



Hommage à Jacques Friedel

Jacques Friedel nous a quittés le 27 août 2014. Son décès constitue un événement douloureux pour toute notre Communauté de physiciens.

La Communauté Scientifique Française lui est extrêmement reconnaissante pour son apport exceptionnel au développement de la Physique de la Matière Condensée.

Rappelons d'abord quelques étapes de sa prestigieuse carrière. Après être passé par les lycées Louis-le-Grand et Henri IV il étudie à l'Ecole Polytechnique puis à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, obtenant par ailleurs une Licence ès Sciences de l'Université de Paris. Il prépare son PhD à l'Université de Bristol dans le Laboratoire de Sir Nevill F. Mott puis soutient sa Thèse de Doctorat d'Etat à l'Université de Paris. Par la suite il devient Professeur à l'Université Paris-Sud où il fonde en 1959, avec André Guinier et Raymond Castaing, le Laboratoire de Physique des Solides à Orsay qui a été et est attractif pour nombre de grands professeurs venus du monde entier pendant leurs congés sabbatiques –certains futurs prix Nobel-, ou plus jeunes scientifiques venus bénéficier d'une excellente formation dans cet environnement exceptionnel.

Jacques Friedel a été Président de la Société Française de Physique (1970), de la Société Européenne de Physique (1982-1984) et de l'Académie des Sciences (1992-1994). Il a aussi été élu membre associé de l'Académie Nationale des Sciences américaine, de l'Académie Royale des Sciences suédoise et de la Royal Society anglaise. Il a reçu de nombreux prix: médaille d'or du CNRS en 1970, prix Holweck, Von Hippel award... Il a enfin reçu la Grand' Croix de la Légion d'Honneur en 2013.

L'apport de Jacques Friedel à la Physique de la Matière Condensée a en effet été considérable en particulier à la compréhension des propriétés électroniques. En premier lieu il faut citer la découverte des "oscillations de Friedel", oscillation de densité électronique autour des impuretés dans les métaux, phénomène d'écrantage de portée très générale. Un autre aspect essentiel concerne la description des propriétés électroniques des solides par des méthodes simples: "électrons libres" et surtout "liaisons fortes". Cette dernière, idéale pour décrire la liaison chimique, permet d'analyser, de façon très descriptive et efficace, les tendances dans les propriétés de cohésion et les excitations électroniques. Elle s'applique pratiquement à tous les types de matériaux: métaux de transition, semi-conducteurs, solides partiellement covalents et ioniques, cristallins ou amorphes... Elle est très utilisée actuellement, mais sans en connaître les origines, en modélisation quantitative de composants électroniques nanométriques. Pour terminer ajoutons les apports de Jacques Friedel à l'analyse du rôle des défauts étendus des structures cristallisées (en particulier les dislocations essentielles à la plasticité des métaux auxquelles il a consacré un ouvrage en 1956, qui a connu un immense succès), à l'étude des cristaux liquides et aussi à la compréhension des différentes manifestations de la supraconductivité.

Jacques Friedel va nous manquer. Ses avis scientifiques, y compris ceux très récents, ont toujours eu une très grande valeur pour nombre d'entre nous.

M. LANNOO, A.FONTAINE

Vice-Président et Président de la Société Française de Physique

Contributions

Pierre RADVANYI

Directeur de recherches émérite au CNRS

5

Yves BRÉCHET

Haut-Commissaire à l'énergie atomique

6

Maurice KLEMAN

Directeur de recherches émérite au CNRS

8

Michel LANNOO

Directeur de recherches émérite au CNRS

10

François GAUTIER

Professeur émérite

12

Denis JEROME

Directeur de recherches émérite au CNRS

14

Jean-Paul POUGET

Directeur de recherche émérite au CNRS

16

JACQUES FRIEDEL, PRÉSIDENT DE LA SFP ET DE LA SOCIÉTÉ EUROPÉENNE DE PHYSIQUE

Par Pierre RADVANYI,
Directeur de recherches émérite au CNRS



Jacques Friedel ne fut pas seulement un physicien de grand talent, mais également un homme soucieux de l'intérêt général, en particulier du développement et de l'organisation de la recherche en France. Il fut amené ainsi à devenir président de la Société française de physique (SFP) en 1970, puis de la Société européenne de physique (EPS) de 1982 à 1984 ; je le connus dans ces deux fonctions.

Tous ceux qui ont collaboré avec lui ont encore en tête – et ont peut-être conservé – ces petits mots manuscrits rapidement écrits, parfois dans un train, posant des questions ou faisant des remarques sur un problème lui tenant à cœur ; ils n'étaient jamais à négliger. On était frappé par la subtilité de son analyse et la sûreté de son jugement. Sa retenue et sa modestie étaient appréciées.

Jacques Friedel fut Président de notre Société de physique en 1970 et s'intéressa toujours à nos actions : chaque fois que la SFP souhaita faire passer un message aux pouvoirs publics ou que lui-même sentit qu'un tel message était nécessaire, il prenait sa plume et écrivait un article significatif pour notre Bulletin. On peut ainsi suivre sa trace dans les numéros successifs.

« Laissera-t-on rouiller l'outil ? », son allocution lorsqu'il reçut la médaille d'or du CNRS est publiée en janvier 1971 ; il y relève la nécessité « du contact avec le monde de la physique appliquée, tant pour lui transmettre une connaissance utilisable que pour en tirer certains thèmes de recherche fondamentale. » Mais il ajoute : « Nous nous méfions de la tentation dirigiste en recherche fondamentale. » Il se préoccupa du recrutement des jeunes chercheurs, de l'emploi des jeunes docteurs, des moyens accordés à la recherche, ainsi que des publications de physique, notamment du Journal de physique qui se doubla d'un Journal de lettres.

Il accueillit dans son laboratoire le secrétariat de la Commission des publications chargé de recevoir les manuscrits et de les envoyer aux referees.

Il prit part à l'installation de la Société européenne de physique (EPS) qui se proposait, malgré la guerre froide, de réunir les physiciens de l'Ouest et de l'Est de l'Europe. Son siège fut d'abord fixé à Genève. J. Friedel devint membre de son Comité exécutif, puis en fut le Président pendant deux ans.

Là aussi il s'intéressa particulièrement aux publications et s'efforça d'obtenir la fixation de certaines règles. Il était préoccupé par la double structure des adhérents de l'EPS : membres individuels et sociétés nationales dont le rôle était essentiel. Il œuvra pour l'amélioration du travail des divisions de spécialité ; la division de la matière condensée se développa, mais il ne put pas empêcher la sécession des opticiens. Il préconisa l'étude d'une source européenne de rayonnement synchrotron.

C'était instructif d'observer de la salle l'expression de son visage quand il était assis à la tribune lors d'une réunion de l'EPS : lorsqu'il fronçait le nez, je savais qu'il était en désaccord avec ce que l'intervenant était en train de dire.

Nous nous sommes ainsi retrouvés à plusieurs reprises à Genève et nous nous asseyions quelquefois à la terrasse d'un café en évoquant les questions d'actualité.

Une année le Directeur du CNRS arrivait en fin de mandat. Nous étions tous les deux assis au soleil à proximité du siège de l'EPS en attendant l'heure fixée.

J. Friedel me raconta l'entrevue qu'il avait eue la veille à Paris avec le Ministre et la discussion qu'ils avaient eue sur l'évolution de la recherche en France. Il se tût. Je sentis alors qu'il s'était passé quelque chose de plus ; je le regardai et lui dis : « Et le Ministre vous a proposé de devenir Directeur du CNRS et vous avez refusé ? »

Il répondit : « Oui, c'est cela. », et il sourit.



DISLOCATION ET PLASTICITÉ : LE « STYLE FRIEDEL »

Par Yves BRÉCHET,
Haut-Commissaire à l'énergie atomique

Les dislocations sont des défauts topologiques dans les cristaux ; défauts linéaires, associés à des champs élastiques à longue distance, ils interagissent également à des distances comparables aux dimensions atomiques. Ces défauts sont non conservatifs et hors équilibre thermodynamique... ; ils jouent un rôle central dans la plasticité des métaux et alliages. C'est dire si la complexité et la variété des problèmes posés par la plasticité des matériaux exigent une approche simplificatrice qui capture l'essentiel des phénomènes, sans se perdre dans les détails de la variété des situations possibles. Avec Jacques Friedel disparaît un des pères fondateurs de la « métallurgie physique » qui, avec A. H. Cottrell, F. C. Frank, N. F. Mott, F. R. N. Nabarro, ont fondé une nouvelle science : la compréhension du comportement mécanique irréversible des matériaux à partir de l'interaction de leurs défauts avec les différents composants de la microstructure.

J. Friedel a contribué de façon déterminante à créer cette discipline en écrivant un ouvrage classique sur les dislocations où il analyse les mécanismes fondamentaux comme le durcissement, par les interactions entre dislocations des différents systèmes de glissement (modèle de Friedel-Saada), ou le glissement dévié (modèle de Friedel-Escaig). Il y expose enfin sa solution d'une rare élégance au problème de l'ancrage collectif des dislocations par des impuretés (statistique de Friedel). J. Friedel a aussi acclimaté en France un certain style de physique « à l'anglo-saxonne », faite d'estimations d'ordres de grandeur, d'analyses dimensionnelles, de simplifications géométriques.

Cette manière de faire de la physique permet de démontrer avec une simplicité fascinante les grandes lois d'échelle et les contributions dominantes. Cet art de « faire simple et élégant », Jacques Friedel le possédait à la perfection. Il l'aura gardé jusqu'à la fin, à plus de 90 ans, mû par la seule curiosité et intrigué par le rapport de l'Académie des sciences sur Fukushima, en développant quelques lois simples

sur les frottements entre plaques tectoniques et les énergies mises en jeu, pour expliquer les observations et suggérer qu'on en fit de nouvelles.

Tout Friedel est dans ces deux moments: au début, en montrant, par de simples arguments dimensionnels, que la limite d'écoulement d'un métal écroui devait varier comme la racine carrée de la densité de dislocation ; à la fin, en montrant que le glissement le long d'une plaque tectonique susceptible de conduire à un mégaséisme, devait être de l'ordre de 60m.

La question de l'ancrage collectif des dislocations par des impuretés me semble particulièrement révélatrice du « style Friedel ». Il s'agit de répondre à une question très pratique : quelle est la limite d'élasticité d'un alliage contenant une fraction volumique donnée de précipités de taille donnée ? Cette question d'apparence anodine est en fait très fondamentale ; elle relève de la problématique des phénomènes d'ancrage collectifs où l'on retrouve les courants critiques des supraconducteurs de type II, de « désancrage » des ondes de densité de charge, d'ancrage des parois de Bloch en lien avec la coercivité des aimants, ou d'hystérésis de l'angle de mouillage d'une goutte liquide posée sur une surface hétérogène.

Mais restons-en au cas des dislocations et de la limite d'élasticité. Connaissant la force maximale que peut exercer un précipité sur une ligne de dislocation, il faut connaître la densité de points d'ancrage le long de la ligne pour en déduire la force résultant par unité de longueur. Cette densité dépend de la courbure de la ligne, elle-même liée à la contrainte appliquée pour la désancrer, qui est précisément la grandeur recherchée. Par un simple argument de stationnarité, la ligne qui se désancre d'un point, rencontre immédiatement un autre point, sur lequel s'ancrer. Friedel dérive la longueur D entre les points d'ancrage (appelée depuis « longueur de Friedel ») qui diffère bien sûr de la distance ℓ entre obstacles dans le plan.

Suivant la figure 1 ci-dessous, on a $2Rh=D^2$ et $hD=l^2$. On en déduit l'expression de D en fonction de R et l . Le rayon de courbure de la ligne de dislocation sous une contrainte σ est $\mu b/\sigma$ et la limite d'élasticité σ en fonction de la force d'ancrage individuelle F et de la densité d'obstacle le long de la ligne $1/D$ est F/bD . On en déduit le résultat cherché.

Ce résultat dérivé de façon particulièrement simple et élégante a été redémontré de façon beaucoup plus savante bien des années plus tard (modèle de Labusch). Il est à la base des développements modernes sur les alliages aéronautiques. Car c'est aussi cela le « style Friedel » : savoir allier l'élégance à l'utilité.

De nombreux ouvrages ont été consacrés aux dislocations et à leurs applications ; une littérature immense a suivi l'époque héroïque où la métallurgie physique se constituait comme une science à part entière. Là, comme dans d'autres domaines de la physique, les simulations numériques se taillent aujourd'hui la « part du lion ». Mais restent deux ouvrages fondateurs qu'on relit avec profit quand on veut réellement comprendre en profondeur la plasticité : « Dislocation and plastic flow » d'Alan H. Cottrell, et "Dislocations" de Jacques Friedel.

Deux amis de la même génération disparus à peu d'intervalle ; deux fondateurs de cette discipline aux frontières de la physique et de la mécanique qui viennent de nous quitter, comme des frères jumeaux scientifiques. Le beau texte de Friedel sur Cottrell est un témoignage éclairant de la naissance d'une science.

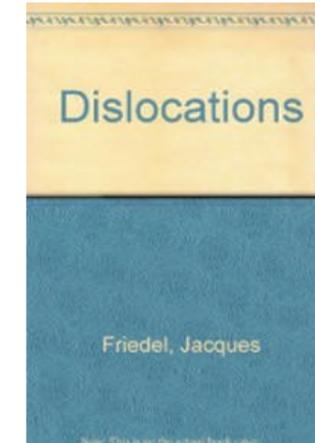


Fig. 2: Le traité classique de Jacques Friedel sur les dislocations

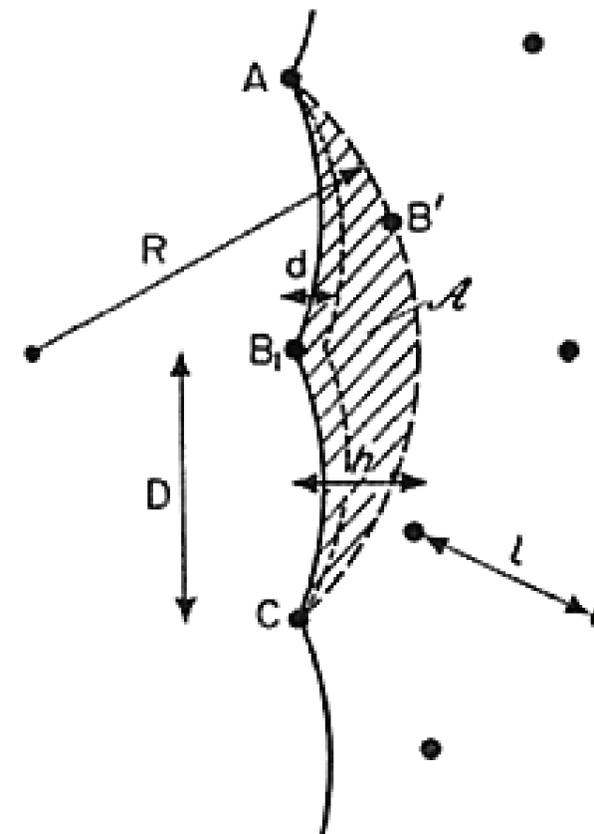


Fig. 1: La figure utilisée pour dériver la « statistique de Friedel » pour l'ancrage sur des obstacles aléatoirement distribués.

APPROFONDIR

Dislocations, J. Friedel, Pergamon Press, (1964)

J. Friedel & O. Hardouin Duparc (2013), "Alan Cottrell, a fundamental metallurgist. In memoriam", Philosophical Magazine, 93:28-30, 3703-3713



JACQUES FRIEDEL ET LES CRISTAUX LIQUIDES

Par Maurice KLEMAN,
Directeur de recherches émérite au CNRS

Lorsqu'il s'agit des cristaux liquides, ce n'est pas seulement à Jacques Friedel que nous pensons, mais nous adjoignons nécessairement à cette pensée celle d'autres membres de sa famille, dont les travaux scientifiques ont porté sur ce même sujet. Une journée a été récemment consacrée à la saga Friedel en l'amphithéâtre Charles Friedel, à l'École Nationale Supérieure de Chimie de Paris ; c'était le 23 Avril, et à cette occasion j'avais rappelé, outre les travaux de Jacques évoqués plus loin, ceux de son grand-père Georges, véritable créateur de ce thème de recherche, et ceux de son père Edmond, élève de Maurice de Broglie et collaborateur occasionnel de son père.

Jacques Friedel, qui je crois n'était pas peu fier de sa famille, aimait rappeler quelques anecdotes, ou ajouter quelques précisions, dès que l'occasion s'en présentait, sur les travaux de son grand-père et de son père. C'est ainsi que j'ai appris que sur le soir de sa vie son grand-père s'était persuadé que les plans de Grandjean des cholestériques (plus tard appelés plans de Grandjean-Cano) n'étaient pas singuliers mais que l'étaient les lignes qui les bordaient (il a fallu attendre De Gennes, près de quarante ans plus tard, pour que ce résultat soit retrouvé) et qu'avec son fils, en 1931, il avait clairement expliqué (et publié) les relations entre les domaines focaux, les coniques conjuguées qui les

bordent, et l'empilement des couches sous forme de cyclides de Dupin ; ceci avant Bragg, à qui la découverte de ces relations est le plus souvent attribuée. Il s'amusait aussi à souligner les sentiments antigermaniques de Georges, bien visibles dans le texte de son article fondamental de 1922 sur les phases mésomorphes, mais aussi, écrits de sa main, dans les marges de quelques articles de ses collègues allemands.

L'intérêt de Friedel (et le mien) pour les cristaux liquides se manifesta quand Georges Durand et Madeleine Veyssié nous montrèrent l'effet du champ magnétique sur les lignes de singularité d'un coin de Grandjean-Cano : au-delà d'un champ critique, certaines lignes zigzaguaient, sur d'autres aucun effet n'était visible. Friedel suggéra aussitôt que le coeur des lignes zigzagantes était décomposé en deux lignes d'une autre nature, en une géométrie qui ménageait un espace sensible au champ, cependant que le coeur des lignes non-zigzagantes, plus fines à l'observation sous le microscope optique, ne l'était pas. Ces deux types de ligne pouvaient être décrites comme des dislocations coin qui différaient par leur vecteur de Burgers, un demi-pas cholestérique pour les plus fines, un pas pour les plus épaisses. Cette description rejoignait les résultats du travail de De Gennes évoqué plus haut.

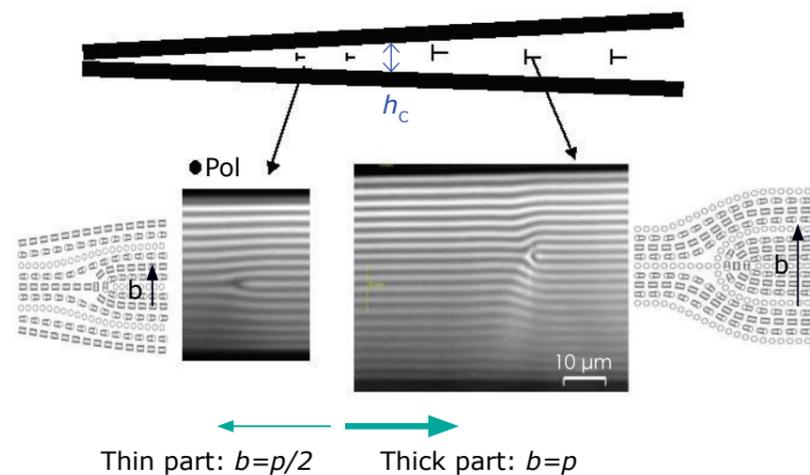


Fig. 1: Lignes dans un coin de Cano, par microscopie confocale; due à Smalyukh et Lavrentovich

Ce qui manquait au modèle de De Gennes, c'était justement le caractère topologique de la décomposition du coeur de certaines de ces lignes, décomposition qui expliquait les zigzags sous champ.

Ces remarques se développèrent en une classification des lignes de défauts dans les cholestériques, fondée sur le processus de Volterra dont on sait qu'il permet de construire des dislocations (attachées aux symétries de translation) et des disinclinaisons (attachées aux symétries de rotation) dans les solides. Un des éléments nouveaux dans le cas cholestérique est qu'il n'y a pas de différence essentielle entre les dislocations et certaines disinclinaisons : une dislocation de vecteur de Burgers d'un demi-pas est équivalente à une disinclinaison de vecteur de rotation de π rad autour de l'axe cholestérique. Cette difficulté, et bien d'autres relatives au processus de Volterra dans les cristaux liquides, sont résolues avec la classification topologique des défauts, qui a aussi l'avantage de fournir une classification les défauts en toute dimension (défauts ponctuels, parois, configurations).

Jacques Friedel nous encouragea dans cette voie nouvelle en théorie des défauts mais n'y participa pas. Auparavant, c'était en 1976, avec la classification à la Volterra des lignes de défauts dans les cholestériques que je viens d'évoquer, il avait fourni les éléments d'une approche toute différente aux difficultés que devait résoudre la classification topologique, à savoir l'application du processus de Volterra à des dislocations et disinclinaisons infinitésimales : ce concept est particulièrement bien venu pour les cristaux liquides, parce que ces derniers ont des symétries continues. Il permet de donner un sens à des phénomènes physiques comme la courbure des lignes de défauts, leur relaxation visqueuse, la nature du coeur (quand il n'est pas décomposé), les notions de fautes surfaciques (analogues lointaines des fautes d'empilement des solides cristallins), etc. Ces concepts échappent totalement à l'approche topologique, qui ne sait pas s'intéresser à des 'détails' de cette nature. Pendant les trente années qui suivirent Jacques Friedel se consacra uniquement à la physique électronique puis revint à ses réflexions sur le processus de Volterra ainsi généralisé.

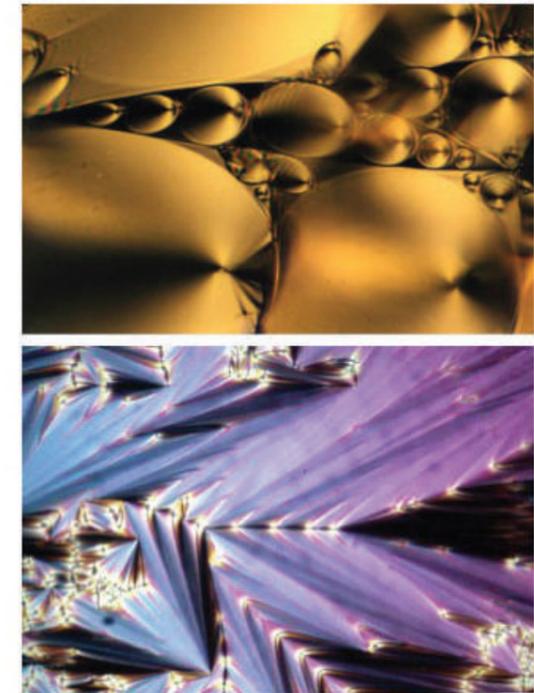
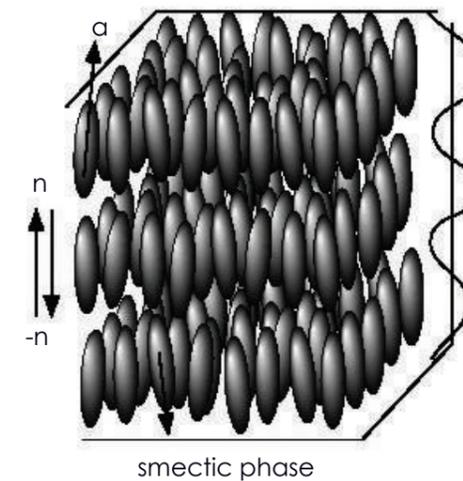


Fig. 2: Domaines focaux (en haut, par D. Lavrentovich, en bas par C. Meyer).

APPROFONDIR

Disclinations, dislocations, and continuous defects : A reappraisal. Reviews in Modern Physics (2008)



JACQUES FRIEDEL, LES SEMICONDUCTEURS ET LES LIAISONS FORTES

Par Michel LANNOO, Directeur de recherches émérite au CNRS

Je voudrais consacrer ces quelques lignes au rôle essentiel joué par Jacques Friedel dans un domaine qui ne lui était pas habituel, à savoir celui des semi-conducteurs covalents ou partiellement ioniques. L'idée principale était de décrire la structure électronique de ces matériaux par une approche physico-chimique aussi simple et performante que possible, à savoir la méthode dite des « liaisons fortes ». Celle-ci s'inspirait des travaux sur la liaison chimique de Pauling, Hückel et Coulson. L'originalité consistait en leur extension à des classes entières de solides cristallins ou amorphes où la covalence se manifeste par l'existence d'une bande d'énergie interdite.

La première étape a été le sujet de thèse proposé par J. Friedel à G. Leman sur la description de la structure électronique des covalents C, Si, Ge, Sn cristallisant dans la structure blende de zinc. Ici chaque atome a 4 voisins en position tétraédrique. Par ailleurs la méthode des liaisons fortes consiste à écrire la fonction d'onde de l'électron dans le cristal à partir de la fonction d'onde de la couche externe des atomes, une fonction « s » et trois fonctions « p » dans le cas présent. Ceci permet de bâtir sur chaque atome quatre orbitales hybridées sp^3 (Fig. 1) équivalentes pointant vers les quatre premiers voisins.

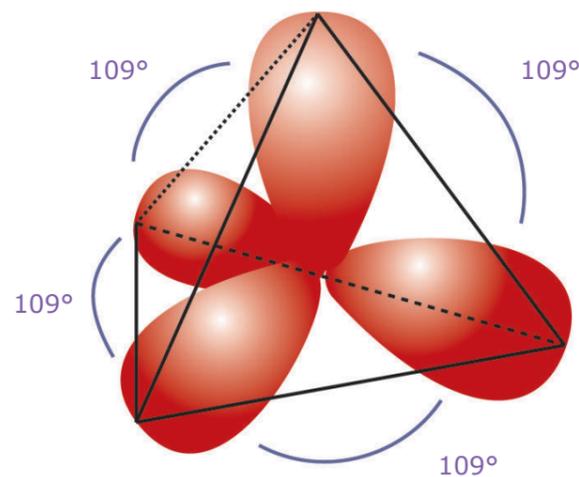


Fig. 1: Orbitales hybrides sp^3 .

Le paramètre important pour la covalence est alors le couplage V_c entre deux orbitales sp^3 premières voisines et pointant l'une vers l'autre alors que celui décrivant la résistance à la formation d'une liaison covalente (caractère métallique) est le couplage V_m entre deux orbitales du même atome. On trouve alors que la bande interdite est égale à $2V_c - 4V_m$ et n'existe que si cette quantité est positive.

Ce modèle, bien que rudimentaire, permet une description efficace des propriétés de valence (ionicté, polarisabilité, phonons...). Il est devenu très à la mode à une époque avec une extension aux covalents amorphes « parfaits » donnant lieu au « Théorème de Thorpe et Weaire » du nom de leurs auteurs. J. Friedel et moi-même avons par la suite entrepris de le généraliser à l'ensemble de la famille des covalents tétraédriques lacunaires (orbitales hybridées sp^n , $n = 2$ à 4, Fig. 1) en le rebaptisant « Théorème de Leman, Thorpe et Weaire » pour des raisons bien compréhensibles. Les résultats obtenus ont permis d'interpréter les données de photoémission. Des précisions concernant les aspects évoqués ci-dessus peuvent se trouver dans l'ouvrage de W.A. Harrison et le Chapitre 1 du Handbook of Semiconductor Technology mentionnés en référence.

Une autre branche d'activité importante générée par J. Friedel concerne la théorie des défauts dans les semi-conducteurs. Ceci a débuté avec mon sujet de thèse « Sur la distorsion par effet Jahn-Teller d'une monolacune dans le carbone diamant ».

Nous avons utilisé le modèle de molécule lacunaire de Coulson et Kearsley formé à partir des quatre orbitales sp^3 pointant vers le site lacunaire et ne pouvant donc s'engager dans des liaisons covalentes. A partir de ces « liaisons pendantes » on peut calculer le couplage électron-phonon et donc les distorsions pour les divers états de charge de la lacune. Les résultats ont surtout été utilisés pour la lacune dans Si où les données expérimentales sont abondantes.

Les méthodes de liaisons fortes mises au point ont ensuite été étendues à d'autres types de défauts dans divers semi-conducteurs. Le concept de liaison pendante s'est avéré très important pour les surfaces de semi-conducteurs (centres Pb), leurs hétérojonctions (discontinuités de bandes) et l'interface métal-semi-conducteur (blocage du niveau de Fermi sur celui de la liaison pendante). Dans tous ces secteurs les méthodes de fonctions de Green et de moments développées par l'école Friedel se sont avérées particulièrement efficaces.

Depuis une vingtaine d'années l'ensemble du domaine évolue vers les nanotechnologies. Ici encore les liaisons fortes représentent un outil de choix mais sous une forme différente : elles sont considérées comme une méthode semi-empirique dont les paramètres sont ajustés de manière à reproduire les résultats des meilleurs calculs ab-initio dans les structures limites simples où ceux-ci sont possibles. Cette approche permet d'aboutir à des prédictions à caractère quantitatif dans des boîtes et puits quantiques ainsi que des nanofils. Dans ces structures même les approches de masse effective sont discrétisées de manière à redonner une description de liaisons fortes très efficace sur le plan numérique.

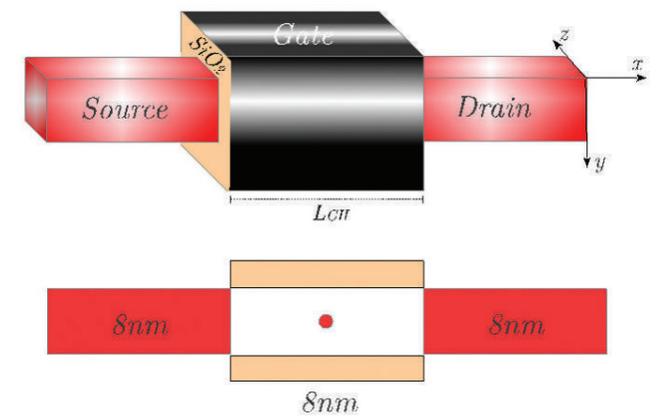


Fig. 2: Représentation schématique d'un transistor MOSFET à nanofil de silicium.

La figure 2 représente une structure réaliste de transistor à nanofil de silicium pour laquelle de tels calculs peuvent être menés à bien.

La figure 3 montre le résultat du calcul de courant pour cette structure comportant une impureté en son centre et incluant l'interaction électron-phonon.

L'apport initial de J. Friedel a induit de nombreuses ramifications dans ce domaine de compétition intense. Cette contribution cherche à montrer à quel point cet apport a été important pour les générations qui ont suivi.

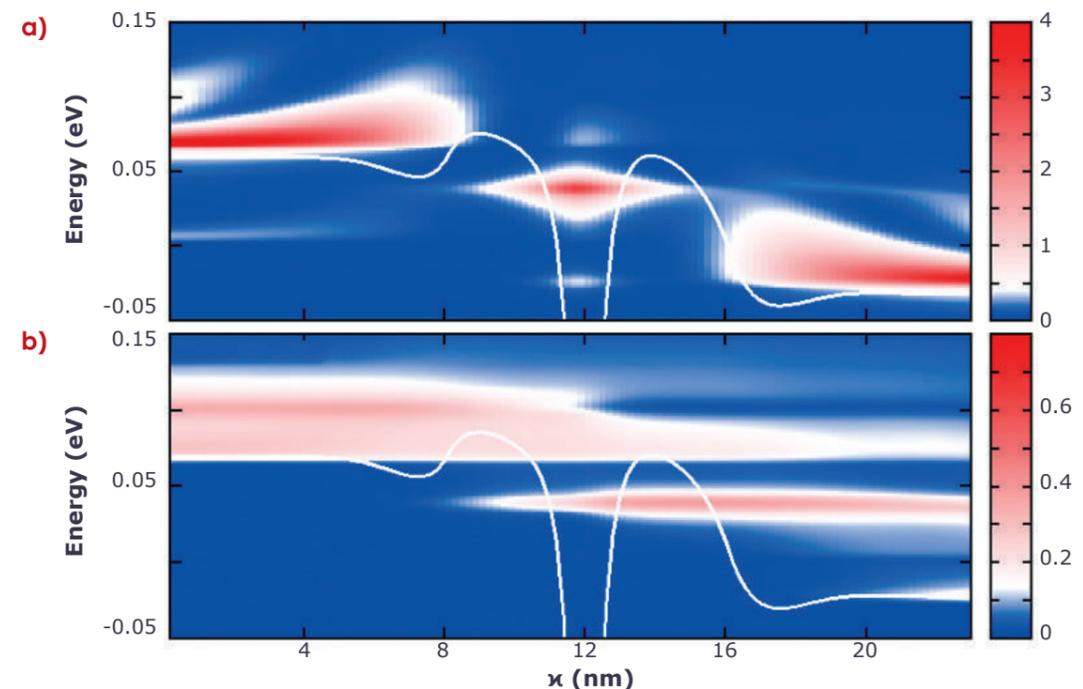


Fig. 3: Densité électronique (a) et de courant (b) dans le transistor de la Fig. 2 avec une impureté au centre et en présence de phonons optiques.

APPROFONDIR

Harrison, W.A. (1980): Electronic structure and the Properties of Solids. The Physics of the Chemical Bond. New-York : Freeman.

Lannoo, M. (2000) : Band Theory applied to Semiconductors. Handbook of Semiconductor Technology, Vol. 1, Chap. 1, ed. K.A. Jackson and W. Schröter, Wiley-VCH (2000).



JACQUES FRIEDEL ET LES PROPRIÉTÉS ÉLECTRONIQUES DES MÉTAUX ET ALLIAGES

Par François GAUTIER, Professeur émérite

Jacques Friedel a joué un rôle majeur dans le développement des recherches concernant les propriétés électroniques de la matière condensée en relation avec sa structure. Dès le début des années 1950, il établit les bases de la compréhension des états d'impureté dans les alliages métalliques à Bristol - dans le laboratoire de Sir N. Mott - puis à l'Ecole des Mines de Paris.

Il caractérise l'écran i. e. la redistribution électronique induite par chaque impureté, celle-ci décroissant comme r^{-3} (où r est la distance à l'impureté) et oscillant avec un nombre d'ondes égal à un diamètre de la surface de Fermi (oscillation de Friedel, Fig. 1) ; il relie la charge supplémentaire apportée par l'impureté à la diffusion électronique induite par celle-ci (règle de Friedel).

Cette diffusion introduit une forte variation de la densité d'états locale lorsqu'un état "quasi lié" est extrait de la bande de conduction (Fig. 2).

Sa mise en évidence dans les alliages de métaux de transition dissous dans les métaux normaux ainsi que celle d'états magnétiques locaux si l'interaction électron-électron est suffisante ont rendu très populaire ce modèle de l'état lié virtuel. Il a fallu plusieurs années pour se convaincre de la généralité et de l'importance de l'ensemble de ces résultats. Ainsi, les impuretés interagissent entre elles via l'interaction de la redistribution électronique de l'une avec le potentiel de l'autre. Ces interactions sont à la base de l'ordre local ; elles permettent de clarifier l'origine de la stabilité des alliages et de déterminer l'énergie des défauts ponctuels ou étendus. Si les impuretés sont magnétiques, l'alliage magnétique dilué présente alors un ordre antiferromagnétique gelé à basse température (verre de spin) étudié ainsi pour la première fois.

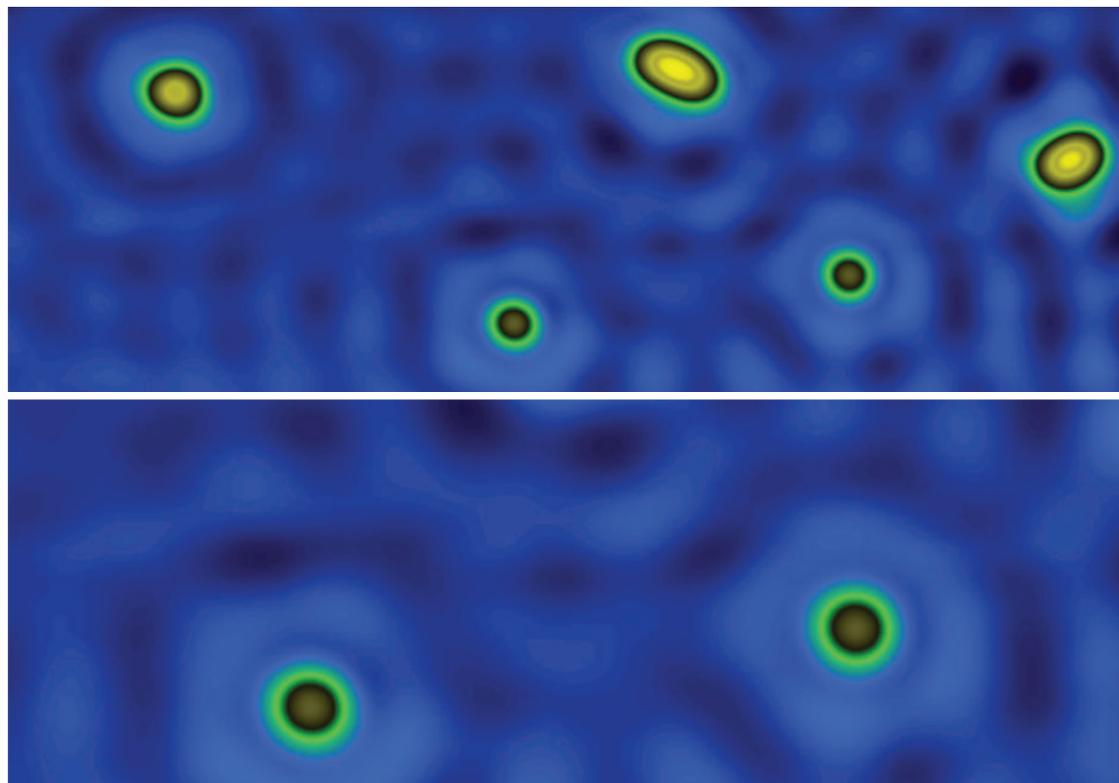


Fig. 1: Oscillations de Friedel observées par STM d'un gaz 2D d'électrons diffusé par des atomes uniques ou de petits amas d'atomes de cuivre sur une surface de Cu(111) [haut: 18 x 7 nm², et bas: 12 x 5 nm²] (avec la permission de G.Schull, I.P.C.M.S.)

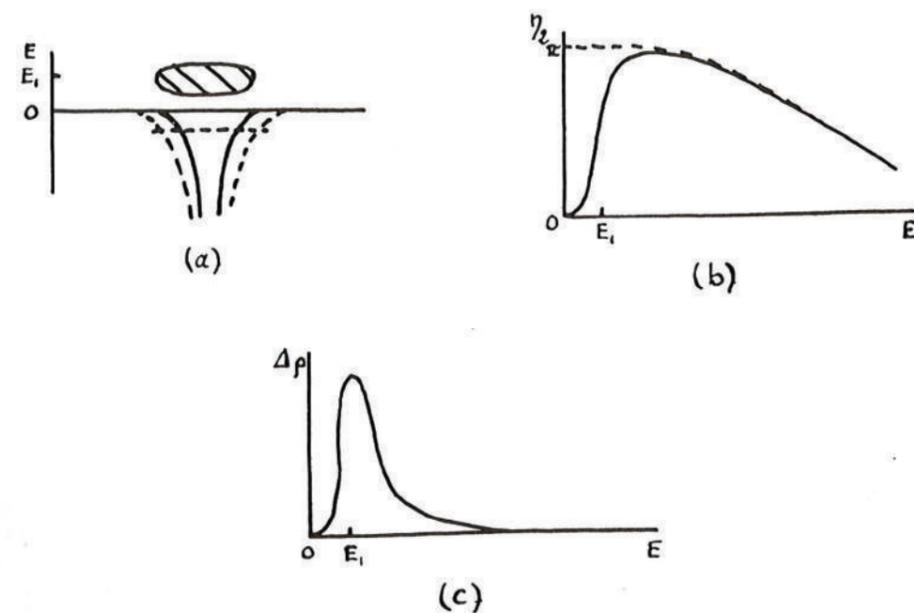


Fig. 2: Etat lié virtuel

a) représentation de l'état en fonction de l'énergie et de la distance à l'impureté
b) variation du déphasage avec l'énergie
c) variation de la résistivité avec l'énergie. Courbes continues : e.l.v. ; courbes discontinues pour un potentiel légèrement plus attractif.

D'après J. Friedel Can. J. Phys. 14, 1190 (1956)

Progressivement, Jacques Friedel et ses élèves ont ensuite développé au laboratoire de Physique des Solides d'Orsay qu'il a créé en 1959, avec R. Castaing et A. Guinier une description générale des propriétés électroniques des matériaux métalliques ou semi conducteurs, de leur cohésion, de leurs défauts, que ces systèmes soient de basse dimensionnalité ou non, cristallins, amorphes ou liquides. Cette description qui utilise l'approximation des liaisons fortes, les électrons étant dans le régime des corrélations faibles, est simple, physiquement transparente et adaptée à beaucoup de situations physiques.

Ainsi, J. Friedel a montré que les propriétés spécifiques des métaux de transition et de leurs alliages (cohésion, magnétisme, transport...) peuvent être décrits dans ce modèle : il obtient par exemple une interprétation physique des moments magnétiques à basse température des alliages de nickel, cobalt et fer (courbe de Pauling Slater) en supposant que l'écran se forme essentiellement dans les bandes d et que, si la perturbation induite par l'impureté est trop forte dans le nickel ou le cobalt, un état lié est extrait du haut des bandes majoritaires en spin, les électrons occupant cet état étant transférés dans les bandes minoritaires.

Ce modèle a permis ultérieurement de comprendre les couplages magnétiques et la magnétorésistance géante dans les superréseaux métalliques.

La voie a été ainsi ouverte vers l'étude de composés à base de métaux de transition (hydrures, borures...) ou de systèmes complexes exhibant des propriétés très différentes selon leur structure atomique, la nature des orbitales mises en jeu et l'importance des corrélations.

Les travaux de Jacques Friedel permettent de faire reposer sur des bases physiques solides les recherches qui se développent actuellement en utilisant des techniques numériques complexes et dans des domaines très variés, qu'il s'agisse par exemple de nanostructures en spintronique ou d'alliages multicomposants et de leur nanostructuration.



JACQUES FRIEDEL ET LA SUPRACONDUCTIVITÉ

Par Denis JEROME,
Directeur de recherches émérite au CNRS

La supraconductivité contrairement à d'autres domaines tels que magnétisme ou plasticité des métaux et alliages n'a pas été initié à Orsay par Jacques Friedel. Toutefois, son rôle dans le développement de cette activité au Laboratoire de Physique des Solides est cependant fondamental. C'est dans ce laboratoire que PG de Gennes, attiré par Friedel au début des années 60 abandonna le magnétisme qu'il étudiait à Saclay pour s'attaquer à la supraconductivité, domaine en pleine expansion à la suite de la parution en 1957 des travaux de Bardeen, Cooper et Schrieffer. La structure et l'ambiance du laboratoire conçu par J. Friedel convenaient parfaitement à PG de Gennes et à son groupe de supraconductivité où théorie et expériences étaient fortement intriquées.

La décade 1960-1970 a été celle des supraconducteurs intermétalliques de structure A15 de formule V_3Si , V_3Ga et Nb_3Sn . Ils montraient des signes d'essoufflement pour la température critique en fonction des années dans les différents matériaux comme l'indique la Fig. 1.

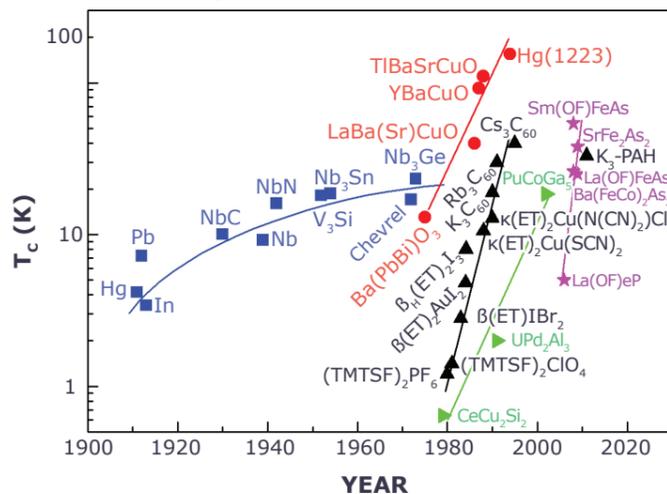


Fig. 1: Evolution des T_c des supraconducteurs en fonction de l'année de leur découverte. Un plateau est visible à partir de 1960 interrompu par un brusque renouveau à partir de 1980.

Cette situation désespérait chimistes du solide et physiciens parmi lesquels des théoriciens américains allaient jusqu'à déclarer l'absence de salut du point de vue de la T_c dans les supras BCS

isotropes. J. Friedel, constatant cette saturation de la T_c mais conscient de l'enjeu technologique lié à la possibilité d'une haute température critique et aussi fort de sa grande compétence dans la structure électronique des métaux d voulait comprendre ce qui limitait T_c dans les supras de type A15. Il a ainsi montré avec ses deux élèves Labbé et Barisic que dans ces intermétalliques présentant des chaînes de métaux d suivant les trois directions de l'espace, les électrons d des bandes d exercent avec leur anomalie de van-Hove proche du niveau de Fermi un rôle dominant pour la détermination de la T_c . La conclusion d'un calcul élégant et simple fut que pour les matériaux supraconducteurs A15 connus, le remplissage des bandes d était tel qu'il optimisait la valeur de leur T_c donc, il ne restait que peu d'espoir pour améliorer les performances de ces matériaux.

Le calcul de Labbé, Barisic et Friedel datant de 1967 eut des conséquences importantes, encourageant d'une part les théoriciens à sortir du modèle en vogue de BCS et d'autre part les chimistes à creuser d'autres sillons que ceux des intermétalliques A15. Est ce donc une coïncidence si au cours des années 70 sont apparues de nouvelles classes de supraconducteurs ? Les phases dites de Chevrel pour lesquelles le magnétisme est dominant à coté de la supra et aussi les premières structures cubiques pérovskites supraconductrices de type $Ba(PbBi)O_3$. En Californie, A. Little avait de son coté lancé l'idée dans un grand article à Physical Review de supraconductivité à température ambiante dans des cristaux moléculaires à molécules unidimensionnelles, une sorte de CHx avant l'heure, où un appariement de Cooper pourrait se produire via un mécanisme de polarisation électronique et non de réseau.

Cette proposition avait beaucoup stimulé le petit monde de la supraconductivité et avait conforté Jacques dans le projet de soutenir l'un des groupes expérimentaux crée en 1967 au laboratoire de Physique des Solides dans le but d'étudier les métaux et alliages sous pression à basse température et qui en 1973 s'est redirigé vers l'étude

des conducteurs organiques de basse dimensionnalité.

Le style de direction de Jacques Friedel est certainement pour beaucoup dans les succès du laboratoire, obtenus à partir de 1974. Y a été ouvert un nouveau domaine pour la supraconductivité, celui de la supraconductivité organique: découvert en 1980 et toujours particulièrement actif 30 ans plus tard. Le laboratoire a aussi été très présent sur le front de la théorie des conducteurs unidimensionnels avec les travaux de notamment H. Schulz, T. Giamarchi, M. Héritier, P. Lederer, G. Montambaux et C. Bourbonnais.

Sept ans plus tard, la découverte de supraconducteurs à hautes T_c dans des cuprates bidimensionnelles par Bednorz et Müller, fut une nouvelle stimulation pour Jacques Friedel. Rapidement les discussions ont porté sur le pas quantitatif qui venait d'être franchi pour la T_c rapidement couronné par le Nobel de Müller et Bednorz.

Pouvait-on garder une vision de type BCS couplage faible électron-phonon tridimensionnel pour expliquer ce pas alors que, dans la décade précédente, tout semblait indiquer que le maximum avait été atteint dans le cadre BCS? Friedel, se contenta de faire quelques remarques simples, de bon sens et très pertinentes dans un milieu agité par des propositions extrêmes - sinon provocantes. Ses suggestions étaient fondées sur la profonde connaissance acquise dans la physique des métaux de transition. Il ne s'est pas attaché à résoudre le problème lié à l'origine de l'appariement dans les cuprates, admettant seulement qu'une attraction d'origine électronique n'était pas à exclure.

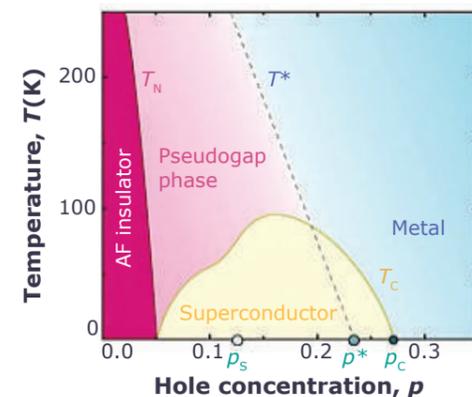
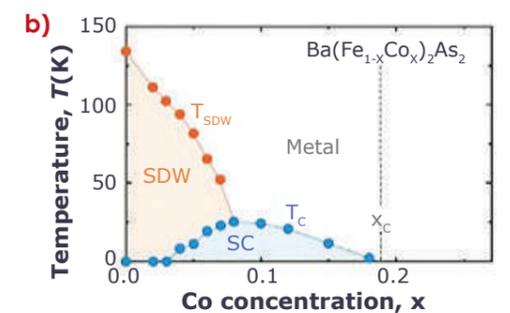
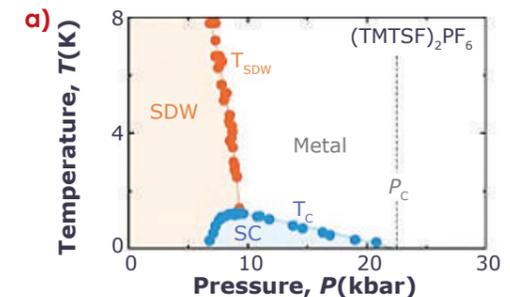


Fig 2. : Diagrammes de phases de trois familles de supraconducteurs récents indiquant différences et similitudes entre elles. Pour les cuprates (gauche), antiferromagnétisme et supraconduction se repoussent alors que pour les 1D organiques (a) et les pnictures (b) magnétisme et supraconduction s'attirent.

Toutefois, dans plusieurs articles et revues Friedel a suggéré que les hautes T_c de ces nouveaux matériaux pouvaient s'accommoder d'une théorie de type BCS de couplage faible à condition de bien tenir compte de la nature bidimensionnelle des structures en plans CuO_2 faiblement couplés, un point qui avait d'ailleurs été rappelé opportunément en 1987 par Labbé et Bok avec l'existence d'anomalies de van Hove situées à proximité du niveau de Fermi. Quant aux fluctuations antiferromagnétiques dont Friedel rappelait souvent l'existence puisque une évidence avait été apportée à Orsay par l'observation du déplacement de Knight dans la zone appelée pseudogap et par la stabilité d'une phase isolante magnétique dans le diagramme de phases de la Fig. 2, il considérait qu'elles ne procuraient pas une interférence constructive pour l'instauration de la supra puisque phases antiferros et supras se repoussent, Fig. 2, une situation qui est à l'opposé de celle des diagrammes soit des organiques 1D soit des récents supraconducteurs lamellaires de type plans Fe-As.

Jacques Friedel pour la supraconductivité comme pour tant d'autres domaines qu'il a abordés ne recherchait pas les annonces tonitruantes, il a marqué le milieu scientifique par ses remarques qu'il qualifiait lui même de conservatrices mais qui étaient oh combien pertinentes!



APPROFONDIR

J. Friedel. The high- T_c superconductors: a conservative view, J. Phys: Condens. Matter 1, 7757-7794, 1989



JACQUES FRIEDEL ET LES ONDES DE DENSITÉ DE CHARGE DANS LES CONDUCTEURS ÉLECTRONIQUES À UNE DIMENSION

Par Jean-Paul POUGET,
Directeur de recherches émérite au CNRS

Le concept d'onde de densité de charge (ODC) fut introduit par A.W. Overhauser dans les années 1960. Toutefois les ODC ne furent observées que dans les années 1970 dans le sel de Krogmann $K_2Pt(CN)_4Br_{0.33}H_2O$ (KCP) et les dichalcogénures de métaux de transition qui sont respectivement des conducteurs à une et deux dimensions. A l'époque la communauté doutait d'une physique intéressante dans les systèmes métalliques à une dimension (1D) car selon un résultat de N.F. Mott [1] les défauts de la chaîne suffisaient à localiser la fonction d'onde électronique. En 1972 H. Launois parla à J. Friedel de son intention d'étudier au laboratoire de Physique des Solides les propriétés électroniques de KCP formé d'un assemblage peu couplé de chaînes d'atomes de Pt. Bien que connaissant le résultat de N.F. Mott, J. Friedel non seulement encouragea avec pragmatisme cette étude mais conforta par la suite l'implantation de ces recherches en favorisant la synergie entre études électroniques autour de H. Launois et D. Jérôme et études structurales autour de R. Comès.

Les mesures de diffusion diffuse des rayons X montrèrent dès 1973 que KCP présentait dès l'ambiante dans sa phase métallique une instabilité collective 1D de type ODC stabilisant en dessous de 100K, après une transition dite de Peierls (suite à son calcul de 1955 [2]), un fondamental isolant. Dans l'ODC la densité électronique couplée aux variations de position atomique du Pt est modulée par le vecteur d'onde $2k_F$ (k_F est le vecteur d'onde de Fermi du gaz d'électrons 1D). La phase isolante est précédée d'un important régime de fluctuations des ODC creusant un pseudo-gap dans la densité d'états du métal qui fut mis en évidence par RMN du Pt. La dynamique des fluctuations ODC conduit à la formation d'une anomalie de Kohn géante au vecteur d'onde $2k_F$ dans la branche longitudinal acoustique qui fut mesurée en parallèle par diffusion des neutrons. L'observation en 1975 de la transition de Peierls et des ODC dans le conducteur organique TTF-TCNQ montra la généralité du phénomène.

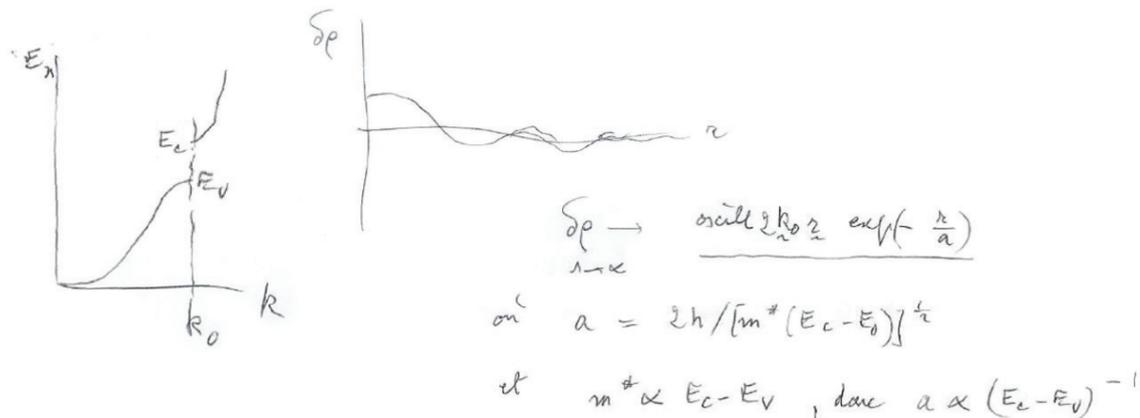


Fig. 1. Partie gauche : relation de dispersion électronique et ouverture d'une bande d'énergie interdite au niveau de Fermi en présence d'une modulation de vecteur d'onde $2k_0 \approx 2k_F$. Partie droite : oscillation d'amplitude de la densité électronique en réponse à un potentiel d'impureté; a correspond à ξ de la figure 2. (Correspondance de J. Friedel à l'auteur).

[1] Le résultat de Mott n'est valable que pour une chaîne isolée à $T=0K$.

[2] Il est intéressant de noter que le calcul de Peierls et le concept d'anomalie de Kohn ont été introduits fin des années 1960 par P.G. de Gennes dans son cours du DEA avant leur mise en évidence expérimentale.

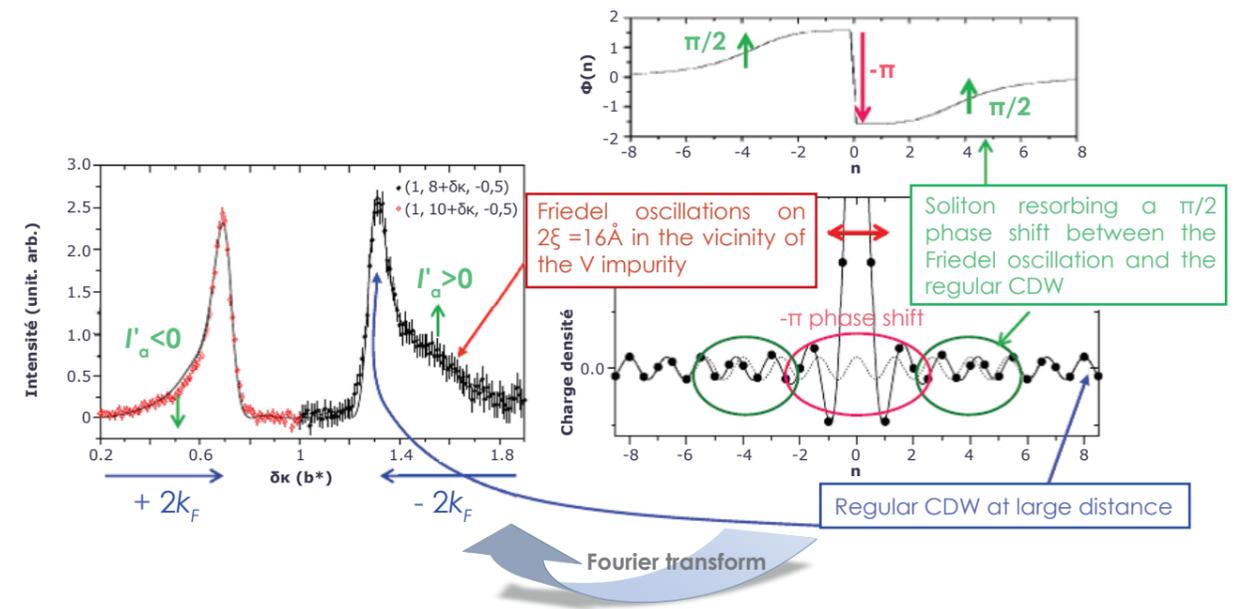


Fig. 2: Partie droite: oscillations de la densité de charge avec son déphasage de $-n$ autour d'une impureté de V et raccordement de l'OF à l'ODC régulière via la formation de deux solitons de déphasage $\pi/2$. Le panneau du haut donne la dépendance spatiale du déphasage $\phi(n)$ de l'onde résultante par rapport à l'ODC régulière (pointillés). Partie gauche: spectre de diffusion diffuse des rayons X dans $K_{0.3}(Mo_{0.972}V_{0.028})O_3$ comparé à la transformée de Fourier (ligne continue) de la modulation de densité représentée à droite (adapté de S. Rouzière, S. Ravy, J.-P. Pouget and S. Brazovskii, Phys. Rev. B 62, R16231 (2000)).

Suite à ces résultats J. Friedel fut le promoteur d'un effort de recherche coordonné au niveau national.

J. Friedel se consacra lors d'écoles de physique et de son enseignement au DEA à replacer la transition de Peierls dans le contexte plus général où un système électronique gagne de l'énergie via une modulation du réseau entraînant l'ouverture de gaps partiels au niveau de Fermi (partie gauche de la Fig. 1). Par la suite J. Friedel proposa que les quasi-cristaux soient des alliages de Hume Rothery. A partir de concepts bien établis en métallurgie J. Friedel s'est aussi consacré, avec D. Feinberg, à décrire l'élasticité, la plasticité, les propriétés topologiques des défauts de l'ODC et l'effet des imperfections qui jouent un rôle essentiel dans son accrochage au réseau [3]. Ces travaux ont stimulés des expériences qui ont permis de mesurer l'élasticité de la phase de l'ODC, de déterminer par effet d'interférences aux rayons X l'accrochage de la phase de l'ODC sur des défauts et de « visualiser » par diffusion cohérente des rayons X les dislocations de phase de l'ODC du conducteur 1D $K_{0.3}MoO_3$. En plus à cause de la réponse électron-trou à $2k_F$ du système électronique 1D le potentiel d'impureté induit des oscillations de densité électronique (les oscillations de Friedel (OF) - partie droite de la Fig.1)

se superposant à l'ODC à $2k_F$. Dans les années 2000 la diffraction des rayons X a permis de détecter dans $K_{0.3}MoO_3$ substitué au V (Fig. 2) la transformée de Fourier de deux composantes de l'OF induite par le défaut de V: l'oscillation à $2k_F$ de l'amplitude de l'ODC et son déphasage $\phi = -\pi$ sur le site du V assurant l'écrantage d'une différence de charge avec le Mo. A cette époque l'auteur eut des discussions avec J. Friedel afin de décrire la façon dont le déphasage de $-\pi$, qui annule d'un côté du défaut le déphasage transverse de π entre ODC voisines minimisant leur interaction coulombienne (S. Barisic et J. Friedel, 1976), se résorbe. Dans le système 1D $K_{0.3}MoO_3$ l'expérience indique que cette résorption s'effectue par création de deux solitons déphasant chacun l'ODC de $\pi/2$ (Fig.2).

J. Friedel fut l'un des premiers scientifiques à considérer dans sa globalité la complexité des conducteurs 1D où plusieurs types de degrés de liberté sont intimement couplés. Il a vite réalisé que les propriétés des ODC ne pouvaient se comprendre qu'en considérant simultanément ses aspects électroniques et structuraux. Il a aussi favorisé le développement de cette activité en mettant en synergie les communautés de physiciens et de chimistes.

APPROFONDIR

[3] D. Feinberg and J. Friedel, Elastic and Plastic deformations of Charge Density Waves, J. Physique 49, 485 (1988)