

Paris le 30 septembre 2004

JOURNÉE JEAN-PIERRE NOBLANC

AVANT-PROPOS

Le colloque auquel vous avez bien voulu participer aujourd'hui résulte de l'initiative prise par quelques amis de Jean-Pierre Noblanc.

A l'automne dernier, Jean Jerphagnon et moi avons pensé que consacrer une journée d'études au développement des technologies des semiconducteurs en France serait une manière adéquate de rendre hommage à Jean-Pierre Noblanc et à son remarquable parcours professionnel. Nous y avons été encouragés par ses nombreux amis et par la volonté très claire de FRANCE-TELECOM et de ST MICROELECTRONICS d'en être les organisateurs. L'Académie des technologies nous a rapidement accordé son parrainage.

Certains penseront qu'un sujet aussi considérable ne peut-être traité en une seule journée, si dense soit-elle. Ils ont raison. Aussi bien l'idée n'est pas de couvrir ce champ immense mais, plus modestement, d'y inscrire quelques repères qui, en reliant le passé au présent, peuvent faire sens à l'époque changeante et dangereuse que nous vivons.

Nous avons, avec un comité scientifique ad hoc, choisi de solliciter quelques uns des acteurs les plus importants et des observateurs les plus avertis dans ce domaine.*

Sans hésitation FT-R&D a proposé de nous accueillir ici, au siège du CNET historique, dans les Jardins de l'Innovation. Son directeur, Pascal Viginier, a droit à nos remerciements chaleureux.

** Marcel Bensoussan, Daniel Bois, Patrick Cogez, Max Verdonne, Michel Voos, se sont joints à Jean Jerphagnon et à moi-même pour constituer un comité scientifique autoproclamé!*

TÉLÉCOMMUNICATIONS ET SEMICONDUCTEURS.

par Maurice BERNARD, ancien Directeur du CNET

Quelle introduction pour ce colloque à la fois modeste et ambitieux? Le privilège de l'âge m'a permis de suivre depuis 1953, durant plus d'un demi-siècle, l'intérêt porté aux technologies issues de la Physique des semiconducteurs par la Direction générale des Télécommunications, devenue l'entreprise FranceTélécom.

Mon propos est celui d'un témoin, propos que je m'efforcerai de situer dans le cours de l'Histoire. Les événements rapportés, les succès et les échecs qui les ont accompagnés sont de nature scientifique et technique, et aussi sociale et politique. Mais derrière les événements seuls les hommes comptent. C'est à travers les souvenirs que j'ai gardés de nombre d'entre eux que je situerai mon témoignage.

Le contexte historique

On compare parfois l'Histoire à une tapisserie dont la trame comporte des ruptures brutales séparées par des périodes de maturation. Cette métaphore s'applique bien à l'histoire du téléphone en France.

Au sortir de la Deuxième Guerre mondiale, les techniciens des télécommunications, y compris les ingénieurs du Corps issus, pour l'essentiel, de l'École polytechnique, restent marginalisés à l'intérieur d'une administration des PTT, archaïque et dominée par la Poste. Aux yeux des élites, notamment politiques, le téléphone demeure un gadget[1]. Les premiers plans quadriennaux d'équipement mettent la priorité sur la reconstruction des infrastructures de transport, la modernisation de l'agriculture, la production de charbon et d'acier, l'approvisionnement en énergie. Ils ne mentionnent même pas le téléphone! Cette situation est la suite naturelle d'une histoire catastrophique, celle que connaît le téléphone français depuis son apparition vers les années 1880. Durant toute la première moitié du XXème siècle le domaine est sous la tutelle de l'État qui multiplie les orientations contradictoires, n'y investit que des sommes dérisoires et laisse exsangue le service public du téléphone. Les industriels étrangers dominent le marché français. * Après la Deuxième guerre mondiale l'état désastreux du téléphone en France qui freine le développement du pays devient un scandale national. Aujourd'hui, un demi-siècle plus tard, FranceTélécom est une entreprise performante, en partie privatisée. Cette mutation est le résultat des ruptures successives, plus ou moins violentes, qui ont accompagné les immenses transformations que la France a subies durant ce demi-siècle. Pour faire court, évoquons seulement les noms des différents Directeurs généraux des Télécommunications.

- Pierre Marzin(1965-1971) et Louis-Joseph Libois(1971-1974), en s'appuyant sur les travaux du CNET, préparent les bases d'un renouveau technique et industriel. Ils amorcent le rattrapage du téléphone.

- A Gérard Théry(1974-1981) revient le mérite, en sept ans, de donner le téléphone à tous les Français, de franciser une bonne part de l'industrie des télécoms et de lancer une politique audacieuse de nouveaux services.

- Jacques Dondoux(1981-1986), Marcel Roulet(1986-1995), Michel Bon(1995-2002) à travers et malgré des cohabitations politiques coûteuses, continuent à développer des nouvelles techniques et des nouveaux services. Ils accompagnent le changement de statut nécessaire et transforment enfin la Direction générale des télécommunications en entreprise publique.

- aujourd'hui Thierry Breton est à la tête d'une entreprise véritable dont l'État détient, pour quelques temps encore, la majorité du capital. Elle apprend à se battre, pour garder des parts sur son marché national et pour se faire une place sur le marché international.

Cette histoire plus récente, à la différence de celle des débuts du téléphone en France, n'a pas encore beaucoup intéressé les historiens. Seuls quelques ingénieurs et scientifiques en ont abordé le coté technique. Pourtant l'histoire sociale, économique et politique d'une telle mutation me paraît assez intéressante pour exciter la curiosité des historiens.

Sur cette trame, encore en grande partie à déchiffrer, le fil de chaîne de mes souvenirs évoquera les personnages qui, aujourd'hui, avec le recul du temps, me semblent avoir été importants pour le développement des technologies issues de la science des matériaux et leur application aux Télécommunications.

* Quelques historiens se sont intéressés à ces malheurs répétés. On notera, en particulier, Catherine Bertho dont le livre cité[1] plus haut contient une abondante bibliographie, ainsi qu'Helga Kragh[2].

L'intérêt précoce du CNET pour le germanium et le silicium

Jeune ingénieur, sortant de l'ENST, l'École nationale supérieure des Télécommunications de la rue Barrault, j'arrive au CNET en octobre 1953. A l'École polytechnique j'avais pris goût à la Physique. Pierre Marzin et René Sueur souhaitaient que je m'occupe d'hyperfréquences et que je remplace Pierre Clavier qui se préparait à quitter l'Administration. Or j'étais venu au CNET pour faire de la recherche, non de la technique. Les semiconducteurs auxquels je ne connaissais rien, avaient pour moi le goût irrésistible de l'inconnu! Marzin et Sueur avaient aussi un côté libéral : ils ont accédé à mon souhait et m'ont affecté au groupe que dirigeait le Dr Franke (3).

Le CNET s'est investi très tôt dans les semiconducteurs. Cette aventure a été évoquée ou analysée par plusieurs chercheurs ou historiens [4][5], notamment en 1995, peu après la commémoration du cinquantenaire de la création du CNET [3], [6].

Dès la fin de la guerre, vers 1946-1947, le CNET avait fait son marché en Allemagne. Il 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, à Aulnay-sous-Bois. Le CNET finançait dans cette société des études sur les cristaux de Germanium et de Silicium afin de développer une fabrication française de détecteurs pour hyperfréquences. A la même époque le CNET avait pris en charge un petit laboratoire allemand de la Forêt Noire où un cristallographe, le Dr Emmanuel Franke [3], [4], [5], [6], [7], travaillait sur la synthèse hydrothermale du quartz, matériau stratégique dont les belligérants avaient été friands durant la guerre. Après quelques péripéties les deux opérations se rejoignent. D'une part, en 1948, le CNET rapatrie à Paris, rue Dussoubs, dans les greniers des magasins Réaumur, le laboratoire du Dr Franke [7]. D'autre part la collaboration avec Westinghouse se détériore quelque peu. Les résultats des recherches menées à Aulnay sont mitigés : les avis sur les performances telles que l'on peut les connaître à travers les archives sont divergents et, en tous cas, les militaires émettent des critiques sur la qualité des détecteurs fournis [4]. Le soutien du CNET n'est plus garanti, tandis que l'industriel s'interroge sur son intérêt dans cette affaire. H.Welker, physicien de réputation mondiale* ne tarde pas à retourner en Allemagne où Siemens lui propose de diriger les recherches sur les semiconducteurs. Quant à Mataré, il émigre aux EU où il fera parler de lui quelques années encore.

Marzin et Sueur ont une ambition nouvelle [3], [6]. Les détecteurs hyperfréquences que Westinghouse peine à développer sont certes bien utiles pour les futurs faisceaux hertziens (et plus encore pour les radars des militaires) mais les Bell Laboratories, pour lesquels Marzin et Sueur ont une admiration profonde, ont annoncé dans *Physical Review*, début 1948, l'invention, le 23 décembre 1947, d'une sorte d'effet triode dans l'état solide** : deux pointes métalliques en contact avec soin sur une surface de Ge ont permis aux chercheurs américains de Muray Hill, d'amplifier des signaux électriques. L'invention du transistor à pointes, comme le soulignent Michael Riordan et Lillian Hoddeson [8], ne fait pas la une de la presse grand-public : elle n'apparaît qu'en page 46 du *New York Times* daté du 1er juillet 1948, lorsque le quotidien rend compte de la première conférence de presse faite, le 30 juin, sur le sujet par les Bell Labs. En France, l'invention n'échappe pas à l'attention de Sueur et de Marzin. Leur réaction est rapide [6], et ils chargent le Dr Franke de reprendre, à Issy-les-Moulineaux, où un nouveau bâtiment, le bâtiment B, vient de s'achever, les recherches sur le germanium financées jusqu'alors à Aulnay. Georges Petit Le Du qui a fait ses classes avec Welker est recruté par le CNET où il monte un laboratoire de croissance de cristaux semiconducteurs. Christian Licoppe a bien montré [6] que ce pari technologique sert à merveille l'ambition de Marzin et de Sueur de faire du SRCT*** l'aile marchante du CNET. Pour Pierre Marzin le caractère interministériel de celui-ci est une construction commode. La partie téléphone du CNET, financée sur le budget des PTT, est de loin la plus importante et dispose de moyens importants. Les membres de la meilleure équipe de l'ancien CNET, la Division tubes et hyperfréquences, installée à Neuilly, se sont dispersés. Le SRCT a, en outre, une mission claire, orientée vers le développement du réseau téléphonique; il est la partie moderne de ce CNET dont Pierre Marzin deviendra, quelques années plus tard, le directeur****.

*H.Welker est reconnu comme le père des combinaisons intermétalliques III-V, telles que l'AsGa. Dans des publications parues pendant la guerre il avait prédit que ces composés devaient être des semiconducteurs tout comme le Ge ou le Si.

**La découverte du transistor qui est le point de départ incontournable de la société de l'information dans laquelle nous vivons aujourd'hui est une extraordinaire aventure scientifique, technique et humaine que racontent avec talent deux auteurs américains dans un livre publié récemment aux EU, Crystal Fire, par Michael Riordan et Lillian Hoddeson [8].

*** Le SRCT: service de la recherche et du contrôle technique.

**** Cet état de chose reflétait l'ambiguïté du concept d'un CNET "interministériel" voulu en 1944 et 1945 par les pouvoirs publics, mais contraire au "chacun pour soi" qui prévalait dans chaque ministère, notamment parmi les deux principales parties prenantes, les PTT et les Armées. Ces dernières avaient cherché à empêcher la création du CNET [9]. En 1953 les PTT de facto se voient reconnaître le leadership de cet organisme : rien là qui soit de nature à provoquer une réelle collaboration entre deux parties qui, de fait, ne le souhaitent pas.

La physique des semiconducteurs et William Shockley

En octobre 1953, le groupe du Dr Franke où je suis affecté fait partie du "célèbre" Département Transmissions du SRCT : on y fabrique les premiers monocristaux de Ge. On sait en mesurer la résistivité électrique point par point, mais il faut monter la mesure de la durée de vie des porteurs minoritaires, celle de l'effet Hall, etc. Il faut surtout apprendre à faire des jonctions p-n, les caractériser et fabriquer en quelques exemplaires le transistor à jonction, ce nouveau composant qui vient de détrôner le transistor à pointe[10]. René Sueur et Emmanuel Franke encouragent la petite équipe que j'ai formée. Ils partagent notre enthousiasme et nous donnent des moyens. Mais que savons-nous des semiconducteurs? Rien, nous avons tout à apprendre.

* *
*

Aux yeux des quelques scientifiques des années 50 qui s'intéressent aux semiconducteurs, le père de la discipline est William Shockley. Avec deux physiciens, John Bardeen et Walter Brattain, qui faisaient partie de son groupe aux Bell Telephone Laboratories, ils avaient inventé l'effet transistor: tous deux, en positionnant de manière adroite deux pointes métalliques, très fines et très rapprochées, au contact d'une surface bien polie de germanium, avaient réussi à amplifier des signaux électriques. Ils avaient ainsi apporté la preuve expérimentale qu'un amplificateur "tout solide" était possible. Le transistor à pointes, suivi peu après par le transistor à jonction p-n, qui lui résulte directement d'un travail théorique de William Shockley, vaudra aux trois Américains de se partager le prix Nobel de physique 1956. Au milieu des années 50 les rares physiciens français qui travaillaient sur les semiconducteurs ne pouvaient imaginer la suite.... Ce que nous savions c'est que les connaissances, les idées venaient d'Outre-Atlantique: publications scientifiques, maîtrise des techniques de laboratoire, appareils de mesure, etc. "*Electrons and Holes in semiconductors*" de William Shockley[11] était notre livre de chevet, en même temps que nous découvriions l'ancien testament, "*Modern Theory of Solids*" de Frederick Seitz[12]. Et, paru peu après, "*Introduction to Solid State Physics*" de Charles Kittel pouvait être regardé comme le nouveau testament[13].

Au début des années 1960, William Shockley était une des personnalités dominantes de la physique des semiconducteurs, de la recherche fondamentale aux applications. Dès le milieu des années 50, peu avant le Nobel, une ambition dévorante de gagner de l'argent et de réussir à Wall Street l'avait saisi[8]. Elle l'entraînera, indirectement, sur les chemins moins glorieux de la "Bell curve"*.

Shockley était encore à son zénith, en 1958, à la Conférence internationale sur la physique des semiconducteurs de Bruxelles. Jeune physicien de trente ans, sur le point de soutenir ma thèse, précisément sur la théorie et les propriétés des jonctions p-n[14], je me souviens de l'avoir raccompagné à son hôtel. Nous parlions en sortant de la conférence où, au cours de la journée, il avait été souvent question d' "energy band gap". Arrivé devant ma voiture je lui propose, ainsi qu'à James M. Early** qui était avec nous, de les raccompagner tous deux jusqu'à leur hôtel. Après un coup d'œil étonné à ma 2 CV, véhicule qu'ils voyaient certainement pour la première fois de leur vie, ils acceptent et se glissent sans trop de peine à l'intérieur. Devant l'hôtel, me remerciant pour le "lift", W.Shockley commente la situation: "there is a gap between having a car and having no car".

* La Bell curve se rapporte à des études assez sulfureuses sur le QI des différentes races humaines.

** James M. Early, physicien des Bell Labs, a beaucoup contribué au développement du transistor.

Pierre Aigrain

A cette époque traverser l'Atlantique était banal mais pas encore très fréquent. Nous avons la chance d'avoir en France, avec Pierre Aigrain, un des pionniers de la physique des semiconducteurs. En 1945, celui-ci, frais émoulu de l'École Navale, va aux EU pour apprendre à piloter. En fait il trouve plus intéressant de s'inscrire à Carnegie Tech, l'université de Pittsburgh, où il découvre les semiconducteurs.

Quelques années plus tard, Yves Rocard l'attire au laboratoire de l'École normale supérieure de la rue Lhomond où il fonde avec Claude Dugas le premier groupe de physique des semiconducteurs en France. Pierre Aigrain débordait d'imagination et avait une mémoire exceptionnelle. C'était un homme d'une extrême générosité, d'une remarquable ouverture d'esprit. Ce grand physicien, avait de plus une bonne culture d'ingénieur. Il connaissait parfaitement tous les labos américains qui comptaient dans le domaine des semiconducteurs.

Sa disparition récente, elle aussi bien trop prématurée, a été l'occasion de lui rendre hommage. Pierre Aigrain, en 2001, alors qu'il était déjà malade, avait accepté d'évoquer avec ses premiers élèves et amis les étapes marquantes de sa carrière scientifique. Il en est résulté quelques articles et plusieurs textes accessibles sur internet qui montrent l'importance que Pierre a eue sur le développement de la physique des semiconducteurs et plus généralement sur la recherche en France[15]. Je me bornerai à témoigner de son influence décisive sur les débuts des semiconducteurs au CNET[16]. J'avais rencontré Pierre Aigrain pour la première fois, en 1953, peu après mon arrivée au CNET, dans les laboratoires de la CSF à Puteaux dont il était ingénieur-conseil et où Claude Dugas était responsable des études sur les semiconducteurs. La CSF avait un marché d'études du CNET sur le transistor et, en novembre ou décembre 1953, j'avais accompagné René Sueur, le chef du Département Transmissions, le Dr Franke et son adjoint, Jacques Lantiéri, dans le cadre de ce marché d'études. J'ai ensuite revu assez fréquemment Pierre Aigrain, notamment à son laboratoire de l'École normale, rue Lhomond, où il accueillait chaleureusement les visiteurs. Ses encouragements m'ont été précieux pour développer les laboratoires de physique des semiconducteurs du CNET, à Issy-les-Moulineaux, dans le nouveau bâtiment construit pour le groupe Franke, que nous appelions et que sans doute on continue d'appeler le Bâtiment E. Il m'a persuadé de soutenir en 1958 une thèse sur le travail que j'avais mené sur les jonctions p-n[14].

Des influences étrangères

Il serait injuste de ne parler que des influences américaines. Les Anglais avaient travaillé pendant la guerre sur les cristaux détecteurs hyperfréquence en germanium et en silicium, des composants capricieux mais essentiels au bon fonctionnement des radars. Des physiciens anglais avaient joué un rôle de pionnier dans la théorie de l'état solide, comme Alan Wilson qui avait prédit en 1931 l'existence de matériaux ayant une conductivité électrique intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants [17]. A la même époque W. Pauli avait déconseillé de travailler sur ces matériaux considérés comme "dégoûtants". Peu après la guerre Jacques Friedel avait travaillé quelques années à Bristol dans le laboratoire de Nevill Mott [18]. Il en était revenu en 1952 et développait le laboratoire de physique des métaux, boulevard St Michel, à l'École des Mines de Paris.

En physique des semiconducteurs, dans les années 50, l'un des meilleurs laboratoires anglais était militaire, le Royal Radar Research Establishment, à Great Malvern. Mais nous étions surtout intéressés à savoir ce que nos homologues du Post Office pensaient de l'avenir des transistors en matière de télécommunications et quelle recherche ils jugeaient utile de faire en physique des semiconducteurs? Rapidement il nous apparut que leurs ambitions étaient assez limitées, et cela pour deux raisons. Ils estimaient, d'une part que l'aspect recherche pouvait être laissé aux diverses équipes universitaires anglaises engagées dans ce domaine(ainsi qu'aux militaires) et que, d'autre part, leurs industriels avaient les ressources voulues pour suivre sans trop de retard les progrès des entreprises américaines. Ce n'était pas notre cas. D'un coté l'université française ignorait encore à cette époque la physique des semiconducteurs et plus généralement la physique des solides; de l'autre les industriels français restaient bien fragiles.

L'école russe était lointaine à beaucoup d'égards. Pourtant je garde un souvenir précis d'une conférence que A.Ioffé, un célèbre physicien russe donna à la Sorbonne au cours des années 50. Déjà âgé, parlant un anglais incertain, ce grand scientifique venant du froid nous avait raconté des choses passionnantes, précisément sur l'effet de la température sur les propriétés des semiconducteurs! Leurs propriétés thermoélectriques pouvaient être mises à profit pour réaliser des applications spectaculaires: une lampe à pétrole revêtue d'une couche d'un matériau semiconducteur pourrait fournir assez d'énergie électrique pour alimenter un récepteur à transistor. Un poêle servant à chauffer une isba délivrerait le courant nécessaire à l'éclairage par une ampoule électrique. S'agissait-il de prévisions théoriques ou d'innovations effectives, de travaux de laboratoire ou de percées décisives réalisées dans la patrie du Communisme? Personne ne savait trop. Le hasard veut que, très récemment, en 2002, la Fondation Altran a attribué son prix de l'innovation technologique à une entreprise française qui développe et industrialise aujourd'hui, des applications de la thermoélectricité [19]. Cinquante ans plus tard, les travaux précurseurs d'A.Ioffé trouvent leur aboutissement. Ils sont un espoir pour les pays en voie de développement. Les technologues français ont d'ailleurs pu établir des liens avec des chercheurs ukrainiens qui sont les lointains héritiers de A.Ioffé.

L'Allemagne ne nous était pas étrangère. Mon patron le Dr Franke était resté très lié avec Herbert Welker et nous avions de bonnes relations avec le laboratoire de Siemens qu'il dirigeait maintenant à Erlangen près de Nuremberg. Mais l'intérêt de Siemens allait en priorité aux courants forts, sujet très loin de nos préoccupations. C'est indirectement, par Emmanuel Franke, que la science allemande nous influençait. Il avait amené avec lui, non seulement quelques collaborateurs mais aussi les qualités traditionnelles de la science allemande : le soin dans les expériences, la rigueur dans la pratique journalière. Il nous semblait tout naturel de réunir les diverses compétences nécessaires : chimie préparative, chimie analytique, analyses par rayons X et par diffraction électronique, mécanique de précision, microscopie électronique, etc. Créer de telles équipes pluridisciplinaires était à l'époque inhabituel en France. Cette culture qui ne nous a pas quittés et qui a contribué aux succès du laboratoire de Bagneux des années 80 et 90 vient indirectement et, au moins en partie, d'Allemagne.

Cette époque a vu se développer une idée nouvelle, aujourd'hui devenue classique, à savoir le rôle essentiel, dans certaines disciplines, de contrôler la pureté chimique des matériaux utilisés, jusqu'à des valeurs inconnues jusqu'alors. Parce que certaines propriétés des semiconducteurs sont sensibles à des traces d'impuretés aussi faibles qu'une part pour 10^8 , 10^9 ou 10^{10} , le germanium, le silicium et les autres doivent être préparés avec une extrême pureté, par exemple 10^{-10} . Il faut simultanément savoir doser des traces très faibles d'impuretés* .

C'est aussi l'époque où est apparue une technique d'une stupéfiante simplicité, la purification par fusion de zone. Pfann, un agent technique des Laboratoires Bell, a une idée de génie: en fondant une zone étroite d'un lingot de germanium et en la déplaçant lentement on concentre les impuretés aux extrémités du barreau. Il suffit d'en couper les extrémités et de recommencer pour obtenir très facilement des puretés extrêmes.

* Un des premiers collaborateurs du Dr Franke m'a communiqué un échange de correspondance datant des années 50 par lequel Pierre Marzin demande à Frédéric Joliot-Curie d'aider le CNET à détecter de très faibles traces d'impuretés, grâce aux techniques nucléaires. Il est vrai que la jeune physique nucléaire partageait désormais avec la science des matériaux cette exigence dans la pureté de la matière.

Le renouveau de la science française

Revenir sur la scène française, donne l'occasion de dire un mot des problèmes de la recherche scientifique et de d'enseignement supérieur de l'époque. La France scientifique de l'entre deux-guerres était, à quelques exception près, dans une étrange somnolence : la théorie de la relativité restreinte y avait fait péniblement son chemin et la mécanique quantique, malgré le génie, il est vrai, assez solitaire, de Louis de Broglie, était ignorée. Le renouveau de la physique française qui s'est produit après la guerre a étonné les historiens[20]. Je peux témoigner de deux faits significatifs de cette renaissance:

- l'existence du CEA, le Commissariat à l'énergie atomique, créé en 1945, avait permis à Albert Messiah qui revenait des EU, de donner, dès 1953, un cours de mécanique quantique à Saclay, à l'Orme des merisiers. Son livre, le premier ouvrage complet de mécanique quantique en français, paraît en 1958 et 1960. Il sera d'un grand secours pour les jeunes affamés de physique moderne que nous étions[21].

- les concepts d'enseignement de troisième cycle et de diplôme d'études approfondies, le DEA, se précisent au début des années 1950. Le premier DEA, ou l'un des tout premiers, est celui de Physique des solides, fondé par Pierre Aigrain, Jacques Friedel et Georges Guinier. Les premiers cours ont lieu à l'Institut du radium, rue Pierre Curie, dès 1954 ou 1955, avant d'être donnés partiellement à Jussieu et à Orsay où vient de naître une nouvelle université. Dans les années 60 les troisièmes cycles de toutes disciplines se multiplient en région parisienne et en Province. Les élèves sortis des grandes écoles scientifiques complètent souvent leur formation par des enseignements de DEA. Le paysage de l'enseignement supérieur scientifique se transforme sensiblement.

Au sortir de la Deuxième guerre mondiale, la recherche européenne, notamment en sciences des matériaux, est sinistrée; sauf en Grande Bretagne. Quelques équipes vieillottes mènent des recherches routinières, alors que la science anglo-saxonne porte un grand intérêt aux problèmes nouveaux, comme ceux posés par les semiconducteurs de référence que sont devenus le germanium et le silicium.

Dans le milieu académique, l'École normale, grâce à la vision d'Yves Rocard et à l'arrivée de Pierre Aigrain et de Claude Dugas, est la première au début des années 50, et la seule, à relever le défi. Le laboratoire de physique de la rue Lhomond, aujourd'hui baptisé laboratoire Pierre Aigrain, devient, en quelques années, l'un des meilleurs au monde. Son orientation fondamentale certes ne le prédispose pas à devenir un leader en matière de technologie mais il est un pôle important de formation et sert de modèle au développement de nouveaux labs dans les universités et les grandes écoles. A. Botelho dans l'article controversé cité plus haut[4] s'interroge sur le paradoxe français: on a commencé très tôt en France à s'intéresser aux semiconducteurs et à leurs applications mais, en définitive, on y essuie beaucoup d'échecs industriels. L'auteur croit déceler une explication de ce paradoxe dans l'orientation trop théorique du meilleur laboratoire français de l'époque, c'est à dire celui de l'École normale. Cette explication me semble un peu courte et même franchement erronée. En effet, durant la période envisagée, de 1945 à 1966, on peut remarquer que:

- 1) le laboratoire de Pierre Aigrain était riche de jeunes physiciens du meilleur niveau mais limité en taille et pauvre en techniciens et en moyens technologiques,
- 2) l'existence du LETI, un bon laboratoire technologique, à proximité d'un industriel (Thomson en l'occurrence) n'a pas suffi, pendant longtemps, à prémunir l'industriel contre un échec prolongé.

En d'autres termes, la réussite de la recherche-développement peut conduire au succès industriel mais c'est à travers une alchimie complexe qui dépend d'un grand nombre de facteurs.

Le "transistron"

Si le CNET, comme nous l'avons dit plus haut, s'est engagé très tôt dans le domaine des semi-conducteurs, c'est dû, pour une bonne part, à deux hommes exceptionnels, Pierre Marzin et René Sueur.

Jusqu'à sa nomination comme Directeur général des Télécommunications en 1965, Pierre Marzin a été la personnalité dominante du CNET. Son influence a eu des conséquences directes et indirectes sur l'implication du CNET dans le développement des semi-conducteurs en France.

Pierre Marzin a commencé sa carrière d'ingénieur non, comme la plupart de ses collègues ingénieurs du corps des Télécommunications, dans un service d'exploitation, mais au laboratoire. Là, je pense qu'il a dû très vite toucher du doigt combien l'industrie française du téléphone était en retard par rapport aux entreprises étrangères et se convaincre que la technique jouerait un rôle croissant dans les innovations à venir. Mais c'est comme animateur que Marzin s'impose. Dès la naissance du CNET, en 1944, il est responsable de sa section la plus importante, le SRCT, Service de la recherche et du contrôle technique. En 1953 il est nommé directeur du CNET et du LNR*. Les textes de 1953 qui réorganisent le CNET lui conservent son caractère interministériel tandis que la partie PTT bénéficie des moyens les plus importants. Elle était déjà prépondérante avant 1953, elle détient maintenant sans partage le pouvoir au CNET.

Parmi les qualités que l'on reconnaît en général à Pierre Marzin, vision long terme, talent d'organisateur, efficacité de son réseau, etc., il faut ajouter sa capacité à déceler l'excellence. Ses débuts dans la technique des télécommunications l'avaient vite convaincu que le meilleur téléphone au monde était celui développé par le Bell System et que cela résultait pour une bonne part de l'existence de laboratoires puissants impliqués à la fois dans la recherche fondamentale et dans les applications. Le modèle américain s'imposait, il fallait s'en inspirer toujours, l'imiter souvent. Il aimait à dire: "comme on n'est pas plus... que les Américains, on doit arriver à faire aussi bien". Pierre Marzin n'aimait pas voyager mais il n'avait pas besoin de traverser l'Atlantique pour savoir à peu près ce qui se passait d'important, aux Bell Labs.

Son adjoint, René Sueur, partageait son admiration pour le Bell System. Bien que la culture scientifique initiale de ce dernier fut modeste (il était entré aux PTT comme contrôleur, c'est à dire comme agent technique) il lisait assidûment la *Physical Review* des années 40 et 50. Il avait assez bien assimilé certains articles de W.Shockley pour décrire dans un article de *l'Onde électrique* de 1949[22] un programme d'études du CNET, ambitieux mais pertinent**, et donner les caractéristiques du premier transistor à pointe français. Celui-ci, baptisé "transistron" dans un élan cocardier, y est présenté comme le prototype d'un composant spécifique, le transistron PTT601. Il préfigure les composants qui vont succéder aux tubes à vide, les triodes PTT. Ces écrits audacieux témoignaient peut-être du mélange d'une certaine naïveté mêlée à un sens tactique très développé, mais ils étaient aussi la marque irréfutable d'un extraordinaire optimisme et d'une foi étonnante.

Un domaine important, auquel je n'ai pas directement participé, est celui de la pénétration des transistors dans les équipements du réseau téléphonique. Là aussi l'action de Marzin et de Sueur a été déterminante. S'ils avaient aussi vite cru dans ces nouveaux composants, c'est à dire s'ils avaient pensé, dès la fin des années 40, que le transistor pourrait remplacer les tubes à vide, c'est que, comme les dirigeants des Bell Labs, ils voyaient là une véritable révolution technique: dissiper des mw là où on consommait des watts, remplacer des tensions de l'ordre de 100 volts par quelques volts, diviser par dix voire par cent le volume de certains équipements.

Dès le début des années 50, Jean-Marie Moulon puis Jacques Dezoteux travaillaient dans un laboratoire du bâtiment B, voisin du mien. Ils faisaient partie du groupe François Job du département transmission. Avec les transistors qu'ils arrivaient à se procurer, ils concevaient les premiers amplificateurs destinés au réseau téléphonique. A la CSF Jean-Pierre Vasseur suivait une démarche analogue au profit des matériels grand-public. Le CNET a-t-il été un des premiers laboratoires à développer des matériels transistorisés? Ce serait un sujet d'histoire des techniques digne d'intérêt que de comparer, par exemple, la transistorisation des réseaux téléphoniques de la France, de la Grande-Bretagne, de l'Allemagne, de la Suède et bien sûr des EU, dans les années 50.

*LNR: Laboratoire national de radioélectricité.

** D'emblée René Sueur commence l'article en précisant que le "transistron" français a été présenté le 18 mai 1949, au Ministre des PTT, dans une manifestation qui se veut parallèle(quoique légèrement décalée dans le temps!) à la présentation du transistor à New York par les Bell Laboratories, le 30 juin 1948.

Un choix : la science ou la recherche technologique?

En tous cas, dans les années 60, la transistorisation des équipements allait suffisamment bon train pour que l'intérêt de René Sueur se soit déplacé vers un point de connexion miraculeux qui aurait permis de résoudre le problème de l'électronisation des auto commutateurs crossbar. Il attendait de nous que nous inventions, pour demain si possible, ce composant magique qui aurait permis au glorieux département Transmissions qu'il dirigeait de satisfaire les ingénieurs qui avaient misé sur la commutation électronique spatiale. Les pressions que René Sueur exerçait sur nous à travers le Dr Franke étaient sensibles [23]. Elles inquiétaient notre patron direct qui était trop bon scientifique pour ne pas savoir que l'on n'invente pas un composant miracle sur commande et qui craignait la remise en cause de tout ce qu'il avait construit à PCM, le Groupe Physique, Chimie et Métallurgie. Par la suite la commutation électronique prendra les orientations que l'on sait avec le triomphe du numérique. Grâce aux circuits intégrés, apparus dans les années 60 et dont l'importance devient décisive dans les années 70, la commutation temporelle l'emporte sur la commutation spatiale. En 1963 le Dr Franke retourne en Allemagne où il dirigera le service brevet de Siemens. Jacques Lantiéri qui lui succède part lui-même en 1968 s'occuper à la SAT des recherches sur l'infrarouge. Sans que personne s'en doute, l'aventure Bagneux se préparait!

Les jeunes ingénieurs que nous étions, ironisions parfois sur les "vérités d'avenir" de René Sueur, mais nous partagions en fait son enthousiasme. Pas étonnant dans ces conditions que la Société des freins et signaux Westinghouse, puis la CSF et la CFTH* aient reçu des marchés d'études pour développer des différentes filières de transistors. Il y avait peut-être un peu d'anarchie dans ces développements industriels, mais il faut garder à l'esprit le contexte de l'époque. Le péché d'anachronisme guette l'historien qui, après coup, sait bien quelles étaient les impasses et quelles voies avaient mené au succès. L'histoire des premiers développements de l'industrie des semi-conducteurs dans le monde est assez connue et l'on est frappé par les innombrables échecs industriels qui jalonnent la route.

Vers la fin des années 50, l'un des développements menés au CNET est celui du transistor npn, par tirage à partir d'un bain de germanium liquide. Il était discutable. La technique, initiée par les Bell Labs, reproduite avec succès à Issy-les Moulineaux dans le laboratoire de Petit Le Du, donna lieu à un marché d'études chez des industriels français, notamment la Cie Française Thomson-Houston. Cette méthode se voulait une alternative au transistor germanium par alliage d'indium développé par Philco, RCA et la CSF. En fait aucune des deux techniques ne débouchera sur le plan industriel. La technique de diffusion s'imposera inexorablement, en même temps que le silicium.

L'idée d'un amplificateur à l'état solide utilisant l'effet de champ avait, en fait, inspiré aux Bell Labs les pionniers du transistor à l'époque héroïque, de 1946-1947 [8]. Le concept du transistor à effet de champ avait été repris en France par Stanislas Teszner, ingénieur-conseil au CNET, d'origine hongroise. Il avait imaginé une structure cylindrique originale: autour d'un bâtonnet semi-conducteur une métallisation annulaire permettait d'étrangler un canal de conduction. La faisabilité au CNET de ce nouveau composant amplificateur avait donné naissance à un néologisme, le "technétron". En miniaturisant on pouvait envisager de le faire fonctionner à des fréquences élevées, ce qui intéressait, a priori, les Armées. Les développements industriels du "technétron", puis du "gridistor" qui lui succéda, furent sans lendemain. Les rudes chemins de la guerre technologique sont jonchés de cadavres, plus ou moins inévitables.

Certains [4], se sont interrogés sur les échecs industriels français. On peut, non sans raison, souligner le manque de cohérence entre la politique des Armées et celle du CNET et sur un certain flou dans la stratégie même des Télécommunications françaises. Mais limiter là ses observations c'est s'interdire de chercher les causes plus profondes d'une situation que l'on retrouve dans tous les pays comparables à la France. Dans ce domaine les échecs industriels ont été nombreux dans tous les pays, EU compris. Ces échecs, comme ceux dans le domaine des calculateurs qui furent également innombrables, ont des causes multiples et complexes.

S'il est des erreurs inévitables et en quelque sorte profitables, il est aussi des choix techniques qu'il faut savoir abandonner à temps. L'histoire des semiconducteurs au CNET qui fut la nôtre, est pleine d'exemples de la sorte. En attendant que des historiens les étudient en détail, quelques orientations malencontreuses me reviennent en mémoire.

La diffusion d'impuretés à partir de la phase vapeur dans les matrices semiconducteurs, en fait dans le silicium, pour créer des jonctions et des transistors, apparaît dès le milieu des années 50. Elle devient rapidement une étape majeure dans la maîtrise technologique des semiconducteurs. Au CNET ce tournant a été pris tardivement et avec des moyens insuffisants. Il est vrai que, dès le début des années 60, nous avons été nombreux à être attirés par ce que nous commençons à appeler la "recherche fondamentale orientée": l'émission de lumière, le laser, c'est à dire la production de lumière cohérente, l'optique non-linéaire, etc. Nous y reviendrons.

Le décès d'Andrieux (1960), les départs successifs de Franke, retourné en Allemagne(1963), de Jacques Eldin (1967), successeur d'Andrieux, de Jacques Lantieri (1968), tous deux recrutés dans des entreprises privées, avaient laissé assez seules les équipes technologiques.

*CFTH: Compagnie française Thomson-Houston.

Les nouveaux laboratoires de Bagneux

L'installation en 1969, dans de nouveaux locaux à Bagneux, de plusieurs services hérités des départements PDT* et PCM a constitué, de fait, un tournant dans la politique technologique du CNET. Devaient se regrouper à Bagneux, outre la partie recherche, quelques équipes de technologues engagées dans des actions diverses, depuis le transistor HF pour répéteur sous-marin jusqu'au dépôt par chalumeau à plasma, en passant par les circuits micro-électroniques hybrides chers à Maurice Ménoret. Ce regroupement 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. Sans doute les ingénieurs de la base et les experts ne surent pas proposer de projets ambitieux et convaincants. La Direction ne vit pas là un enjeu d'avenir ou peut-être a-t-elle compté sur Lannion, où la tentation existait de développer de réels moyens technologiques dans le domaine du silicium? Cette décision finalement ne fut pas prise. Lorsque la question des composants sera posée en termes nouveaux à partir de 1975 par la nouvelle Direction des affaires industrielles et internationales, on constatera que les compétences du CNET en micro-électronique se limitaient à un service qualité des composants, localisé au CNET -Lannion.

Ayant pris trop tardivement le virage de la diffusion dans le silicium, le CNET a raté le train des circuits intégrés. Reconnaissons qu'il aurait fallu qu'il y consacre des moyens considérables, étant donné que le progrès technique en micro-électronique, déjà à cette époque, s'était emballé. Un effort du CNET, plus important et plus cohérent dans les technologies des semiconducteurs, eut été souhaitable. Il aurait probablement renforcé l'efficacité de la DGT en général. Cela n'aurait pas suffi, me semble-t-il, pour donner à la France un ou des industriels occupant une place de choix sur le marché mondial des circuits intégrés. Tout comme en informatique, il y avait là une carence profonde que la France partageait, plus ou moins, avec les autres nations européennes, l'Allemagne ou le Royaume-Uni, par exemple, et qui nous distinguait des États-Unis. Ceux-ci, longtemps maîtres du jeu, commençaient à être sévèrement talonnés, à partir des années 70, par le Japon et les autres dragons asiatiques, sur un marché en croissance ininterrompue.

L'insuffisance de nos locaux à Issy-les-Moulineaux conduisait à une impasse : soit déménager à Lannion, ce que la Direction souhaitait mais que peu d'entre nous étions prêts à faire, soit trouver une improbable solution parisienne. La direction du CNET de l'époque, Louis-Joseph Libois (1968-1971) puis Jacques Dondoux (1971-1974), montra que, comme ses devancières, elle attachait du prix au type de recherche que nous avons réussi à développer. Les locaux de l'ex-LNR du général Ferrié à Bagneux pouvaient être aménagés en laboratoires modernes. Mieux, Jacques Dondoux obtint de la DATAR, pourtant toujours aussi inflexible dans sa politique de décentralisation, de faire construire un bâtiment supplémentaire à Bagneux. Il est vrai qu'il était difficile au gendarme de l'aménagement du territoire de s'opposer à ce qui fut présenté dans le dossier comme un central téléphonique expérimental!

* Le département PDT, pièces détachées et tubes, dirigé d'abord par Andrieux, puis par Jacques Eldin, regroupait les moyens technologiques les plus importants et avait pour mission d'étudier des composants nouveaux.

Bagneux et la recherche fondamentale orientée.

Au cours des années 60 l'accent avait donc été mis sur la "recherche fondamentale orientée" et non sur les technologies. Il y avait là, de notre part, un choix plus ou moins explicite de stratégie scientifique. Dès les débuts de la physique des semiconducteurs au CNET il était évident à nos yeux que le modèle, à l'époque indépassable, était celui de Bell Labs. Pierre Aigrain nous avait montré qu'en France, dans la partie fondamentale de cette nouvelle science des matériaux, en rassemblant des jeunes de valeur sur quelques problèmes bien posés, il était possible de se rapprocher des meilleurs. S'efforcer de suivre cet exemple était la seule manière pour nous d'atteindre une certaine reconnaissance nationale et internationale. Nos premières publications originales arrivent vers la fin des années 50. Elles entraînent pour nos meilleurs chercheurs les premières invitations à l'étranger. Et il faut bien avouer que les années 60 sont riches en problématiques scientifiques de première grandeur auxquelles nous avons très envie de nous inviter. C'est dans cet esprit que se construit et se développe le Centre du CNET à Bagneux à partir de 1969.

Dans le groupe de physique des semiconducteurs que je dirigeais au cours des années 60, la fibre technologique ne faisait pas encore partie de notre culture. Le cas du laser à semiconducteur en est une bonne illustration. J'avais eu la chance avec Georges Duraffourg de reprendre une idée astucieuse de Pierre Aigrain qu'à son habitude il n'avait pas consignée par écrit et n'avait pas complètement explicitée [16]. A partir de là nous avons pu établir, en 1961, la condition nécessaire pour que l'amplification laser puisse apparaître dans un semiconducteur, l'équivalent de la célèbre condition d'inversion de population pour une assemblée d'atomes indépendants. Bien que le "referee" de *Physical Review letters* à qui nous avons adressé le manuscrit n'ait pas retenu notre travail, notre plaisir intellectuel était grand. D'autant plus que la thèse de doctorat de Georges Duraffourg qui en résultera, quelques années plus tard [24], était d'une rare élégance*.

Il était évident qu'à partir de ce résultat, il est vrai assez abstrait, nous aurions dû faire preuve d'un sens plus développé des réalités expérimentales et des enjeux techniques en nous acharnant à trouver quels systèmes semiconducteurs pouvaient permettre le plus facilement de réaliser cette "inversion de population". Ce ne fut pas le cas et ce fut une erreur. Nous aurions dû naturellement déposer une demande de brevet, ce que nous négligeâmes de faire! Un an plus tard, durant l'été 1962, trois équipes américaines feront état simultanément d'expériences montrant l'effet laser dans des diodes AsGa, résultats obtenus à la suite de démarches purement empiriques. Cette erreur de jugement porte la marque de notre jeunesse, de notre naïveté et de notre manque de maturité. La leçon servira plus tard, à Bagneux en 1972, lorsque Jean-Pierre Noblanc, Jean Jerphagnon et moi, nous lancerons OPA, le groupe Optique Appliquée!

L'idée de pouvoir maîtriser la réalisation et le fonctionnement d'oscillateurs produisant des ondes électromagnétiques cohérentes, dans le domaine visible ou proche infrarouge, exactement comme on savait le faire avec les systèmes hyperfréquences, nous semblait être le fil d'Ariane orientant nos recherches. Travailler dans les années 60 sur les différentes sortes d'effet laser, nous rapprochait naturellement du groupe infrarouge de l'ancien CNET et nous ouvrait la voie à une collaboration fructueuse avec Otto Deustchbein, un scientifique d'origine allemande, mondialement reconnu en spectroscopie des terres rares. En citant le nom de cet excellent et trop modeste physicien, et bien que cela nous écarte des semiconducteurs, je me dois de mentionner le nom de François Auzel. Il avait été mon élève à l'Institut supérieur d'Électronique de Paris (Institut catholique) vers la fin des années 50. Très proche collaborateur d'Otto Deustchbein durant de longues années, il est aujourd'hui mondialement connu pour ses travaux sur les matériaux APTE** issus de leurs recherches communes des années 60 et 70. A ce sujet une nuance de regret, celui de ne pas avoir su, à Bagneux marier les terres rares et les semiconducteurs! L'idée la plus simple était d'incorporer un ion de terre rare à une matrice semiconductrice en lui conservant assez bien ses propriétés spectroscopiques pour qu'il garde son individualité, tout en profitant des propriétés des électrons et des trous pour changer son état d'excitation par voie électronique. Tout cela s'est révélé plus compliqué que prévu.

Une autre voie pour produire des ondes lumineuses cohérentes était le nouveau chapitre de l'Optique non-linéaire qu'avait ouvert en 1960 le premier doublement de fréquences optiques dans le quartz obtenu par Franken en 1961 [25] ainsi que l'article fondateur de Bloembergen et al [26] sur les non-linéarités optiques. Il apparaissait possible à partir d'une source de lumière cohérente, de fréquence bien définie, d'engendrer de nouvelles fréquences. On pouvait même rêver, avec les oscillateurs paramétriques, d'obtenir des sources de lumière cohérente accordables. Nous étions d'autant mieux préparés à prendre cette orientation que mon attention avait été attirée, dès leur publication, par les deux articles de base sur les interactions paramétriques publiés par Manley et Rowe [27] vers la fin des années 50.

*Elle n'a jamais été publiée, au-delà du texte de notre article initial ; pourtant des chercheurs américains nous avaient demandé l'autorisation de la traduire.

**APTE : addition de photons par terre rare.

Retour à la recherche technologique.

Propriétés optiques des semiconducteurs, recherche de nouveaux lasers, réalisations d'oscillateurs paramétriques, matériaux pour l'optique non-linéaire, structures microscopiques et symétries macroscopiques, ferro-élasticité, tous sujets de recherche qui nous passionnent et nous amènent dans le grand bain de la science en marche. Certains scientifiques de Bagneux sont invités dans les meilleurs labos EU et nous commençons à nous sentir capables de rivaliser avec les meilleurs. Notre légitimité est en passe d'être reconnue.

Cependant le souci d'être utile au développement technologique ne nous avait pas abandonnés. Là où nous avons acquis suffisamment de compétences, c'est à dire en optique appliquée, nous nous sentions désormais en mesure de nous engager dans la course technologique. Nous ne souhaitons pas commettre, dans les années 70, les mêmes erreurs que celles commises avec le laser semiconducteur, au début des années 60. Pour lancer une opération de cette nature il était indispensable de trouver un leader ayant une légitimité incontestable en recherche pure et, cependant, attiré par la technique, les réalisations et le goût des performances. Ce responsable d'une petite équipe, destinée d'ailleurs à se développer rapidement, devait être l'acteur central des transferts de connaissances, des retours d'information, du dialogue entre experts de cultures différentes. Non seulement cet oiseau rare existait parmi nous, Jean-Pierre Noblanc venait de terminer sa thèse, mais de plus il était volontaire! Le groupe OPA (OPTique Appliquée) vit le jour en 1972, se développa rapidement et fut à la base de nombreux succès techniques récoltés par le CNET-Bagneux jusqu'en 1996.

Jean-Pierre avait su établir avec les autres chercheurs de Bagneux, et notamment avec Jean Jerphagnon, des relations de confiance et d'amitié qui pèseront sur les réussites à venir. Ce dernier, rentré en 1970, après un séjour de deux ans aux Bell Labs, à Murray-Hill (NJ), devient en 1972 responsable des recherches amont de Bagneux.

Les réussites de Bagneux, que d'autres que moi évoqueront sans doute aujourd'hui, trouvent en partie leur origine dans la culture de coopération et d'échanges qui s'était peu à peu développée au cours des années 60 et 70, entre trois types d'activité :

- la réflexion fondamentale sur les processus physiques, leur mesure, leur compréhension,
- l'élaboration des matériaux et leur évaluation,
- la réalisation de composants ou de dispositifs innovants et la mesure de leurs performances.

Avec Bernard Grégory, alors Directeur général du CNRS, nous avons convenu, en août 1974, que le CNET-Bagneux demanderait l'association au CNRS. Celle-ci sera effective en 1975, alors que je m'étais éloigné de Bagneux pour prendre d'autres fonctions à la DGT, auprès de Jean-Pierre Souvion. Sans moi, Jean Jerphagnon et Jean-Pierre Noblanc, sous la houlette débonnaire de Michel Reyssat, feront de Bagneux le laboratoire réputé que l'on a connu.

La DAI et les composants électroniques.

Le remplacement de Louis-Joseph Libois par Gérard Théry à la tête de la Direction générale des Télécommunications intervint le 16 octobre 1974. Cette décision de Valéry Giscard d'Estaing, nouveau Président de la République, avait une signification qui allait au delà des personnes. Aujourd'hui, trente ans plus tard, le regard se fait plus serein. Trois objectifs étaient visés :

- accélérer le rattrapage en cours du retard de l'équipement téléphonique du pays, jugé trop lent,
- redistribuer les cartes dans un secteur industriel où les entreprises étrangères installées en France occupaient les places de choix, à côté d'un champion national (CIT) jugé peu dynamique. Cette redistribution était d'autant plus nécessaire que le secteur avait une croissance naturelle forte que les investissements publics envisagés allaient encore renforcer.
- encourager les innovations que l'informatisation de la société ne manquerait pas de susciter.

Le changement concernait aussi l'organisation de la DGT. Le rôle du CNET, notamment, se trouvait profondément modifié. Pour bien montrer qu'il devait être l'exécutif de la stratégie de cette quasi-entreprise qu'était devenue la DGT (on ne va pas tarder à la baptiser FranceTélécom!) et non son inspirateur, ce qu'il avait toujours eu tendance à être, les décrets ont placé le CNET, du jour au lendemain, sous la tutelle d'une nouvelle direction, la DAI*. Les relations entre la direction du CNET et sa nouvelle tutelle ne furent pas un long fleuve tranquille! D'autant que le titulaire de cette nouvelle direction, Jean-Pierre Souviron, n'avait pas été choisi dans le sérail, mais au Corps des Mines! Ces nouvelles relations traduisaient de fait une évolution de fond. En vérité, dès lors que la DGT abandonnait de facto le statut d'administration centrale pour se comporter et agir comme une entreprise publique, le CNET n'avait pas d'autre légitimité que d'être partie intégrante de l'entreprise, et de se mettre au service de sa stratégie.

C'est dans ce contexte qu'à partir de 1975 se pose à nouveau et de façon encore plus pressante que durant les années 60, la question des composants électroniques et plus précisément des circuits intégrés.

A cette époque les équipes système du CNET, à Issy comme à Lannion, s'efforcent de disposer des composants les plus performants existants sur le marché mondial mais elles n'ont pas à leurs côtés d'équipes de recherche en micro-électronique. Le CNET n'a de compétences technologiques que dans le domaine des composants optiques ou optoélectroniques: les équipes de Bagnex sont engagées dans des programmes à relativement long terme intéressants les futures communications optiques et les composants de visualisation. Quelques études s'achèvent à Bagnex sur le germanium ou le silicium: elles ne concernent que des composants discrets. Les compétences en micro-électronique et en circuits intégrés sont à peu près inexistantes. A Lannion, un service Fiabilité suit la qualité des composants susceptibles d'entrer dans la fabrication des matériels achetés par la DGT.

A la DGT peu de responsables ont réellement pris la mesure de la révolution que le développement ininterrompu de la micro-électronique silicium annonce. Rappelons que l'article emblématique de Robert Noyce, dans *Scientific American*, date de septembre 1977 [28]. On y trouve décrite en quelques pages toute la machinerie qui, depuis 1970, entraîne le monde entier vers des rivages nouveaux, en partie inconnus. L'article rappelle quatre données essentielles :

- 1) la loi de Moore,
- 2) la courbe d'apprentissage,
- 3) l'effondrement exponentiel du coût des fonctions de base, comme le bit de mémoire,
- 4) la courbe de l'envahissement de toutes les activités humaines par le circuit intégré.

La loi de Moore date de 1965 et la courbe d'apprentissage est une vieille connaissance, mais la machine microélectronique n'est pas encore très familière**. En 1975, les ingénieurs de la DGT, et même ceux du CNET, qui connaissent la loi de Moore, ne sont pas légion.

Le monde français de la recherche, sauf exception, ignore superbement la microélectronique. Les équipes universitaires qui s'intéressent à la science des matériaux se sont tournées en général vers les recherches de base plutôt que vers les applications. Le CEA fait exception, ignore superbement la microélectronique. Les équipes universitaires qui s'intéressent à la science des matériaux se sont tournées en général vers les recherches de base plutôt que vers les applications. Le CEA fait exception et, à Grenoble, il finance un bon laboratoire d'électronique, le LETI qui s'intéresse à la micro-électronique silicium.

Une consolation, l'enseignement supérieur sans être au niveau souhaitable, forme tous les ans, dans les écoles d'ingénieurs et dans les DEA universitaires, des diplômés de bon niveau.

Sur le marché mondial les Japonais et quelques autres dragons asiatiques montent en puissance et concurrencent durement les EU qui continuent, cependant, à dominer en matière de recherche et d'innovation.

La production de circuits intégrés en France est le fait, en dehors d'IBM qui fabrique pour ses besoins propres, d'industriels étrangers, Texas Instruments, Motorola, RadioTechnique (c'est à dire Philips). Ils ont des usines dans l'Hexagone, sans que l'on sache bien d'ailleurs ce qui est fabriqué en France et ce qui est importé. Les fabricants français se résument à Sescosem qui perd de l'argent malgré l'aide permanente des pouvoirs publics, via les plans composants successifs.

Or la DGT bénéficie d'un plan d'action prioritaire, décidé par le Président de la République lui-même (140 milliards de francs en 4 ans) et dont l'objectif est, avant la fin des années 70, de raccorder 2 millions de lignes principales par an. Les matériels commandés aux constructeurs français contiennent de plus en plus d'électronique, et donc de circuits intégrés qui seront fournis, pour l'essentiel, par des firmes étrangères.

* Les textes du 16 octobre 1974 avaient créé une DAI, direction des affaires industrielles, qui devient, quelques mois plus tard, la DAI, direction des affaires industrielles et internationales.

** La loi découverte par Moore en 1965 stipule que le nombre de composants élémentaires par circuit intégré double tous les 18 mois ; en 2004 cette loi s'applique toujours!

La courbe d'apprentissage, connue depuis plus longtemps, indique que le coût d'un produit industriel décroît de 25 à 30 % chaque fois que double la quantité cumulée produite.

La baisse annuelle du coût d'un bit mémoire stocké résulte de la combinaison des deux lois précédentes que la dissémination toujours plus grande des circuits intégrés dans les activités économiques les plus variées ne fait qu'accélérer.

Le troisième pôle du CNET à Grenoble: le centre Norbert Ségard

L'idée de lancer au CNET un programme de recherche ambitieux en microélectronique silicium est naturelle. La DGT, maintenant riche, peut dégager des moyens importants pour essayer de rattraper, au moins en partie, en quelques années, le retard pris en matière de recherche. Où planter un nouveau laboratoire CNET consacré essentiellement à la recherche en microélectronique? Une rude dialectique s'engage entre le CNET et la DAII. Lannion revendique le privilège d'abriter un nouveau centre de recherche dédié au silicium, arguant de la vocation électronique de la Bretagne! Le point essentiel, aux yeux de la DAII et de la DIELI*, au ministère de l'Industrie, est le couplage du futur centre avec les fabricants français, voire étrangers, associés au projet. Ce point est central et conditionne la réussite à long terme de tout plan de redressement.

**DIELI : direction des industries électroniques et de l'informatique.*

La DAII estimait que la région de Lannion, malgré la présence des bonnes équipes systèmes du CNET, n'avait pas les avantages incomparables que pouvaient présenter des sites comme Grenoble ou Toulouse. Dans ces deux villes on trouvait un excellent environnement en matière de recherche et d'enseignement supérieur, une très riche présence industrielle, des communications nationales et internationales fréquentes. En outre les deux villes abritaient déjà au moins un fabricant de circuits intégrés.

Accroître l'effort français de recherche dans ce domaine, grâce au futur centre du CNET dédié au silicium, c'est à dire disposer en France d'équipes de chercheurs, d'ingénieurs, de techniciens, experts en micro-électronique silicium, était indispensable, mais cette compétence ne prenait tout son sens que si elle se traduisait dans des réalités industrielles. La rencontre avec Pierre Bonelli s'est avérée primordiale. Pierre Bonelli, récemment disparu*, trop tôt lui aussi, était à l'époque Directeur général de la SEMA, société de conseil bien connue. Ayant occupé des positions importantes chez Texas Instruments, il connaissait aussi bien les problèmes techniques que le milieu industriel international.

**Pierre Bonelli est décédé le 31 mars dernier. Il avait accepté, en décembre 2001, de prendre la présidence de Bull dont il tentait, avec courage, de réussir enfin le redressement.*

Dans le courant de l'année 1976, Jean-Pierre Souvion, Directeur des affaires industrielles et internationales et Pierre Bonelli arrivent à la conclusion que la situation est favorable à des négociations avec les fabricants américains et japonais. La croissance rapide de la consommation de circuits intégrés, prévue par la DGT, doit permettre d'attirer certains d'entre eux dans des joint ventures avec des entreprises françaises.

Un marché d'études passé par la DAII à la SEMA permet à celle-ci, en quelques mois, de bâtir des scénarios précis de consommations de circuits intégrés, en fonction des commandes de la DGT en centraux téléphoniques, en péritéléphonie et en nouveaux services (en particulier le télécopieur) et déclinées selon les principales filières technologiques, n-MOS, c-MOS, bi-polaires, etc.

La DGT dispose à l'issue de ce contrat d'une arme efficace pour négocier avec les fabricants et les amener, s'ils veulent bénéficier des commandes de la DGT, à accepter diverses conditions: prise de participation de capitaux français, accord de licence avec un fabricant français, localisation des fabrications, etc. Pour mettre en route le processus un tour de table réunit une dizaine d'industriels français dans une société d'études, la SECIMOS dont Pierre Bonelli est le président.

Une question essentielle se posait au préalable : un constructeur de matériel de télécommunications pouvait-il choisir librement les composants? En ces temps de néo-colbertisme, mâtiné de protectionnisme, qui aujourd'hui nous semble appartenir à un monde disparu, la DGT se réservait le droit d'agréer ou de ne pas agréer tel ou tel composant. Là encore le CNET et la DAII divergeaient. Pour les ingénieurs du centre de fiabilité de Lannion, l'agrément n'était qu'un acte technique : les experts se rendaient chez les fabricants de composants, inspectaient les installations, se faisaient montrer les mesures de taux de défauts et rendaient leur verdict. Pour la DAII la complexité croissante des chaînes de fabrication de circuits intégrés devait conduire à exécuter des contrôles techniques beaucoup plus rigoureux et à agréer, non des composants, mais des filières. Et surtout l'agrément, pour être un acte politique efficace, devait être prononcé par une autorité disjointe de l'expertise technique. A cette époque la société américaine National Semiconductors avait éprouvé quelques déboires avec une certaine gamme de circuits. Les experts du CNET n'avaient pas très envie de sanctionner un industriel valeureux, qui ne "manquerait pas de s'améliorer". La DAII sans état d'âme retira l'agrément du fabricant. Ce fut un beau tapage, au CNET et dans le monde des circuits intégrés. Exactement ce que nous souhaitions pour rendre l'arme de l'agrément crédible en prévision des futures négociations.

La création d'un nouveau centre consacré à la recherche en micro-électronique silicium soulevait bien d'autres problèmes que celui de sa localisation.

En premier lieu il fallait que le principe même en soit acquis au niveau le plus haut: convaincre donc plusieurs structures administratives et éviter les embûches de certains lobbies. Le Directeur des affaires industrielles et internationales, Jean-Pierre Souvion, le Directeur général des télécommunications, Gérard Théry, s'y employèrent et grâce aux relations qu'ils entretenaient avec les divers conseillers techniques, tout se passa au mieux. Ces conseillers constituaient un réseau d'une exceptionnelle qualité où l'information circulait fort bien*.

**Citons en particulier, Polge de Combret à l'Elysée, Olivier Costa de Beauregard à Matignon, Philippe Pontet, le directeur de cabinet du ministre des PTT, Hervé Nora, conseiller technique.*

Deux obstacles étaient à redouter : l'opposition de la DATAR et l'éventualité d'une pression électoraliste : un député, ou pis un ministre, revendiquant pour sa circonscription la manne des emplois de haut niveau attendus!

Dès le 23 mai 1977, le Conseil économique et social avait décidé :

- la création d'une mission interministérielle pour les circuits intégrés,
- la création d'un troisième centre du CNET consacré à la recherche sur les circuits intégrés (aucune localisation n'était mentionnée),
- l'affectation de 120 MF au profit d'actions industrielles en microélectronique.

Pour convaincre les différentes instances compétentes, la DAII avait préparé un dossier qui écartait la solution bretonne et comportait une comparaison raisonnée des avantages et des inconvénients de quatre sites de province: Grenoble, l'Isle d'Abeau, Montpellier et Toulouse. Une note de synthèse montrait que deux sites se détachaient nettement, Toulouse et Grenoble. Et entre ces deux villes Grenoble apparaissait comme l'implantation la plus favorable à ce que nous pensions être l'intérêt général (voir annexe 1).

Le conseil interministériel du 20 décembre 1977 décide la création d'un troisième pôle du CNET à Grenoble. Cette décision de caractère industriel et politique, avait été prise, pour une fois, sur des critères strictement rationnels. Le fait, assez rare en lui-même, mérite d'être noté.

En 1978 la DAII et le CNET prennent, dans ce domaine, deux décisions importantes.

Michel Camus, directeur du secteur composants du CNET est nommé, début 1978, directeur du futur centre de Grenoble (il le restera jusqu'en 1990). D'autre part la DGT acquiert un terrain sur la ZIRST* de Meylan dans la banlieue de Grenoble.

**ZIRST: Zone industrielle pour la recherche scientifique et technique.*

Le LETI, laboratoire du CEA, implanté depuis les années 50 sur le site du CENG, le centre d'études nucléaire de Grenoble (créé après la guerre par Louis Néel) était consacré à l'électronique avec quelques compétences en micro-électronique. Il vivait en partie des crédits du CEA mais devait les compléter par des ressources sur contrats. L'irruption de la DGT dans un domaine technologique où le LETI détient une position significative est pour lui, tout à la fois, un motif de satisfaction, "la microélectronique enfin reconnue pour une technologie essentielle pour l'avenir", et une raison de redouter l'arrivée d'un concurrent, encore incompetent, mais riche et ambitieux! Le CEA propose très vite à la DAI de louer au CNET un terrain sur le site du CENG. Une des raisons qui avait fait choisir Grenoble était précisément l'existence du LETI (Annexe 1). Il ne paraissait pas très judicieux qu'une autre ville abrite un laboratoire qui serait vite apparu comme un concurrent du LETI et qu'ainsi, entre deux laboratoires, deux institutions, deux ministères, s'exacerbe peu à peu une lutte stérile. Si concurrence il devait y avoir nous avons la faiblesse de penser qu'elle serait plus facilement canalisée dans la même ville. Mais de là à ce que le CNET soit un sous-locataire du LETI il y avait un pas! La DGT fit rapidement l'acquisition d'un terrain de plusieurs hectares sur la ZIRST de Meylan et dès juillet 1978 Michel Camus s'installa à Meylan dans des locaux provisoires.

Les nombreuses discussions qui s'étaient tenues depuis plus d'un an entre Jean Pollard, Robert Veilex, Pierre Bonelli et ses collaborateurs, la direction et les experts du CNET avaient permis à Jean Pierre Souviron, Michel Camus et moi de nous faire une idée claire (mais peut-être simpliste?) de la mission du futur centre. Il lui fallait se limiter à la microélectronique silicium, pour éviter la dispersion, remonter dans les recherches amont aussi loin que nécessaire et aller vers l'aval jusqu'à la création d'un atelier-pilote qui semblait indispensable pour que les chercheurs touchent du doigt les problèmes concrets et aussi pour faciliter les transferts ultérieurs à des industriels. Une assistance informatique puissante, à la conception comme à la conduite des process, nous paraissait prioritaire. Acquérir en France des compétences dans le domaine des machines correspondant aux différentes étapes de fabrication ne devait pas être négligé.

Il était urgent, à nos yeux, de construire des bâtiments définitifs. Nous souhaitions marquer les esprits par la qualité de l'architecture et sa technicité mais aussi par l'esthétique et le symbole. Un concours d'architecture est lancé et le jury se réunit à deux reprises, les 13 et 28 juillet 1978. Le projet Herbert eut sans peine la faveur du jury. Ses modules accolés symbolisaient la répétition du motif cristallin constituant le silicium dont la couleur bleue métallique se retrouvait dans les façades faites de métal et de verre teinté. La qualité du projet Herbert nous parut si évidente que Gérard Théry souhaita que nous demandions à l'Élysée de choisir entre les six projets finalistes. Le Président Giscard d'Estaing voulut bien ratifier nos préférences!

La première pierre est posée le 13 novembre 1979 en présence de Norbert Ségard*, l'inauguration est présidée par le nouveau Secrétaire d'État aux PTT, Pierre Ribes.

** Norbert Segard était décédé quelques mois auparavant*

Les premières équipes qui avaient travaillé dès juillet 1978 dans les locaux provisoires loués à Meylan ont eu, dès le début, un esprit pionnier inspiré par Michel Camus. Celui-ci a eu le grand mérite de réunir autour de lui des équipes rapidement importantes et d'un excellent niveau.

La nouvelle donne industrielle en matière de circuits intégrés.

Parallèlement à l'effort interne auquel le Gouvernement conviait le CNET, se déroulaient de grandes manœuvres industrielles. Aujourd'hui, d'autres orateurs après moi y reviendront. On peut les résumer ainsi jusqu'en 1981 :

- la plupart des fabricants américains approchés se sont montrés favorables à l'idée de pouvoir vendre leurs circuits intégrés aux constructeurs français de matériels achetés par la DGT. Pour cela ils étaient prêts à développer ou à créer des capacités de production, éventuellement en joint-venture avec des entreprises françaises. Tout était dans les conditions que les pouvoirs publics chercheraient à imposer. Au contraire les fabricants japonais, NEC, par exemple, n'ont jamais donné le sentiment d'être prêts à des négociations autres que commerciales.

- peu d'industriels français ont été réellement intéressés à investir dans des joint-venture en microélectronique. Les uns, comme la CGE, ne s'intéressaient qu'aux circuits intégrés à la demande ou ne souhaitaient pas s'éloigner de leur métier de base, les autres n'étaient pas prêts, matériellement ou intellectuellement, à investir lourdement dans la microélectronique. Parmi les entreprises intéressées figuraient Schlumberger, Saint Gobain et Matra.

- les cibles les plus attrayantes, comme Texas ou Intel, étaient déjà devenues des sociétés trop puissantes pour s'engager, dans la collaboration, très au-delà d'accords de licence plus ou moins favorables. D'autres, comme Mostek, National semiconductors ou Harris, se montraient plus intéressées.

- Schlumberger approchera Mostek avec, dit-on, trop peu de modestie pour réussir! Après ce pas de clerc le groupe franco-américain pensera se rattraper avec Fairchild qui sera rachetée au mauvais moment... l'échec coûtera son poste à son président, Michel Vaillaud.

- Pour National Semiconductor le flirt avec les Français ira très loin. Saint Gobain ne souhaitait pas rester entièrement liée aux tuyaux de fonte de Pont à Mousson et cherchait à se diversifier hors du verre. La question avait été évoquée lors d'un déjeuner auquel Roger Martin et Roger Fauroux avaient invité Jean-Pierre Souviron et moi. Le siège de la maison tricentenaire n'avait pas encore été transporté à La Défense et la salle à manger avait une vue splendide sur la Place de l'Étoile*.

** Jean-Pierre Causse, directeur scientifique de Saint-Gobain, a gardé le souvenir de ce déjeuner. Il se souvient que le 30 mai 1978, avec Christian Dambrine, on avait aussi évoqué le développement des fibres optiques chez Quartz et Silice*

Non moins splendide nous semblait devoir être la renaissance de la microélectronique française si elle pouvait s'adosser à ce groupe industriel, riche, et qui pariait sur la science des matériaux et ses applications. De fait le mariage franco-américain accouche bel et bien d'un enfant viable. Eurotechnique, joint-venture entre National SC et Saint Gobain, voit le jour. La nouvelle société construit une usine moderne à Aix-en-Provence qui sera inaugurée en juillet 1981 alors que le vent politique a déjà tourné. Saint Gobain sera peu après "interdit d'électronique"!

- Matra fait affaire avec Harris, une entreprise américaine de taille moyenne mais de technologie très avancée dans la filière c-MOS, celle justement qui se révélera la plus performante.

* *
*

Aujourd'hui, que reste-t-il de toutes ces entreprises? Bien des années après les évènements que je viens d'évoquer, le paysage s'est éclairci. Voici venir le temps des historiens. Il est probablement encore trop tôt pour qu'ils puissent juger des hommes, de leurs idées et de leurs actes de l'époque. Mais il est temps, me semble-t-il, de comprendre les enchaînements des faits, d'examiner les conséquences des décisions, de constater succès ou échecs. C'est ce que, modestement, cette introduction à la journée Jean-Pierre Noblanc essaye de faire à propos de certains des évènements que j'ai vécus.

Un certain "Bagneux", celui que j'ai connu, comme nombre de collègues, a existé près de trente ans de 1969 à 1998. Qu'en reste-t-il aujourd'hui? Rien en vérité. Les locaux ont maintenant une toute autre destination. Les activités de recherche qui, dans les années 90, en faisaient encore la réputation nationale et internationale ont laissé la place à des problèmes nouveaux, les équipes sont dispersées.

Le centre Norbert Segard, tel qu'avec quelques collègues et amis nous l'avions conçu, tel que le Gouvernement de l'époque l'avait décidé et mis en œuvre, n'est plus. Les bâtiments sont toujours là, aussi séduisants dans le paysage grenoblois qu'à leur naissance, mais la microélectronique silicium s'en est allée, ailleurs, à Crolles, ou plus loin.

Il serait erroné d'en tirer une conséquence pessimiste, de penser que ces aventures ont été des erreurs, des impasses que l'on aurait mieux fait de ne pas emprunter. Bien au contraire, pour qui veut bien se donner la peine de regarder autour de soi, il est évident que, dans le cas de Bagneux, comme dans celui de Meylan, de très nombreux chercheurs, ingénieurs et techniciens ont apporté ailleurs des compétences qui n'auraient pas existé sans eux et ont fécondé d'autres terrains. Dans les deux cas on observe un phénomène de diaspora dont les bénéfiques l'emportent largement sur les inconvénients.

On pourrait en toute rigueur objecter qu'il est nécessaire d'établir un *bilan détaillé* avant d'affirmer sur le vu d'impressions trop globales, que le solde est positif. Là encore, de façon générale, il me semble que les diasporas de cette nature, la fécondation de certains champs techniques, l'essaimage scientifique sont, pour les historiens, voire les sociologues, autant de sujets d'études trop peu étudiés en France.

D'où une ultime remarque sur le rôle des historiens des sciences, des techniques et des entreprises en France. Dans ce domaine notre retard sur les autres pays développés est considérable. Pis, ce retard ne semble pas se réduire avec le temps. Trop peu de spécialistes, pas assez d'intérêt du grand public et des médias pour ces questions, désintérêt des entreprises et des pouvoirs publics pour la conservation des archives et pour l'histoire, etc. Comparée à celle des autres pays avancés la situation en France est médiocre. Dans cette exception culturelle dont personne ne parle, la liste de nos "manques" semble sans fin. Pourtant l'accélération du monde rend ce devoir de mémoire encore plus impérieux. Je répète, le temps des historiens est là.

Bibliographie

- [1] Catherine Bertho, *Télégraphes et téléphones, de Valmy au microprocesseur*, Le livre de poche, 1981.
- [2] Helga Kragh, un transfert de technologie: l'introduction du téléphone aux EU et en Europe, *Les cahiers Télécommunications, Histoire et société*, semestriel publié par FranceTélécom, N°1, 1995.
- [3] Maurice Bernard, Les premières années de recherche sur les semiconducteurs et les "transistrons" au CENT (1946-1956), *Histoire, Recherche, Télécommunications, des recherches au CNET, 1940-1960*, chap 6, page 149 à 159.
- [4] Antonio José Botelho, the industrial policy that never was french semiconductor policy, *1945-1966, History and technology*, 1994, vol 11, p.165-180, Harwood Academy Publisher, GmbH.
- [5] François Jacq, Pratiques scientifiques, formes d'organisations et conceptions politiques dans la France d'après-guerre. La politique de la Science comme énoncé collectif (1944-1962), École nationale supérieure des Mines de Paris, *thèse de doctorat*, 1996.
- [6] Christian Licoppe, Les premières années de recherche sur les semiconducteurs et les "transistrons" au CNET, (1946-1956), *Histoire, Recherche, Télécommunications, des recherches au CNET, 1940-1960*, chap 5, page 125 à 147.
- [7] Georges Petit-Le Du, Quelques souvenirs du début des études sur les matériaux semi-conducteurs dans l'Administration des PTT, 1997, *non publié*.
- [8] Michael Riordan et Lillian Hoddeson, *Crystal Fire, The Invention of the Transistor and the Birth of the Information Age*, WW. Norton & Company, New-York London
- [9] Pierre-Eric Mounier-Kuhn, *Les ingénieurs militaires et l'émergence d'une nouvelle industrie française de l'armement, 1945-1960*, CNRS, 2002.
- [10] William Shockley, the theory of p-n junctions, *Bell Syst. Techn. J.* 28, 435-489 (1949)
- [11] William Shockley, *Electrons and Holes in Semiconductors*, D. Van Nostrand, 1950.
- [12] Frederick Seitz, *Modern Theory of Solids*, McGraw Hill, 1940.
- [13] Charles Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, John Wiley & Sons
- [14] Maurice Bernard, étude des phénomènes de recombinaison et de génération dans les jonctions de germanium p-n, *thèse de doctorat ès sciences*, Paris, 1958.
- [15] Rencontres avec Pierre Aigrain (2001/2002) présentées par Ludivine Bantigny et Pierre Baruch, ENS, *rapport interne*
- [16] Entretien de Maurice Bernard avec Natalia Lebedeva, 1995, *non publié*.
- [17] A.H. Wilson, *Proc. Roy. Soc.*, 277, 1931.
- [18] Jacques Friedel, *Graine de mandarins*, Odile Jacob, Paris, 1994.
- [19] LUFO, la lampe qui parle, *Prix Altran de l'innovation 2002*.
- [20] Dominique Pestre, le renouveau....
- [21] Albert Messiah, *Mécanique quantique*, Dunod, Tome I (1958), tome II (1960)
- [22] René Sueur, le transistor triode PTT 601, *L'Onde électrique*, nov 1949, p.389.
- [23] Entretien d'Emmanuel Franke avec Maurice Bernard, 1995, *non publié*.
- [24] Georges Duraffourg, l'émission induite dans les semiconducteurs, *thèse de doctorat ès sciences*, Paris, 1965.
- [25] P.A. Franken, A.E. Hill, C.W. Peters and G. Weinrich, *Phys. Rev. Letters*, 7, 118 (1961)
- [26] Armstrong J.A., Bloembergen N., Ducuing J. and Pershan P.S., *Phys. Rev.* 127, 1918 (1962)
- [27] Manley J.M. and Rowe H.E., *Proc. I.R.E.* 44, 904 (1956)