

Introduction

En 1962, Brian Josephson, alors étudiant en thèse à l'Université de Cambridge publie un article de deux pages qui va avoir un impact considérable sur toute la physique de la matière condensée (JOSEPHSON 1962). Josephson suivait les cours donnés par P.W. Anderson, alors en année sabbatique au laboratoire Cavendish (JOSEPHSON 1974). Inspiré par ces cours, en particulier par ceux sur le sujet de la brisure spontanée de symétrie, Josephson considère une jonction formée de deux supraconducteurs séparés l'un de l'autre par une fine barrière isolante (figure 1); il montre que même en absence de différence de potentiel entre les deux supraconducteurs, un courant peut circuler de l'un vers l'autre avec une intensité fonction de la différence de phase quantique entre ces deux supraconducteurs.

Comme l'écrit ANDERSON (1970), les physiciens pensaient à l'époque que la phase d'un supraconducteur n'était pas mesurable :

In 1962 we had already postulated that superconductivity consisted of coherence of the de Broglie waves representing pairs of electrons inside the superconductor. Prior to Josephson, the phase φ of these macroscopic waves was thought to be unmeasurable in principle ...

La phase absolue d'un supraconducteur n'est certes pas mesurable, mais la phase relative entre deux supraconducteurs l'est, et c'est précisément ce que Josephson a mis en avant dans son article. Il s'appuyait pour cela sur la découverte toute récente de GIAEVER (1960), qui avait observé l'effet tunnel d'électrons à travers une barrière isolante, séparant deux métaux supraconducteurs¹.

Même si Josephson s'est heurté initialement au scepticisme d'une par-

1. Josephson et Giaever ont reçu le prix Nobel de physique 1973, avec Leo Esaki qui avait quant à lui découvert l'effet tunnel d'électrons dans des semi-conducteurs.

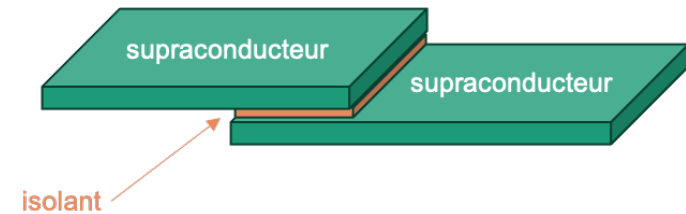


FIGURE 1. Jonction Josephson. Un courant peut circuler entre les deux supraconducteurs en l'absence de toute différence de potentiel électrique entre eux. Ce courant est une fonction de la phase relative $\varphi \equiv \varphi_a - \varphi_b$ entre ces deux supraconducteurs.

tie des théoriciens de l'époque (MCDONALD 2001 ; FOSSHEIM et al. 2013), les expérimentateurs sont venus rapidement confirmer ses prédictions, en premier lieu Anderson lui-même (ANDERSON & ROWELL 1963). D'autres confirmations des prédictions de Josephson ont suivi (figure 2), avec l'observation de l'effet Josephson alternatif et des résonances de Shapiro (SHAPIRO 1963), désormais à la base des standards électriques. Citons également la réalisation de dispositifs interférométriques, les SQUIDS (*superconducting quantum interference devices*), qui constituent les dispositifs les plus sensibles pour la mesure de champs magnétiques extrêmement faibles.

Josephson a rédigé son article en s'intéressant aux matériaux supraconducteurs, mais les concepts qu'il a mis en avant s'appliquent à d'autres fluides quantiques, de l'hélium liquide ou des gaz d'atomes ultra-froids, pourvu qu'ils présentent une cohérence macroscopique. Quand c'est le cas, un couplage entre deux composantes du fluide (notées dans la suite *a* et *b*) permet de réaliser le système modèle étudié par Josephson. Ces deux com-

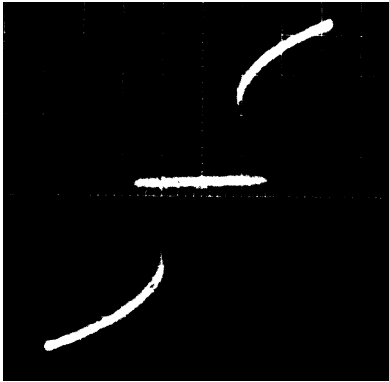


FIGURE 2. Caractéristique d'une jonction Josephson, avec I en abscisse et V en ordonnée. On voit qu'un courant I non nul peut circuler dans la jonction même si la différence de potentiel V est nulle, comme prédit par Josephson. Largeur totale $\sim 1 \mu\text{A}$, hauteur totale $\sim 0.5 \text{ mV}$. Figure extraite de SHAPIRO (1963).

posantes peuvent être séparées spatialement, a à gauche, b à droite, et séparées par une barrière physique, comme la couche d'isolant de la jonction supraconductrice. Le couplage correspond alors à l'effet tunnel à travers la barrière (figure 3, gauche). Ce couplage peut également être induit par une onde électromagnétique, les états a et b étant alors deux états internes des particules, par exemple deux états de spin. Dans ce dernier cas, les particules occupent la même région de l'espace (figure 3, droite).

La démarche que nous allons suivre dans cette série de cours est double :

D'une part, nous allons présenter quelques facettes de l'effet Josephson pour des supraconducteurs, en nous limitant à un petit nombre d'expériences emblématiques. Nous rencontrerons ainsi les expériences de Clarke, Devoret et Martinis qui leur ont valu le prix Nobel de Physique 2025; nous verrons comment les résonances de Shapiro permettent de relier un voltage à une fréquence et de faire ainsi des mesures électriques de très grande précision; nous nous intéresserons également au "régime quantique" de la jonction Josephson, qui conduit à la réalisation de qubits supraconducteurs.

D'autre part, nous aborderons la transposition de ces effets à des fluides

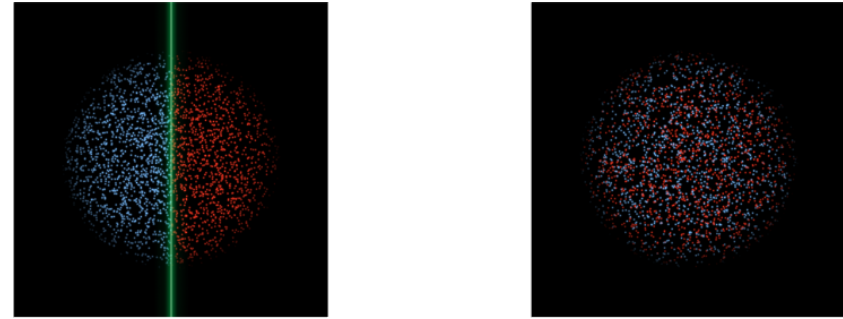


FIGURE 3. Les deux types de jonctions Josephson étudiées dans ce cours. Gauche : un ensemble de particules est séparé en deux par une barrière, que les particules peuvent franchir par effet tunnel. Les particules à gauche de la barrière (bleues) seront notées a et celles à droite (rouges) seront notées b . Droite : les particules peuvent être préparées dans deux états internes possibles et une onde électromagnétique peut induire des transitions $a \leftrightarrow b$.

d'atomes, dans un liquide ou dans un gaz. Nous montrerons que certains aspects de la jonction supraconductrice ont été transposés avec succès, comme l'observation des oscillations plasma, l'utilisation de SQUIDS pour des mesures de précision – en l'occurrence la rotation –, ou encore les résonances de Shapiro. D'autres dispositifs liés aux jonctions Josephson, comme la réalisation de qubits performants, n'ont pas encore vu le jour. Ce cours aura pleinement atteint son but s'il stimule des recherches dans ces directions encore peu explorées, au moins sur le plan expérimental.

Nous suivrons le plan suivant :

- Le premier chapitre sera consacré à l'établissement des relations Josephson et à leur transposition à un double puits confinant un condensat de Bose-Einstein atomique ou un gaz de Fermi superfluide. Nous y discuterons les similarités et les différences entre les équations du mouvement des deux systèmes, et nous décrirons une première manifestation de la physique Josephson, les oscillations plasma.
- Dans le chapitre 2, nous aborderons la dynamique d'une jonction Josephson, avec la détermination de sa caractéristique, c'est-à-dire la variation de la tension électrique moyenne aux bornes de la jonction en fonction du courant qui la traverse (cf. figure 2). Nous introduirons en particulier le modèle RCSJ (*resistively capacitance shunted junction*) qui

permet de décrire de multiples aspects de cette dynamique, et nous verrons comment transposer ce modèle à un fluide d'atomes.

- Le chapitre 3 sera centré sur les effets dépendant du temps, en particulier l'effet Josephson alternatif et les résonances de Shapiro. Nous expliquerons leur rôle crucial en métrologie et nous décrirons leur transposition à l'hélium superfluide ainsi que, très récemment, à des gaz d'atomes froids.
- Nous aborderons au chapitre 4 les jonctions Josephson internes, où le couplage entre les deux états a et b de la jonction n'est pas dû à un effet tunnel, mais est induit par une onde électromagnétique. Même si les équations du mouvement sont formellement identiques à celles d'une jonction interne, les régimes qui peuvent être réalisés expérimentalement sont notablement différents ; de nouveaux phénomènes peuvent apparaître, comme une transition de phase d'un régime para- vers un régime ferromagnétique.
- Le chapitre 5 sera consacré aux "condensats fragmentés", un régime que l'on atteint quand le couplage entre les états a et b devient très faible. La description de la jonction que nous aurons utilisée jusqu'ici, fondée sur un traitement en termes de champs classiques, cesse alors d'être valable et il faut se tourner vers un traitement quantique. Nous illustrerons cette possible fragmentation sur l'exemple d'un condensat de particules de spin 1, où le rôle de la barrière Josephson est joué par les interactions entre atomes.
- Au dernier chapitre, nous nous intéresserons aux SQUIDs. Nous expliquerons comment ces dispositifs permettent, à partir de jonctions supraconductrices, de réaliser des capteurs extrêmement sensibles du champ magnétique. Nous discuterons brièvement la réalisation de qubits à partir des ces dispositifs. Nous étudierons ensuite la transposition de la notion de SQUID à des jonctions atomiques, en tirant parti du lien entre le magnétisme orbital de particules chargées et la rotation de particules neutres.

Pour terminer cette introduction, insistons sur le fait que les notes qui suivent n'ont pas la prétention d'être un cours exhaustif sur les jonctions Josephson supraconductrices. D'excellents livres couvrent ce vaste domaine, comme par exemple BARONE & PATERNO (1982), LIKHAREV (1984), TINKHAM (2004), CLARKE & BRAGINSKI (2004), BUCKEL & KLEINER (2008), et nous y renvoyons les lectrices et lecteurs désireux d'approfondir certains aspects abordés ici.

Références

- ANDERSON, Philip W (1970), « How Josephson discovered his effect », in *Physics Today* **23**, p. 23-29.
- ANDERSON, Philip W & John M ROWELL (1963), « Probable observation of the Josephson superconducting tunneling effect », in *Physical Review Letters* **10**, p. 230.
- BARONE, Antonio & Gianfranco PATERNO (1982), *Physics and applications of the Josephson effect*, Wiley.
- BUCKEL, Werner & Reinhold KLEINER (2008), *Superconductivity : fundamentals and applications*, John Wiley & Sons.
- CLARKE, John & Alex I BRAGINSKI (2004), *The SQUID handbook*, t. 1, Wiley Online Library.
- FOSSHEIM, Kristian et al. (2013), *Superconductivity : discoveries and discoverers : ten physics Nobel laureates tell their story*, Springer.
- GIAEVER, Ivar (1960), « Electron tunneling between two superconductors », in *Physical Review Letters* **5**, p. 464.
- JOSEPHSON, Brian D (1974), « The discovery of tunnelling supercurrents », in *Reviews of Modern Physics* **46**, p. 251.
- JOSEPHSON, Brian David (1962), « Possible new effects in superconductive tunnelling », in *Physics letters* **1**, p. 251-253.
- LIKHAREV, Konstantin K (1984), *Dynamics of Josephson junctions and circuits*, Gordon et Breach.
- MCDONALD, Donald G (2001), « The Nobel laureate versus the graduate student », in *Physics today* **54**, p. 46-51.
- SHAPIRO, Sidney (1963), « Josephson currents in superconducting tunneling : The effect of microwaves and other observations », in *Physical Review Letters* **11**, p. 80.
- TINKHAM, Michael (2004), *Introduction to superconductivity*, Courier Corporation.