

Le document préparatoire de l'Industrial Accelerator Act (IAA) vient enfin d'être publié : une définition bien décevante de ce que pourrait être le 'Made in Europe'

Comme évoqué dans le numéro REE 2025-4 dans l'actualité sur les véhicules électriques, la proposition de texte de l'IAA a enfin été présentée le 4 mars par Stéphane Séjourné (figure 1), le commissaire européen chargé du marché intérieur et des services¹. Ce texte marque un tournant majeur de la Commission, jusqu'à maintenant promoteur de l'ouverture des marchés, qui doit faire face aux menaces de déclin économique, de désindustrialisation et de vulnérabilité stratégique.



Figure 1 : Le commissaire européen Stéphane Séjourné (source : The Guardian).

En effet, la part de l'industrie manufacturière de l'UE dans son PIB total a reculé de 17,4 % à 14,3 % entre 2000 et 2024. Depuis 2019, les volumes de production dans les EI (*Energy Intensive Industries*) ont baissé de près de 20 %. La dépendance de l'UE vis-à-vis de la Chine a été multipliée par 4,2 pour les véhicules électriques. Environ 50 % des batteries utilisées dans l'UE, 94% des panneaux solaires et cellules photovoltaïques, 50 % des onduleurs sont importés de Chine.

La commission européenne indique que plus de 600 000 emplois sont menacés dans le secteur automobile dans les 5 à 10 prochaines années. L'objectif de l'IAA est de permettre de préserver ces emplois et de créer 150 000 emplois dans d'autres secteurs, principalement pour les batteries (85 000) et pour le solaire (60 000). Il s'agit aussi de préserver 4 500 emplois dans

¹ Nous avons pu assister à une présentation plus détaillée de ce projet le 11 mars (EU Clusters Talk).



Structure of the IAA



Figure 2: Structure de l'IAA (source UE).

la sidérurgie avec l'acier bas carbone. In fine, l'objectif est de remonter la part du PIB de l'industrie manufacturière de l'UE à 20 % en 2035.

La proposition de texte couvre 4 domaines d'actions (figure 2) :

Faciliter et simplifier l'obtention des permis

Cela concerne l'industrie manufacturière et les EI. Il s'agit pour ces industriels de n'avoir qu'à soumettre une seule fois leurs projets pour obtenir un permis pour l'ensemble de l'Union. C'est actuellement toujours un goulot d'étranglement notamment pour les technologies innovantes du fait des processus d'approbation différents selon les pays.

Introduire une obligation de 'Made in Europe' dans les marchés publics ou dans les financements publics (subventions...)

Cela concerne les secteurs de l'acier, le ciment, l'aluminium, les technologies Net-Zero et les composants automobiles (figure 3). Le concept de 'Made in Europe' ou MiEU dans l'IAA est en fait très spécifique :

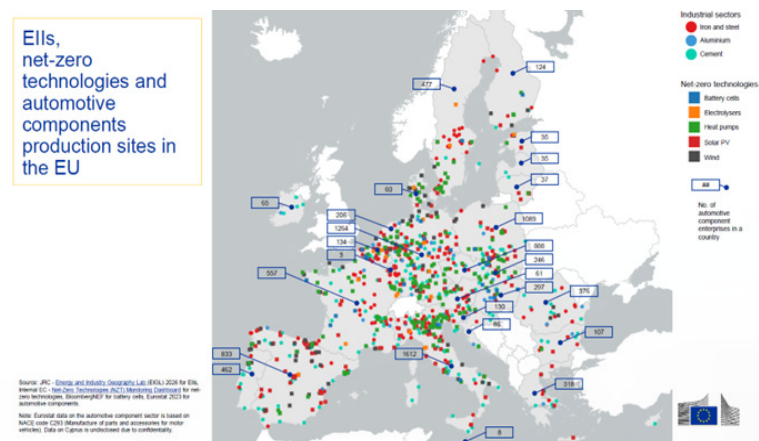


Figure 3 : Les domaines concernés par l'IAA.

- La zone Europe concerne l'UE mais aussi tout pays qui aurait un accord économique réciproque (comme le Canada, la Norvège, l'Islande, la Turquie, la Grande Bretagne ou le Japon...). C'est donc un concept géographique variable, très large et très lâche ! Il ne faudrait pas dire *Made in Europe*, mais *Not Made in China*.

- Pour les véhicules électriques (VE) : le MiEU impose que le véhicule soit assemblé dans l'UE et respecte deux conditions : 70 % de composants MiEU à l'exception des batteries, et pour les batteries, 3 composants au moins doivent être MiEU. Ce nombre de composants doit augmenter progressivement. A noter l'exception des petits VE qui ne doivent respecter qu'une seule des deux conditions au choix.

- Pour l'aluminium, le ciment, l'acier et les technologies Net-Zero (batteries, éolien, nucléaire, solaire, pompe à chaleur ou électrolyseurs), des conditions similaires ont été proposées, avec des exigences bas carbone.

Favoriser le développement de zone industriel

Cela concerne les secteurs automobiles, EI ou les technologies Net-Zero. L'objectif est de créer des 'hubs' régionaux industriels. Il s'agit d'attirer les investissements, de faciliter la décarbonation et de renforcer les chaînes d'approvisionnement.

Par exemple, cela pourrait concerner des *clusters* en France autour du nucléaire. Mais cela amène à développer une collaboration transfrontalière, car il est difficile pour une région de posséder toute la chaîne de valeur. Les modalités de la mise en œuvre de cette politique industrielle européenne sont loin d'être claires et devront tenir compte des enjeux politiques nationaux.

Imposer des obligations pour les investissements étrangers

Cela concerne spécifiquement le secteur des batteries, des VE, du solaire ainsi que les industries d'extraction / traitement / recyclage des matières premières critiques. Le texte propose d'imposer des conditions pour tout investissement supérieur à 100 Meuro provenant de pays qui contrôlent plus de 40 % de la production mondiale. Bien entendu, le premier pays visé est la Chine.

- Au moins 50 % des effectifs doivent être des travailleurs de l'Union.

De plus, 3 des 5 conditions suivantes doivent être respectées :

- La participation des investisseurs étrangers ne doit pas dépasser 49 % ;
- *Joint ventures* avec des entités de l'UE : participation étrangère maximale de 49 % ;
- Accord de transfert de technologies ;
- 1 % du chiffre d'affaires annuel brut mondial consacré aux dépenses de R&D dans l'Union ;

- 30 % des produits entrant dans la fabrication doivent provenir de l'UE.

En réalité, cela ne concerne qu'une dizaine de cas d'investissement par année pour des secteurs étroits, et en premier lieu des investissements chinois dans l'UE.

Une proposition bien décevante

Cette proposition de texte dont la publication avait été retardée à de multiples reprises reflète les débats intenses notamment sur ce que doit être le 'Made in Europe', du fait des intérêts divergents des acteurs et des pays.

La France, leader du mouvement, ainsi que plusieurs pays du sud de l'Europe revendique qu'une part importante de contenu soit fabriquée en Europe, tandis que les pays plus libéraux sont inquiets des répercussions sur leurs exportations. Les industriels allemands demandent plutôt à se focaliser sur les problèmes plus importants à leurs yeux que sont les coûts administratifs en Europe, la faiblesse du marché local et le manque de leadership technologique. L'ensemble des industriels quant à eux sont inquiets pour leurs chaînes de fabrication et d'approvisionnement dont souvent une partie importante se trouve hors de l'UE.

Les propositions ont été ainsi peu à peu diluées pour tenir compte de ces intérêts. Par exemple, le contenu produit en local d'un VE n'est obligatoire que pour les marchés publics ou les produits subventionnés. Autre exemple, un acier bas-carbone à 25 % n'a pas besoin d'être MiEU pour les marchés publics ou pour être subventionné. Un VE fabriqué au Canada pour plus de 70 % (hors batteries) serait considéré comme MiEU !

Il n'est pas du tout certain que les objectifs ambitieux de 20 % du PIB en 2035 puissent être atteints avec une telle proposition. Mais, c'est certainement un progrès par rapport à la situation actuelle. Comme l'a déclaré Stéphane Séjourné, si rien n'est fait, très vite 100 % des technologies seront produites en Chine.

Cette proposition de texte doit encore être débattue et approuvée par le Conseil de l'UE et le Parlement européen, un processus qui pourra nous mener jusqu'à la fin de l'année 2026, voire au-delà, du fait des dissensions qui existent toujours. Par ailleurs, les pressions externes des Etats Unis ou de la Chine ne seront pas à négliger.

Pour conclure sur une note plus positive, l'IAA contient bien les éléments permettant de conserver l'emploi en Europe malgré le tsunami des VE chinois en imposant un contenu local, et en permettant d'imposer des transferts de technologie pour les constructeurs chinois qui produiront en Europe. Ceci est bien en cohérence avec la conclusion de l'actualité que nous avons publiée sur les VE dans le dernier numéro (Cf. REE 2026-1 pp.12-16). ■

Roberto Kung, membre senior SEE



Publication de la feuille de route R&D du Conseil scientifique de Think SmartGrids

Acteur de référence pour le développement des Smart Grids en France et à l'international, Think Smartgrids a pour objectif de développer la filière des smart grids en France et de la promouvoir en Europe comme à l'international. Créée en avril 2015, l'association rassemble gestionnaires de réseaux, fournisseurs d'énergie, régulateurs, entreprises de l'électrotechnique, des automatismes, des équipements de télécommunication et systèmes d'information, du conseil, mais aussi monde de la recherche et associations.

Au sein de l'association, le Conseil scientifique a pour mission de définir les priorités de R&D dans le secteur français des smart grids et d'éclairer les choix technologiques. Il constitue un forum où les acteurs concernés se rencontrent. Il recense l'ensemble des thèses sur les smart grids et décerne le prix de thèse annuel de l'association.

L'association a publié en début d'année la seconde édition de sa « Feuille de route R&D ». Celle-ci a pour ambition de permettre aux différents acteurs de la filière, industriels, centres de recherche et organismes de financement, de partager une vision commune des perspectives et des priorités. Elle vise à favoriser les coopérations et à orienter au mieux les ressources disponibles.

Un contexte marqué par des évolutions nombreuses et très rapides : il faut préparer la « seconde révolution de l'électrification »

Les systèmes et réseaux électriques jouent un rôle fondamental dans l'atteinte de l'objectif de décarbonation de l'Union européenne et font l'objet de transformations profondes et rapides. Ces changements portent sur les moyens de production, les usages de l'électricité, les technologies des composants du réseau, mais aussi sur la réglementation, les modèles d'affaires et les attentes sociétales. Et les nombreuses innovations dans les domaines du numérique et de la donnée amplifient les évolutions.

La feuille de route propose une organisation en huit axes des travaux à mener

En intégrant l'ensemble des conséquences des transformations en cours, la feuille de route R&D s'articule autour de huit axes :

- **Transition énergétique optimale** : il s'agit de développer des nouvelles méthodes de prévision des profils de charge tenant compte des nouveaux usages et de l'intelligence répartie, de quantifier les différents besoins en flexibilités, de transformer les méthodes de développement, de conduite et d'exploitation du réseau pour intégrer les flexibilités, de développer des solutions pour limiter les occurrences de surproduction et d'adapter le *market design* et la réglementation.

- **Compétitivité et efficacité** : l'objectif est d'optimiser les investissements et la gestion des actifs, de piloter au mieux le réseau, notamment avec la décentralisation de l'intelligence et la virtualisation, d'améliorer la relation clients et de permettre de nouveaux services en tirant parti du traitement de données massives, de l'IA et de l'IA-Gen.

- **Résilience du système** : des solutions innovantes sont nécessaires pour faire face à la complexité croissante du système, maîtriser les risques liés aux cyberattaques, prévoir les effets des événements climatiques extrêmes et adapter le réseau et ses composants à ces nouvelles contraintes.

- **Empreinte environnementale** : des travaux de R&D sont indispensables pour limiter le bilan carbone, minimiser la consommation de matière, intégrer la biodiversité et limiter l'artificialisation des sols. Ils devront permettre de développer des indicateurs environnementaux exploitables et pertinents.

- **Composants innovants** : l'objectif est de tirer parti des progrès de l'électronique de puissance, de concevoir les nouveaux composants nécessaires compte tenu de l'évolution du système électrique, y compris les composants pour les réseaux à courant continu, et d'intégrer les perspectives offertes par la supraconductivité.

- **Opportunités du digital** : il s'agit de développer des solutions innovantes permettant de traiter des quantités massives de données, de garantir leur qualité, de gérer l'accès aux données, de protéger la vie privée et garantir la souveraineté, de maîtriser les risques liés aux cyberattaques, de développer l'interopérabilité et de tirer parti des innovations télécom pour la gestion des réseaux électriques.

- **Usagers, territoires, gouvernance** : l'objectif est de contribuer à la définition et à la mise en œuvre des politiques publiques nationales et locales, de faciliter les actions de sobriété, d'intégrer la faisabilité sociotechnique dans la réalisation des nouveaux ouvrages de réseau, d'accompagner les consommateurs pour en faire des acteurs des évolutions du système et de contribuer à la conception d'un *market design* et de tarifs de réseaux efficaces, justes et incitatifs.

- **Solutions innovantes pour les pays en voie d'électrification, en reconstruction et ZNI** : des travaux de R&D doivent permettre d'intégrer des énergies renouvelables dans des proportions iné-

dites, d'assurer le maintien de la fréquence du système et de la tension dans un contexte de foisonnement limité, d'adapter les systèmes de protection du réseau à des territoires faiblement maillés, de planifier l'évolution de *micro-grids* décarbonés à coût réduit, dans des contextes d'ajout progressif des usages et de moyens de production, et de concevoir des composants et infrastructures *micro-grids* pérennes dans des contextes de difficile réparabilité. ■

Pierre Mallet, membre émérite SEE

➤ TST Bot : le robot qui révolutionne les travaux sous tension

Intervenir sur des lignes électriques du réseau de distribution 20 000 volts sans interrompre l'alimentation des clients est une activité à la fois indispensable et exigeante. Elle contribue à la disponibilité du réseau électrique opéré par Enedis (99,99 % de disponibilité) et nécessite un haut niveau de technicité. Pour accompagner ses techniciens et anticiper les enjeux de demain, Enedis développe un outil inédit : TST Bot, un robot téléopéré par des techniciens depuis le sol, capable d'effectuer des travaux sous tension (TST) sur le réseau aérien 20 000 volts.

TST Bot a été conçu pour réaliser les interventions les plus fréquentes dans les TST. Il s'agit d'opérations telles que la pose ou la dépose d'accessoires, ou encore la maintenance d'équipements de réseau. Doté d'une plateforme isolée installée sur un engin de levage et équipée de deux bras robotisés, il permet désormais aux techniciens de rester au sol tout en commandant les gestes nécessaires avec précision. Le robot peut couvrir près de la moitié de l'activité actuelle (plus de 30 000 chantiers par an), ce qui constitue une avancée majeure et positionne Enedis comme un précurseur au niveau international. En effet la complexité technique, en comparaison avec la robotisation d'un process industriel classique en usine, réside dans la possibilité d'utiliser une telle solution robotique en milieu extérieur, sur un réseau en hauteur et sous tension et sur des chantiers tous différents (accessibilité, type de terrain, type et hauteur du support, génération des matériels de réseau...).

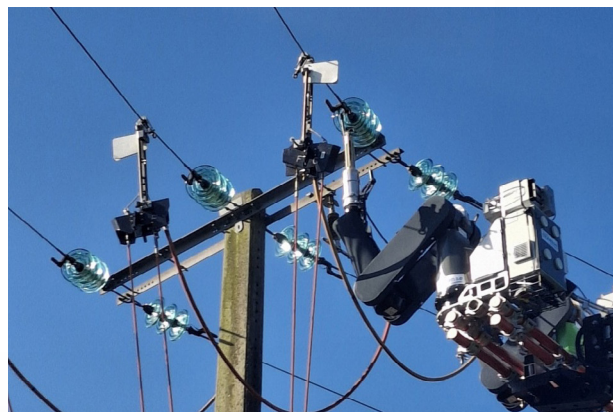
L'aventure commence en 2018, lorsque l'entreprise se fixe pour objectif d'améliorer l'ergonomie du travail et de renforcer la maîtrise des risques sur les chantiers TST. Une première preuve de concept confirme en 2021 qu'il est possible de manipuler des outils à distance grâce à des bras robotisés. Cette démonstration encourage Enedis à lancer en 2022 le développement d'un prototype plus abouti. Pour concevoir TST Bot, un travail collaboratif réunit opérateurs, encadrants,



■ Figure 1 : Réalisation d'un pontage » par TST-Bot sur un réseau 20 000 V.

experts techniques, ingénieurs en prévention, spécialistes en robotique ainsi que SERECT, le centre d'expertise des travaux sous tension français.

Sur le plan technique, TST Bot est constitué d'une nacelle araignée spécialement adaptée pour supporter en permanence le système robotique qui repose à l'extrémité du bras élévateur de la nacelle sur quatre tubes isolants pour garantir l'isolation électrique (figures 1 et 2). Ce système robotique est composé de deux bras robotisés à six axes pilotables jusqu'à quarante mètres de distance, un système de contrôle commande, des batteries, ainsi que plusieurs caméras embarquées. Pour éviter toute confusion lors de la manœuvre, les deux bras sont de couleurs différentes. Ils disposent chacun d'un préhenseur reproduisant fidèlement le mécanisme d'une perche à crochet (outil traditionnel pour les travaux sous tension) les rendant capables de manipuler les outils et matériels utilisés sur le réseau d'Enedis pour les TST.



■ Figure 2 : Pose d'un interrupteur provisoire par TST-Bot sur un réseau 20 000 V.

- La téléopération repose sur deux techniciens habilités à réaliser des TST, chacun équipé d'une télécommande sans fil attribuée à un bras. Les retours vidéo des quatre caméras embarquées leur permettent de suivre précisément l'intervention. Une troisième télécommande, destinée au responsable du chantier, donne accès à l'intégralité des flux vidéo et à la supervision de la mission. Cette organisation garantit une coordination fluide tout en conservant les principes fondamentaux d'un chantier TST.

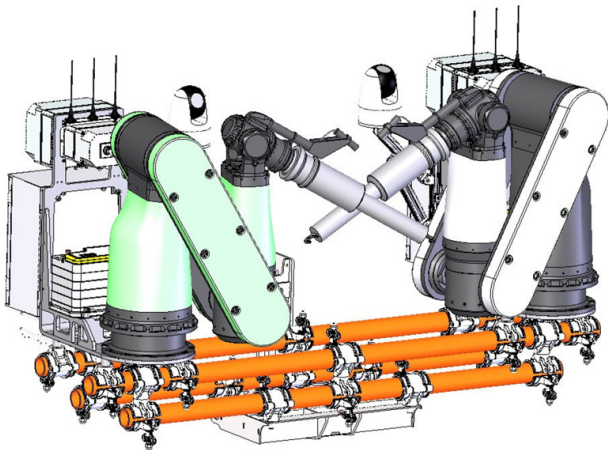


Figure 3 : Système robotique de TST-Bot.

Avant d'être déployée, le système robotique de TST Bot a été soumis à des essais stricts réalisés par le laboratoire de SERECT. Ces tests incluent la résistance aux arcs grêles, l'immunité au champ électrique et au champ magnétique, conditions indispensables pour garantir un fonctionnement à proximité immédiate de lignes sous tension.

TST Bot ouvre la voie à une nouvelle façon d'aborder les TST. Grâce à lui, les équipes pourront se concentrer davantage sur les opérations les plus complexes et à forte valeur ajoutée. Dans un contexte où les besoins augmentent avec la transition énergétique, et où les métiers techniques peinent à recruter, le robot constitue également un atout pour attirer de nouveaux profils, en introduisant des technologies avancées et en réduisant la pénibilité physique. Il représente également un progrès notable en matière de maîtrise des risques liés au travail en hauteur, à la proximité de pièces sous tension ou au port de charges.

Depuis début 2025 TST-Bot est expérimenté en conditions réelles. Plusieurs équipes TST d'Enedis, formées à son utilisation, testent le robot sur le réseau en exploitation. Les retours d'expérience – qu'il s'agisse de performance, d'ergonomie, d'acceptabilité ou de prévention – serviront de base à la décision d'industrialiser TST Bot prévue en 2026 pour un déploiement national. ■

Stanislas Iweins, Chef de projet, Direction technique d'Enedis

➤ Expérience de temps... négatif

La science classique rapportait l'évolution du temps de manière indépendante par rapport à toutes les autres variables. La structure de la mécanique classique montrait même une symétrie du temps dans son écoulement, cette symétrie s'est brisée avec la thermodynamique et avec l'apparition de l'irréversibilité du temps. Avec la relativité, la révolution scientifique du début de XX^{ème} siècle mit sur le même plan le temps et l'espace en les intégrant comme variables d'espace. La physique quantique, quelques années plus tard, fit intervenir une irréversibilité avec l'intervention de la mesure d'un observateur. Mais la causalité n'a pas été remise en cause par les théories modernes même si certaines interprétations des corrélations EPR font intervenir des rétro causalités passées et futures.

Le développement de nouvelles technologies, à partir de la deuxième révolution quantique dans les années 80, ont suscité de nombreuses expériences. Beaucoup de mesures sur des objets quantiques sont menées depuis, pour tenter de comprendre le comportement des objets quantiques tels que les photons lorsqu'ils sont en interaction avec d'autres photons ou avec des atomes de matière.

L'un des scénarios fondamentaux dans le domaine de l'interaction lumière-matière est la propagation de la lumière à travers un milieu diélectrique. Bien que ce phénomène ait été largement étudié et, à bien des égards parfaitement compris, il a provoqué des controverses dans des domaines spécifiques tels que la définition de la vitesse de propagation d'un signal électromagnétique et des mécanismes régissant le transport d'énergie dans les milieux dispersifs. Des expérimentateurs de l'université de Toronto ont commencé à travailler sur ces interactions depuis plusieurs années et ont publié en 2024¹ des résultats qui ont surpris les physiciens.

Ces expérimentations (voir figure 1) sont fondamentales pour l'optique non linéaire et pour des technologies telles que les mémoires quantiques.

L'expérience utilise l'effet Kerr qui est un phénomène de biréfringence créé dans un matériau par un champ électrique et qui se caractérise par deux indices de réfraction différents et a pour conséquence qu'un rayon lumineux peut être séparé en deux lorsqu'il entre dans le matériau. Cet effet sert à sonder le degré d'excitation atomique induit par un photon transmis à la fréquence de résonance de l'atome, en mesurant le déphasage d'un faisceau distinct qui est hors résonance. La différence des temps de propagation des deux faisceaux montre une différence qui est à l'origine du temps négatif.

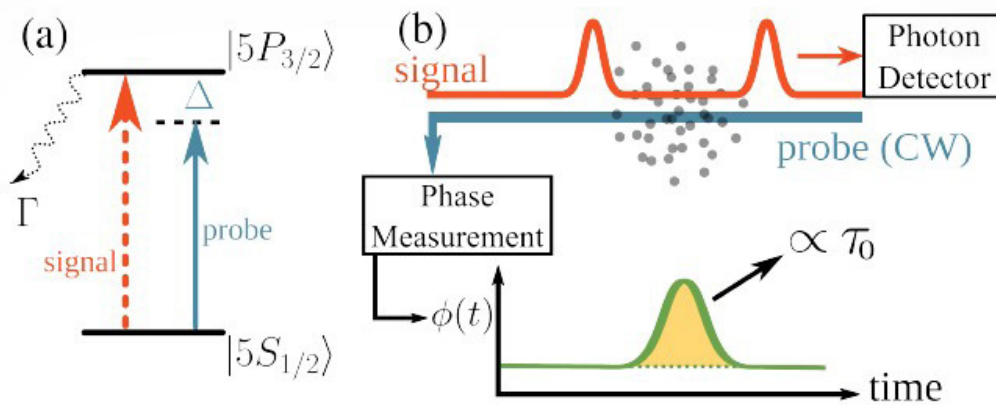


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental (a) à l'échelle atomique et (b) Schéma conceptuel de l'appareil expérimental : un faisceau pulsé résonant (signal) et un faisceau continu hors résonance (sonde) se propagent en sens inverse à travers un nuage d'atomes froids de rubidium, détectés de part et d'autre de l'appareil.

Ce temps supplémentaire passé sous forme d'excitation non liée à la propagation serait associé au retard de groupe. Bien que cette dépendance rende compte du comportement de l'indice de réfraction loin de la résonance, les chercheurs ne s'attendaient probablement pas à ce que cette association soit valable pour de faibles écarts de résonance, où le retard de groupe est connu pour devenir négatif ce qui signifierait que ce retard correspondrait à un retour dans le passé. Ainsi le concept de temps négatif, connu théoriquement depuis plusieurs années, avait soulevé à la fois une certaine fascination et beaucoup de scepticisme. En effet les physiciens avaient constaté que la lumière semblait sortir d'un matériau avant d'y être entrée. Cela était considéré comme un effet identique à une illusion d'optique liée à la déformation des ondes par la matière traversée.

Le groupe de Toronto qui effectuait des séries de mesures sur le temps d'excitation, constatait que, dans certains cas, un photon transmis passait presque autant de temps à exciter un atome que le photon incident moyen. Il faut savoir que quand les photons traversent les atomes certains sont absorbés et d'autres sont réémis. Ceux qui sont absorbés modifient l'état des atomes et des mesures récentes sur le changement d'état des atomes ont semblé mettre en évidence un temps négatif dans les interactions entre photons et atomes. Après ces premières constatations de temps négatif, il a fallu près de deux ans pour affiner ces mesures qui ont confirmé les premières constatations.

Cette expérience a été très critiquée par une physicienne allemande qui a indiqué que l'effet temps négatif était une illusion liée à la manière dont les photons traversent un milieu qui change leurs phases. Avec l'objectif de défendre la validité de leur expérience, les chercheurs de Toronto ont publié un article décrivant leurs expériences¹. Les résultats, obtenus pour différentes durées d'impulsions et de densités optiques, sont

cohérents avec la prédiction théorique récente qui stipule que la durée moyenne d'excitation atomique induite par un photon transmis correspond à l'intégrale temporelle du déphasage observé et est égale au retard de groupe subi par la lumière. Ces résultats suggèrent que les valeurs négatives mesurées entre le temps de propagation dans le matériau et celui de la sonde conduisent à une signification physique plus importante qu'on ne le pensait généralement.

Ainsi ce phénomène qui était prévu théoriquement mais se semblait pas réel a été mis en évidence de manière plus claire avec ces dernières expériences. Bien qu'il soit largement admis que le retard de groupe puisse prendre des valeurs négatives, elles sont associées à l'apparition du pic d'une impulsion à des instants qui peuvent indiquer des vitesses de groupe supraluminiques ou négatives. Cependant, il est admis généralement que cette grandeur ne correspond pas au temps passé réellement dans le milieu, mais simplement au moment où l'interférence est majoritairement constructive. Les observations montrent néanmoins que le retard de groupe est une grandeur physiquement significative. Il fournit non seulement la position du centre d'une impulsion transmise, mais décrit correctement l'amplitude et indique également l'existence d'un effet que les photons transmis ont sur les systèmes avec lesquels ils interagissent. Ce temps négatif mesuré requiert, selon le groupe de Toronto, d'autres expérimentations car l'interaction photon/matière est fondamentale pour les dispositifs employés dans le calcul quantique et pour l'informatique quantique lorsqu'on réalise des portes quantiques avec des qubits représentés par des photons. Ces expériences sont donc à suivre avec attention. ■

Marc Leconte, membre émérite SEE

¹ ANGULO, Daniela, THOMPSON, Kyle, NIXON, Vida-Michelle, et al. Experimental evidence that a photon can spend a negative amount of time in an atom cloud. arXiv preprint arXiv:2409.03680, 2024.