

## L'INVENTION DU TRANSISTOR AUX BELL LABS OU LA CRÉATION D'UNE EXPERTISE SUR UN DOMAINE INCONNU

[Sylvain Lenfle, Loïc Petitgirard](#)

ESKA | « Entreprises et histoire »

2020/1 n° 98 | pages 94 à 119

ISSN 1161-2770

ISBN 9782747230445

Article disponible en ligne à l'adresse :

-----  
<https://www.cairn.info/revue-entreprises-et-histoire-2020-1-page-94.htm>  
-----

Distribution électronique Cairn.info pour ESKA.

© ESKA. Tous droits réservés pour tous pays.

La reproduction ou représentation de cet article, notamment par photocopie, n'est autorisée que dans les limites des conditions générales d'utilisation du site ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Toute autre reproduction ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit, est interdite sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France. Il est précisé que son stockage dans une base de données est également interdit.

# L'INVENTION DU TRANSISTOR AUX BELL LABS OU LA CRÉATION D'UNE EXPERTISE SUR UN DOMAINE INCONNU

par Sylvain LENFLE

Professeur des universités de management de l'innovation au CNAM  
LIRSA et i3/CRG

et Loïc PETITGIRARD

Maître de conférences d'histoire des sciences et des techniques au CNAM  
HT2S

***Comment se construit l'expertise dans une grande organisation ? Et quels rapports entretient-elle avec l'innovation ? Cet article s'attaque à ces questions à partir du célèbre cas de l'invention du transistor aux Bell Laboratories. En suivant étape par étape le processus de conception de cette invention entre les années 1930 et 1948, il propose une réflexion sur les rapports complexes entre objectifs pratiques, inconnu théorique et stratégie de l'expertise en entreprise.***

## INTRODUCTION

Les questions de l'élaboration de compétences nouvelles et de leur rôle dans la stratégie des firmes font l'objet d'un courant de recherche important en management stratégique autour de ce que l'on appelle les *dynamic capabilities*<sup>1</sup>. Celui-ci insiste sur le rôle fondamental joué par les compétences distinctives de l'entreprise dans la construction d'un avantage compétitif<sup>2</sup>. On peut toutefois

constater, suivant ici Gary Pisano, que ce courant manque encore d'études de cas permettant de comprendre le processus de construction de compétences nouvelles à l'échelle d'une entreprise ou d'un laboratoire de Recherche & Développement (R&D). Les connaissances dont nous disposons sur les origines, le déroulement ou encore les facteurs expliquant le succès ou l'échec du processus de création et d'élaboration de nouvelles compétences sont par conséquent relativement limitées.

<sup>1</sup> Les auteurs tiennent à remercier pour leurs précieux commentaires les relecteurs ainsi que Gilles Garel, Christophe Lécuyer et Pascal Le Masson.

<sup>2</sup> Pour une synthèse récente par l'un des auteurs de référence sur le champ, voir G. Pisano, « Toward a Prescriptive Theory of Dynamic Capabilities: Connecting Strategic Choice, Learning and Competition », *Industrial and Corporate Change*, vol. 26, n° 5, 2017, p. 747-762.

En outre, si ce processus de construction est lié à la stratégie d'entreprise, il est aussi articulé aux processus d'invention et d'innovation dans l'entreprise. Les travaux récents de Benjamin Cabanes<sup>3</sup> éclairent cette interdépendance complexe entre stratégie d'entreprise, innovation et expertise – la notion d'expertise englobant et dépassant ici la question des compétences. En effet, ces travaux définissent l'expertise comme incarnant « les connaissances, les savoirs et les savoir-faire techniques et scientifiques sur lesquels se construit le positionnement des firmes ». L'expertise correspond donc au « substrat scientifique et technologique permettant l'imagination et la conception des technologies et produits futurs ». Nous nous appuyons sur cette même définition dans cet article. Benjamin Cabanes *et alii*<sup>4</sup> font l'hypothèse qu'il existe une variété de formes de création d'expertise et que ces différentes formes ne génèrent pas les mêmes potentiels d'innovation. C'est la raison pour laquelle ils mettent en avant le concept de « régime de création d'expertise » pour clarifier les enjeux de création d'expertise dans les processus d'innovation.

Notre article se veut une contribution à la fois empirique et théorique à ces débats et propositions : la problématique de la construction de l'expertise, dans ses rapports à l'organisation et à l'innovation, en constitue le cœur. L'article est centré sur un cas d'étude

célèbre : l'invention du transistor au sein des Bell Laboratories d'AT&T (désormais BL) entre 1936 et 1950. En effet, l'histoire de l'invention du transistor donne matière à analyser dans le détail le processus de construction d'une expertise nouvelle au sein d'une grande organisation. Au milieu des années 1930, les BL lancent un programme de recherche visant à explorer la physique des semi-conducteurs (désormais SC) et ses potentialités en termes de fabrication de nouveaux composants électroniques susceptibles de dépasser les limites des tubes à vide utilisés dans tous les systèmes de télécommunications de l'époque : téléphonie longue distance, radiodiffusion et récepteurs radio, et bientôt télédiffusion<sup>5</sup>. Une grande partie des usages de ces (futurs) composants électroniques sont prédéfinis au sens où il s'agit d'imaginer un « simple » substitut aux tubes préexistants. Le programme est d'autant plus intéressant qu'il est construit comme une recherche de fond, empirique et théorique, visant une compréhension approfondie des phénomènes physiques propres aux SC comme préalable à la conception du dispositif : une part considérable de l'inconnu en jeu tient à ces lacunes théoriques et technologiques, pour lesquelles les BL veulent construire leur expertise de toute pièce.

Comme nous allons le voir, ce programme s'avère particulièrement fructueux puisqu'il conduit à l'invention du transistor à point de contact en décembre 1947, puis à celle

<sup>3</sup> B. Cabanes, *Modéliser l'émergence de l'expertise et sa gouvernance dans les entreprises innovantes : des communautés aux sociétés proto-épistémiques d'experts*, thèse de doctorat de sciences de gestion, MINES ParisTech - PSL Research University, 2017.

<sup>4</sup> B. Cabanes, P. Le Masson et B. Weil, « Les régimes de création d'expertise : innovation et gouvernance de l'expertise dans les organisations industrielles », *Entreprises et Histoire*, n° 98, avril 2020.

<sup>5</sup> Les tubes à vide sont de deux sortes : les diodes (ou valves, à deux électrodes) inventées par John Fleming en 1904, et les triodes (trois électrodes) inventées par Lee de Forest en 1906 et perfectionnées aux Bell Labs en 1912. Ces tubes assurent plusieurs fonctions techniques essentielles aux télécommunications : redresser des courants électriques (la fonction principale des diodes), générer des oscillations et amplifier des signaux électriques (fonctions essentielles des tubes triodes). Ce sont des composants électroniques essentiels, et sans équivalent, jusqu'à l'invention des transistors performants dans les années 1950. Les tubes à vide sont une clé technologique indispensable pour amplifier les communications téléphoniques à longue distance, pour générer des gammes de fréquences radio étendues et contrôlables, pour recevoir et amplifier des signaux radio, etc. Voir A. D. Chandler, *Inventing the Electronic Century: the Epic Story of the Consumer Electronics and Computer Industries*, 2<sup>e</sup> éd. avec une nouvelle préface, Cambridge (Mass.), Harvard University Press, 2005 ; P. R. Morris, *A History of the World Semiconductor Industry*, Londres, Peregrinus, 1990 ; M. Riordan et L. Hoddeson, *Crystal Fire: the Invention of the Transistor and the Birth of the Information Age*, New York, W. W. Norton, 1997.

du transistor à jonction en février 1948. Les différents transistors inventés après 1948 (à jonction, à effet de champ, au germanium puis au silicium) vont bouleverser toute l'industrie électronique qui était jusque-là fondée sur le *dominant design* du tube à vide. Elle vaudra à W. Shockley, J. Bardeen et W. Brattain le prix Nobel de physique en 1956. Le transistor en silicium (*silicon* en anglais) constituera le nouveau composant clé de l'industrie et donnera son nom à la Silicon Valley, lieu d'éclosion et de concentration de la nouvelle industrie microélectronique<sup>6</sup>. L'histoire du transistor est donc, à bien des égards, exceptionnelle, d'autant plus qu'il s'agit à la fois de l'invention d'un nouvel objet technique (le composant transistor) et d'une découverte fondamentale en physique des états solides (« l'effet transistor »). C'est le résultat d'un programme de conception d'un nouvel objet en même temps qu'un programme de recherche qui vise à lever des inconnues fondamentales en physique. Les rapports à la construction de l'expertise sont pluriels car le processus implique autant de savoir-faire, de compétences pratiques (qui permettront l'invention)

que de savoirs théoriques (qui aboutiront à la découverte scientifique valant prix Nobel).

Le cas du transistor offre, en outre, aux chercheurs en gestion et en histoire un matériau historiographique particulièrement riche. En premier lieu, nous pouvons nous appuyer sur les recherches de l'historienne des techniques Lillian Hoddeson<sup>7</sup> et de ses collaborateurs, ainsi que sur les nombreux travaux existant sur les BL<sup>8</sup>. En second lieu, nous disposons des témoignages écrits des acteurs eux-mêmes, en particulier Mervin Kelly<sup>9</sup> et William Shockley, dont les réflexions sur le processus conduisant aux inventions de 1947 et 1948 sont particulièrement utiles pour accéder aux processus et aux raisonnements de conception<sup>10</sup> qui nous intéressent ici.

L'exploitation de ce matériau nous permet d'étudier en détail le processus d'élaboration d'une expertise sur un champ quasiment inconnu en 1930, et de montrer comment se créent des compétences nouvelles depuis l'émergence de la question jusqu'à sa réduction en art, au sens donné à cette

<sup>6</sup> Sur l'histoire de la Silicon Valley voir en particulier C. Lécuyer, *Making Silicon Valley. Innovation and the Growth of High Tech, 1930-1970*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 2006 ; ou, pour un cas particulier, L. Berlin, *The Man Behind the Microchip. Robert Noyce and the Invention of Silicon Valley*, Oxford, Oxford University Press, 2005.

<sup>7</sup> Les premiers travaux de L. Hoddeson sur l'organisation de la recherche aux BL et l'émergence de la mécanique quantique remontent aux années 1980 : L. Hoddeson, G. Baym et M. Eckert, « The Development of the Quantum-Mechanical Electron Theory of Metals: 1928-1933 », *Reviews of Modern Physics*, vol. 59, n° 1, 1987, p. 287-327 ; L. Hoddeson, E. Braun, J. Teichmann et R. S. Weart (eds.), *Out of the Crystal Maze: Chapters from the History of Solid State Physics*, Oxford, Oxford University Press, 1992 ; L. Hoddeson, « The Entry of the Quantum Theory of Solids into the Bell Telephone Laboratories, 1925-40: A Case-Study of the Industrial Application of Fundamental Science », *Minerva*, vol. 18, n° 3, 1980, p. 422-447. Ses principaux travaux sur l'invention du transistor sont publiés dans : L. Hoddeson, « The Discovery of the Point-Contact Transistor », *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 12, n° 1, 1981, p. 41-76 ; M. Riordan et L. Hoddeson, « Minority Carriers and the First Two Transistors », in A. Goldstein et W. Aspray (eds.), *Facets: New Perspectives on the History of Semiconductors*, New Brunswick, IEEE Center for the History of Electrical Engineering, 1997, p. 1-33 ; M. Riordan, L. Hoddeson et C. Herring, « The invention of the transistor », *Reviews of Modern Physics*, vol. 71, n° 2, 1999, p. S336-S345. Beaucoup de ses travaux sont synthétisés dans M. Riordan et L. Hoddeson, *Crystal Fire*, op. cit.

<sup>8</sup> Par exemple, J. Gertner, *The Idea Factory: Bell Labs and the Great Age of American Innovation*, New York, Penguin Books, 2012.

<sup>9</sup> M. J. Kelly, « The Bell Telephone Laboratories—an Example of an Institute of Creative Technology », *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 203, n° 1074, 1950, p. 287-301.

<sup>10</sup> En particulier : W. Shockley, *Electrons and Holes in Semiconductors with Applications to Transistor Electronics*, Princeton, D. Van Nostrand Company, 1950 ; *Id.*, « Transistor Technology Evokes New Physics », Nobel Lecture, Stockholm, 1956 (<https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/shockley-lecture.pdf>) ; *Id.*, « The Invention of the Transistor – “An Example of Creative-Failure Methodology” », *National Bureau of Standard Special Publication*, mai 1974, p. 47-89 ; *Id.*, « The Path to Conception of the Junction Transistor », *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 23, n° 7, 1976, p. 597-620.

notion par Hélène Vérin<sup>11</sup>. Nous arrêterons ainsi notre analyse à l'année 1950, date de publication de l'ouvrage de W. Shockley, *Electrons and Holes in Semiconductors with Applications to Transistor Electronics*, dans lequel il synthétise ses travaux de manière à les rendre « *accessible to electrical engineers or undergraduate physicists with no knowledge of quantum theory or wave mechanics. It should serve as a basis for understanding the operation of transistor devices and for elementary design considerations* ». L'ouvrage constituera pendant de longues années la bible de la recherche et du développement en électronique dans la Silicon Valley.

Précisons enfin que notre objectif n'est pas ici d'écrire une page nouvelle de cette histoire. Nous cherchons à confronter le matériau existant à la problématique de construction d'une expertise nouvelle en nous situant, autant que faire se peut, au plus près des acteurs. Il s'agit d'analyser les multiples dynamiques entrelacées qui sous-tendent le processus conduisant du projet plein d'inconnu, esquissé dans les années 1930 aux BL, à l'invention d'un dispositif appelé transistor et à la découverte de l'effet transistor en 1947-1948. Comme nous allons le voir, le processus se déploie sur des temporalités longues et en plusieurs phases successives : nous les avons identifiées à partir de notre lecture synthétique des travaux historiographiques. Pour chacune de ces phases nous analyserons simultanément la dynamique de construction de l'expertise dans le laboratoire, les raisonnements de conception de dispositifs à SC, les théorisations de la physique de l'état

solide et les évolutions des modes d'organisation de la recherche au sein des BL. C'est ce qui justifie que nous mobilisions la théorie C/K, développée par A. Hatchuel et B. Weil<sup>12</sup>, afin de mettre en forme le matériau historique. Celle-ci nous permet en effet de reconstruire les raisonnements de conception à l'œuvre lors de l'invention du transistor afin de montrer comment Bardeen, Brattain et Shockley avancent dans ce territoire inconnu jusqu'à l'invention du transistor. Elle nous permet de suivre l'évolution des différents concepts de transistors explorés (notés  $C_1, C_2, C_n$ ) ainsi que les connaissances sur lesquelles s'appuie cette exploration ou celles qu'elle génère (notées  $K_1, K_2, K_n$ ). Nous pourrions ainsi suivre au plus près des acteurs l'heuristique à l'origine du développement d'une nouvelle expertise sur un domaine inconnu.

Cette relecture sera ensuite mise en regard des « régimes de création d'expertise » discutés dans Benjamin Cabanes *et alii*<sup>13</sup>, pour déterminer à quels régimes le processus d'invention du transistor aux BL pourrait être rapporté et pour préciser les particularités du régime auquel nous avons à faire. D'une part, le régime basé sur la « cumulativité » des domaines d'expertise, caractéristique de l'organisation des laboratoires de recherche industriels, correspond évidemment à certains aspects du processus tel qu'il se déroule dans les BL. Mais, d'autre part, B. Cabanes distingue un régime basé sur la « générativité » des domaines d'expertise qui nous paraît complémentaire et judicieux pour éclairer le processus d'invention du transistor.

<sup>11</sup> « Réduire en art est rassembler, mettre en ordre et diffuser par l'écrit : rassembler des données dispersées, confuses voire profuses, les ordonner, les éclaircir à l'aide de règles et de préceptes, dans un exposé bref et méthodique, et diffuser par écrit le résultat de ce travail dans un langage accessible à tous, afin que chacun dispose des moyens d'agir au mieux, ses choix étant ainsi facilités, conduits, réglés. Par ce travail de réduction, l'auteur contribue à la diffusion d'un savoir et donc à son perfectionnement possible, grâce au travail successif – et cumulatif – des générations : la finalité toujours évoquée est le bien public, qui se décline en charité, en service du prince et de son peuple ; imbus de religion, les protestants ne manquent jamais d'évoquer la gloire de Dieu. Le point de vue est celui de l'action : sur les idées, sur les hommes, sur les choses. » H. Vérin, « Rédiger et réduire en art : un projet de rationalisation des pratiques », in P. Dubourg Glatigny et H. Vérin (dir.), *Réduire en art. La technologie, de la Renaissance aux Lumières*, Paris, Éditions de la MSH, 2008, p. 27-28.

<sup>12</sup> Voir par exemple A. Hatchuel et B. Weil, « C-K Design Theory: an Advanced Formulation », *Research in Engineering Design*, vol. 19, n° 4, 2009, p. 181-192. Nous résumons brièvement la théorie C/K en annexe.

<sup>13</sup> B. Cabanes *et alii*, « Les régimes de création d'expertise », *art. cit.*

L'article est construit en plusieurs parties déterminées par les grandes phases du processus qui ont conduit à l'invention du transistor. En introduction nous expliquons que les temporalités que nous retenons sont inspirées des travaux de Lillian Hoddeson *et alii* d'une part et des écrits de William Shockley de 1974 d'autre part. Puis nous montrerons comment le programme sur les SC a émergé aux BL dans les années 1930 (1<sup>ère</sup> phase) : le pari initial de tout le programme est de miser sur ces nouveaux matériaux, très mal connus mais perçus comme porteurs d'avenir technologique. La partie suivante examinera le rôle du second conflit mondial (2<sup>e</sup> phase) dans l'accélération des recherches sur les SC, en particulier autour du développement des radars et des nouveaux résultats concernant les SC que sont le germanium et le silicium. La section 3 présentera les importantes évolutions organisationnelles aux BL au sortir du conflit (3<sup>e</sup> phase) – évolutions inspirées par l'expérience du projet de radar dans lequel les BL ont joué un rôle essentiel. Ce projet a permis de relancer le programme mis en place avant la guerre dans un cadre pluridisciplinaire. La section 4 étudiera l'invention du transistor à point de contact et ce que W. Shockley a appelé, en 1974, le « *magic month* » (4<sup>e</sup> phase). Nous montrerons alors que l'histoire ne s'arrête pas là car, dans la foulée, W. Shockley développe la théorie du transistor à jonction (section 5) qui s'avèrera finalement être le produit réellement performant en termes technologiques, industriels et commerciaux (5<sup>e</sup> phase). Nous évoquerons rapidement dans la section 6 l'impact de cette invention sur le développement de la Silicon Valley. Enfin, nous reviendrons dans la conclusion sur les enseignements à tirer de cette histoire pour les modes d'élaboration d'expertise sur un domaine inconnu.

<sup>14</sup> Le *Bell system* rassemble les Bell Telephone Laboratories, la Western Electric Company et plusieurs autres compagnies. Les Bell Labs sont l'entité de R&D du groupe et la Western Electric fabrique et fournit les appareils. L'ensemble a été absorbé par AT&T (American Telephone and Telegraph Company) en 1899 et dispose alors d'un monopole aux États-Unis. Fondés en 1912, les Bell Labs deviennent une filiale d'AT&T en 1925. Ils sont alors chargés de l'ensemble des activités de recherche et de développement d'AT&T.

## 1. LA CONSTITUTION D'UNE PREMIÈRE BASE DE CONNAISSANCES ( $K_0$ ) SUR LA PHYSIQUE DES SEMI-CONDUCTEURS (PHASE 1 – 1930-1939)

Les racines de l'histoire du transistor remontent aux années 1930 au sein des BL<sup>14</sup>. L'industrie de l'électronique et des télécommunications est à l'époque déjà bien installée et repose sur le *dominant design* du tube à vide (aussi appelé tube triode ou simplement triode). Ces tubes ont été inventés pour assurer plusieurs fonctions : produire des oscillations, redresser des courants et amplifier des signaux. Ils sont sans rivaux avant l'invention du transistor. C'est une technologie fondamentale parce qu'ils servent, en particulier pour un pays de la taille des États-Unis, à assurer des communications à longue distance en amplifiant les signaux téléphoniques. Mais les tubes ont leurs limites : ils sont fragiles, ils consomment beaucoup d'énergie et dissipent beaucoup de chaleur, ils sont complexes à fabriquer en série.

Les principaux industriels du secteur (aux États-Unis comme en Europe, tout particulièrement en Allemagne, en Grande-Bretagne et en France) cherchent à perfectionner les moyens de les produire, de les fiabiliser, de les miniaturiser : ce sont les grands axes de recherche des centres de R&D dans les années 1930. Trouver des composants alternatifs fait aussi partie des projets de recherche, mais avec de grandes inconnues concernant les dispositifs et les matériaux susceptibles de remplacer ces indispensables tubes à vide. Aux BL, le directeur de la recherche Mervin Kelly (1895-1971) choisit, dès le milieu des

années 1930, d'explorer la piste des SC comme des candidats potentiels pour concevoir des dispositifs d'amplification capables de se substituer aux tubes<sup>15</sup>. La question des usages est donc en quelque sorte réglée en partie à l'avance puisque le futur composant doit assurer les mêmes fonctions que les tubes. C'est un point singulier de ce programme.

Ces matériaux semi-conducteurs, qui ont des propriétés intermédiaires entre les conducteurs (comme les métaux) et les isolants (comme le verre), sont fabriqués et utilisés à petite échelle depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle : sélénium, oxyde de cuivre, galène, germanium (découvert en 1886) etc. Ferdinand Braun a découvert les propriétés des contacts métal / semi-conducteurs, pour redresser des courants en 1874<sup>16</sup>. Les cristaux de galène (sulfure de plomb) sont utilisés couramment dans les récepteurs radio dans les premières décennies du XX<sup>e</sup> siècle. À ceci près qu'il faut ajuster le point de contact sur le cristal de galène à chaque utilisation : le récepteur à galène (aussi appelé « moustache de chat ») fonctionne, mais de manière très empirique et approximative. Personne ne sait en réalité expliquer pourquoi et comment la galène réalise le redressement des courants et assure la réception radio. En 1926, L. Grondahl et P. Geiger<sup>17</sup> inventent un nouveau redresseur à oxyde de cuivre<sup>18</sup>, mais celui-ci pose de

nombreuses questions, qui viennent s'ajouter à celles concernant la galène.

Aux BL, comme dans de nombreux laboratoires académiques et industriels, on étudie les propriétés des solides, la conduction électrique, la compréhension de la matière à l'échelle atomique<sup>19</sup>. Dans les années 1930 aux BL, on expérimente tous ces dispositifs et matériaux, pour réaliser des varistors (redresseurs à résistance variable) ou des thermistors (dispositifs dont le gain varie en fonction de la température). Avec Joseph A. Becker, Walter Brattain développe ainsi un varistor en oxyde de cuivre. Et à force d'expériences sur l'oxyde de cuivre, émerge l'idée que ce matériau pourrait « faire comme » le tube à vide. Brattain et Becker explorent cette piste aux BL, et tentent de comprendre les énigmes posées par les SC. Est-ce que les effets des redresseurs à oxyde de cuivre sont liés aux effets de surface ou bien se produisent-ils dans le corps du solide ? Pourquoi certaines variétés de cuivre ne donnent-elles pas les mêmes propriétés de redresseurs ? Mais il n'existe aucune explication de ces comportements semi-conducteurs avant l'effort théorique des années 1940, pour lequel la découverte de l'« effet transistor » est un jalon primordial. Aux BL, M. Kelly orchestre cette phase intermédiaire d'exploration et de constitution d'une première expertise dans ce domaine très mal connu.

<sup>15</sup> Kelly a dirigé au préalable la division des BL dédiée aux tubes (*Vacuum Tube Department* – sur la période 1928-1934). C'est dans cette période qu'il s'est forgé l'idée des limites des tubes d'une part, et des potentialités des matériaux semi-conducteurs d'autre part.

<sup>16</sup> Les premières observations de propriétés de conduction différentes des métaux remontent au moins aux travaux de Michael Faraday en 1833. Dès 1839, Edmond Becquerel avait rapporté ses observations sur des effets photovoltaïques (l'éclairage de matériaux semi-conducteurs produisant une tension électrique dans certaines conditions). Il existe donc beaucoup de travaux disparates au XIX<sup>e</sup> siècle sur le sujet.

<sup>17</sup> Ils travaillent à l'Union Switch and Signal Company, une filiale de Westinghouse.

<sup>18</sup> Une plaque de cuivre, oxydée en surface, recouverte d'une électrode en graphite ou en argent. À travers ce dispositif, le courant ne passe que dans un seul sens (il est « redressé »). Mais ils ne savent pas encore dire si l'effet provient du contact cuivre-oxyde de cuivre ou du contact avec l'autre électrode.

<sup>19</sup> Parmi les contributions majeures dans ce champ, hors des BL, mentionnons qu'Edwin Hall a découvert qu'un courant d'électrons soumis à un champ magnétique perpendiculaire à sa direction pouvait être dévié (effet Hall). Cet effet est utilisé presque quotidiennement dans les recherches sur les SC aux BL. La nature ondulatoire de l'électron est mise en évidence par Davisson, Fermi et Thomson (1923-1927). Le principe d'exclusion de Pauli (1925) et les statistiques de Fermi-Dirac (1926) constituent l'architecture conceptuelle et les préliminaires indispensables aux théorisations ultérieures de la semi-conduction. B. Cabanes, *Modéliser l'émergence de l'expertise et sa gouvernance dans les entreprises innovantes*, op. cit., annexe 3.

Au tournant des années 1930, les éléments théoriques sont en fait très limités pour comprendre les propriétés de ces matériaux. La physique quantique est un domaine émergent, les théories et les interprétations empiriques sont en pleine discussion à l'échelle internationale. Une nouvelle théorie physique de la conduction dans les métaux se développe, mais la physique des SC est le parent pauvre du domaine.

Les éléments théoriques importants avant 1940 tiennent à quelques grandes lignes (ce qui constitue la base de connaissance initiale du projet des BL :  $K_0$ ) :

- La première théorie de la semi-conduction du physicien britannique Alan H. Wilson (1906-1995), publiée en deux articles de 1931-1932, qui indique les principes généraux des phénomènes propres à ces matériaux, directement inspirés des théories quantiques (il a réalisé ses travaux sous la direction de Werner Heisenberg).
- La théorie du redressement des courants électriques par un point de contact métal / semi-conducteurs – les explications probantes sont les résultats du physicien russe Boris Davydov, de l'Anglais Nevill Mott et de l'Allemand Walter Schottky. En 1938, elle est surtout connue sous le nom de « théorie de Mott-Schottky ».

Ces théories prendront un autre sens au fil des années 1940 : d'une part parce que leurs limites seront clairement établies, d'autre part parce que le germanium et le silicium apparaîtront comme des SC très particuliers, dits « intrinsèques » (ce ne sont pas des alliages) et bien mieux maîtrisés que tous les autres. Mais avant 1940 il s'agit d'un squelette théorique, satisfaisant pour des matériaux comme l'oxyde de cuivre : la théorie de Mott-Schottky est à la

mesure de la méconnaissance du phénomène de semi-conduction.

Toutefois, dans les années 1930, la plupart des physiciens théoriciens dans le monde académique se désintéressent pour ainsi dire des détails du fonctionnement des SC, en se satisfaisant des théories générales qui sont en train de faire leurs preuves en termes de physique nucléaire avec notamment bientôt la bombe atomique (le projet Manhattan repose entièrement sur la nouvelle physique). Les théories quantiques sont satisfaisantes et suffisantes dans le cas d'un métal idéal : c'est seulement dans le monde industriel, aux BL tout particulièrement, que le sujet des métaux « non parfaits » devient crucial. Ce point est extrêmement significatif du fait que c'est en fabriquant des matériaux nouveaux que les explications théoriques émergent. Ceci explique également que finalement la découverte de l'effet transistor soit intimement liée à la possibilité même d'inventer (et de fabriquer très concrètement) le composant transistor.

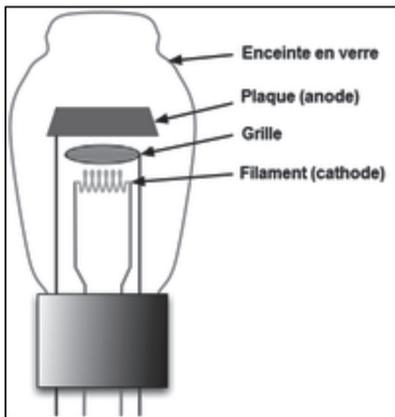
Compte tenu de la nouveauté du champ, en termes théoriques et expérimentaux, les BL font le choix de débiter de manière très « académique » : les laboratoires adoptent d'emblée un horizon de recherche de moyen voire de long terme, ils recrutent des chercheurs du niveau des meilleurs laboratoires universitaires, et s'organisent comme dans le monde académique. Après la période de crise de 1929 et la récession qui s'ensuit, les BL recrutent peu de nouveaux chercheurs avant 1935-1936. En 1936, afin de développer les compétences et les connaissances en matière de physique des SC, M. Kelly décide cependant d'embaucher aux BL des jeunes et brillants physiciens : W. Shockley (1910-1989) et D. Woolbridge (1913-2006)<sup>20</sup>. En 1939 viendront J. B. Fisk (1910-1981) du MIT et C. Townes (1915-2015) de CalTech<sup>21</sup>.

<sup>20</sup> Shockley a fait son doctorat sur l'étude des structures atomiques des molécules avec John C. Slater, l'un des pionniers de la physique quantique aux États-Unis, et *chairman* du Département de physique au MIT à partir de 1930. Woolbridge est formé à CalTech, il travaille aux BL sur les questions de magnétisme, puis quitte les BL pour une brillante carrière dans l'aéronautique.

<sup>21</sup> Fisk succédera à Mervin Kelly comme président des BL (1959-1973). Townes est l'un des inventeurs du maser (et pionnier du laser), prix Nobel de physique en 1964.

Très rapidement W. Shockley organise un séminaire hebdomadaire (du type de ceux qu'il a fréquentés au MIT) afin de développer et diffuser aux BL les connaissances et les compétences dans ce domaine nouveau qu'est la physique des SC. W. Brattain est embarqué dans l'aventure : recruté antérieurement aux BL (en 1929), il incarne (comme M. Kelly) une génération de physiciens formés à l'électronique des tubes qui se convertit très activement à la nouvelle physique. L'enjeu, clairement énoncé par Kelly, est de développer une théorie des SC adaptée aux systèmes de communication d'AT&T<sup>22</sup>.

C'est dans le cadre de ce groupe qu'ont lieu les premières expérimentations orientées vers un remplaçant du tube à vide, à base d'oxyde de cuivre puisqu'il s'agit d'un matériau prometteur et connu depuis plusieurs années. L'idée est alors de reproduire dans les SC la structure des tubes à vide (triodes), c'est-à-dire d'insérer l'équivalent de la « grille » d'un tube entre deux électrodes (anode et cathode du tube).



**Figure 1 - Représentation schématique d'un tube à vide**

En 1939, Shockley suggère de tester, avec l'aide de W. Brattain, une structure d'amplificateur en oxyde de cuivre avec une géométrie de « sandwich » comportant plusieurs couches de cuivre et d'oxyde de cuivre pour les équivalents d'électrodes / grille<sup>23</sup>. Le dispositif ne fonctionne pas comme prévu, il ne se passe rien dans cette « triode en oxyde de cuivre », mais le test a valeur d'indicateur : la transposition de la structure d'un tube dans le SC n'est pas une simple affaire de décalque structure pour structure. L'inconnu théorique est toujours aussi grand, malgré les efforts des années 1930, puisque personne ne sait expliquer pourquoi cela ne marche pas. L'expertise du groupe est encore à élaborer, malgré quatre ans d'investissements de Kelly. On peut souligner ici que l'expertise du groupe est encore très empreinte de l'expertise des BL sur les tubes à vide : c'est encore la culture technique dominante, c'est elle qui fournit les modèles et analogies pour la compréhension des « sandwichs » et autres structures en SC.

À la veille de la guerre cependant, un tournant vers le silicium s'amorce aux BL. Il est en grande partie influencé par l'électrochimiste du groupe, R. Ohl (1898-1987), qui a entrepris des tests systématiques sur les SC (en parallèle de W. Brattain et d'autres collaborateurs). Ohl identifie ainsi les matériaux les plus sensibles dans les contacts métal-semiconducteurs, et conclut que le silicium a des propriétés remarquables, une grande sensibilité mais un comportement erratique. Dès août 1939, il imagine purifier le silicium pour améliorer la stabilité de ses propriétés et perfectionne un procédé de purification par fusion du silicium. Avec J. H. Scaff (1908-1980) et H. Theuerer, deux métallurgistes des BL, il développe des fourneaux spéciaux pour purifier le silicium. C'est ainsi qu'en septembre 1939, en refroidissant un lingot de silicium, Scaff et Theuerer ont produit une jonction « p-n », c'est-à-dire une

<sup>22</sup> L. Hoddeson, « The Discovery of the Point-Contact Transistor », *art. cit.*, p. 48 : ce que Kelly avait en tête et qui organise toute la recherche de la période 1936-1940 : « *developing a microscopic theory for solid-state phenomena relevant to communication devices* ».

<sup>23</sup> Ce type de dispositif sera plus tard reconnu comme un transistor « *Shottky-gate-field effect* ». Shockley dessine ce dispositif dans son carnet de laboratoire du 29 décembre 1939.

interface entre deux régions respectivement « p » et « n » dans le lingot<sup>24</sup>. Cette propriété de jonction est mise en évidence par Ohl. Le morceau de silicium a en outre une propriété photovoltaïque remarquable dépassant largement (d'un facteur 10) tout ce qui est connu à l'époque et marque singulièrement les esprits de Kelly et Brattain.

---

## 2. LA SECONDE GUERRE MONDIALE ET LES RECHERCHES SUR LES RADARS : VERS UNE EXPERTISE SUR LA FABRICATION DES SEMI-CONDUCTEURS (PHASE 2 / K<sub>1</sub> – 1939-1945).

---

La guerre interrompt ces recherches et réoriente les groupes des BL vers de nouvelles priorités. Les physiciens sont mobilisés sur différents programmes militaires qui n'ont, pour la plupart, rien à voir avec les SC<sup>25</sup>. Les BL eux aussi s'investissent totalement dans l'effort de guerre américain : 1500 projets militaires sont développés aux BL durant le conflit. Les laboratoires jouent notamment un rôle central dans le projet de développement des radars conduit par le MIT et son célèbre Radiation Laboratory (Rad Lab), créé pour l'occasion<sup>26</sup>.

Dans ce nouveau contexte, les connaissances sur les SC se développent à grande échelle car ils jouent un rôle de premier plan dans la conception des radars pour lesquels les tubes à vide sont des composants dépassés : ils ne fonctionnent pas aux fréquences très élevées des radars<sup>27</sup>. De nouveaux détecteurs utilisés dans les radars sont conçus en SC : le silicium (Si) et le germanium (Ge) sont identifiés comme les SC les plus prometteurs dans ce cadre<sup>28</sup>. Ainsi, à l'Université Purdue, un groupe mené par le physicien K. Lark-Horovitz (1892-1958) développe une variété de germanium (dite *high back voltage germanium*) très importante dans de nombreux radars. Leurs premières réalisations datent de l'été 1942. Le groupe de Purdue étudie simultanément les propriétés fondamentales du germanium, la métallurgie des matériaux (pour la purification) et la réalisation de détecteurs. Le germanium *high-back voltage* est produit en octobre 1943. Il s'agit là d'une rupture importante : pour la première fois on considère le Ge et le Si comme des SC « intrinsèques », non pas seulement des métaux impurs – les théories de Wilson datant de 1931 prennent donc tout leur sens avec ces nouvelles possibilités de fabriquer et d'étudier les SC en pratique.

Les exigences de la guerre conduisent ainsi à des progrès spectaculaires dans les techniques de purification du Ge et du Si afin d'obtenir des matériaux au comportement suffisamment stable pour les applications militaires. La chimie et la métallurgie

<sup>24</sup> Il existe deux types de porteurs de charge dans un matériau conducteur d'électricité : l'électricité circule grâce à des électrons (porteurs « n ») et des trous (qui sont des déficits d'électrons, porteurs « p »). Le type de zone dans un SC dépend du type de porteurs de charge majoritaire dans la zone.

<sup>25</sup> Shockley, par exemple, obtiendra la *Medal for Merit* (la décoration la plus prestigieuse pour un civil) pour ses apports fondamentaux à la recherche opérationnelle appliquée à la lutte contre les sous-marins, puis pour son travail sur les programmes de formation des pilotes de B29.

<sup>26</sup> On estime ainsi que 50 % de l'effort de guerre américain sur les radars a lieu aux BL : R. Buder, *The Invention that Changed the World: How a Small Group of Radar Pioneers Won the Second World War and Launched a Technological Revolution*, New York, Simon & Schuster, 1996.

<sup>27</sup> C'est un petit retournement de l'histoire puisque les tubes ont remplacé les détecteurs à galène, c'est-à-dire des points de contact métal / semi-conducteurs, parce que les tubes fonctionnent de manière bien plus stable pour les fréquences radio !

<sup>28</sup> R. Ohl avait déjà identifié en 1939 que les matériaux comme l'oxyde de cuivre ne répondaient pas aux exigences des phénomènes à hautes fréquences.

du Si et du Ge deviennent des technologies cruciales, réclamant une expertise très nouvelle et en plein développement durant le conflit. Les travaux de Ohl ont été pionniers sur les cristaux de silicium dès 1939 aux BL. Différentes méthodes de dopage sont mises au point, notamment par Scaff et Theurer, et ces travaux conduisent à des découvertes intéressantes quoiqu'encore inexplicées. Durant la guerre, l'idée qu'il coexiste des zones « n » et « p » à l'intérieur du silicium se confirme : surtout ces zones dépendent du type d'impuretés introduites dans le matériau, comme l'avait imaginé Scaff. Se produisent ainsi des jonctions « n-p » à l'intérieur du silicium, maîtrisables si le type d'impuretés est calibré : d'où la course à la purification et à la maîtrise de ces impuretés (les SC sont en quelque sorte d'abord purifiés et nettoyés, pour être « salis » correctement par les impuretés). Toujours dans la lignée ouverte en 1939, Ohl travaille sur des diodes silicium pour le radar (des redresseurs en silicium utilisant les propriétés des jonctions « p-n ») ; Brattain et Becker fabriquent quant à eux des détecteurs à point de contact en silicium, toujours pour le radar.

La guerre a ainsi constitué un formidable accélérateur<sup>29</sup> dans la fabrication des SC : les matériaux les plus prometteurs sont identifiés, on sait en fabriquer avec des propriétés et des qualités différentes, les nouvelles questions de recherche et les principales inconnues à résoudre apparaissent de plus en plus clairement. L'expertise des BL est avant tout un savoir-faire, une base de connaissances qui s'étend avec de nombreuses inconnues et de nouvelles hypothèses concernant le rôle des impuretés. L'ensemble des acquis de la période constitue une base de connaissance  $K_1$

sur laquelle capitaliser. Mais, jusqu'en 1945, il n'existe pas de véritable nouveau concept ou *design*, alternatif à l'idée de décalquer la structure d'un tube dans du SC.

---

### 3. RETOUR AUX BELL LABS : LA CRÉATION D'UNE ÉQUIPE MULTIDISCIPLINAIRE SUR LES SC ET L'HYPOTHÈSE DES « ÉTATS DE SURFACE » (PHASE 3 – AVRIL 1945-NOVEMBRE 1947)

---

Forts de l'expertise croissante dans la chimie et la métallurgie des SC ( $K_1$  dans la figure 3), les travaux sur les amplificateurs à base de SC reprennent aux BL avant même la fin du conflit. En effet, dès le mois d'avril 1945, W. Shockley reprend les tests de dispositif amplificateur à base de SC, mais selon une conception et un principe nouveaux (pour la première fois depuis les années 1930) : l'effet de champ<sup>30</sup> (étiqueté  $C_1$ ). Néanmoins les tests de 1945, réalisés aux BL par W. Brattain, J. Hayes, W. Yages, R. Ohl et H. McSkimin, sont de nouveaux échecs. Le dispositif ne fonctionne pas et les calculs théoriques réalisés dans la foulée indiquent le fossé qui se creuse entre la théorie de la rectification de Mott-Schottky et la réalité des systèmes fabriqués désormais quotidiennement au laboratoire<sup>31</sup>. L'expertise en fabrication permet de concevoir de nouveaux dispositifs, de nouvelles formules et compositions en SC, avec un impact très direct en termes de connaissances : ici il s'agit

<sup>29</sup> Dans un article de 1945 le MIT estime que le conflit a multiplié par cinq la vitesse d'exploration du domaine des radars, au sein desquels les SC jouent un rôle très important. « *The press release dated 14 August 1945 states that during its five year existence, the Rad Lab "pushed research in this field ahead by at least 25 normal peacetime years."* » Source : <https://libraries.mit.edu/archives/mithistory/building20/history.html> (nous soulignons).

<sup>30</sup> L'idée est de générer un champ électrique intense à la surface du dispositif semi-conducteur pour créer un canal de conduction du courant électrique qui soit modulable en fonction de l'intensité de ce champ. Cela permettrait de faire varier la résistance électrique du matériau et laisse imaginer des propriétés d'amplification de courants électriques.

<sup>31</sup> Le 23 juin 1945 Shockley calcule que s'il n'y a pas d'effet observé, c'est ce que les changements doivent être au moins 1500 fois moindres que ceux calculés par la théorie de Mott-Schottky.

d'une forte remise en question des théories sur la rectification de Mott-Schottky, pourtant largement admises dans la communauté des physiciens. Ces théories étaient acceptables dans les matériaux comme l'oxyde de cuivre : la suite de l'histoire révèle que dans ce matériau les porteurs de charge « minoritaires » (mis de côté dans la théorie de Mott-Schottky) jouent un rôle secondaire, alors que dans le Si et le Ge purifiés, ils produisent justement les comportements les plus nouveaux et les plus inattendus. Les itérations entre invention de nouveaux dispositifs, fabrication, expérience et analyse théorique de ces dispositifs, génération de nouvelles connaissances et remise en question progressive, par petits pas, des théories pourtant acceptées avec leur lot de surprises ne cesseront pas jusqu'à l'invention du transistor qui constitue l'ultime grande surprise en théorie physique dans ce processus.

En juillet 1945, Mervin Kelly vient d'être nommé vice-président des BL. Fort lui aussi de son expérience durant la guerre, il entreprend une importante réorganisation du laboratoire. Impressionné, comme beaucoup d'autres<sup>32</sup>, par les avancées réalisées par les grands projets militaro-scientifiques du conflit, il décide la création aux BL d'une équipe multidisciplinaire dédiée à la recherche sur la physique des états solides. Kelly a pu observer, en particulier au Rad Lab, les effets spectaculaires d'une approche de la recherche mobilisant simultanément les différentes disciplines de la physique<sup>33</sup>, mais aussi des expérimentateurs, des ingénieurs, des métallurgistes, etc. L'équipe regroupe ainsi, sous la direction de W. Shockley, les expérimentateurs chevronnés W. Brattain et G. Pearson, R. Gibney (physico-chimiste),

H. Moore (électronicien) et deux techniciens, T. Griffith et P. Foy. Tous ces chercheurs sont installés dans des locaux adjacents afin de faciliter la communication et d'accélérer les expériences. Ainsi, dans une conférence donnée à Londres en 1950, M. Kelly passe un temps considérable à discuter la conception de l'organisation spatiale des locaux de Murray Hill afin de faciliter la communication interdisciplinaire (figure 2)<sup>34</sup>. Organisation des hommes, organisation de l'espace, tout est pensé pour faciliter l'apprentissage du champ des SC et le développement d'une expertise collective.

Le groupe reste toujours guidé par l'objectif pratique du développement d'amplificateurs à base de SC pour des applications téléphoniques, tout en étant conscient du caractère fondamental de la recherche nécessaire pour ces développements. Il exploite d'ailleurs immédiatement les avancées de la guerre en décidant de concentrer ses travaux sur le germanium et le silicium dont les radars ont démontré le potentiel, sans toutefois expliquer théoriquement leur fonctionnement : le gain en expertise de fabrication est converti en priorisation des recherches sur ces matériaux. Par ailleurs l'équipe continue à s'étoffer. Ainsi, en octobre 1945, J. Bardeen, qui a réalisé sa thèse sous la direction d'E. Wigner<sup>35</sup>, arrive aux BL. La première tâche que lui confie Shockley consiste à vérifier les calculs réalisés en avril de la même année pour tenter de comprendre l'échec de l'amplificateur à effet de champ. Bardeen confirme la justesse des calculs de Shockley et concentre ses recherches sur la compréhension de l'échec de l'expérience. Ceci l'amène, en mars 1946, à formuler une hypothèse : si le dispositif n'a pas fonctionné c'est à cause d'un effet de *surface state* (états

<sup>32</sup> Vannevar Bush, qui a piloté le National Research Defense Committee et l'ensemble de la recherche durant le conflit, rédige dans ce sens le célèbre rapport *Science, the Endless Frontier* en 1945.

<sup>33</sup> Sur ce point voir P. Galison, *Image and Logic: a Material Culture of Microphysics*, Chicago, University of Chicago Press, 1997, chap. 8 ; ainsi que S. Lenfle et J. Soderlund, « Large-Scale Innovative Projects as Temporary Trading Zones: Toward an Interlanguage Theory », *Organization Studies*, vol. 40, n° 11, 2019, p. 1713-1739.

<sup>34</sup> M. J. Kelly, « The Bell Telephone Laboratories », *art. cit.*

<sup>35</sup> Wigner pilote le deuxième centre important en physique quantique aux États-Unis après celui du MIT, à l'Université de Princeton. Il reçoit le prix Nobel de physique en 1963.

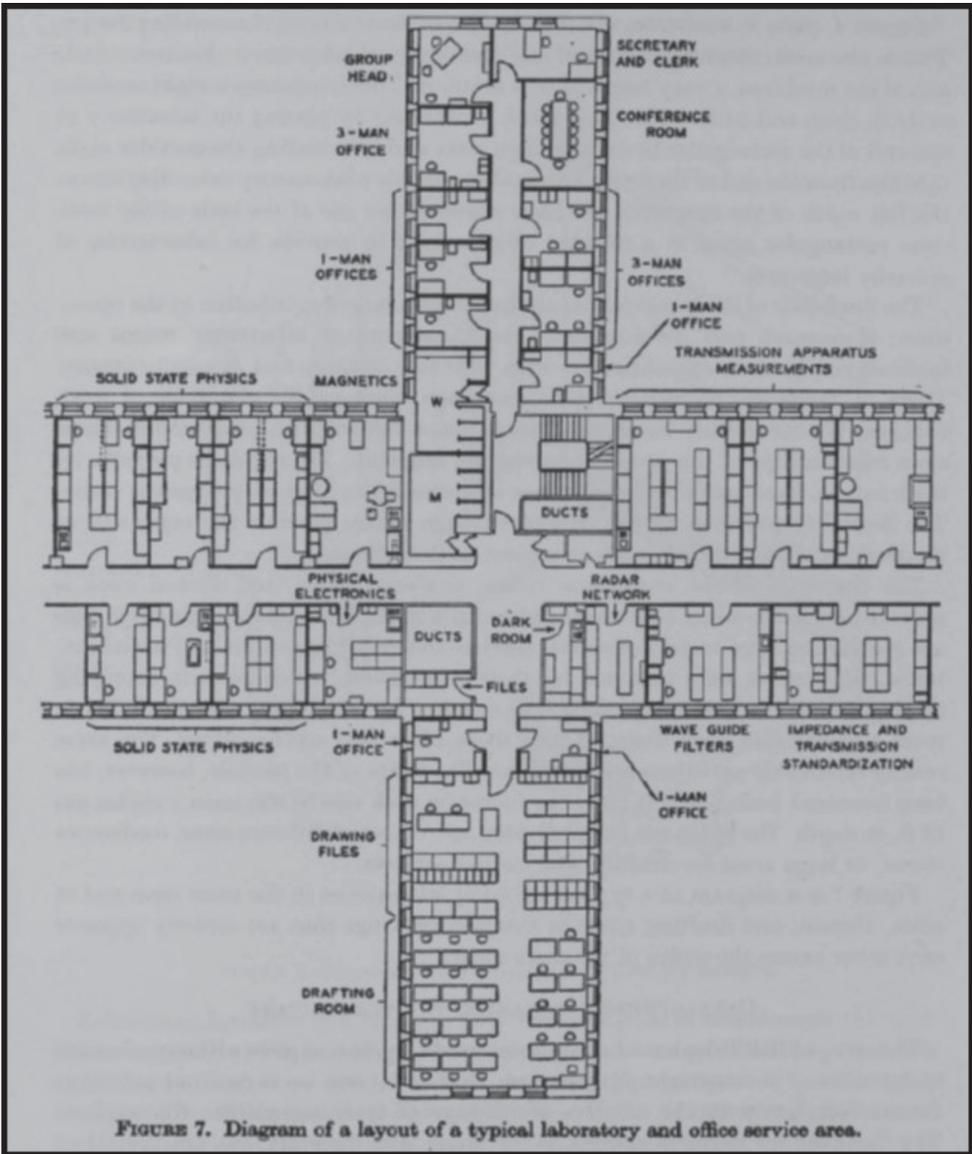


Figure 2 - L'organisation spatiale des Bell Labs<sup>36</sup>

de surface) qui piège les électrons à la surface du SC et bloque l'effet de champ (figure 3). Son hypothèse permet également de dépasser

les théories de Mott-Schottky, qui font toujours référence, à défaut de mieux, mais sont clairement insuffisantes<sup>37</sup>.

<sup>36</sup> M. J. Kelly, « The Bell Telephone Laboratories », *art. cit.*

<sup>37</sup> L'hypothèse des états de surface permet d'expliquer qu'il n'y a pas de potentiel électrostatique entre deux SC mis en contact à l'équilibre ; et que dans les contacts métal-semiconducteurs, les potentiels mesurés sont indépendants du

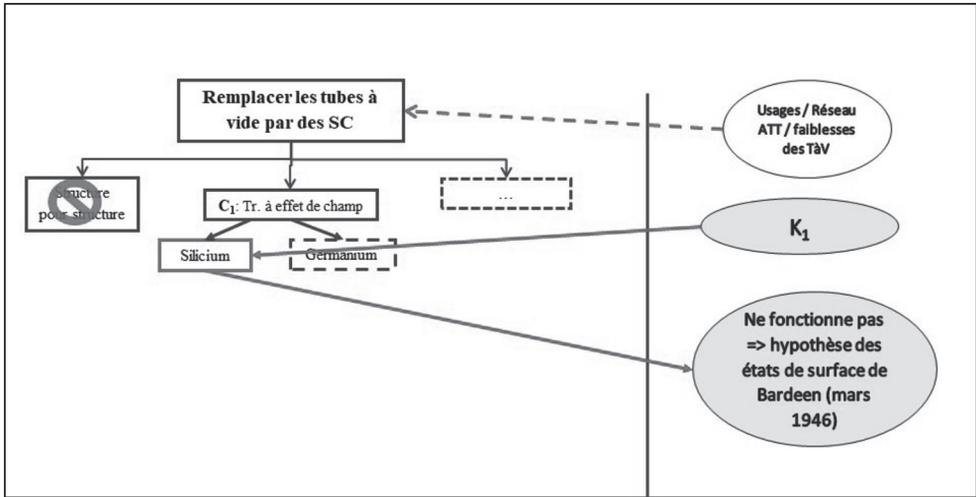


Figure 3 - Point de départ ( $K_1$  et  $C_1$ ) et hypothèse des états de surface

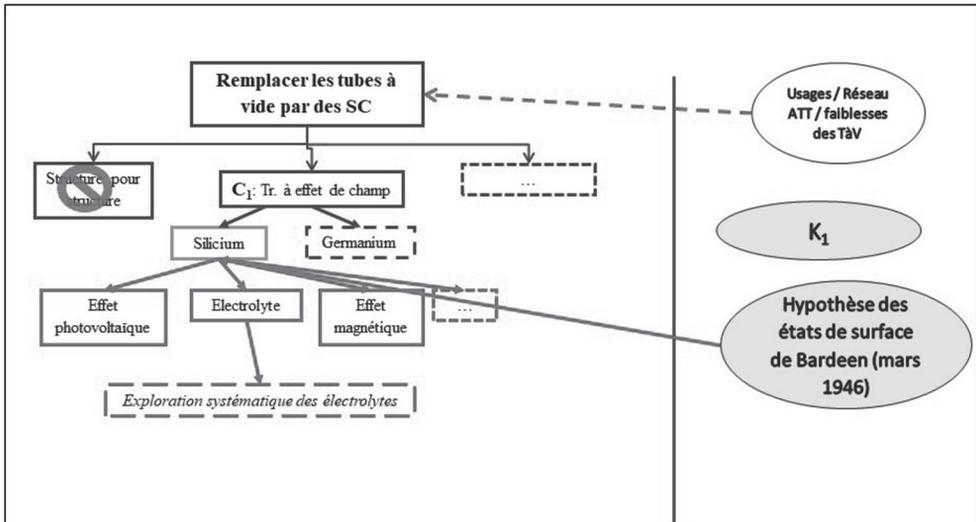


Figure 4 - Recherche systématique sur les états de surface

L'hypothèse est jugée suffisamment prometteuse pour que Shockley décide de demander au duo Bardeen-Brattain de se consacrer à un programme d'exploration systématique de cette hypothèse et des moyens de contourner ces états de surface (figure 4). Les moyens à

leur disposition au sein du groupe de physique des états solides sont alors mobilisés pour étudier différentes pistes : examiner le rôle des impuretés, améliorer le dopage du silicium avec du phosphore ou du bore (deux points qui soulignent l'importance fondamentale de

métal utilisé – tout ce qui était encore mystérieux dans le cadre de la seule théorie de Mott-Schottky.

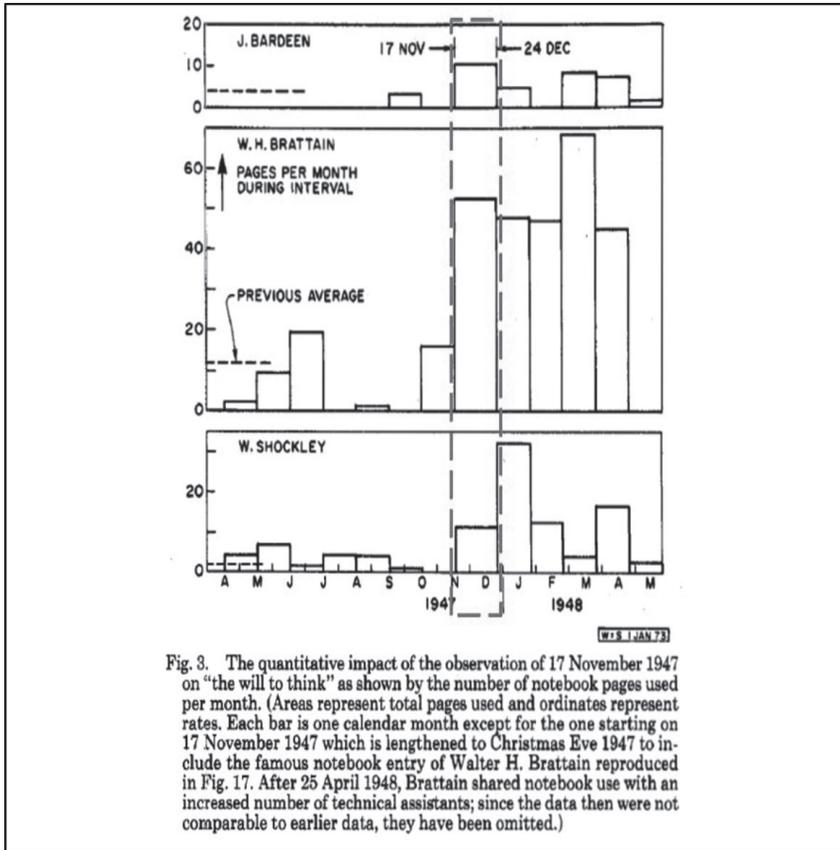


Fig. 3. The quantitative impact of the observation of 17 November 1947 on "the will to think" as shown by the number of notebook pages used per month. (Areas represent total pages used and ordinates represent rates. Each bar is one calendar month except for the one starting on 17 November 1947 which is lengthened to Christmas Eve 1947 to include the famous notebook entry of Walter H. Brattain reproduced in Fig. 17. After 25 April 1948, Brattain shared notebook use with an increased number of technical assistants; since the data then were not comparable to earlier data, they have been omitted.)

Figure 5 - Le « magic month »<sup>38</sup>

la métallurgie), analyser les relations entre la surface et le corps du matériau, mesurer les effets photovoltaïques, les effets du magnétisme, de la température, etc. La dextérité de W. Brattain comme expérimentateur et l'infrastructure dont il dispose jouent un rôle très important dans l'efficacité d'un processus d'exploration qui dure 18 mois. L'approche multidisciplinaire préconisée par Kelly montre ici son efficacité. Elle permet d'aboutir en novembre 1947, d'une part,

à la démonstration de l'existence des états de surface et, d'autre part, à l'identification d'un moyen pour annuler ces effets. En effet le 17 novembre Brattain et Gibney montrent qu'en plongeant le dispositif dans un électrolyte il est possible d'obtenir un effet de champ, et ils réouvrent par ce moyen la voie à un système d'amplification<sup>39</sup>. Ce premier résultat contribue à accélérer brusquement le programme de recherche sur les amplificateurs en SC.

<sup>38</sup> W. Shockley, « The Invention of the Transistor », *art. cit.*

<sup>39</sup> Les mesures de Brattain et Gibney se font par effet photovoltaïque : il faut appliquer de la lumière sur le dispositif pour évaluer tous les effets de surface, et la réduction des états de surface selon les électrolytes utilisés (eau, alcool, acétone...). Les états de surface ne se « voient » pas, ils se mesurent de manière indirecte. En tout cas, cette expérience montre qu'il est possible de générer des champs électriques forts à la surface des SC, de faire varier la résistance électrique du matériau et laisse imaginer des dispositifs amplificateurs.

#### 4. LE PREMIER « MAGIC MONTH » : L'INVENTION DU TRANSISTOR À POINT DE CONTACT (PHASE 4 - 17 NOVEMBRE 1947- 16 DÉCEMBRE 1947)

Pour Shockley (1974), l'expérience de Brattain et Gibney du 17 novembre 1947 marque le début du « *magic month* » qui va aboutir à l'invention du transistor à point de contact<sup>40</sup>. La temporalité change, l'accélération est spectaculaire : des années de préparation pour un sprint d'un « mois magique » (la formule est restée, mais il s'agit d'un peu plus d'un mois comme nous allons le voir) à la fin de l'année 1947. Les carnets de laboratoire montrent en effet une augmentation soudaine du nombre d'entrées à la suite de cette expérience (figure 5). Chaque entrée est relative à une nouvelle expérience ou un

nouveau résultat, témoignant du fait que la production de dispositifs ou d'idées connaît un brusque accroissement.

Bardeen et Brattain continuent sur leur lancée. Bardeen suggère notamment d'utiliser à nouveau la technique des points de contact (figure 6 - C<sub>2</sub>) pour essayer de dépasser les effets de surface : il conçoit une nouvelle configuration avec un contact métal / semi-conducteurs, une « couche d'inversion » très fine, et l'utilisation d'eau comme électrolyte (figure 7). Le point de contact est à la fois une suggestion pratique de Bardeen (pour explorer ce qui se passe à la surface) et en quelque sorte un retour aux anciens dispositifs de contact métal / semi-conducteurs étudiés depuis le XIX<sup>e</sup> siècle.

Ils parviennent ainsi, quatre jours plus tard (le 21 novembre 1947), à démontrer la possibilité d'une amplification du courant. Malgré l'aspect bricolé et hétérogène du dispositif, et même si l'amplification est beaucoup trop faible pour être d'une quelconque utilité, ils

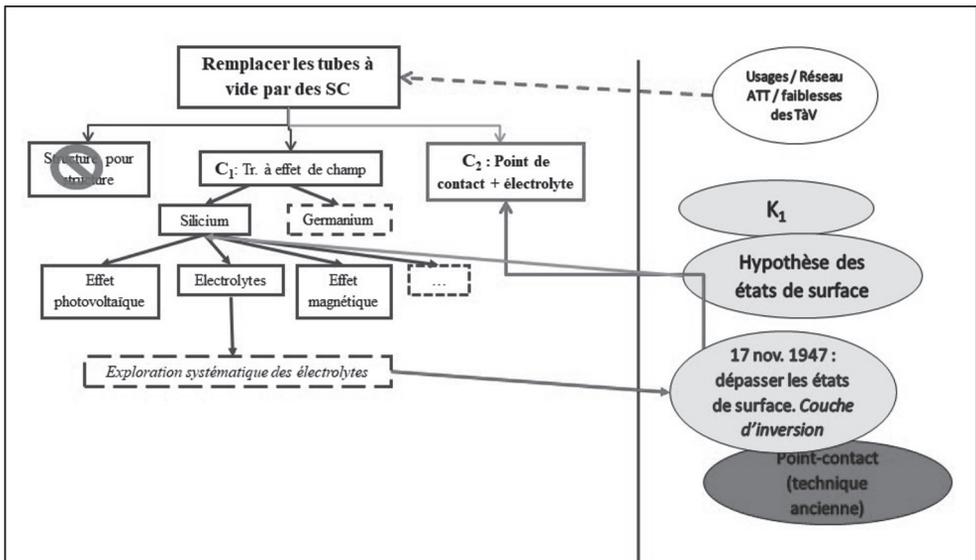


Figure 6 - La bascule vers les points de contact (C<sub>2</sub>)

<sup>40</sup> W. Shockley, « The Invention of the Transistor », art. cit.

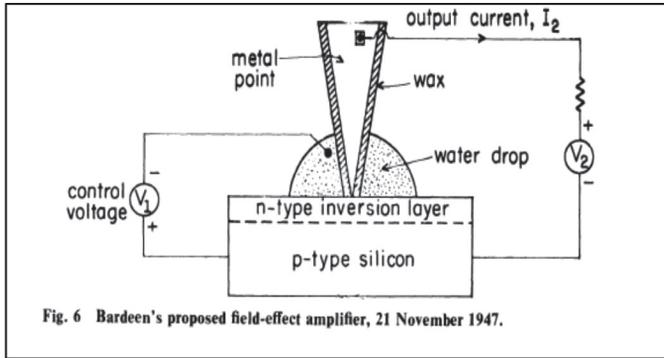


Fig. 6 Bardeen's proposed field-effect amplifier, 21 November 1947.

Figure 7 - Le dispositif à point de contact de J. Bardeen<sup>41</sup>

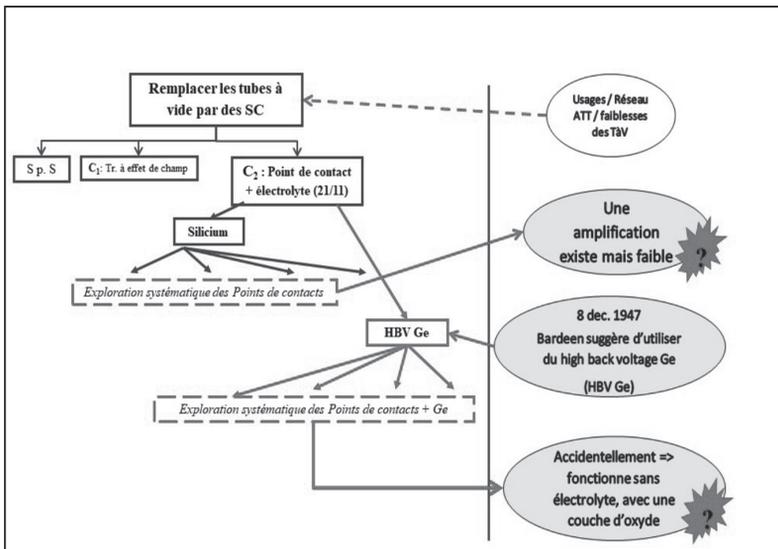


Figure 8 - L'exploration des points de contact

poursuivent l'exploration et déposent deux brevets sur différents aspects de leurs expériences<sup>42</sup> (figure 8).

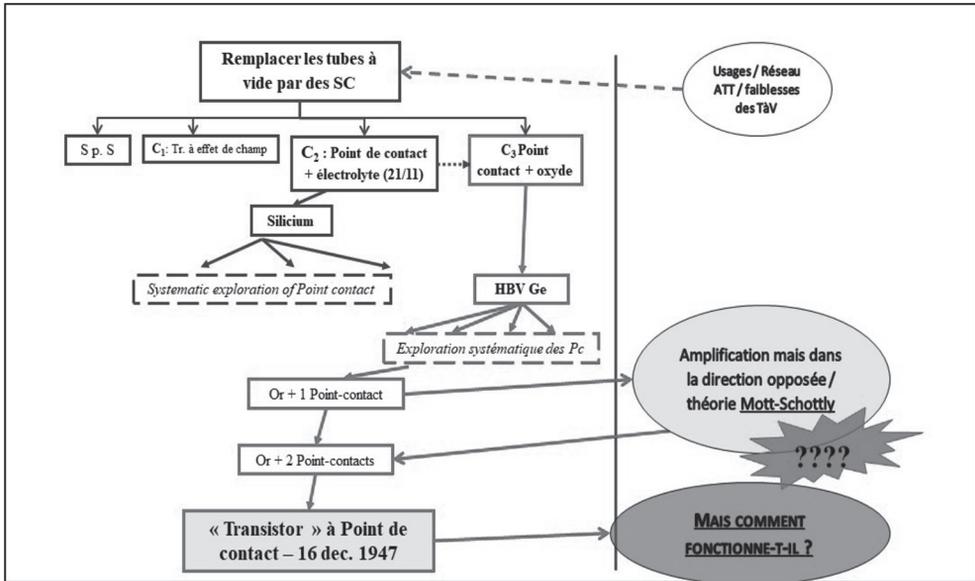
Arrive alors, le 8 décembre, une discussion cruciale lors du déjeuner entre Shockley,

Bardeen et Brattain<sup>43</sup>. Shockley suggère de tester dans l'électrolyte un dispositif à jonction « p-n » car il est convaincu de son potentiel. Bardeen et Brattain écartent l'idée mais, dans la conversation, Bardeen suggère

<sup>41</sup> L. Hoddeson, « The Discovery of the Point-Contact Transistor », *art. cit.*, p. 68.

<sup>42</sup> Les deux brevets ont un intitulé commun et générique (« *Three-electrode circuit element utilizing semiconductor materials* ») : US 2,524,033 (au nom de Bardeen pour la conception de son dispositif avec couche d'inversion) et US 2,524,034 (aux noms de Brattain et Gibney, pour le dispositif à électrolyte et effet de champ). Ils ont été déposés le 26 février 1948 (et validés en octobre 1950).

<sup>43</sup> W. Shockley, « The Invention of the Transistor », *art. cit.*, p. 48.

Figure 9 – De C<sub>3</sub> au « transistor à point de contact »

de changer de matériau et d'utiliser, à la place du silicium, le *high back voltage germanium* fabriqué pendant la guerre à l'Université Purdue : ce germanium a été créé pour obtenir des propriétés remarquables de rectification par contact avec un métal, il est particulièrement adapté au *design* imaginé par Bardeen. Les expériences se poursuivent donc avec du germanium et la technologie des points de contact (figure 8). Lors de l'une d'elles les chercheurs découvrent que les résultats sont identiques sans électrolyte : l'évaporation accidentelle de l'électrolyte, avec la formation d'une couche d'oxyde à la surface du germanium, ne modifie pas les propriétés du dispositif. Ils testent alors systématiquement un nouveau *design* (C<sub>3</sub>, voir figure 9), avec plusieurs matériaux et configurations de points de contact. Avec une électrode en or et un point de contact

unique, Bardeen et Brattain obtiennent enfin une amplification significative... mais dans la direction opposée aux prévisions calculées sur la base de la théorie de Mott-Schottky. Ils poursuivent ensuite leurs expériences, sans compréhension des phénomènes physiques – ce qui n'est pas limitant pour eux à ce moment-là – en utilisant cette fois deux points de contact qu'ils rapprochent le plus possible l'un de l'autre (c'est-à-dire un *design* légèrement différent du précédent). Finalement, le 16 décembre 1947, au terme de plusieurs essais et tâtonnements, ils obtiennent une amplification et un gain en voltage suffisants. Ce que l'on appellera un « transistor à point de contact »<sup>44</sup> est né (figure 10). En revanche le brouillard théorique s'est encore épaissi, puisqu'aucun élément ne permet d'expliquer le phénomène physique observé : c'est la raison pour

<sup>44</sup> En fait il faudra attendre mai 1948 pour que le dispositif soit appelé un transistor, nom choisi suite à un sondage organisé aux BL pour choisir entre différentes appellations (*semiconductor triode*, *surface state triode*, etc.). « Transistor » rappelle également les autres dispositifs semi-conducteurs connus et testés au même moment, comme le thermistor et le varistor. Le brevet, aux noms de Brattain et Bardeen, est déposé le 17 juin 1948 (US 2,524,035 – il porte toujours un nom générique : « *Three-electrode circuit element utilizing semiconductor materials* »).

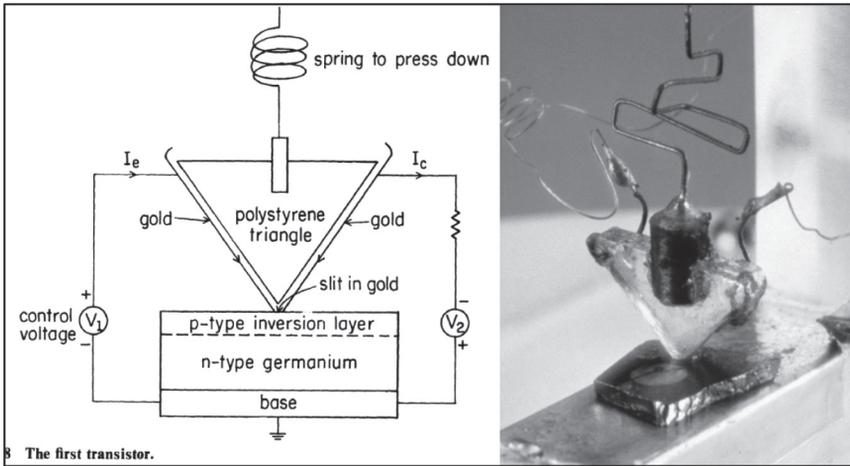


Figure 10 - Dispositif de transistor à point de contact

laquelle il s'agit fondamentalement d'une découverte en physique, laquelle est baptisée plus tard « effet transistor ».

S'ensuivent de nouveaux essais pour assurer la robustesse du dispositif expérimental avant une démonstration aux responsables des BL organisée le 23 décembre<sup>45</sup>. Un transistor à point de contact (TPC désormais) est monté dans un circuit qui génère des oscillations électriques, faisant la preuve que le dispositif amplifie le courant électrique (sans cette amplification le circuit s'arrêterait d'osciller). Mais personne ne sait expliquer pourquoi cela se produit. Il faut attendre juin 1948 pour que les BL organisent une conférence de presse afin de rendre public ce transistor. Durant cet événement, des transistors sont utilisés pour amplifier le son de la voix, sans les inconvénients des tubes à vide (qui doivent préchauffer avant de fonctionner), à la grande surprise des journalistes présents.

## 5. LE SECOND « *MAGIC MONTH* » : SHOCKLEY ET L'INVENTION DU TRANSISTOR À JONCTION (PHASE 5 - 31 DÉCEMBRE 1947 - FÉVRIER 1948)

Contrairement à l'idée, formulée par Shockley, d'un « *magic month* » unique qui aurait pour conclusion le transistor à point de contact, l'histoire ne s'arrête pas là. En premier lieu, ce premier transistor est un démonstrateur de recherche efficace, mais il s'avère rapidement très compliqué à industrialiser. Les BL mettent immédiatement en place une équipe dite de « développement exploratoire » sous la direction de J. Morton afin de mettre au point un produit industrialisable et commercialisable<sup>46</sup>. Deuxièmement,

<sup>45</sup> Les deux principaux responsables sont le physicien Harvey Fletcher (directeur du département de *Physical Research*) et le directeur de la recherche des BL, Ralph Brown. Parmi les autres membres dans la confidence se trouvent les collaborateurs proches : R. Gibney, H. R. Moore, J. Bardeen, G. Pearson, W. Shockley (M. Riordan et L. Hoddeson, *Crystal Fire, op. cit.*, p. 140).

<sup>46</sup> Précisons à nouveau qu'il n'y a aucune expérience industrielle préliminaire pour ce transistor : tout est à apprendre (et même à désapprendre en quelque sorte, par rapport aux modes d'industrialisation des tubes à vide, dont la produc-

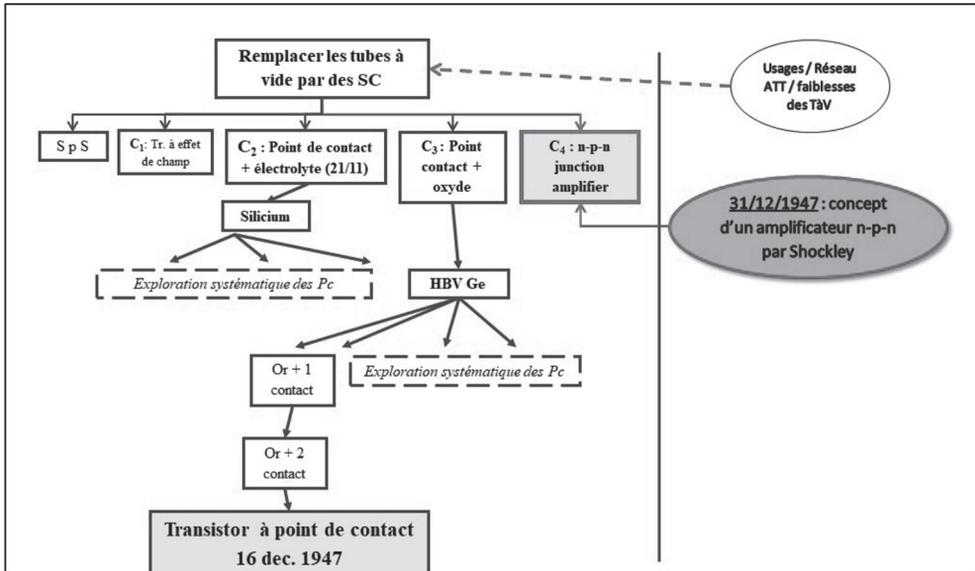


Figure 11 - C<sub>4</sub> et le cheminement vers un nouveau type de transistor

de son côté, W. Shockley vit mal le fait de ne pas être l'un des inventeurs du transistor à point de contact<sup>47</sup>. Comme il explique dans l'article de 1974 : « *Frankly, Bardeen's and Brattain's point-contact transistor provoked conflicting emotions in me. My elation with the group's success was balanced by not being one of the inventors* »<sup>48</sup>. Troisièmement, nous l'avons souligné, les problèmes théoriques soulevés par cette invention sont nombreux. D'une part, on ne sait pas encore expliquer le fonctionnement du TPC. L'hypothèse principale en décembre 1947 pour Bardeen et Shockley est celle d'une diffusion au sein de la couche « p » en raison des « trous »<sup>49</sup> libérés

dans la structure des SC. Mais il ne s'agit là que d'une hypothèse de l'équipe prise au dépourvu par la surprise et dont l'explication complète viendra dans les semaines à venir. D'autre part, Shockley reste convaincu que les solutions dites « à jonction », rejetées lors de la discussion du 8 décembre, représentent une voie d'avenir pour la conception des transistors.

Aussi, dès le TPC présenté à la direction des BL, Shockley prend le sujet à bras le corps. Il travaille seul, dans une chambre d'hôtel à Chicago, entre deux conférences fin décembre-début janvier 1948. Son travail est purement théorique mais il avance

tion est totalement différente). Morton met en place une ligne de production expérimentale autant pour produire que pour apprendre à produire les transistors.

<sup>47</sup> Shockley, quoique responsable du groupe de recherche, est en effet peu présent aux BL en décembre 1947 et sa contribution au transistor à point de contact reste assez limitée. Nous n'entrerons pas ici dans les détails de la relation rapidement conflictuelle entre Bardeen et Brattain d'une part et Shockley d'autre part, suite aux tentatives infructueuses de Shockley de s'attribuer l'invention du transistor à point de contact. Le lecteur intéressé se reportera à M. Riordan et L. Hoddeson, *Crystal Fire, op. cit.*, chap. 8. Contentons-nous de dire que ces tensions ont, fort logiquement, porté un coup fatal à la collaboration entre les trois hommes.

<sup>48</sup> W. Shockley, « The Invention of the Transistor », *art. cit.*, p. 54.

<sup>49</sup> Ces « trous » sont les porteurs de charge dans ce cas : ils assurent la conduction du courant et l'amplification par effet transistor.

très vite. Le 31 décembre 1947 il aboutit à la première version d'un dispositif qui reprend à la fois ses idées du 8 décembre (il avait déjà dessiné un sandwich à trois zones « n-p-n », persuadé de la pertinence de composer avec des jonctions « p-n »), les résultats obtenus avec le transistor à point de contact et une analogie avec le tube à vide qui le guide toujours. En reprenant le sandwich « n-p-n » (figure 11, C<sub>4</sub>), il imagine un dispositif entièrement en SC, sans point de contact métal / semi-conducteurs, ce qui aurait l'avantage d'être plus robuste et donnerait une prévisibilité théorique supérieure (en évitant le recours aux complexités des contacts métal / semi-conducteur et à la théorie de Mott-Schottky). Il envoie cette première version aux BL pour qu'elle soit intégrée à son *logbook* mais n'en parle ni à Bardeen ni à Brattain.

En janvier, toujours seul, il poursuit sa réflexion qui l'amène à reconsidérer le principe de fonctionnement du TPC (partant d'une interrogation sur l'importance de la couche d'inversion promue par Bardeen). Son intuition le porte à penser que l'amplification est le résultat d'une « injection » de porteurs de charges minoritaires<sup>50</sup> via les points de contact : l'effet transistor ne se limiterait pas à la couche d'inversion à la surface du TPC mais se déploierait dans tout le corps solide du SC. Cette intuition est fondamentale et l'amène à revoir ses travaux du 31 décembre. Le 23 janvier 1948, il propose une conception de transistor radicalement nouvelle dans laquelle l'amplification est due à l'injection de porteurs de charges minoritaires (des trous) dans un sandwich de trois couches « n-p-n ».

Il inscrit ses résultats dans son carnet de travail mais ne les révèle pas au reste du groupe<sup>51</sup>.

C'est alors qu'intervient l'expérience cruciale de J. N. Shive du 23 février 1948 (figure 12). En effet, parallèlement aux travaux solitaires de Shockley, le programme de recherche sur le TPC, et plus particulièrement sur la compréhension théorique de son fonctionnement, s'est poursuivi aux BL. Différentes expériences sont ainsi conduites avec plusieurs configurations de TPC, dont celles de Shive qui teste un TPC dans lequel les points de contact, au lieu d'être placés l'un à côté de l'autre comme dans le dispositif de décembre 1947, sont placés de part et d'autre du corps en SC. Le résultat est une nouvelle surprise car l'expérience de Shive montre encore un effet d'amplification (c'est en quelque sorte un nouveau dispositif transistor). La conséquence théorique est très directe : l'amplification n'est pas conditionnée par la couche d'inversion, hypothèse partagée dans le groupe jusque-là, car les porteurs de charge minoritaires traversent tout le corps du matériau.

Lorsque Shive présente son expérience au groupe le 23 février 1947, Shockley, Bardeen et Brattain sont présents. Les résultats de Shive sont pour le moins surprenants mais surtout ils corroborent les intuitions de Shockley qui, n'y tenant plus et redoutant probablement que Bardeen ne comprenne rapidement l'origine du phénomène, présente immédiatement au groupe ses résultats théoriques obtenus en janvier-février. Stupéfaits par la qualité de la présentation de Shockley, Bardeen et Brattain comprennent qu'il n'a pas pu arriver à de telles conclusions sans un important travail

<sup>50</sup> Dans un SC de type « n », les porteurs de charge majoritaires sont les électrons, les minoritaires sont les « trous » (un déficit d'électron). C'est l'inverse pour le type « p ». L'effet transistor est lié à cette injection (création massive) de porteurs minoritaires dans le SC, qui modifie les propriétés de conduction du dispositif et permet l'amplification. La théorie de Mott-Schottky insistait avant tout sur le rôle des porteurs de charges majoritaires, comme l'essentiel de la physique des SC jusqu'à la découverte de l'effet transistor et sa théorisation complète par Shockley.

<sup>51</sup> Les causes du comportement secret de Shockley sur son travail de décembre 1947-janvier 1948 font l'objet de débats entre historiens. Peut-être était-il encore trop peu sûr de sa théorie, peut-être voulait-il absolument conserver la primauté de cette invention dont (d'après M. Riordan et L. Hoddeson) J. Bardeen n'était pas très éloigné. Cf. M. Riordan et L. Hoddeson, « Minority Carriers and the First Two Transistors », *art. cit.*

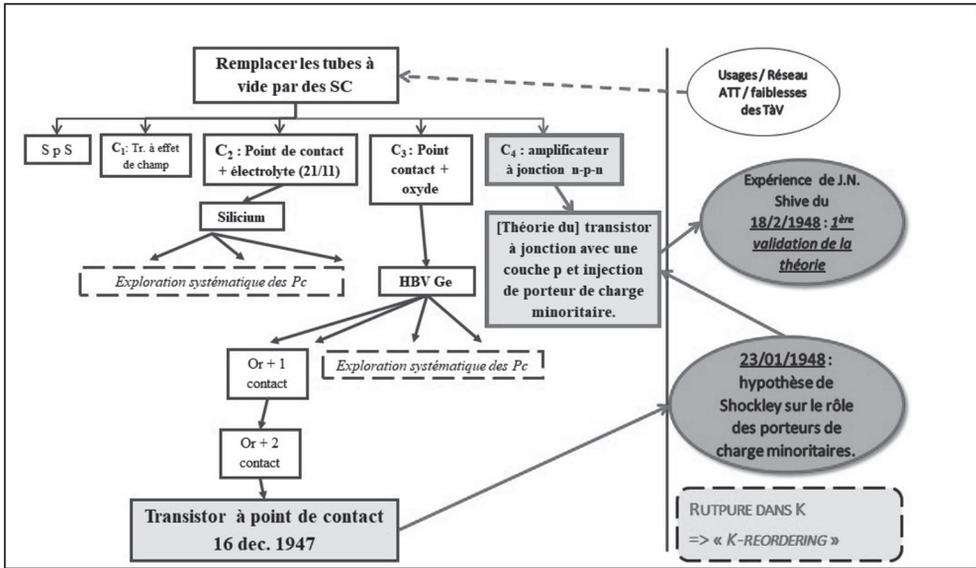


Figure 12 - L'invention du transistor à jonction

en amont, ce qui achève de les convaincre de son caractère foncièrement non-coopératif<sup>52</sup>.

Du côté de Shockley cependant, les résultats sont purement théoriques. Il a obtenu la réponse théorique la plus aboutie sur l'effet transistor avec le mécanisme d'injection de porteurs minoritaires. Mais les sandwiches « n-p-n » qu'il a conçus en théorie sont impossibles à fabriquer dans l'état de l'expertise et des connaissances métallurgiques de 1948, même dans le laboratoire le plus perfectionné du monde. Deux années de travail sont encore nécessaires, ainsi que des innovations dans les procédés métallurgiques : Gordon Teal et John Little inventent un procédé de production de monocristaux<sup>53</sup> de germanium

(1950) par tirage et améliorent les procédés de purification et de dopage. Morgan Sparks et Teal aboutissent ainsi, en avril 1950, à la production d'un premier transistor à jonction tel que Shockley l'avait imaginé en 1948 (le brevet du dispositif de Shockley est déposé en juin 1948<sup>54</sup>). Il est rendu public à l'été 1951. Enfin, en novembre 1950, W. Shockley publie *Electron and Holes in Semiconductors with Application to Transistor Electronics*, dans lequel il expose sa théorie des transistors et du rôle des porteurs de charges majoritaires / minoritaires dans la physique des SC. Cela devient immédiatement le texte de référence pour les scientifiques et les ingénieurs travaillant dans le domaine émergent des SC.

<sup>52</sup> Bardeen quitte les BL en 1951 pour rejoindre l'Université de l'Illinois où ses travaux sur la supraconductivité lui vaudront un second prix Nobel de physique en 1972 (avec Cooper et Schrieffer), Brattain reste quant à lui aux BL mais refuse de travailler à nouveau avec Shockley. La suite de l'histoire des transistors s'écrit donc sans eux et leur contribution principale reste l'invention du TPC.

<sup>53</sup> Le passage des polycristaux (un cristal constitué de petits cristaux de différentes tailles et orientations) aux monocristaux (un cristal unique, une structure « parfaite ») est une étape supplémentaire, techniquement difficile (d'où les deux ans de développement) mais cruciale : les porteurs de charge ont en effet une durée de vie beaucoup plus importante (20 à 100 fois) dans les monocristaux, les effets semi-conducteurs sont bien plus importants. Teal quitte les BL en 1953 pour aller développer les monocristaux et transistors en silicium chez Texas Instruments (réalisés en avril 1954).

<sup>54</sup> US 2,569,347 – « Circuit element utilizing semiconductive material » au nom de W. Shockley, déposé le 26 juin 1948.

## 6. ÉPILOGUE : DU TRANSISTOR À LA SILICON VALLEY

La suite de l'histoire mérite d'être brièvement rappelée pour donner une perspective de plus long terme sur la dynamique de l'expertise en train de se développer. Le TPC, dont les BL ont lancé le développement en premier, s'avère être un cauchemar industriel. Excessivement complexe à fabriquer, fragile et instable, il ne connaît que des applications limitées. Le sort du transistor à jonction sera très différent. En effet, bloqué dans sa progression de carrière aux BL par son caractère difficile, Shockley décide de quitter le laboratoire en 1955 et de créer sa propre entreprise à Palo Alto en Californie, le Shockley Semiconductor Laboratory<sup>55</sup>. Il recrute une équipe de jeunes physiciens extrêmement brillants<sup>56</sup> afin de développer des composants électroniques en silicium : Shockley est obnubilé par une diode de son invention, un sandwich à quatre couches (« p-n-p-n »), qu'il veut absolument développer. Très rapidement le caractère de plus en plus pathologique de Shockley<sup>57</sup> génère de fortes tensions dans l'équipe et des dissensions importantes sur la stratégie, une partie souhaitant, contre l'avis de Shockley,

développer les transistors en silicium, plus simples que sa diode. En 1957, le cœur de son équipe, connu ensuite dans la mythologie de la Valley comme les « huit traîtres », décide de partir pour fonder Fairchild Semiconductor qui devient rapidement un acteur majeur de cette industrie naissante<sup>58</sup>. Là où l'histoire devient très intéressante, c'est que, comme souvent dans le cas des innovations de rupture, les applications du transistor diffèrent considérablement de ce qui était prévu au départ : un usage avait été prédéfini (substitut du tube à vide) qui a permis de générer des connaissances et des théories nouvelles, aboutissant ensuite à une ouverture considérable des usages potentiels du transistor. Mais le transistor ne remplace pas les tubes à vide au sein des réseaux téléphoniques d'AT&T avant la fin des années 1950<sup>59</sup>. Des applications grand public sont en revanche mises au point dans les récepteurs radio portables aux États-Unis et au Japon (c'est ce qui permettra le décollage de Sony) et dans les appareils auditifs, pour lesquels la miniaturisation est fondamentale. Mais ce sont surtout, une fois encore serions-nous tentés de dire, les applications militaires (en particulier le programme de missile balistique Minuteman (1958-1962) dont le système de guidage informatique utilise, pour la première fois, des transistors<sup>60</sup>) qui tirent la croissance de cette industrie, avant que

<sup>55</sup> Il est aidé financièrement par la firme Beckman Instruments, un fabricant d'instruments scientifiques qui entrevoit les potentialités commerciales des SC. Shockley, rappelons-le, est sorti de CalTech et il a eu Arnold Beckman comme professeur. Ce dernier a obtenu son PhD à CalTech en 1928 et devient très rapidement professeur à CalTech ; il fonde la firme qui porte son nom en 1939. Shockley choisit la Californie également pour se rapprocher de sa mère, qui réside à Palo Alto.

<sup>56</sup> On y trouve notamment Gordon Moore et Robert Noyce qui fonderont Intel en 1968 après avoir à leur tour quitté Fairchild. Shockley a imaginé débaucher des personnels des BL, sans succès visiblement (les BL se trouvant sur la côte Est, à plus de 4000 km de là). Sur cet épisode voir L. Berlin, *The Man Behind the Microchip*, op. cit.

<sup>57</sup> Sur la dérive paranoïaque de Shockley et sa promotion de l'eugénisme voir J. Shurkin, *Broken Genius: The Rise and Fall of William Shockley, Creator of the Electronic Age*, Londres, Macmillan, 2006.

<sup>58</sup> Sur cette histoire, voir C. Lécuyer, *Making Silicon Valley*, op. cit., ainsi que L. Berlin, *The Man Behind the Microchip*, op. cit. ou encore D. Holbrook, W. Cohen, D. Hounshell et S. Klepper, « The Nature, Sources and Consequences of Firm Differences in the Early History of the Semiconductor Industry », *Strategic Management Journal*, vol. 21, n°10-11, 2000, p. 1017-1041.

<sup>59</sup> Et plus tard encore, vers la fin des années 1960, dans des applications extrêmement exigeantes en termes de fiabilité comme les câbles transatlantiques (J. A. Morton, *Organizing for Innovation. A Systems Approach to Technical Management*, New York, McGraw-Hill, 1971). J. Morton était vice-président en charge des composants électronique aux BL de 1958 à sa mort en 1971.

<sup>60</sup> Cf. C. Lécuyer, « Manager l'innovation », in C. Bonneuil et D. Pestre (dir.), *Histoire des sciences et des savoirs*, t. 3 : *Le siècle des technosciences*, Paris, Le Seuil, 2015, p. 422-439. Ainsi que D. MacKenzie, *Inventing Accuracy*.

les ordinateurs ne prennent le relais. Shockley avait ainsi raison de voir dans l'invention du transistor « *the birth of the information age* » et est effectivement « *the man who brought silicon to the Silicon Valley* »<sup>61</sup>.

## CONCLUSIONS : COMMENT ÉMERGE UNE EXPERTISE SUR L'INCONNU ?

À travers la succession de ces phases, il apparaît que le processus d'élaboration d'une expertise sur un domaine initialement inconnu est très riche d'enseignements. Reprenons-en, de manière synthétique, quelques traits saillants.

### 1. Les temporalités d'une « recherche conceptive »

Le premier élément important concerne la durée du processus. Commencée au milieu des années 1930, la quête d'un amplificateur en SC aboutira douze ans plus tard. Dans ce processus, l'accélération que constitue le « *magic month* », préparée par la stratégie mise en place dès le milieu des années 1930, est très frappante. La culture patiemment construite de la physique des états solides permet, après le conflit mondial, une reprise rapide de l'exploration qui s'appuie à la fois sur les avancées en physique des SC et sur les nouveaux modes d'organisation issus de la guerre. C'est la combinaison de ces deux facteurs qui permet une exploration extrêmement riche et rapide (novembre

1947-février 1948). Le recours à la théorie C/K fait ainsi apparaître un processus de conception extrêmement original et met en évidence toute la dimension « conceptive » de la recherche en jeu, au sens de Pascal Le Masson et Benoît Weil<sup>62</sup>. En effet, à la différence de ce que l'on observe fréquemment<sup>63</sup>, l'enjeu ici n'est pas de trouver les applications possibles de résultats obtenus par la recherche. La question des applications est en quelque sorte résolue au départ, l'enjeu étant de remplacer les tubes à vide dont les usages sont connus<sup>64</sup>. Le processus de conception porte donc sur la conception d'une théorie pour expliquer des phénomènes inconnus, ici le comportement des SC. Il ne s'agit donc pas d'asservir la recherche aux exigences du *business*, thème central dans la littérature sur le management de la recherche<sup>65</sup>, mais de concevoir un corpus théorique qui ouvre ensuite un grand nombre d'applications : l'horizon temporel d'une telle construction est d'emblée le long terme. L'accélération de la temporalité du projet en 1947 en est directement le fruit.

### 2. La vision stratégique de la recherche aux Bell Labs

Ceci pointe la seconde leçon fondamentale, à nos yeux, de cette histoire : l'importance de la vision stratégique et du soutien de l'organisation pour mobiliser des ressources significatives sur une si longue période. Il faut ici souligner le rôle moteur de Mervin Kelly qui fut à la fois à l'origine du processus, son organisateur et son soutien indéfectible sur l'ensemble de la période. D'abord directeur de la recherche des BL (1936-1944) avant d'en devenir vice-président exécutif (1944-1951)

*A Historical Sociology of Nuclear Missile Guidance*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1990.

<sup>61</sup> D. Levy, « William Shockley: Still Controversial, After All These Years », *Stanford News Service*, October 22, 2002.

<sup>62</sup> P. Le Masson et B. Weil, « Fayol, Guillaume, Chevenard - La science, l'industrie et l'exploration de l'inconnu : logique et gouvernance d'une recherche conceptive », *Entreprises et Histoire*, n° 83, juin 2016, p. 79-107.

<sup>63</sup> Voir par exemple le cas célèbre du nylon dans P. Le Masson, B. Weil et A. Hatchuel, *Les processus d'innovation*, Paris, Hermès, 2006.

<sup>64</sup> Le fait que les usages réels du transistor soient différents de ceux initialement prévus ne change pas le fait que la question des applications soit résolue dès le départ.

<sup>65</sup> P. Le Masson et B. Weil, « Fayol, Guillaume, Chevenard », *art. cit.*

puis président<sup>66</sup>, M. Kelly a joué plusieurs rôles fondamentaux :

- Il est celui qui a très tôt perçu les limites des tubes à vide (il était au cœur même du processus de production de ces tubes) et qui a identifié les SC comme un domaine à explorer pour dépasser ces limites.
- Il a recruté les chercheurs nécessaires pour explorer ce champ émergent, en particulier W. Shockley en 1936, et leur a donné les moyens de le faire (moyens humains, financiers, matériels...).
- Il a ensuite su mettre très rapidement à profit son expérience du projet de radar pour changer l'organisation des BL en mettant en place, dès 1945, un groupe de recherche pluridisciplinaire sur la question sous la direction de Shockley avec le succès que nous avons décrit.

Ceci souligne le rôle du pilotage stratégique de la recherche qui, dans ce cas, est tout sauf isolée du reste de l'organisation<sup>67</sup> et est capable de définir ses priorités, en lien avec la stratégie de l'entreprise, pour doter l'entreprise de connaissances et de savoir-faire suffisamment génériques afin d'aborder une grande variété de questions et de problèmes. Sans ce soutien constant, il y a fort à parier que le processus n'aurait pu se déployer.

L'originalité des BL est ici de pousser explicitement les chercheurs à ce travail théorique fondamental de longue haleine. Notons à cet égard que, comme l'explique Shockley en ouverture de son discours Nobel<sup>68</sup>,

<sup>66</sup> Pour une biographie de M. J. Kelly voir : <http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/kelly-mervin.pdf>.

<sup>67</sup> S. Lenfle, « 'Out of the Dusty Labs' Really? Bell Labs, the Transistor and the Myth of Isolated Research », R&D Management Conference, École Polytechnique, Paris, 2019.

<sup>68</sup> Dans son discours Nobel du 11 décembre 1956 « Transistor Technology Evokes New Physics », *op. cit.*. Shockley déclare : « *The objective of producing useful devices has strongly influenced the choice of the research projects with which I have been associated. It is frequently said that having a more-or-less specific practical goal in mind will degrade the quality of research. I do not believe that this is necessarily the case and to make my point in this lecture I have chosen my examples of the new physics of semiconductors from research projects which were very definitely motivated by practical considerations.* »

<sup>69</sup> Sur ce point voir Q. Plantec, P. Le Masson et B. Weil, « Inventions and Scientific Discoveries: Impact of Designers' Collaborations on Creativity. An Analysis towards Fixation Effects », in *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Conference on Engineering Design (ICED19)*, Delft, 2019.

<sup>70</sup> B. Cabanes, *Modéliser l'émergence de l'expertise et sa gouvernance dans les entreprises innovantes*, *op. cit.*

et contrairement à une idée souvent avancée, ceci ne se fait pas au détriment de la pertinence pratique du travail. Tout le processus, au contraire, est guidé par des considérations pratiques dont les chercheurs, fussent-ils de grands théoriciens, sont parfaitement conscients. On voit même comment les considérations industrielles amènent les chercheurs à réinterroger la science, qu'il s'agisse des propriétés des SC, sujet délaissé au profit de théories générales sur des métaux idéaux, ou de la théorie de Mott-Schottky, remise en cause lors de la découverte du TPC. Il y a là un mode de relation tout à fait original entre science et invention<sup>69</sup>.

### 3. Création d'expertise et processus de conception

Finalement, le suivi détaillé de l'invention du transistor illustre à quel point la création de l'expertise nécessaire a été indissociable du processus de conception innovante à l'œuvre. Le fait que l'année 1947 se termine simultanément par une invention et par une découverte met en lumière l'entrelacement permanent des deux processus. Le processus de conception innovante est indissociable de, et indispensable à, la construction de l'expertise du groupe des BL.

B. Cabanes distingue en outre deux types de processus de conception : un dont l'identité des objets à concevoir est « orienté produit », l'autre étant « orienté expertise »<sup>70</sup>. Il est bien difficile de les dissocier dans le cas

du transistor. La simultanéité de l'invention d'un produit fabriqué grâce aux savoir-faire accumulés (une partie de l'expertise) et de la découverte de l'effet transistor avec son élaboration théorique résultant de l'accumulation de savoirs et de résultats empiriques (partie complémentaire de la même expertise) témoigne de cette indissociabilité.

En suivant B. Cabanes *et alii*<sup>71</sup>, il nous faut souligner à nouveau que ce sont plusieurs domaines d'expertise complémentaires et indépendants qui sont à l'œuvre aux BL : métallurgie, physico-chimie des solides, électronique, théorie quantique. Ces domaines d'expertise interagissent, se rencontrent et convergent pour créer un ensemble capable de générer de nouvelles opportunités. Ce type de régime de création d'expertise est au-delà des régimes de « cumulativité » et de « combinabilité » d'expertise distingués par B. Cabanes *et alii*<sup>72</sup>, qui relèvent de processus classiques dans des laboratoires industriels et dans la conduite de projets de recherche à l'ère contemporaine. À ce titre, les auteurs pointent une similitude entre le régime de création d'expertise d'une société de la microélectronique aujourd'hui – STMicroelectronics – et le cas des BL des années 1940. Ce régime commun de création d'expertise est basé sur une « générativité » des domaines d'expertise : la création résulte d'un « processus génératif qui s'appuie sur des domaines d'expertise existants et la formalisation de nouveaux concepts de proto-expertise désirables. Les concepts de proto-expertise sont ensuite le point de départ d'un processus d'exploration et de conception innovante pour la création d'un nouvel espace d'expertise encore incomplet et non stabilisé »<sup>73</sup>. La proto-expertise, comme domaine d'expertise en émergence, nous paraît particulièrement adaptée pour qualifier la stratégie mise en place par M. Kelly et le processus tel qu'il se développe avant 1947 aux BL. La forte générativité de cette proto-expertise multidisciplinaire est

rendue évidente par la succession d'inventions de transistors.

Dans la mise en place de cette proto-expertise on peut distinguer plusieurs éléments décisifs : le choix de la création d'un groupe multidisciplinaire sur les SC ; et le recrutement de J. Bardeen, qui avance l'hypothèse des états de surface qui contribue notamment à stabiliser les travaux du groupe. Le choix de privilégier le germanium et le silicium constitue la seconde restriction rendant l'espace K « explorable ». Les surprises se multiplient encore jusqu'à l'invention du TPC. Enfin, l'hypothèse de Shockley sur l'injection de porteurs de charge minoritaires constitue probablement le saut théorique fondamental qui vient achever la constitution d'un véritable domaine d'expertise aux BL.

La proto-expertise est fortement générative grâce à l'organisation des BL qui permet à la fois la poursuite des travaux théoriques sur les deux types de transistor et le basculement dans le développement et l'industrialisation. À partir de 1948, et surtout 1950, la « réduction en art », via l'ouvrage publié par Shockley, rend le domaine accessible à des ingénieurs ne maîtrisant pas la physique quantique. Cet effort de réduction et de diffusion des connaissances est également flagrant dans les séminaires que les BL organisent pour les entreprises ayant acquis les licences pour fabriquer elles-mêmes des transistors en septembre 1951 et avril 1952. Cette expertise en train de se diffuser s'avère extraordinairement génératrice puisque l'ouvrage de Shockley et les connaissances ainsi disséminées (en partie par Shockley lui-même lors de la création de son entreprise où il formera, de fait, les « huit traîtres » qui fondent Fairchild Semiconductor en 1957) constitueront la base de l'expansion de la Silicon Valley.

Finalement, à partir d'une situation d'usages « connus » (et prédéfinis) avec des

<sup>71</sup> B. Cabanes *et alii*, « Les régimes de création d'expertise », *art. cit.*

<sup>72</sup> *Ibid.*

<sup>73</sup> *Ibid.*

inconnues théoriques majeures en 1930, les BL organisent la création d'une proto-expertise génératrice autant d'inventions (espace C), de dispositifs concrets que de nouvelles connaissances (espace K), aboutissant à un grand renversement dans l'ordre du connu : les théories fondamentales sont stabilisées, rapidement et largement partagées, alors que l'espace des usages se redessine complètement.

## ANNEXE : UNE BRÈVE INTRODUCTION À LA THÉORIE C/K

La théorie C/K représente le raisonnement de conception comme l'interaction entre deux espaces : celui des concepts (C) et celui des connaissances (K). Le processus de conception débute par un concept initial « indécidable » en l'état actuel des connaissances, i.e. une proposition qui n'est ni vraie ni fausse. Le

concept de « bateau qui vole », par exemple, ne peut pas être initialement considéré comme faisable ou pas, ou encore comme ayant un intérêt pratique.

Le processus de conception consiste alors à affiner (ou à « élargir ») ce concept en lui ajoutant des attributs venant de l'espace K (un bateau qui vole peut avoir des moteurs, des ailes, des foils, etc.). Le processus peut aussi donner lieu à la production de nouvelles connaissances utilisables dans les processus de conception – par exemple comme résultat d'une expérience sur les foils. Le concept initial est ainsi partitionné en plusieurs sous-concepts.

Le processus se poursuit jusqu'à ce qu'un concept soit suffisamment spécifié pour être considéré comme vrai par les concepteurs. À ce stade, le concept devient une connaissance (d'où la notion de « conjonction CK »). La structure générique du raisonnement de conception est présentée dans la figure 13<sup>74</sup>.

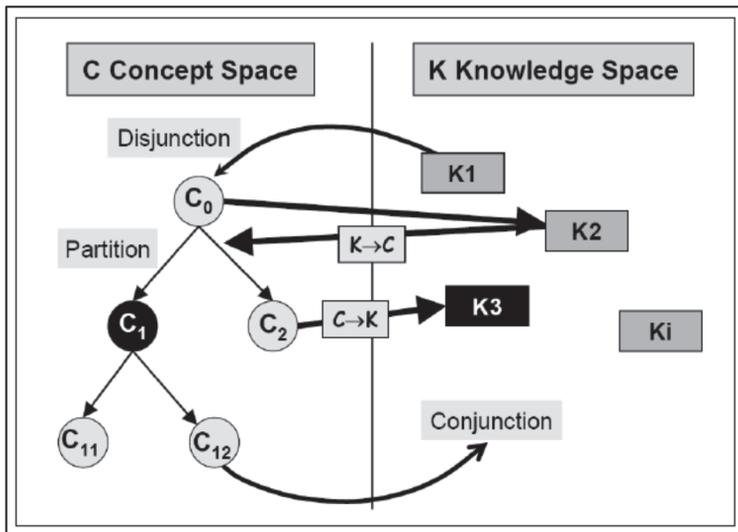


Figure 13: structure générique du raisonnement de conception dans la théorie C/K

<sup>74</sup> Pour une présentation complète de la théorie, de ses origines et de ses applications, cf. A. Hatchuel et B. Weil, « C-K Design Theory: an Advanced Formulation », *art. cit.*, et M. Agogué, S. Hooge, F. Arnoux et I. Brown, *Introduction à la conception innovante. Éléments théoriques et pratiques de la théorie C-K*, Paris, Presses des Mines, 2013.