

## Avant-propos

Au sortir de la Deuxième Guerre mondiale, naquit un nouveau courant technologique : l'électronique intégrée. Cette dernière s'est appuyée sur l'énorme essor de composants électroniques intégrables ; ce domaine a envahi nos sociétés.

En fait l'électronique date du début du XX<sup>e</sup> siècle. Lee de Forest inventa la triode en 1907. Cependant les premiers tubes fiables n'apparurent que vers le milieu du siècle dernier.

Ces tubes virent leur fréquence augmenter dès la fin des années 1950.

La physique de l'état solide, si ce n'est les détecteurs à galène et les redresseurs secs, démarra à l'orée des années 1930, quant aux aspects théoriques : voir F. Bloch et A.H. Wilson. Fin 1947, John Bardeen, Walter Houser Brattain (les fondateurs) et Willam Bradford Shockley (le théoricien, quelque peu « fondu » par ailleurs) présentèrent à leur collègue de (Ma) Bell Telephone le premier transistor bipolaire, en décembre 1947. Durant une vingtaine d'années, d'énormes progrès technologiques améliorèrent les performances en matière de fréquence, puissance et thermique, les prix de revient chutant concomitamment. Des liens entre recherche, développement, productivité deviennent alors très forts, physiciens et technologues tendant à se confondre, les spécialistes du matériau, du composant, du circuit, du système formant un même corps *ad hoc*. Dans la décade 1970-1980, un autre domaine – la modélisation et les simulations numériques afférentes – apparut dans ce champ ; au début de cette décade, des mathématiciens américains étaient des invités, curieux, lors des réunions « remue-méninges ». À la fin de cette décade, ces derniers devinrent des collaborateurs à part entière. En l'occurrence, la modélisation étant fiable, les simulations robustes, les industriels se rendirent vite compte de leur intérêt, en particulier en termes de coût, évitant, entre autres, de construi-

re des démonstrateurs, de « rater » quelque étape technologique, amenant à « poubelliser » toute une série de *wafers*.

Qui plus est, du côté pédagogique, cela apporte beaucoup quant à la compréhension de phénomènes physiques et électriques, permettant de réaliser des « expériences numériques », évitant la « casse » sur composants et circuits réels. Un nouveau domaine apparaît depuis quelques années : l'intelligence artificielle, cette dernière permettant de faire des découvertes, souvent sous forme heuristique, en utilisant un grand nombre de données. Actuellement, l'on peut parler d'IA verticale, améliorant, affinant quelque diagnostic. C'est sûrement l'IA « horizontale » qui verra notre vie révolutionnée. Des robots ou logiciels parviendront sûrement à relier des phénomènes paraissant, *a priori*, disjoints, parvenant peut-être à émuler le raisonnement humain, voire la fameuse intuition qui surgit dans le cerveau des plus grands savants. On pourra être alors enclin à accepter que la théorie de Charles Darwin (et d'Alfred Russel Wallace) poursuit son évolution, en particulier dans notre domaine d'intérêt. Mais c'est une autre histoire...

Cet ouvrage est composé de deux volumes : l'un traite de composants analogiques, le second de circuits analogiques associés. C'est le substrat de deux cours de master, ex-DEA – diplôme d'études approfondies (actuel master 2) –, enseignés sous triple sceau : École centrale, Institut national des sciences appliquées, chimie, physique et électronique (chimie et sciences du numérique), Université Lyon 1. D'anciens étudiants ayant, depuis, pignon sur rue dans l'industrie, demandaient de transformer les photocopiés afférents en livre, en particulier, car les formations actuelles privilégient peut-être trop le qualitatif au quantitatif. À noter, bien sûr, l'existence de sommes, la plupart des États-Unis d'Amérique. Le but n'est donc pas, ici, de réaliser un traitement exhaustif, mais plutôt de travailler par touches, mettant en exergue la complexité du domaine, en appuyant sur certains points majeurs, avec une nécessité de l'art du compromis, qui rend d'autant plus riche et passionnant ce domaine qu'est la microélectronique. Un poste de maître de conférences avait alors été créé, à la fin des années 1980, à la suite de la création du Centre interuniversitaire de microélectronique de la région lyonnaise (CIMIRLY).

## Remerciements

Je remercie certains de mes collègues, la plupart souvent d'anciens doctorants ou étudiants en master ou cinquième année d'ingénieur, la liste n'étant pas exhaustive : Saïda Latreche, Maya Lakhdera, Samir Labiod, Mourad Bella, Bruno Villard, Iulian Gradinariu, Fengyuan Sun, Anne Géroddolle, Serge Martin, Daniel Mathiot, Alain Chantre, Pascal Chevalier, Daniel Barbier, Drissi Fayçal, Filali Omar, Marc Buffat, Francis Calmon, Jacques Verdier, Pierre-Jean Viverge, Mohamed Abouelatta, Yue Ma, Christian Andrei,

Olivier Valorge, Florent Miller, Rabah Dahmani, Rachid Benslimane, Alain Poncet, Michel Le Helley, Jean-Pierre Chante, Geoffroy Klisnick, Jean-Claude Vaissière, Daniel Gasquet, Jean-Pierre Nougier.

Je remercie également l'Union pour la Méditerranée (UPM) et l'Université euro-méditerranéenne de Fès (UEMF).



## I.1. Historique synoptique de la microélectronique

### I.1.1. *Électricité : Ampère, Coulomb, Faraday, Gauss, Henry, Kirchhoff, Maxwell et Ohm*

- 1826 : loi d'Ohm (Georg Simon).
- 1837 : S. Morse (New York) → télégraphe : signaux binaires : points, tirets.
  - Vient de W. Thomson et C. Wheatstone.
- 1865 : J.C. Maxwell → électromagnétisme.
  - Hertz → production d'ondes électromagnétiques, en laboratoire.
- 1876 : Bell → téléphone.
- 1877 : Edison → phonographe (disque : première ROM).
- 1996 : Marconi → téléphone sans fil : ondes hertziennes (~ km).

### I.1.2. *Tube à vide*

- 1895 : H.A. Lorentz → électron (du grec : ambre) ; charges discrètes.
- 1897 : J.J. Thomson → expérience → existence des électrons.
  - Braun : tube à rayons cathodiques ; premier tube électronique.
- 1904 : Ambrose Fleming → invention de la diode (tube) → détecteur.
- 1905 : Albert Einstein, Hendrik Antoon Lorentz, Henri Poincaré → relativité restreinte (*special relativity*) : intrinsèque à l'électromagnétisme.

- 1906 : Pickard → détecteur à cristal de silicium (Si), à moustaches (*whiskers*).
  - Mauvaise fiabilité, car pointes.
- 1906 : Lee de Forest → l’audion triode (diode + grille : ancêtre du transistor) : première source commandée (*controlled*).

#### 1.1.2.1. *Premières applications*

- 1884 : AIEE : American Institute of Electrical Engineers.
- 1906 : AIEE + IRE → IEEE : Institute of Electrical and Electronics.
- 1911 : la triode est fiable (cathode recouverte d’une couche d’oxyde + vide très poussé).
  - Téléphonie, radiocommunications.
- 1917 : création de l’IRE : Institute of Radio Engineers.

#### 1.1.2.2. *Diodes et triodes*

- 1912 : Armstrong : amplificateur à contre-réaction (*feedback*), en cascade.
  - De Forest : oscillateur.
- 1917 : Armstrong : hétérodyne (voir translation de fréquence).
- 1918 : Eccles-Jordan : multivibrateurs.
  - Réaction positive, ampli. en cascade + hétérodyne → détection « faibles signaux ».
- 1928 : Julius E. Lilienfeld : brevets sur les bases des transistors à effet de champ.
- 1930 : Armstrong : modulation de fréquence (FM), avant la modulation d’amplitude (AM).
- 1930 : téléviseur N&B (noir et blanc : *black and white*).
- 1942 : radar (*Radio Detection And Ranging*).
  - Hyperfréquences : klystron, magnétron, etc.
- 1950 : Télévision couleur.

#### 1.1.3. *Ordinateurs (transistors – transrésistors – circuits intégrés – CI)*

- 1633 : Wilhelm Schickard : calculateur mécanique (à roues, avec différents nombres de rayons).

- 
- 1643 : Blaise Pascal (voir la pascaline).
  - 1687 : Gottfried Wilhelm Leibniz.
  - 1883 : Babbage : « la machine analytique ».
    - Cartes perforées (voir 1853, Jacquard) : programmes enregistrés.
  - 1930 : Mark I : Aiken (Harvard : 1930) : calculateur automatique, à séquences programmées :  $\sim 17 \text{ m}^3$ .
  - 1936 : Alan Turing : principes généraux des machines d'états automatiques.
  - 1945 : IBM : Industrial Business Machines ; le 603 : commercialisé (le 701 en 1952, le 704 en 1954 (144 ko de mémoire)).
  - 1945 : von Neumann : théorie sur l'architecture des calculateurs automatiques.
  - 1946 : Eckert, Mauckly (Pennsylvanie) :
    - ENIAC : Electronic Numerical Integrator And Computer ;
    - armée  $\rightarrow$  balistique, von Neumann  $\rightarrow$  binaire ;
    - $40 \times 2\,300$  tubes (salle de  $10 \text{ m} \times 13 \text{ m}$ ).
  - 1947 : IBM 604 : 4 000 exemplaires en 12 ans.
  - 1948 : début de l'industrie des ordinateurs, avènement du transistor (trans(rés)istor).
  - 1951 : l'UNIVAC 1 : premier ordinateur commercial.
  - 1954 : IBM 650 : ordinateurs numériques de première génération.
    - Bush (Massachusetts Institute of Technology) : analyseur différentiel (premier ordinateur analogique électromécanique).
    - Amplificateur opérationnel : électronique analogique.
  - 1955 : premier réseau informatique : SABRE (créé pour American Airlines).
    - W. Shockley quitte Ma Bell pour fonder sa propre compagnie à Palo Alto, en Californie, la première de ce qui deviendra la Silicon Valley.
  - 1956 : Cray ; il fonda Control Data Corporation, puis Cray Computers.
    - Ordinateurs à semi-conducteurs.
  - 1957 : John Backus : premier langage de programmation « supérieur » : le Fortran (*formula translation*).

- 1959 : IBM 5090/7094 : deuxième génération.
  - Le PDP 1 : premier ordinateur interactif, de la Digital Equipment Corporation.
  - PDP8 (1965) : premier mini-ordinateur dans l'industrie.
- 1964 : IBM 360 ; avec circuits intégrés (CI) hybrides à transistors discrets sur un substrat (*bulk*) : Burroughs, Control Data, UNIVAC.
- 1970 : IBM 370 : troisième génération.
- 1980 : quatrième génération (CI VLSI : *Very Large Scale Integration*).
  - Plusieurs dizaines de millions d'opérations par seconde.
  - Architectures nouvelles (vectorielle, *pipeline*).
- 2010 : ordinateurs exaflops.

#### **I.1.4. Analyse et théorie**

Cela inclut l'analyse des circuits et les techniques de synthèse.

- Bell et MIT.
- Bode, Nyquist : amplificateurs à réaction :
  - Shannon, Kotelnikov, Spataru : théorie de l'information (transmission des données) ;
  - exemple : MIC : modulation à impulsions codées, de Reeves.
- Shannon (1937) : algèbre de Boole → analyse et conception des circuits de commutation.
  - Turing : concept d'ordinateur universel.
  - Wilkes : microprogrammation.
  - Raggazini, Zadeh : systèmes de données échantillonnées → contrôle et commande numérique.

#### **I.1.5. Transistor**

- 1930-1945 : étude des propriétés électromagnétiques des semi-conducteurs et des métaux : Block, Davidov, Lark, Horovitz, Mott, Schottky, Slater, Summerfield, Vanvleck, Wigner, Wilson, Van der Ziel, Van Vliet.



- Fin 1947 (Bardeen, Brattain, Shockley) : le transistor bipolaire, Bell Telephone.
- 1950 : Team (Bell Labs) : branche recherche d'AT&T.
  - Tirage (méthode Czochralski) de monocristaux ultrapurs de germanium (Ge).
- 1951 : production commerciale de transistors. AT&T fournit des licences de brevets de fabrication de transistors → RCA Raytheon, General Electric, Westinghouse, Western Electric (branche de fabrication d'AT&T).
- 1954 : Texas Instruments (Teal) : production de transistors au silicium : Si.
- 1956 : (Bardeen, Brattain, Shockley) : prix Nobel.
- 1975 : Esaki : ingénierie de *band gap* (*band gap heterojunction engineering*).

### 1.1.6. Circuits intégrés

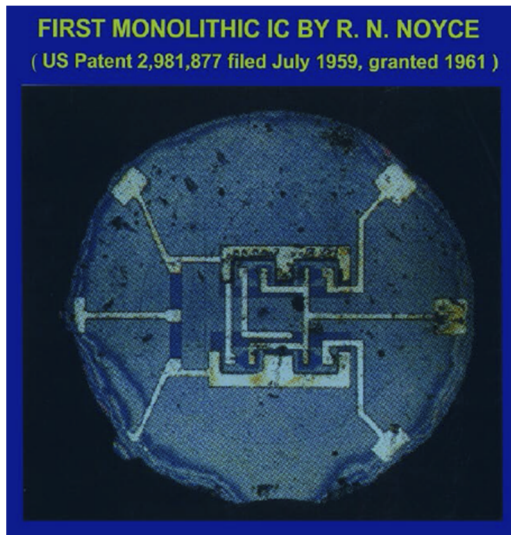
- 1958 (1959) Kilby (Texas Instruments) : congrès IRE « circuits à semi-conducteurs » (oscillateurs multivibrateurs, condensateurs en Si ou Ge).
  - Noyce (Fairchild : futur fondateur d'Intel).
  - Circuit monolithique Si ; plusieurs composants ; résistances, condensateurs, jonction PN isolation : brevet de Lehovec : Prague Electric Company.
  - Moore → zones diffusées.
- 1958 : Hoerni (Fairchild) : transistors diffusés (base et émetteur diffusés dans le collecteur).
  - Passivation des jonctions par couche d'oxyde (*oxide*).
  - Lithographie, gravure (*etching*).

Traitement par lots (sur une même tranche (*wafer*) plusieurs puces (*dies*)) → CI commercialisées par Texas et Fairchild.

### 1.1.7. Transistor à effet de champ

- 1951 : Shockley ; JFET (*Jonction Fiel Effet Transistor*).
  - Pb : surface instable (piège à porteurs de charge électrique).
- 1958 : Tezner (France) : premier JFET fabriqué, grâce au procédé Planar (remplace les mésas – plateaux – et la passivation : SiO<sub>2</sub>).

- 1960 : M. Atalla, D. Kahng (Bell Labs) : premier MOS (*Metal Oxide Semiconductor*), type P : PMOS.
- 1962 : premier inverseur CMOS, invention de la technologie CMOS par F. Wanlass, chez Fairchild, technologie se distinguant par sa faible consommation en statique.
- 1962 : Hofstein, Heiman (RCA), brevet pour la fabrication des CI MOS (production des premiers transistors à effet de champ commerciaux).
- 1970 : CMOS : *Complementary MOS* : NMOS et PMOS.
- 1970 : BiCMOS : bipolaire compatible CMOS ; par exemple l'émetteur polycristallin du NPN et fabriqué en même temps que la grille polysilicium du PMOS.



**Figure I.1.** Premier circuit intégré (Noyce) (source : Fairchild Inc.)

#### 1.1.7.1. Transistors discrets, par puce (chip)

- 1960 : intégration à petite échelle (< 100 composants).
- 1966 : intégration à moyenne échelle (100 à 1 000 composants).
- 1969 : intégration à grande échelle (> 1 000 composants).
- 1975 : intégration à très grande échelle, VLSI (> 10 000 composants).
- 1986 : intégration à ultragrande échelle, ULSI (> 1 000 000 composants).
- 2010 : vers la 3D ?

### I.1.8. Circuits intégrés numériques

- 1961 : Buie : TTL : *Transistor-coupled Transistor Logic* (*Pacific Semiconductor* ∈ TRW).
  - TTL : *Transistor-Transistor Logic*.
  - Exemple : plusieurs émetteurs par transistor → plus forte intégration des composants.
- 1962 : Motorola → ECL : *Emitter Coupled Logic*.
- 1965 : fondation de la compagnie Intel (la Silicon Valley).
- 1967 : ROM : *Read Only Memory*.
  - PROM : *Programable ROM*.
  - EPROM : *Erasable PROM*.
- 1968 : lancement du réseau ARPANET, l'ancêtre d'Internet.
- Invention de l'environnement fenêtre/souris (Xerox, cédé à Microsoft).
- 1969 : Marcian Hoff (Intel) → microprocesseur.
- UNIX, système d'exploitation.
- 1970 : RAM bipolaires (enregistrement de  $\sim 1\,000$  bits (*binary digit*) d'information).
- 1970 : Boyle, Smith (Bell Labs) → mémoire et registres avec RAM de 64 000 bits : 1977.
  - Application : caméras, traitement d'images, télécommunications.
- 1971 : microprocesseur 4 bits.
  - Création du premier microprocesseur : Intel 4004 (cadencé à 740 kHz : 2 300 transistors).
- 1971 : implantation ionique :  $I^2$ .
- Longueurs des interconnexions sur puce :
  - 1961 : 25 mm ;
  - 1975 : 2 mm ;
  - 1990 : 1 mm.
- CAO : conception assistée par ordinateur.

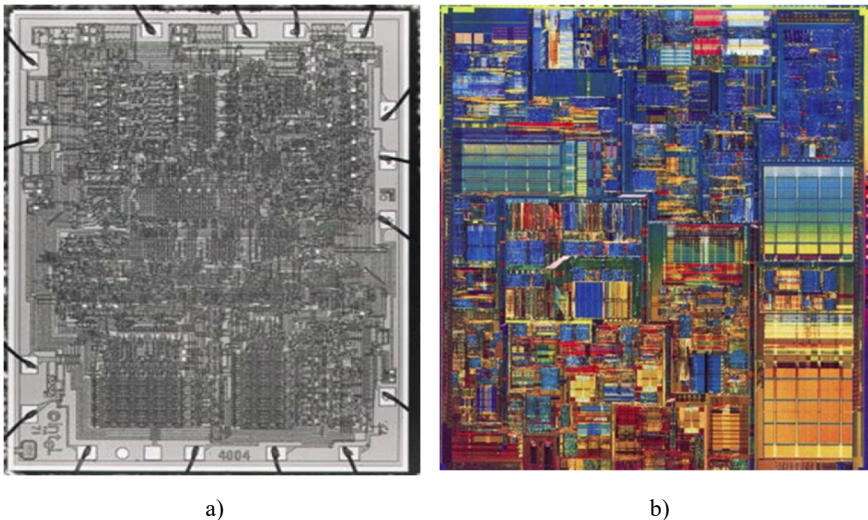
- CAD : *Conception Aided Design*.
- Simulateur de *process* de fabrication :
  - Suprem (Stanford), 1978 : premier simulateur 1D ;
  - Biceps 2D (différences finies) ;
  - Titan (CNET Grenoble 3D éléments finis : *process*) ;
  - Athena Silvaco.
- Pour le *device* :
  - Pisces/Medici ;
  - Storm (France-Italie : *process* et *device* ; abandonné : cause bureaucratie) ;
  - Atlas Silvaco ;
  - Centaurus Synopsis.
- Simulateur électrique circuits (lois de Kirchhoff) :
  - SPICE : *Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis* (Nagel, Vladimirescu) ;
  - Eldo : très adapté au CMOS ; simulateur électrique RF ;
  - *layout/schematic* : Cadence + ADS (*Advanced Design System*, de Hewlett-Packard).
    - 1971 : Cockran et Bonne (Texas) ; brevet d'un « micro-ordinateur » sur puce (cependant le 8048 d'Intel fut le premier disponible sur le marché).
    - CCD (MOS) : *Charge-Coupled Device* ; dispositif à transfert de charge (MOS « multigrille »).
  - 1972 : microprocesseur 8 bits.
  - 1972 : Hart, Slob (Philips, Pays-Bas) et Berger, Wiedmann (IBM, Allemagne) → I<sup>2</sup>L : *Integrated Injection Logic* (transistors à plusieurs collecteurs → puces bipolaires de très haute densité).
    - CMOS : utilisation initiale : les montres ; Japon et Suisse.
  - 1973 : 16 000 bits (MOS).
  - 1973 : création du langage de programmation C, étroitement lié au système d'opération UNIX (1969 : Ken Thompson et Dennis Ritchie).

- 1974 : Wildar (*Fairchild Semiconductor*) :
  - premier amplificateur opérationnel ; le mA709 ;
  - la plupart des circuits analogiques comportaient des bipolaires (voir rapidité en sortance), mais aussi des MOS depuis la fin des années 1970 ;
  - exemples :
    - multiplicateurs analogiques (exemple : Gilbert) ;
    - convertisseur numérique analogique et A/N ;
    - boucle à verrouillages de phase : PLL (*Phase-Locked Loop*) et son VCO (*Voltage-Controlled Oscillator*) : oscillateur commandé en tension.
- 1976 : lancement du supercalculateur Cray-1 (puissance de crête 100 Mflops).
- 1977 : premier ordinateur Apple.
- 1977 : microprocesseur 16 bits, 32 puis 64.
- 1978 : 64 000 bits.
- 1982 : 288 000 bits.
- 1988 :  $> 10^6$  bits.
- 1990 : suprématie du CMOS.
  - Les MOS sont très utilisés dans les RAM (*Random Access Memories*) : mémoires vives, à accès aléatoire (écriture et lecture).

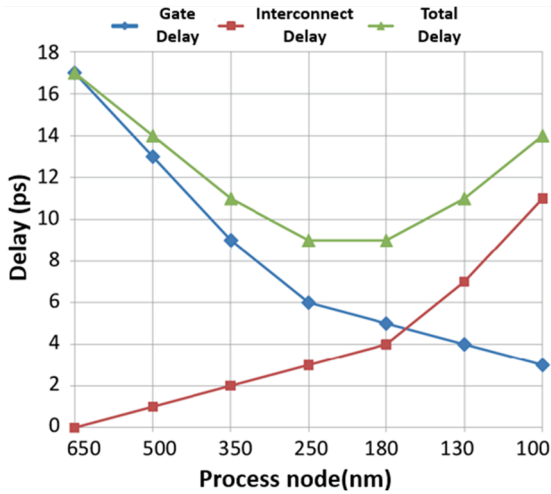
### **I.1.9. Technologies de fabrication**

- 1960 : épitaxie (du grec *epe* : au-dessus ; *taxis* : ordonner).
- 1967 : masquage par faisceau électronique.
- 1971 : implantation ionique : I<sup>2</sup>.
- 1981 : IBM se lance dans la commercialisation des ordinateurs personnels.
- 1983 : création du langage de programmation C++.
- 1984 : lancement du Macintosh d'Apple, premier succès commercial d'un ordinateur à environnement « fenêtre/souris » (technologie Xerox).
- 1986 : lancement du système d'opération Windows 1.1, par Microsoft.

- 1989 : création du *World Wide Web* et du langage HTML (*HyperText Markup Language*), au Centre européen de recherche nucléaire (CERN).
- 1994 : Intel lance le Pentium, microprocesseur contenant plus de cinq millions de transistors. Les nouveautés : bus de données élargi à 64 bits pour l'accès à la mémoire, capacité du processeur à pouvoir traiter deux instructions par cycle d'horloge et deux niveaux de mémoire cache afin d'accélérer le traitement des instructions au niveau du processeur.
- 1998 : lancement du Pentium II d'Intel et du K6-2 d'AMD.
- 2001 : début du Pentium III d'Intel. Ce processeur monte la fréquence des PC à 866 MHz.
- 2003 : début du Pentium IV d'Intel. Lancé à 1 GHz, il atteindra jusqu'à 3,8 GHz.
- 2003 : le nombre de transistors sur une puce de PC atteint les milliards. Un microprocesseur de PC peut délivrer jusqu'à 6,4 Gflops (6,4 milliards d'opérations en virgule flottante par seconde).
- Le supercalculateur : le DOE Blue Gene d'IBM installé au Lawrence Livermore National Laboratory (États-Unis). Actuellement, le plus rapide : le Fugaku de Fujitsu/Riken (442 pétaflops : 2022).



**Figure I.2.** a) Premier microprocesseur : Intel 4004 : 1971 ; b) Intel P4 : 2000



**Figure I.3.** Temps de retard en fonction du nœud de process



**Figure I.4.** La loi de Moore (1975) : le nombre de transistors des microprocesseurs (et non plus de simples circuits intégrés, cas de la première conjecture de 1965) sur une puce de silicium double tous les deux ans

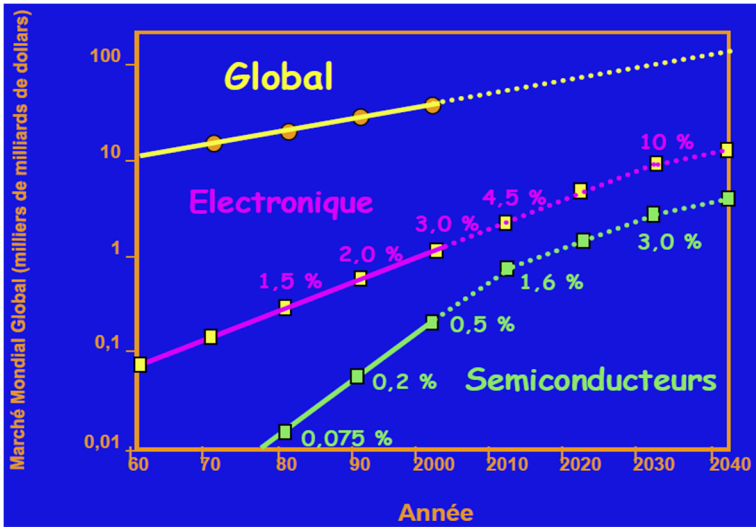


Figure I.5. Industrie des semi-conducteurs

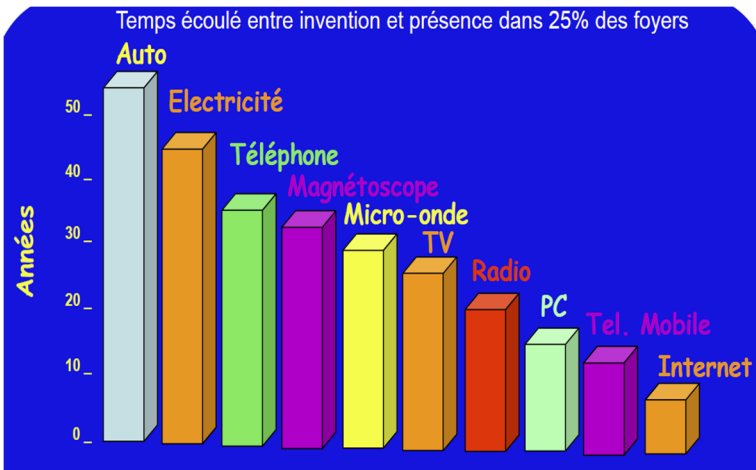


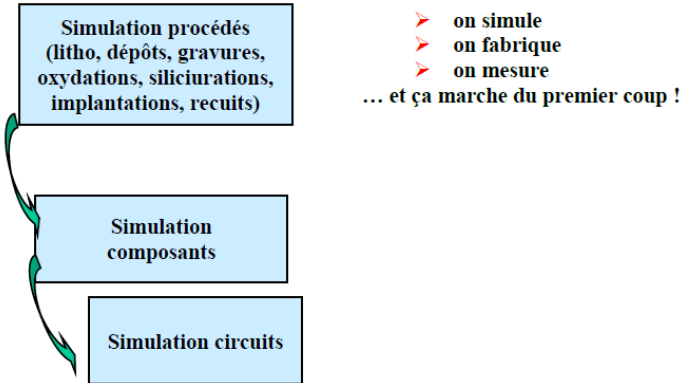
Figure I.6. Pénétration de la microélectronique dans le marché grand public



## I.2. Conception assistée par ordinateur

### LA PLACE DE LA CONCEPTION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR (CAO/CAD)

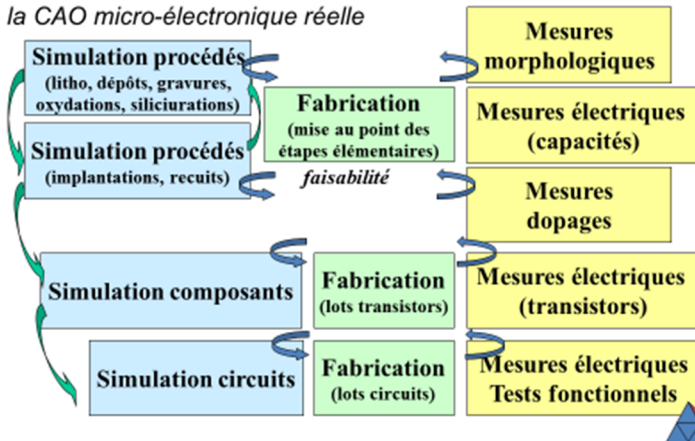
*la CAO microélectronique idéale*



**Figure I.7.** La CAO

### LA PLACE DE LA CONCEPTION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR (CAO/CAD)

*la CAO micro-électronique réelle*



**Figure I.8.** CAD : Conception Aided Design ;  
CAO : conception assistée par ordinateur

### Conception assistée par ordinateur (CAO/CAD)

#### *La CAO microélectronique réelle*

- **Toujours au moins une génération d'écart entre :**
  - matériau innovant, exemple : nouveaux diélectriques ;
  - composant innovant (transistor) ;
  - circuit innovant ;
  - service innovant.
- **De même pour les outils de conception !**
- **La simulation technologique (TCAD)**  
s'appuie sur des modèles physiques qui doivent être continuellement affinés et calibrés.
- **La simulation de circuit**  
s'appuie sur des modèles « compacts » dont les paramètres doivent être extraits à partir de données expérimentales (et, possiblement, de simulation composants).
- **La simulation fonctionnelle**  
s'appuie sur des bibliothèques de cellules à régénérer d'une génération technologique à la suivante.

**Figure I.9.** *La CAO microélectronique*

### Conception technologique assistée par ordinateur (TCAD)

#### *La TCAD microélectronique réelle*

#### **La simulation technologique 100 % prédictive n'existe pas !**

- Les mécanismes physiques sont de plus en plus **complexes**.
- Les évolutions technologiques sont **rapides** → la modélisation a du mal à suivre.
- Le calibrage d'un modèle a toujours besoin de **données expérimentales**.
- Malgré un contrôle très rigoureux des paramètres technologiques dans l'industrie du silicium, leurs **fluctuations** ne sont jamais négligeables.

Les simulateurs **commerciaux** sont plus utiles dans l'industrie que dans la recherche.

Ce sont des outils :

- puissants pour interpoler entre des situations bien connues ;
- incertains pour extrapoler et explorer de nouveaux concepts.

**Figure I.10.** *Conception technologique assistée par ordinateur*

### Modèles « TCAD » versus modèles « CAO »

- ❑ Modèles TCAD (modèles numériques).
- ❑ Pour prendre en compte les paramètres technologiques (T pour technologie).
- ❑ Pour « voir » l'intérieur des couches (semiconductrices et diélectriques).
  - Ce sont en général des modèles 2D ou 3D.
    - ❑ Modèles **physiques** à base d'équations aux dérivées partielles.
    - ❑ Modèles **empiriques** à base de fonctions mathématiques plus ou moins simples (polynômes, fonction spline, etc.).
- ❑ Modèles CAO (modèles compacts) analytiques.
 

Pour avoir des expressions simples pour les caractéristiques de sortie (courants, capacités) :

  - soit pour la **simulation de circuit** ;
  - soit pour des études physiques particulières, en faisant des simplifications pour que des solutions exactes des équations existent.

(exemples : dopage constant, champ constant, etc.)

**Figure I.11.** Hiérarchie des modèles

Erreur due au modèle lui-même = représentation simplifiée de la réalité.

– Cas où l'on cherche des solutions analytiques :

Sources d'erreurs : hypothèses simplificatrices permettant de trouver des solutions exactes → difficile d'en déduire l'erreur induite sur les résultats.

– Cas où l'on cherche des solutions numériques :

Maillages : dans le temps, dans l'espace... (espace réel et espace réciproque – des vitesses ou vecteurs d'ondes).

– Nombre fini d'itérations sur :

- des problèmes non linéaires ;
- de très gros systèmes linéaires ;
- des systèmes d'équations couplées.

L'analyse numérique donne quelques outils pour estimer ces erreurs.

### I.3. Fabrication : procédés technologiques, diffusions : rappels succincts

Nous présentons, ici, un rappel des processus de fabrication des composants électroniques intégrés ; en l'occurrence, nous insistons sur les diffusions de dopants, étapes cruciales. Nous nous intéresserons donc à l'équation de la diffusion, à son utilisation dans le cadre de la modélisation de la fabrication de composants microélectroniques.

#### I.3.1. Simulateurs de procédés technologiques

Commandes	Paramètres		
	Technologiques	Physiques	Numériques
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spécification des modèles</li> <li>• Description du substrat</li> <li>• Définition de masques</li> <li>• Dépôt</li> <li>• Gravure</li> <li>• Implantation ionique</li> <li>• Recuit</li> <li>• Contacts électriques</li> <li>• Sauvegarde résultats</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• épaisseur</li> <li>• dimension</li> <li>• durée</li> <li>• dose</li> <li>• énergie</li> <li>• pression de gaz</li> <li>• température</li> <li>• .../...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• coef. d'anisotropie</li> <li>• coef. de réaction</li> <li>• diffusivité</li> <li>• .../...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• taille de maille</li> <li>• pas de temps</li> <li>• nombre d'itérations</li> <li>• critère de convergence</li> <li>• paramètre de relaxation</li> <li>• .../...</li> </ul>

Exemples : DIOS, FLOOPS (ISE), ATHENA (SILVACO), TAURUS (SYNOPSIS)



**Figure I.12.** Modélisation des procédés

Les processus de diffusion sont sûrement les étapes les plus cruciales lors de la fabrication des composants pour les circuits intégrés. Ils sont sous-tendus par l'équation de base : l'équation de la diffusion, qui est aussi celle de la chaleur.

Les physiciens et les technologues ont été amenés à se rapprocher dans les années 1970, jusqu'à se confondre, les problèmes bidimensionnels – diffusions latérales, diffusion accélérée par oxydation, ou par la présence d'autres dopants – devenant incontrôlables.

Il faut aussi avoir à l'esprit que la physique des défauts ponctuels, métalliques par exemple, dans le cadre des semi-conducteurs, est loin d'être bien prise en compte dans les simulateurs commerciaux ; ce problème pourrait s'aggraver eu égard à la miniaturisation.

Depuis les années 1980, l'implantation ionique remplace les diffusions initiales ; la profondeur moyenne des dopants implantés est bien contrôlée, et les recuits thermiques

(type RTA : *Rapid Thermal Annealing*) subséquents permettent d'ajuster les diffusions postimplantation (*drive-in*).

L'équation de la diffusion, ici de dopants, est une des équations fondamentales de la physique ; elle fait intervenir un opérateur fameux : le laplacien !

### 1.3.2. Étapes principales de la fabrication des composants

Les étapes principales de la fabrication des composants sont :

- a) implantation ionique (*ion implantation*) :  $I^2$  ;
- b) redistribution (*drive-in*) ;
- c) oxydation thermique (*thermal oxidation*) ;
- d) épitaxie (*epitaxial growth*) ;
- e) gravure (*etching*) ;
- f) dépôt, par exemple d'oxyde (*deposition, oxide*).

### 1.4. La jonction PN

Les définitions sont les suivantes :

– jonction PN (*PN junction*) : à l'intérieur du même cristal, le semi-conducteur passe du type « P » au type « N » ;

– homojonction : le semi-conducteur de type « P » est constitué du même matériau (Si, Ge, GaAs) que le semi-conducteur de type « N ». Dans le cas contraire, l'on parle d'hétérojonction ;

– jonction métallurgique : le plan où le semi-conducteur change de type ;

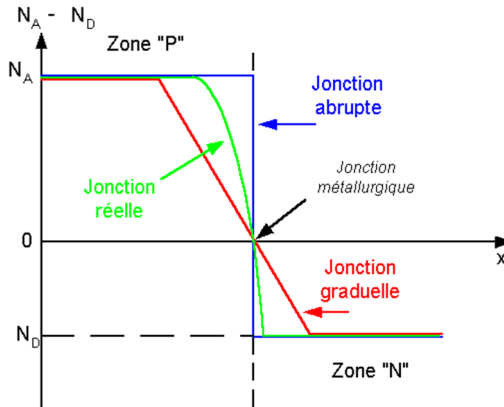
– dans le modèle unidimensionnel, la distribution des impuretés est étudiée uniquement selon un axe  $Ox$  :

- le profil de dopage (*impurity profile*) est la différence entre la densité des atomes accepteurs et la densité des atomes donneurs ( $NA - ND$ ) ;

- pour simplifier, on supposera que du côté « P » l'excédent de la densité des atomes accepteurs vaut  $NA$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) et que du côté « N » l'excédent de la densité des atomes donneurs vaut  $ND$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) ;

- jonction abrupte (*step junction*) : le passage de la région « P » à la région « N » s'effectue sur une épaisseur « infiniment » fine ;

- jonction graduelle (*linearly graded junction*) : le passage de la région « P » à la région « N » s'effectue selon une loi linéaire ;
- en réalité, le profil de dopage est assez bien représenté par la fonction  $\text{erfc}(x)$  : c'est la jonction réelle.

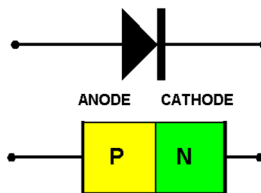


**Figure I.13.** Différents profils de jonctions

La diode PN est constituée d'une épaisseur de semi-conducteur « P », d'une jonction PN et d'une épaisseur de semi-conducteur « N ».

En pratique, les diodes PN modernes sont fortement dissymétriques : le dopage de l'une des zones est beaucoup plus important que l'autre (pour améliorer l'injection de porteurs).

Si le côté P est beaucoup plus dopé que le côté N, on parle d'une diode  $P^+N$ .



**Figure I.14.** Le K, inversé, du schéma symbolique de la diode : cathode, région N

Si le côté N est beaucoup plus dopé que le côté P, on parle d'une diode  $PN^+$ .

- En référence à la diode à vide, on appelle parfois anode la partie « P » de la diode.
- La diode PN présente la particularité de laisser passer le courant dans un seul sens.

La jonction PN non polarisée : soit une jonction PN abrupte (dopage P constant =  $N_A$ , dopage N constant =  $N_D$ ) à l'équilibre thermodynamique (jonction idéale).

Imaginons que le semi-conducteur « P » soit séparé du semi-conducteur « N ».

Dans le semi-conducteur « P », le niveau de Fermi (énergie électrochimique maximale des trous) se situe à une distance au-dessus du maximum de la bande de valence, telle que :

$$\partial E_p = E_{FP} - E_V = kT \cdot \text{Log} \left( \frac{N_V}{N_A} \right) \quad [I.1]$$

Dans le semi-conducteur « N », le niveau de Fermi se situe en dessous du minimum de la BdC à une distance telle que :

$$\partial E_n = E_C - E_{FN} = kT \cdot \text{Log} \left( \frac{N_C}{N_D} \right) \quad [I.2]$$

Si les deux semi-conducteurs font partie du même réseau cristallin et à l'équilibre thermodynamique (pas de polarisation), les niveaux de Fermi s'alignent :

$$E_G = qV_b + \partial E_n + \partial E_p \quad (G: \text{Gap}) \quad [I.3]$$

Il apparaît une distorsion des bandes d'énergie. La différence entre le minimum de la bande de conduction (BdC) du côté P et le minimum de la BdC du côté N correspond à la variation de l'énergie potentielle de l'électron de conduction. Cela se traduit par l'apparition d'une barrière de potentiel :

$$qV_b = E_G - k_B T \text{Log} \frac{N_C N_V}{N_A N_D} \quad [I.4]$$

Ici,  $V_b$  : potentiel de barrière ou potentiel de diffusion (*built-in -  $V_{bi}$  - potential*, potentiel de diffusion) ; donc :

$$qV_b = k_B T \text{Log} \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad [I.5]$$

Il existe une variation du potentiel  $V_{bi}$  ( $bi$  : *built-in potential*) en traversant une jonction PN même si la polarisation extérieure est nulle.

À dopages  $N_A$  et  $N_D$  identiques, plus  $E_G \nearrow$  plus  $V_{bi} \nearrow$ .

Les hauteurs de barrière de potentiel sont grandes dans les semi-conducteurs à bande interdite (*bandgap*) importante (exemples : SiC, GaN).

Pour  $E_G$  fixé, plus le produit  $N_A N_D \nearrow$  plus  $V_{bi} \nearrow$ .

Plus les dopages des parties P et N sont grands, plus le potentiel de barrière de la jonction est important.

Lorsque la température de fonctionnement de la jonction augmente,  $E_G$  varie peu ; la hauteur de la barrière de potentiel diminue.

#### 1.4.1. La jonction PN polarisée en direct

Polariser en direct : porter la partie « P » de la jonction à un potentiel positif par rapport à la partie « N ».

On notera  $V_j$  la différence de potentiel créée par la source extérieure au niveau de la jonction. Pour une polarisation directe, cette grandeur  $V_j$  ( $j$  : jonction) est positive.

En appliquant une polarisation directe, on diminue la hauteur de la barrière de potentiel qui existait lorsque la jonction n'était pas polarisée :

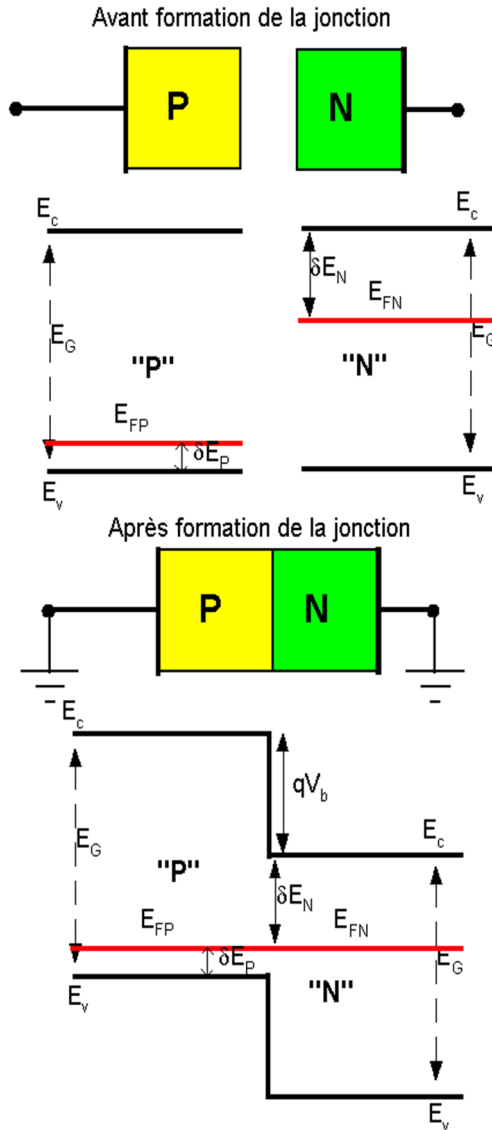
$$E'_M = E_M \sqrt{1 - \frac{V_j}{V_b}} \quad (\text{V/m}) \quad [1.6]$$

En appliquant une polarisation directe, on diminue le champ électrique de rétention de la diffusion ; en conséquence, plus une jonction est polarisée en direct, plus la diffusion des trous de la région « P » vers la région « N » et la diffusion des électrons de la région « N » vers la région « P » vont être importantes. Il apparaît un courant : le courant direct.

#### 1.4.2. La jonction PN polarisée en inverse

La partie « P » de la jonction est à un potentiel négatif par rapport à la partie « N ».





**Figure I.15.** Formation d'une jonction

$V_j$ , la différence de potentiel créée par la source extérieure au niveau de la jonction, est négative.

– Le potentiel de la partie « N » est le même ; dans le diagramme énergétique (voir figure I.16), le niveau de Fermi du côté « N » ne bouge pas.

– Les énergies étant croissantes vers le haut, pour une diminution du potentiel,  $qV$  est positif, donc le niveau d'énergie « monte ».

– Lorsque la différence de potentiel  $V_j$  négative est appliquée sur la jonction, le niveau de Fermi du côté « P » monte de la quantité  $qV_j$ .

– La hauteur de la barrière de potentiel qui était de  $qV_b$  sans polarisation est maintenant plus grande et elle vaut :

$$qV_b = qV_{bi} - qV_j \quad [I.7]$$

En appliquant une polarisation inverse, on augmente la hauteur de la barrière de potentiel qui existait lorsque la jonction n'était pas polarisée.

Plus on augmente la polarisation inverse  $V_j$  (de plus en plus négative), plus la ZCE (zone de charge d'espace, zone désertée), non neutre, de part et d'autre de la jonction métallurgique, augmente, et donc plus la capacité de la jonction diminue.

En général :

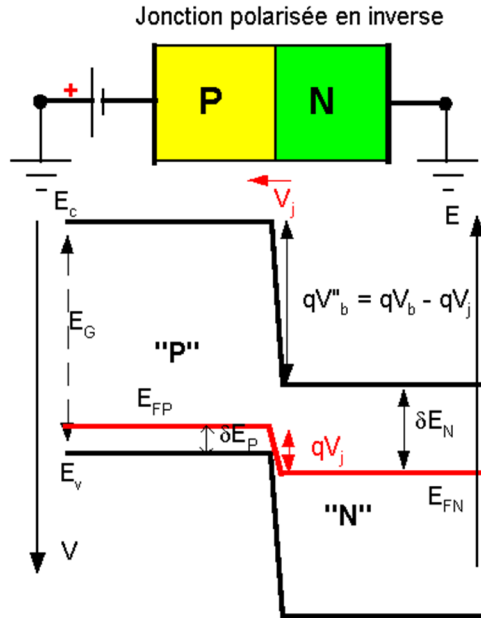
$$I_D = I_S \left( \exp \frac{qV_j}{k_B T} - 1 \right) \quad [I.8]$$

mais comme  $V_j$  est négative,  $\exp(qV_j/k_B T)$  tend vers 0, le courant inverse est alors :  $I_i = -I_S$ .

**REMARQUE.** Le courant inverse : les minoritaires « voient » la jonction en direct.

Le courant inverse traversant une jonction polarisée en inverse est très faible ( $< \mu A$ ), indépendant de la tension appliquée et varie fortement avec la température (double tous les 8 °C).

Il provient donc des porteurs minoritaires (p dans la région N, n dans la région P). Ces minoritaires, qui « voient » la jonction en direct, ont une concentration de  $\approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , à l'ambiante.



**Figure I.16.** Jonction PN polarisée en inverse

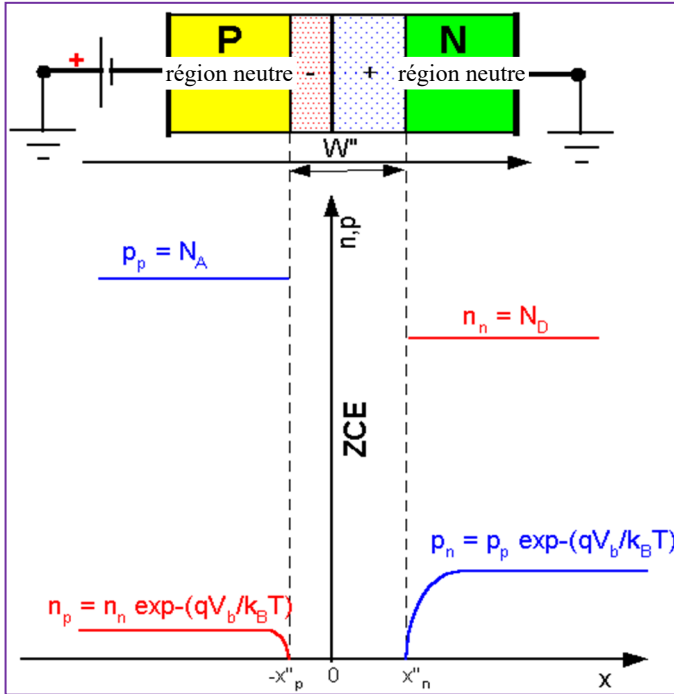
Que se passe-t-il au niveau de la jonction PN lorsque celle-ci est polarisée en inverse ?

La figure I.18. montre qu'à l'instant où le circuit est fermé, une partie des électrons libres quittent la zone N du cristal et se dirigent vers le pôle positif de la batterie d'alimentation.

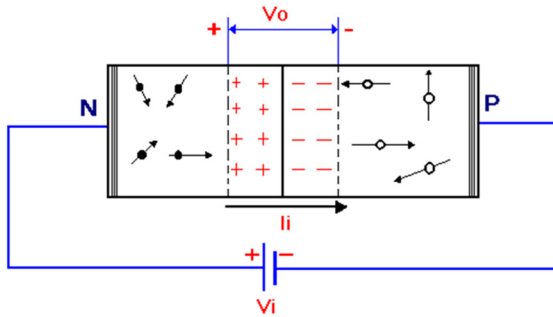
Au même instant, une certaine quantité d'électrons émis par le négatif de la batterie rejoignent la zone P du cristal, où ils feront disparaître une partie des trous.

Si maintenant nous admettons que, dans la zone P, il n'y a pas d'électrons libres qui puissent rejoindre la zone N pour remplacer ceux qui sont repoussés vers le positif de la pile, et que, dans la zone N, il n'y a pas de trous qui puissent se propager jusqu'à la zone P afin de remplacer ceux qui ont disparu, nous pourrions conclure à la cessation du mouvement des charges circulant du cristal à la batterie et de la batterie au cristal. En effet, le nombre d'électrons libres présents dans la zone N du cristal est certainement très grand, mais non illimité ; il en est de même pour les trous présents dans le cristal P.

Dans la réalité, le déplacement des charges, et par conséquent le courant produit par l'alimentation (la pile), cessent avant même que la zone N ne se soit libérée de ses électrons et la zone P de ses trous.



**Figure I.17.** Jonction en inverse ; profils de porteurs (ZCE : zone de charge d'espace)



**Figure I.18.** Diode en inverse ; déplacement des porteurs

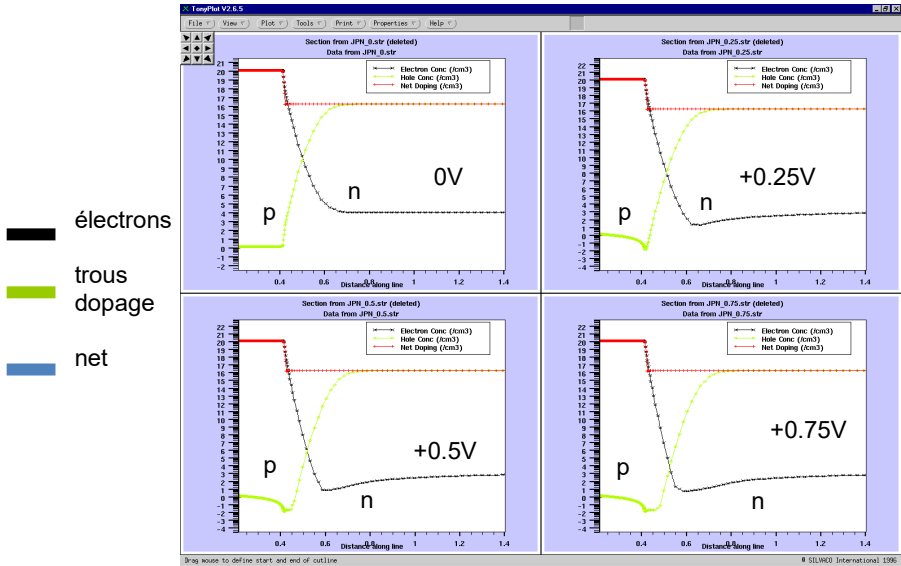
Pour expliquer ce phénomène, sachons que la barrière de potentiel se renforce rapidement avec la diminution des électrons libres et des trous dans les zones respectives et son amplitude augmente en passant de  $V_o$  à  $V_o'$ .

La nouvelle différence de potentiel  $V_0'$  peut ainsi annuler l'effet de la tension extérieure  $V_i$ , avant que tous les électrons de la zone N ne soient repoussés vers le positif de la pile et avant que tous les trous de la zone P n'aient disparu.

La tension  $V_i$  appliquée aux bornes de la diode est dite tension inverse. Si l'on tient compte de ce qui a été dit précédemment, le courant circulant dans la diode (aux bornes de laquelle on a appliqué une tension inverse) devrait s'annuler rapidement. En réalité, le courant ne s'annule pas complètement du fait de la présence des porteurs minoritaires, c'est-à-dire de la présence de trous dans la zone N (avec  $p \ll n$ ) du cristal et d'électrons libres dans la zone P (avec  $p \gg n$ ). Rappel : on dit que les minoritaires « voient » la jonction en direct.

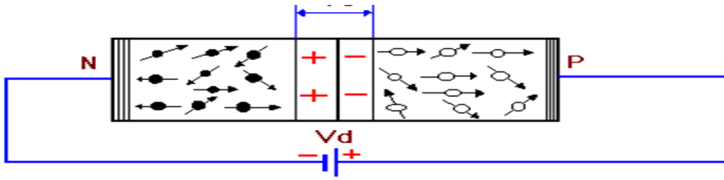
Un certain nombre de porteurs minoritaires réussissent toujours à traverser la jonction, provoquant ainsi un remplacement partiel des électrons libres dans la zone N et des trous dans la zone P. On constate donc la présence d'un courant très faible ( $\sim 10^{-15}$  A à l'ambiante), circulant de l'extrémité N à l'extrémité P du cristal. Ce courant est appelé courant de saturation inverse ( $I_s$ ).

### JONCTION ABRUPTE N<sup>+</sup>P EN INVERSE



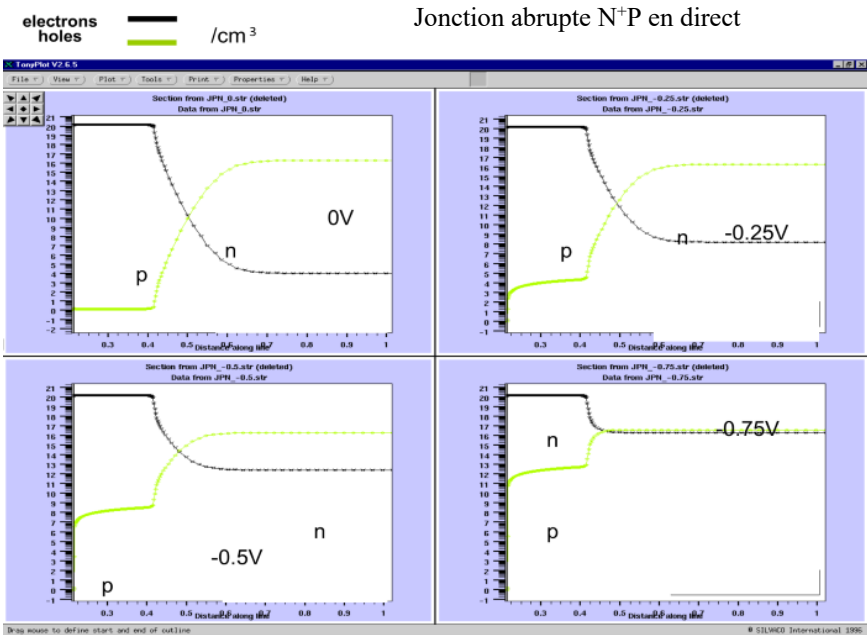
**Figure I.19.** Densité de porteurs  $n$  et  $p$ . Jonction abrupte N<sup>+</sup>P polarisée en inverse, à 0, 0,25, 0,5 et 0,75 volts (simulations Silvaco)

Revenons à la jonction PN lorsqu'elle est polarisée en direct.



**Figure I.20.** Diode en direct ; déplacement des porteurs

Lorsque le circuit est fermé, la force électromotrice de la batterie met en mouvement les électrons libres de la zone N et les trous de la zone P, qui convergent tous deux vers la jonction, à l'intérieur de laquelle les électrons tombent dans les trous, ce qui entraîne la disparition des uns et des autres. Cependant, les électrons libres qui tombent dans les trous sont continuellement remplacés par d'autres, provenant du pôle négatif de la source d'alimentation.



Jonction abrupte N<sup>+</sup>P polarisée en direct, à 0, -0,25, -0,5 et -0,75 volts

**Figure I.21.** Densité de porteurs *n* et *p* (simulations Silvaco)

Ainsi, tous les trous disparus sont remplacés par d'autres, qui se forment du côté de la zone P, vers le positif de la batterie. Le flux des charges se reproduit donc perpétuellement, formant un courant continu. On le constate d'ailleurs en mesurant la résistance directe de la diode.

Le courant continu  $I_d$  est dit courant direct, la tension extérieure,  $V_d$ , qui est à l'origine de la formation du courant  $I_d$ , est dite tension directe.

Tant que la tension  $V_d$  est inférieure ou égale à  $V_{bi}$ , le courant est pratiquement nul. Ce courant n'existe que lorsque la tension  $V_d$  dépasse la valeur de  $V_{bi}$ . Cette valeur est différente selon que la jonction est constituée par un cristal de germanium ou par un cristal de silicium : pour le germanium, cette valeur est normalement voisine de 0,25 V, alors que pour le silicium elle est de 0,6 à 0,7 V.

Une jonction PN permet le passage d'un courant lorsque celui-ci parcourt le semi-conducteur dans le sens du cristal dopé P vers celui dopé N. Elle s'oppose à la circulation d'un courant dans le sens inverse.