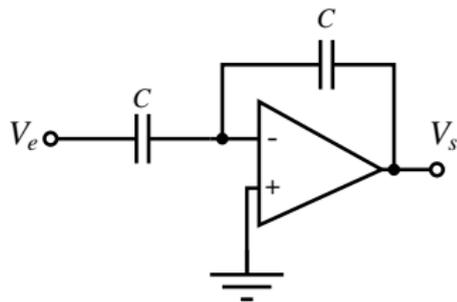


## Numérique vs Analogique

On est tous un peu schizophrène, l'électronique aussi

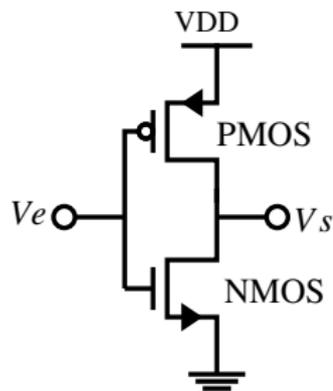
# Inverseur Numérique vs Analogique

## Analogique



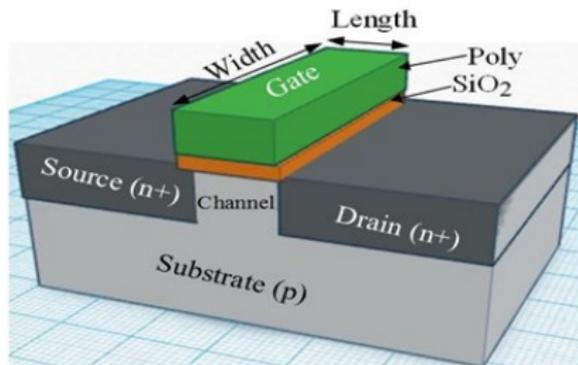
- ▶ Surface: 20 à 100 transistors pour l'amplificateur opérationnel + capacités
- ▶ Consommation: Dépend principalement de la bande du signal et des capacités utilisées

## Numérique

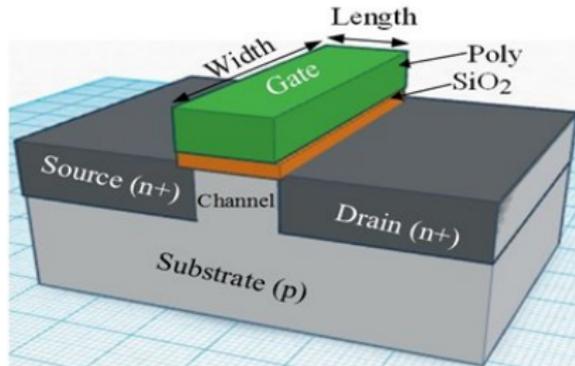


- ▶ Surface: 2 transistors
- ▶ Consommation: Dépend de la vitesse voulue et de la technologie

Transistor NMOS (Negative channel Metal Oxide Semiconductor)

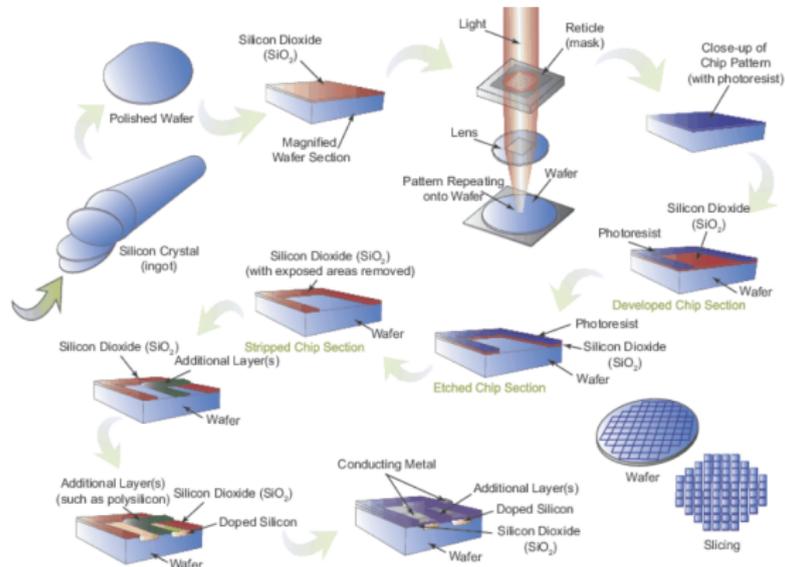


Transistor NMOS (Negative channel Metal Oxide Semiconductor)



- ▶ En fonction des tensions de grille (gate), source et drain, le transistor NMOS se comporte soit en commutateur fermé, ouvert ou comme une source de courant contrôlée par la tension  $V_{gs}$
- ▶ Le transistor PMOS a le même comportement que le NMOS mais inversé (des zones de diffusions P+ dans un substrat N-)
- ▶ L'association des 2 types de transistor nous donne la technologie "Complementary Metal Oxide Semiconductor" ou CMOS

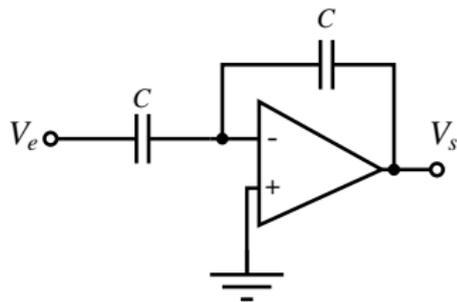
# Fabrication circuit



La fabrication de circuits intégrés est longue (6 à 12 semaines), très coûteuse et intègre de nombreux risques

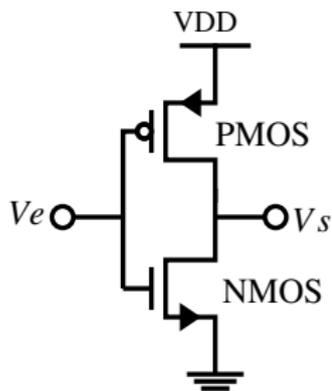
# Inverseur Numérique vs Analogique

## Analogique



- ▶ Surface: 20 à 100 transistors pour l'amplificateur opérationnel + capacités
- ▶ Consommation: Dépend principalement de la bande du signal et des capacités utilisées

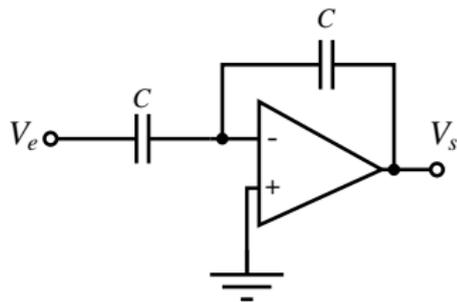
## Numérique



- ▶ Surface: 2 transistors
- ▶ Consommation: Dépend de la vitesse voulue et de la technologie

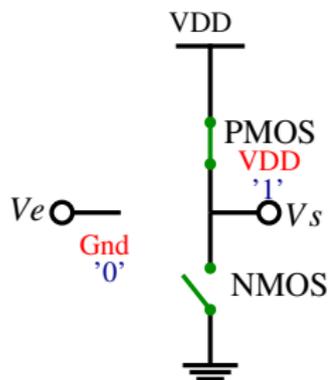
# Inverseur Numérique vs Analogique

## Analogique



- ▶ Surface: 20 à 100 transistors pour l'amplificateur opérationnel + capacités
- ▶ Consommation: Dépend principalement de la bande du signal et des capacités utilisées

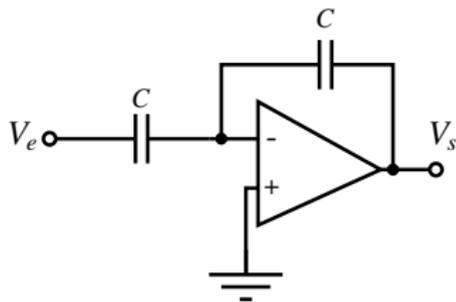
## Numérique



- ▶ Surface: 2 transistors
- ▶ Consommation: Dépend de la vitesse voulue et de la technologie

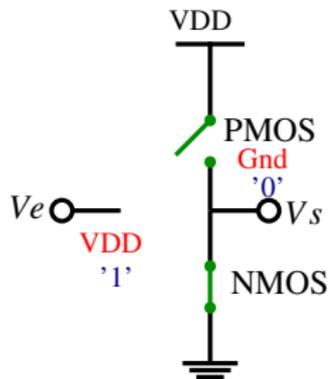
# Inverseur Numérique vs Analogique

## Analogique



- ▶ Surface: 20 à 100 transistors pour l'amplificateur opérationnel + capacités
- ▶ Consommation: Dépend principalement de la bande du signal et des capacités utilisées

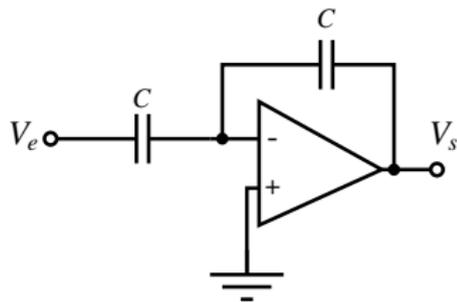
## Numérique



- ▶ Surface: 2 transistors
- ▶ Consommation: Dépend de la vitesse voulue et de la technologie

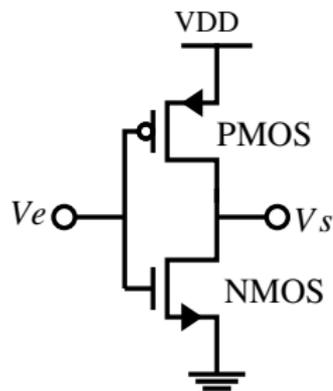
# Inverseur Numérique vs Analogique

## Analogique



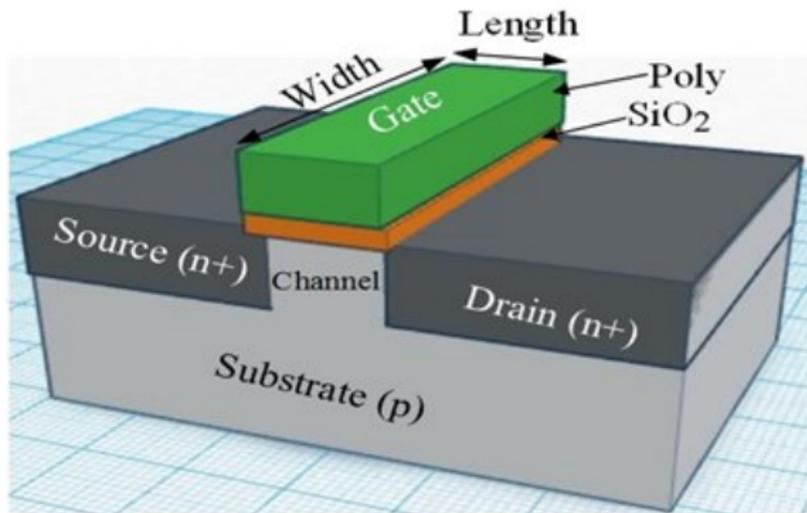
- ▶ Surface: 20 à 100 transistors pour l'amplificateur opérationnel + capacités
- ▶ Consommation: Dépend principalement de la bande du signal et des capacités utilisées

## Numérique



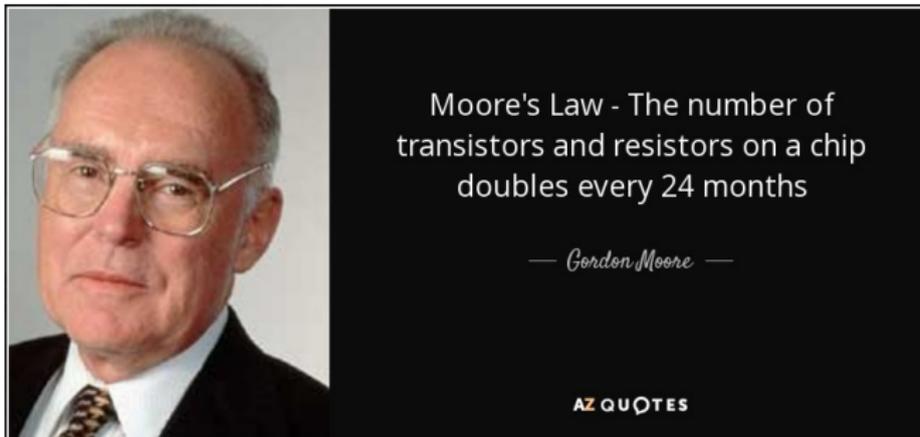
- ▶ Surface: 2 transistors
- ▶ Consommation: Dépend de la vitesse voulue et de la technologie

# Technologie CMOS



- ▶ Quand on parle d'une technologie CMOS 40 nm, 40 nm désigne la longueur du canal  $Length$
- ▶ Les capacités d'un transistor sont proportionnels à  $W \cdot L$
- ▶ Alors que sa vitesse est approx. proportionnelle à  $\frac{W}{L}$

# La loi de Moore - 1965 (RIP Gordon)



Gordon Moore

Co-fondateur de Intel en 1968 avec Robert Noyce et Andrew Grove



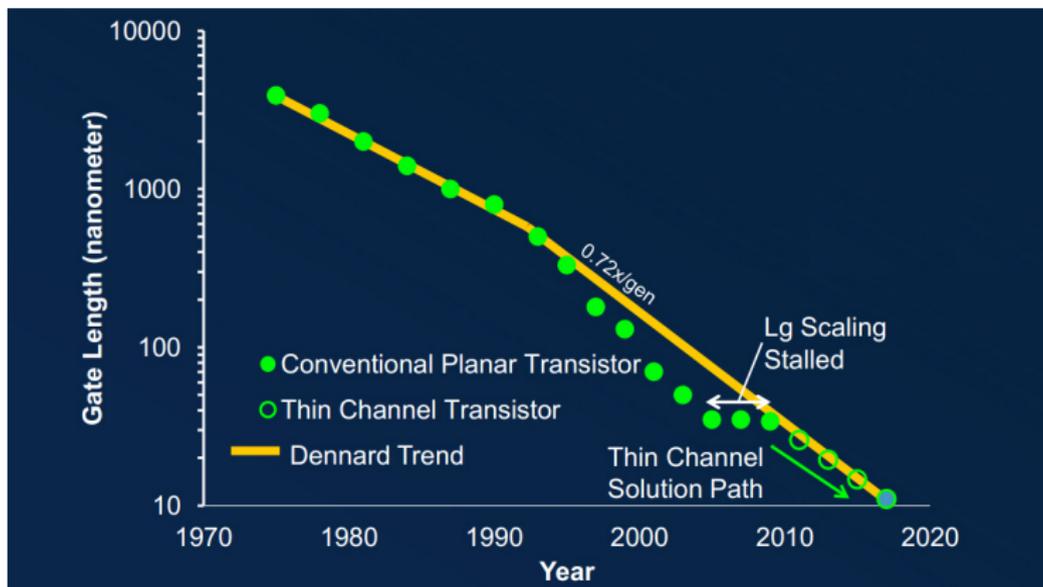
Si dans une surface donnée, nous voulons doubler de nombres de transistors:

- ▶ A  $\frac{W}{L}$  constant,  $L$  doit  $\searrow \sqrt{2}$  d'un noeud technologique au suivant afin que la surface ( $\propto W \cdot L$ )  $\searrow 2$  tous les 2 ans

# Implications de la loi de Moore

Si dans une surface donnée, nous voulons doubler de nombres de transistors:

- ▶ A  $\frac{W}{L}$  constant,  $L$  doit  $\searrow \sqrt{2}$  d'un noeud technologique au suivant afin que la surface ( $\propto W \cdot L$ )  $\searrow 2$  tous les 2 ans



[source: Applied Materials]

## Analogique

- ▶ Surface: Diminue légèrement car principalement dominée par les capacités
- ▶ Vitesse maximale:  $\nearrow \sim 2$
- ▶ Consommation: Diminue très légèrement

## Numérique

- ▶ Surface:  $\searrow 2$  entre noeuds tech. successifs ou 2 fois plus de fonctionnalités
- ▶ Vitesse maximale:  $\nearrow 2$
- ▶ Consommation: à vitesse constante,  $\searrow > 2$

Réduction consommation :

Technologie 1  $\mu m$  1990 Vs Technologie 7 nm 2020

$\sim 200000$  pour le numérique Vs 5 à 10 pour l'analogique

# Numérique vs Analogique - résumé

- ▶ Le *scaling* technologique améliore exponentiellement les performances des circuits numériques (vitesse, résolution, surface, consommation ...). **Beaucoup moins vrai pour les circuits analogiques.**
- ▶ Les circuits numériques sont plus simples à concevoir, sont conçus et dessinés automatiquement par des outils dédiés. **Beaucoup moins vrai pour les circuits analogiques qu'on doit en grande partie les concevoir à la "main".**
- ▶ Son marché étant sensiblement plus important que l'analogique, les fondeurs optimisent leurs technologies pour le numérique, **beaucoup moins pour l'analogique.**
- ▶ ...



L'électronique analogique , ça sert vraiment à rien

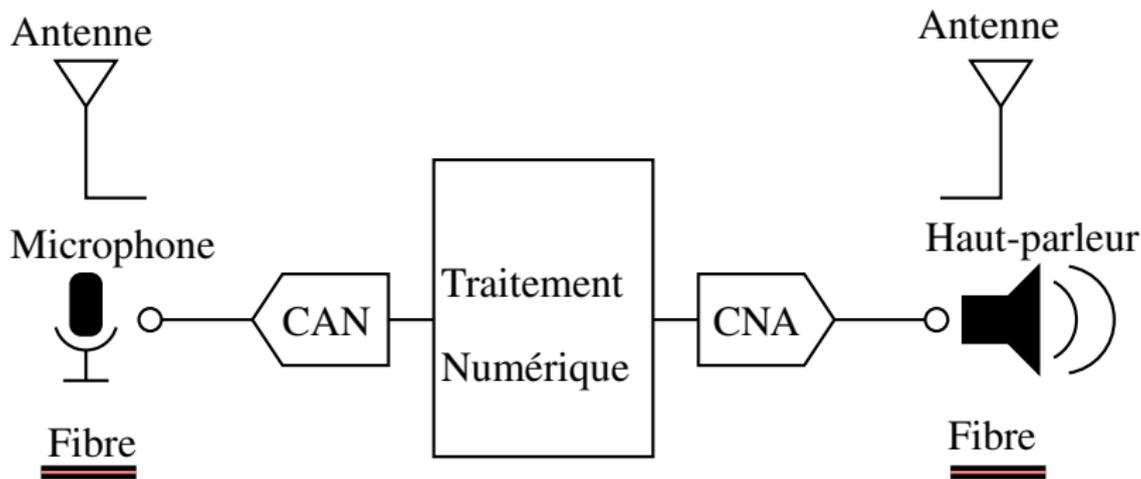
On est d'accord, tu viens de te tirer une balle dans le pied voire 3

# Le monde réel est analogique



Tous les systèmes de com. (filaires, sans fil, sur fibre), tous les systèmes de détection (radar, capteur de distance ...), tous les systèmes audio, un moment ou un autre, sont analogiques

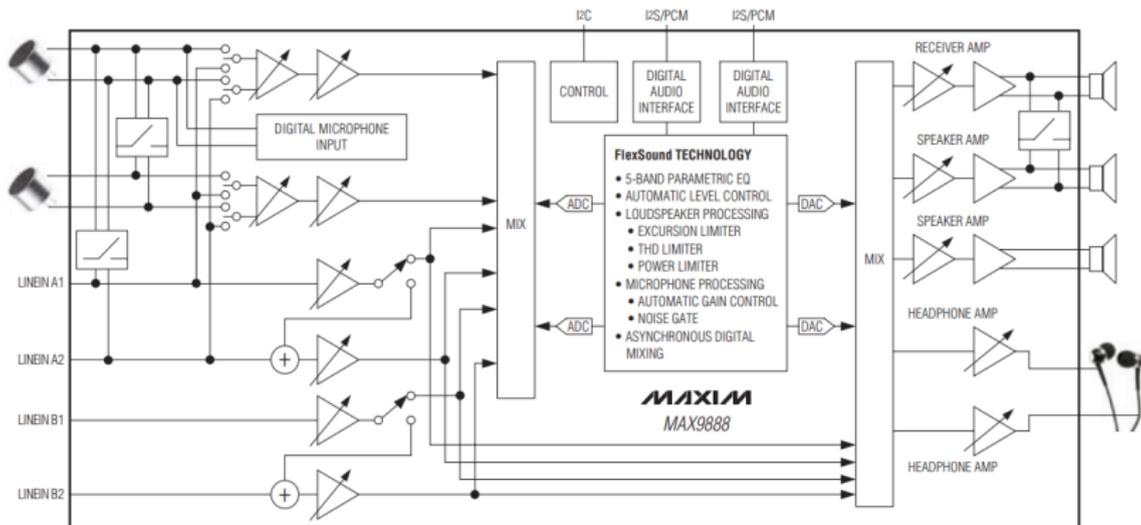
# Du coup rajoutons, juste des interfaces A/N (CAN ou ADC) et N/A (CNA ou DAC)



## Approche *Software Defined Radio* proposée dans les 90s

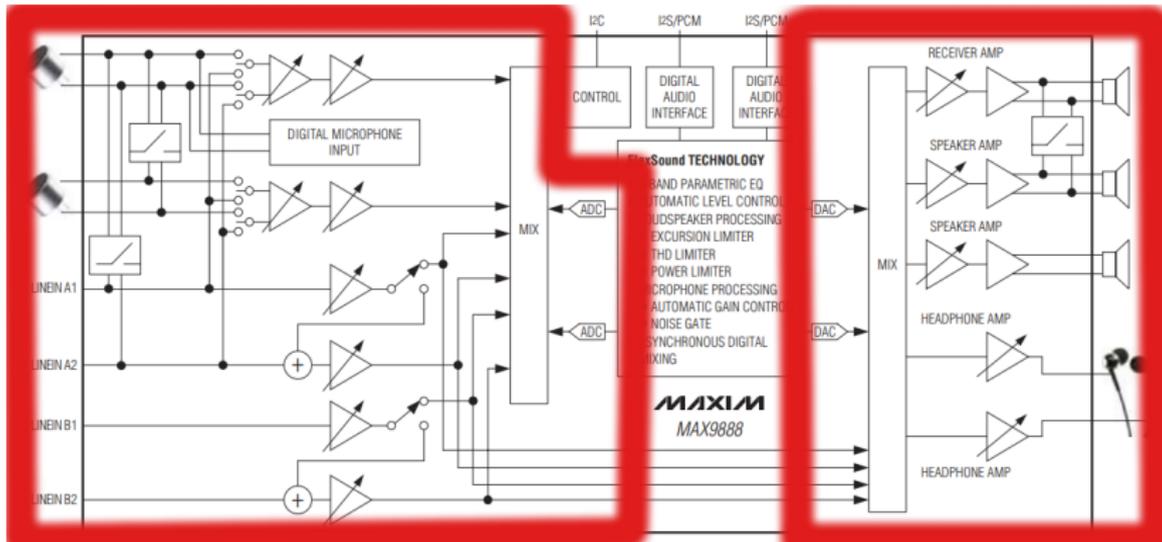
Comme le traitement numérique coûte et coûtera de moins en moins cher, rajoutons à notre traitement numérique juste des convertisseurs analogique-numérique et numérique-analogique.

# Transceiver audio



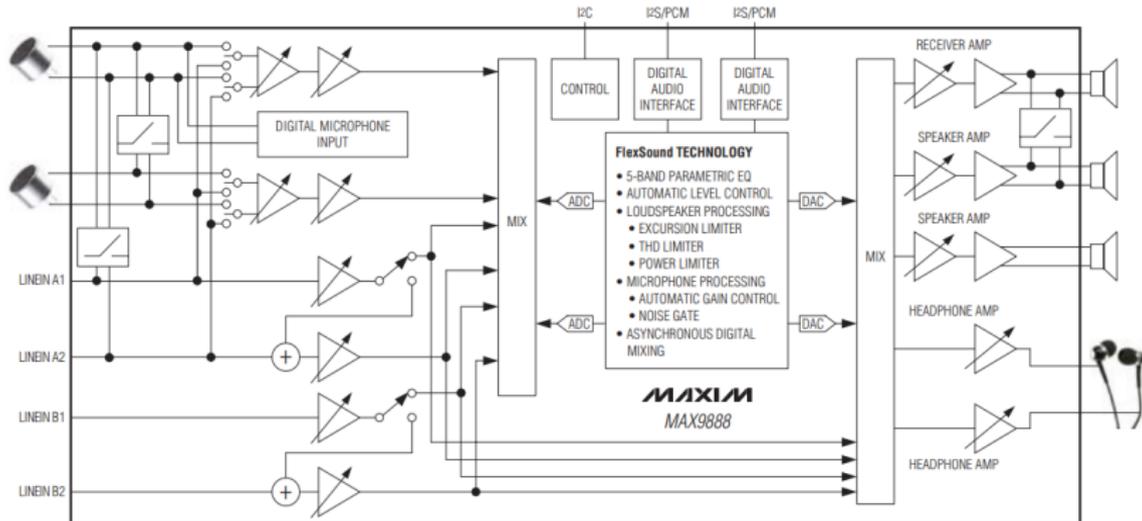
Transceiver audio stéréo produit par Maxim

# Transceiver audio



Transceiver audio stéréo produit par Maxim

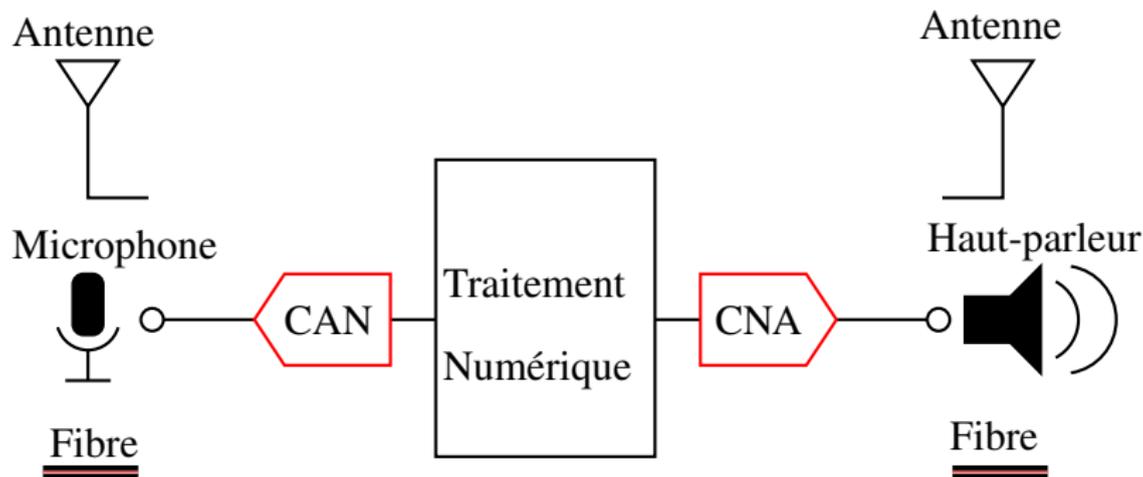
# Transceiver audio



Transceiver audio stéréo produit par Maxim

Tous les systèmes de communication et d'acquisition ont toujours un grand nombre de blocs analogiques, pas juste des CAN et CNA

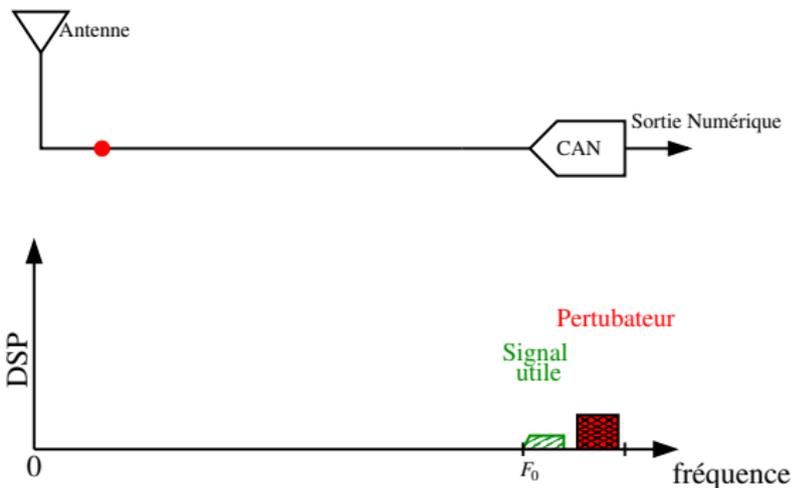
# Approche SDR, why not?



## Problèmes

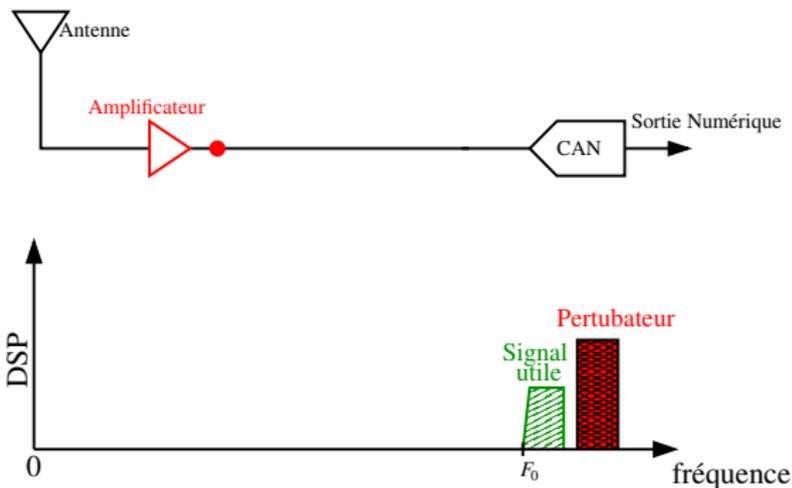
Cette approche n'est jamais adoptée en pratique car implique des contraintes colossales sur le CAN et CNA

# Approche SDR, why not? Récepteur



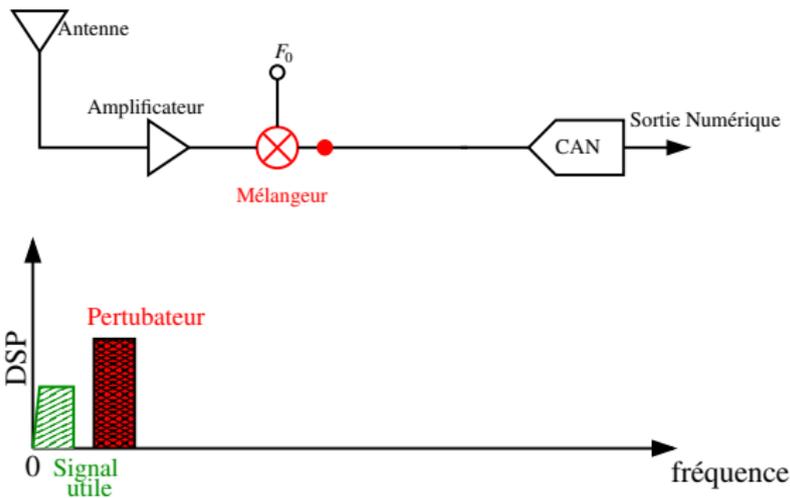
- Puissance du signal très faible à la réception

# Approche SDR, why not? Récepteur



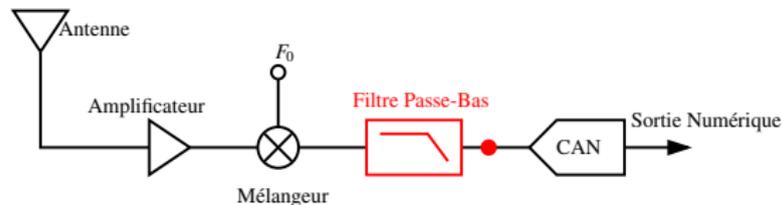
- ▶ Puissance du signal très faible à la réception **Amplification**
- ▶ Fréquence centrale de réception élevée

# Approche SDR, why not? Récepteur



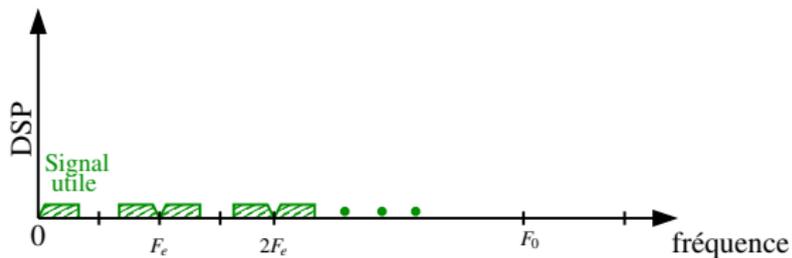
- ▶ Puissance du signal très faible à la réception **Amplification**
- ▶ Fréquence centrale de réception élevée **Mélangeur**
- ▶ Interféreurs et parasites

# Approche SDR, why not? Récepteur



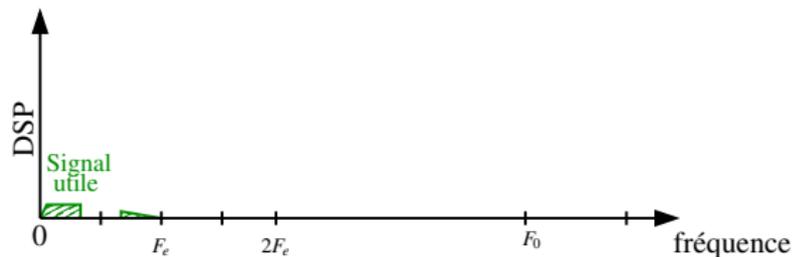
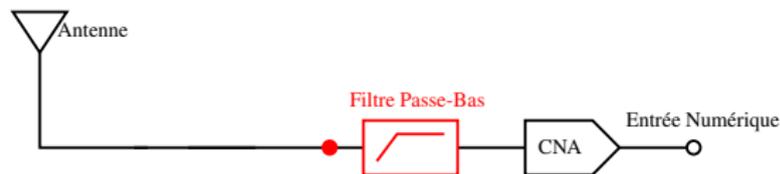
- ▶ Puissance du signal très faible à la réception **Amplification**
- ▶ Fréquence centrale de réception élevée **Mélangeur**
- ▶ Interféreurs et parasites **Filtrage**

# Approche SDR, why not? Emetteur



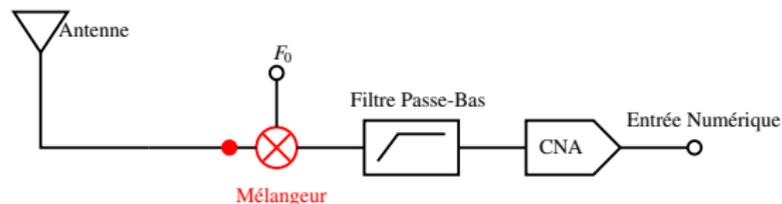
- Images du signal aux multiples de la fréquence d'échantillonnage

# Approche SDR, why not? Emetteur



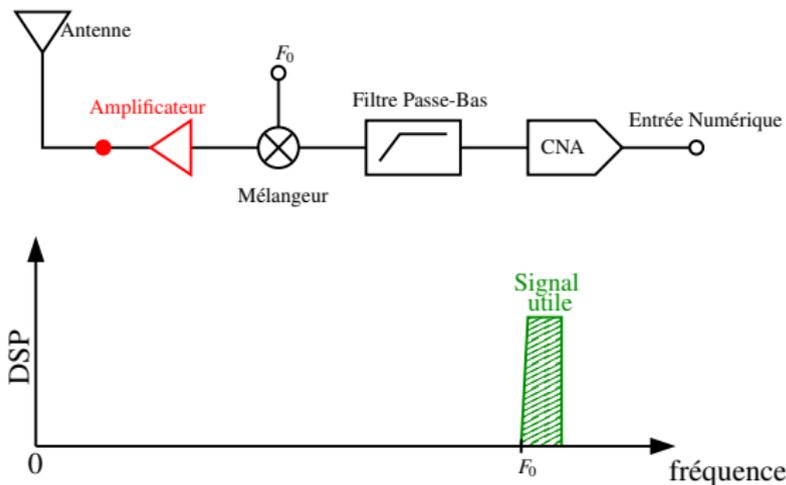
- ▶ Images du signal aux multiples de la fréquence d'échantillonnage **Filtrage**
- ▶ Fréquence centrale à l'émission élevée

# Approche SDR, why not? Emetteur



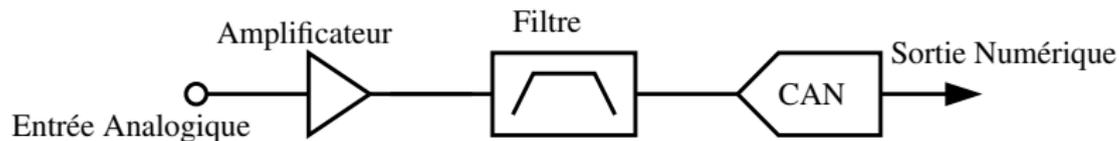
- ▶ Images du signal aux multiples de la fréquence d'échantillonnage **Filtrage**
- ▶ Fréquence centrale à l'émission élevée **Mélangeur**
- ▶ Nécessité d'avoir une puissance élevée pour réduire les contraintes sur le récepteur

# Approche SDR, why not? Emetteur

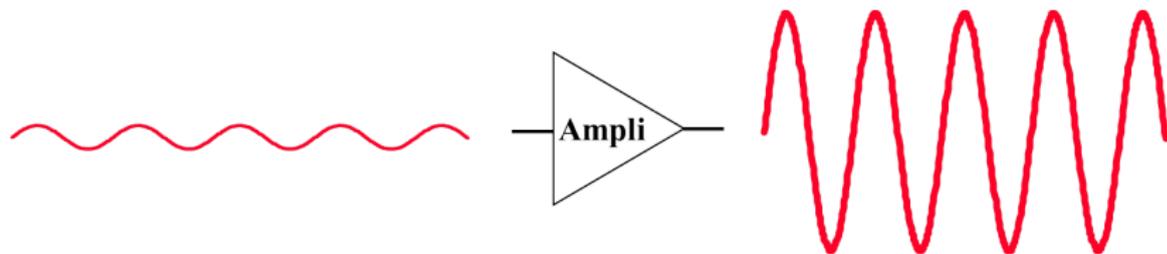


- ▶ Images du signal aux multiples de la fréquence d'échantillonnage **Filtrage**
- ▶ Fréquence centrale à l'émission élevée **Mélangeur**
- ▶ Nécessité d'avoir une puissance élevée pour réduire les contraintes sur le récepteur **Amplification**

# Chaîne étudiée dans le module



- ▶ Amplificateur pour amplifier
- ▶ Filtre pour filtrer
- ▶ CAN pour convertir



- ▶ Gain
- ▶ Bruit
- ▶ Bande passante
- ▶ Non-linéarités
- ▶ Dynamique d'entrée
- ▶ Dynamique de sortie
- ▶ Impédance de sortie
- ▶ ...



Léon Charles  
Thévenin  
(1857-1926)

## Énoncé du théorème

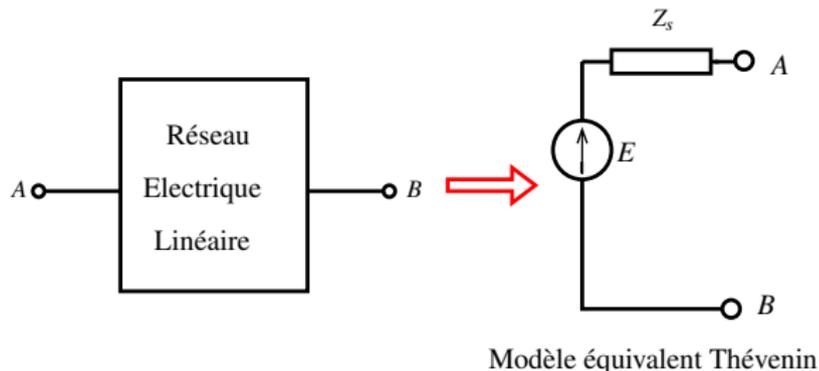
On peut remplacer tout circuit linéaire, qui alimente par les bornes  $A$  et  $B$  un dipôle  $D$  par une source de tension idéale en série avec une impédance



# Théorème de Thévenin - 1883 - EPSPT



Léon Charles  
Thévenin  
(1857-1926)



## Enoncé du théorème

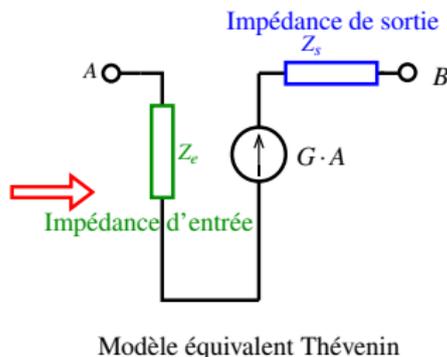
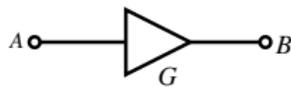
On peut remplacer tout circuit linéaire, qui alimente par les bornes  $A$  et  $B$  un dipôle  $D$  par une source de tension idéale en série avec une impédance



# Théorème de Thévenin - 1883 - EPSPT



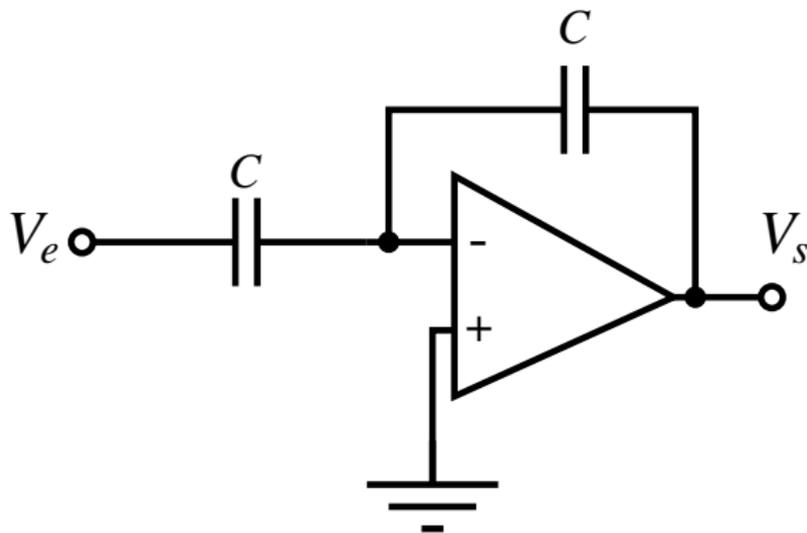
Léon Charles  
Thévenin  
(1857-1926)



## Enoncé du théorème

On peut remplacer tout circuit linéaire, qui alimente par les bornes  $A$  et  $B$  un dipôle  $D$  par une source de tension idéale en série avec une impédance

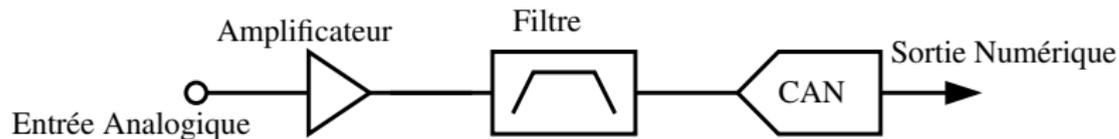
# Amplificateur en boucle fermée



## Amplificateur opérationnel

Grâce à sa masse virtuelle et son impédance de sortie nulle, l'AO permet d'implémenter avec précision une multitude de fonctions sans perte de puissance utile: inversion, intégration, dérivation ...

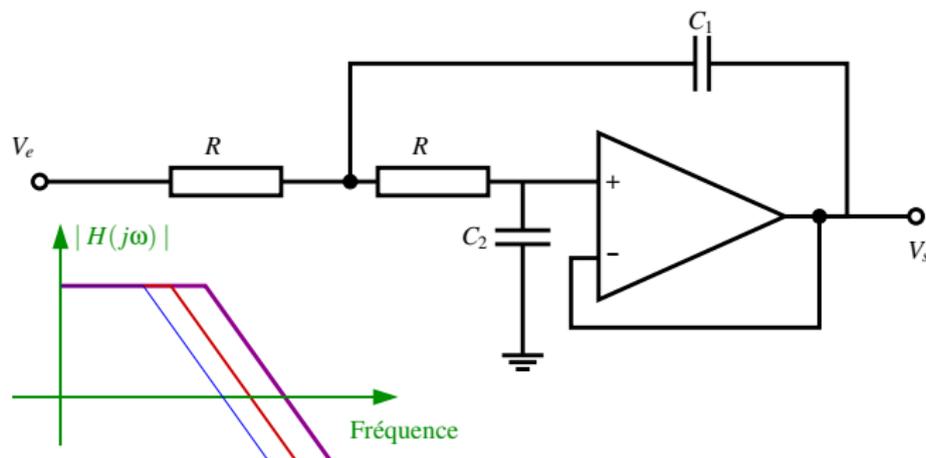
# Chaîne étudiée dans le module - Filtrage



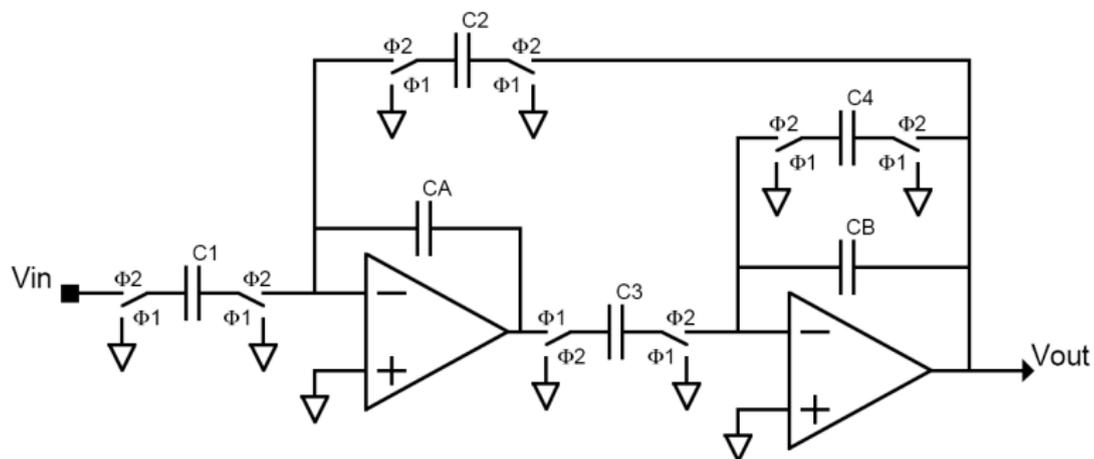
## Filtrage

Le filtrage a comme fonction d'atténuer les perturbateurs, interféreurs et parasites tout en gardant l'intégrité du signal utile

# Filtrage temps continu



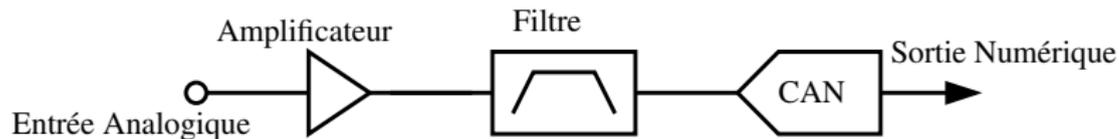
- ▶ Type du filtrage (passe bas, passe haut, ...)
- ▶ Ordre du filtre
- ▶ Approximations: Butterworth, Bessel, Tchebychev ...
- ▶ Atténuation min hors bande, max dans la bande



## Technique des capacités commutées

Cette technique qui consiste à émuler le fonctionnement d'une résistance avec une capacité commuté a de nombreux avantages:  
+ de précision sur la fonction de transfert et + de reconfigurabilité

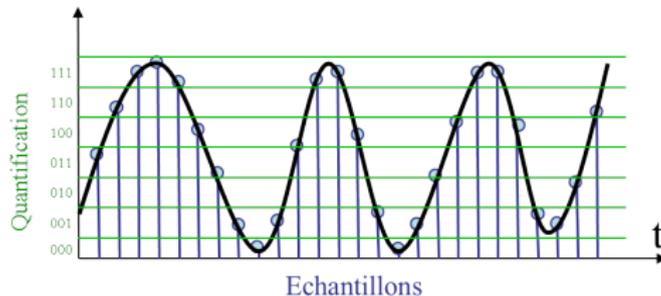
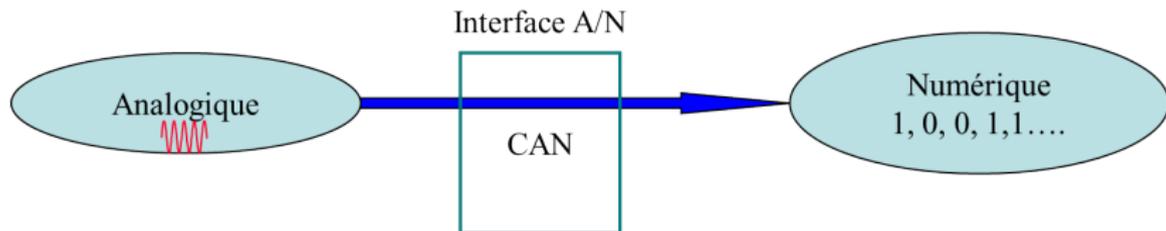
# Chaîne étudiée dans le module - CAN



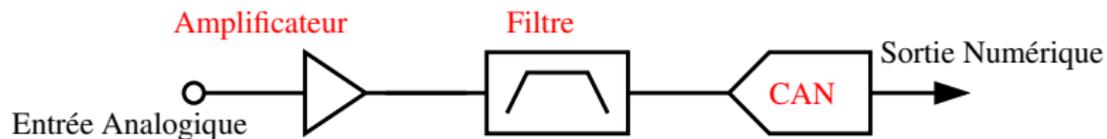
## Convertisseur Analogique-Numérique

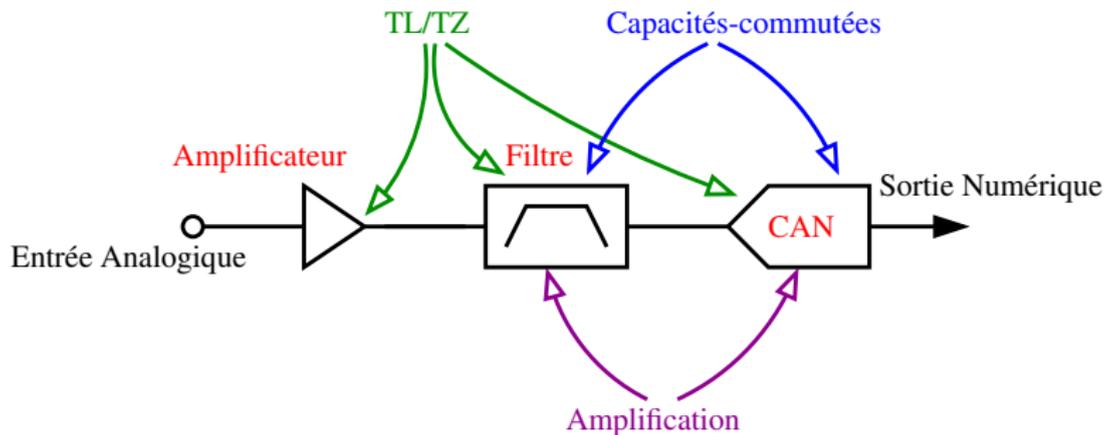
Le CAN a comme fonction de convertir une grandeur analogique en une sortie numérique

# Convertisseurs analogique-numérique



- ▶ Nombre de bits
- ▶ Pleine échelle
- ▶ Fréquence d'échantillonnage
- ▶ Résolution/Linéarité





# Question



Money, money, money

Et ton truc à la con, ça rapporte de l'argent?

# Pour y répondre, combien de transistors "vivants" actuellement?

Y-a-t il plus de transistors, plus de grains de sable ou plus d'étoiles dans l'univers?

# Pour y répondre, combien de transistors "vivants" actuellement?

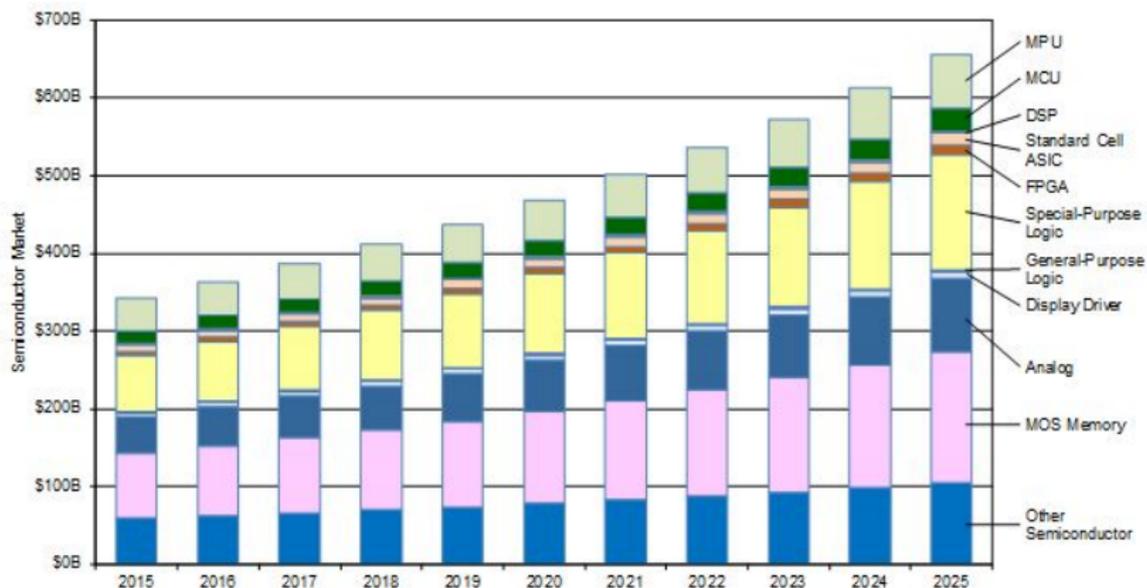
Y-a-t il plus de transistors, plus de grains de sable ou plus d'étoiles dans l'univers?

En faisant plusieurs approximations:

- ▶ sur le nombre de wafers fabriqués
- ▶ sur le nombre de transistor par wafer
- ▶ sur la durée de vie des produits

On obtient environ  $6 \cdot 10^{21}$  transistors vs  $7,5 \cdot 10^{21}$  grains de sable vs  $2 \cdot 10^{23}$  étoiles

# Les grands marchés et acteurs du domaine



Distribution Mondiale par secteur

# Les grands marchés et acteurs du domaine

1Q21 Top 15 Semiconductor Sales Leaders (\$M, Including Foundries)

1Q21 Rank	1Q20 Rank	Company	Headquarters	1Q20 Total IC	1Q20 Total O-S-D	1Q20 Total Semi	1Q21 Total IC	1Q21 Total O-S-D	1Q21 Total Semi	1Q21/1Q20 % Change
1	1	Intel	U.S.	19,508	0	19,508	18,676	0	18,676	-4%
2	2	Samsung	South Korea	14,030	767	14,797	16,152	920	17,072	15%
3	3	TSMC (1)	Taiwan	10,319	0	10,319	12,911	0	12,911	25%
4	4	SK Hynix	South Korea	5,829	210	6,039	7,323	305	7,628	26%
5	5	Micron	U.S.	5,004	0	5,004	6,580	0	6,580	31%
6	7	Qualcomm (2)	U.S.	4,050	0	4,050	6,281	0	6,281	55%
7	6	Broadcom Inc. (2)	U.S.	3,673	409	4,082	4,355	485	4,840	19%
8	9	Nvidia (2)	U.S.	3,074	0	3,074	4,630	0	4,630	51%
9	8	TI	U.S.	2,974	190	3,164	3,793	235	4,028	27%
10	16	MediaTek (2)	Taiwan	2,022	0	2,022	3,849	0	3,849	90%
11	18	AMD (2)	U.S.	1,786	0	1,786	3,445	0	3,445	93%
12	11	Infineon	Europe	1,828	876	2,704	2,170	1,083	3,253	20%
13	10	Apple* (2)	U.S.	2,770	0	2,770	3,080	0	3,080	11%
14	14	ST	Europe	1,483	745	2,228	2,011	994	3,005	35%
15	13	Kioxia	Japan	2,567	0	2,567	2,585	0	2,585	1%
--	--	<b>Top-15 Total</b>		<b>80,917</b>	<b>3,197</b>	<b>84,114</b>	<b>97,841</b>	<b>4,022</b>	<b>101,863</b>	<b>21%</b>

(1) Foundry (2) Fabless

Source: Company reports, IC Insights' Strategic Reviews database

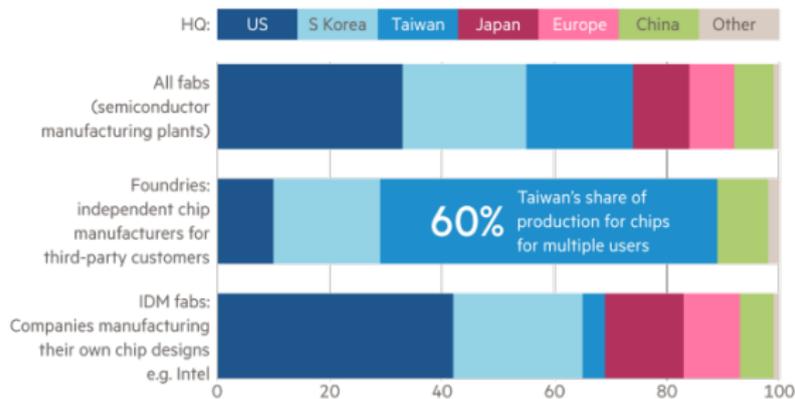
\*Custom processors/devices for internal use.

## Distribution par entreprise

- ▶ Un *Integrated device manufacturer* est une entreprise qui fait à la fois la conception et la fabrication
- ▶ Un *Fabless Supplier* est une entreprise qui ne fait que de la conception et qui sous-traite la fabrication
- ▶ Un *Pure Play* est une entreprise qui ne fait que la fabrication

## How market share varies according to type of chip production

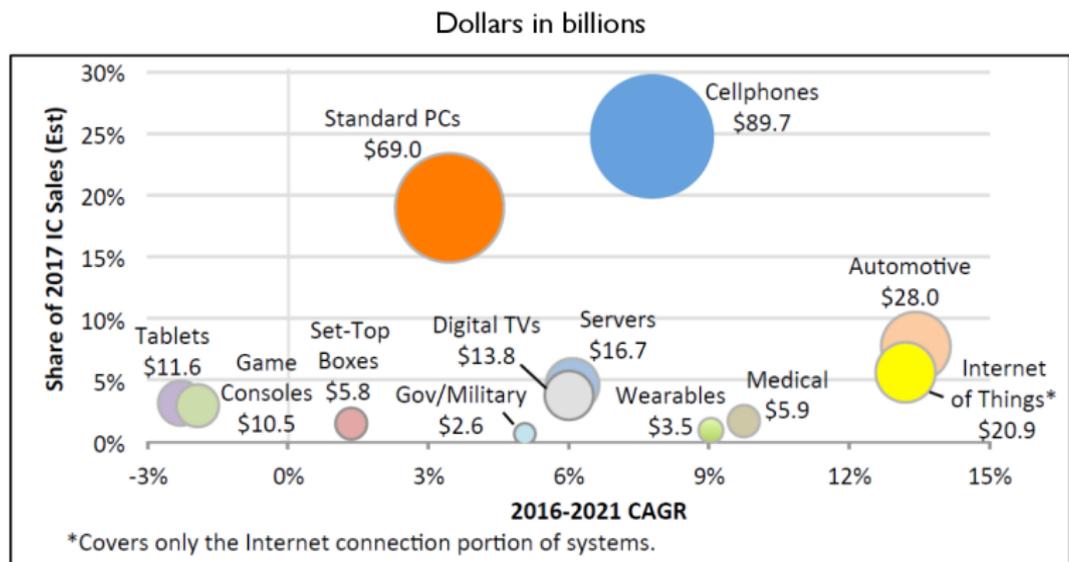
Market share by fab type and location of firm headquarters (%)



Source: Center for Security and Emerging Technology  
© FT

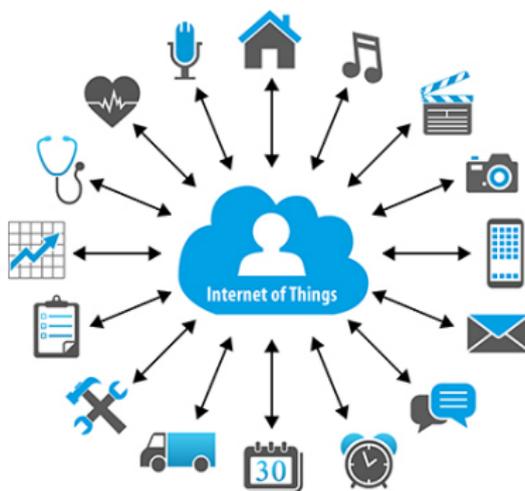
## Distribution par région

# Principaux secteurs



## Principaux secteurs du semiconducteur

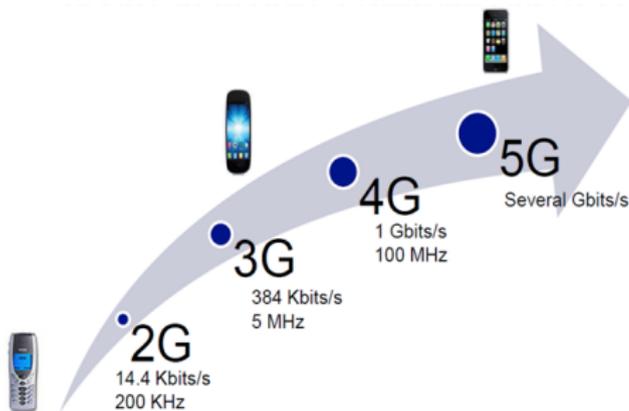
- ▶ Le marché du semiconducteur sera porté par l'IoT, l'automobile et la santé en plus des *smartphones*



Contraintes très diverses, dépendent étroitement de l'application.

Pour un capteur cardiaque, la consommation est primordiale, le coût un peu moins vice versa pour un capteur de connectivité dans un four micro-onde.





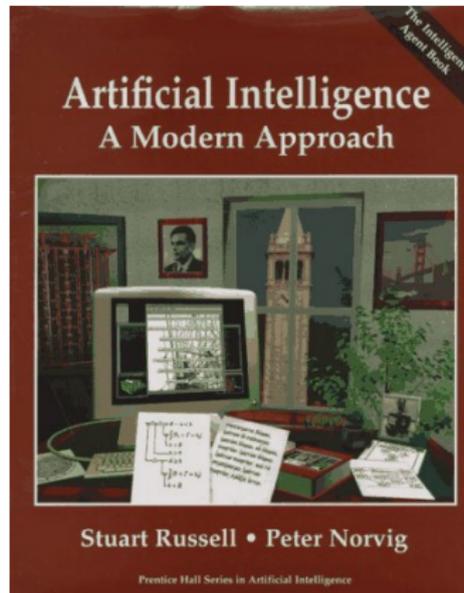
## Bande et débit

La bande passante a été multipliée par 500 et le débit de données par 70 000 entre la 2G et la 4G

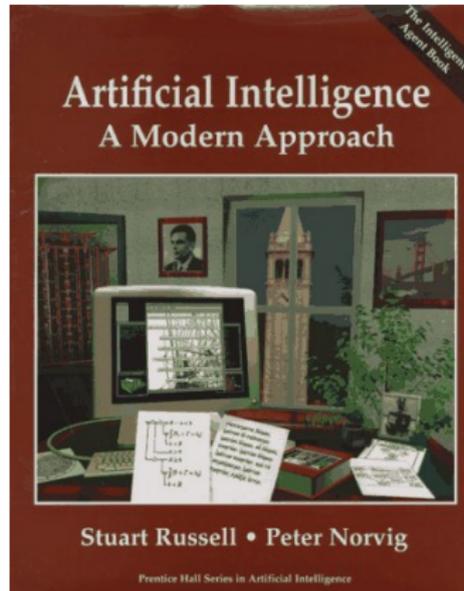
## Contraintes matérielles

Les traitements sont de + en + rapides et complexes mais la consommation doit rester sous contrôle





Artificial Intelligence: A Modern Approach by Russel et Norvig



Artificial Intelligence: A Modern Approach by Russel et Norvig

1994



# Everything is about silicon

# Everything is about silicon



# Everything is about silicon



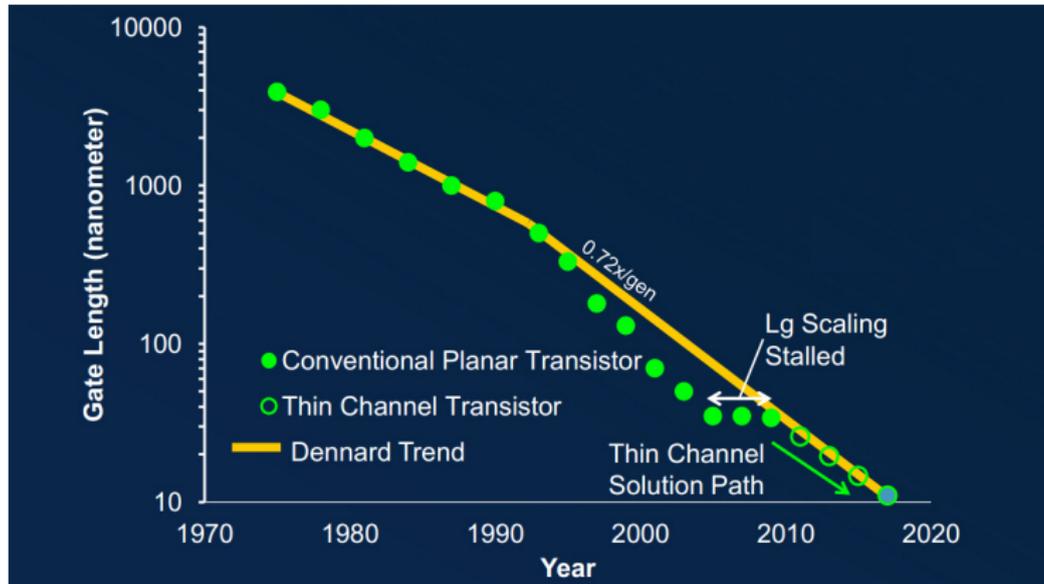
# Everything is about silicon



US Military Journal

Be ready to destroy TSMC To Deter Chinese Invasion Plan

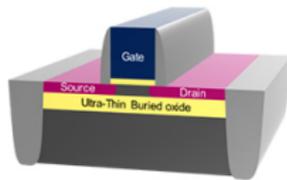
# Et la technologie, elle est en ou?



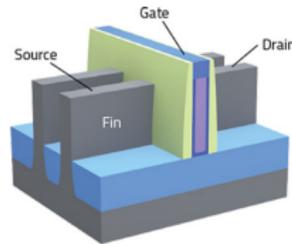
A partir de la technologie 40 nm, les méthodes classiques de *scaling* sont devenues insuffisantes

# Et le monde du semiconducteur s'est divisé en 2 camps.

FDSOI

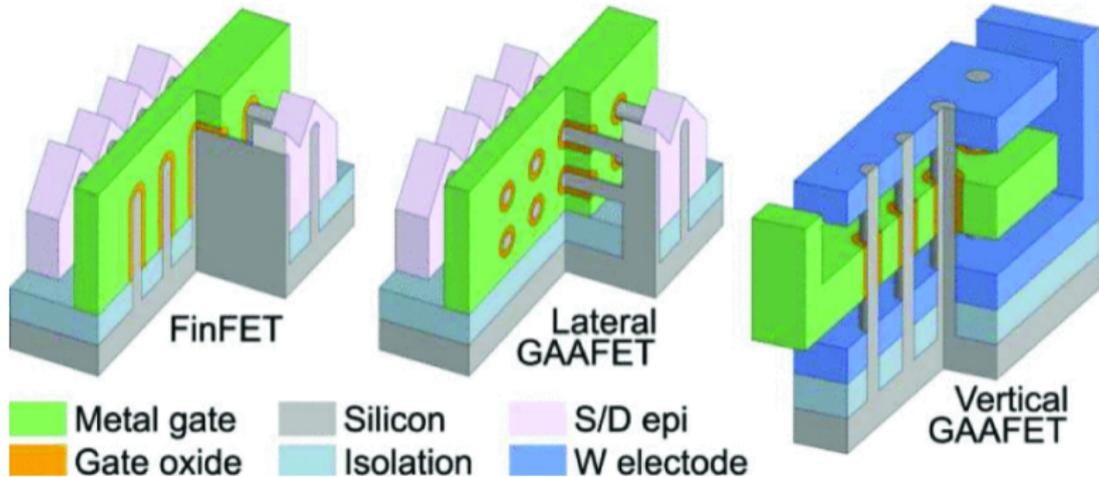


FinFet



- ▶ Transistor planaire avec une couche isolante
- ▶ Moins cher mais limité à 18 nm voire 14 nm
- ▶ STM, GF, Samsung
- ▶ Transistor 3 dimensions en doigts
- ▶ Plus cher mais possibilité d'aller jusqu'à 7 nm
- ▶ Intel, TSMC, Samsung

# Sub 7 nm Technologies



- ▶ Le noeud technologique ne fait plus référence à la longueur du canal mais à la densité équivalente
- ▶ Les transistors deviennent de plus en plus complexes et donc plus chers à produire

# Lithography machines

The ASML logo consists of the letters 'ASML' in a bold, blue, sans-serif font.

Market share : 50 %

The Canon logo features the word 'Canon' in a red, serif font.

Market share : 38 %

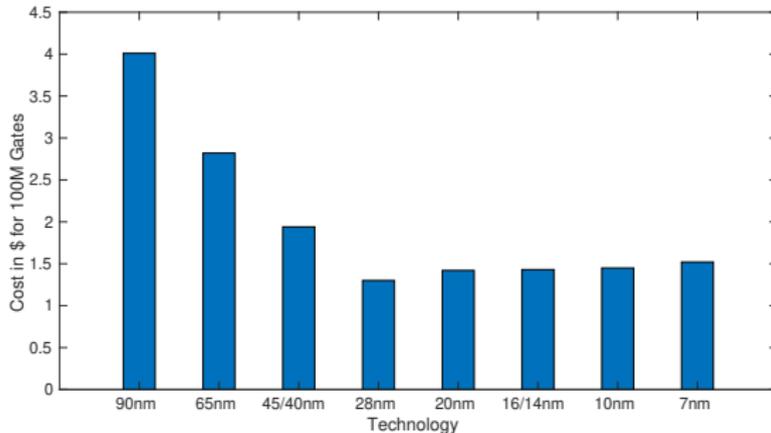


Market share : 12 %

- ▶ ASML est le leader de l'équipement de photolithographie, une société néerlandaise.
- ▶ C'est également le seul producteur des derniers nœuds technologiques.
  - ▶ En 2011 : ASML a produit et vendu 220 machines de photo-lithographie.
  - ▶ En 2021 : 42 machines EUV (au prix modique de 150 millions de dollars par machine)
  - ▶ La machine pèse 18 tones et nécessite 18 mois pour être assemblée!



# Cout de fabrication du transistor



Evolution du Coût par transistor - source: IBS

Mauvaise nouvelle, ou pas?

Besoin de plus d'innovation et plus de créativité dans la conception pour compenser le ralentissement au niveau technologique.

# Numérique et Analogique, main dans la main



Numérique et Analogique, deux faces d'une même pièce

Un bon concepteur de circuits analogiques doit maîtriser la conception numérique et vice versa

# Objectifs ELEC 101 compatibles TP école du numérique

Pour les futurs concepteurs, architectes et chercheurs des systèmes d'acquisition

ELEC101 sera un cours d'initiation au domaine

Pour les futurs utilisateurs de ces systèmes

ELEC101 vous permettra de mieux comprendre leurs fonctionnements et spécifications

Pour les autres

Pour la culture scientifique et pour éviter les crises d'épilepsie si vous entendez CMOS, Thévenin, CAN ou Ampli-op.

## Pré-requis: les bases

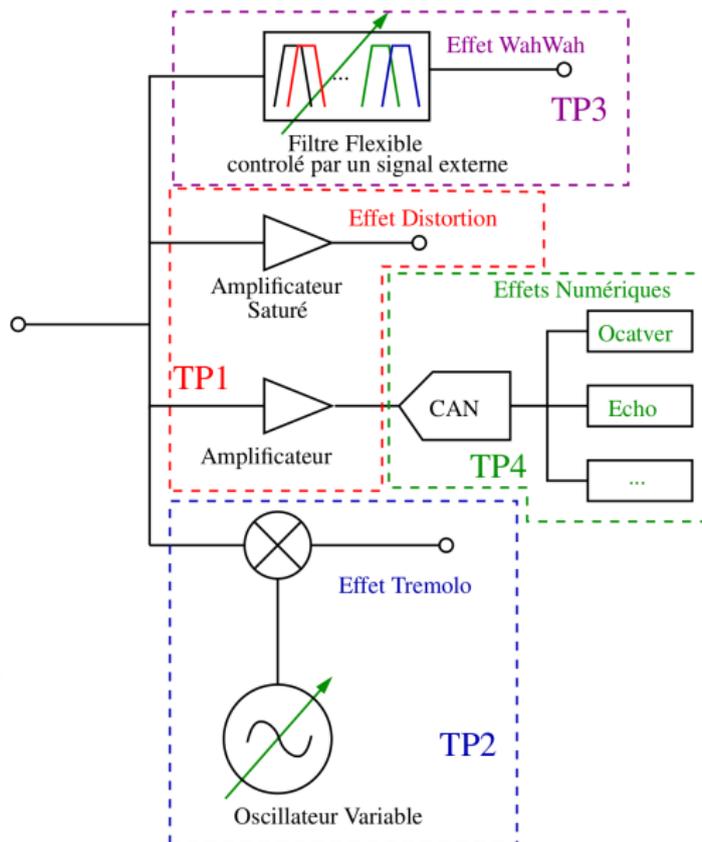
- ▶ La transformée de Fourier
- ▶ Le principe de l'échantillonnage (théorème de Shannon Nyquist, repliement spectral )
- ▶ La loi des noeuds
- ▶ Les diviseurs de tension
- ▶ Les impédances (résistance, condensateur et impédance) en série et en parallèle
- ▶ Conversion linéaire - dB
- ▶ ...

2 heures de bureau spécifiques aux pré-requis sont programmées le 28/04 et le 12/05

# Déroulement du cours

- ▶ 1 TH de cours en promo
  - ▶ Introduction
- ▶ 8 Leçons/TD par groupe
  - ▶ TL, Amplification (2), TZ, capacités-commutées, Filtrage et CAN (2)
- ▶ 4 TPs par groupe
  - ▶ Amplification, capacités-commutées, Filtrage et CAN
  
- ▶ Responsables des groupes
  - ▶ Groupe 1: Patricia Desgreys
  - ▶ Groupe 2: Paul chollet
  - ▶ Groupe 3: Van Tam Nguyen
  - ▶ Groupe 4: Germain Pham
  - ▶ Groupe 5: Chadi Jabbour
  - ▶ Groupe 6: Reda Mohellebi

# Les travaux pratiques



- ▶ 40 % sur les TPs
- ▶ 60 % sur le CC final

## Autres Précisions

- ▶ Des corrigés détaillés des TDs seront mis sur le site au fur et à mesure
- ▶ Une heure de bureau ("office hour") par semaine est prévue afin de répondre à vos questions
- ▶ Si vous vous absentez à un TP, adressez vous à votre responsable de groupe pour convenir d'un créneau de rattrapage.
- ▶ Si l'absence n'est pas justifiée, une pénalité sur la note sera prise. Un TP non rattrapé (absence justifiée ou pas) entraîne une note de 0.

### Site Web

<https://c2s.telecom-paristech.fr/ELEC101/>

This is the end

Merci pour votre attention

Questions ?