

Electronique

JEAN-MICHEL SALLESE

Faculté STI - Section Génie Electrique et Electronique
ELB 234 jean-michel.sallese@epfl.ch



Electronique- Introduction page 1

Références.

- *Traité d'Electricité, Volume VIII, Electronique*, J.-D. Chatellain et R. Dessoulavy, PPR 2013, 2^{ème} Ed (e-book).
- *Electronique. Fondements et applications*. J.-P. Pérez, C. Lagoute, J.-Y. Fourniols, S. Bouhours, Dunod 2006.
- *Microelectronic Circuits 5th edition*, A. S. Sedra & K. C. Smith, Oxford University Press (see internet).

SOMMAIRE DES CHAPITRES

- 1) Introduction.**
- 2) Bases d'analyse des circuits.**
- 3) Circuits linéaires en régime sinusoïdal.**
- 4) La diode à jonction P-N.**
- 5) L'amplificateur opérationnel.**
- 6) Les oscillateurs.**
- 7) Notions de circuits numériques.**
- 8) Les conversions analogiques / numériques.**
- 9) Le transistor MOSFET.**
- 10) La Paire Différentielle - Application à l'AO**

I. INTRODUCTION GÉNÉRALE



INTRODUCTION - GÉNÉRALITÉS

L'électronique a pour objectif de **traiter des signaux électriques** afin de convertir une grandeur physique en un signal électrique ou réciproquement..

- ☐ Transformation des signaux électriques: amplification, filtrage, numérisation.
- ☐ Traitement des données et stockage de l'information (mémoires).
- ☐ Communication via signaux électriques par câbles ou par ondes.

L'évolution des techniques d'intégration sur 'puces' (microélectronique) permet de réaliser des opérations plus complexes pour un coût moindre.

MONDE ANALOGIQUE	MONDE NUMÉRIQUE
Grandeurs à Valeurs continues	Grandeurs à valeurs discrètes
Infinité de valeurs possibles dans un intervalle donné <i>(tension, courant, température)</i>	Nombre fini de valeurs dans un intervalle donné <i>(nombre d'objets)</i>
	
Traitement analogique Représentation continue de l'information (tension, courant, charge électrique). Opérations 'analogiques'	Traitement numérique Représentation binaire de l'information (codage en base 2). Opérations 'numériques' (calculs et opérations logiques)
Electronique- Introduction page 5	

Les grandeurs physiques naturelles varient de manière continue, c'est le monde de l'analogique. Les circuits analogiques sont, par exemple, ceux que l'on utilise pour transformer ces grandeurs physiques en signaux électriques. Ces signaux électriques analogiques varient de façon continue.

Le monde du numérique utilise des 'nombres' pour représenter une information ou une grandeur physique. Les circuits numériques utilisent des signaux électriques discret (essentiellement binaires) pour représenter ces 'nombres'.

SYSTÈMES LINÉAIRES	SYSTÈMES NON-LINÉAIRES
Toutes les grandeurs du système sont liées par des fonctions linéaires	Certaines grandeurs du système sont liées par des fonctions non-linéaires
Exemples:	Exemples:
$V = R \cdot I$ Résistance $I = C \, dV(t)/dt$ Condensateur $V = L \, dI(t)/dt$ Inductance	$I = I_0 (e^{V/0.025} - 1)$ Diode $I = K (V - V_T)^2$ Transistor MOSFET

Electronique- Introduction page 6

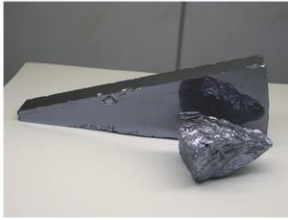
Les systèmes réels sont en majorité non-linéaires. Or, les systèmes non-linéaires sont difficiles à analyser parce qu'il existe rarement une solution analytique qui les décrit.

Sous certaines conditions, un système non-linéaire peut être modélisé par des équations linéaires plus faciles à manipuler (via des développements de Taylor) lorsqu'on ne s'intéresse qu'à un domaine restreint de courants ou de tensions.

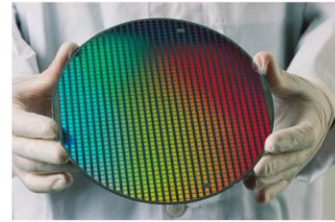
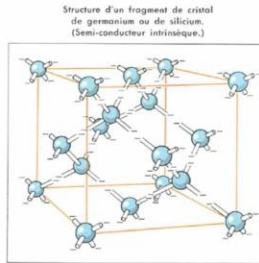
LES COMPOSANTS ACTIFS ET PASSIFS

Les composants électroniques se divisent en deux catégories:

- Les composants dits **passifs**: Résistances, Condensateurs, Inductances.
 - Les composants dits **actifs**: Diodes, Transistors (BJT, MOSFET, HEMT ...)
- Les composants passifs sont constitués de métaux et de couches isolantes (ex: résistances métalliques, à base de couches de carbone et d'oxydes métalliques.)
- **Les composants actifs sont constitués de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium.**



<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/38/Silicon2.jpg>



<https://cdn2.nextinpact.com/images/bd/news/32587-wafer-silicium.jpg>

Electronique- Introduction page 7

L'essor de la microélectronique s'explique par la découverte et la maîtrise des semi-conducteurs tels que le silicium, qui peuvent être soit isolants, soit conducteurs, selon les tensions appliquées et leur composition.

NOTIONS DE SEMICONDUCTEURS

Quelques propriétés des semiconducteurs.

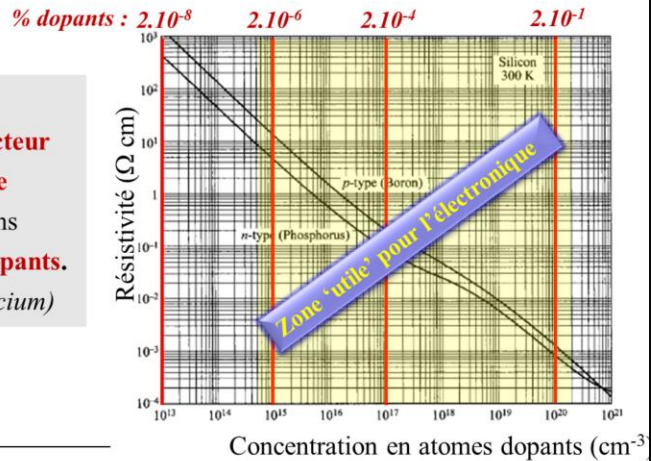
- Un **cristal semiconducteur à l'état pur** est un matériaux *relativement* isolant.
- Sa **résistance diminue si la température augmente**, à l'inverse des métaux.

Une propriété remarquable:

La résistivité d'un semiconducteur diminue de plusieurs ordres de grandeur en introduisant certains types d'atomes étrangers: **les dopants**.
(Bore ou Phosphore pour le silicium)

Silicium: $5 \cdot 10^{22}$ atomes / cm^3

Electronique- Introduction page 8

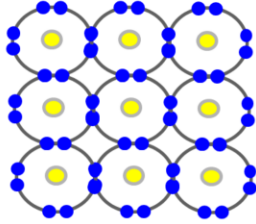


En maîtrisant la quantité d'atomes étrangers qui sont introduits dans le silicium, ou tout autre semiconducteur, on peut changer de plusieurs ordres de grandeur leurs propriétés électriques.

NOTIONS DE SEMICONDUCTEURS

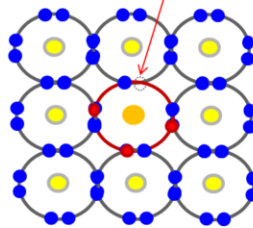
Le dopage dans un cristal de silicium

Silicium à l'état pur: tous les électrons de valence sont mobilisés (à 0K)



Électrons de valence
(liaisons entre atome)

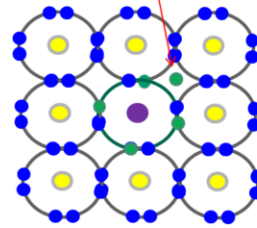
Un 'trou': Particule virtuelle qui participe à la conduction



Atome de **Bore** en substitution du silicium: il manque 1 électron au cristal

Dopage de type P

Électron supplémentaire qui participe à la conduction



Atome de **Phosphore** en substitution du silicium: ajoute 1 électron au cristal

Dopage de type N

Electronique- Introduction page 9

Il existe deux manières de transporter un courant électrique dans un semiconducteur:

- Soit en déplaçant des électrons
- Soit en déplaçant des trous, qui sont en réalité un 'manque' d'électron.

L'association de ces deux modes de conduction est à la base de toute la richesse des divers composants et des circuits électroniques.

Pour créer des électrons en excès dans un semiconducteur, par exemple le silicium, on insère des atomes étrangers qui possèdent **un électron de plus que le silicium** dans leur bande de valence.

De même, pour créer des trous, soit des électrons manquants, on insère des atomes étrangers qui possèdent **un électron de moins que le silicium** dans leur bande de valence.

NOTIONS DE SEMICONDUCTEURS

Résistance typique d'un barreau de 1 cm x 1mm²



Silicium pur : 6 M Ω (très résistif)

Silicium dopé Phosphore 10¹⁴ cm⁻³ : 4 K Ω (très faible dopage)

Silicium dopé Phosphore 10¹⁶ cm⁻³ : 500 Ω

Silicium dopé Phosphore 10¹⁸ cm⁻³ : 3 Ω

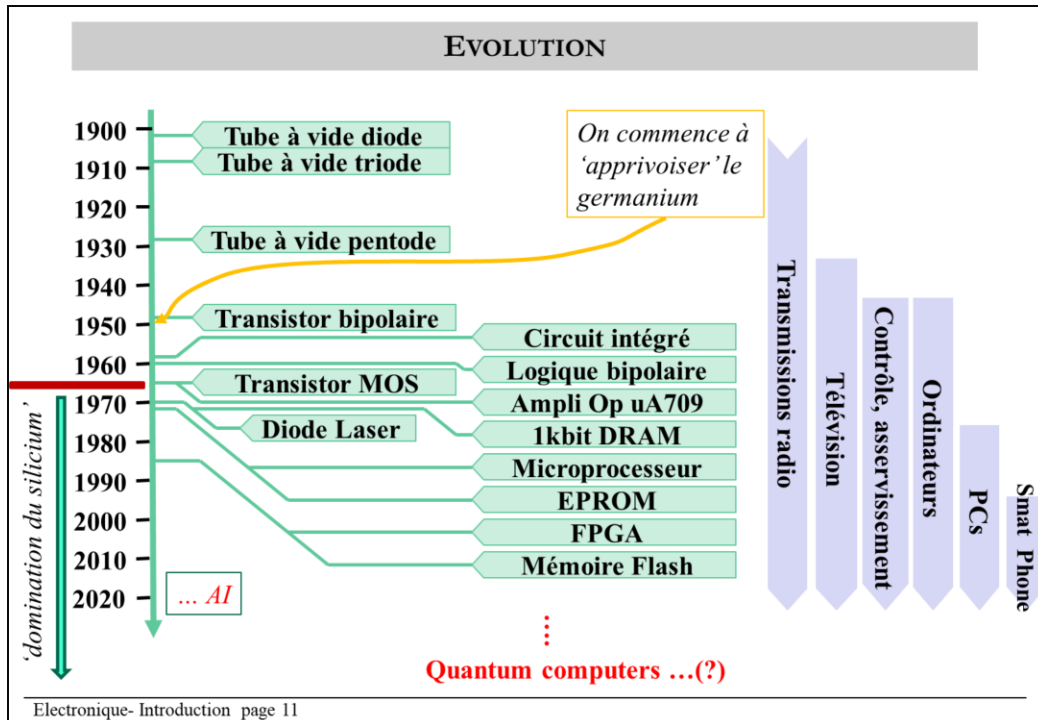
Silicium dopé Phosphore 10²⁰ cm⁻³ : 0.1 Ω (très fort dopage)

Cuivre : 0.00016 Ω

La plupart des caractéristiques des composants électroniques à base de semiconducteurs sont obtenues par l'alternance de zones dopées P et N (Diodes, Transistors, LED).

En modifiant la concentration de ces atomes étrangers, on peut modifier la résistivité du silicium de plusieurs ordres de grandeur.

A noter qu'on ne peut pas atteindre la conductivité de métaux tels que le cuivre, mais ce n'est pas non plus le but recherché pour les applications électroniques.



Début du 20^e siècle marque l'invention des tubes à vide, en particulier la triode qui est le premier élément amplificateur. Il s'agit du début de l'électronique.

L'électronique à tubes est d'abord utilisée exclusivement pour les transmissions radio et la téléphonie.

A partir de 1950 le transistor bipolaire remplace le tube à vide comme élément d'amplification et de commutation. Il est plus fiable, de dimensions réduites (mm au lieu de cm), ayant une faible consommation et un moindre coût.

L'invention du circuit intégré monolithique (tous les composants intégrés sur un même cristal semiconducteur), puis du transistor MOS (métal-oxide-semiconducteur), marquent le début d'un développement 'exponentiel' des applications de l'électronique. Les avantages du Circuit Intégré sont immenses: fonctions très complexes, gain en vitesse, et coût de fabrication réduits. Un microprocesseur peut comporter plus d'un milliard de ces transistors MOS.

Sans ce composant (le transistor MOSFET), l'AI serait une utopie...

A présent, c'est le concept de l'ordinateur quantique qui émerge dans la littérature.

Il semblerait qu'une fois de plus, une technologie nanoélectronique basée sur les semiconducteurs pourrait être la solution.