

La diffusion de neutrons, une technique majeure et interdisciplinaire

Panorama des études autour des matériaux et du magnétisme

Résumé Les caractéristiques du neutron, en particulier sa neutralité et son spin, en font un outil multi-échelles incontournable en matière condensée, de l'étude des ordres cristallins et magnétiques à celle des dynamiques atomiques ou de spins. Des exemples choisis parmi les enjeux sociétaux d'aujourd'hui illustrent comment les techniques de diffusion neutronique sont utilisées par les chercheurs en chimie et physique du solide pour progresser dans leurs connaissances.

Mots-clés Diffusion élastique et inélastique des neutrons, magnétisme.

Abstract Neutron scattering, a major and interdisciplinary technique: overview of studies around materials and magnetism

Its characteristics, and in particular the fact that it does not carry a charge but carries a spin, make of the neutron a unique and multi-scale probe of condensed matter, ranging from crystal structures and magnetic orders to atom and spin dynamical properties. A few examples, chosen amongst key societal challenges, illustrate how neutron scattering techniques are being used by solid state chemists and physicists to deepen their knowledge of matter.

Keywords Neutron diffraction, neutron spectroscopy, magnetism.

Faire diffracter les rayons X (RX) pour étudier la façon dont la matière s'organise à l'échelle atomique est une technique éprouvée, qui remonte déjà aux débuts du siècle dernier. Faire diffracter des particules massives, comme les neutrons, peut sembler plus compliqué, et à tout le moins, repose sur l'un des piliers de la physique quantique, la dualité onde-corpuscule. La diffraction des neutrons thermiques est pourtant devenue, avec celle des RX, un des outils indispensables à l'étude de la matière. Il s'agit d'une technique simple et robuste, capable de s'adapter à des mesures dans des conditions extrêmes, de température, de pression, de champ magnétique ou électrique, et que l'on peut même associer à des mesures cinétiques ou à d'autres mesures spectroscopiques (Raman, RMN...). Elle ne nécessite quasiment aucune correction systématique, le nombre brut de neutrons recueillis dans le détecteur constituant

le signal « utile ». La contrepartie est que la production des faisceaux de neutrons est complexe, qu'elle suppose de grandes installations d'envergure nationale ou internationale, assujetties à une sécurité et à une vigilance sans faille ; plus encore, elle suppose un temps d'accès limité, le temps de faisceau alloué aux équipes de recherche étant compté.

Les spécificités du neutron (voir encadré 1) ont fait le succès de la neutronique dans des domaines aussi variés que, par exemple, l'étude des structures cristallines et magnétiques, des excitations de réseau ou de spin. Des techniques et des instruments variés ont été développés, qui permettent d'accéder à des informations diverses dans des gammes temporelles et spatiales très larges. Cet article dresse un panorama, non exhaustif, de l'utilisation de la diffusion des neutrons en lien avec l'évolution de la recherche.

Encadré 1

Les spécificités des neutrons

Les spécificités qui ont fait le succès de la diffusion des neutrons tiennent aux propriétés intrinsèques de ces particules et à leurs interactions avec la matière. Tout d'abord, la longueur d'onde de de Broglie d'un neutron thermique est de l'ordre de l'Angström, tandis que son énergie est de l'ordre du meV ($1 \text{ meV} = 0,242 \text{ THz} = 8,065 \text{ cm}^{-1} = 11,6 \text{ K}$), deux valeurs adaptées aux distances interatomiques et aux énergies typiques dans la matière condensée.

À la différence des rayons X, qui interagissent avec la charge d'un atome, un neutron interagit avec le noyau via l'interaction forte. Il est donc en particulier sensible au type d'isotope et n'aura pas de mal à distinguer deux éléments voisins dans le tableau périodique, voire même occupant la même case, comme l'hydrogène et le deutérium !

D'autre part, le neutron interagit via son spin, avec la distribution de champ magnétique présente au sein de la matière. La diffraction des neutrons renferme donc (une partie !) du secret de l'agencement relatif des atomes ainsi que des moments magnétiques.

Par ailleurs, l'analyse de l'énergie finale des neutrons, après interaction, nous renseigne sur la nature des états excités, susceptibles d'absorber l'énergie cinétique des neutrons incidents ou de céder leur énergie aux neutrons diffusés. Cette analyse « spectroscopique » du faisceau de neutrons diffusé donne ainsi accès au spectre des états excités propre au réseau d'atomes comme à l'assemblée des moments magnétiques.

Une autre de leurs caractéristiques est leur fort pouvoir de pénétration, qui va de pair, malheureusement, avec la nature intrinsèquement faible de l'interaction neutron-matière. Ceci permet tout à la fois d'étudier des échantillons massifs, sans les endommager, dans des conditions de stimuli extérieur variées.

Magnétisme et corrélations électroniques : les neutrons au service de la physique fondamentale

Le magnétisme constitue un domaine d'intérêt majeur dans nos sociétés. Combiné à l'électronique, il a modifié en profondeur notre vie quotidienne : sous forme de capteurs, d'actionneurs, de dispositifs nomades (téléphones, tablettes, ordinateurs portables), de matériaux aux capacités de stockage accrues dans de nouvelles générations de disques durs, etc. À terme, les ordinateurs et le calcul quantique révolutionneront peut-être encore nos sociétés.

En physique fondamentale, le magnétisme est un terrain de prédilection pour revisiter, voire aller au-delà de certains paradigmes comme la théorie des transitions de phase, ou la théorie des liquides de Fermi. La théorie des transitions de phase est pourtant un concept d'une redoutable efficacité, d'une portée très générale en physique, créant des ponts avec la théorie des champs, la cosmologie, etc. Avec la notion de brisure spontanée de symétrie, elle s'est avérée être un outil puissant pour trier, classer et comprendre des modèles complexes. Le magnétisme quantique s'inscrit dans cette évolution [1], où l'on cherche à comprendre et décrire de nouveaux types de transitions de phases entre états exotiques de la matière, mettant notamment en jeu la topologie ou le déconfinement des excitations. Ces phénomènes se rencontrent lorsque par exemple les ions magnétiques sont suffisamment isolés les uns des autres dans une structure cristalline pour que les effets à une ou deux dimensions se manifestent. C'est le cas par exemple des chaînes ou échelles de spin et des composés au magnétisme planaire [2-3]. Ces composés sont susceptibles d'abriter des défauts topologiques (vortex, parois de domaine), voire d'être le siège de transitions quantiques entre phases de Néel conventionnelles et phases de type

« liquide de spin ». Ces phases liquides sont de nouvelles phases de la matière, où l'orientation relative de deux spins distants reste corrélée, à l'image de la position des atomes dans un liquide, mais où cette corrélation décroît comme une loi de puissance avec la distance.

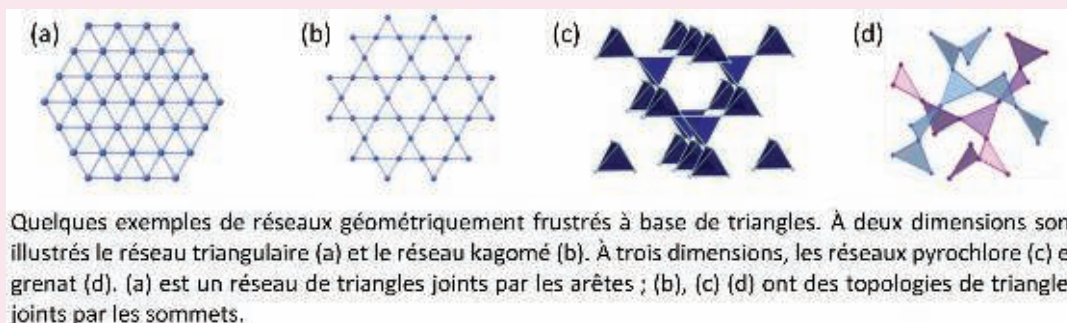
D'autres matériaux se révèlent être de très bons systèmes modèles, comme les composés magnétiques frustrés (voir encadré 2). D'autres systèmes encore, présentant un ordre magnétique unique mais complexe et associé à un groupe d'espace non centrosymétrique, peuvent abriter des défauts topologiques. C'est le cas de composés de structures magnétiques hélicoïdales induites par le couplage spin-orbite, aussi appelés skyrmions [4-5]. Ces derniers peuvent s'organiser en réseau sous certaines conditions de température et de champ magnétique.

De même que ces développements cherchent à aller au-delà des états classiques de la matière, d'autres recherches traquent les écarts aux descriptions usuelles basées sur la théorie des liquides de Fermi. Ce modèle permet de décrire les propriétés de métaux quasiment comme celles d'un gaz d'électrons sans interaction, mais où les vrais électrons sont remplacés par des quasi-particules (électrons habillés par les corrélations). C'est le cas notamment des nouveaux supraconducteurs ou des systèmes dits Kondo. Ces observations mettent en exergue le rôle des interactions coulombiennes entre électrons, que l'on nomme sous le terme général de « corrélations ». Dans cet esprit, les chercheurs tentent de percer le mystère du mécanisme microscopique à l'origine des propriétés fascinantes des supraconducteurs dits non conventionnels. Les supraconducteurs à haute température critique, tels que les oxydes de cuivre supraconducteurs ou les nouveaux supraconducteurs à base de fer (pnictures et séléniures) sont caractérisés par des diagrammes de phases

Encadré 2

Le magnétisme frustré

Il s'agit de composés où les interactions magnétiques sont frustrées, un phénomène qui résulte soit de leur compétition, soit de la connectivité du réseau qui relie les moments magnétiques (ces réseaux « géométriquement » frustrés sont les réseaux triangulaire, pyrochlore, kagomé, ou encore hyperkagomé). Dans certains cas, l'état fondamental peut s'avérer macroscopiquement dégénéré, c'est-à-dire constitué d'un ensemble de configurations magnétiques (ou d'arrangements locaux) de même énergie, éventuellement séparés par des barrières d'énergie faibles. De petites perturbations, d'origine chimique, liées aux contraintes extérieures (champ magnétique H , pression P ...), voire même les fluctuations thermiques ou quantiques, peuvent sélectionner l'une de ces configurations et stabiliser un unique état fondamental, mais ce sont bien les états dégénérés qui sont sans doute les plus intéressants [8]. En effet, un état excité, qui typiquement renverse un spin, peut se scinder, se « déconfiner », en deux sous-entités portant des nombres quantiques fractionnaires. L'espace « laissé libre » entre ces deux entités est aussitôt comblé par une des multiples configurations qui composent l'état fondamental, ce qui permet de révéler et d'isoler les deux sous-entités qui d'ordinaire sont liées [9].



Dans d'autres cas, il s'avère que la règle qui permet de construire les états dégénérés peut se voir comme la condition de conservation du flux des équations de Maxwell, ce qui ouvre un parallèle fascinant avec l'électrodynamique ; par analogie, de nouvelles excitations « émergentes » sont attendues : en particulier « monopoles » magnétiques [10], visons, et photon. En fonction des interactions, ce dernier peut acquérir une masse, à l'instar du phénomène de Higgs, et orienter le système vers des phases ordonnées.

complexes où la supraconductivité coexiste ou entre en compétition avec d'autres états de la matière (onde de densité de spin ou de charge, ordres orbitaux, états électronique nématiques, ordre de boucles de courants circulants) [6]. Le couplage des électrons avec différents types de modes magnétiques bosoniques peut être à l'origine de mécanismes d'appariement supraconducteur inédits [7] et/ou d'états métalliques en rupture totale avec la théorie des liquides de Fermi qui prévaut pour les métaux usuels.

Les fortes corrélations électroniques, remettant en cause notre compréhension des métaux, se manifestent également dans les systèmes magnétiques mettant en jeu les électrons 4f. Ils peuvent être le siège d'une compétition entre les interactions d'échange et les fluctuations magnétiques de type Kondo, ce qui conduit à l'obtention de fluides de « fermions lourds », quasi-particules dont la masse effective est de plusieurs ordres de grandeur supérieure à celle d'un simple électron, et parfois à des superfluides de paires de fermions lourds (supraconducteurs).

Pour élucider tous les détails de ce magnétisme complexe, les techniques de diffusion des neutrons constituent une sonde irremplaçable [11]. Les mesures de diffraction sur poudre et monocristaux caractérisent la structure cristalline (groupe d'espace, taux d'occupation des sites) et magnétique (périodicité, orientation des moments). Faire varier différents paramètres (concentration, température, champ, pression) permet d'établir les diagrammes de phase, en visualisant les transitions sans ambiguïté. Pour étudier les fluctuations ou les excitations de spin et leur couplage éventuel avec les excitations de réseau, les mesures de diffusion inélastique (spectromètre neutrons trois axes ou temps de vol) sont indispensables. On peut alors en déduire le délicat équilibre des interactions d'échange qui se cache derrière la complexité des structures magnétiques étudiées. Les mesures d'écho de spin permettent en complément l'étude des fluctuations lentes au voisinage d'une transition (phénomènes critiques). Enfin, les mesures de diffusion de neutrons aux petits angles permettent de visualiser la structure de gros objets magnétiques (vortex, skyrmions, polarons magnétiques) et leur organisation à très longue période, ainsi que les structures modulées (hélices, coniques, cycloïdes), qui ont souvent une stabilité voisine dans les diagrammes de phases (T, H) [12-13]. Pour toutes ces techniques, l'utilisation des neutrons polarisés en spin est très utile ou même indispensable. Elle permet de séparer les modes magnétiques ou hybrides des modes de phonons, de déterminer la chiralité sans ambiguïté, d'isoler un faible signal magnétique du bruit de fond, etc.

Des matériaux « pour faire ce que l'on veut »

Une seconde grande tendance qui traverse la recherche en chimie-physique de la matière condensée s'attache à comprendre les relations structure-propriétés de certains matériaux dits « fonctionnalisables ». Il y en a pour tous les goûts... !

L'organisation de la matière magnétique à plusieurs échelles

Il s'agit d'étudier les propriétés structurales et magnétiques d'une série de systèmes depuis l'échelle atomique et moléculaire jusqu'à l'échelle micrométrique, en passant par l'échelle nanométrique. Les questions relatives aux effets de taille, de morphologie et de surface, de composition chimique sont

alors importantes. Parmi ces systèmes magnétiques « multi-échelles », on peut citer les couches minces magnétiques, et plus particulièrement les matériaux antiferromagnétiques pour l'électronique de spin, les structures en domaines magnétiques du nanomètre au micromètre, avec un accent sur les textures de spin qui sont actuellement prometteuses pour des applications en électronique de spin. Les nanostructures magnétiques comme les nanofils magnétiques, les nanoparticules magnétiques (oxydes cœur-coquille, composés moléculaires à propriétés photomagnétiques) sont également au centre des problématiques modernes des technologies de l'information, de l'environnement et de la santé. Les approches « bottom-up » (voie polyol, etc.) ou « top-down » (membranes d'alumine, lithographie électronique) permettent maintenant de piloter très finement les morphologies, les compositions chimiques et les propriétés magnétiques.

Un des avantages majeurs des neutrons, comparés aux RX, réside dans leur capacité à pénétrer profondément dans la matière. Ils permettent ainsi de sonder les interfaces entre matériaux couramment utilisés dans des dispositifs (stockage de données, capteurs de champ magnétique ultra sensibles, capteurs biomagnétiques, calcul quantique, etc.). Les aimants moléculaires [14] et nanoparticules magnétiques, enfin, sont au cœur de nombreuses applications : ferrofluides, stockage d'information ou applications biomédicales. La diffusion des neutrons permet de réaliser la cartographie de l'aimantation à l'échelle intramoléculaire (grâce aux techniques de neutrons polarisés) comme à l'échelle des nanoparticules [16], et de caractériser l'anisotropie magnétique et les excitations magnétiques. Pour l'ensemble de ces systèmes, une connaissance fine des propriétés magnétiques en trois dimensions est indispensable. La combinaison offerte par les techniques de diffusion des neutrons permet de relever ce défi et donc d'envisager une cartographie 3D de l'aimantation de nano-objets, contrairement aux techniques d'imagerie qui sont essentiellement des techniques de surface. Concernant les aimants moléculaires, les neutrons permettent de déterminer non seulement la carte de densité de spin dans une structure moléculaire, mais aussi l'anisotropie magnétique locale au sein de molécules complexes (figure 1). Plus récemment, les capacités expérimentales ont permis de déterminer les excitations magnétiques dans les composés à transition de spin, et l'étude *in situ* des transitions photo-induites.

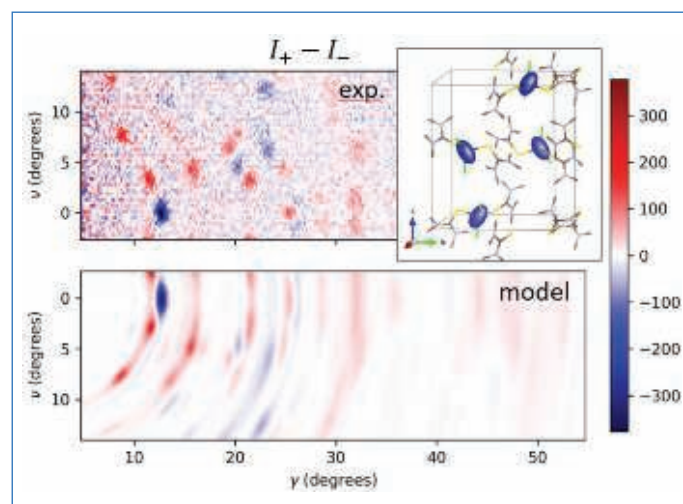


Figure 1 - Ellipsoïdes de susceptibilité magnétique de l'ion Co^{2+} dans l'aimant moléculaire $\text{Co}(\text{tétraméthyl-thiourée})_2\text{Cl}_2$, déterminées par diffraction de neutrons polarisés sur poudre [15].

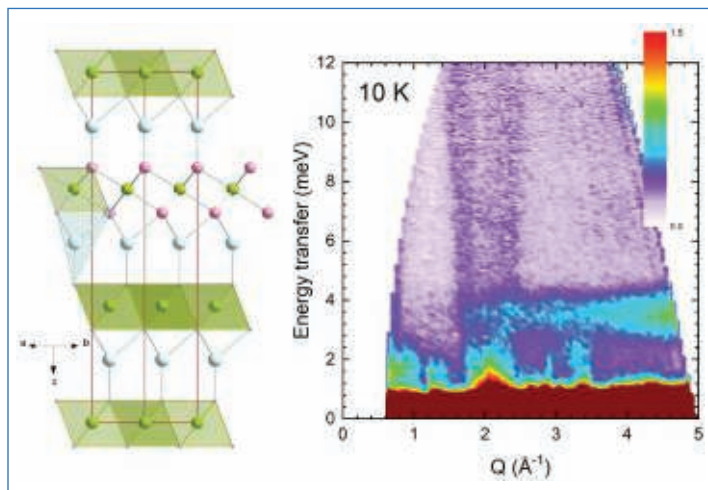


Figure 2 - Structure cristalline de AgCrSe_2 , caractérisée par un empilement de couches compactes d'octaédres CrSe_6 séparées par des couches ordonnées d'ions Ag^+ . C'est le mouvement de ces derniers, entre les couches, qui est à l'origine du phonon à 3 meV observable sur le spectre des excitations mesuré en diffusion inélastique des neutrons [18].

Matériaux pour l'énergie

Les matériaux pour l'énergie couvrent un autre vaste panel d'applications, que ce soit pour la production, la conversion ou le stockage de l'énergie. Ces études connaissent une croissance importante qui s'exprime au travers de thématiques telles que la thermoélectricité, le photovoltaïque, la réfrigération magnétique ou encore l'optimisation des aimants permanents. D'autres aspects concernent la conduction ionique, les composés pour batteries au lithium et pour le stockage de l'hydrogène.

Thermoélectricité

La thermoélectricité peut servir à transformer la chaleur perdue en électricité ou à fabriquer des refroidisseurs. En ce qui concerne la diffusion des neutrons, il s'agit de caractériser le spectre des phonons afin d'identifier des modes spécifiques qui contribuent à diminuer la conductivité thermique des phonons [17]. Les matériaux étudiés ont souvent des agencements cristallographiques bien particuliers, complexes, formant par exemple des cages comme dans les skuttérudites ou les clathrates. Ces agencements induisent des modes de phonons atypiques, comme le mode optique de très basse énergie observé dans AgCrSe_2 (figure 2), qui diffuse les phonons acoustiques responsables du transport de la chaleur. Le couplage avec le calcul *ab initio* de dynamique de réseau est ici un aspect primordial [19]. Un des paramètres importants pour cette modélisation est le temps de vie des phonons dont il existe très peu de déterminations expérimentales. La détermination de cette quantité par la méthode d'écho de spin sur un spectromètre neutrons trois axes permet d'augmenter la résolution en énergie d'un facteur de l'ordre de 50. D'autres équipes s'intéressent aux interfaces solide-liquide, où la dynamique des phonons du solide semble être modifiée dans une gamme d'énergie allant jusqu'à 100 meV, tandis que les molécules du liquide voient leur relaxation modifiée, générant des variations de température près de la paroi.

Stockage de l'hydrogène

L'étude des matériaux pour le stockage de l'hydrogène s'inscrit dans le développement de l'hydrogène comme vecteur énergétique pour le transport et le stockage de

l'énergie produite à partir de sources d'énergie renouvelables abondantes mais intermittentes. Les recherches concernent à la fois l'étude de la fragilisation des aciers par l'hydrogène, mais également le développement d'hydrures aux propriétés adaptées en termes de capacité de stockage, de thermodynamique et cinétique de sorption de l'hydrogène. Dans ce cas, les matériaux concernés sont des hydrures interstitiels, souvent des intermétalliques, ou des composés basés sur des complexes, comme (BH_4^-) dans LiBH_4 . La diffraction des neutrons est particulièrement adaptée à la localisation de l'hydrogène (substitué par le deutérium) dans la structure atomique ; un atout supplémentaire est la possibilité de réaliser des mesures *in situ* d'adsorption et désorption de l'hydrogène et d'enregistrer les courbes d'équilibre pression-température de l'hydrure [20].

Photovoltaïque

De nombreux matériaux sont aussi au centre d'une révolution scientifique et technologique pour des applications optoélectroniques variées, dont le photovoltaïque. Récemment, d'énormes progrès ont été réalisés sur les cellules solaires fabriquées à partir de pérovskites hybrides [21]. Ces matériaux sont des organo-halogénures de plomb, composées d'ions organiques incluant du carbone, de l'hydrogène et de l'azote au sein d'un réseau minéral régulier formé d'atomes d'un halogène et de plomb, comme dans $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$. Ils ont permis l'apparition des premiers composants photovoltaïques à bas coût avec des rendements de photoconversion supérieurs à 25 %, atteignant presque le même rendement que le silicium en seulement cinq années de recherches. Ces pérovskites hybrides ont typiquement une structure pseudo-cubique à température ambiante avec des transitions de phase vers des structures quadratiques et orthorhombiques à plus basse température. Une question importante est de comprendre comment la dynamique de réseau, phonons acoustiques et optiques, des sous-réseaux Pb-halogène ou organique, affecte les propriétés optiques et de transport électronique menant à l'effet photovoltaïque. Par ailleurs, il reste à déterminer si le caractère hybride est important pour les applications visées. En raison de la symétrie moléculaire, les cations ne peuvent prendre place au sein du réseau cristallin que grâce à des rotations rapides au sein de cavités présentes dans le réseau pérovskite. Motivé par la nécessité d'étudier le spectre des phonons [22], un effort a été dédié à la croissance de monocristaux de ces composés. La diffusion de neutrons est la technique expérimentale de choix capable de mesurer le spectre de phonons et toutes les phases structurales de ces matériaux. Le mélange d'atomes légers (H) et d'atomes lourds rend *a priori* l'usage de la diffusion inélastique de rayons X plus délicat.

Matériaux magnétocaloriques

Les études sur des matériaux cibles [23] portent sur les structures magnétiques et leur évolution sous champ, ainsi que sur les couplages entre degrés de liberté de spin et de réseau, afin d'étudier de possibles transferts d'entropie entre ces bains, sous champ magnétique. Les recherches bénéficient ici des progrès récents sur les flux de neutrons polarisés propices à l'étude de fonctions de corrélations hybrides spin-réseau. Les chercheurs se retrouvent également confrontés à des problèmes fondamentaux de magnétisme comme la dualité magnétisme localisé-magnétisme itinérant, qui semble un ingrédient favorable aux effets magnétocaloriques

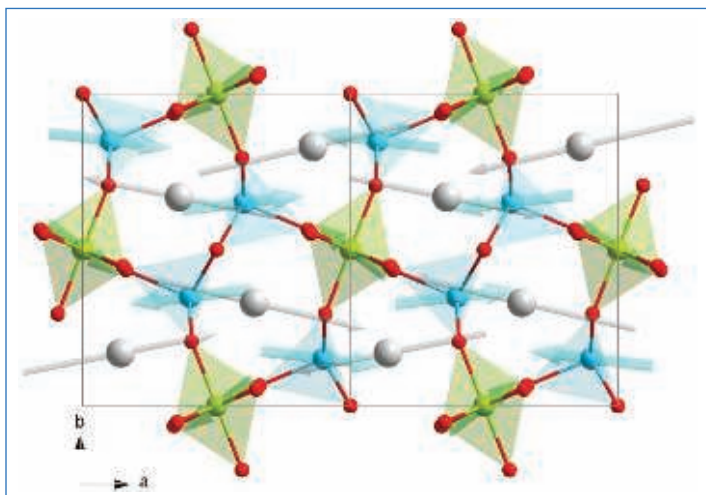


Figure 3 - Structure magnétique de $GdMn_2O_5$ à 1,5 K déterminée par diffraction de neutrons sur poudre (Gd^{3+} en gris, Mn^{3+} en vert, Mn^{4+} en bleu). Ce sont des couplages du type striction d'échange qui sont à l'origine de la multiferroïcité dans ce composé [26].

importants dans les alliages métalliques à bases d'éléments 3d-4f, les alliages de Heusler, les phases de Laves ou les intermétalliques.

Stockage de l'information

Cette thématique couvre un ensemble de systèmes magnétiques et ferroélectriques, c'est-à-dire possédant une polarisation et un moment magnétique spontanés [24]. La diffraction des neutrons y est essentielle pour résoudre les structures magnétiques souvent complexes (liées au couplage entre degrés de liberté) qui induisent la ferroélectricité. Parmi les systèmes les plus étudiés, on peut citer RMn_2O_5 (R : terre rare), dans lequel la multiferroïcité peut avoir des origines différentes et qui dépendent de R [25] (figure 3).

Grâce à la diffraction des neutrons polarisés, non seulement les structures magnétiques moyennes peuvent être résolues, mais l'expérimentateur peut également détecter les chiralités magnétiques, les directions de rotation des spins et les populations de domaine, ce qui permet une mesure directe du renversement de l'aimantation microscopique par le champ électrique. Enfin, ces expériences peuvent être effectuées dans des conditions extrêmes – par exemple, de température (entre 50 mK et 800 K), de champs magnétiques (jusqu'à 14 T) et champs électriques (supérieurs à 100 kV/m). Ces conditions sont essentielles pour explorer les propriétés fonctionnelles des multiferroïques au niveau microscopique [27].

Pour plus d'informations sur la diffusion neutronique en générale, les cours des écoles thématiques de la Société Française de Neutronique sont publiés et mis à disposition des utilisateurs (en libre accès sur www.sfn.asso.fr/ecoles-thematiques).

[1] B. Keimer, J.E. Moore, The physics of quantum materials, *Nature Physics*, **2017**, 13, p. 1045.

[2] T. Giamarchi, *Quantum physics in one dimension*, Clarendon press, **2003**.

- [3] A. Vasiliev, O. Volkova, E. Zvereva, M. Markina, Milestones of low- d quantum magnetism, *Npj Quantum Materials*, **2018**, 3, p. 18.
- [4] K. Everschor-Sitte, J. Masell, R.M. Reeve, M. Klaui, Perspective: magnetic skyrmions-overview of recent progress in an active research field, *J. Appl. Phys.*, **2018**, 124, art. 240901.
- [5] J. Zang, V. Cros, A. Hoffmann (eds), *Topology in Magnetism*, Springer Int. Publ., **2018**.
- [6] Q.M. Si, R. Yu, E. Abrahams, High-temperature superconductivity in iron pnictides and chalcogenides, *Nat. Rev. Mater.*, **2016**, 1, art. 16017.
- [7] P. Monthoux, D. Pines, G.G. Lonzarich, Superconductivity without phonons, *Nature*, **2007**, 450, p. 1177.
- [8] N. Martin *et al.*, Disorder and quantum spin ice, *Physical Review X*, **2017**, 7, art. 041028.
- [9] C. Lacroix, P. Mendels, F. Mila (eds), *Introduction to Frustrated Magnetism*, Springer-Verlag, Berlin, **2011**.
- [10] S. Petit *et al.*, Observation of magnetic fragmentation in spin ice, *Nat. Phys.*, **2016**, 12, p. 746.
- [11] S.T. Bramwell, B. Keimer, Neutron scattering from quantum condensed matter comment, *Nat. Mater.*, **2014**, 13, p. 763.
- [12] S. Muhlbauer *et al.*, Magnetic small-angle neutron scattering, *Rev. Mod. Phys.*, **2019**, 91, art. 015004.
- [13] T. Nakajima, T.H. Arima, Observation of magnetic skyrmions by neutron scattering, *Journal of the Physical Society of Japan*, **2019**, 88, art. 081006.
- [14] E. Coronado, Molecular magnetism: from chemical design to spin control in molecules, materials and devices, *Nat. Rev. Mater.*, **2020**, 5, p. 87.
- [15] I.A. Kibalin, A. Gukasov, Local magnetic anisotropy by polarized neutron powder diffraction: application of magnetically induced preferred crystallite orientation, *Phys. Rev. Res.*, **2019**, 1, art. 033100.
- [16] K. Ridier *et al.*, Individual-collective crossover driven by particle size in dense assemblies of superparamagnetic nanoparticles, *Eur. Phys. J. B*, **2017**, 90, p. 77.
- [17] X.L. Shi, J. Zou, Z.G. Chen, Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices, *Chem. Rev.*, **2020**, 120, p. 7399.
- [18] F. Damay *et al.*, Localised Ag^+ vibrations at the origin of ultralow thermal conductivity in layered thermoelectric $AgCrSe_2$, *Sci. Rep.*, **2016**, 6, art. 23415.
- [19] S.R. Turner *et al.*, Impact of temperature and mode polarization on the acoustic phonon range in complex crystalline phases: a case study on intermetallic clathrates, *Phys. Rev. Res.*, **2021**, 3, art. 013021.
- [20] T.C. Hansen, H. Kohlmann, Chemical reactions followed by in situ neutron powder diffraction, *Zeitschrift Fur Anorganische Und Allgemeine Chemie*, **2014**, 640, p. 3044.
- [21] A.K. Jena, A. Kulkarni, T. Miyasaka, Halide perovskite photovoltaics: background, status, and future prospects, *Chem. Rev.*, **2019**, 119, p. 3036.
- [22] A.C. Ferreira *et al.*, Elastic softness of hybrid lead halide perovskites, *Phys. Rev. Lett.*, **2018**, 121, art. 085502.
- [23] N.R. Ram *et al.*, Review on magnetocaloric effect and materials, *J. Supercond. Nov. Magn.*, **2018**, 31, p. 1971.
- [24] W. Eerenstein, N.D. Mathur, J.F. Scott, Multiferroic and magnetoelectric materials, *Nature*, **2006**, 442, p. 759.
- [25] S.-W. Cheong, M. Mostovoy, Multiferroics: a magnetic twist for ferroelectricity, *Nat. Mater.*, **2007**, 6, p. 13.
- [26] G. Yahia *et al.*, Experimental evidence for the microscopic mechanism of the unusual spin-induced electric polarization in $GdMn_2O_5$, *Phys. Rev. B*, **2018**, 97, art. 085128.
- [27] N.A. Spaldin, R. Ramesh, Advances in magnetoelectric multiferroics, *Nat. Mater.*, **2019**, 18, p. 203.

Sylvain PETIT, directeur de recherche du CEA, et Françoise DAMAY, directrice de recherche au CNRS, en collaboration avec les membres du groupe NFMQ du Laboratoire Léon Brillouin (CEA Saclay, Gif-sur-Yvette).

* sylvain.petit@cea.fr ; francoise.damay@cea.fr

LILLE GRAND PALAIS, FRANCE
24-28 OCTOBRE 2022

14 COLLOQUES
DANS UN MÊME LIEU !

MATERIAUX

www.materiaux2022.org