



Science in the making 2 : From 1940 to the early 1980s / *La science en mouvement 2 : de 1940 aux premières années 1980*

Les débuts du laboratoire Pierre-Aigrain

The beginning of Pierre Aigrain's laboratory

Julien Bok^a, Albert Zylbersztein^b

^a Ancien directeur du groupe de physique des solides de l'École normale supérieure, Paris, France

^b Ancien directeur du laboratoire d'optoélectronique du Cnet, Bagnex, France



INFO ARTICLE

Historique de l'article :

Disponible sur Internet le 20 août 2019

Mots-clés :

Pierre Aigrain
Semiconducteurs
Transistor
Circuits intégrés
Diodes électroluminescentes
Supraconducteurs

Keywords:

Pierre Aigrain
Semiconductors
Transistor
Integrated circuits
Light-emitting diodes
Superconductors

R É S U M É

Nous décrivons la naissance et les débuts du groupe de physique des solides de l'École normale supérieure (ENS). Le directeur du laboratoire de physique de l'ENS, Yves Rocard, avait compris l'importance des semiconducteurs pour l'avenir de l'électronique et recruté un jeune Français, Pierre Aigrain, qui venait d'obtenir un *PhD* en *electrical engineering* au Carnegie Tech. Les premiers domaines explorés se sont révélés très importants pour les futures applications : propriétés optiques, phénomènes de transport, nouveaux composés semiconducteurs. Plus tard, de nouveaux domaines ont été développés, comme les supraconducteurs, la spectroscopie par effet tunnel, la turbulence et le chaos en hydrodynamique, les propriétés de ⁴He liquide superfluide et solide. Le laboratoire a toujours entretenu des relations étroites avec l'industrie, et de nombreux chercheurs du labo ont contribué au développement de la recherche en physique du solide dans des entreprises privées et des centres de recherches publics, et en particulier à la création du premier fabricant européen de circuits intégrés en silicium.

© 2019 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Cet article est publié en Open Access sous licence CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

A B S T R A C T

We describe the birth and growth of the Solid State laboratory at "École normale supérieure", Paris. The director of the Physics Department, Yves Rocard, understood the importance of semiconductors for the future of electronics and recruited a young Frenchman, Pierre Aigrain, who had just received a *PhD* from Carnegie Tech. The first domains explored proved to be very important for future applications: optical properties, transport properties, new semiconductor compounds. Later new fields were developed such as superconductors, tunnel effect spectroscopy, turbulence and chaos in hydrodynamics, properties of superfluid and solid ⁴He. The laboratory had strong relationships with industry and many members of the lab contributed to the development of solid-state physics and technologies in private companies and government research centers, and also to the creation of a European manufacturer of silicon integrated circuits.

© 2019 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Cet article est publié en Open Access sous licence CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Adresse e-mail : julien.bok@orange.fr (J. Bok).

<https://doi.org/10.1016/j.crhy.2019.07.002>

1631-0705/© 2019 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Cet article est publié en Open Access sous licence CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. À l'origine

La physique française avait été pratiquement détruite pendant la Seconde Guerre mondiale. À la Libération, tout était à reconstruire. L'École normale supérieure avait, depuis toujours, fourni d'éminents physiciens, à savoir Jean Perrin, Paul Langevin, Louis Néel, etc. Un bâtiment tout neuf avait été inauguré rue Lhomond en 1937, mais en 1944 ses premiers directeurs, Henri Abraham, Eugène Bloch et Georges Bruhat sont morts en déportation dans les camps de concentration. Les deux premiers parce qu'ils étaient juifs, et le troisième parce qu'il abritait des résistants.

En 1945, Yves Rocard [1] est nommé directeur du laboratoire, et son ambition est de relancer son potentiel scientifique. Il sut attirer des scientifiques de talent dans des domaines qui se sont révélés essentiels pour l'avenir de nos sociétés. Citons Alfred Kastler pour la physique atomique, qui a conduit aux lasers et aux horloges atomiques indispensables pour le GPS, Jean-François Denisse pour la radioastronomie, Hans von Halban pour la physique nucléaire et des particules. Ces deux derniers domaines, nécessitant de gros instruments, sont partis à Nançay et à Orsay.

Yves Rocard avait travaillé à la Radiotechnique, une entreprise industrielle où il avait participé à la construction de nouveaux tubes électroniques comme la pentode. Parti en Angleterre pendant la guerre, il avait vu l'apparition des premiers dispositifs à semiconducteurs – c'étaient des détecteurs infrarouges au sulfure de plomb – et il avait compris leur potentiel de développement. Il avait conservé des liens privilégiés avec la Compagnie générale de TSF (CSF) dirigée par Maurice Ponte, son camarade de promotion. L'invention du transistor par trois physiciens des Bell Telephone Laboratories a été une avancée décisive. Le transistor a remplacé le tube électronique triode qui comportait un filament chauffé au rouge pour émettre des électrons dans le vide. Le transistor, qui consomme de mille à un milliard de fois moins d'énergie, a permis la miniaturisation des circuits électroniques.

On est passé de dimensions de l'ordre du millimètre au micromètre – c'est la microélectronique – au nanomètre (nanoélectronique). Rappelons que le premier ordinateur construit aux États-Unis pour le projet Manhattan (bombe atomique) contenait 2000 tubes électroniques et était situé dans un grand hangar ventilé en raison du dégagement de chaleur. Les derniers smartphones contenant plus d'un milliard de transistors dans leur microprocesseur et tenant dans notre poche sont donc un million de fois plus puissants.

Yves Rocard voulait qu'un jeune élève normalien s'engage dans la physique des semiconducteurs. Il l'a trouvé en la personne de Claude Dugas. Il a appris la physique des solides dans l'ouvrage de référence de Frederick Seitz, *Modern Theory of Solids*, qu'il a traduit en français. À sa sortie de l'École, il est parti à Pittsburgh dans le laboratoire de Seitz pour y faire un stage. Là, il rencontre un jeune officier de marine français, Pierre Aigrain [2]. Seitz décrit très bien les circonstances de son arrivée aux États-Unis :

« I first met Pierre in Pittsburgh, Pennsylvania in 1946, immediately after the end of World War II, when he was twenty-two years of age. He had been a French Naval Cadet and was sent to United States, along with about two hundred other cadets, first to study at Norfolk, Virginia and then for naval flight training at Memphis, Tennessee. A relatively small fraction of the group were judged to be better suited for other forms of specialization and, through the action of Captain Guignonis who later became a high executive of the Thompson-CSF Corporation, were admitted to the Carnegie Institute of Technology for study toward a Master's degree. This special segment proved for the most part to be exceptionally successful in their later careers, which included involvement in areas such as technology, administration and politics. »

Pierre decided to focus his immediate attention on the advances in electrical engineering and electronics that had occurred as a result of wartime research and joined the Department of Electrical Engineering. He proved to be sufficiently outstanding as an investigator that Professor F. M. Williams, who served as his friend and brilliant mentor, arranged for him to receive a fellowship that allowed him to carry on the research and study required to receive a Doctor's degree. »

Pierre a effectivement soutenu une thèse en *electrical engineering* au Carnegitech, mais il a toujours su conserver d'étroites relations avec le département de physique, dirigé par Seitz. Ce dernier l'a chaudement recommandé et il a reçu de nombreuses propositions de grands laboratoires américains. Mais Claude Dugas a su le convaincre qu'il avait un grand avenir en France et qu'il le recommanderait chaudement à Rocard.

Pierre revint en France et passa une thèse de doctorat d'État sur la physique du transistor en 1950. Yves Rocard proposa alors à Aigrain et Dugas de créer un laboratoire de physique des solides à l'ENS. En 1952, Claude Dugas a rejoint la CSF à la demande de Maurice Ponte pour y prendre la direction d'un laboratoire d'études des semiconducteurs. Ce qui montre, dès le départ, les étroites relations du laboratoire Aigrain avec l'industrie.

2. Semiconducteurs

En raison de leurs nombreuses applications, les semiconducteurs [3] ont une importance considérable. L'invention du transistor en 1947 permet de remplacer le tube électronique, ce qui entraîne une énorme économie d'énergie, et la miniaturisation des dispositifs ouvre la voie à l'intégration. Les circuits intégrés au silicium constituent les composants essentiels des ordinateurs, des téléphones portables, des tablettes, etc. Les technologies actuelles permettent une densité d'intégration impressionnante : le processeur A11 de l'iPhone 8 contient plus de 4 milliards de transistors sur une puce de moins de 1 cm².

Les semiconducteurs permettent également de réaliser des dispositifs optiques performants, tels que les puces lasers et les photodétecteurs pour les télécommunications, les LED (*light-emitting diodes*) pour l'éclairage, les piles photovoltaïques pour la conversion du rayonnement solaire.

Le semiconducteur typique est le silicium. Les liaisons entre deux atomes de Si voisins sont covalentes, c'est-à-dire que la liaison est formée de deux électrons mis en commun. L'atome de Si possède quatre électrons de valence. Tous ces électrons participent aux liaisons chimiques.

Il faut une énergie E_G de l'ordre de l'électron-volt pour arracher un électron à ces liaisons. Les électrons de valence forment une bande d'énergie pleine (ou bande de valence, BV), et les électrons de valence étant tous fortement liés, ils ne peuvent pas se déplacer et ne donnent lieu à aucun courant électrique. Les semiconducteurs sont isolants à basse température. Si une énergie supérieure à E_G est fournie, une liaison est détruite, et l'électron se retrouve dans une bande d'énergie vide, la bande de conduction (BC), dans laquelle, ainsi libéré, il peut se déplacer et provoquer un courant électrique. Il laisse une place libre dans la bande de valence, et les autres électrons de cette bande peuvent se déplacer de proche en proche. Il est plus simple de suivre le déplacement de cette place vide. On introduit ainsi la notion de **trou**, particule de charge positive $+e$. Le courant électrique total est alors la somme des courants des électrons et des trous qui se déplacent en sens inverses. Le Si devient alors faiblement conducteur, d'où son appellation de semiconducteur. La bande de valence et la bande de conduction sont donc séparées par une bande d'énergie interdite (*gap* en anglais).

Les semiconducteurs les plus utilisés sont :

- le germanium (Ge) qui a rapidement cédé la place au silicium (Si) dans les applications microélectroniques (circuits intégrés); tous deux possèdent quatre électrons de valence et appartiennent à la colonne IV du tableau de Mendeleïev;
- les composés III–V comprennent un élément de la colonne III (Ga, In...) et un élément de la colonne V (As, P, Sb...) du tableau de Mendeleïev, comme GaAs, GaP, InP, InSb et leurs alliages (composants optoélectroniques pour les communications par fibre optique);
- les composés II–VI, comme ZnTe, CdS, etc.

Il existe plusieurs façons de fournir l'énergie $E_G = E_C - E_V$ et donc de transférer un électron de BV à BC. Voici ces moyens :

- la température, si $k_B T$ n'est pas trop petit par rapport à E_G , le facteur de Boltzmann $\exp\left(-\frac{E_G}{k_B T}\right)$ n'est plus négligeable et quelques électrons sont transférés dans BC, laissant ainsi des places vides, une paire électron–trou est créée, permettant de produire un courant électrique. Le semiconducteur est dit intrinsèque;
- des photons d'énergie $h\nu > E_G$ peuvent être absorbés si leur énergie est suffisante pour extraire un électron de BV et l'envoyer dans BC;
- certaines impuretés (c'est le dopage du semiconducteur) peuvent apporter des électrons supplémentaires ou laisser des places vides. Par exemple, si dans le cristal on substitue un atome de Si par un atome d'arsenic (As), qui possède cinq électrons de valence (le semiconducteur est alors dit de type n), alors quatre électrons participent aux liaisons chimiques. Le cinquième électron est faiblement lié à l'ion As^+ , il peut facilement être excité, se retrouver dans BC et se déplacer. Si c'est le bore (B) qui remplace le silicium (le semiconducteur est dit de type p), il n'apporte que trois électrons de valence, et peut capter un quatrième élément dans BV pour assurer les liaisons chimiques, et ainsi laisser une place vide permettant aux électrons de la bande de valence de se déplacer et donc de conduire un courant électrique.

Un dispositif semiconducteur qui est constitué de deux régions accolées, l'une de dopage n et l'autre de dopage p, constitue une jonction p–n, et celle-ci présente une barrière de potentiel à l'interface des deux régions. Une tension appliquée permet d'abaisser ou d'augmenter la hauteur de cette barrière et la jonction p–n se comporte en redresseur de courant. Lorsqu'une telle jonction est illuminée, les photons créent des paires électrons–trous qui génèrent un courant électrique. Cette propriété est mise à profit dans les *piles photovoltaïques*, où le flux lumineux solaire induit ce courant. Le rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique pour une cellule photovoltaïque dépend du matériau et de la structure utilisée. Les cellules en silicium monocristallin constituent 90% du marché des panneaux solaires, avec un rendement au niveau de la cellule pouvant atteindre 24%. Le silicium polycristallin atteint 20%, et le silicium amorphe passivé à l'hydrogène 12%. L'arséniure de gallium (GaAs) permet la réalisation de cellules avec un rendement de 29%; le coût de ces cellules explique leur limitation aux applications spatiales.

En accolant deux jonctions p–n, soit une structure n–p–n, on constitue un transistor. Une variation de tension appliquée à la région p (appelée la base du transistor) permet de faire varier le courant entre les deux régions n (appelées émetteur et collecteur) : on a les propriétés d'une triode. La mise en série d'un transistor n–p–n et d'un transistor p–n–p se comporte comme un interrupteur : ce dispositif a longtemps constitué la base de la logique des circuits intégrés des *microprocesseurs*. Cette technologie a ensuite laissé la place à l'intégration dite CMOS, basée sur le transistor MOSFET (metal-oxyde-semiconductor field-effect transistor), où une électrode métallique (la grille) est déposée sur le silicium recouvert d'une mince couche isolante de silice, le courant dans le canal silicium sous-jacent étant modulé par la tension appliquée à la grille. En appliquant une différence de potentiel sur la grille, on ferme le canal et le courant ne passe plus. On obtient ainsi deux états : le courant ne passe pas, état 0; le courant passe : état 1. L'élément de base de la logique CMOS est constitué par deux MOSFET, l'un de canal n et l'autre de canal p. Le gros avantage de cette approche tient au fait que l'élément logique ne dissipe de l'énergie que pendant qu'il bascule de l'état 0 (ou 1) à l'état 1 (ou 0).

Tableau 1
Domaine spectral des semiconducteurs.

Couleur	longueur d'onde λ (nm)	semiconducteur
Infrarouge	$\lambda > 760$	GaAs et GaAlAs
Rouge	$610 < \lambda < 760$	GaAlAs et GaAsP
Jaune	$570 < \lambda < 590$	GaAsP
Vert	$500 < \lambda < 570$	GaN
Bleu	$450 < \lambda < 500$	ZnSe et InGaN

Si le silicium s'est imposé pour les circuits intégrés microélectroniques et les applications photovoltaïques, ce sont les composés III–V qui ont permis le développement de l'optoélectronique. En effet, les transitions optiques entre bande de valence et bande de conduction (par absorption ou émission d'un photon d'énergie égale ou supérieure au gap) sont dépendantes de la structure de bande du semiconducteur. Dans le silicium, le gap dit indirect ne permet une transition optique que si se produit simultanément un échange d'énergie entre l'électron concerné et une autre excitation du système, comme les quanta de vibration du réseau cristallin, par exemple. Les transitions optiques sont donc beaucoup moins favorables que dans un semiconducteur à gap dit direct, où le système est comparable à un système atomique à deux niveaux distants de l'énergie du gap. Dans ce cas, l'effet laser s'obtient par inversion de population entre les deux niveaux, comme dans un gaz atomique, par pompage optique ou par forte injection des porteurs de charge (électrons et trous).

Les LED (light-emitting diodes) utilisent ce phénomène de recombinaison radiative des porteurs dans une jonction p–n polarisée en direct, où des électrons sont injectés dans la région de type p et des trous sont injectés dans la région de type n. Un électron, dans la région p, trouve des trous, c'est-à-dire des places libres dans BV. Il peut donc descendre dans cet état quantique vide et émettre un photon d'énergie de l'ordre du gap. Les diodes p–n polarisées en direct sont donc émettrices de lumière (lumière de recombinaison électron–trou), on les appelle « diodes électroluminescentes ». Ces LED sont actuellement très utilisées en éclairage, par exemple pour les écrans de téléviseurs ou d'ordinateurs, les guirlandes décoratives, les lampes de poche, etc. Pour varier la fréquence d'émission, il faut utiliser différents semiconducteurs possédant des gaps différents ; une panoplie non exhaustive de ces semiconducteurs est présentée dans le Tableau 1 ci-dessous.

Une condition de la réalisation d'un laser à semiconducteur est la possibilité de maintenir la lumière au sein de la population d'électrons et de trous, afin de favoriser au mieux le phénomène d'émission stimulée. Dans une jonction p–n, c'est la jonction elle-même qui joue le rôle de guide d'onde le long de l'interface, son indice étant légèrement différent de celui du matériau semiconducteur du fait de la présence d'une forte population des deux types de porteurs de charge au voisinage de l'interface de la jonction p–n. Les premiers lasers à jonction p–n transformaient ce guide d'onde en cavité résonnante par clivage des deux facettes perpendiculaires à l'interface p–n. Dans les générations actuelles de puces laser, la cavité résonnante est la puce toute entière (*distributed feedback laser*, laser DFB), ce qui permet d'abaisser considérablement le courant de seuil du laser et d'augmenter la puissance émise au-delà du seuil. Le laser d'un émetteur-récepteur de fibre optique installé chez le client de l'opérateur (FTTH, *fiber to the home*) permet un débit de 1,25 Gbit/s à la longueur d'onde d'émission de 1490 nm et émet une puissance optique de 3 dBm sous une tension de l'ordre de 3 V. C'est l'un des composants essentiels de la technologie d'un réseau GPON (*gigabit passive optical network*), tel qu'en cours de généralisation dans le monde, en France en particulier.

3. Les débuts du groupe de physique des Solides (GPS)

Pierre arrivait tous les matins au labo avec plein d'idées originales, parfois farfelues. Il fallait faire un tri. Mais il était très accommodant et nous laissait une grande liberté. Finalement ses choix se sont révélés très judicieux. Quatre domaines principaux ont été développés.

3.1. Propriétés optiques des semiconducteurs et lumière de recombinaison

La recombinaison d'un électron et d'un trou permet l'émission d'un photon, dont la fréquence f est donnée par la formule de Planck $\Delta E = hf$, où la différence d'énergie ΔE est de l'ordre du gap du semiconducteur. Une méthode simple pour obtenir cet effet est d'injecter des électrons dans une région dopée p au moyen d'une diode n–p. C'est une diode électroluminescente (LED, *light-emitting diode* en anglais). Claude Benoît à la Guillaume [4] a réalisé les premières expériences avec le germanium. Il a publié ses résultats au congrès de Bruxelles en 1958. Il compte parmi les pionniers des LED. Le germanium n'était pas le meilleur matériau, car il émet dans l'infrarouge et le rendement est mauvais en raison d'autres mécanismes de recombinaison non radiatifs dus à sa structure de bandes particulières. Les semiconducteurs III–V, comme GaAs, GaP, etc., se sont révélés beaucoup plus efficaces.

À cette occasion, Pierre Aigrain a apporté une contribution fondamentale. Il a montré, théoriquement, qu'une injection suffisamment intense d'électrons dans une zone p pouvait conduire à une inversion de population (plus d'électrons que de trous) et donc à l'effet laser. Cette idée a conduit à la réalisation de diodes lasers semiconductrices en GaAs, par exemple. Malheureusement, et malgré l'insistance de ses collaborateurs, il n'a jamais publié cette contribution dans une revue scientifique. Dommage ! Il aurait peut-être partagé le prix Nobel.

L'équipe de Benoît à la Guillaume s'est développée et a apporté bien d'autres contributions importantes. Citons l'étude des excitons. Un électron et un trou peuvent former un état lié, analogue à un atome d'hydrogène, c'est un exciton. À forte densité, ces excitons peuvent se condenser en une goutte d'électrons et de trous. Benoît à la Guillaume, Michel Voos et Frank Salvan [5] ont mis en évidence cette transition de phase. Cette découverte a eu un grand retentissement international.

Minko Balkanski, [6] chercheur d'origine bulgare, est arrivé au laboratoire à la fin des années 50. Il a développé l'étude des cristaux par des méthodes spectroscopiques, la diffusion de la lumière et l'effet Raman. Ses principaux résultats concernent la diffusion par les excitons, le couplage électron-phonon et l'étude des surfaces. Ces résultats ont été reconnus mondialement et il a eu de nombreuses collaborations avec des universités étrangères. Il a également contribué à l'enseignement de la physique des semiconducteurs. Son équipe a grossi et s'est transférée à Jussieu en 1969. Ce laboratoire est bien connu pour la diffusion Raman, prise en charge par son élève Sébenne, et l'étude des solides sous très haute pression grâce à une enclume diamant (Jean-Michel Besson).

3.2. Phénomènes de transport

La thèse de Julien Bok portait sur l'étude des électrons chauds [7] dans les semiconducteurs. C'était une idée de William Shockley. À très fort champ électrique, l'énergie fournie aux électrons n'est pas retransmise entièrement au réseau cristallin par émission de phonons (ondes sonores). Les électrons forment un gaz à température plus élevée que celle du réseau. Cette étude a été poursuivie au labo par une équipe dirigée par Albert Zylbersztejn, particulièrement pour ce qui concerne les interactions électron chaud-phonon. Cet effet a pris une grande importance dans les circuits intégrés modernes de très faibles dimensions. Une différence de potentiel de l'ordre du volt appliquée au dispositif produit des champs électriques locaux supérieurs à $10^7 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ et les effets d'électrons chauds deviennent importants et doivent être maîtrisés.

Lors des expériences réalisées par Julien Bok sur le semiconducteur InSb à fort champ électrique et sous fort champ magnétique, une instabilité est apparue, avec de très fortes oscillations électriques et magnétiques. Ces effets d'instabilité, analogues à ceux observés dans les plasmas gazeux, ont été retrouvés dans de nombreux laboratoires dans le monde et fait l'objet d'études approfondies. Nous avons organisé, en 1964 à Paris, un congrès international sur le thème « *Instabilities in solid-state plasmas* » [8].

Philippe Nozières et Pierre Aigrain ont montré qu'une onde électromagnétique polarisée circulairement pouvait se propager dans un semiconducteur soumis à un fort champ magnétique. C'est l'analogue du mode « siffleur » observé dans l'ionosphère. Cette onde, baptisée hélicon par Aigrain, a été mise en évidence par Robert Veilex et Albert Libchaber [9] dans InSb. Ce fut une première mondiale, qui connut un grand retentissement.

Julien Bok et Philippe Nozières [10] ont montré qu'on pouvait amplifier cette onde dans un semimétal en injectant un courant électrique le long du champ magnétique. Cette proposition a suscité un très grand intérêt de la part des Bell Labs, qui y voyaient la possibilité de remplacer les tubes électroniques utilisés pour les radars par des composants à l'état solide. Un chercheur des Bell Labs, Dirk J. Bartelink, a observé expérimentalement cet effet dans le bismuth. Malheureusement, cela n'a pas conduit à une réalisation industrielle, car le composant ne fonctionnait qu'à très basse température (hélium liquide).

3.3. Autres matériaux semiconducteurs

L'équipe de Jean-Marie Thuillier, rejointe par Claudette Rigaux [10] a exploré d'autres matériaux semiconducteurs comme le tellure et ses composés, en particulier les II–VI comme HgTe, CdTe, etc., qui ont servi à construire des détecteurs infrarouge utilisés dans les dispositifs de vision nocturne, lunettes, cameras et autres. Claudette Rigaux a également étudié des composés à la fois semiconducteurs et magnétiques, domaine qui a connu un important développement.

3.4. Van de Graaf

Une équipe de physique nucléaire, dirigée par Halban, s'est installée rue Lhomond et utilisait un accélérateur Van de Graaf de 2 MeV. C'était insuffisant pour la physique des particules, et l'équipe est partie à Orsay où se construisait un grand accélérateur linéaire. Le VdG a été récupéré par la physique des solides. Pierre Baruch a étudié les dommages causés aux matériaux par l'irradiation. Georges Amsel [11] a mis au point une méthode d'analyse très performante utilisant des réactions nucléaires. Cette méthode permet de déterminer de façon très précise la composition chimique d'un échantillon. Elle a connu un grand succès et s'est répandue dans le monde entier. Le musée du Louvre a acquis un VdG pour déterminer les composants de ses œuvres d'art. Amsel a aidé à installer cet équipement au Louvre.

Dès le début, plusieurs théoriciens ont soutenu les expérimentateurs. Pierre Aigrain lui-même a formulé plusieurs théories : diode laser, hélicon, etc. La venue de Philippe Nozières a été déterminante. Il a développé la théorie du problème à N corps et formé plusieurs élèves. Citons, par exemple, Monique et Roland Combescot, qui ont toujours travaillé en étroite collaboration avec les expérimentateurs sur les problèmes d'optique, d'effet tunnel, de supraconductivité, etc.

4. Développement du laboratoire

Pierre Aigrain laissant une grande liberté à ses chercheurs et avide d'idées originales, de nouveaux sujets ont vu le jour.

4.1. Effet tunnel

Jean Klein et Alain Léger [12] ont développé la spectroscopie par effet tunnel appliquée aux semiconducteurs et aux supraconducteurs. L'effet tunnel est un effet purement quantique qui permet à une particule (électron en l'occurrence) de franchir une haute barrière de potentiel. Le dispositif utilisé est un sandwich métal-isolant-métal. L'effet tunnel est perturbé par certains atomes dans l'isolant. Ceci s'observe dans la caractéristique courant-tension du dispositif et permet donc de faire une véritable spectroscopie de certains matériaux. Il permet également de déterminer des paramètres d'un métal supraconducteur lorsque celui-ci constitue l'une des deux électrodes. Jean Klein a ensuite poursuivi son activité dans la microscopie par effet tunnel à Jussieu.

4.2. Turbulence et chaos

Albert Libchaber est arrivé au laboratoire pour travailler avec Robert Veilex sur la mise en évidence expérimentale de la propagation des héliçons. Après sa thèse, il a voulu changer de sujet et s'est intéressé à l'hydrodynamique en régime turbulent. On caractérise un écoulement par un nombre sans dimensions, appelé nombre de Reynolds, défini par $Re = VL/\nu$, où V est la vitesse du fluide, ν sa viscosité cinématique et L une dimension caractéristique du récipient. À fort Re , le régime devient chaotique. Libchaber [13] a eu l'idée d'utiliser de l'hélium liquide de très faible densité et peu visqueux, donc avec un ν très petit et des nombres de Reynolds très grands (plus de 10^4). Il a étudié le passage au régime turbulent. Il a utilisé pour cela un petit volume d'hélium liquide (1 cm³ environ), mis en convection en le chauffant par le bas. Il se forme des cellules convectives qui oscillent à leur fréquence propre f . Lorsqu'on augmente le flux de chaleur, on observe l'apparition de sous-harmoniques à $f/2$, $f/4$, etc. Cela vérifie une prévision théorique de Michael Feigenbaum. Ce travail a eu un très grand retentissement international. Il révèle que, derrière le chaos, se cache un certain ordre. Albert Libchaber a été récompensé par le prix Wolf.

Il s'est ensuite reconverti à la biologie et est parti aux États-Unis. Il est actuellement professeur à la Rockefeller University à New York. Il a formé plusieurs élèves qui ont développé de nouveaux domaines.

Yves Couder, [14] après une thèse en physique des solides, s'est orienté vers l'étude des phénomènes non linéaires et a étudié la turbulence dans des écoulements bidimensionnels, en utilisant des lames de savon. Il s'est également intéressé aux formes de certains végétaux, résultant de leur mécanisme de croissance. Enfin, il a réalisé des expériences mettant en évidence la dualité onde-particule à l'échelle macroscopique. Le dispositif expérimental consiste à utiliser une goutte rebondissant sur une surface liquide vibrant verticalement. La goutte est alors associée dans son déplacement à l'onde de surface qu'elle excite. Les résultats montrent une analogie étonnante avec la mécanique quantique.

Sébastien Balibar [15], après une thèse sur les métaux, s'est intéressé à l'étude de l'hélium 4 liquide superfluide. À très basse température (2 K), l'hélium 4 devient superfluide. Tous les atomes se condensent dans l'état quantique de plus basse énergie, le fluide s'écoule sans viscosité. Il a étudié l'évaporation d'atomes d'⁴He à partir du condensat superfluide et a montré qu'il s'agit d'un phénomène purement quantique analogue à l'émission d'électrons à partir d'un métal. La phase solide de l'⁴He, obtenue sous pression, présente également des propriétés singulières dues au déplacement très facile des dislocations. Balibar a introduit la notion de « supersolide » pour décrire ces phénomènes.

4.3. Supraconducteurs

Très tôt, des chercheurs du laboratoire se sont intéressés à la supraconductivité. Julien Bok et Jean Klein [16] ont montré que l'on pouvait mesurer les champs électriques à la surface des supraconducteurs. Claudine Guthmann et al. ont étudié la dynamique des vortex dans les microponts supraconducteurs et ils ont montré qu'on pouvait observer une résistance dynamique négative. Jean Klein et A. Léger ont montré l'importance de l'effet tunnel dans la détermination des paramètres caractérisant un supraconducteur.

Yvan Simon, Patrice Mathieu et Bernard Plaçais [17] ont étudié les supraconducteurs de type II dans lesquels le champ magnétique pénètre, à partir d'une première valeur H_{c1} , sous forme de vortex. Ils restent supraconducteurs (résistance nulle) jusqu'à un champ magnétique H_{c2} , qui peut atteindre des valeurs très élevées (~ 10 Tesla pour NbTi). Ceci est très important pour les applications.

Un paramètre important est le courant critique I_c , courant électrique au-delà duquel une dissipation d'énergie apparaît. Dans les supraconducteurs de type II, dans l'état intermédiaire, entre H_{c1} et H_{c2} , la dissipation apparaît, lorsque les vortex se déplacent. Simon et al. ont étudié l'accrochage des vortex sur des impuretés ou à la surface de l'échantillon. Ils ont montré que l'accrochage de surface était le plus important, et que cet accrochage devenait plus efficace avec une surface rugueuse.

Le laboratoire a beaucoup grossi et ne tenait plus dans les locaux de la rue Lhomond. À la fin des années 1960, une grande partie du labo est partie à Jussieu, dans la nouvelle faculté des sciences, et a pris plus tard son autonomie.

5. Enseignement

En 1955, le directeur des enseignements supérieurs, Jacques Donzelot, créa un nouveau cursus, le diplôme d'études approfondies (DEA), destiné à former de futurs chercheurs. Avec Jacques Friedel et André Guinier, Pierre Aigrain créa un

DEA de physique des solides commun à Orsay et Paris. Pierre y assumait le cours de physique des semi-conducteurs, puis Julien Bok lui succéda. Ce DEA a joué un rôle très important, puisqu'il a formé une grande partie des chercheurs qui ont développé la physique des solides et ses applications en France, aussi bien dans les laboratoires publics et universités (CNRS, CEA, CNE, etc.) que dans l'industrie (Thomson-CSF, Radiotechnique, Bull, Alcatel, etc.).

Jean Brossel a également créé un DEA à l'ENS, destiné à inculquer des connaissances de base très larges aux futurs doctorants, et en particulier aux normalien(ne)s. C'était le DEA de physique atomique et statistique. Les enseignements de départ étaient les suivants :

- physique quantique par Claude Cohen-Tannoudji,
- physique atomique par Jean Brossel,
- physique statistique par Pierre-Gilles de Gennes, puis Édouard Brézin,
- physique des solides par Julien Bok.

Ce DEA a fourni un nombre important de chercheurs au laboratoire Aigrain.

6. Essaimage vers l'industrie

Dès 1952, Claude Dugas est parti à la CSF, à la demande de Maurice Ponte, pour participer à la création du laboratoire central de recherches (LCR) à Corbeville.

Maurice Ponte voulait démarrer une industrie des semi-conducteurs en Europe. Il a recruté Olivier Garetta comme directeur de la première usine de fabrication de composants semi-conducteurs en Italie.

Robert Veilex est parti à la Radiotechnique (groupe Philips), Jean-Claude Picard vers Schlumberger puis Bull (directeur général adjoint, fabrications industrielles).

Albert Zylbersztejn a créé (sous l'impulsion de Julien Bok) le groupe de physique au laboratoire central de Thomson-CSF (LCR), où l'étude des transitions isolant-métal a permis une collaboration avec Nevill F. Mott [18]. Ensuite, Albert Zylbersztejn est parti diriger la technologie du groupe Bull, puis le laboratoire du Cnet à Bagneux.

Jean-Pierre D'Haenens a rejoint Thomson-CSF (groupe de physique), puis a dirigé la recherche à la CGR (équipements de radiologie) et ensuite le LCR.

Daniel Huet, entré au labo comme tourneur-fraiseur dans l'équipe d'Albert Zylbersztejn, est devenu ingénieur-docteur, et est parti diriger les activités de croissance épitaxiale des semi-conducteurs au centre de recherches d'Alcatel.

Pierre Aigrain lui-même, après avoir exercé les fonctions de secrétaire d'État à la Recherche scientifique dans le gouvernement de Raymond Barre, a été nommé directeur technique général du groupe Thomson, aujourd'hui Thalès.

De nombreux chercheurs du labo ont servi d'ingénieurs-conseils dans des entreprises.

Julien Bok était membre du conseil scientifique de Thomson, présidé par Aigrain, puis a été président du conseil scientifique du Cnet Meylan, et ensuite du Cnet Bagneux.

7. Conclusion

Le groupe de physique des solides de l'ENS, devenu laboratoire Pierre-Aigrain, a joué un rôle très important dans la renaissance de la physique française après la guerre et dans son développement ultérieur. D'abord, en créant une activité de recherche reconnue mondialement dans le domaine des semi-conducteurs, qui ont pris une telle importance dans notre vie quotidienne. Nous sommes à l'ère du silicium (ordinateurs, tablettes, smartphones, lasers, piles photovoltaïques, LED, etc.). Le laboratoire n'a pas développé de nouveaux composants, mais a formé de nombreux chercheurs qui ont essaimé vers des centres de recherche publics et privés et vers l'industrie. L'exemple le plus remarquable est celui d'Olivier Garetta, qui a créé une industrie des semi-conducteurs en Italie. Cette activité franco-italienne existe toujours ; c'est la STMicroelectronics, qui reste une des principales sociétés de production de composants semi-conducteurs basée en Europe.

L'inventivité de Pierre Aigrain, arrivant tous les jours avec des idées originales, et la totale liberté qu'il laissait à ses élèves et à ses collaborateurs ont fait émerger de nouvelles directions de recherche, qui se sont révélées très fructueuses. Parmi elles :

- les effets des plasmas dans les solides,
- la supraconductivité,
- les effets non linéaires en hydrodynamique, turbulence, chaos à trois et deux dimensions,
- les liquides et solides quantiques à très basse température (^4He),
- la spectroscopie par effet tunnel.

Le laboratoire Pierre-Aigrain est toujours en pleine activité, et nous lui souhaitons un brillant avenir.

Références

[1] L'âge d'or des laboratoires, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00159479>.

- [2] L. Blantigny, P. Baruch, Pierre Aigrain et le laboratoire de physique des solides de l'École normale supérieure, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00088219>.
- [3] J. Bok, Physique statistique, chapitre V, <https://cours.espci.fr/site.php?id=359&fileid=1601>.
- [4] Symposium Claude Benoit à la Guillaume : Effets radiatifs dans les semiconducteurs, Éditions de Physique, Paris, 1995.
- [5] C. Benoit à la Guillaume, M. Voos, F. Salvan, Motion of Electron–Hole Drops in Pure Ge, Phys. Rev. Lett. 27 (1971) 1214; C. Benoit à la Guillaume, M. Voos, F. Salvan, Phys. Rev. Lett. 28 (1972) 330, Erratum.
- [6] M. Balkanski, Sofia–Paris, un aller simple, Éditions Scali, 2007.
- [7] J. Bok, Étude des porteurs de charge dans les semi-conducteurs à champ électrique élevé, Ann. Radioélectr. XV (60) (1960).
- [8] A. Libchaber, R. Veilex, Phys. Rev. 127 (1962) 774.
- [9] J. Bok, Effets de plasmas dans les solides, Dunod, Paris, 1964.
- [10] J. Bok, P. Nozières, Instabilities of transverse waves in a drifted plasma, J. Phys. Chem. Solids 24 (6) (1963) 709–714.
- [11] G. Amsel, Microanalyse de la région superficielle des solides par l'observation directe d'interactions nucléaires à basse énergie. Applications à l'électrochimie de l'état solide, aux couches minces, à la métallurgie, la cristallographie et la biologie, J. Radioanal. Chem. 17 (1–2) (1973) 15–27.
- [12] A. Léger, J. Klein, S. De Cheveigne, M. Belin, D. Defourneau, Tunneling investigation of the phonon spectrum of superconducting, J. Phys. Lett. 36 (12) (1975) 301–304, <https://doi.org/10.1051/jphyslet:019750036012030100>.
- [13] A. Libchaber, Two-parameter study of the routes to chaos, Phys. D: Nonlinear Phenom. 7 (1–3) (1983) 73–84, <https://www.sciencedirect.com/science/article/.../016727898390117>.
- [14] <https://www.espci.fr/fr/actualites/2019/hommage-a-yves-couder>.
- [15] S. Balibar, The enigma of supersolidity, Nature 464 (2010) 176.
- [16] J. Bok, J. Klein, "Electric Fields" in superconductors, Phys. Rev. Lett. 20 (13) (1968) 660.
- [17] B. Plaçais, N. Lutke-Entrup, J. Bellessa, P. Mathieu, Y. Simon, et al., Peak-effect and surface crystal–glass transition for surface-pinned vortex array, Europhys. Lett. 67 (2004) 655.
- [18] A. Zylbersztejn, N.F. Mott, Metal–insulator transition in vanadium dioxide, Phys. Rev. B 11 (1975) 4383.