

# Avant Propos

Durant les 10 années pendant lesquelles ce cours de « Physique des Electrons dans les Solides » a été enseigné à l'École polytechnique, les diverses équipes enseignantes ont été conduites à effectuer de nombreux contrôles écrits. Nous nous sommes très souvent astreints à proposer des énoncés centrés sur **des observations expérimentales** et permettant donc d'encourager les élèves à réfléchir à leur signification.

Parmi ceux-ci, de nombreux exercices plus ou moins classiques ont été introduits sous formes de « questions » dans le cours. Les réponses à ces questions sont données au début de ce tome II. Nous n'avons par ailleurs conservé dans ce recueil que les problèmes dont les énoncés illustrent des effets physiques originaux et nouveaux par rapport au contenu du cours. Il nous est en effet apparu important de compléter les notions de base du tome I par une présentation de **compléments** importants de physique des solides qui ne pouvaient pas être enseignés à l'École dans le temps limité dédié au cours magistral et aux travaux dirigés.

L'objectif de ce recueil n'est donc pas limité à un contrôle des acquis du tome I. Des étudiants ayant acquis indépendamment des connaissances de base de physique des solides pourront l'utiliser pour entrevoir des **ouvertures vers des thèmes de recherche très vivaces**, éclairées par des approches expérimentales modernes.

Des manifestations directes de la structure de bandes électroniques sur les **propriétés optiques** des solides sont examinées dans les problèmes 2 et 5. L'énergie des bandes d'états électroniques peut **influencer la structure cristalline** de certains alliages (règles de Hume Rothery, problème 4) ou induire une **transition de Peierls**, qui correspond à un doublement de maille et une transition métal-isolant dans les composés unidimensionnels (problème 6).

Nous avons tenu à illustrer les **structures de bandes particulières** de certains métaux importants pour leurs propriétés supraconductrices, tel le cuprate à haute température critique  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (problème 3), les composés dits A15 tel  $\text{V}_3\text{Si}$  où les atomes de vanadium sont organisés en un arrangement de chaînes (problème 14) ou le nouveau composé supraconducteur  $\text{MgB}_2$  dont la structure électronique très bidimensionnelle s'apparente à celle du graphite (problème 16).

La technologie des **semi-conducteurs** faisant l'objet d'un cours spécifique à l'École, nous nous sommes contentés ici de rappeler l'importance de la structure de bandes pour leurs propriétés de transport électronique. Les expériences classiques de résonance cyclotron permettent d'accéder aux masses effectives des électrons et des trous (problème 8). La compréhension de la structure des niveaux électroniques donneurs introduits par substitution de P dans le Si permet d'introduire dans ces systèmes la notion de **transition isolant-métal de Mott**. Celle-ci résulte de la compétition entre la répulsion coulombienne sur un site atomique qui favorise la localisation des

électrons et la tendance à leur délocalisation associée aux intégrales de transfert entre sites voisins. Cette compétition peut expliquer la transition isolant métal observée dans le Si à fort dopage en phosphore (problème 7).

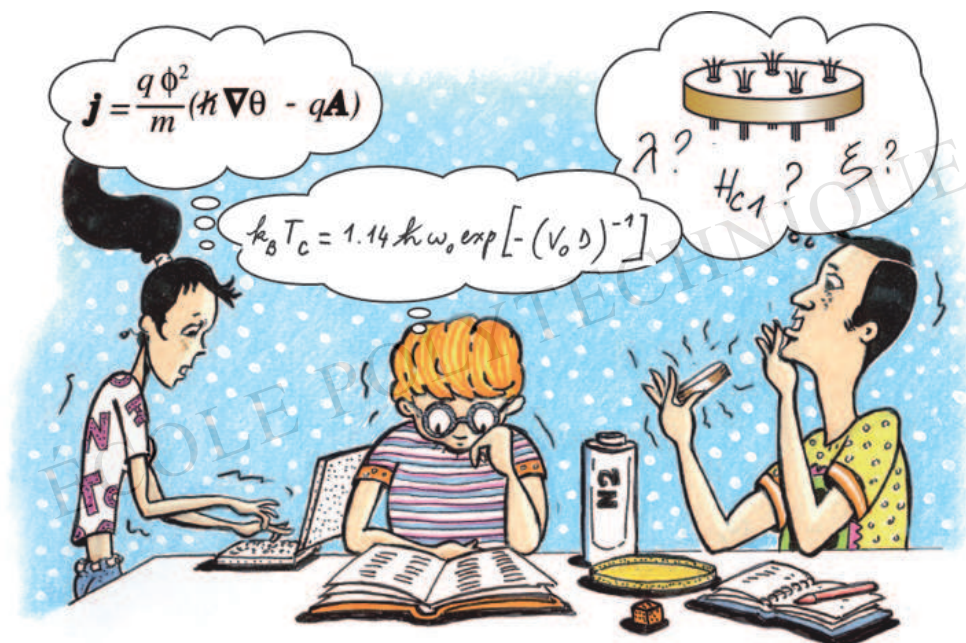
Si les vibrations atomiques et leur quantification en termes de **phonons** sont peu abordés dans le tome I, ces notions sont explicitées dans le problème 9 où leurs influences sur la capacité calorifique des solides et la résistivité des métaux purs sont illustrées. Leur incidence sur les diagrammes de diffraction des rayons X est aussi étudiée dans le problème 1.

De nombreux problèmes sont dédiés à une étude approfondie des propriétés originales associées à la supraconductivité. On peut par exemple étudier l'incidence de la **quantification du flux** sur les propriétés thermodynamiques des supraconducteurs (expérience de Little et Parks, problème 10) et l'**effet Josephson continu ou alternatif** en champ nul (problème 11). L'existence d'**états mixtes** au coeur d'une jonction Josephson (problème 12), les **irréversibilités des courbes d'aimantation** induites par les interactions entre les vortex et la surface dans un supraconducteur de type II (problème 13) permettent de mieux appréhender la **physique des vortex**.

L'observation de ces états mixtes par **microscopie et spectroscopie tunnel** (problème 15) permet d'aborder les propriétés des états excités des supraconducteurs et la structure fine du **gap supraconducteur** dans les composés NbSe<sub>2</sub> ou MgB<sub>2</sub> (problème 16).

Les compléments de magnétisme portent sur l'antiferromagnétisme des cuprates non dopés (problème 17) et sur les propriétés magnétiques des matériaux **antiferromagnétiques** dans l'approximation du champ moléculaire (problème 18). Enfin l'importance du **magnétisme des couches minces** est soulignée par l'utilisation de méthodes magnétooptiques pour illustrer leur décomposition en domaines (problème 19), ainsi que par une étude de l'incidence de la surface sur l'anisotropie magnétique des films minces (problème 20).

La mise sous forme de problèmes de ces effets physiques passionnants, et les nombreux efforts de réflexion qui sont suggérés sur la base d'observations expérimentales me paraissent devoir stimuler la curiosité du lecteur. Ce recueil devrait lui permettre d'entrevoir la richesse de la démarche scientifique qui s'évertue à confronter observations et modèles théoriques.



Si l'on considère souvent la physique par son aspect formel, qui est nécessaire à un certain stade de compréhension, le socle de la démarche scientifique repose sur l'observation et l'expérience. Pour cette raison des observations expérimentales sont à la base de nombreux problèmes présentés dans ce volume.

Illustration : Claire et David ont bien compris que leur compréhension qualitative des phénomènes expérimentaux peut maintenant être mise sous forme de modèles susceptibles d'explicitier les observations. Pierre, qui est un expérimentateur avéré, préfère relever soigneusement la chronologie des faits, avant d'aborder cette démarche.

# Table des matières

Réponses aux questions du tome I	9
1 Facteur Debye-Waller	45
2 Réflectivité de l'Aluminium	51
3 Structure de bandes d' $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	55
4 Énergie électronique et stabilité des alliages	69
5 Propriétés optiques des métaux monovalents	77
6 Composés unidimensionnels TTF-TCNQ	83
7 Transition isolant-métal	97
8 Résonance cyclotron	119
9 Phonons dans les Solides	131
10 Thermodynamique d'un cylindre supraconducteur mince	147
11 Effets Josephson continu et alternatif en champ magnétique nul	159
12 Jonction Josephson en champ magnétique	169

13 Aimantation d'un supraconducteur de type II	187
14 Structure Électronique et supraconductivité de $V_3Si$	199
15 Supraconductivité de $NbSe_2$	207
16 Le diborure de Magnésium	217
17 Propriétés électroniques de $La_2CuO_4$	233
18 Propriétés d'un solide antiferromagnétique	239
19 Magnétisme de films minces : utilisation en magnéto-optique	249
20 Magnétisme d'une couche mince	255