

**Zeitschrift:** Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles = Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg  
**Herausgeber:** Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles  
**Band:** 112 (2023)

**Artikel:** Développement de manipulateurs pour des mesures de photoémission  
**Autor:** Rumo, Maxime / Andrey, Markus  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1046532>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 23.12.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

---

## Développement de manipulateurs pour des mesures de photoémission

---

MAXIME RUMO & MARKUS ANDREY

*La photoémission est une méthode expérimentale de choix dans la recherche sur les matériaux quantiques. Ces nouveaux matériaux (quantiques) jouent un rôle majeur dans les technologies du futur, tout particulièrement dans l'électronique. Dans le monde de la photoémission, Fribourg a une histoire singulière et par ailleurs une renommée internationale. Cette histoire fut acquise grâce à une collaboration importante avec l'atelier technique de l'Université de Fribourg. Cette collaboration étroite a mené récemment à l'élaboration d'un projet de développement d'un manipulateur pour la spectroscopie de photoémission à résolution angulaire utilisant un faisceau micro-focalisé. L'évolution des développements des manipulateurs à Fribourg pour la photoémission va être retracé depuis son début jusqu'à l'élaboration du nouveau projet du groupe du Prof. Dr. CLAUDE MONNEY.*

*Die Photoemission ist eine bevorzugte experimentelle Methode bei der Forschung an Quantenmaterialien. Diese neuen (Quanten-)Materialien spielen eine wichtige Rolle in den Technologien der Zukunft, insbesondere in der Elektronik. In der Welt der Photoemission hat Freiburg eine einzigartige Geschichte und ist darüber hinaus international bekannt. Diese Geschichte wurde durch eine wichtige Zusammenarbeit mit der technischen Werkstatt der Universität Freiburg erworben. Diese enge Zusammenarbeit führte vor kurzem zu einem Projekt zur Entwicklung eines Manipulators für die winkeelaufgelöste Photoemissionsspektroskopie unter Verwendung eines mikrofokussierten Strahls. Die Entwicklung der Manipulatorenentwicklung in Freiburg für die Photoemission wird von ihrem Beginn bis zur Entwicklung des neuen Projekts der Gruppe von Prof. Dr. CLAUDE MONNEY zurückverfolgt werden.*

*Photoemission is an experimental method of choice in research for quantum materials. These new (quantum) materials play a major role in the technologies of the future, particularly in electronics. In the world of photoemission, Fribourg has a singular history and an international renown. This history has been built up through close collaboration with the technical workshop at the University of Fribourg. This close collaboration has recently led to a project to develop a manipulator for angle-resolved photoemission spectroscopy using a micro-focused beam. The evolution of manipulator development at Fribourg for photoemission spectroscopy will be traced from its beginnings to the elaboration of the new project of the group of Prof. Dr. CLAUDE MONNEY.*

## Introduction

### Matériaux quantiques

Alors que le développement de la technologie au cours des trois dernières décennies a conduit à la miniaturisation ultime de nos dispositifs matériels, nous atteignons dans certains domaines les limites classiques décrites par la physique newtonienne. Dans ce monde de dispositifs toujours plus petits, des nouvelles applications telles que les micropuces, les nanomatériaux organiques ou les nanostructures placent la mécanique quantique et ses propriétés au centre de l'attention. Les matériaux dotés d'étonnantes propriétés quantiques, tels que la supraconductivité, sont étudiés par les scientifiques qui s'intéressent à la physique du solide. Cette communauté se consacre à l'étude de la phase solide de la matière, en particulier les structures cristallines, qui sont des assemblages périodiques ordonnés d'atomes. Les matériaux dotés de structure cristalline sont appelées cristaux. Les propriétés physiques des cristaux diffèrent fortement de celles des atomes qui la composent. En effet, les interactions entre plusieurs atomes peuvent conduire à l'émergence de phases collectives nouvelles et exotiques, par exemple la supraconductivité ou les ondes de densité de charge.

Le phénomène de supraconductivité étant souvent mal compris par les néophytes, faisons une analogie quelque peu maladroite. Le déplacement d'un poisson seul est "simple" à étudier et à prédire. Cependant, les déplacements d'un banc de poisson sont très différents des déplacements d'un poisson seul. De plus, le comportement d'un banc de poisson n'est pas explicable par l'addition des comportements des individus du banc. Dans le contexte des phénomènes émergents susmentionnés, c'est-à-dire de toute forme de phase collective corrélée, les interactions entre les atomes joue un rôle majeur. Le comportement collectif corrélé de ces éléments individuels conduit régulière-

ment à des phénomènes exotiques aux propriétés étonnantes. En fait, ces phénomènes se produisent spontanément et diversement dans la nature à toutes les échelles. Par exemple, le comportement des bancs de poissons montre une identité collective impressionnante qui émerge de la contribution de chaque individu. En physique de la matière condensée, les interactions complexes d'individus tels que des atomes, des électrons, des ions ou des spins conduisent à des phénomènes collectifs spectaculaires tels que la supraconductivité, le magnétisme, les ondes de densité de charge ou les états électroniques ordonnés par orbite, pour n'en citer que quelques-uns. L'apparition de ces états est le produit de la compétition des corrélations électroniques et des effets de fluctuation qui conduisent à des transitions de phase à des températures critiques, où les corrélations deviennent coordonnées dans des régions spatiales limitées, ce qui entraîne la rupture de la symétrie du cristal. À partir de ces transitions de phase, le système stabilisé de symétrie brisée (qui est différent de l'état fondamental) présente plusieurs propriétés observables. La compréhension des différents paramètres du système permet une meilleure appréhension de ces phénomènes et fournit les outils cruciaux pour la création de technologies futures.

### La spectroscopie de photoémission à résolution angulaire

Une méthode puissante pour étudier ces comportements est l'analyse de la structure de bande électronique. La spectroscopie électronique, et plus spécifiquement la spectroscopie de photoémission à résolution angulaire (ARPES) [HUF13], fournit des informations uniques sur le degré de liberté électronique qui est essentiel pour comprendre la physique de ces états exotiques sur une large gamme d'énergie. Ces mesures nous permettent d'identifier la distribution des électrons dans l'espace réciproque des solides et également de détecter les propriétés exotiques qui découlent des transitions de phase.

Une expérience ARPES est basée sur un principe simple : l'effet photoélectrique. Un photon d'énergie  $h\nu$ , où  $h$  est la constante de PLANCK et  $\nu$  la fréquence de l'onde électromagnétique, est absorbé par l'échantillon et

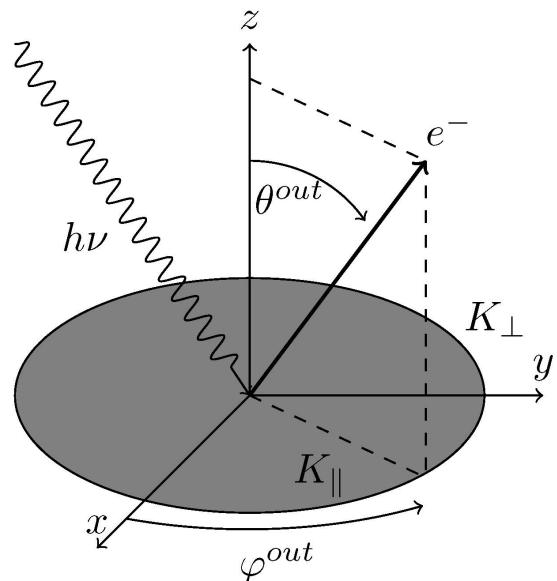


Figure 5.1: Photoémission sur un échantillon, où  $h\nu$  représente le photon incident,  $e^-$  l'électron éjecté et les composantes  $K_\perp$  et  $K_\parallel$  du vecteur d'onde de l'électron [MAL15, RUM21].

un électron est éjecté de la surface de l'échantillon. L'énergie cinétique  $E_{kin}$  de l'électron éjecté peut être reliée à son énergie de liaison  $E_B$  dans le solide avant l'événement de photoémission par la relation d'Einstein :

$$E_{kin} = h\nu - |E_B| - \phi_s, \quad (5.1)$$

où  $\phi_s$  est la fonction de travail de l'échantillon. La figure 5.1 montre une représentation schématique du processus de photoémission. Le nombre mesuré de photoélectrons émis en fonction de leur quantité de mouvement  $K$  et de leur énergie cinétique  $E$ ,  $I(K, E)$ , constitue l'intensité de la photoémission.

### Importance des ateliers

Dans la technique de photoémission, un photon est utilisé pour l'excitation d'un électron. En d'autres mots, les matériaux sont illuminés afin d'en extraire des informations. De même que pour la diffraction des photoélectrons (XPD), nous utilisons un rayon-X pour exciter un électron avec une énergie définie qui est alors utilisé comme sonde. La diffusion cohérente de ces électrons dans le potentiel électronique du réseau révèle des informations cruciales sur l'organisation atomique. Les angles  $\theta$  et  $\varphi$ , définis dans la figure 5.1, sont variés en effectuant des rotations sur l'échantillon, demandant une précision très minutieuse. Les manipulateurs et les instruments de mesures sont alors la clef de voute de la recherche fondamentale de cette technique. Le développement de ces instruments est souvent le précurseur de découvertes. Par exemple, le développement des chambres à brouillard de WILSON a permis l'étude des particules alpha, bêta et gamma. C'est pourquoi le développement d'instruments est autant décisif. Dans cette optique, l'Université de Fribourg a investi pendant de nombreuses années dans le développement de manipulateurs pour l'expérimentation physique. Cet investissement se traduit par une collaboration étroite entre une atelier technique et les groupes de recherches.

Dans la suite de cet article, nous allons donc nous intéresser aux manipulateurs qui ont été développés à l'Université de Fribourg, à leur genèse ainsi qu'aux principaux protagonistes de leur conception. Nous aborderons ensuite les optimisations apportées ainsi que la prolifération des articles scientifiques qui en résultent. Nous terminerons par la présentation des projets à venir.

## L'historique des contributions de l'Université de Fribourg

### Le semis

La graine qui lança le développement des manipulateurs pour la photoémission fut semée sous d'autres latitudes, proches des plages de sable blanc d'Honolulu à Hawaï. Dr. JÜRG OSTERWALDER, fraîchement diplômé d'un doctorat de l'École polytechnique de Zürich en 1985, y effectua un post-doctorat de 1985 à 1987 sous la direction du Prof. Dr. CHARLES S. FADLEY, directeur de l'institut de chimie de l'Université d'Hawaï. L'institut travaillait activement sur le développement et l'étude de la spectroscopie de photoémission à rayon-X. Le groupe du Prof. Dr. FADLEY avait déjà réalisé des avancées considérables dans ce domaine en créant notamment un nouveau domaine de recherche de la spectroscopie de photoémission, la diffraction de photoélectrons à rayon-X, ce qui attira l'attention du Dr. JÜRG OSTERWALDER.

*"Le professeur Charles S. Fadley (surnommé Chuck), qui était un leader mondial de la spectroscopie de photoémission utilisant le rayonnement synchrotron, est décédé le 1<sup>er</sup> août 2019 à l'âge de 77 ans. Il était un fondateur bien connu de la diffraction de photoélectron à rayon-X, et en tant que chef de file de la spectroscopie de photoélectron utilisant le rayonnement synchrotron, il a initié et promu plusieurs nouvelles approches: telles que l'holographie de photoélectron, la spectroscopie de photoélectron de rayons X durs, la spectroscopie d'ondes stationnaires de rayons X mous, et plus encore. Il a contribué à de nombreuses activités scientifiques et a servi les communautés scientifiques, y compris cette conférence de la ALC (International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices). Il était un membre honorable du 141<sup>me</sup> comité de la JSPS (The Japan Society of Vacuum and Surface Science) et un lauréat du prix du 141<sup>me</sup> comité de la JSPS" [DAI20].*

Le groupe du Prof. Dr. FADLEY fut le premier à mesurer les motifs de diffraction sur un cristal d’O/Cu(001) en 1980 et multiplia les études dans ce domaine qui n’en était qu’à son balbutiement. En 1985, à l’arrivée du Dr. OSTERWALDER, la technique était déjà bien maîtrisée, mais les études restaient laborieuses et longues. Les prises de mesures étaient rudimentaires et nécessitaient de la patience. Afin de mesurer les motifs de diffraction de la figure 5.2, il était nécessaire de mesurer manuellement l’intensité de chaque angle polaire  $\theta$  entre  $7^\circ$  et  $45^\circ$ , c’est à dire prendre la première mesure à un angle polaire et modifier l’angle azimutale de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  manuellement, pour finalement changer à nouveau l’angle polaire pour la mesure suivante et ainsi de suite. Seulement après ces longues sessions de mesures répétitives, les scientifiques pouvaient reconstruire un spectre. Sur la figure 5.2, nous pouvons observer sept tels spectres. Dans ce contexte et avec ces moyens techniques, Dr. J. OSTERWALDER acquit de l’expérience, rédigea et contribua à huit études publiées entre 1987 et 1989<sup>1</sup>, un exploit en soi.

A la fin de son post-doctorat en 1987, il fut appelé par le Prof. Dr. LOUIS SCHLAPBACH qui, suite à son nomination en début de 1988, formait une équipe pour développer la recherche à l’Université de Fribourg. Cet événement fut un tournant majeur pour l’Université de Fribourg.

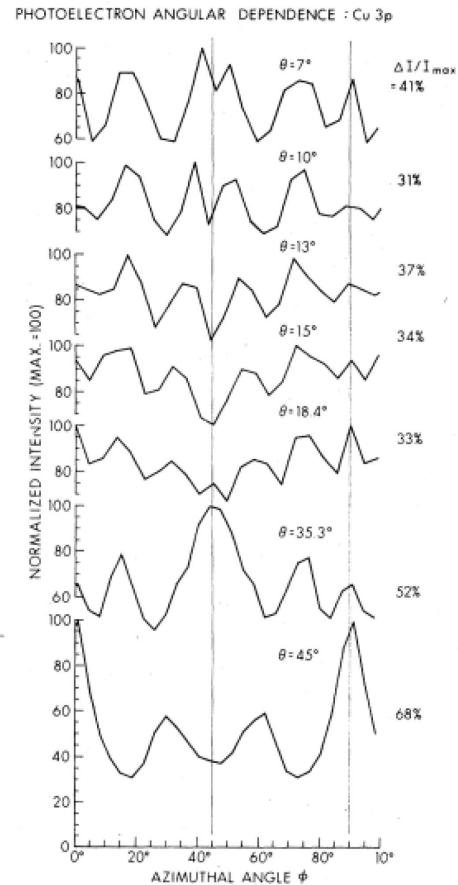


Figure 5.2: Les dépendances azimutales à 4 symétries des intensités des photoélectrons du niveau de coeur 3p du Cu (001) des angles polaires  $\theta$  de  $7^\circ$  à  $45^\circ$  [PET80].

*"Louis Schlapbach, né en 1944, Suisse, a été directeur général de l’EMPA (Laboratoire fédéral suisse pour la science et la technologie des matériaux) et, jusqu’en 2006, professeur titulaire de physique à l’EPF de Lausanne. Il est diplômé de l’École polytechnique fédérale de Zürich en physique expérimentale et a obtenu son doctorat en physique des solides - magnétisme également à l’ETH Zürich. En tant que postdoc*

<sup>1</sup>Les résultats des études prirent du temps à être publiées et les auteurs ne se trouvaient plus dans le même institut. Les co-auteurs de chaque études restèrent en contact pour finir leur différentes collaborations.

*dans un laboratoire du CNRS à Paris, il a étudié le stockage de l'hydrogène dans les composés intermétalliques. De retour à l'ETHZ, il a développé les aspects de science des surfaces de l'interaction de l'hydrogène avec les métaux et les alliages. De 1988 à 2001, Louis Schlapbach a été professeur ordinaire de physique expérimentale à l'Université de Fribourg. À ce titre, il a constitué une équipe de recherche de 20 à 25 personnes travaillant sur le thème des nouveaux matériaux et de leurs surfaces, qui a donné lieu à une quarantaine de doctorats, 200 articles scientifiques et quelques brevets. Une forte collaboration avec l'industrie a été établie. Ses intérêts de recherche concernent principalement les propriétés nanoscopiques des nouveaux matériaux et surfaces, l'interaction de l'hydrogène avec les solides, les surfaces et revêtements fonctionnels, les matériaux pour la technologie énergétique" [ETH].*

## La germination

A la suite de sa nomination, le Prof. Dr. L. SCHLAPBACH acheta un analyseur à multiplicateur d'électrons de la classe ESCA pour les futures études de son groupe et, en parallèle, commença à composer son équipe. Dr. J. OSTERWALDER, membre clé de l'équipe et revenu en terre helvétique, fit part à son nouveau chef de ses compétences acquises lors de son séjour à l'Université d'Hawaï auprès du Prof. Dr. C. S. FADLEY. Les échanges entre les deux scientifiques menèrent au premier concept de manipulateur automatisé qui réduirait le temps de prise de mesures et augmenterait la précision de ces dernières. Afin de concrétiser ce premier concept, Prof. Dr. L. SCHLAPBACH et Dr. J. OSTERWALDER ont pris contact avec les techniciens de l'atelier de l'Université afin de réaliser leurs objectifs. Du côté de la mécanique, OSWALD RAETZO, mécanicien de précision curieux et inventif, a su comprendre les scientifiques et réalisa par la suite la majorité des pièces mécaniques des différents prototypes. Du côté électronique et programmation, FRANCIS BOURQUI, automatien et électronicien, leur a apporté le savoir nécessaire pour rendre tout le processus de mesure automatique. Cette collaboration étroite entre le groupe de recherche et l'atelier furent sans aucun doute la clé de voute de la conception des prototypes.

C'est ainsi qu'à la fin des années 80, le groupe SCHLAPBACH pouvait profiter de leur premier prototype de manipulateur automatisé. Ce prototype fut réalisé à l'aide de matériaux bien spécifiques, compatibles avec les conditions d'ultra haut vide<sup>1</sup> nécessaire pour les mesures de photoémission. Dans

<sup>1</sup>Pression inférieur à  $10 \times 10^{-10}$  mbar

ces matériaux, nous comptons le cuivre de haute conductivité sans oxygène (OFHC) pour le refroidissement, le bronze de beryllium pour tous les rouages ainsi que l'inox, l'aluminium, divers céramiques et autres. La conception du premier prototype, bien qu'étant un chef d'œuvre de complexité, comprenait quelques faiblesses et défauts. Le refroidissement de l'échantillon était fait à l'aide d'une mâchoire que l'on devait actionner manuellement et n'était donc pas efficace. Une fois la mâchoire actionnée, les scientifiques ne pouvaient mesurer l'échantillon qu'à un seul angle avant de le déplacer manuellement, technique similaire à celle utilisée avec l'ancienne méthode appliquée à Hawaï. De plus, les sillons des roues dentées montrèrent rapidement des signes de vieillissement à cause de l'absence de lubrification dans le vide. Ces inconvénients ne découragèrent en rien la détermination des différents acteurs du développement, mais leur permirent de trouver des solutions ingénieuses.

Les développements ont permis de réduire grandement le temps de mesure et d'augmenter considérablement leur précision. La figure 5.3 montre une image typique XPD que leurs appareils ont permis de prendre en seulement quelques heures, alors que cette même mesure aurait pris plusieurs jours sans l'automatisation. Sur cette image, le centre correspond à l'émission normale des photoélectrons et le bord correspond à une émission rasante.

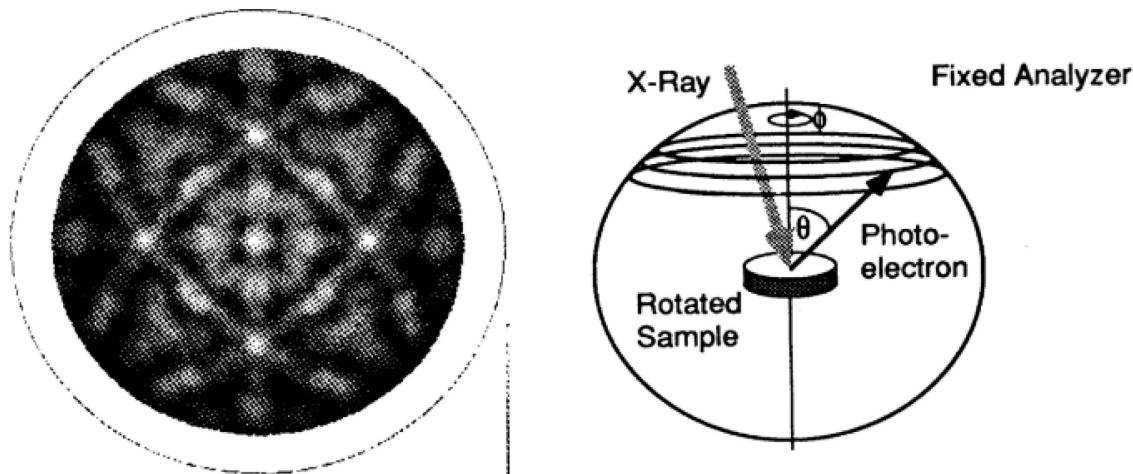


Figure 5.3: Le diffractogramme expérimental est présenté sous forme de cartes d'intensité bidimensionnelles en niveaux de gris projetées stéréographiquement. L'échantillon est tourné autour de sa normale de surface de manière à mesurer un balayage azimutal à chaque position d'angle polaire [NAU93].

## La pousse

Forts de leurs nouvelles expériences, les scientifiques sont rejoints par un nouveau membre, Dr. THOMAS GREBER, et avec les membres de l'atelier développèrent un second prototype tout en continuant à travailler sur l'ancien. Ce second prototype surmonta les soucis mécaniques au moyen de matériaux mieux adaptés. Les succès scientifiques atteints grâce au second prototype dépassa largement les frontières et attisa la curiosité d'éminents chercheurs en Europe, dont le Prof. Dr. STEPHAN HÜFNER de l'Université de Saarbrücken. Le Prof. Dr. S. HÜFNER, amis du Prof. Dr. L. SCHLAPBACH, décida de prendre une année sabbatique pour rejoindre le groupe de scientifiques de l'Université de Fribourg afin d'apporter ses compétences et de bénéficier en retour de l'expérience des fribourgeois. L'effervescence issue des échanges entre tous ces protagonistes mena à un succès sans précédent pour l'Université de Fribourg. Le groupe de SCHLAPBACH ne publia pas moins de 20 articles par année avec le second prototype de manipulateur. De ce succès naquit l'idée de compléter les compétences techniques de la photoémission de diffraction de photoélectron avec de la photoémission à ultra-violet, domaine de prédilection du Prof. Dr. S. HÜFNER. Pour cette nouvelle tâche, le Prof. Dr. L. SCHLAPBACH chargea en 1992 le Dr. PHILIPP AEBI qui terminait un post-doctorat au Canada.

L'arrivée du Dr. P. AEBI, engagé par le Prof. Dr. J. OSTERWALDER fraîchement promu professeur assistant, coïncida avec le développement du troisième prototype de manipulateur qui devait surmonter les problèmes de refroidissement rencontrés par les deux premiers modèles. L'engagement du Dr. P. AEBI se réalisa dans le cadre d'un projet du fond national suisse pour l'étude des supraconducteurs de haute température critique. Le succès de ce projet dépendait à la fois de la cartographie automatique, dit "mapping", mais aussi de la qualité des mesures. L'inventivité du mécanicien de l'atelier, O. RAETZO, permit d'atteindre cette qualité de mesure. Dès lors, toutes les conditions étaient réunies.

La figure 5.4 montre le dernier exemplaire du manipulateur issu de la troisième génération de prototype de l'Université de Fribourg. Il possède deux axes de rotation  $\varphi$  et  $\theta$  automatisés, ainsi que des axes de translation  $x$  et  $y$  pour aligner l'échantillon (ici un échantillon d'aluminium monté sur un porte échantillon, appelé dans la communauté, le swiss-puck ou porte échantillon style "champignon"). Nous pouvons également observer l'admission de froid externe suivie des soufflets (accordéons) enroulés autour du manipulateur interne.

Il n'a fallu que peu de temps aux scientifiques et membres de l'atelier pour atteindre les objectifs fixés. Ils mesurèrent pour la première fois en 1993 une image de cartographie de la surface de Fermi sur un échantillon supracon-

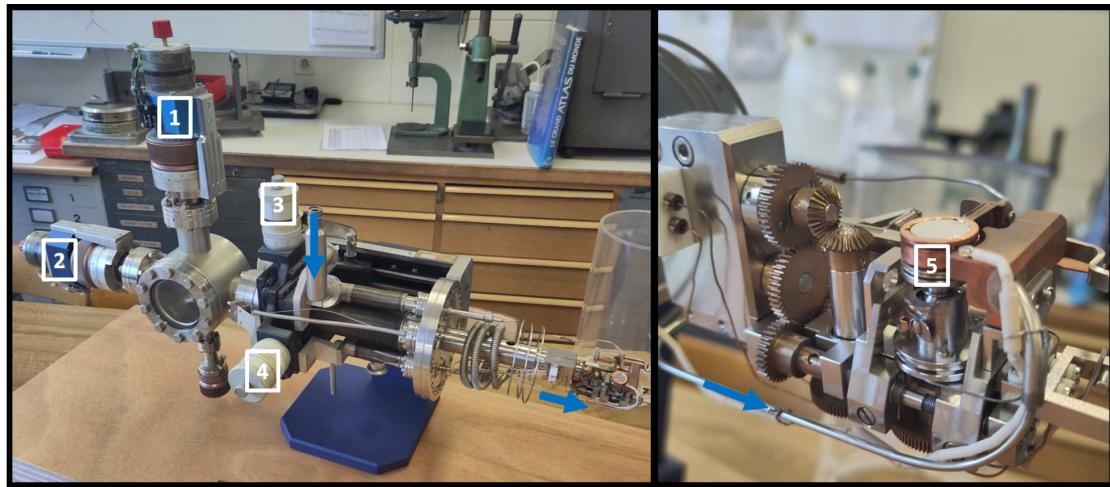


Figure 5.4: Le troisième prototype de manipulateur de l'Université de Fribourg. (1) l'axe de rotation  $\varphi$ , (2) l'axe de rotation  $\theta$ , (3) axe de translation  $y$ , (4) axe de translation  $x$ , (5) l'échantillon et les flèches bleues des soufflets du système cryogénique.

ducteur à haute température critique par spectroscopie de photoémission à résolution angulaire. Le fait d'avoir une image a permis de percevoir de nouvelles structures de bande qui n'avaient jusqu'alors jamais été vues. Dr. P. AEBI ira présenter peu de temps après cette découverte ses travaux aux États Unis d'Amérique en Californie en tant qu'invité. Cette découverte intéressa trois lauréats du prix Nobel le Prof. Dr. JOHN ROBERT SCHRIEFFER, le Prof. Dr. PHILIP W. ANDERSON et le Prof. Dr. KARL A. MÜLLER qui ont souhaité discuter avec les scientifiques fribourgeois. En outre, leur dispositif expérimental leur permettait de combiner la spectroscopie de photoémission à rayon-X et de diffraction de photoélectrons et à ultra-violet. Ainsi, ce dispositif expérimental était en cette année l'installation universitaire la plus complète.

### La récolte

Cette avancée majeure augmenta encore plus la visibilité de l'Université de Fribourg avec un nombre d'articles publiés à un rythme galopant. Selon le Dr. P. AEBI "*le dispositif expérimental est devenu une machine à publication ... Tout ce que l'on essayait, devenait en quelques temps une publication.*" cette citation dévoile l'ampleur de leurs avancées. Entre 1991 à 2001, le groupe du Prof. Dr. L. SCHLAPBACH publie environ 95 articles grâce aux développements des différents prototypes de manipulateur.

À la suite de cette période faste, l'équipe au complet put profiter des rebondées de leur travail. Le Prof. Dr. L. SCHLAPBACH saisit la place de CEO de l'EMPA en 2001 et devint ainsi professeur à l'école polytechnique de Lausanne, puis ensuite de l'école polytechnique de Zürich en 2006. Le Prof. Dr.

As. J. OSTERWALDER obtint un poste de professeur à l'Université de Zürich en 1994, où il monta son groupe de recherche. Le Dr. T. GREBER effectua un post-doc en Allemagne peu après sa thèse de doctorat et rejoint Prof. Dr. J. OSTERWALDER à Zürich en 1995. Il obtint une habilitation et une place de professeur à l'Université de Zürich en 2004. Le Dr. P. AEBI fut nommé professeur à l'Université de Neuchâtel en 2002 et reviendra à Fribourg à la suite de la fermeture de l'institut de physique de l'Université de Neuchâtel. De nombreux autres membres de ce groupe obtinrent des places prestigieuses.

*"Ces découvertes et développements ont permis de placer Fribourg sur la carte de la photoémission pour le reste du monde ."*

Prof. Dr. P. AEBI.

En parallèle, la notoriété des manipulateurs de l'Université de Fribourg fit du chemin et un exemplaire fut construit pour un institut d'Italie à l'Université de Padoue et un autre au synchrotron LURE (aujourd'hui SOLEIL) de Paris dans le cadre de collaborations. De plus, Fribourg développa et produira le premier manipulateur de spectroscopie de photoémission de l'institut Paul Scherrer (PSI). Depuis cette collaboration, les liens entre l'Université de Fribourg et le PSI sont restés forts. Le PSI développa sur le modèle du manipulateur fribourgeois les manipulateurs nouvelle génération de classe Carving grâce à l'ingéniosité de Dr. LUC PATTHEY (aujourd'hui Prof. Tit. Dr. à l'Université de Fribourg).

Cette histoire à succès émergea de l'idée de génie de visualiser les mesures de spectroscopie de photoémission non sous forme de spectres mais sous forme d'image en deux dimensions mesurées de manière automatique.

## Projet du nouveau manipulateur

La conception d'un manipulateur micro-ARPES est un processus complexe qui requiert une expertise en ingénierie de précision et en physique des surfaces. Un manipulateur micro-ARPES est un outil utilisé pour l'imagerie de surface en utilisant la technique de spectroscopie de photoémission à résolution angulaire. La conception d'un manipulateur micro-ARPES commence par la sélection de matériaux appropriés. Les matériaux choisis doivent être rigides et stables pour minimiser les vibrations indésirables qui pourraient perturber les mesures, mais comme nous l'avons déjà vu, l'Université de Fribourg possède les compétences.

Le système optique est un autre élément clé de la conception du manipulateur micro-ARPES. Il y a majoritairement trois techniques différentes utilisées pour obtenir un micro-focus :

1. La première méthode consiste à utiliser des plaques de zone de Fresnel. Elles sont fabriquées en matériaux de substrat qui présentent une absorption raisonnablement faible dans le régime ultraviolet (UV). En micro-ARPES, les plaques de zone de Fresnel sont utilisées pour focaliser les faisceaux de rayonnement UV sur l'échantillon afin d'obtenir une résolution spatiale élevée. Les plaques de zone de Fresnel sont des lentilles de diffraction qui peuvent être utilisées dans le domaine UV pour obtenir une résolution encore plus élevée que les lentilles optiques traditionnelles.
  2. Une autre méthode courante pour obtenir une mesure de micro-ARPES est la sélection du signal ARPES. Cette dernière consiste à utiliser des filtres dans le système de lentille électrostatique des analyseurs. Ces filtres permettent de supprimer les signaux parasites, de sélectionner une partie du signal et d'éliminer le bruit de fond pour obtenir une image nette de micro-ARPES.
  3. Une troisième méthode utilise une lentille optique classique. Pour obtenir des mesures micro-ARPES de haute qualité, il est possible d'utiliser des lentilles optiques sous vide qui offrent une excellente résolution spatiale. La lentille est placée dans la chambre de mesure sous vide proche de l'échantillon. Ceci permet de mesurer des images avec un faisceau de taille micrométrique. Cependant, la lentille吸吸 une partie du signal.

Afin de simplifier le processus de construction et éviter les problèmes, le groupe du Prof. Dr. CLAUDE MONNEY et le chef de l'atelier MARKUS ANDREY ont choisi de construire un manipulateur sur plan, adapté pour les besoins et par les contraintes du groupe de recherche. Le financement de ce projet fut possible grâce au soutien du Fonds National Suisse de la recherche (FNS). Ils ont également choisi d'utiliser la troisième méthode, celle de lentille de transmission sous vide pour obtenir un faisceau de taille micrométrique, une technique simple, peu coûteuse et maîtrisée dans le groupe.

Le développement que le groupe du Prof. Dr. C. MONNEY et l'atelier veulent apporter est la conception d'une table de translation  $x - y - z$ . Cette table permettra de faire des translations et ajustements fins, ouvrant la porte à la cartographie micro-ARPES. Cette capacité de machine simplifiera la prise de mesure et l'étude des phénomènes de surface domaine par domaine. Cette

liberté spatiale a permis dans de précédentes études d'affiner la qualité des mesures et de révéler des propriétés électroniques de la surface des matériaux.

A terme, le groupe de recherche aimerait compléter la technique de micro-ARPES avec une analyse dépendante du temps. La micro-ARPES résolue en temps permet de suivre l'évolution des propriétés électroniques des matériaux. Cette technique permet également d'obtenir des informations sur les processus électroniques hors état d'équilibre, les interactions électroniques, la dynamique de la structure de bandes électroniques, et bien d'autres propriétés des matériaux. Cependant, la mise en œuvre de la micro-ARPES résolue en temps est une tâche complexe et nécessite un équipement de pointe avec des lasers femtosecondes et un manipulateur de haute précision.

## Conclusion

En conclusion, le développement de manipulateurs à Fribourg fait partie intégrante de l'histoire de la recherche en physique des surfaces. La conception d'un instrument de haute précision pour les expériences de micro-ARPES sera une avancée et fournira les outils nécessaires aux scientifiques pour poursuivre leurs études. Ce manipulateur permettra au groupe du Prof. Dr. C. MONNEY d'étudier les échantillons à l'échelle micrométrique et d'obtenir des mesures précises de leurs propriétés électroniques.

En somme, les manipulateurs de haute précision pour des expériences de micro-ARPES jouent un rôle dans la compréhension et la maîtrise des propriétés électroniques des matériaux à l'échelle atomique. Le développement continu de ces outils est essentiel pour l'avancement de la science des matériaux et pour ouvrir la voie à de nouvelles applications potentielles dans un avenir proche. De plus, ces développements contribuent à l'histoire de la Suisse en tant que cheffe de fil de la conception des machines-outils.

---

## Remerciements

---

Nous remercions les nombreuses contributions du Prof. Dr. PHILIPP AEBI, Prof. Dr. CLAUDE MONNEY et de OSWALD RAETZO, qui ont permis la rédaction de cet article au travers de leurs récits. Nous tenons également à remercier chaleureusement FLORINE PIERROZ pour les nombreuses relectures et valorisation de vulgarisation.

---

## Bibliographie

---

- [HUF13] Hüfner, Stephan, Book, Photoelectron spectroscopy: principles and applications, (2013), Springer Science & Business Media.
- [RUM21] Rumo, Thesis, Investigation of the IrTe<sub>2</sub> Phase Transitions with Photoemission Spectroscopy and Development of a Femtosecond Photoemission Experiment.
- [PET80] L.-G. Petersson, Z. Hussain, S. Kono, and C.S. Fadley, Solid State Communications, vol. 34, num. 7, Oxygen chemisorbed on Cu(001): The Cu3d O2p interaction studied by angular-resolved photoemission using synchrotron radiation, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038109880901490>
- [NAU93] D. Naumovic, A. Stuck, T. Greber, J. Osterwalder, and L. Schlapbach, PHYSICAL REVIEW B, VOLUME 47, NUMBER 12, Full-hemispherical photoelectron-diffraction data from Cu(001): Energy dependence and comparison with single-scattering-cluster simulations, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.47.7462>
- [MAL15] A. Tejeda, D. Malterre, Photoémission dans les solides, edp-sciences.
- [DAI20] H. Daimon, C. M. Schneider, B S. Mun, Memory of Prof. Charles (Chuck) S. Fadley (1941-2019), e-Journal of Surface Science and Nanotechnology 18, 235-238 (2020), <https://doi.org/10.1380/ejssnt.2020.235>
- [ETH] Biographie du L. Schlapbach de l'école polytechnique de Zürich, <https://ethz.ch/en/the-eth-zurich/organisation/who-is-who/retired-professors/details.MTQyNTQw.TGlzdC80MDEsMTk1NzY4Mzcv0Q==.html>