

► En le désorientant d'un angle magique, le graphène peut devenir supraconducteur

A la suite de la découverte de l'effet de la désorientation de couches de graphène d'un angle précis (dit « magique ») qui confère au matériau des propriétés supraconductrices, plusieurs équipes explorent le nouveau domaine de la « twistronique », dans l'espoir de fabriquer de nouveaux dispositifs électroniques, notamment des jonctions Josephson mieux contrôlables.

Le graphène qui a déjà fait l'objet de plusieurs articles dans cette rubrique ¹, est un matériau qui n'en finit pas d'émerveiller les physiciens et les chercheurs en quête de nouvelles pistes de développements technologiques, en raison de ses propriétés remarquables et des applications qui en découlent.

Une avancée supplémentaire s'est produite en 2018 lorsqu'un groupe de recherche du MIT ² a réalisé une expérience en passe de révolutionner la science des matériaux. En empilant deux feuilles monoatomiques de graphite (constitutives du graphène, rappelons-le) et en désorientant très légèrement une couche par rapport à la couche adjacente, l'application d'un champ électrique a transformé l'empilement ainsi réalisé en un matériau conducteur, puis en un isolant et finalement en un supraconducteur, c'est-à-dire un matériau conduisant l'électricité sans frottement.

Cet effet que personne n'avait prévu a ouvert la voie à ce que les anglo-saxons désignent sous le terme de « *twistronics* » ³, c'est-à-dire l'électronique à base de matériaux partiellement désorientés.

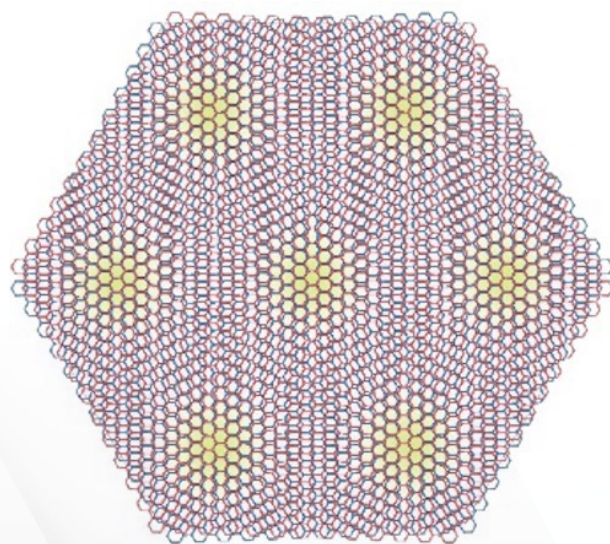
Depuis cette découverte, des dizaines de laboratoires se sont lancés dans la « twistronique », dans l'espoir de créer de nouveaux dispositifs électroniques sans avoir à élaborer des matériaux composés.

Deux groupes notamment - le groupe pionnier déjà cité du MIT et une équipe de l'université de Columbia - sont en train d'en faire la démonstration en élaborant à partir de graphène désorienté des dispositifs fonctionnels, notamment des commutateurs

supraconducteurs du type de ceux qu'on utilise dans l'une des technologies employées pour l'ordinateur quantique. Ces travaux marquent une étape cruciale pour une utilisation nouvelle du graphène, en train de devenir un outil scientifique de base pour la capture et le contrôle des électrons et des photons individuels. Le secret derrière la nature caméléon du graphène désorienté (dit aussi « torsadé ») réside dans ce que l'on appelle « l'angle magique. »

La notion d'angle magique

Les chercheurs du MIT à l'origine de cette découverte surprenante ont démontré que lorsqu'on fait pivoter les feuilles de graphite de $1,1^\circ$ précisément, la torsion provoque la création d'un motif de « moiré » à grande échelle, comme l'illustre la figure 1. L'explication simplifiée du comportement électronique, décrit plus haut de ce « nouveau » matériau, est la suivante : en rapprochant des milliers d'atomes, le moiré leur permet d'agir à l'unisson de façon collective, comme des « superatomes » aux nœuds d'un « super-réseau ». Ce regroupement d'atomes de carbone en des points stratégiques permet à un nombre réduit d'électrons, acheminés au bon endroit sous l'effet d'un champ électrique, de modifier radicalement le comportement du matériau de base, passant ainsi de l'état isolant à l'état conducteur puis supraconducteur. Les interactions fortes avec les supercellules obligent également les électrons à ralentir et à « sentir » la présence des autres électrons qui suivent le même chemin, ce qui facilite leur appariement, condition indispensable à l'apparition de la supraconductivité.



■ Figure 1 : Figure de moiré induite par un empilement désorienté de couches de graphène - Crédit : MIT/Jarillo-Herrero. On voit apparaître un super-réseau (en jaune pâle), constitué de points d'accumulation atomique répartis selon la symétrie hexagonale du graphite. Avec une désorientation précise de $1,1^\circ (\pm 0,05^\circ)$, on peut induire un comportement supraconducteur du matériau.

1 Du même auteur : REE 2018-1, RE 2018-3, REE 2020-2

2 Cao, Y., Fatemi, V., Fang, S. et al. Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices. Nature 556, 43–50 (2018). <https://doi.org/10.1038/nature26160>

3 Nous utiliserons par analogie l'équivalent français de « twistronique » pour qualifier l'étude de composants basés sur des structures cristallines désorientées d'un angle qualifié de « magique ».

Vers de nouveaux dispositifs électroniques ?

Les chercheurs ont désormais prouvé qu'ils pouvaient donc piloter les propriétés souhaitées dans de petites zones de la feuille de graphite en implantant un motif régulier de «portes» métalliques qui soumettent les différentes zones à des champs électriques adaptés. Les deux équipes en pointe dans le domaine ont tous deux ainsi réalisé des jonctions Josephson, dans lesquels deux supraconducteurs encadrent une fine couche de matériau non supraconducteur, créant une valve pour contrôler le degré de supraconductivité recherché. Or les jonctions Josephson conventionnelles sont le cheval de bataille de l'électronique supraconductrice, que l'on retrouve notamment dans les magnétomètres ultra-sensibles ou les dispositifs magnétiques de surveillance de l'activité électrique du cerveau.

Afin de montrer la polyvalence de cette technique, le groupe du MIT, en collaboration avec une équipe du National Institute of Materials Science japonais, est allé plus loin en transformant électriquement ses jonctions Josephson en d'autres dispositifs submicroscopiques ⁴. En réglant les champs appliqués pour obtenir une configuration conducteur-isolant-supraconducteur, ils ont pu mesurer le degré d'étanchéité des paires d'électrons, un indice essentiel lié à la nature supraconductrice du matériau, permettant de le comparer à d'autres matériaux plus traditionnels. L'équipe a également construit un transistor capable de contrôler le mouvement d'électrons uniques.

Certes les dispositifs de graphène à angle magique ne sont pas près de défier l'électronique grand public à base de silicium. Toutefois le graphène est facile à fabriquer : les feuilles élémentaires de graphène peuvent être décollées de blocs de graphite avec un simple ruban adhésif. Mais plusieurs contraintes fortes risquent de tempérer l'enthousiasme provoqué par ces dernières avancées :

- la réalisation de dispositifs complexes suppose la création de centaines de milliers de substrats de graphène. Or la technologie permettant une telle production de masse n'existe pas encore ;
- les matériaux doivent être refroidis à une température proche du zéro absolu avant de pouvoir devenir supraconducteurs ;
- l'angle magique de désorientation est difficile à obtenir et surtout à maintenir de façon précise car les feuilles ont tendance à

se déformer. Créer de manière fiable des feuilles désorientées, même d'un micron ou deux d'épaisseur, reste un défi.

Néanmoins, de nombreux chercheurs restent désireux d'explorer des dispositifs électroniques qui ne fassent pas appel à un procédé chimique de fabrication de composés complexes dont la structure est difficile à maîtriser. Dans le graphène à angle magique, en revanche, tous les atomes sont constitués d'un seul élément, le carbone, et les scientifiques peuvent en modifier le comportement électronique par simple contrôle du champ appliqué. Une des applications privilégiée aujourd'hui pourrait être les jonctions Josephson pour ordinateur quantique. Pour faire fonctionner les qubits à supraconducteurs, un grand nombre de ces jonctions doivent être manipulées conjointement de manière fastidieuse. Avec le graphène désorienté, les qubits pourraient provenir de jonctions uniques, plus petites et plus faciles à contrôler. ■ AB

> Une faille dans le modèle standard de la physique des particules

L'annonce a débordé du cercle habituel des publications spécialisées traitant de la physique nucléaire. L'expérience appelé Muon g-2 du moment magnétique du muon au Fermilab à Chicago confirme une autre expérience datant d'une vingtaine d'années qui montrait une divergence entre les prédictions théoriques du modèle standard de la physique des particules et l'expérimentation.

Retour sur le modèle standard

Les deux grandes théories du XX^{ème} siècle, la mécanique quantique et la relativité générale, dominent la physique théorique depuis bientôt un siècle. La description de la matière qu'a entraînée l'étude des propriétés des particules microscopiques avec les lois de la physique quantique ont donné naissance à de nouveaux domaines, la physique atomique et la physique nucléaire.

Ce qu'on appelle le modèle standard de la physique des particules est une théorie qui décrit les constituants élémentaires de la matière et leurs interactions. Chaque interaction bénéficie d'un modèle qui la décrit. Historiquement la première d'entre elle est la gravitation décrite par Newton puis par la relativité générale et elle échappe encore au modèle standard et reste pour l'heure à part. L'interaction électromagnétique ●●●

4 « Daniel Rodan-Legrain, Yuan Cao, † Jeong Min Park, Sergio de la Barrera, Mallika T. Randeria, Pablo Jarillo-Herrero, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi », arXiv:2011.02500v1 [cond-mat.supr-con] 4 nov.2020

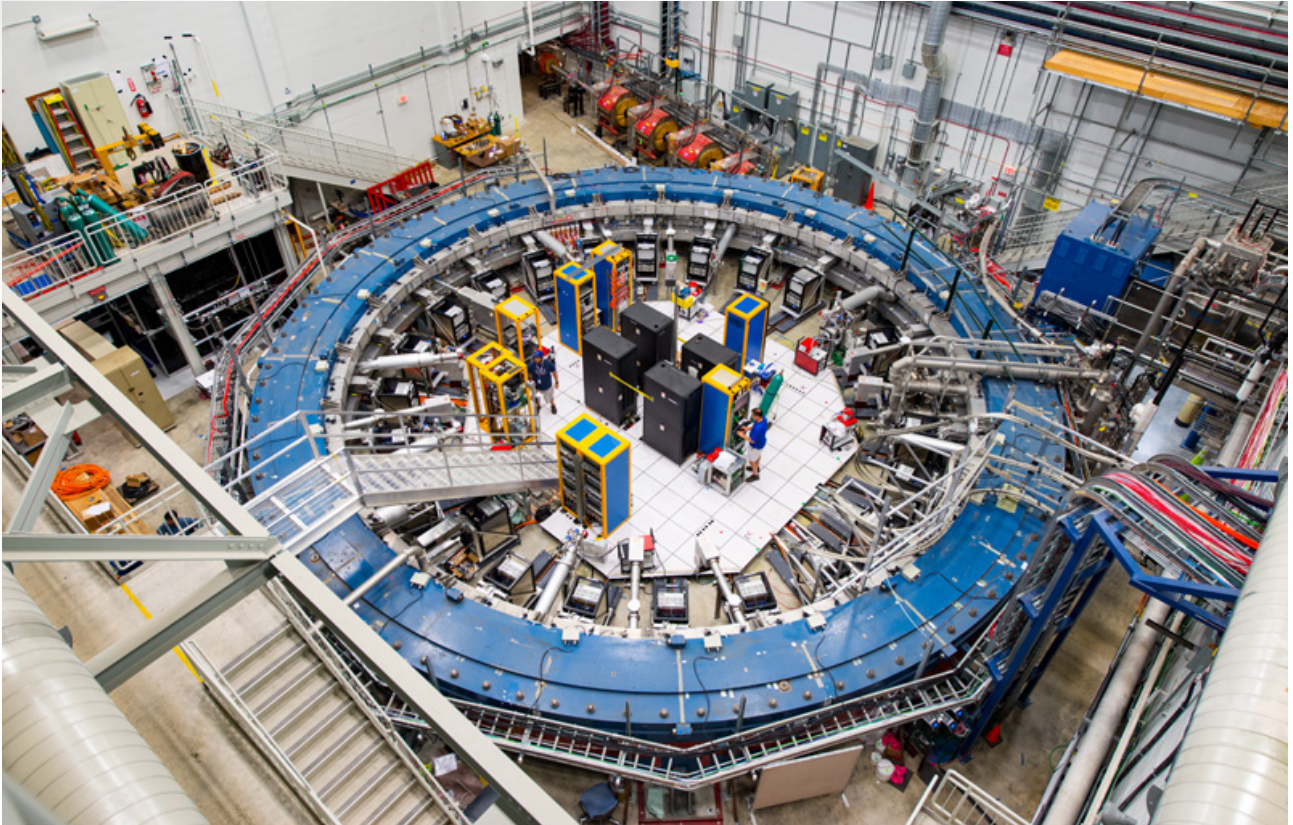


Figure 1 : Anneau de détection des muons au Fermilab - Source <https://vms.fnal.gov/asset/detail?recid=1950114>.

- théorisée au XIX^{ème} siècle par Maxwell puis les interactions forte et faible, formalisées au XX^{ème} siècle, forment le socle théorique du modèle standard. Dans les années 30 les physiciens pensaient que la liste des particules élémentaires se limitait aux particules connues à l'époque comme l'électron, le proton et le neutron. Avec les accélérateurs de particules, il est apparu une véritable inflation des particules élémentaires tant elles étaient nombreuses. Avec les mises au point des grandes théories d'unification des forces faibles, électromagnétiques et fortes, respectivement la théorie électrofaible et la chromodynamique quantique, le modèle standard a été l'objet de nombreuses vérifications et validations expérimentales. Il est considéré comme une réussite intellectuelle de la physique.

La saga du moment magnétique

La découverte de la structure atomique s'est effectuée par l'observation et l'interprétation des spectres atomiques. Les modèles d'atome de Bohr puis de Sommerfeld ont permis d'expliquer les raies atomiques dont il n'était rendu compte que par des formules empiriques. Ainsi Zeeman avait observé que le spectre des atomes dans un champ magnétique se dédoublait et cela avait conduit à associer à l'atome un nombre supplémentaire, le moment magnétique. Afin d'expliquer le dédoublement des raies de Zeeman par le moment magnétique des particules, le physicien Landé avait proposé une solution empirique qui consistait à multiplier le moment

élémentaire (le magnéton de Bohr) par un facteur g appelé facteur de Landé. Expérimentalement dans le cas de l'électron, la valeur de g pour laquelle les mesures correspondaient aux prédictions était égale à 2. En 1928, le moment magnétique de l'électron était calculé par Dirac grâce à son équation relativiste et il justifiait alors la valeur empirique du facteur de Landé. En 1947, la mesure du moment magnétique était effectuée avec une plus grande précision et la valeur mesurée était alors légèrement plus grande d'un millième. Avec la mise au point de la théorie quantique des champs, les théoriciens Feynman, Schwinger et Dyson ont envisagé que l'électron puisse interagir avec le milieu par des échanges de particules virtuelles. Le passage d'un état à un autre pouvait être considéré comme la superposition de plusieurs chemins de paires particules et antiparticules. Les théoriciens ont résolu dans le cadre de cette théorie les problèmes des termes infinis grâce à la méthode de renormalisation. Avec l'apport de la théorie quantique des champs, la valeur du moment magnétique trouvée était conforme aux résultats expérimentaux, l'accord avec la théorie étant de l'ordre de 10^{-10} .

Le muon

Le modèle standard comprend 17 particules élémentaires. En 1936, en étudiant les rayons cosmiques, les Américains Carl Anderson et Seth Neddermeyer ont découvert le muon, un cousin 207 fois plus massif que l'électron. Comme l'électron,

le muon a un spin égal à $1/2$, mais contrairement au premier, il est instable et sa durée de vie moyenne est de 2,2 microsecondes avant de se désintégrer en un électron et deux neutrinos. Il fait partie de la famille des leptons comme l'électron et le tau. Pendant des décennies, les physiciens ont mesuré le moment magnétique du muon qui a priori devait être identique à celui de l'électron. L'expérience consistait à placer les muons dans un champ magnétique vertical qui les fait tourner horizontalement et la fréquence à laquelle les muons tournent était proportionnelle au moment magnétique.

L'anomalie du moment magnétique du muon

La première alerte sur le modèle standard s'est produite en 2001 lorsque des chercheurs de l'expérience Muon g-2, alors à Brookhaven dans la banlieue de New-York, ont trouvé que le muon avait un moment magnétique plus grand que le modèle standard ne le prédisait. L'écart n'était que d'environ 2,5 fois les incertitudes théoriques et expérimentales combinées. C'était loin d'être la norme des physiciens pour revendiquer une découverte qui est typiquement de l'ordre de cinq fois l'incertitude totale. Néanmoins, les données statistiques étaient insuffisantes pour garantir la validité de ce résultat. Une nouvelle expérience était donc nécessaire.

La mesure du Fermilab

Le Fermilab de Chicago est l'un des grands collisionneurs de particules avec le LHC du CERN et c'est l'un de ses laboratoires qui a effectué une nouvelle mesure du moment magnétique du muon. Après près d'une année, l'expérience Muon g-2 a livré ses premières données qui suggéraient que les chercheurs avaient mis le doigt sur une faille dans le modèle standard. Le moment magnétique anormal du muon a été mesuré avec une grande précision. Ce résultat différait de seulement 251×10^{-11} de la valeur théorique de référence, mais c'était suffisant pour parler d'un écart entre la mesure et le calcul théorique. Le nouveau résultat correspond presque exactement à la mesure effectuée à Brookhaven. La concordance des deux mesures a montré que le résultat des années 2000 n'était ni un hasard statistique ni le produit d'une faille non détectée dans l'expérience.

Le modèle standard en cause ?

Suite à ce constat, avant d'attaquer le modèle standard un certain nombre de précautions doivent être prises ; en effet les incertitudes sur le résultat ne proviennent pas seulement de l'expérience, mais aussi du calcul théorique car toutes les autres particules, susceptibles d'exister à l'état « virtuel » dans l'expérience, peuvent influencer sur le moment magnétique du muon. Le muon étant 200 fois plus massif que l'électron, les corrections quantiques apportées par des particules plus

lourdes, qui subissent l'interaction forte, ne sont pas négligeables, il faut donc consolider encore d'avantage les calculs théoriques. Une autre mesure effectuée par une méthode différente montrant un désaccord moins significatif incite également à la prudence.

Il reste que le modèle standard malgré ses réussites passées ou plus récentes comme le boson de Higgs recèle des anomalies qui au fil des améliorations des méthodes et des précisions de mesure, posent le problème de sa validité et de sa robustesse. La différence théorie-expérimentation du moment magnétique du muon est donc une alerte sérieuse à laquelle s'ajoute également de manière très technique une anomalie dans la désintégration du méson B apparue au LHC du CERN.

Ou bien une nouvelle théorie sera nécessaire ou une modification substantielle du modèle standard suffira, l'avenir le dira. ■ ML

De l'hydrogène stocké à l'état solide pour l'e-mobilité

POWERPASTE, un carburant à base d'hydrogène, stocké à pression atmosphérique sous forme de pâte, destiné à la mobilité sans carbone de petits véhicules.

L'Institut allemand Fraunhofer vient de mettre au point un hydruide de magnésium solide, POWERPASTE, qui permet de stocker l'hydrogène sous forme chimique à température ambiante et à pression atmosphérique. L'hydrogène est libéré à la demande par réaction avec de l'eau (voir figure 1).

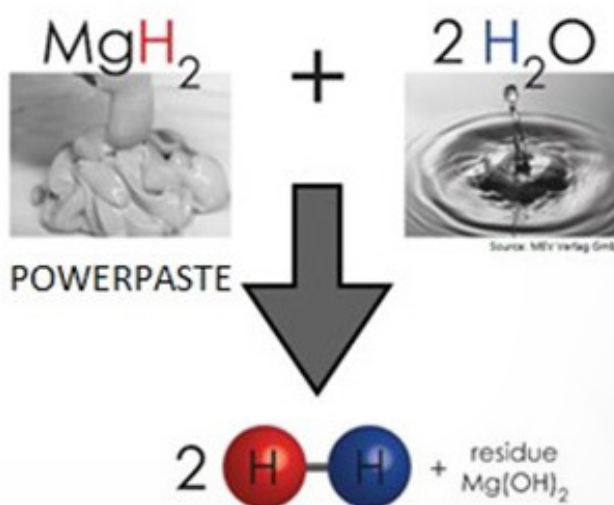


Figure 1 : Réaction chimique du POWERPASTE avec l'eau.

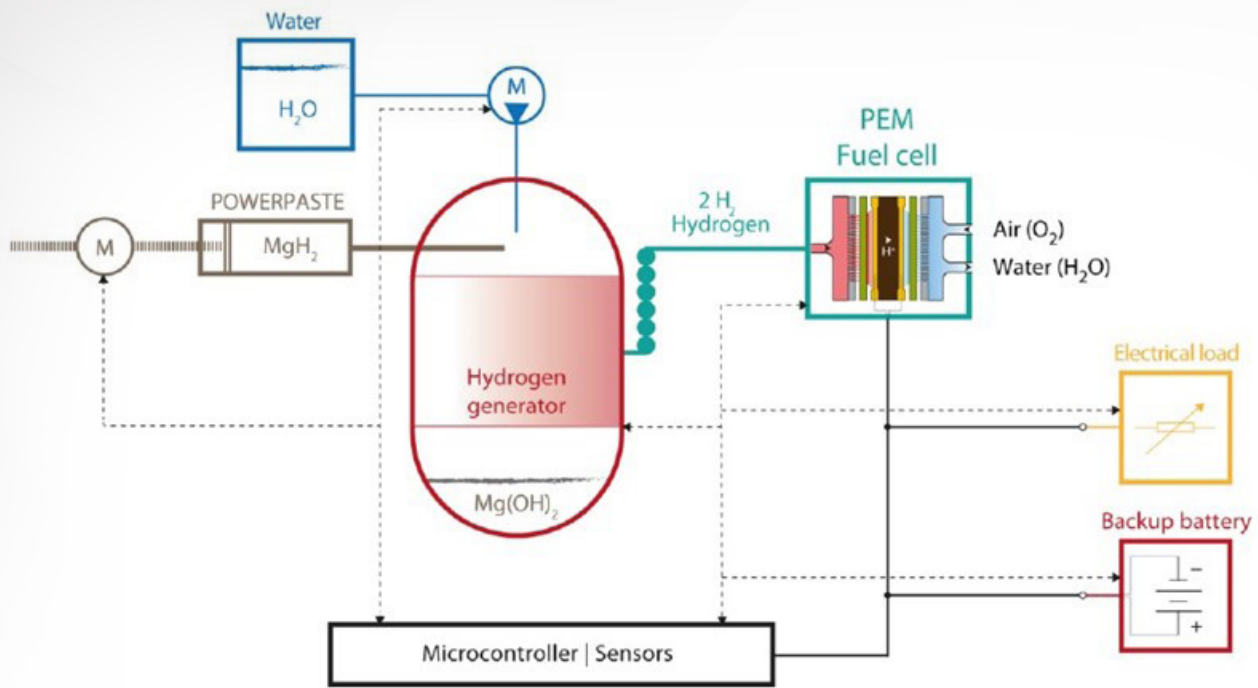


Figure 2 : Schéma d'une pile à combustible (PEM) alimentée par le POWERPASTE – publication de L.Röntzsch et NM.Vogt.

- La matière première de POWERPASTE est le magnésium, matière très abondante et facilement disponible. La poudre de magnésium est combinée à l'hydrogène pour former de l'hydruide de magnésium dans un procédé à 350 °C et cinq à six fois la pression atmosphérique. Un ester et un sel magnétique sont ensuite ajoutés pour former un produit fini qui est très stable et ne commence à se décomposer qu'au-delà de 250°C.

A bord du véhicule, le POWERPASTE est libéré d'une cartouche au moyen d'un piston. Par ajout d'eau provenant d'un réservoir embarqué, la réaction avec l'hydruide de magnésium libère de l'hydrogène gazeux en quantité ajustée aux besoins de la pile à combustible du véhicule. En fait, seulement la moitié de l'hydrogène provient du POWERPASTE, le reste provient de l'eau ajoutée.

A partir d'un kilogramme d'hydrogène, on peut produire 1,6 kWh d'électricité. Sa densité énergétique de 1,9 kWh/litre est deux fois meilleure que celle de l'essence et représente dix fois celle des batteries Lithium-ion (voir figure 3).

L'hydrogène est considéré par beaucoup comme le carburant de l'avenir pour les transports routiers. Des voitures roulent déjà à l'hydrogène. Ils sont équipés de réservoir renforcé pour stocker l'hydrogène à une pression de 700 bars. Cette solution n'est pas encore adaptée pour les petits véhicules comme les scooters électriques ou les vélos.

Avec le POWERPASTE, l'objectif de l'Institut Fraunhofer est d'offrir une solution alternative aux batteries Li-ion afin de permettre aux petits véhicules de rouler sans émission de carbone. Les pâtes ne sont pas encore prêtes à être mises sur le marché. Une usine pilote

devrait ouvrir à la fin de l'année 2021 qui produira quatre tonnes de pâtes par an. L'institut allemand mentionne de nombreux autres domaines d'utilisation comme par exemple la production d'électricité dans les campings, pour les générateurs de secours, pour l'alimentation de drones. L'utilisation pour les voitures reste également un sujet d'études futures.

On va donc surveiller avec attention les progrès de cette pâte prometteuse. Les défis à relever sont encore nombreux pour passer du stade de l'expérimentation de laboratoire à une solution industrielle et économique. Ayant en tête qu'une cartouche de 10 kilogrammes de POWERPASTE contient 1 kg d'hydrogène, l'énergie électrique libérée, 1,6 kWh, ne devrait permettre à un petit scooter de ne rouler que 30 minutes à 1 heure. Augmenter son autonomie suppose donc augmenter la quantité de POWERPASTE et d'eau à transporter, ce qui alourdirait le véhicule d'autant. ■ GS

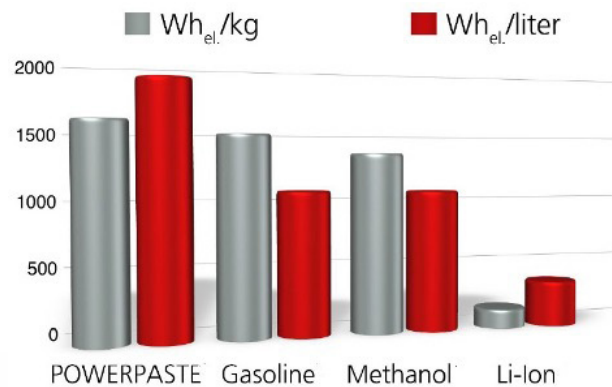


Figure 3 : Densités massiques et densités énergétiques du POWERPASTE comparées à d'autres carburants.



Source Suez

► Une collecte des déchets « intelligente » dans la région toulousaine

Les 200 bennes collectant les déchets déposés par les toulousains dans les 13 déchèteries gérées par SUEZ, sont désormais équipées d'une intelligence embarquée qui permet l'optimisation des moyens de collecte et la réduction des coûts de transport. D'autres applications de la solution à base d'intelligence artificielle et d'apprentissage machines proposée par la société ffly4u sont aussi présentées.

Dans le cadre d'un partenariat entre le Groupe SUEZ et l'entreprise ffly4u, spécialisée dans l'intégration des technologies d'Intelligence Artificielle (IA) et de « *Machine Learning* (ML) », a débuté fin 2019 une expérimentation portant sur une déchèterie unique et une dizaine de bennes. Les essais s'étant avérés concluants, Suez et Decoset ont déployé la solution ffly4u en juillet 2020 dans les 13 déchetteries toulousaines.

Grâce aux boîtiers connectés placés sur les bennes, SUEZ dispose d'une visibilité en temps réel sur le taux de remplissage des bennes, leur localisation à quai et hors quai, aussi bien au sein des déchèteries qu'en transit. La reconnaissance de la vibration spécifique induite par le processus de compactage permet de renseigner sur le niveau de remplissage des bennes, d'optimiser les moyens et les parcours de collecte et de réduire les coûts.

Les équipes opérationnelles connaissent donc précisément les phases de chargement/déchargement des bennes c'est-à-dire

bennes sur camion ou au sol, et sont alertées en cas d'immobilisation prolongée. Sur un territoire fortement urbanisé qui attire chaque année plus de 10 000 nouveaux habitants, cet équipement optimise la planification, le remplissage et le transport des bennes et permet ainsi de réduire de 5 % les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées au transport des déchets.

Une technologie unique en Europe

L'innovation ffly4u repose sur l'intégration des technologies (IA) et (ML) dans un boîtier à faible consommation énergétique. Cette solution appelée « *Edge AI Low Power®* », lancée en 2018 par ffly4u, permet d'identifier précisément les phases de vie des objets industriels en particulier dans le secteur du recyclage.

Fondée en 2015, l'entreprise toulousaine ffly4u (Fly for You) a déjà connecté plus de 30 000 objets en plaçant ses boîtiers électroniques sur des actifs mobiles. Les boîtiers permettent de générer de la donnée qui est recueillie sur un réseau de connectivité de type Sigfox/LoRa avant d'être restituée sur le cloud, où elle est réceptionnée par les clients.

Ffly4u qui bénéficie du soutien de Bpifrance depuis sa création cible l'industrie et la logistique avec l'intégration embarquée des technologies IA et ML qu'elle a développée dans des capteurs autonomes positionnés sur des objets en mouvement et ne disposant pas de source d'alimentation permanente.

Une architecture basée sur l'Edge et l'IOT

La solution

La solution Ffly4u permet une géolocalisation intérieure et extérieure, une surveillance de la température, une détection ●●●

- de chocs/de mouvements et un suivi du couple contenant / contenu pour ainsi assurer l'intégrité des actifs.

Elle se compose de trois éléments indépendants :

- un dispositif FflyTrack à fixer sur l'actif mobile ;
- une connectivité sans fil et bas débit via des réseaux LPWAN de type Sigfox et LoRa ;
- une plateforme data pour restitution des données.

L'offre technologique Edge AI Low Power repose sur l'intégration d'algorithmes type IA et ML dans des boîtiers très compacts (14 cm de longueur, 150 g), équipés de capteurs embarqués (géolocalisation, température, humidité, mouvement...), fonctionnant à très faible consommation énergétique, avec une autonomie de 4 à 6 ans. Ces capteurs intelligents traitent une partie des données métier directement à l'intérieur du boîtier sans les remonter au niveau central du cloud.

Les boîtiers

Le boîtier ffly « Track Myria » fournit :

- un service de localisation GPS (également en BLE, Wifi et par les réseaux LPWAN) en indoor et outdoor ;
- la détection de mouvement et la détection de chocs grâce à un accéléromètre ;
- le relevé de température ;
- la mesure de durée de lavage en reconnaissant la signature vibratoire du Karcher sur le container ;
- des algorithmes IA qui contrôlent la présence, l'absence ou analysent les différences d'états.

Les boîtiers sont conçus, prototypés et produits en France. L'intégration des compétences matériels et logiciels permet à ffly4u de garantir la qualité de ses dispositifs et d'assurer une prestation à un faible prix, de l'ordre de 2€/mois/actif.

Les réseaux IOT

Ffly4u est indépendant en termes de choix de réseaux afin d'adapter ses capteurs à la fois à SIGFOX, LoRaWAN ou au GSM pour répondre de manière pertinente aux besoins des industriels. La consommation via un réseau LPWAN (longue portée et faible consommation énergétique) de type Sigfox ou LoRaWAN est divisée par 10 par rapport à un réseau GSM. Le coût de connexion, lui, est divisé par 4.

La plate forme applicative

La plateforme, à la fois web et mobile, est personnalisable en fonction des KPIs définis avec les clients et des fonctions activées du boîtier. Des alertes e-mail et/ou sms sont paramétrées afin d'être envoyées en temps réel.

L'Intelligence artificielle dans les capteurs

Ffly4u a développé des solutions technologiques avancées mettant en œuvre de l'intelligence artificielle embarquée pour le traitement de données provenant de différents capteurs ainsi que de l'électronique basse consommation (hardware et firmware) notamment pour les aspects traitement de l'information et communication.

Actuellement, les calculs sont majoritairement réalisés sur des serveurs distants dans les clouds, ce qui nécessite la transmission complète des données mesurées par les capteurs. Cette architecture est simple à déployer mais peu efficace du point de vue énergétique avec des serveurs de calcul surdimensionnés pour la plupart, et est peu résiliente en cas de défaut de transmission des données.

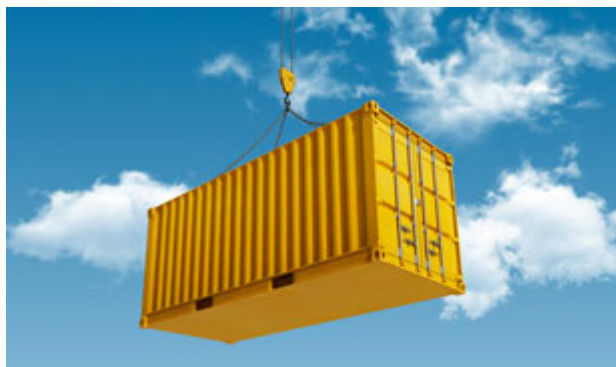
La tendance est donc à l'implémentation des algorithmes de traitement au plus proche des capteurs avec des microcontrôleurs à faible consommation. Ces solutions permettent de réduire les taux d'utilisation des systèmes de communication, de décharger les serveurs de calcul en réduisant leur consommation énergétique et d'améliorer la résilience de ces réseaux de capteurs.

D'autres domaines d'application

Au cœur des projets **Industrie 4.0** de ses clients, ffly4u intervient sur d'autres créneaux que la collecte des déchets, notamment dans les domaines du fret aérien et de l'environnement :



Stockage de tourets de câble. Source Nexans.



Transport d'emballages consignés. Source ffly4u.

- **Tourets de câble** : Ffly4u a développé une solution spécifique pour Nexans, permettant de calculer la longueur résiduelle de câble sur tourets en fin de chantier permettant à l'entreprise de renforcer son service de suivi et de gestion pour permettre aux opérateurs de réseaux de distribution de localiser précisément leurs tourets mais aussi de connaître à tout moment la longueur de câble restant et ainsi de contrôler l'état d'avancement de leurs chantiers.

- **Emballages réutilisables** (durée de lavage) : solution utilisée dans le cadre du process RTP (*Returnable Transport Packaging*), terme générique pour décrire une grande variété d'emballages différents utilisés pour transporter des marchandises dans de nombreux secteurs : automobile, commerce de détail, pharmacie, cosmétique, industrie chimique, machines, etc. Outre les informations standards (position, température, choc), les capteurs peuvent détecter des seuils de température ainsi que les différents états possibles de l'emballage (plié/déplié, lavé/non lavé).

- **Aéronautique** (détection atterrissage/décollage). Le boîtier ffly4u est aujourd'hui « avionable ». Embarqué dans les appareils, il permet de détecter les phases de décollage et d'atterrissage pour couper automatiquement la radiofréquence pendant les vols. ATR l'utilise déjà pour tracer ces avions en maintenance. ■ SD

➤ Du nanocarbone black pour rendre le béton conducteur, une nouvelle voie à explorer ?

Dans le cadre d'une collaboration entre le MIT Concrete Sustainability Hub et un laboratoire conjoint MIT-CNRS, une publication scientifique récente [1] analyse les performances électriques d'un nouveau type de béton à base de nanocarbone black (nCB). Ce choix est motivé par la meilleure

conductivité, le plus faible coût et le caractère poreux de ce matériau qui permet une microstructure hautement compressible. Les mesures ont concerné la conductivité électrique et l'effet thermique pour différentes fractions volumiques de nCB (de 0 à 25 %).

Pour réaliser ces mesures, un échantillon cylindrique (3,8 cm² et 9-15 mm) est placé entre deux armatures métalliques puis soumis à une tension continue de quelques volts. La mesure du courant permet d'en déduire la résistance électrique de l'échantillon puis sa conductivité électrique. Le phénomène de conduction électrique apparaît au-delà d'un certain seuil (3-4 %) caractéristique d'un phénomène de percolation. L'élévation de température étant proportionnelle aux pertes (loi d'Ohm thermique), les mesures confirment un échauffement proportionnel au carré de la tension appliquée. L'échauffement augmente avec la concentration en nCB mais de façon non linéaire.



Figure 1 : Échantillons de béton conducteur au nCB réalisés par l'équipe mixte MIT-CNRS.

Etat de l'art et applications visées pour le béton conducteur

Usuellement, les performances des bétons sont principalement évaluées au regard de leurs caractéristiques mécaniques. Toutefois, à l'avenir, leurs caractéristiques électriques pourraient entrer en jeu. Par le passé des travaux de recherche ont déjà été menés, et des brevets (1995 et 2003) déposés concernant des propriétés conductrices pour certains bétons. Pour cela des matériaux conducteurs (graphite, nanotubes de carbones, ou fibre de carbone) avaient été mélangés au ciment, mortier ou béton.

La production de béton est très énergivore (2 775 MJ soit 770 kWh pour un m³ de béton), et représente 8 à 10 % ●●●

- des émissions de CO₂. De nouvelles propriétés électriques laissent espérer des avantages qui pourraient supplanter le coût énergétique propre du béton. Parmi les avantages, l'exploitation d'un effet joule pour la production de chaleur.

Des applications possibles concernent le dégivrage de ponts dans des zones critiques ou le déneigement des infrastructures de transport afin de réduire les contraintes mécaniques. Les évaluations préconisent de mélanger 15 à 20 % (en volume) de fibre d'acier au béton. Une autre application, dans le domaine du bâtiment, concerne les planchers chauffants. L'ajout de nCB dans le mortier permet d'envisager une élévation de 10 °C au-dessus de la température ambiante en 5 h. Ces propriétés semblent montrer une certaine stabilité sur plusieurs jours. Les performances électriques et mécaniques des alliages de béton à base de nCB ou fibres de carbone dépendent à la fois du contenu en carbone et du processus de préparation. Un certain nombre d'études ont été réalisées pour en étudier les performances thermoélectriques.

Les performances des matériaux dépendent de la fraction d'eau dans le ciment, du mélange sable/ciment et du taux de nCB dans le mélange (masse de nCB ramenée à la masse du ciment).

Au-delà de la caractérisation d'échantillons, le déploiement à l'échelle industrielle pose plusieurs questions [3] :

- Quel est l'effet de la dispersion des nCB sur les propriétés électriques et mécaniques ?

Les analyses montrent qu'il existe 3 états :

(I) sans dispersion, la conductivité est bonne mais la force de compression est plus faible que le ciment normal ;

(II) à faible dispersion, il existe une conductivité maximale avec une force de compression modérée ;

(III) au-delà de ce maximum, à forte dispersion, la conductivité chute fortement alors que la force de compression est forte.

- Pour une mise à l'échelle, comment les proportions (taux d'humidité du ciment, de nCB, de sable) impactent-elles la conductivité électrique ?

- Quelle est l'évolution des performances mécaniques du fait de ce réseau connecté de nCB ?

Il faudra acquérir des débuts de réponse à ces questions avant de se faire une opinion sur l'avenir de ce type de struc-

tures béton/nCB et sur les chances de les voir passer au stade d'une production industrielle. ■ MP

Références :

[1] N. A. Soliman, N. Chanut, V. Deman, Z. Lallas and F.-J. Ulm, "Electric energy dissipation and electric tortuosity in electron conductive cement-based materials", *Phys. Rev. Materials*. Vol. 4, 125401, Dec. 2020 { - <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevMaterials.4.125401>

[2] Matériau d'information additionnel sur la conception et l'optimisation du matériau, consulter: <http://link.aps.org/supplemental/10.1103/PhysRevMaterials.4.125401>

[3] Seminar by N. A. Soliman: https://www.youtube.com/watch?v=pSOvkYF4L_8

[4] W. Li, W. Dong, L. Shen, A. Castel and S. P. Shah, "Conductivity and piezoresistivity of nano-carbon black (NCB) enhanced functional cement-based sensors using polypropylene fibres", *Materials Letters*, Vol. 270, July 2020