

Wojciech Szuszkiewicz¹

La coopération scientifique exemplaire entre l'Institut de Physique de l'Académie Polonaise des Sciences de Varsovie et des laboratoires français de physique du solide

I Présentation historique

L'histoire des contacts entre l'Institut de Physique et plusieurs centres scientifiques français remonte au début des années 60. La coopération continue encore aujourd'hui, elle dure donc depuis une quarantaine d'années.

L'Institut de Physique a été créé en 1953 et, dès le début, son activité scientifique a été focalisée sur les problèmes de la physique des milieux condensés, tout en poursuivant les recherches en physique atomique et moléculaire qui avaient été entamées à Varsovie avant la Seconde Guerre mondiale. La physique des solides s'est tout d'abord concentrée sur les problèmes généraux des semi-conducteurs et des milieux magnétiques mais l'optique atomique et moléculaire a également été étudiée pendant des années. La recherche expérimentale était accompagnée d'une solide base théorique. L'Institut de Physique de Varsovie était alors – et le reste aujourd'hui – le plus grand centre de l'Académie Polonaise des Sciences dans le domaine des milieux condensés.

Il est difficile de reconstituer le commencement des contacts bilatéraux franco-polonais, mais il est probable que le premier physicien de Varsovie qui ait visité un laboratoire parisien à cette époque a été Waław Nazarewicz² qui travaillait alors à l'Institut de Physique Expérimentale de l'Université de Varsovie. À cette époque-là, les relations entre les différents laboratoires de Varsovie

¹ (ndr) Institut de Physique de l'Académie Polonaise des Sciences, Al. Lotników 32/46, 02-668 Varsovie, Pologne ; szusz@ifpan.edu.pl.

² W. Nazarewicz a été l'un des directeurs du Centre Scientifique de l'Académie à Paris au début des années 90.

étaient étroites et on pouvait considérer l'Université de Varsovie et l'Institut de Physique comme un seul et même milieu scientifique (« le centre varsovien »). W. Nazarewicz a séjourné au Laboratoire de Physique de l'École Normale Supérieure (ENS) et plus précisément dans l'équipe des semi-conducteurs de Minko Balkanski à l'intérieur du Groupe de physique des solides (GPS), alors dirigé par Pierre Aigrain. Ces premiers contacts d'un physicien polonais du solide avec un laboratoire français se sont transformés en collaboration de nombreux physiciens des deux pays qui continue aujourd'hui malgré les modifications qui ont restructuré la physique du solide dans la région parisienne. En effet, dès les années 60, le GPS, à l'étroit à l'ENS, a émigré dans la toute nouvelle Faculté des Sciences de Paris sur les terrains de l'ancienne Halle aux Vins entre la Seine et la place Jussieu. À la même époque, Minko Balkanski a pris son indépendance et a créé le Laboratoire de physique des solides (LPS) au sein de la même faculté. Les deux laboratoires ont poursuivi leur collaboration avec Varsovie. Andrzej Mycielski notamment, après une première année au LPS, a entamé une collaboration de plus de vingt ans avec le groupe de C. Rigaux et celui de C. Benoit à la Guillaume au GPS.

Lors des évènements de 1968, la Faculté des Sciences de Paris s'est divisée en deux universités : Paris VI et Paris VII¹. Le LPS qui a rejoint Paris VI, a vu plusieurs de ses équipes essaimer à l'extérieur dans les années 70 et 80. Tout d'abord, le groupe d'Yves Pétroff a participé à la fondation du LURE, le premier synchrotron français situé à Orsay et dédié à l'exploitation de son rayonnement spécifique. Ensuite, l'équipe des hautes pressions s'est scindée en deux, Jean-Michel Besson et son groupe ont créé le Laboratoire de physique des milieux très condensés à l'Université Paris VI et Gérard Martinez a pris la direction du Laboratoire des champs magnétiques intenses à l'Université Joseph Fourier de Grenoble. La collaboration scientifique franco-polonaise s'est poursuivie avec ces nouvelles entités, par exemple Bronisław Orłowski a travaillé avec LURE et de nombreux chercheurs du nouvel Institut des Hautes Pressions de Varsovie (aujourd'hui UNIPRESS) avec le laboratoire de Jean-Michel Besson ainsi que celui de Grenoble. L'Institut (en particulier

¹ Les Universités Paris VI et Paris VII ont été ensuite renommées respectivement Pierre et Marie Curie et Denis Diderot.

Julian Auleytner) a entretenu des contacts avec le Laboratoire de minéralogie et de cristallographie dirigé par André Authier.

À cette époque-là, la dynamique de réseau et les propriétés optiques des semi-conducteurs étaient les sujets les plus étudiés. Les technologies de croissance de matériaux parfaitement maîtrisées à Varsovie permettaient de disposer d'échantillons de grande qualité qui étaient ensuite analysés dans les deux pays. C'est ainsi que les semi-conducteurs du groupe II-VI et les chalcogéniures de mercure ont donné lieu à de nombreuses études croisées. À partir de 1977, Robert R. Gałązka à Varsovie propose une analyse des semi-conducteurs semi-magnétiques (ou semi-conducteurs magnétiques dilués). Il s'agit de cristaux semi-conducteurs contenant des ions de métaux de transition aux propriétés très particulières. Autour de ce projet, à côté de la collaboration développée et établie de longue date entre Andrzej Mycielski et une équipe au GPS, de nouvelles coopérations se sont nouées comme celles de Zbysław Wilamowski avec le Laboratoire des champs intenses à Grenoble ou bien celle de Tomasz Dietl qui, après des contacts avec I. Solomon de l'École Polytechnique et Benoit à la Guillaume du GPS a ensuite initié une nouvelle collaboration avec le groupe d'Henri Mariette également à Grenoble.

Il faut remarquer que les échanges ne se sont pas limités à Paris et à sa région (les centres de Palaiseau, Saclay, Bagneux, Villetaneuse etc.) ou à Grenoble mais ils ont également été noués avec Montpellier (Sylwester Porowski et Włodzimierz Zawadzki et quelques autres collègues) ainsi qu'avec les universités de Toulouse, Caen, Strasbourg, Metz et Bordeaux. Les sujets dépassaient souvent le cadre de la physique des solides pour aborder la physique moléculaire, celle des nanoparticules ou des supraconducteurs ou aujourd'hui la spintronique, un nouveau concept pour lequel Tomasz Dietl est bien connu. Parmi les collègues polonais impliqués dans ce domaine et plus spécialement dans les semi-magnétiques de basse dimension, il faut évoquer Grzegorz Karczewski dont la collaboration initiée avec le GPS se perpétue à présent avec l'Institut des Nanosciences de Paris (INSP).

Ce sont donc plusieurs dizaines de physiciens polonais de l'Institut de Physique qui ont effectué des séjours postdoctoraux en France,

formant ainsi une communauté de physiciens maîtrisant la langue française, ce qui n'est pas fréquent dans les autres centres scientifiques polonais. L'auteur de ce texte fait partie de cette communauté, car, jeune physicien de l'Université de Varsovie, il est arrivé en France pour la première fois en 1977, après sa thèse de doctorat pour un stage d'une année au LPS. Après une interruption, cette collaboration n'a repris qu'en 1989 et c'est pendant cette période que j'ai quitté l'Université de Varsovie pour rejoindre l'Académie Polonaise des Sciences où je travaille encore aujourd'hui.

II Propriétés optiques, élastiques et magnétiques des semi-conducteurs

C'est donc pendant ces vingt dernières années que j'ai eu l'occasion de devenir le coordinateur de plusieurs collaborations scientifiques non seulement avec les chercheurs du LPS qui ont rejoint plus tard le Laboratoire des milieux désordonnés et hétérogènes (LMDH), puis l'Institut des nanosciences de Paris (INSP), mais aussi avec le Laboratoire des ultra-sons (Universités Paris VI), le Laboratoire de physique des milieux très condensés (Université Paris VI), l'Institut Galilée (Université Paris XIII) et l'Université d'Orsay (Paris XI). Ces activités, focalisées sur les propriétés optiques et élastiques des semi-conducteurs utilisaient diverses techniques, comme la spectrométrie Raman et Brillouin, la spectroscopie infrarouge en transmission et réflectivité et la propagation des ultrasons.

Du côté français, les principaux coordinateurs étaient Michel Jouanne, Christian Julien et Jean-François Morhange, parmi les collaborateurs plus ou moins occasionnels, il faut mentionner : M. Balkanski, P. Djemia, M. Fisher, J. Joffrin, M. Kanehisa, B. Morin, J.Y. Prieur, Y. Roussigné, et A. Staschkevich.

Du côté polonais, les principaux chercheurs impliqués étaient les collègues de l'Institut de Physique de l'Académie Polonaise des Sciences : J. Bąk-Misiuk, E. Dynowska, K. Fronc, E. Janik, G. Karczewski, J. Kossut, B. J. Kowalski, E. Łusakowska, A. Mycielski, B. Witkowska, T. Wojtowicz et W. Zaleszczyk. Il faudrait énumérer aussi quelques collègues de l'Institut de Physique Expérimentale de l'Université de Varsovie ainsi que de l'Institut de Physique Moléculaire de l'Académie Polonaise des Sciences de Poznań.

Au début, les sujets abordés ont été limités aux propriétés dynamiques de quelques semi-conducteurs élémentaires ainsi que d'alliages ternaires de ces matériaux. Ils ont été étendus ensuite à des couches minces ou à des structures complexes, comme des superréseaux ou à des nanostructures, comme les nanofils. La disponibilité des semi-conducteurs à petit gap ou à gap nul nous a ensuite amenés à nous intéresser à la dynamique du réseau des chalcogéniures de mercure et aux alliages de ces composés. Cependant nos études n'étaient pas restreintes aux matériaux de base mais embrassaient aussi les matériaux dopés. L'analyse de leurs modes de vibration d'impureté, de l'influence du dopage (modes plasmons), de la fonction diélectrique et des propriétés élastiques a donné lieu à de nombreuses publications avec des collègues des universités de la région parisienne. L'arrivée de nouveaux matériaux et de nouvelles structures dont la réalisation n'était possible que grâce à l'épitaxie par jet moléculaire nous a ensuite poussés vers l'étude spectroscopique (Raman et IR) des matériaux magnétiques tels que MnTe en phase cubique, des superréseaux MnTe/CdTe puis de Fe/Si et de GaMnAs/GaAs. Ces travaux ont été ensuite complétés par des expériences de diffusion élastique et inélastique de neutrons, réalisés au Laboratoire Léon Brillouin (LLB) à Saclay en collaboration avec Bernard Hennion et Frédéric Ott. Le LLB est un laboratoire national financé conjointement par le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) qui possède un équipement instrumental compétitif à l'échelle internationale, sa dimension internationale est attestée par le statut de « Grande Installation » reconnu par différents programmes européens successifs, par exemple, « Capital Humain et Mobilité » qui m'a permis d'effectuer une partie de mes expériences. C'est aussi avec des collègues français du LLB que de nombreux résultats importants ont pu être prouvés pendant ces derniers quinze ans. En particulier, on a réussi pour la première fois à démontrer qu'il était possible de travailler en diffusion inélastique de neutrons sur des couches très minces et sur des multicouches (superréseaux) et ainsi en étudier certaines propriétés physiques. Une telle éventualité était difficile à imaginer il y a seulement quelques années puisque la diffusion inélastique de neutrons exige généralement, pour les étudier, une grande quantité de matériau. Dans la littérature, on parle de volumes de l'ordre de 1 cm^3 ou même plus qui sont utilisés dans le cas des semi-conducteurs magnétiques dilués. Une heureuse combinaison

d'échantillons de MnTe, de qualité exceptionnelle, déposés en couches minces par épitaxie par jets moléculaire (MBE), associée avec les méthodes « state of the art » de nos collègues français du LLB a permis une observation de la propagation d'excitations collectives de spin (magnons). Nous avons pu non seulement observer cette propagation mais aussi étudier en détail la dispersion de plusieurs branches de magnons, ce qui nous a servi à déterminer des paramètres importants décrivant les propriétés magnétiques d'un groupe de semi-conducteurs du type II-VI contenant Mn en tant qu'élément magnétique. Il faut souligner que nous avons obtenu ces résultats sur un échantillon contenant seulement 1 mm³ de MnTe. L'article principal relatant ces résultats, publié en 2002 dans *Physical Review B* [A] reste, encore aujourd'hui, un exemple unique à ce niveau dans la littérature. Nous avons démontré la faisabilité d'une analyse par diffusion inélastique de neutrons de couches ultra minces, ce qui était jusqu'alors réputé impossible. L'ensemble des résultats obtenus par diffusion Raman et par diffusion de neutrons sur des couches minces et des superréseaux de MnTe ont élargi les limites de notre savoir sur les interactions magnétiques dans les semi-conducteurs magnétiques et/ou magnétiques dilués [B].

Parmi les sujets de recherche sur lesquels un grand effort expérimental a été fourni dans le monde entier durant ces dernières années, les phénomènes liés au confinement quantique d'excitations collectives dans les systèmes à dimension réduite sont particulièrement fascinants. Le confinement des magnons n'a cependant pas encore été clairement mis en évidence. Ce phénomène est prévu par la théorie et nous espérons l'observer par diffusion Raman et/ou par diffusion inélastique de neutrons sur un superréseau de MnTe/CdTe ou de MnTe/ZnTe.

Il existe un autre axe de recherche développé en commun par un groupe de chercheurs de l'Institut de Physique de Varsovie et par une équipe de l'Institut des Nanosciences de Paris : il s'agit des propriétés optiques et structurales de nanofils des semi-conducteurs préparés par une méthode d'épitaxie par jets moléculaires à Varsovie sur la base du ZnTe. L'introduction d'impuretés actives électriquement ou magnétiquement dans les nanofils ouvre des possibilités potentielles de diverses applications des structures unidimensionnelles, comme récepteurs, senseurs, détecteurs, éléments pour applications en

optoélectronique ou spintronique etc. [C]. « Last but not least », un certain effort expérimental est consacré aux propriétés des cristaux et des structures diverses sur la base de ZnO – matériau étudié aujourd’hui pour d’éventuelles applications magnétiques lorsqu’il est dopé avec des impuretés de métaux de transition. La possibilité d’obtenir ainsi un ZnO semi-conducteur ferromagnétique à l’ambiante avec ses applications spintroniques n’est pas encore abandonnée.

III Financement

Au début des échanges, l’Université Paris VI, puis l’Union Européenne ont assuré le financement des travaux. À partir de 1994 et jusqu’en 2006, grâce à divers programmes Académie Polonaise des Sciences-CNRS ou Académie Polonaise des Sciences-Ministère de la Recherche (Polonium), on a pu rembourser les frais de voyage des participants. La collaboration formelle s’est achevée en 2006 lorsque le CNRS en a décidé la fin, mais les échanges se poursuivent toujours de façon plus informelle. Depuis 1990, la production scientifique à laquelle j’ai participé comporte 75 articles (dont 2 en français et 73 et anglais) publiés dans des revues à comité de lecture ou présentés lors des colloques internationaux. La majorité des publications mentionnées ont été publiées dans des journaux reconnus (liste de Philadelphie). Ces articles, écrits en collaboration avec des collègues français, portent en grande majorité sur la spectroscopie Raman ou infrarouge ou sur des mesures de diffusion élastique ou inélastique de neutrons. Dès 2007, la collaboration s’est plus particulièrement recentrée sur les propriétés des nanofils de divers matériaux II-VI et la majorité de ces recherches ont été soutenues non seulement par des fonds polonais et français, mais aussi par un contrat de recherche de l’Union Européenne.

IV Conclusion

Dans cette brève description de la collaboration franco-polonaise dont j’ai été l’un des participants actifs, je n’ai abordé que les recherches dans le domaine de la physique des semi-conducteurs comme les matériaux magnétiques non semi-conducteurs ou les supraconducteurs. Notre Institut a développé pendant des années des collaborations dans le domaine de l’optique atomique et moléculaire sur la physique des clusters. J’estime que le nombre total de publications communes signées à la fois par des membres

de l'Institut de Physique (y compris des étudiants en thèse) est de l'ordre de plusieurs centaines, publiées pendant une période de plus de quarante ans.

Ainsi, pendant ces années, les collaborations se sont poursuivies malgré diverses restructurations des laboratoires. On a réussi à prouver que pour une coopération de qualité, les relations humaines entre différents protagonistes sont plus importantes que les structures.

Le développement de nouveaux contacts bilatéraux dans le cadre de collaborations européennes serait un avantage clair tant pour le côté français que le côté polonais. L'échange d'idées, de personnes (en particulier de jeunes chercheurs et de thésards), aussi bien que des matériaux devrait continuer à renfoncer les relations scientifiques traditionnellement très efficaces et très amicales au profit de nos deux pays, tout en intensifiant les liens européens qui nous unissent.

Remerciements

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à l'« European Development Fund » dont la bourse « Grant Innovative Economy » POIG.01.01.02-00-008/08 a soutenu partiellement les recherches les plus récentes décrites ci-dessus.

Bibliographie sélectionnée :

[A] B. Hennion, W. Szuszkiewicz, E. Dynowska, E. Janik, T. Wojtowicz, *Physical Review B* **66**, 224426 (2002).

[B] W. Szuszkiewicz, E. Dynowska, B. Witkowska, B. Hennion, *Physical Review B* **73**, 104403 (2006).

[C] W. Zaleszczyk, E. Janik, A. Presz et al., *Nanoletters* **8**, 4061 (2008).