

Avant-propos

Au début du XX^e siècle, le silicium « métal » est utilisé comme élément d'alliage des aciers présentant des propriétés électriques. L'année 1906 voit la première application du silicium cristallin en tant que composant des circuits de détection des ondes électromagnétiques dans les récepteurs radio, concurrent de la galène.

Les recherches poursuivies pendant la Seconde Guerre mondiale sur le silicium et le germanium, matériaux des composants (les diodes à pointe) des circuits de réception des ondes radars permettant la détection et le repérage des avions, révèlent que ces matériaux sont des semi-conducteurs dont la caractéristique de base est la maîtrise de la conductivité électrique par dopage. Cette caractéristique suscite la recherche, après la Seconde Guerre mondiale, de composants solides pour remplacer les « triodes » (tubes à vide). Cela débouche très rapidement sur l'invention du transistor.

L'invention du transistor est l'acte fondateur de la révolution numérique (de la société de l'information dans laquelle nous vivons).

Le germanium, puis le silicium, sont les deux matériaux qui ont permis, le premier l'invention du transistor et le développement initial des ordinateurs, le second (le silicium détrônant le germanium) la réalisation du transistor « MOSFET », composant de base des circuits intégrés : microprocesseurs et mémoires, composants des ordinateurs.

Mais ces « composants » nécessitent des matériaux (germanium et silicium) d'une pureté extraordinaire et de cristallinité parfaite. La purification des matériaux de base, jusqu'à des puretés atteignant 11N, la réalisation de monocristaux de germanium, puis de silicium, la fabrication des composants (à base de transistors), leur miniaturisation ont posé des problèmes d'une complexité rarement rencontrée dans l'élaboration de produits manufacturés.

Ce sont les mêmes propriétés et caractéristiques qui ont permis au silicium d'être le matériau de la conversion de l'énergie solaire en électricité et le matériau des capteurs photographiques.

Le silicium, par ses propriétés mécaniques exceptionnelles, alliées aux propriétés électriques, est le matériau des microsystèmes électromécaniques (MEMS), composants clés des « objets intelligents ».

En 2018, aucun matériau susceptible de détrôner le silicium comme matériau de la microélectronique, aussi bien que de l'optoélectronique, ne pointe. Selon Gérard Berry : « Le silicium n'est pas mort, loin de là. »

Cet ouvrage s'adresse aux lecteurs qui veulent savoir et comprendre comment on a pu passer de l'ordinateur ENIAC, construit pendant la Seconde Guerre mondiale pour calculer des trajectoires d'obus, long de trente mètres et haut de deux mètres quarante, comportant 17 468 triodes (tubes à vide) et capable d'exécuter cinq mille additions et soustractions en une seconde, à des microprocesseurs de dimensions centimétriques comportant une vingtaine de milliards de transistors, de puissance de traitement (nombre d'instructions traitées par seconde) de plusieurs gigahertz, composants de base de l'ordinateur individuel de la taille d'un livre mince.

Pour cela, ce livre, en retraçant l'histoire des découvertes, inventions, innovations et évolutions technologiques des matériaux, des composants, des circuits intégrés, des mémoires, en présentant les bases physiques de leur fonctionnement, en se focalisant sur les matériaux et les technologies de réalisation de ces composants, tente de répondre aux questions suivantes :

– quelles propriétés (caractéristiques) spécifiques, électriques, physico-chimiques, mécaniques, sont à la base des dominations successives du silicium, puis du germanium, et de nouveau du silicium dans le développement de la microélectronique, de la domination du silicium dans la conversion de l'énergie solaire en électricité, de la domination du silicium comme matériau de base des microsystèmes électromécaniques ?

– quelles propriétés (pureté, cristallinité, dopage) ont dû être conférées au matériau et comment ont-elles été obtenues pour obtenir les performances atteintes de nos jours par ces composants ?

– quels procédés ont dû être développés pour réaliser ces composants, puis pour satisfaire les exigences de leur miniaturisation, permettant les performances de rapidité du traitement de l'information atteintes de nos jours, une conversion efficace de l'énergie solaire en électricité, etc. ?

– quels ont été les artisans de cette épopée ? Selon Gérard Berry¹, « son extraordinaire succès (celui du silicium) est clairement à mettre au crédit des physiciens des matériaux semi-conducteurs qui ont fait des progrès technologiques demandant énormément d’imagination et de compétences pour repousser tous les obstacles ».

Jusqu’en 1942, le silicium extrait de la silice (SiO₂) et le germanium extrait du sulfure (GeS₂) étaient considérés comme des métaux. Les semi-conducteurs connus alors étaient des composés chimiques : oxydes (CuO) et sulfures (la galène PbS) composés d’un métal et d’un métalloïde (oxygène ou soufre), dont la caractéristique de base était la variation croissante de leur conductibilité avec la température alors que celle des métaux décroît lorsque la température croît. Ce n’est qu’à partir de l’été 1942 qu’il fut reconnu que le silicium et le germanium purifiés n’étaient pas des métaux, mais des semi-conducteurs.

Cet ouvrage est divisé en deux volumes. Le volume 1 est consacré aux composants de base (diodes et transistors).

Le chapitre 1 présente : 1) les travaux ayant permis l’extraction du silicium de la silice et sa purification (« silicium métal »), ainsi que la découverte du germanium, son extraction et sa purification ; 2) les caractéristiques physiques de base des semi-conducteurs réalisés à partir de ces deux matériaux, dont la connaissance est indispensable pour comprendre le fonctionnement des composants.

Les chapitres 2 à 6 du volume 1 présentent les composants de base (diodes, transistors) dans l’ordre chronologique de leur découverte/invention/réalisation et les développements technologiques nécessités pour leur réalisation.

Chaque chapitre comporte une présentation du composant, de son fonctionnement, de ses fonctions de base, suivie par l’historique des recherches et développements industriels ayant débouché sur son invention et sa réalisation. Les bases physiques de son fonctionnement sont présentées en annexe. Les technologies mises en œuvre pour satisfaire les impératifs de pureté et de perfection cristalline du matériau de base sont présentées chronologiquement, tout comme les technologies pour réaliser les composants et leurs évolutions nécessités par leur miniaturisation. Les développements industriels des premiers composants sont présentés selon leur importance pour les développements successifs.

Le volume 2 est consacré aux « puces ».

Les chapitres 1 et 2 du volume 2 présentent les circuits intégrés et les mémoires de la micro-informatique.

1. Berry, G. (2017). *L’Hyperpuissance de l’informatique*. Odile Jacob, Paris, p. 88 et p. 401.

Le chapitre 3 présente le transistor TFT, ayant permis le développement des écrans plats à cristaux liquides.

Les chapitres 4 et 5 présentent les composants optoélectroniques en silicium. Les cellules solaires réalisant la conversion de l'énergie solaire en électricité et les capteurs d'images photoélectriques des appareils photographiques numériques, qui ont révolutionné l'astronomie, l'imagerie médicale.

Le chapitre 6 présente les microsystèmes électromécaniques (MEMS), les propriétés mécaniques exceptionnelles du silicium qui ont permis leur développement et les technologies spécifiques développées pour la réalisation de structures comportant des éléments mobiles.

De nombreux ouvrages anglais et américains présentent « l'histoire des semi-conducteurs ». Par rapport aux ouvrages de référence cités dans la bibliographie, ce livre présente, outre les aspects historiques, les développements technologiques récents qui ont permis de réaliser les performances actuelles des microprocesseurs, des mémoires, des cellules solaires, des microsystèmes électromécaniques. Cet ouvrage s'appuie sur les nombreux travaux d'historiens et sur les publications originales.

L'auteur tient à remercier tout particulièrement messieurs les professeurs Jean Philibert et André Pineau.

Bibliographie

- Burgess, P.D. (n.d.). Transistor History [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://sites.google.com/site/transistorhistory>.
- Computer History Museum (n.d.). The Silicon Engine Timeline [En ligne]. Disponible à l'adresse : www.computerhistory.org.
- Hu, C. (2009). *Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits*. Pearson, Londres.
- Krakowiak, S. (2017). Éléments d'histoire de l'informatique. Document de travail, Université Grenoble Alpes & Aconit, CC-BY-NC-SA 3.0 FR.
- Lazard, E., Mounier-Kuhn, P. (2022). *Histoire illustrée de l'Informatique*. EDP Sciences, Les Ulis.
- Lilen, H. (2019). *La belle histoire des révolutions numériques*. De Boeck Supérieur, Louvain-la-Neuve.
- Lojek, B. (2007). *History of semiconductor Engineering*. Springer, New York.

- Mathieu, H. (2009). *Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques*, 6^e édition. Dunod, Paris.
- Nouet, P. (2015). Introduction to Microelectronics Technology. Document de travail, Polytech Montpellier, ERII4 M2 EEA Systèmes Microelectronics.
- Orton, J.W. (2004). *The Story of Semi-conductors*. Oxford University Press, Oxford.
- Orton, J.W. (2009). *Semiconductors and the Information Revolution; Magic Crystals that made it happen*. Elsevier, Amsterdam.
- Riordan, M., Hoddeson, L. (1997). *Crystal Fire, the birth of the information age*. W.W. Norton & Company, New York.
- Seitz, F., Einspruch, N.G. (1998). *Electronic Genie, the tangled History of Silicon*. University of Illinois Press, Illinois.
- Sze, S.M. (2002). *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. Wiley, New York.
- Verroust, G. (1997). Histoire, épistémologie de l'informatique et Révolution technologiques. Résumé de cours.
- Ward, J. (n.d.). Transistor Museum [En ligne]. Disponible à l'adresse : transistormuseum.com.

La révolution numérique

« Révolution numérique », encore appelée « révolution informatique ». Ces expressions traduisent toutes deux « une transformation radicale du monde à laquelle nous assistons aujourd'hui ».

La première fait référence à la numérisation binaire des textes, des chiffres, mais aussi des images, des sons, des vidéos, par des suites de symboles. Il devient ainsi possible de stocker des images, des sons, etc., de les transmettre, de les répliquer, de les analyser et de les transformer par les ordinateurs numériques » (Abiteboul et Dowek 2017, p. 29).

La seconde expression, « la révolution informatique », fait référence à la science et à la technique du traitement de l'information numérisée (ces symboles) par des algorithmes. Selon Gérard Berry : « L'informatique est le moteur conceptuel et technique du monde numérique. L'ordinateur en est le moteur physique » (Berry 2017, p. 25).

« L'acte de naissance de la révolution numérique » est la thèse de master de Claude Shannon en 1937, qualifiée par le journal *Scientific American* de « Magna Carta de l'ère de l'information ».

En 1847, l'Anglais George Boole (*Les Lois de la pensée*) avait établi le lien entre le calcul et la logique. Son algèbre logique basée sur le calcul binaire était apte à représenter la démarche du raisonnement.

Les fonctions logiques de base « ET », « OU », « NON » étaient traitées comme des opérations arithmétiques prenant la valeur 0 ou 1 selon que la proposition était vraie ou fausse.

En 1937, Claude Shannon¹ (Shannon 1938), à la suite d'un stage dans les laboratoires Bell Labs² où il put observer la puissance des circuits des centraux téléphoniques qui utilisaient des relais électromécaniques (commutateurs)³ pour acheminer les appels, imagina que les circuits électriques pourraient exécuter ces opérations logiques en utilisant une configuration de commutateurs marche-arrêt.

La première démonstration de la faisabilité d'exécution de fonctions logiques par un dispositif constitué de deux relais électromécaniques fut réalisée en 1937 par George Stibitz des Bell Labs, et elle permit la construction en 1939 du premier calculateur CNC (*Complex Number Calculator*) (400 relais électromécaniques), pouvant s'ouvrir ou se fermer vingt fois par seconde, exécutant des opérations de multiplication et de division de nombres complexes. Il fut suivi par cinq autres modèles. « Le calculateur de Stibitz démontrait le potentiel d'un circuit de relais pour faire des mathématiques en binaire, traiter des informations et manipuler des procédures logiques » (Isaacson 2015, p. 93).

La révolution « numérique » est la troisième révolution majeure dans l'histoire de l'humanité. La première fut la révolution agricole, il y a 8 000 ans. La deuxième, la « révolution industrielle » au XIX^e siècle⁴.

La technologie à la base de cette troisième révolution, appelée encore « seconde révolution industrielle », c'est la microélectronique⁵. En 1979, la National Academy of Sciences des États-Unis publiait un rapport⁶ « Microstructure, Science, Engineering and

1. Claude Shannon est aussi le père de la théorie de l'information formulée en 1950 (Berry 2017, p. 52).

2. Bell Labs : Bell Telephone Laboratories, filiale d'ATT (American Telephone and Telegram Company) ayant le monopole des transmissions téléphoniques et télégraphiques et ayant comme filiale de production des composants des centraux téléphoniques la société Western Electric.

3. Le relais électromécanique (commutateur qui s'ouvre et se ferme par un moyen électrique tel qu'un électroaimant), avec ses deux états ouvert et fermé, était le composant idéal pour représenter les deux états de la numération binaire (0 et 1) et de la logique (vrai ou faux). Avec une machine binaire on peut donc traiter de la même façon les opérations arithmétiques et les opérations logiques.

4. La révolution industrielle, telle qu'elle est présentée ici, englobe les deux premières révolutions : celle de la machine à vapeur dans les années 1780, puis celle du moteur électrique et du moteur à explosion dans les années 1880.

5. La microélectronique désigne l'ensemble des technologies de fabrication de composants qui utilisent des courants électriques pour transmettre, traiter ou stocker des informations.

6. Citation rapportée dans la brochure « La microélectronique : bilan et perspectives d'une technologie de base », Siemens Aktiengesellschaft, Berlin et Munich, 1984. Traduction de l'ouvrage *Chancen mit Chips*, 1984.

Technology » dans lequel on pouvait lire : « L'ère moderne de l'électronique a ouvert une "seconde" révolution industrielle : ses conséquences pourraient être encore plus profondes que celles de la première. » Selon Ian Ross, président des Bell Labs de 1979 à 1991 : « The semiconductor odyssey produced a revolution in our society at least as profound as the total industrial revolution. Today electronics pervades our lives and affects everything » (Ross 1997).

Les composants de la microélectronique

En 1903, Arthur Fleming invente la diode (tube à vide), redresseur de courant, et en 1906, Lee de Forest invente la triode (tube à vide) en ajoutant, entre la cathode et l'anode de la diode, une grille. En plus du redressement du courant, elle permettait une amplification de courants faibles induits par les ondes électromagnétiques, d'où le développement des récepteurs radio : une petite variation du signal sur la grille se traduisait par une amplification du courant cathode-anode. En outre une variation brusque du signal appliqué à la grille assurait la coupure ou l'allumage de la triode, qui pouvait ainsi fonctionner comme commutateur. La triode est aussi capable d'entrer en auto-oscillation, d'où son emploi dans les émetteurs radio.

L'invention du transistor bipolaire en 1948 par William Shockley (prix Nobel), composant solide pouvant réaliser les mêmes fonctions (amplification de courants faibles et commutation), mais beaucoup plus rapidement, ouvre l'ère de la révolution numérique.

Le fonctionnement des triodes, comme celui des transistors, repose sur le contrôle d'un courant d'électrons, que l'on peut soit amplifier, soit interrompre et rallumer. Ces composants fonctionnent alors comme un commutateur pouvant prendre sur commande les positions zéro ou un, donc réalisant des fonctions logiques. Mais dans les triodes, les temps de commutation sont beaucoup plus longs et les fréquences admissibles beaucoup plus faibles que dans les composants solides, car ces variables sont liées au temps mis par les électrons pour traverser la distance entre la cathode et l'anode (environ 1 mm), alors que dans un transistor la distance parcourue par les électrons entre l'émetteur et le collecteur est inférieure au micron, jusqu'à une dizaine de nanomètres.

Des « calculateurs » prototypes avaient été réalisés, avant l'invention du transistor, avec des triodes, l'ENIAC pendant la Seconde Guerre mondiale, puis avec des diodes solides (en germanium) associées à des triodes. Les diodes ne permettent que la réalisation de circuits logiques (portes) OU et ET. Elles ne permettent pas la restauration du signal à la sortie d'une porte, d'où la présence de triodes restaurant le signal, permettant de réaliser des cascades de portes, donc des circuits logiques.

C'est la découverte du silicium N et du silicium P⁷, au début de la Seconde Guerre mondiale, autrement dit de l'effet du dopage sur la conductivité du silicium et donc la maîtrise de celle-ci, et les découvertes de l'effet redresseur et de l'effet photoélectrique présentés par la diode solide PN⁸ par Rüssel Ohl qui ont permis l'invention du transistor bipolaire (à jonctions PN) en 1949 par William Shockley (prix Nobel) et la réalisation de circuits constitués de diodes solides et de transistors réalisant les portes logiques NON-ET (NAND), NON-OU (NOR) et toutes les fonctions logiques universelles par combinaison de l'une ou l'autre, comportant en plus la restauration du signal en sortie de chaque porte, permettant ainsi des cascades de portes logiques, et donc la réalisation des circuits intégrés, inventés en 1958-1959 par Jack Kilby (prix Nobel) et Robert Noyce.

La réalisation du transistor MOSFET à effet de champ à base de silicium, dont la conception est également due à William Shockley dès l'année 1945, par Dawon Kahng et Martin Atalla en 1960, par suite de sa capacité de miniaturisation, a permis le développement des circuits intégrés : mémoires et microprocesseurs. Ces derniers constituant l'ultime innovation qui devait assurer la révolution numérique en permettant le développement de l'ordinateur personnel. Selon Reid : « Une ère nouvelle de l'électronique avait commencé » (Reid 1984).

La miniaturisation des composants à l'échelle du nanomètre permet des performances élevées de rapidité de traitement de l'information et des gains substantiels de consommation électrique. Le nombre de transistors est passé de 2 400 pour l'Intel 4004, le premier microprocesseur intégré, à une vingtaine de milliards pour les plus gros processeurs graphiques actuels (2017). La puissance de traitement d'un microprocesseur (nombre d'instructions qu'un microprocesseur est capable de traiter par seconde) est passée de quelques mégahertz au début des années 1980 à plusieurs gigahertz au début des années 2000. Cette fréquence d'horloge (comme on l'appelle) est directement liée à la vitesse de commutation des transistors du microprocesseur. On ne peut qu'être émerveillé qu'un jeu astronomique de composants électroniques aussi simples que des interrupteurs, phénoménalement rapides, puisse être à la base de la troisième révolution de l'humanité.

Les matériaux de la microélectronique

Mais ces « composants » nécessitent des matériaux d'une pureté extraordinaire et de cristallinité parfaite pour obtenir les caractéristiques électroniques très spécifiques, ainsi que des technologies de fabrication des transistors, puis des circuits intégrés, tout à fait nouvelles (dont la liste est présentée en annexe).

7. Le silicium N (silicium dopé avec du phosphore) de conductivité de type n ; le silicium P (dopé avec du bore) de conductivité de type p.

8. La diode PN : composant constitué par deux régions N et P accolées le long d'une surface plane.

C'est la disponibilité et la maîtrise technologique de deux matériaux, le germanium et le silicium, pratiquement inconnus au début du XX^e siècle, ayant les caractéristiques électroniques appropriées, qui ont permis l'invention du transistor et de la conversion de l'énergie solaire en électricité.

La purification des matériaux de base, jusqu'à des puretés atteignant 11N (99,999999 999), la réalisation de monocristaux de cristallinité parfaite de germanium, puis de silicium, permettant la maîtrise par dopage de la conductivité de ces matériaux d'une part, et d'autre part la fabrication des composants et leur miniaturisation ont posé des problèmes d'une complexité rarement rencontrée dans l'élaboration de produits manufacturés (Queisser 1998).

C'est avec le germanium (sur des pastilles purifiées et à gros grains (quasi monocristallines) disponibles) qu'une amplification de puissance fut observée pour la première fois en décembre 1947 sur un dispositif réalisé par John Bardeen et Walter Brattain (prix Nobel), qui fut baptisé « transistor à pointes » (Bardeen et Brattain 1948). Cette invention suscita le développement d'un procédé d'obtention de monocristaux de germanium par Gordon Teal (Teal 1976). La réussite de la purification et de la fabrication de monocristaux de germanium et la réalisation du transistor bipolaire imposèrent le germanium comme matériau de base des transistors. En 1952, Ralph Hunter, dans un discours en tant que président de la société électrochimique des États-Unis, prédisait : « A revolution in the electronics industry as a result of the development of germanium. » Des transistors au germanium furent fabriqués jusqu'en 1961. Les ordinateurs CDC 1604 et IBM 1401 commercialisés en 1960 furent réalisés avec des transistors en germanium.

En 1952, à la suite de la réussite de la fabrication de monocristaux de silicium et de la réalisation d'une jonction PN, toujours par Gordon Teal, dont les propriétés étaient supérieures à celles de la jonction PN au germanium, « immediately silicon became a rival to germanium » (Leamy et Wernick 1997). Le silicium conquiert très progressivement, vu les difficultés à obtenir du silicium « électronique », la place prééminente comme matériau du transistor, sous la pression des militaires, qui étaient à cette époque pratiquement les seuls clients, en particulier pour la tenue en température jusque vers 150 °C des diodes et transistors en silicium.

À partir de la réalisation du premier transistor MOSFET en silicium en 1959, la suprématie du silicium, par suite des qualités de son oxyde et de sa grande dissipation thermique, devint totale. Depuis les années 1970, les transistors MOSFET en silicium constituent les composants de base des circuits intégrés et des mémoires des ordinateurs.

Si, en 1951, les études sur des composés de même structure que le silicium et le germanium, comme l'arséniure de gallium GaAs, entreprises par Heinrich Welker (prix Nobel) révélèrent leurs caractéristiques de semi-conducteurs, ce n'est qu'en 1978 qu'il

fut montré qu'un composant en arséniure de gallium était deux fois plus rapide que le même composant en silicium dans les mêmes conditions (Welker 1976). Néanmoins ce facteur 2 n'a pas convaincu les industriels d'abandonner le silicium, grâce à ses deux avantages : sa grande dissipation thermique et sa technologie maîtrisée (Bols et Rosencher 1988), depuis les années 1960 avec le transistor MOSFET.

Les moteurs du développement de la microélectronique et des composants des ordinateurs

Les recherches poursuivies en Angleterre et essentiellement aux États-Unis dès le début de la Seconde Guerre mondiale sur la réception des ondes électromagnétiques radars par la « diode à pointe » ont été le premier moteur du développement du silicium et du germanium et consacrent la première victoire de ce composant solide sur les tubes à vide.

Le deuxième moteur du développement de la microélectronique fut la volonté des Bell Labs⁹, dès la fin de la guerre, de trouver un substitut solide aux lampes triodes utilisées comme amplificateurs le long des lignes téléphoniques de transmission et aux relais électromécaniques de leurs centraux téléphoniques de la société ATT¹⁰.

Ce sont les découvertes du silicium N et du silicium P, de la propriété de redressement du courant électrique à travers un lingot de silicium solidifié unidirectionnellement, constituant une diode PN, ainsi que la découverte de l'effet photovoltaïque présenté par ce lingot en 1940 qui sont à l'origine de l'aventure des Bell Labs dans la microélectronique. Lorsque ces remarquables propriétés d'un lingot de silicium furent portées à la connaissance du directeur des Bell Labs, Mervin Kelly, celui-ci considéra que cette découverte avait une très grande valeur pour l'industrie électronique et il décida que le secret absolu devait être conservé jusqu'à ce que des études approfondies en révèlent toute la

9. « The research group established at Bell Labs in the summer of 1945 had a long-term goal of creating a solid state device that might eventually replace the tube and the relay » (Ross 1997).

10. Dans les années 1950 de nombreuses recherches furent entreprises pour appliquer les tubes à vide à la commutation des centraux téléphoniques. Elles débouchèrent sur des échecs. Jusqu'en 1974 furent installés des commutateurs semi-électroniques (« commutation spatiale ») : commutateurs hybrides dont le système de commande est entièrement électronique, mais qui agit sur un réseau de connexion encore mécanisé faisant circuler les courants de conversations purement analogiques. Le premier central téléphonique expérimental utilisant un système de commutation entièrement électronique, mettant en œuvre des microprocesseurs, système appelé « commutation temporelle ou numérique », fut mis en place par le CNET en France, à Perros-Guirec en 1970. Ces commutateurs constituent la vraie révolution dans les télécommunications modernes (Caron 1997, p. 295).

puissance : « It was too important a breakthrough to bruit about. »¹¹ Les études furent reprises en 1945.

Au cours de l'été 1945, comme rapporté par Ian Ross, Kelly créa un groupe de recherche avec pour objectifs : l'étude fondamentale des semi-conducteurs en concentrant celle-ci sur le germanium et le silicium, matériaux commençant à être bien connus, et à long terme la création d'un composant solide constituant un amplificateur « pour remplacer les triodes (tubes à vide) et constituant un commutateur pour remplacer les relais électromécaniques des centraux téléphoniques ».

Ces recherches débouchèrent en 1947 et 1949 sur les inventions du transistor à pointes et du transistor bipolaire à jonctions PN.

En 1950, selon Ian Ross, les chercheurs des Bell Labs réalisèrent que, vu les caractéristiques des transistors, leur taille et leur faible consommation énergétique, ce n'était pas le remplacement des tubes à vide qui devait être recherché, **mais leur utilisation comme composants de circuits logiques**¹².

Dès que la fabrication reproductible de transistors apparut possible, dans le milieu des années 1950, « remplacer les tubes à vide dans autant d'applications que possible devint l'objectif ».

Des spécimens de transistor furent confiés à différents ingénieurs des Bell Labs avec comme mission de développer des applications. John H. Felker fut l'un d'entre eux. Felker montra que le transistor pouvait être utilisé comme un composant de circuits logiques (Felker 1951). Cette utilisation potentielle du transistor fut présentée par Felker aux sociétés ayant acquis la licence « Western Electric ». Selon McMahon¹³, « aucun d'entre

11. « The goal for the group, following Mervin Kelly's instructions, was to determine whether it was possible to develop a practical semiconductor triode » (Seitz et Einspruch 1998, p. 164).

12. Ross a cité Bob Wallace : « Gentlemen, you've got it all wrong. The advantage of the transistor is that it is inherently a small size and a low power device. This means that you can pack a large number of them in a small space without excessive heat generation and achieve low propagation delays. And that is what we need for logic applications. The significance of the transistor is not that it can replace the tube but that it can do things that the vacuum could never do. » Et selon Ross : « And this was a revelation to us all » (Ross 1997).

13. « First, J.H. Felker fascinated us with the applicability of transistors to high-speed digital computers. He stated that the prime objective was practically infinite reliability, closely followed by low power consumption (hence minimal heat removal), small size and minimal weight. However, none of us imagined the semiconductor revolution that was really to take place over the next forty years » (McMahon 1990) (Hughes Aircraft Company).

nous n’imaginait la révolution qui allait se produire dans les quarante années suivantes », « même chez IBM », selon Rick Dill¹⁴.

À la suite de cette présentation, l’Air Force confia aux Bell Labs, en 1951, le développement d’un calculateur, le TRADIC (*transistorized airborne digital computer*), qui fut confié à Felker. Il en résulta la réalisation successive de quatre calculateurs TRADIC, dont la version Leprechaun, opérationnelle en 1956, fut le premier calculateur entièrement transistorisé et bâti sur des circuits logiques constitués de transistors bipolaires en germanium (Irvine 2001).

La majorité des découvertes, inventions, développements technologiques relatifs aux transistors, aux cellules solaires et à la photo numérique entre les années 1947 et 1970 ont été faites par les chercheurs des Bell Labs (voir tableau I.1).

Néanmoins, comme on le verra à plusieurs reprises, les inventions et les développements technologiques des Bell Labs ne furent pas toujours suivis par des développements et des productions industrielles par la société Western Electric. Il y avait une bonne raison à cela : la société ATT, ayant le monopole des transmissions téléphoniques et télégraphiques aux États-Unis, par décision de justice, selon les lois antitrust, n’était autorisée à produire des composants électroniques que pour ses besoins propres et devait porter à la connaissance de toute l’industrie électronique les découvertes pouvant l’intéresser. C’est ainsi qu’après la réalisation du premier transistor bipolaire en 1950 Western Electric commença à accorder des licences de fabrication aux sociétés produisant des diodes, triodes (tubes à vide), etc., « licensing the rights to manufacture transistors for a 25 000 \$ fee », et pour ces licenciés Bell Labs organisa un *Transistor Technology Symposium* en avril 1951.

Le troisième moteur fut l’intérêt de nombreuses sociétés industrielles présentant l’importance de ces inventions. Dès 1948, avec la publication de la découverte du transistor à pointes, des sociétés fortement impliquées, au cours de la Seconde Guerre mondiale, dans des développements et productions de diodes à base de germanium : General Electric, Sylvania, RCA, CBS et IBM. Par la suite, d’autres sociétés productrices de tubes à vide ayant acquis la licence Bell comme Raytheon, Philco, Telefunken, Siemens, et des sociétés créées par des chercheurs ou ingénieurs, passant d’ailleurs d’une société à une autre, pour réaliser des composants, puis des circuits intégrés. En 1958, il y avait dans le monde 70 fabricants de diodes et transistors, dont une grande majorité aux États-Unis (Morton et Pietenpol 1958).

14. « Everyone on the early transistor business saw analog and communications circuits as the most important thing. In 1954, computers were not important to the electronic world » Rick Dill (IBM) (Dill 1954).

Les premiers ordinateurs commerciaux utilisant des transistors bipolaires comme composants de circuits logiques apparurent en 1956 avec les ordinateurs Philco S-2000 et 2600.

Trois sociétés : Texas Instruments (TI), créée en 1952, Fairchild Semiconductor, créée en 1957, puis Intel, créée en 1968, vont prendre le relais des Bell Labs tant dans le développement que dans la production industrielle des composants ultimes.

Les inventions et réalisations du circuit intégré en 1958-1959 sont dues à Jack Kilby de Texas Instruments et à Robert Noyce de Fairchild Semiconductor et à leurs collaborateurs. Cette invention a permis la réalisation du « microprocesseur » par la société Intel, fondée par des transfuges de Fairchild Semiconductor : Noyce, Grove et Moore (auteur de « la loi de Moore » en 1969). Il s'agit d'un circuit intégré universel qui intégrait toutes les fonctions de l'unité centrale d'un ordinateur capable de suivre des instructions de programmation. En novembre 1971 Intel présenta le microprocesseur Intel 4004.

Simultanément, un autre moteur majeur du développement de la microélectronique, comme pour beaucoup d'autres innovations majeures, fut les besoins militaires ou de prestige étatique.

Le programme spatial civil et le programme militaire de construction de missiles balistiques impulsèrent la demande de transistors. Les organismes étatiques responsables des programmes correspondants financèrent les sociétés citées précédemment.

Le programme des missiles balistiques mer-sol Polaris en 1956, puis le programme des missiles sol-sol Minuteman à la fin des années 1950, pour leur système de guidage embarqué, les satellites terrestres Vanguard et Explorer, lancés en 1958, pour leurs transmissions, le programme Apollo, début 1960, doté de 25 milliards de dollars, qui donne un véritable coup d'accélérateur aux recherches sur les circuits intégrés et calculateurs¹⁵.

Le matériau de l'énergie solaire

Les diodes en silicium, en germanium et en d'autres semi-conducteurs réalisent la conversion de photons en électrons.

15. « The decision of President Kennedy in 1961 to mount an intensive space program, with the intention to put a man on the moon in 1970 kick-start a technological revolution, certainly no other country ever received a comparable boost. Given the modest lifting capability of current US rockets weight was a vital factor and all electronics must therefore be transistorized. Ruggedness and reliability too were better served by solid-state devices than by the older fragile vacuum tubes. It became clear that the required rocket guidance would demand highly sophisticated computer technology and that such advanced circuitry could only be realized in integrated form » (Orton 2004, p. 99).

L'effet photovoltaïque, présenté par un lingot de silicium constituant une diode PN, fut découvert par Russell Ohl des Bell Labs en 1940 (Ohl 1946).

Le programme de développement des cellules solaires démarra en 1952. Le 26 avril 1954 les Bell Labs annoncèrent la fabrication de cellules solaires en silicium par le procédé de dopage par diffusion. C'est le développement de ce procédé de dopage pour le solaire qui assura celui des transistors (Chapin *et al.* 1954).

Le programme spatial fut le moteur du développement des cellules solaires ; la première utilisation de cellules solaires fut dans l'équipement du satellite Vanguard 1, lancé le 17 mars 1958 pour l'alimentation d'un émetteur radio. L'ensemble fonctionna pendant huit ans. Le programme spatial suscita (finança) de nombreuses recherches et une véritable industrie de production de cellules.

La crise de l'énergie dans les années 1974-1975 suscita un nouvel intérêt pour les cellules solaires. Le silicium est le matériau d'une source énergétique majeure (l'énergie solaire), 99,4 % des panneaux solaires sont à base de silicium, 0,4 % à base de CdTe, GaAs.

Solar Impulse 2, le fragile avion aux ailes immenses recouvertes de panneaux solaires (11 628 cellules photovoltaïques en silicium monocristallin ultrafines (166 μm)), est le symbole des progrès réalisés en quelques années dans le domaine des matériaux et des énergies renouvelables.

Le matériau des capteurs d'images numériques

Les capteurs d'images photoélectriques en silicium, dont l'invention par W.S. Boyle et G.E. Smith, également des Bell Labs, en 1970 leur valut un prix Nobel, ont rendu possible la photographie numérique et ont révolutionné l'astronomie. Ce sont des composants cruciaux des fax, appareils photo, scanners, de l'imagerie médicale (Boyle et Smith 1970).

Le matériau des microcomposants électromécaniques (MEMS)

Un MEMS « capteur » ou « actionneur » est un élément essentiel de ce que l'on appelle les objets intelligents, puisque c'est grâce à lui que l'on peut disposer d'informations liées à notre environnement et inversement. Une série de ruptures technologiques et de paris industriels ont permis de faire exploser un marché qui ne cesse d'évoluer (Vigna 2013).

Le développement de ces microsystèmes a été rendu possible par la disponibilité d'un matériau, le silicium, par ses propriétés électriques et mécaniques exceptionnelles et par le développement de technologies spécifiques de miniaturisation pour ce matériau.

Le rôle des « métallurgistes »

Si l'invention du transistor doit être, sans contestation, attribuée à trois physiciens, John Bardeen, Walter H. Brattain, William B. Shockley des Bell Labs (BTL, Bell Telephone Laboratories), selon Jack Scaff, directeur du laboratoire des matériaux des Bell Labs : « Le rôle des métallurgistes dans ces développements a été primordial » (Scaff 1970).

La purification des matériaux de base, jusqu'à des puretés atteignant 11N, la miniaturisation des composants (transistors) ont posé des problèmes de matériaux d'une complexité rarement rencontrée dans l'élaboration de produits manufacturés.

Le tableau en annexe présente la liste des principales inventions, découvertes et réalisations dues à des « métallurgistes/chimistes ».

La découverte du silicium N et du silicium P, de l'effet redresseur et de l'effet photoélectrique en 1940, présentés par un barreau de silicium solidifié unidirectionnellement par Rüssel Ohl des laboratoires Bell Labs de la société ATT en 1940.

C'est à Gordon Teal des Bell Labs que l'on doit, dès la découverte du transistor à pointes, en décembre 1947, la préconisation de la purification du matériau et de l'utilisation du monocristal comme matériau de base, le développement de la méthode CZ de tirage pour l'obtention de monocristaux de germanium dans un premier temps, puis de silicium, et pour la réalisation des transistors bipolaires, la recherche de l'obtention de la pureté la plus grande du matériau de base et la mise au point du dopage contrôlé ayant permis la réalisation du premier transistor bipolaire en germanium. Ces travaux sont effectués en catimini, sans avoir ni l'autorisation ni l'approbation des responsables, en particulier de William Shockley (chapitre 4).

Les travaux de Jack Scaff et Henry Theuerer, puis de Calvin Fuller sur le procédé de dopage par diffusion, qui devait devenir le procédé de base de fabrication des transistors (remplacé ensuite par l'implantation ionique, de même principe) (chapitre 5).

La découverte du procédé de masquage par oxydation du silicium, par Derrick et Frosch, ayant permis l'invention, par Jean Hoerni de la société Fairchild, du transistor

bipolaire de configuration planar en silicium. Selon Bo Lojek, Hoerni réalisa ses expériences en travaillant tout seul, pratiquement de nuit, sans aucun budget de recherche, en se gardant de mettre au courant Gordon Moore (Lojek 2007, p. 123).

La découverte de la passivation du silicium par oxydation par Atalla, ayant permis la réalisation du premier transistor MOSFET en silicium par Khang et Atalla (chapitre 6).

Les clés technologiques de la révolution numérique

Ce sont :

– la découverte du silicium N et du silicium P en 1940, autrement dit la découverte que la conductivité du silicium suivant le dopage par des éléments tels que le bore ou le phosphore pouvait être du type n (par électrons porteurs de charge négative) ou du type p (par trous, porteurs de charge positive), propriété constatée également pour le germanium. Les recherches poursuivies permettent d'établir en 1942 que ces éléments sont des « semi-conducteurs » ;

– la découverte de la diode PN à base de silicium en 1940 ;

– l'invention du transistor bipolaire en 1949 par W. Shockley : composant électronique solide, recherché pour se substituer à la triode électronique, comme élément amplificateur, mais s'avérant être également un élément de commutation : « véritable vanne électronique » ;

– l'invention du circuit intégré en 1959 : innovation majeure consistant en une « intégration monolithique », dans un monocristal de silicium, de circuits logiques constitués de plusieurs transistors, jusqu'à des milliards, qui a ouvert une révolution industrielle (la deuxième ou la troisième) ;

– la purification à des niveaux jamais atteints pour un matériau (jusqu'à 11N) et la réalisation de monocristaux de cristallinité parfaite pour le germanium, puis pour le silicium, réalisations permettant la maîtrise par dopage de la conductivité de ces matériaux semi-conducteurs ;

– les qualités de l'oxyde de silicium : stabilité, isolant (diélectrique), barrière de diffusion, gravure sélective par HF (sans attaquer le silicium sous-jacent), ayant permis la réalisation du transistor à effet de champ MOSFET et le développement des circuits intégrés ;

– la dissipation thermique du silicium (la conductivité thermique du silicium est le double de celle du germanium et le triple de celle de l'arséniure de gallium), permettant une intégration poussée.

Annexes

Les transistors : principales découvertes, inventions et innovations¹⁶

Innovations	Sociétés	Dates	Auteurs
Contrôle de la conductibilité du Si par dopage	BTL	1942	Russell Ohl et Jack Scaff
Effet redresseur et effet photovoltaïque de la diode PN en silicium	BTL	1940	Russell Ohl
Transistor à pointes	BTL	1947	John Bardeen et Walter Brattain (Nobel)
Transistor bipolaire (à jonctions PN)	BTL	1948	William Shockley (Nobel)
Monocristal de germanium (Ge)	BTL	1950	Gordon Teal
Transistor bipolaire Ge fabriqué par tirage (<i>grown junction</i>)	BTL	1950	Morgon Sparks et Gordon Teal
Purification Ge par fusion de zone	BTL	1951	W.C. Pfann
Transistor bipolaire Ge fabriqué par alliage (<i>alloy junction transistor</i>)	General Electric	1951	R.N. Hall et W.C. Dunlap
Transistor bipolaire en silicium	BTL-TI	1954	Morris Tannenbaum et Gordon Teal
Réalisation d'une cellule solaire en Si par diffusion de bore	BTL	1954	Calvin S. Fuller
Procédé de masquage par oxydation du Si (<i>oxide masking</i>)	BTL	1955	Lincoln Derrick et Carl Frosch
Transistor bipolaire « planar » en Si	Fairchild	1959	Jean Hoerni
Passivation du silicium par oxydation (<i>oxide surface passivation</i>)	BTL	1959	Martin Atalla, Morris Tannenbaum et E. Scheibner
Circuits intégrés	TI et Fairchild	1959	Jack Kilby (Nobel) et Robert Noyce
Transistor MOSFET en Si	BTL	1960	Dawon Khang et Mohamed M. Atalla
Transistor MOSFET complémentaire (CMOS)	Fairchild	1963	Frank Wanlass, Chih Tang, Sah, Moore
Transistor MOSFET à grille flottante (<i>floating gate MOSFET</i>) (mémoire ROM)	BTL	1967	Dawon Kahng et Simon Min Sze
Mémoire DRAM (<i>one transistor DRAM cell</i>)	IBM	1968	Robert Dennard
Capteurs d'images numériques CCD	BTL	1970	Willard S. Boyle et George E. Smith (Nobel)

(BTL : Bell Telephone Laboratories, « Bell Labs » ; TI : Texas Instruments)

Tableau I.1. Les transistors

16. Adapté de P. Seidenberg, « From germanium to silicon », voir : ethw.org/archives.

La position de la France

La position de la France dans cette aventure a été décrite par Maurice Bernard, ancien directeur du CNET, dans une conférence prononcée dans un colloque « Journée Jean-Pierre Noblanc » le 30 septembre 2004 à Paris (disponible sur Internet). Extraits :

« Dès la fin de la guerre vers 1946-1947, le CNET avait récupéré deux scientifiques allemands, H. Welker et H. Mataré, et avait contribué à leur installation dans un laboratoire de la Société des freins et signaux Westinghouse. »

Les recherches de Herbert Mataré et Heinrich Welker débouchent sur l'invention du « Transistron », un transistor à pointes, en 1948. Cette invention est présentée chapitre 3 section 3.2.3.

« H. Welker, physicien de réputation mondiale, ne tarde pas à retourner en Allemagne, où Siemens lui propose de diriger les recherches sur les semi-conducteurs. Quant à Mataré, il émigre aux États-Unis. »

« L'installation en 1969 dans de nouveaux locaux à Bagneux de plusieurs services du CNET aurait pu être l'occasion de lancer un important programme en microélectronique silicium, dont l'importance commençait à apparaître. Cette orientation n'a pas été étudiée de façon approfondie... Cette décision finalement ne fut pas prise. »

« Ayant pris trop tardivement le virage de la diffusion dans le silicium (procédé de dopage du silicium), le CNET a raté le train des circuits intégrés. »

« À partir de 1975 se pose à nouveau et de façon encore plus pressante que durant les années 1960 la question des composants électroniques et plus précisément des circuits intégrés... Quelques études s'achèvent à Bagneux sur le germanium et le silicium. Elles ne concernent que des composants discrets. Les compétences en microélectronique et en circuits intégrés sont à peu près inexistantes. »

En revanche, comme cela est présenté dans la note de bas de page n° 10, le premier central téléphonique expérimental utilisant un système de commutation entièrement électronique, mettant en œuvre des microprocesseurs, système appelé « commutation temporelle ou numérique », fut mis en place par le CNET en France, à Perros-Guirec en 1970. Ces commutateurs constituent la vraie révolution dans les télécommunications modernes (Caron 1997).

Bibliographie

- Abiteboul, S., Dowek, G. (2017). *Le temps des algorithmes*. Le Pommier, Paris.
- Bardeen, J., Brattain, W.H. (1948). The Transistor, A Semi-Conductor Triode. *Physical Review*, 74(7), 230–231.
- Berry, G. (2017). *L'Hyperpuissance de l'informatique*. Odile Jacob, Paris.
- Bols, D., Rosencher, E. (1988). Les frontières physiques de la microélectronique. *La recherche*, 203, 1176–1186.
- Boyle, W.S., Smith, G.E. (1970). Chargecoupled semiconductor device. Bell System Technical Journal. *B.S.T.J. Briefs*, 49(4), 587–593.
- Caron, F. (1997). *Les deux révolutions industrielles du XXème siècle*. Albin Michel, Paris.
- Chapin, D.M., Fuller, C.S., Pearson, G.L. (1954). A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electric power. *Journal of Applied Physics*, 25(5), 676–677.
- Cohen, D. (2015). *Le monde est clos et le désir infini*. Albin Michel, Paris.
- Collins, G. (2012). Claude E. Shannon: Founder of the Information Theory. *Scientific American*.
- Dill, R. (1954). Germanium alloy transistors [En ligne]. Disponible à l'adresse : <http://ibm-1401.info/germaniumalloy.html>.
- Felker, J.H. (1951). The transistor as a digital computer component. Dans *Proceedings AIEE-IRE Computer conference*. Philadelphie, 105–109.
- Irvine, M.M. (2001). Early Digital Computers at Bell Telephone Laboratories. *IEEE Annals of the history of computing*, 21–42.
- Isaacson, W. (2015). *Les innovateurs*. JC Lattès, Paris.
- Leamy, H.J., Wernick, J.H. (1997). Semiconductor Silicon; the extraordinary made ordinary. *MRS Bulletin*, 47–55.
- Lojek, B. (2007). *History of semiconductor Engineering*. Springer, Berlin.
- McMahon, M.E. (1990). The great transistor symposium of 1951, SMEC. *Vintage Electrics*, 2.
- Morton, J.A., Pietenpol, W.J. (1958). The technological impact of transistors. *Proceedings of the IRE*, 6, 955–959.
- Ohl, R.S. (1946). Light sensitive electric device. Brevet US2402662.

- Orton, J.W. (2004). *The story of semiconductors*. Oxford University Press, Oxford.
- Queisser, H.J. (1998). Materials research in early Silicon Valley and earlier. *Semiconductor Silicon*. The Electrochemical Society [En ligne].
- Reid, T.R. (1984). *The Chip*. Simon & Schuster, New York.
- Ross, I.M. (1997). The foundation of the silicon age. *Bell Labs Technical Journal*, 2(4), 3.
- Scaff, J.H. (1970). The role of metallurgy in the technology of electronics materials. *Metallurgical Transactions*, 1(3), 561–573.
- Seitz, F., Einspruch, N.G. (1998). *The tangled History of Silicon*. University of Illinois Press, Illinois.
- Shannon, C. (1938). A symbolic analysis of relay and switching circuits. *Transactions of the American Institute of electrical engineers*, 57(12), 713–723.
- Teal, G.K. (1976). Single crystals of germanium and Silicon – basic to the transistor and integrated circuit. *IEEE Transactions on electron devices*, 23(7), 621–639.
- Vigna, B. (2013). Interview (ST microelectronics). *Paris Innovation Review*, 1.
- Welker, H.J. (1976). Discovery and Development of III-V Compounds. *IEEE Transactions on electron devices*, 23(7), 664–674.