






Mise en perspective didactique d'un dossier de recherche

Grégory SETNIKAR

1. Parcours

Je suis entré à l'université avec pour objectif de devenir enseignant dans le secondaire. Durant mes études, j'ai eu l'occasion de m'essayer à la recherche au travers de stages, ce qui m'a amené à m'inscrire en doctorat et à envisager une carrière académique. J'ai toujours été intéressé par la physique dans son ensemble et en particulier par la physique expérimentale. C'est tout naturellement que j'ai choisi de faire une thèse mêlant un travail expérimental très important, à des thématiques à la frontière entre physique des hautes énergies et de la matière condensée. Plus particulièrement, ma thèse s'est concentrée sur l'étude de l'analogie entre la supraconductivité et la physique des particules au travers du mode de Higgs supraconducteur. Cette dernière m'a poussé à m'ouvrir à divers sujets tels que la physique au-delà du modèle standard ou la cosmologie, et c'est ainsi que j'ai commencé à travailler au sein du consortium EUCLID. J'ai désormais satisfait mon appétit pour la recherche et souhaite me réinvestir pleinement dans ce qui m'a poussé à faire des études de prime abord. Ainsi, suite à ces deux années de *post-doc*, je prépare le concours de l'agrégation à l'ENS de Lyon. Les points clés de mon parcours sont listés ci-dessous :

2013-2016	Licence	Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon 
2016-2018	Master mention bien Spécialité : Physique de la matière condensée & Matière quantique Certificat Universitaire en mathématiques, et Magistère.	Université Grenoble Alpes, Grenoble 
2018-2022	Thèse en physique de la matière condensée et du rayonnement <i>À la recherche du mode de Higgs Supraconducteur</i> Direction : M.D'ASTUTO & M.-A. MÉASSON Label Recherche et Enseignement Scientifique de l'Université	Institut Néel, Grenoble 
2022-2024	Ingénieur de recherche en calcul scientifique Développement du pipeline de réduction des données spectroscopiques sans fente (SIR) pour le satellite EUCLID de l'Agence Spatiale Européenne. Encadrement : Y.COPIN	IP2I, Lyon 
2024-2025	Master 2 FÉADEP - Préparation à l'agrégation	ENS, Lyon 

2. Travaux de recherche

2.1 Contexte scientifique de mes travaux de thèse

Parfait analogue mathématique du boson de Higgs pour la physique des hautes énergies, le mode de Higgs est très important à la fois pour la compréhension de la supraconductivité mais également pour la physique des particules du modèle standard et au-delà. Étant directement lié à l'ordre supraconducteur, son étude permet d'en apprendre plus sur ce dernier (et par extension sur le boson de Higgs) ainsi que ses interactions avec d'éventuels autres ordres électroniques. L'existence du mode de Higgs est la manifestation du mécanisme de Anderson-Higgs introduit en 1963 par P.W.Anderson [1] pour la supraconductivité puis adapté aux bosons de jauge¹ du modèle standard de la physique des particules par (entre autres) P.Higgs [2] en 1964. Pour illustrer ce mécanisme dans le cadre de la supraconductivité, il faut repartir du modèle de Ginzburg-Landau[3], introduisant la notion de paramètre d'ordre pour la transition supraconductrice. Ici, le paramètre en question est un nombre complexe noté $\psi = \sqrt{\rho_s} e^{i\phi}$, où ρ_s est la densité de porteurs supraconducteurs, et ϕ la phase quantique macroscopique caractérisant l'état supraconducteur.

1. Ce sont les bosons associés à une force fondamentale de la physique, à savoir le photon pour l'électromagnétisme, les bosons W^\pm et Z pour la force nucléaire faible, et les gluons pour la force nucléaire forte.

Acquis pouvant être mobilisés pour l'exercice du métier d'enseignant

Ce modèle dépasse le cadre des programmes de classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE), cependant il illustre la généralité des phénomènes en physique. En effet, ce modèle permet aussi bien de décrire la transition ferromagnétique/paramagnétique, que la transition supraconductrice ou encore certains systèmes dynamiques comme les oscillateurs double puits. Cette prise de recul sur la généralité de certains phénomènes en physique est difficile à acquérir, mais est essentiel pour un.e physicien.ne. Les phénomènes cités précédemment étant à la limite du programme, je pourrai mettre en place une activité sous forme de devoir maison (DM), pour amener les étudiants à réfléchir au-delà du programme, et ainsi favoriser les connexions entre les domaines de la physique que l'on aura travaillé. De manière plus générale, mon expertise sur la supraconductivité va me permettre de mettre en place une activité documentaire scientifiquement riche sur la thématique du transport de l'énergie et son optimisation, qui trouvera parfaitement sa place en classe de Terminale. On pourra discuter des possibles apports de la supraconductivité pour la société, que ce soit par le biais de dispositifs réels mis en place comme le train à sustentation magnétique japonais (Maglev), ou encore ce que permettrait la supraconductivité à température ambiante en terme de transport et stockage de l'énergie. On pourra discuter des bénéfices, comme des coûts écologiques de telles innovations, thématique à mon sens capitale dans nos sociétés modernes.

À la transition, le paramètre d'ordre s'annule (car la supraconductivité est détruite) et on peut ainsi écrire un développement limité pour la densité d'énergie libre autour de zéro. Comme la transition supraconductrice est une transition du second ordre, il ne peut y avoir que des puissances paires dans le développement (où l'on néglige les ordres supérieurs). D'où $f(\psi) = \alpha_0(T_c - T)|\psi|^2 + \beta(T)|\psi|^4$ où α_0 est une constante quelconque et β est une constante strictement positive. L'équilibre est atteint lorsque cette équation atteint un minimum.

Pour $T > T_c$, le minimum de f est atteint lorsque $\psi = 0$, et on note que le système est invariant par changement de phase. On remarque cependant que, lorsque $T < T_c$, $\psi = \sqrt{\frac{\alpha_0(T_c - T)}{2\beta}}$, soit un résultat défini à une phase près : le système supraconducteur « choisit » de se placer dans un seul minimum, et ainsi le système perd sa symétrie vis-à-vis du changement de phase, c'est le mécanisme de Anderson-Higgs. Cette brisure de symétrie n'est pas sans conséquence puisqu'elle conduit à l'apparition de modes collectifs. Un mode collectif bien connu en matière condensée est le phonon, qui peut être vu comme le mode associé à la brisure spontanée de symétrie de translation au sein d'un cristal. Pour la supraconductivité, il existe (entre autres) le mode de Higgs, qui correspond à des fluctuations de l'amplitude $|\psi|$ du paramètre d'ordre. Dans le modèle de Ginzburg-Landau, il apparaît ainsi clairement comme une fluctuation de la densité de porteur supraconducteur. C'est un mode massif, car il faut fournir une énergie minimale pour changer l'amplitude. Il est représenté en rouge sur la Figure 1.

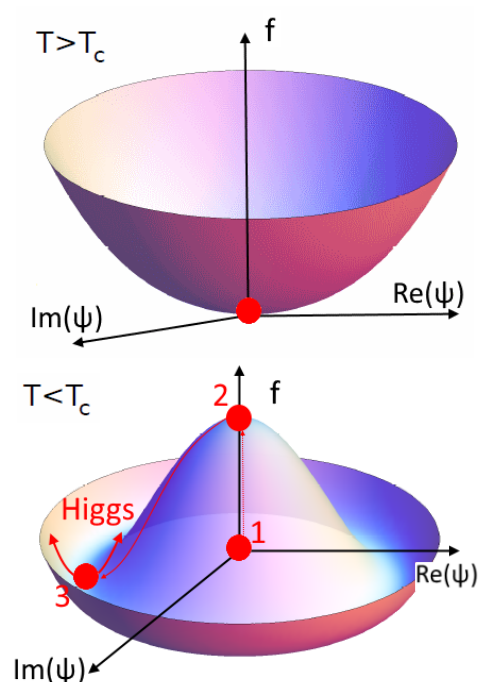


Figure 1. Densité d'énergie libre en fonction de $\text{Re}(\psi)$ et $\text{Im}(\psi)$ dans les états normal (haut) et supraconducteur (bas). Les chiffres correspondent à une vue d'artiste de l'enchaînement des événements qui subviennent à la transition.

Comme pour la physique des hautes énergies, où la valeur de vide non nulle pour le champ de Higgs donnait naturellement une masse aux bosons de jauge (à l'exception du photon car la symétrie correspondante n'est pas brisée dans le modèle standard), ici le mode de Higgs permet de donner une masse au photon. Cette conséquence permet d'expliquer la phénoménologie remarquable des supraconducteurs comme l'effet Meissner.

Acquis pouvant être mobilisés pour l'exercice du métier d'enseignant

Cette démonstration se fait à partir des équations de Maxwell et du modèle de Drude appliqué à des métaux supraconducteurs. Ces notions étant au cœur du programme PC, je pourrai construire un exercice assez général, voire un examen, mobilisant les connaissances vues cette année là (électromagnétisme, physique des ondes, mécanisme de conduction électrique) afin d'amener les étudiants à faire cette démonstration pas-à-pas.

Le mode de Higgs, tout comme son homologue des hautes énergies, n'est pas détectable directement. Dans le cas de la physique des particules, c'est l'observation des produits de désintégrations du Higgs qui a prouvé son existence. Dans notre cas, une possibilité théorisée par T.Céa et L.Benfatto [4] en 2014 repose sur le couplage entre la supraconductivité (noté SC sur les figures suivantes) et une onde de densité de charge (notée CDW de l'anglais *Charge Density Wave*). Cette dernière correspond à une modulation spatiale de la densité électronique au sein d'un cristal et est généralement accompagnée d'une distorsion périodique du réseau cristallin.

Cet ordre électronique peut être décrit d'un point de vue microscopique en utilisant le même formalisme que la supraconductivité, en remplaçant les paires d'électrons (ou paires de Cooper) par des paires électrons-trous. Ainsi, il existe aussi un mode d'amplitude (l'amplitudon) (voir Figure 2). L'idée est que dans certains matériaux, les électrons qui participent à la formation des paires de Cooper, et donc de la supraconductivité, participent également aux paires électrons-trous responsables de la formation de l'onde de densité de charge.

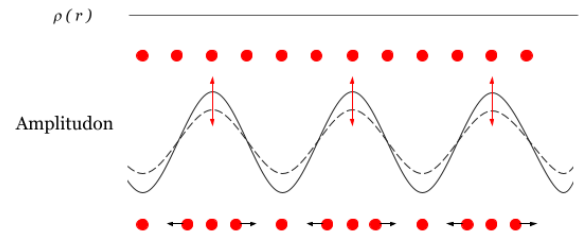


Figure 2. Représentation schématic de l'amplitudon ainsi que l'onde de densité de charge. Les lignes représentent les densités électroniques ainsi que leurs fluctuations, tandis que les points représentent le réseau sous-jacent et les déplacements ioniques.

Ainsi, un amplitudon, signature de l'onde de densité de charge, se retrouverait modifié lors du passage à l'état supraconducteur, car les électrons ont « double emploi ». Cette étude a été initiée expérimentalement par ma directrice de thèse M-A.Méasson [5] et son précédent étudiant R.Grasset, en s'intéressant à la familles des dichalcogénures (NbSe_2 , TaS_2 , ...). Ce choix a été motivé par la possibilité d'explorer pour ces systèmes chaque phase indépendamment (SC, CDW, SC+CDW, aucune des deux) à l'aide de paramètres expérimentaux contrôlables au sein d'une seule expérience, la pression et la température. Ils ont ainsi pu observer un transfert de poids spectral entre l'amplitudon et le mode de Higgs (l'amplitudon perd en intensité au profit de la signature du mode de Higgs) (voir Figure 3). Il apparaît clairement ici, qu'une signature du mode de Higgs n'est observée que lorsque les deux ordres sont présents, confirmant l'interaction entre ces derniers ainsi que le mécanisme d'observation.

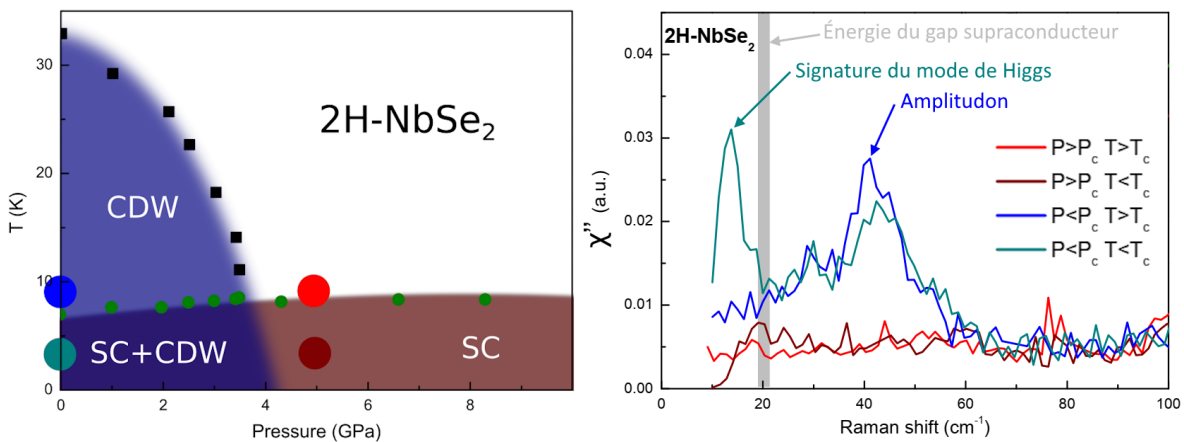


Figure 3. À gauche : Diagramme de phase du composé 2H-NbSe_2 sous pression. À droite : Spectre Raman sur ce même composé illustrant la disparition de la signature du mode de Higgs lors de la suppression de l'onde de densité de charge [6]. Le spectre de couleur lambda (rouge, marron, bleu, vert) a été enregistré dans les conditions de pression et de température correspondant au point de couleur lambda sur le diagramme de phase à gauche. Ici l'intensité a été corrigée du facteur de Bose pour tenir compte de la température, d'où un axe des ordonnées noté χ'' .

Il est important de noter que l'énergie associée à la signature du mode de Higgs est inférieure à l'énergie correspondante au gap supraconducteur Δ . L'énergie du gap dépend de la température critique telle que $\Delta \approx 1.764 k_b T_c$. Pour donner un ordre de grandeur, j'ai travaillé avec des échantillons ayant des températures critiques de l'ordre de 15 à 100K, soit une énergie de l'ordre de 20 à 120 cm⁻¹. Sachant que pour s'assurer de la pertinence physique du résultat, il faut couper² à au moins $\frac{\Delta}{2}$. Ce résultat prévu par la théorie, apparaît donc comme une contrainte expérimentale supplémentaire. En effet, comme je vais le détailler dans la partie suivante, la spectroscopie Raman à basse énergie représente un défi en tant que tel. Finalement, tout l'objet de ma thèse fut de poursuivre ces travaux, afin d'affiner la compréhension du mécanisme d'observabilité en étudiant d'autres systèmes, présentant des couplages entre ordres électroniques différents voire beaucoup plus complexes.

2.2 Expertises expérimentales et spectroscopie Raman

Comme je l'ai brièvement mentionné, j'ai utilisé la spectroscopie Raman. Cette technique consiste à éclairer l'échantillon à analyser à l'aide d'un laser de longueur d'onde connue et de récolter la lumière diffusée par ce dernier dans un spectromètre à réseaux pour en analyser la composition spectrale. La diffusion peut être élastique (Rayleigh) ou inélastique (Raman) par le biais de la création ou annihilation d'une excitation.

Acquis pouvant être mobilisés pour l'exercice du métier d'enseignant

Tout d'abord, ce phénomène pourra servir d'illustration concrète de la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie, dans le cadre d'un cours en première année de CPGE. Je pourrai également amener des étudiants de deuxième année à mener le développement perturbatif du vecteur polarisation menant à l'explication de l'effet Raman dans le cadre d'un DM lorsque nous aborderons les chapitres liés à la polarisation d'une onde lumineuse, faisant le lien avec la notion de polarisabilité vue en amont.

Les spectres Raman sont usuellement tracés en fonction du « *Raman Shift* » (ou décalage Raman) soit la différence entre la fréquence du laser excitant (d'où la nécessité de connaître précisément cette dernière) et la fréquence de l'excitation sondée. Il est coutume d'exprimer cette quantité en nombre d'onde (cm⁻¹). En ce qui concerne l'axe des ordonnées, on parle plus généralement de susceptibilité Raman (χ'') pour tenir compte de l'échauffement laser, dont l'unité s'exprime en coups.s⁻¹.mW⁻¹ en toute rigueur, où en unité arbitraire si l'on a normalisé différents spectres entre eux pour plus de clarté. Il est important de noter qu'au sein de la diffusion Raman, on retrouve deux types de mécanismes, le processus « Stokes » et « anti-Stokes » correspondant respectivement à la création ou à l'absorption d'une excitation (voir Figure 4). De plus, on voit que la conservation de la quantité de mouvement implique que les excitations sondées correspondent à celles présentes en centre de zone de Brillouin (où $q \approx 0$).

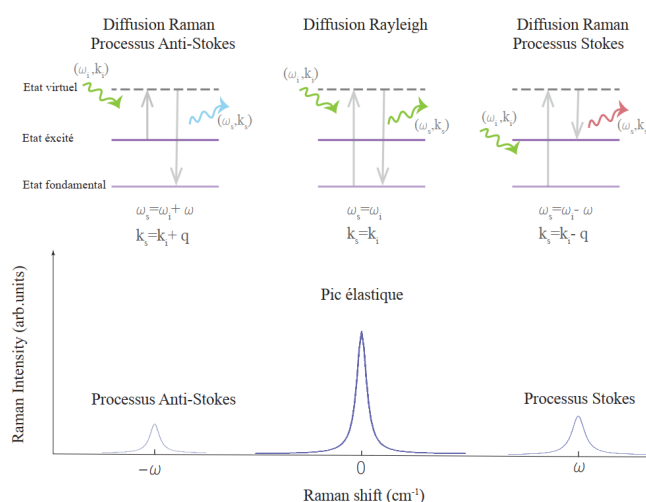


Figure 4. Diagrammes illustrant les différentes transitions énergétiques associées aux processus Stokes et anti-Stokes, ainsi que la correspondance sur un spectre Raman.

2. On appelle «coupure» la limite en énergie mesurée par le spectromètre.

Acquis pouvant être mobilisés pour l'exercice du métier d'enseignant

Cette subtilité est d'importance cruciale pour la spectroscopie Raman. En effet, cette technique fait appel à des lasers avec des puissances parfois élevées, sur des très petites surfaces sondées, ce qui a pour effet de chauffer localement l'échantillon étudié. Cela participe à augmenter significativement les incertitudes de mesures en perturbant le système par la mesure. Cette notion est très importante pour un.e futur.e physicien.ne ou ingénieur.e, d'autant que la notion d'incertitude est souvent mal comprise des élèves en début de parcours. Ainsi, je pourrai transmettre tout ce savoir au travers d'activités documentaires et/ou expérimentales montrant ces effets, illustrer comment se prémunir de ces derniers et utiliser des outils numériques pour traiter *a posteriori* les données recueillies. De plus, la comparaison entre l'intensité des phénomènes Stokes et anti-Stokes donne une très bonne approximation de la température au niveau du faisceau laser, car ces derniers sont reliés par un facteur de Bose-Einstein. Je pourrai donc illustrer le facteur de Boltzmann dans un autre cadre que celui de l'atmosphère isotherme classiquement enseigné en première année CPGE, en proposant un exercice autour de ces notions en donnant la loi de Bose-Einstein qui ne sera pas à connaître à ce niveau. En licence, où les distributions statistiques sont souvent abordées dès la deuxième année, cet exemple aura d'autant plus de sens.

En terme d'ordre de grandeur, la lumière diffusée élastiquement a une intensité de l'ordre d'un million de fois plus importante que celle correspondante à la lumière diffusée inélastiquement. Ainsi, si l'on cherche à observer des excitations de faible énergie, on se retrouve très vite pollué par la lumière diffusée élastiquement, mais également par la lumière réfléchie, ou toute source de lumière parasite présente dans la salle (écran d'ordinateur, LED,...). Ainsi, afin de minimiser toutes ces pollutions, le montage est orienté de sorte à ce que seule la lumière diffusée entre dans le spectromètre, et l'on a recours à un spectromètre à triple étage.

Ces spectromètres permettent de se débarrasser d'un maximum de la lumière élastiquement diffusée en se basant sur la dispersion spatiale d'un réseau. Comme on peut le voir sur la Figure 5, la lumière est diffractée une première fois sur un réseau (R_1) puis est sélectionnée spatialement à l'aide d'une fente (F_{12}). La lumière restante est ensuite recombinée à l'aide d'un nouveau réseau (R_2). La lumière traverse alors une nouvelle fente (F_{23}) que l'on peut également ajuster pour s'absoudre d'éventuelles réflexions internes et par conséquent couper légèrement plus bas en énergie. Enfin la lumière restante, filtrée, est diffractée à nouveau sur une CCD afin d'être analysée. Cette méthode permet de couper plus bas en énergie qu'un spectromètre à simple étage. En revanche, le signal collecté est *de facto* plus faible. Cette méthode est particulièrement adaptée à l'étude des excitations de basses énergies avec une bonne résolution. Je me suis concentré jusqu'alors à la description du parcours de collection, mais comme on le voit sur la figure 5 le parcours incident est tout aussi complexe.

Comme je l'ai précisé, on a besoin d'avoir une lumière incidente parfaitement contrôlée :

- le *Notch filter* est un filtre interférométrique en réflexion qui permet de sélectionner la longueur d'onde centrale du laser très précisément;
- le *Power filter* est un filtre interférométrique permettant d'atténuer la puissance du laser. Même si l'on cherche une intensité maximale, les échantillons étudiés sont sensibles à des intensités trop grandes;
- le *spacial filter* permet de « convertir » le faisceau gaussien du laser en entrée, en faisceau parallèle épuré en sortie;
- un jeu de polariseurs notés « P » sur la figure 5 permet de choisir précisément la polarisation de la lumière incidente et analysée.

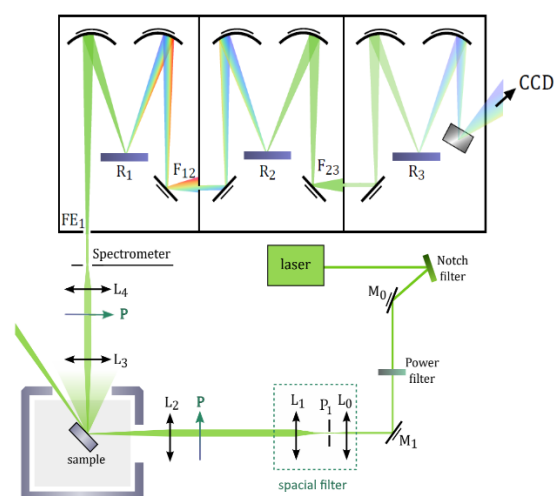


Figure 5. Schéma représentant le montage optique utilisé pour la spectroscopie Raman. On indique par M les miroirs, L les lentilles, F les fentes, R les réseaux dispersifs. Les miroirs internes au spectromètre sont laissés sans légende.

Acquis pouvant être mobilisés pour l'exercice du métier d'enseignant

Différentes applications sont développables à partir de ce montage. En effet, de nombreuses notions sont au cœur de la spectroscopie Raman, comme les interférences au travers de l'utilisation de réseaux ou de filtre interférentiel, ou encore la notion de filtrage spatial. Toutes ces notions feront l'objet d'exercices d'applications qui sortent de l'ordinaire, tout en étant totalement en accord avec les programmes des CPGE. D'un point de vue expérimental, ce montage nécessite une très grande rigueur dans l'alignement des différents éléments. J'ai ainsi développé un important savoir faire que je pourrai transmettre à mes futurs étudiants en TP, car même si les montages d'optiques seront moins exigeants, il est important d'avoir les bons réflexes dès le début.

On note également l'angle d'environ 45° entre l'échantillon et la lumière incidente, permettant que le faisceau réfléchi ne rentre pas dans le spectromètre. L'autre particularité de mes travaux de thèse réside dans le travail avec des conditions difficiles : de température, de champ magnétique, et de pression.

Acquis pouvant être mobilisés pour l'exercice du métier d'enseignant

Afin de refroidir les échantillons que j'ai étudiés, je n'ai pas pu utiliser de l'Hélium liquide. D'une part parce que si l'on baigne l'échantillon dedans, il y aurait une pollution dans le signal due à la réponse Raman de l'Hélium, et d'autre part car cela nécessite de remplir un cryostat chaque jour, ce qui pourrait altérer l'alignement optique. Ainsi, nous avons opté pour l'utilisation du cycle thermodynamique de Gifford-MacMahon, qui permet par un jeu de détente/compression d'Hélium gazeux, d'atteindre des températures de l'ordre de 6K. Ce cycle est une très bonne application que je pourrai discuter avec des étudiants en première année de CPGE lorsque que nous aborderons le chapitre concernant les machines thermiques, par le biais, par exemple, d'un exercice visant à calculer le rendement d'un tel cycle, que l'on pourra comparer au rendement idéal de Carnot. De manière générale, mon expertise en cryogénie me permettra de construire des exercices illustrant la question « comment refroidir un système? ». Cette question me paraît très importante pour un étudiant CPGE, tant d'un point de vue disciplinaire pour les multiples aspects qu'elle englobe (conduction thermique, rayonnement, bilans d'énergie, rendements...) que d'un point de vue industriel avec l'explosion ces dernières années du développement des ordinateurs quantiques par exemple. En ce qui concerne la spectroscopie sous champ magnétique, elle met en exergue l'effet Faraday, que l'on pourra étudier en TP en deuxième année, si l'on a à notre disposition un électro-aimant. Enfin, le travail que j'ai réalisé sur les cellules pression soulèvent un grand nombre de problématiques pratiques qui pourront être abordées sous diverses formes. Pour atteindre des hautes pressions, deux diamants sont pressés l'un contre l'autre *via* l'utilisation d'une chambre à gaz que l'on remplit à l'aide d'un compresseur. La réalisation de ce dispositif dépend fortement de la qualité des pièces (planéité, granularité, alignement, forme des trous...). Il faut également réfléchir au gaz qui sera utilisé pour induire la pression, ainsi que le milieu utilisé dans la chambre pour transmettre cette pression à l'échantillon... On pourra imaginer toute une séquence pédagogique autour de la fabrication d'un objet, et de la caractérisation de ce dernier en terme de qualité, mettant en jeu des notions vues au cours de l'intégralité du parcours d'étudiant en CPGE, entre les lois de Coulomb, la diffraction ou les interférences par exemple. On pourra même aller au-delà de ce que j'ai pu faire en thèse *stricto sensu* et présenter des technologies d'analyse de surface comme la microscopie à force atomique ou à effet tunnel, qui mettraient en application les bases de la physique quantique et de physique du solide vues en CPGE, et ouvriraient les étudiants à des domaines modernes qui reflètent l'actualité en recherche ou dans l'industrie.

2.3 À la recherche du mode de Higgs supraconducteur

Comme je l'ai mentionné précédemment, l'un des grands enjeux de ma thèse fut l'exploration des excitations de très basses énergies dans des systèmes présentant des ordres électroniques complexes, afin de mieux comprendre les couplages de ces derniers avec la supraconductivité notamment. Les familles de composés que j'ai étudiées sont la famille des A_{15} (V_3Si , Nb_3Sn , ...) et la famille des cuprates ($YBa_2Cu_3O_{6+x}$, $Bi_{2-y}Pb_ySr_{2-x}La_xCuO_{6+d}$, ...).

La première correspond aux premiers composés dits « à haute température critique » (avec une température critique ≈ 15 K) découverts au début des années 50. Nous nous sommes penchés sur ces composés car des résultats d'époque (voir Figure 6) suggèrent que ce qui fut interprété comme la signature Raman standard de l'apparition de la supraconductivité (qui correspond à un pic à l'énergie du gap), pourraient être ré-interprétés comme un mode de Higgs, non connu à l'époque. Pour mettre en place cette étude, j'ai effectué un travail important de caractérisation des échantillons. En effet, l'ordre électronique présent dans ces matériaux est une distorsion électronique liée à une déformation structurale assez classique pour l'étude des alliages, nommée transition martensitique. Cette déformation n'est pas systématique au sein des échantillons, et les raisons n'étaient pas forcément claires dans la littérature. J'ai ainsi mené un important travail de caractérisation des échantillons (diffraction Laué, mesures de résistivités, de chaleurs spécifiques) dont j'ai pu suivre la synthèse. L'objectif était à la fois d'obtenir des échantillons de bonne qualité pour mes mesures, et de mieux comprendre le mécanisme favorisant l'apparition de cet ordre électronique.

Acquis pouvant être mobilisés pour l'exercice du métier d'enseignant

Cette expérience met en lumière une importante différence entre le travail fait dans le cadre scolaire, et celui fait à l'extérieur : rien n'est parfait. Même si un composé est annoncé avec une certaine qualité, la réalité peut être toute autre, et pas uniquement à cause de la variabilité de la mesure. Ces aspects de contrôle qualité, et de mesures sont essentiels pour tout.e futur.e physicien.ne ou ingénieur.e. Étant particulièrement sensibilisé à cette question (ayant passé beaucoup de temps à réfléchir à comment améliorer la synthèse de mes échantillons notamment), j'ai à cœur de travailler ces différents points tout au long d'une année scolaire. Par exemple, lorsque nous aborderons les questions de mesure d'une résistance, j'insisterai sur le fait que non seulement faire plusieurs fois la même mesure donne des résultats différents, mais que ces résultats peuvent être différents de celui annoncé par le constructeur. Je pourrai également lorsque nous parlerons de diffraction proposer un exemple visant à estimer la qualité de fabrication d'un miroir (sujet au cœur des activités de recherche françaises récentes, étant donné que le laboratoire produisant les miroirs des interféromètres LIGO/VIRGO est lyonnais). Pour moi, il est important d'apporter autant que possible la vision d'une réalité concrète qui peut venir à manquer sur certains concepts très abstraits de la physique, et en particulier dans l'enseignement qu'on en fait.

Je n'ai malheureusement pas pu étudier en détail les propriétés optiques de ces systèmes. En effet, il a fallu construire l'ensemble du dispositif, notamment la cellule haute pression qui, comme je l'ai indiqué, nécessite beaucoup d'étapes aussi bien de fabrication que de vérification. De plus, ayant effectué ma thèse de 2018 à 2022, le confinement lié à la pandémie de COVID-19 a rendu ce travail d'autant plus fastidieux. Néanmoins, en collaboration avec les différents acteurs du laboratoire (chercheurs, ingénieurs de recherche, techniciens), nous avons pu mettre au point l'environnement de mesure, et le tester pour de futurs étudiants, comme on peut le voir sur ces quelques résultats préliminaires (voir Figure 7).

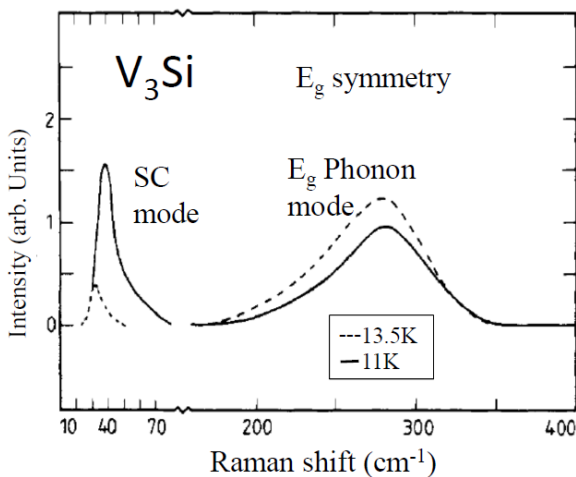


Figure 6. Mode supraconducteur et phonon E_g dans V_3Si pour deux températures. Courbe pleine : $T=11K$; courbe en pointillée : $T=13.5K$ [7].

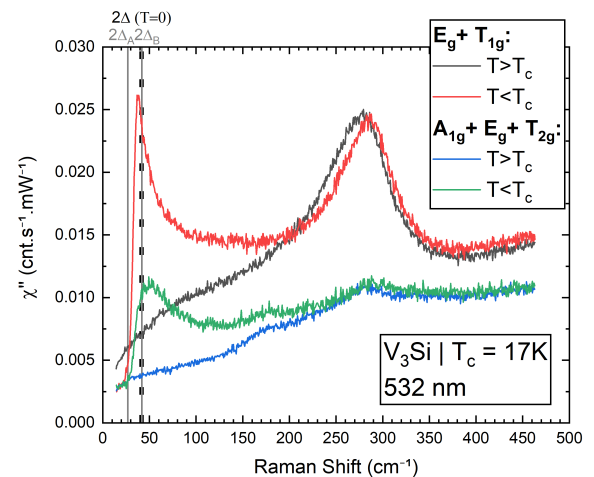


Figure 7. Spectre Raman pour un échantillon de V_3Si à 8K à l'aide d'un laser 532nm. La température est contrôlée par l'augmentation de la puissance.

Historiquement, l'étude de la famille des A_{15} s'est brutalement arrêtée au début des années 80 suite à la découverte des cuprates dont les températures critiques sont de l'ordre du point de fusion de l'azote autour de 100 K.

Ces derniers possèdent une très grande complexité qui s'exprime notamment par la présence de nombreux ordres électroniques, tous plus ou moins en interaction (voir Figure 8). Ainsi, la recherche d'un mode de Higgs dans ces composés était la partie purement exploratoire de mes travaux de thèse. Au cours de cette étude, j'ai très vite pu observer (entre autre) une excitation de très basse énergie non reportée dans la littérature (autour de 60cm^{-1}), et qui avait notamment un comportement très particulier en fonction du champ magnétique (voir Figure 9). On voit notamment que l'excitation perd en intensité sous champ magnétique, et devient de plus en plus asymétrique, et que ce comportement dépend du dopage de l'échantillon. Cette asymétrie est nommée effet Fano, et représente la signature de l'interaction entre un phonon et en général les électrons.

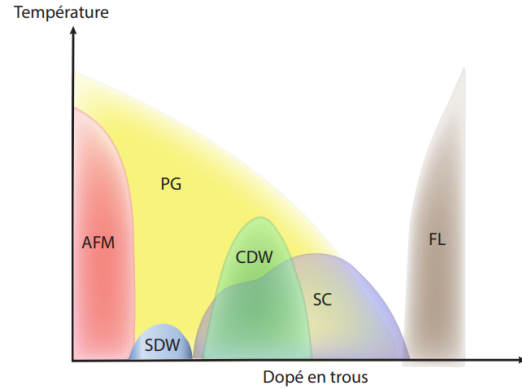


Figure 8. Diagramme de phase schématisé d'un cuprate quelconque, représentant la température en fonction du dopage en trou. Les phases représentées ici sont les suivantes : anti-ferromagnétisme (AFM), pseudo-gap (PG), onde de densité de spin (SDW), onde de densité de charge (CDW), supraconductivité (SC), et liquide de fermi (FL).

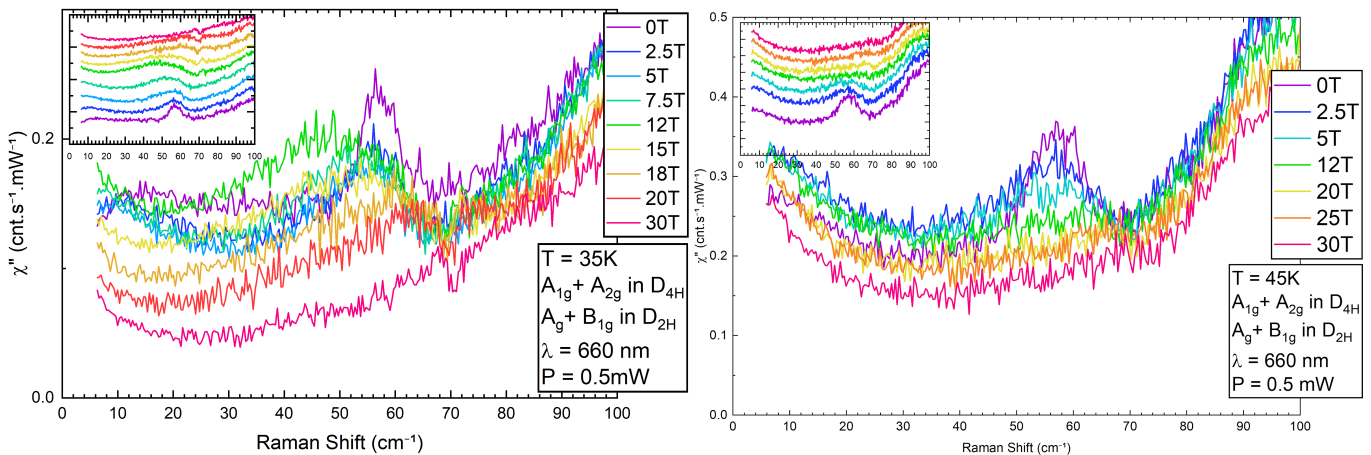


Figure 9. Spectres Raman à basse énergie de deux échantillons présentant des dopages différents de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$. Les insert correspondent aux mêmes courbes décalées.

Pour pouvoir caractériser et comprendre cette interaction, j'ai étudié cette excitation sous tous les angles possibles : dépendances en température, en champ magnétique, en dopage, en quantité d'illumination, en longueur d'onde d'excitation et en polarisation. J'ai ensuite construit (à partir de divers précédents travaux) un modèle phénoménologique visant à reproduire un spectre Raman dans son ensemble, et en particulier de suivre l'évolution de l'excitation Fano vis-à-vis du fond électronique. Ce travail a permis d'exclure un grand nombre de phénomènes qui auraient pu être responsables de ce comportement (y compris l'hypothèse d'un mode de Higgs). L'hypothèse retenue aujourd'hui est qu'il s'agirait d'un phonon de quantité de mouvement non nulle replié en centre de zone de Brillouin dû à l'interaction entre un phonon et les électrons de l'onde de densité de charge (voir Figures 10 et 11). Des mesures complémentaires, et un travail théorique ont été initiés dès la fin de ma thèse et sont toujours en cours afin de confirmer cette hypothèse. Tout ceci illustre parfaitement l'importance de ce travail au sein de la communauté en termes d'ouvertures et de perspectives.

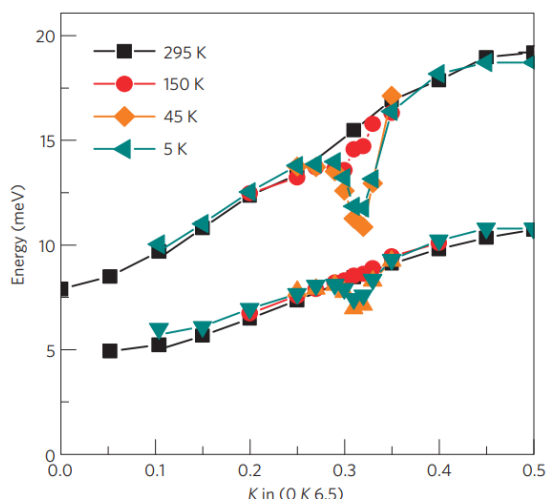


Figure 10. Dépendance en température de la dispersion de deux phonons en fonction du vecteur d'onde. [8].

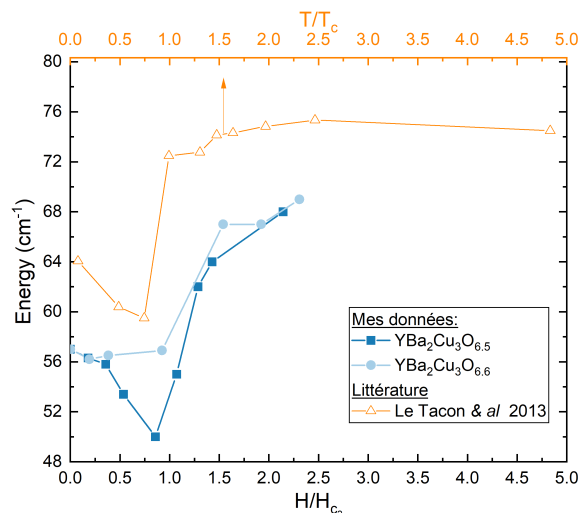


Figure 11. Comparaison des évolutions en température (Fig.10) et champ magnétique de l'énergie de l'excitation Fano.

2.4 Travaux post-doctoraux et expertises logicielles

En parallèle de tous mes travaux de thèse, j'ai développé un code permettant de prédire rapidement, quelles symétries seront sondées en fonction de la polarisation incidente et de l'orientation du cristal (ainsi que ces symétries internes). Ce code disponible sous forme d'un site web ³ m'a permis d'acquérir une première expérience en terme de développement à but collaboratif, que j'ai particulièrement appréciée. C'est pourquoi, j'ai entrepris un *post-doc* axé sur la programmation à l'Institut de Physique des Deux Infinis, à Lyon, où ma mission était de participer au développement du *pipeline* d'analyse de données spectroscopiques issues du satellite Euclid.

Acquis pouvant être mobilisés pour l'exercice du métier d'enseignant

Au travers de mes expériences, j'ai acquis une maîtrise d'un bon nombre de langages de programmation (Python, C++, HTML, CSS, JS, \LaTeX , ...) au sein de *framework* peu utilisé en physique (Node.js, Electron, Qt) ainsi que de nombreux outils et méthodes informatiques (git, bash, POO, ...). Toutes ces compétences vont me permettre de développer de nombreux outils avancés contribuant à ma future pratique. Par exemple, lors de ma préparation à l'agrégation cette année, j'ai pu développer un module permettant de faciliter le traitement des données dans le cadre du concours. J'ai pour projet de décliner ce code en une version tournée vers l'enseignement plus complète et didactique. L'objectif est de, par exemple, pouvoir permettre à mes futurs étudiants de traiter des données de manière très rigoureuse. Je pense qu'on peut sensibiliser dès le lycée les élèves à propager leurs incertitudes, bien qu'ils n'aient pas encore les outils théoriques pour comprendre comment, à l'aide d'un outil numérique adapté qui ferait le calcul pour eux. De manière générale, j'ai pour projet d'utiliser les outils numériques au quotidien que ce soit au travers de simulations pour illustrer mes cours, ou d'outils que j'aurais développés (comme le module d'analyse de données précédemment cité, ou encore de projets de TP à base d'Arduino). L'ensemble de mes travaux, numériques ou pédagogiques seront disponibles en ligne sur un site actuellement en construction, afin d'apporter un maximum à la communauté enseignante. La programmation est importante, mais n'est pas la seule compétence numérique notable, on peut facilement imaginer un bon nombre de TP autour de l'utilisation du traitement d'images (figures d'interférences en classe de Terminale Générale), ou de sons (Première spécialité). Tout ce travail pouvant bien entendu être mis en commun avec les autres enseignants de l'équipe éducative, comme les professeurs de Sciences Numériques et Technologie (SNT) dont la discipline s'est vue attribuée un concours dédié récemment. De manière générale, le numérique prenant une place grandissant dans les programmes et dans nos vies, il est essentiel que les élèves soient formés à ce sujet sous toutes ces formes, et au travers d'exemples concrets comme le permet notre discipline.

3. <http://www.raman-selection-rules-calculator.fr>

3. Transposition didactique

Être docteur, c'est être expert dans des domaines souvent très complexes, et très spécifiques. Pour autant mon parcours est resté très varié tant par les disciplines que j'ai explorées (physique de la matière condensée, optique à différentes échelles, cosmologie, physique des particules) que par les compétences que j'ai développées (comme par exemple l'élaboration de protocoles, la capacité à faire des mesures très sensibles dans des conditions extrêmes, ou la programmation à différentes échelles dans de nombreux langages). Cette pluridisciplinarité est un atout de taille pour l'enseignement de manière générale, mais je pense avoir pu montrer dans ce texte que mes expertises très spécifiques ont aussi leurs atouts pour la transmission d'un savoir plus riche. Mes compétences expérimentales auraient également tout leur sens dans ma pratique de l'enseignement au quotidien, afin de permettre une illustration et une contextualisation importante de notre discipline, au même titre que pour des activités plus ciblées comme la préparation de TPE, voire de TIPE en classe préparatoire. En parallèle de tous mes travaux de recherche, j'ai eu l'occasion de participer à bon nombre de formations et d'activités en lien avec l'enseignement ⁴, et la transmission des savoirs que je vais détailler ci-après.

3.1 Activités d'enseignement

Au cours de ma scolarité, j'ai pu m'exercer à l'enseignement au travers de cours particuliers au niveau lycée, mais également en tant que tuteur en 3^{ème} année de licence, où mon rôle était de donner des cours de soutien « à la volée » aux étudiants qui venaient demander de l'aide. En période d'examens je me suis donc retrouvé à devoir en parallèle gérer des étudiants de première année en biologie pour leurs cours d'optique, et d'autres en 2^{ème} année de physique pour de la thermodynamique, ce qui a nécessité une certaine faculté d'adaptation de ma part. En thèse, j'ai pu enseigner dès la première année la même unité d'enseignement (UE), portant sur l'électricité en régime continu, aussi bien en TD qu'en TP, à deux groupes de première année de licence. Une nouvelle fois, ma capacité d'adaptation a été testée, car les étudiants appartenaient à des parcours différents (Parcours des écoles d'ingénieurs Polytech (PeiP), 1^{ère} année de licence parcours Mathématique-Informatique), et la physique n'étant pas forcément la discipline majeure, il a fallu redoubler d'efforts pour motiver ce public.

3.2 Apprentissage par problèmes (APP)

Suite aux enseignements donnés en première année, j'ai pu intégrer l'année suivante l'équipe pédagogique proposant un enseignement de cette même discipline avec une approche innovante : l'apprentissage par problèmes. Cette approche pédagogique propose aux étudiants d'apprendre par le biais de la résolution en équipe de problèmes issus de situations réelles. Les compétences et les connaissances nécessaires à la résolution du problème sont ainsi données aux étudiants progressivement, valorisant le travail d'équipe et une résolution en autonomie (vis-à-vis du professeur). Le rôle de l'enseignant est donc de guider les élèves vers la solution du problème. L'enseignant doit ainsi s'adapter à chaque groupe, et à chaque solution offerte par les étudiants, illustrant pleinement la nécessité pour un professeur de faire preuve de souplesse et d'innovation. Un exemple que j'ai pu vivre au cours de ces deux années au sein de ce dispositif concerne un TP visant à fabriquer un éclairage écologique pour une grotte. Les étudiants devaient fabriquer une solution d'éclairage la plus efficace possible avec le matériel proposé, à savoir un ensemble de diodes électroluminescentes et une cellule photovoltaïque en guise de générateur. La première année des élèves m'ont proposé une solution élégante permettant un éclairage optimal non prévu par le cours (qui cherchait à les orienter vers une optimisation de la puissance extraite). Plutôt que de leur interdire ce travail et les guider vers la solution attendue, je les ai encouragés tout en leur enseignant les concepts qu'ils n'ont pas pu développer seuls par leur solution. Résultats : les élèves étaient ravis et ont beaucoup appris de ces échanges et les enseignants ont repris cette solution pour l'intégrer au cours l'année suivante. Cet exemple démontre que le dispositif APP permet aux étudiants comme aux enseignants d'apprendre de manière collaborative.

4. Notamment dans le cadre du « label Recherche et Enseignement Scientifique » (RES) au sein duquel j'ai effectué ma thèse

Bien entendu cette démarche d'apprentissage par problèmes n'est pas une fantaisie des professeurs mais relève d'un véritable effort d'amélioration des conditions d'apprentissage, soutenu par une littérature qui s'intéresse à ces questions. On peut notamment citer les travaux de Droui *et al.*[9] qui ont cherché à mesurer l'impact d'un tel dispositif pédagogique sur l'apprentissage de concepts abstraits comme la physique Newtonienne. Il ressort de cette étude que les étudiants apprennent mieux dans le cadre de l'APP comparé à un cours standard. Comme toute science, il faut savoir rester critique et ne pas prendre ces résultats comme une vérité absolue, mais on note tout de même que ces derniers sont encourageants pour le développement de telles pratiques pédagogiques. J'ai personnellement trouvé ce dispositif très enrichissant, et je compte m'inspirer de ces méthodes dans ma pratique future.

Les bases de l'électricité en régime continu étant désormais ⁵ au programme de première générale, l'activité présentée précédemment pourrait complètement être revisitée et faire l'objet de séances de TP-cours, dont la séquence pédagogique serait la suivante.

<p>Situation problème</p> <p>Vous avez retrouvé une vieille radio dans votre grenier dont la source de tension semble hors service, et vous aimeriez la réparer.</p>	<p>Séquence pédagogique</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Scéance d'ouverture (2h) : Analyse et découverte du problème. Formulation d'hypothèses et de protocoles expérimentaux en groupes. ● Activité expérimentale (2h) : Réalisation et utilisation de sources de tensions simples utilisant une pile et des résistances. Mesures et incertitudes. ● Mise en commun (1h) : Comparaison des circuits et mesures réalisés par les binômes et discussion collective pour répondre à l'objectif. ● Clôture et mise au propre (1h) : Cours magistral pour conclure l'activité. ● Vérification des acquis (10 minutes) : Test en début d'activité suivante.
<p>Prérequis</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Loi d'Ohm ● Association dipôle en série/parallèle 	
<p>Objectifs pédagogiques</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Modèle d'une source réelle de tension continue ● Établir la caractéristique d'un dipôle ● Savoir estimer les incertitudes sur les mesures électriques 	

■ 3.3 Communication scientifique

Durant ma thèse, j'ai également eu l'occasion de me former à la communication de manière générale, et en particulier dans le cadre de la transmission de savoirs scientifiques. Cette formation s'est déroulée dans le cadre du concours Ma Thèse en 180 secondes (MT180) qui consiste à vulgariser le travail effectué en thèse au grand public et ce en 180 secondes très précisément. Cet exercice est difficile à cause de sa contrainte de temps, mais pas seulement pour l'aspect vulgarisation. En effet, il faut réussir à capter l'attention du grand public très vite, et réussir à faire passer un maximum de messages, sans être trop vague, ce qui en fait finalement un exercice de théâtre scientifique assez unique en son genre. Pour nous préparer au mieux, nous avons reçu des cours de communication très généraux, de gestion du trac, et de représentation, qui m'ont depuis servi pour l'ensemble de mes représentations publiques, qu'ils s'agissent de conférences ou de cours.

J'ai de plus fait partie d'un groupe d'organisation d'un événement de vulgarisation scientifique (à l'image de la fête de la science, mais organisé exclusivement par des doctorants) nommé les Tribulations Savantes ⁶. L'objectif de cette manifestation, est de proposer diverses activités de vulgarisation grand public autour d'une thématique choisie par l'équipe d'organisation. Si les partenaires de cette association aident à financer l'événement, l'intégralité

5. Lorsque j'enseignais en thèse, l'électricité n'était pas au programme de lycée, mais au programme de première année de licence.

6. <https://tribulations-savantes.osug.fr>

de ce dernier est organisé par l'équipe : choix du thème, conception des visuels, communication et réseaux sociaux, choix des expériences, ... Dans ce cadre, j'ai pu mettre en place diverses expériences autour de mes expertises de thèse comme une activité de sensibilisation aux échelles de température, et aux transitions de phases (*via* la démonstration de l'effet Meissner et de la supraconductivité entre autres).

4. Conclusion

L'ensemble des activités que j'ai pu mener par le passé a formé le scientifique que je suis aujourd'hui, et m'a permis d'acquérir une démarche rigoureuse, que ce soit dans l'élaboration d'une expérience au travers de protocoles, ou d'un cours *via* une recherche documentaire riche et bien sourcée. J'ai également pu développer une capacité de travail aussi bien en autonomie qu'en collaboration au sein d'une équipe pluridisciplinaire et internationale. En outre, j'ai été formé à contextualiser, et à communiquer de manière claire, tout en favorisant l'engouement de mon public pour ce que je raconte. Mon expérience dans le domaine de l'informatique sera également particulièrement utile dans un monde de plus en plus numérique. Autant de compétences que l'on attend chez un enseignant de l'Éducation Nationale. Enfin, j'aspire à un enseignement moderne en continuant à me former aux nouvelles pratiques pédagogiques, que ce soit aux travers de formations, ou en autonomie grâce aux compétences que j'ai pu acquérir tout au long de ma scolarité.

Références

- [1] Anderson, P. Plasmons, Gauge Invariance, and Mass. *Phys. Rev.* **130**, 439-442 (1963,4), <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.130.439>
- [2] Higgs, P. Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons. *Phys. Rev. Lett.* **13**, 508-509 (1964,10), <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.13.508>
- [3] Ginzburg, V. & Landau, L. On the Theory of Superconductivity. *On Superconductivity And Superfluidity : A Scientific Autobiography*. pp. 113-137 (2009), https://doi.org/10.1007/978-3-540-68008-6_4
- [4] Cea, T. & Benfatto, L. Nature and Raman signatures of the Higgs amplitude mode in the coexisting superconducting and charge-density-wave state. *Phys. Rev. B* **90**, 224515 (2014,12), <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.90.224515>
- [5] Méasson, M., Gallais, Y., Cazayous, M., Clair, B., Rodière, P., Cario, L. & Sacuto, A. Amplitude Higgs mode in the $2H-x_2$ superconductor. *Phys. Rev. B* **89**, 060503 (2014,2), <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.89.060503>
- [6] Grasset, R., Gallais, Y., Sacuto, A., Cazayous, M., Mañas-Valero, S., Coronado, E. & Méasson, M. Pressure-Induced Collapse of the Charge Density Wave and Higgs Mode Visibility in $2H-x_2$. *Phys. Rev. Lett.* **122**, 127001 (2019,3), <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.122.127001>
- [7] Hackl, R., Kaiser, R. & Schicktz, S. Gap Mode, Superconducting Gap and Phonon Mode in V_3Si and Nb_3Sn . *Journal Of Physics C : Solid State Physics*. **16**, 1729 (1983,3), <http://stacks.iop.org/0022-3719/16/i=9/a=016?key=crossref.05530aca359f1cad3180a9b5aad8cb7d>
- [8] Le Tacon, M., Bosak, A., Souliou, S., Dellea, G., Loew, T., Heid, R., Bohnen, K., Ghiringhelli, G., Krisch, M. & Keimer, B. Inelastic X-ray Scattering in $YBa_2Cu_3O_{6.6}$ Reveals Giant Phonon Anomalies and Elastic Central Peak Due to Charge-Density-Wave Formation. *Nature Physics*. **10**, 52-58 (2014,1), <http://www.nature.com/articles/nphys2805>
- [9] Droui, M., El Hajjami, A., Bouklah, M. & Zouirech, S. Impact de l'apprentissage Par Problème Sur La Compréhension Conceptuelle de La Mécanique Newtonienne. *EpiNet : Revue Électronique De L'EPI*. **157** (2013)