

Le projet ADEQUADE dans le cadre du Fonds européen de défense

Par Daniel DOLFI, Frédéric NGUYEN VAN DAU & Arnaud BRIGNON

Coordinateurs du projet ADEQUADE, Thales Research & Technology-France

Le projet ADEQUADE s'inscrit dans le cadre des ruptures technologiques soutenues par le Fonds européen de défense. Démarré fin 2022 pour s'achever en juin 2026, il rassemble une trentaine de partenaires, dans huit pays européens. Coordonné par Thales, il est co-piloté par les principaux acteurs européens de la défense que sont en particulier Leonardo, Diehl, Indra et TNO. Ce projet vise le développement de technologies quantiques pouvant apporter un surcroît de performances considérable à des systèmes de détection électromagnétiques ou de navigation « classiques ». Il ne s'agit pas, par exemple, de développer un radar quantique (dont la pertinence n'est d'ailleurs pas établie), mais bien plutôt de doter un radar, classique dans son principe de fonctionnement, de performances (sensibilité, résolution, couverture, ...) en rupture, grâce à la mise en œuvre de concepts issus de la physique quantique.

Le projet ADEQUADE¹ (Advanced, Disruptive and Emerging QUAntum technologies for DEFence) s'inscrit dans le cadre des ruptures technologiques soutenues par le Fonds européen de défense (FED). Démarré fin 2022 pour s'achever en juin 2026, il rassemble une trentaine de partenaires, dans huit pays européens (Figure 1). Coordonné par Thales, il est co-piloté par les principaux acteurs européens de la défense que sont en particulier Leonardo, Diehl, Indra et TNO.

Outre Thales, les principaux autres acteurs français du projet sont l'ONERA, Sorbonne Université, l'ENS Paris-Saclay, le CNRS, Safran, MBDA et Exail.

Ce projet vise le développement de technologies quantiques (QT) pouvant apporter un surcroît de performances considérable à des systèmes de détection électromagnétiques ou de navigation « classiques ». Il ne s'agit pas, par exemple, de développer un radar quantique (dont la pertinence n'est d'ailleurs pas établie), mais bien plutôt de doter un radar, classique dans son principe de fonctionnement, de performances (sensibilité, résolution, couverture, ...) en rupture, grâce à la mise en œuvre de concepts issus de la physique quantique. Plus précisément, le projet est articulé autour de trois domaines techniques :

- Positionnement, navigation et chronométrage (PNT : *positioning, navigation, and timing*).
- Détection radiofréquence quantique.
- Détection optronique quantique.

¹ <https://adequade.eu/>



Figure 1 : Le consortium ADEQUADE

Amélioration des systèmes de navigation et de synchronisation

Dans le domaine PNT, il est de plus en plus essentiel, pour les forces, de disposer de moyens de positionnement partagés, fiables et continus pour l'ensemble des plateformes (navires, avions, véhicules terrestres, drones, ...) et pour l'ensemble des systèmes déployés sur un théâtre opérationnel. Il s'agit de disposer de moyens de positionnement et de synchronisation de l'ensemble des plateformes, avec une précision bien meilleure que leur taille, sur la durée complète de leur mission. Des expériences de détection basées sur les technologies quantiques ont déjà démontré, en laboratoire, des performances supérieures à celles de leurs équivalents classiques. Dans ce domaine, cinq technologies quantiques sont identifiées : horloges atomiques haute performance, capteurs inertiels à base d'atomes froids, gravimétrie à base d'atomes froids, capteurs inertiels à fibre optique, et magnétomètre vectoriel quantique à état solide.

L'objectif central des horloges atomiques développées dans ADEQUADE est, d'une part, d'augmenter la fréquence de référence délivrée (de manière à améliorer la précision), et, d'autre part, de réduire au minimum l'accumulation d'erreurs dans le temps. Idéalement, les horloges atomiques optiques les plus performantes visent une instabilité fractionnaire de 10^{-18} à un jour, ce qui signifie que l'horloge ne gagnerait ou ne perdrait qu'une seconde d'erreur environ tous les 30 milliards d'années. Un défi important consiste à approcher cet objectif tout en respectant les critères de taille, poids et puissance (SWaP, pour *size, weight and power*) qui sont cruciaux pour leur intégration future dans les systèmes de défense. Ainsi, l'objectif du projet, grâce au recours à la photonique intégrée et à la technologie MEMS, est la réalisation d'une horloge atomique optique atteignant une stabilité de l'ordre de 10^{-13} dans un faible volume, à terme comparable à celui d'une micro-horloge radiofréquence cent fois moins stable.

Les capteurs inertiels à base d'atomes froids fonctionnent dans le cadre des unités de mesure inertielle (IMU, pour *inertial measurement unit*). Les IMU sont des dispositifs de navigation où l'erreur de position est proportionnelle aux erreurs de mesure d'accélération et de rotation : ces inexactitudes tendent à s'accroître au fil du temps pendant la navigation. Cet élément joue un rôle clé pour assurer une navigation intégralement inertielle, notamment dans des situations où il n'y a pas de support GNSS (*global navigation satellite system*). Pour réduire l'erreur de l'IMU, il faut réduire les erreurs de mesure d'accélération et de rotation. Les capteurs à atomes froids surpassent leurs homologues classiques pour ces mesures, atteignant une sensibilité remarquable de 500 nm.s^{-2} . $\text{Hz}^{-1/2}$ pour les accélérations et de $3 \cdot 10^{-8} \text{ rad.s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ pour les mesures de rotation, offrant ainsi une solution au problème de la dérive de position. Cependant, ces capteurs quantiques ont un volume de quelques centaines de litres, contre seulement quelques litres pour une IMU classique. Afin de réduire la taille des capteurs à atomes froids, ont été développés une puce atomique permettant le piégeage des atomes ainsi que des circuits photoniques intégrés pour la génération des faisceaux lasers nécessaires au refroidissement des atomes et à l'interrogation du capteur. Par ailleurs, la fréquence de mesure des capteurs à atomes froids reste faible (de l'ordre de quelques Hz), tandis que celle des capteurs inertiels classiques est très importante (typiquement quelques dizaines de kHz). Il serait donc avantageux de

développer un capteur atomique froid hybridé avec un capteur inertiel classique, pour obtenir une dérive minimale de position tout en maintenant une bande passante élevée et toujours en respectant les critères SWaP adaptés aux applications militaires.

La gravimétrie à base d'atomes froids est une technologie quantique innovante basée sur l'interférométrie d'atomes froids, reconnue comme la seule technologie actuellement disponible pour obtenir une mesure absolue de la pesanteur depuis un navire ou un avion. Toutefois, l'utilisation de cette technologie nécessite une grande plateforme gyro-stabilisée, ce qui empêche actuellement l'emploi de ces capteurs sur de petits porteurs. ADEQUADE propose d'étendre la plage de fonctionnement en rotation d'un accéléromètre à atomes froids, permettant ainsi d'effectuer des mesures de gravité sans nécessité de plateforme gyro-stabilisée, tout en explorant des méthodes avancées pour atteindre une précision sans précédent en gravimétrie embarquée. Une telle gravimétrie permet d'établir des cartes précises du champ de gravitation terrestre à partir desquelles il est envisageable de recalculer une IMU classique, encore une fois sans recours au GNSS.

Le gyroscope à fibre optique (FOG) représente une des technologies prédominantes utilisées dans les gyroscopes commerciaux haut de gamme, en particulier lorsque la compacité et la portabilité sont une priorité. Cependant, ces capteurs déduisent les accélérations et rotations à partir de mesures de phase optique : la meilleure précision de phase pouvant être atteinte avec des sources lumineuses classiques est limitée par la limite quantique standard (SQL pour *standard quantum limit*), exprimée comme $1/\sqrt{N}$ où N représente le nombre de photons utilisés dans la mesure interférométrique. Les technologies quantiques ont montré qu'il est possible de surpasser la SQL. ADEQUADE vise à démontrer comment la performance des capteurs à fibre peut être significativement améliorée grâce à l'utilisation de sources de paires de photons intriqués et des états comprimés de la lumière (*squeezing*).

Au même titre que la gravimétrie, la combinaison des mesures issues d'un magnétomètre avec les données de l'IMU peut améliorer les estimations de position et d'orientation d'une IMU autonome. Un des objectifs d'ADEQUADE est de démontrer la faisabilité de magnétomètres vectoriels quantiques compacts et intégrés, état solide, basés sur les centres NV (*nitrogen vacancy*) du diamant. Ils fonctionneront à température ambiante et pourront offrir des magnétomètres compacts et précis, permettant un géo-référencement magnétique périodique pour réduire l'accumulation des erreurs de position dans une IMU et atténuer le risque de brouillage GNSS (interférence intentionnelle de fréquence radio avec les signaux GNSS) ou de leurrage par l'émission de faux signaux GNSS pour tromper les récepteurs GNSS, entraînant des données incorrectes de position, navigation et chronométrage (*spoofing*).

Amélioration des systèmes de détection radiofréquence :

Le deuxième domaine applicatif pouvant bénéficier des technologies quantiques est celui du radar et de la guerre électronique (GE). L'objectif d'ADEQUADE est dans ce cas de les doter de capacités améliorées en termes de sensibilité, probabilité d'interception, plage dynamique et

couverture / agilité de fréquence. Dans tous ces scénarios, l'objectif est d'obtenir des gains d'au moins un ordre de grandeur pour soutenir la détection longue distance, l'identification et la classification des cibles « petites ». Le projet étudie deux axes principaux, celui des capteurs radiofréquence (RF) haute sensibilité et celui de l'intelligence électronique (ELINT pour *electronic intelligence*).

En ce qui concerne les capteurs RF, la détection quantique a le potentiel d'offrir une haute sensibilité, une grande plage dynamique et une large bande passante pouvant potentiellement surpasser le paradigme des antennes métalliques. ADEQUADE étudie trois types de capteurs quantiques spécifiques.

Le premier est fondé sur l'utilisation d'atomes de Rydberg : les atomes de Rydberg sont des atomes extrêmement excités, dans lesquels les électrons se trouvent à des niveaux d'énergie proches du seuil d'ionisation. Ainsi, les électrons de valence sont « très éloignés » du noyau, les rendant particulièrement sensibles aux champs électriques à détecter. Lorsque la fréquence RF est proche de la transition de Rydberg, ces capteurs permettent de sonder un champ RF avec une sensibilité jusqu'à quelques dizaines de $\mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$. Les capteurs RF Rydberg peuvent être beaucoup plus petits que les antennes actuelles, notamment à basses fréquences, et peuvent être fabriqués avec des matériaux diélectriques. Cette caractéristique est particulièrement attrayante dans la perspective de réaliser des antennes discrètes.

Le deuxième type est constitué par les filtres d'interférence quantique supraconducteurs (SQIF pour *superconductive quantum interference filter*) : une antenne SQIF détecte la composante magnétique du champ électromagnétique de manière non résonante grâce au phénomène de jonction Josephson (courant circulant entre deux supraconducteurs séparés par une fine barrière sans tension appliquée, grâce à l'effet tunnel cohérent des paires de Cooper à travers la barrière). Contrairement aux antennes traditionnelles dont la taille doit être proportionnelle à la longueur d'onde, les SQIF peuvent être considérés comme encore un nouveau type d'antenne ou de détecteur RF présentant une très large plage de détection dans un format très compact (quelques cm). Ceci est d'autant plus intéressant aux basses fréquences, où les antennes classiques peuvent être largement métriques ou décimétriques. Enfin, le troisième type est constitué par les magnétomètres pompés optiquement (OPM pour *optically pumped magnetometer*) : la modification de l'état quantique d'une vapeur d'atomes alcalins, dans une cellule de quelques cm^3 , éclairée au moyen de faisceaux laser, permet de mesurer le champ magnétique externe auquel cette vapeur est soumise. Les OPM sont très sensibles (de l'ordre du femtotesla), mais avec une faible bande passante (inférieure au 1 kHz) : ADEQUADE vise à étendre la plage fonctionnelle des OPM. Dans le domaine de la guerre électronique ou ELINT, l'apport principal des technologies quantiques étudiées dans le cadre d'ADEQUADE est de disposer d'une haute probabilité d'interception des signaux, sur un large spectre de fréquences, avec un taux de rafraîchissement et un couple sensibilité / dynamique élevé. Parmi les technologies quantiques candidates, ADEQUADE se concentre sur celle des centres NV dans le diamant². Ceux-ci permettent une analyse spectrale instantanée sur une large bande de fréquences (>10 GHz), tout en répondant aux critères SWaP et coûts nécessaires pour les applications embarquées.

Amélioration des systèmes de détection optronique :

Le troisième domaine technique étudié dans le cadre d'ADEQUADE est celui de la détection optronique dans lequel les technologies quantiques peuvent apporter des capacités améliorées en termes de sensibilité, portée, robustesse au bruit et résolution de l'imagerie, avec un impact direct sur les performances de détection, identification et poursuite des cibles difficiles, et celles des systèmes de surveillance et d'analyse de la situation tactique. Les technologies quantiques étudiées dans le projet contribuent d'une part aux systèmes actifs (constitué à la fois d'un détecteur et d'une source lumineuse pour illuminer artificiellement la cible ou la scène), et d'autre part aux systèmes passifs (détecteur sans source lumineuse propre).

Dans le contexte des systèmes actifs, ADEQUADE étudie deux principales technologies d'imagerie active : la QGI (*quantum ghost imaging*) et la QI (*quantum illumination*). Les deux utilisent comme sources des paires de photons corrélés, et exploitent les corrélations entre photons (signal et idler³) pour surmonter les limitations des systèmes d'imagerie standards et pour fonctionner avec des signaux très faibles (au niveau du comptage de photons), autorisant ainsi la réalisation de systèmes actifs discrets. La QGI utilise des photons corrélés pour créer une image d'un objet sans l'éclairer directement : le photon idler interagit avec l'objet, tandis que son photon signal corrélé est utilisé pour reconstruire l'image. L'avantage est la non-déteçtabilité : en QGI, les images sont réalisées avec un très faible nombre de photons, aléatoirement répartis dans le temps et l'espace, les rendant invisibles à un observateur externe. De plus, la QGI permet l'imagerie dans des environnements visuels dégradés, car la diffusion aléatoire d'un milieu de transmission comme la fumée ou le brouillard peut être filtrée. La QI, quant à elle, est utilisée pour la détection d'objets immergés dans le bruit de fond : le photon signal est utilisé pour illuminer la cible, alors que l'idler est conservé au récepteur. Si la cible est présente, le photon signal est réfléchi et interagit avec l'idler au récepteur. La QI pourrait réduire la probabilité de fausse alarme lors de la détection d'une cible de faible réflectivité, masquée par un bruit de fond important. De plus, la QI fonctionne comme un protocole d'illumination furtif grâce à sa faible puissance émise et assure une robustesse contre le brouillage par l'utilisation de corrélations quantiques. À noter que les sources non linéaires et les détecteurs développés dans ce cadre présentent une forte synergie avec ceux développés pour les communications quantiques.

Les systèmes passifs trouvent une application directe dans l'acquisition de cible, le contrôle de tir, la surveillance à partir de véhicules de combat et de navires : pour ces missions, les technologies classiques ont du mal à satisfaire les exigences en termes de détecteurs à très haute résolution, estimation rapide des paramètres à partir de ces images haute définition et détecteurs à faible bruit pour la détection longue distance. De plus, les systèmes traditionnels ne fournissent généralement pas d'images 3D. ADEQUADE étudie cinq types différents de technologies dans ce contexte : imagerie plénoptique corrélée, super-résolution par statistiques de photons, décomposition modale, conversion

³ Dans le phénomène non linéaire donnant naissance aux photons corrélés, un photon dit « pompe » donne naissance à deux photons, l'un arbitrairement dénommé « signal » et l'autre « idler ».

² https://fr.wikipedia.org/wiki/Centre_azote-lacune

de fréquence et détection cohérente. Les technologies quantiques proposées dans ce domaine sont encore prospectives. On donne donc ici uniquement un aperçu de leur principe de fonctionnement.

L'imagerie plénoptique standard est une technique permettant de détecter simultanément la distribution spatiale et la direction de propagation de la lumière dans une scène donnée. Cette approche est l'une des façons les plus simples de réaliser une imagerie 3D en une seule prise, mais elle est limitée par un compromis entre résolution spatiale et résolution angulaire. L'imagerie plénoptique corrélée (CPI pour *correlated plenoptic imaging*) utilise les propriétés de corrélation spatio-temporelle de la lumière pour séparer physiquement le processus de formation d'image de l'extraction des informations directionnelles. La CPI peut permettre la détection, la mesure de distance et le suivi de cibles, sans nécessité de balayer la scène tridimensionnelle ou d'utiliser des méthodes de triangulation.

La super-résolution par statistiques de photons est une technique qui améliore la résolution d'un système d'imagerie en exploitant les propriétés statistiques des photons, notamment leur corrélation et distribution. Un des avantages potentiels de cette technologie est la possibilité de dépasser la limite de diffraction qui gêne la résolution des systèmes optiques classiques.

La décomposition modale est une technique utilisée pour analyser les propriétés de la lumière en la décomposant en ses modes constitutifs. L'analyse des modes spatiaux devrait apporter des informations sur une scène, qui seraient autrement difficiles à obtenir. Une autre direction d'innovation se situe dans l'étude d'analyses modales dédiées pour récupérer des informations spatiales en conditions de faible illumination.

La conversion de fréquence est une technologie quantique visant à améliorer la détection passive des longueurs d'onde du moyen infrarouge (MIR). Actuellement, cette détection est limitée par l'absence de photodétecteurs haute sensibilité et haute vitesse fonctionnant à température ambiante. La conversion de fréquence devrait accroître la sensibilité de l'imagerie dans le MIR en convertissant cette lumière vers une fréquence plus haute (longueur d'onde plus courte) *via* des processus non linéaires.

Enfin, la détection cohérente est une technique utilisée pour renforcer la sensibilité des détecteurs optiques en mélangeant un signal lumineux entrant avec un signal de référence local (oscillateur local), décalé en fréquence. Dans cette configuration, le rapport signal / bruit est amélioré, en particulier pour traiter des signaux optiques très faibles.

Outre les développements technologiques brièvement présentés dans cet article, le projet ADEQUADE s'attache également à une analyse des gains de performance envisageables, pour de futurs systèmes mettant en œuvre ces concepts fondés sur la physique quantique, ainsi que les efforts d'ingénierie à faire pour en garantir la mise en œuvre effective.

Remerciements :

This project has received funding from the European Defence Fund (EDF) under grant agreement 101103417 EDF-2021-DIS-RDIS-ADEQUADE".

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the authors only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.