



**AMBASSADE
DE FRANCE
EN ALLEMAGNE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Service pour la Science et la Technologie

Technologies Quantiques

Stratégie et Recherche en Allemagne

Rapport rédigé par :

Lisa LACROIX

Chargée de mission scientifique - Politique de recherche et d'innovation / Technologies numériques

Publication : février 2021

Table des matières

TABLE DES MATIERES	2
INTRODUCTION	4
LA POLITIQUE ALLEMANDE DE SOUTIEN À LA RECHERCHE SUR LE QUANTIQUE	6
I. La stratégie quantique allemande	6
A. Éléments de contexte	6
B. Mesures principales	6
C. Pilotage	7
D. Plan de relance : 2 milliards d’euros et une « feuille de route »	7
E. Projets en cours	8
F. Projets de recherches impliquant des partenaires franco-allemands	12
II. Les spécificités du contexte allemand : le rôle des Länder	14
PRINCIPAUX ACTEURS DE LA RECHERCHE ALLEMANDE EN QUANTIQUE	16
I. Les instituts de recherche	16
A. Communauté des centres de recherche Helmholtz	16
B. Société Max-Planck	21
C. Communauté de centres de recherche Leibniz	26
D. Société Fraunhofer	29
E. L’Office national de métrologie (PTB)	36
F. L’Office fédéral allemand pour la sécurité de l’information (BSI)	38
II. La recherche universitaire	38
A. Les clusters d’excellence	38
B. Universités	40
III. Acteurs privés	43
CARACTERISTIQUES DU PAYSAGE DE LA RECHERCHE ALLEMANDE	44
I. Positionnement de la recherche	44
II. Domaines de compétences	44
A. Détection, imagerie et métrologie	44

B.	Communication et cryptographie	46
C.	Informatique	46
D.	Simulateur	47
POSITIONNEMENT INTERNATIONAL		49
I.	Financements européens	49
II.	Comparaisons internationales	49

INTRODUCTION

Les applications des technologies quantiques sont multiples, bien qu'aujourd'hui principalement cantonnées au domaine militaire, notamment le cryptage des données et la navigation. Ces technologies peuvent cependant avoir des applications dans les domaines de l'intelligence artificielle (accélération de l'apprentissage à partir de modèles différentiels complexes), du médical (amélioration du contrôle des prothèses, amélioration de l'imagerie), de la finance (traitement des informations boursières), de la chimie (création de nouveaux engrais), des sciences des matériaux ou dans le secteur automobile. La maîtrise de ces technologies représente ainsi un enjeu industriel et économique de taille.

L'intérêt des pouvoirs publics allemands pour les technologies quantiques, qui font l'objet d'une stratégie du gouvernement fédéral depuis 2018¹, s'est accentué depuis l'annonce faite par Google en 2019 de la création d'un ordinateur permettant d'atteindre la « suprématie quantique ». Depuis, l'Allemagne a entrepris des tractations avec le géant américain IBM afin d'accueillir en 2021 **le premier ordinateur quantique hors du sol américain sur son territoire**.² L'intérêt de la **chancelière allemande, dont le doctorat porte sur la chimie quantique**, pour ce dossier, ainsi que celui de ministres-présidents de Länder notamment la Bavière et la Rhénanie-du-Nord-Westphalie, donne aujourd'hui un véritable élan au développement d'une stratégie ambitieuse. **L'Allemagne se distingue ainsi aujourd'hui comme l'un des plus grand soutien à la recherche en informatique quantique en Europe**. En juillet 2020, la ministre fédérale de la recherche, Anja KARLICHEK, a ainsi annoncé que **2 milliards d'euros du fonds de relance COVID-19 du pays seraient consacrés à la recherche en technologies quantiques**,³ avec pour objectif de **développer deux ordinateurs quantiques « Made in Germany »**. Ce financement fédéral s'ajoute aux 650 millions d'euros déjà dédiés par le gouvernement jusqu'en 2022. **Entre 2018 et 2019 près de 1,2 milliard d'euros (fonds européens inclus)** ont été consacrés à la recherche quantique outre-Rhin.

L'Allemagne s'est clairement lancée dans la course mondiale à laquelle on assiste actuellement. **Forte d'une longue tradition de recherche en physique quantique**, l'Allemagne compte aujourd'hui sur son sol **85 parmi les 457 groupes de travaux existant en Europe**.⁴ Le pays a également multiplié, ces

¹ BMBF, « Quantentechnologien - von den Grundlagen zum Markt », https://www.bmbf.de/upload_filestore/pub/Quantentechnologien.pdf

² Fraunhofer-Gesellschaft, « Fraunhofer und IBM bringen Quantenrechner für Industrie und Forschung nach Deutschland », <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2020/maerz/fraunhofer-und-ibm-bringen-quantenrechner-fuer-industrie-und-forschung-nach-deutschland.html>

³ Point 44 du plan de relance fédéral (Konjunkturpaket)

⁴ BMBF, « Quantenzone », https://www.bmbf.de/files/Quantentechnologie_1.pdf

dernières années, les initiatives d'excellence et coopérations entre universités et centres de recherche extra-universitaires, comme le centre pour la science quantique intégrée et de la technologie (IQST) de l'Université de Stuttgart, le centre Fraunhofer pour l'informatique quantique, le centre quantique Helmholtz (HQC) et le cluster d'excellence pour les sciences et technologies quantiques de Munich (MCQST).

Le ministère fédéral de l'éducation et de la recherche (BMBF) s'est désormais fixé pour objectif de faire en sorte que l'Allemagne devienne « compétitive dans toute la technologie de l'informatique quantique d'ici 2025 » avec un **objectif précis** : « la production de puces quantiques « made in Germany » d'ici 5 ans ».

Ce dossier présente une cartographie des acteurs et des politiques mises en place par l'Allemagne dans le but de développer des technologies quantiques. Il n'a pas vocation à être exhaustif mais plutôt à identifier les grands pôles de recherche et tendances politiques autour des technologies en quantiques en Allemagne. Il reprend, pour une large part, trois rapports publiés par des instituts allemands : L'académie allemande des sciences et de la technologie (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften - ACATECH)⁵, la Société Fraunhofer⁶ et le Bundestag⁷, entre 2018 et 2020.

⁵ ACATECH, « Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation », <https://www.acatech.de/publikation/innovationspotenziale-der-quantentechnologien/>

⁶ Fraunhofer Gesellschaft, « quantum machine learning eine Analyse zu Kompetenz, Forschung und Anwendung », https://newsletter.fraunhofer.de/public/a_14338_S4Jdz/file/data/1847_Fraunhofer_BIG_DATA_AI-Studie-QML_web.pdf

⁷ Bundestag, « Rahmenprogramm Quantentechnologien - von den Grundlagen zum Markt », <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/046/1904645.pdf>

LA POLITIQUE ALLEMANDE DE SOUTIEN À LA RECHERCHE SUR LE QUANTIQUE

I. La stratégie quantique allemande

A. Éléments de contexte

En 2018, l'Allemagne a mis en place une stratégie nationale quantique, portée par le ministère pour l'éducation et la recherche (BMBF) et dotée d'un budget de **650 millions d'euros sur 4 ans**. Contrairement aux autres grandes puissances ayant adopté de tels plans (États-Unis, Chine, Royaume-Uni...), **l'Allemagne a choisi de mettre l'accent sur le développement de cette technique avec une visée industrielle et au service de l'économie**. En dehors des fonds destinés à la recherche, ce plan national prévoit ainsi le financement de projets pilotés par des entreprises dans les domaines médicaux (projet BrainQSens), optique (projet Opticlock) et spatiaux (projet QUBE). Le gouvernement fédéral souhaite également renforcer les coopérations internationales entre centres de recherche, notamment, pour ce qui est de la France, avec le laboratoire national de métrologie d'essais (LNE) et le laboratoire de référence temps Espace (SYRTE) en France. Le CEA Grenoble est également cité comme un partenaire intéressant en raison de sa participation, aux côtés de laboratoires Helmholtz, au « EU Flagship Projet » dédié au quantique.

B. Mesures principales

Le document stratégique commence par un état des lieux du domaine en Allemagne, faisant le constat d'une excellente recherche fondamentale et d'une grande expertise dans ce domaine. Outre une coordination des actions des quatre ministères concernés (voir I. C.), la stratégie a pour objectif le transfert des connaissances vers des applications basées sur les nouvelles technologies quantiques. Elle décline pour cela différentes mesures :

- Renforcer la recherche fondamentale dans ce domaine tout en ouvrant la voie vers les applications ;
- Etablir une cartographie des acteurs et mettre en place des réseaux et projets de recherche collaborative comprenant les acteurs académiques et les industriels pour faire émerger de nouvelles opportunités économiques ainsi que de nouveaux marchés ;
- Mettre en place deux projets-phare à forte visibilité afin de démontrer les opportunités pour les entreprises, l'un dans le domaine de la communication quantique et l'autre dans le domaine des ordinateurs quantiques ;
- Garantir la sécurité et la souveraineté technologique de l'Allemagne (essentiellement dans le domaine spatial et de la cybersécurité) ;

- Développer la coopération européenne et internationale ;
- Informer les citoyens en Allemagne et les accompagner sur le chemin de cette transformation technologique.

L'élaboration de la stratégie a ainsi permis d'identifier quatre domaines de recherche prometteurs :

- L'ordinateur quantique ;
- Les communications quantiques ;
- Les mesures et capteurs basés sur les propriétés quantiques ;
- L'accompagnement technologique dans le développement des systèmes quantiques.

C. Pilotage

La stratégie quantique allemande est pilotée par quatre ministères fédéraux, en premier lieu le ministère de l'Education et de la Recherche (**BMBF**), qui s'est vu attribué le rôle de chef de file. Les trois autres ministres concernés par ce domaine (**Défense - BMVg, Intérieur - BMI, Economie - BMWi**) se voient attribuer des compétences relatives à leurs domaines respectifs. La coordination des actions passe par la tenue régulière de réunions interministérielles. Les questions liées au transfert de technologie seront gérées par le BMWi dans le cadre de son programme « Transferinitiative ».

Le financement de la recherche universitaire dans ce domaine passe par la **DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft - agence publique de moyens pour la recherche universitaire)**. En 2018, elle y a consacré 52,9 millions d'euros à travers le financement de centres de recherche coordonnée (SFB), de programmes de recherche prioritaires (SPP), de groupes de recherche, de collèges doctoraux (GK) et de clusters d'excellence.

D'un point de vue du paysage institutionnel, **la société Fraunhofer aura pour mission de créer une communauté de chercheurs, de développeurs, d'informaticiens et d'industriels**. Le gouvernement investira également dans la mise en place de clusters et la création d'un centre d'excellence pour la technologie au sein de l'institut national métrologique allemand. **Le centre de recherche aéronautique et spatiale allemand (DLR) devrait se voir attribué un rôle renforcé dans le développement de l'utilisation de la technique quantique par satellite.**

La contribution des industriels n'est pas spécifiée / prévue à ce stade dans la stratégie.

D. Plan de relance : 2 milliards d'euros et une « feuille de route »

Dans le cadre du plan de relance allemand (juin 2020) faisant suite à la crise du COVID-19, il est prévu que **2 milliards d'euros soient fléchés vers la recherche en technologie quantique, dont 400 millions pour la construction de deux ordinateurs**. A l'heure actuelle, les projets précis vers lesquelles ces

fonds seront dirigés ne sont pas encore connus. **Le gouvernement allemand a mis en place un groupe d'experts composé de 16 membres issus du monde scientifique et industriel afin de proposer une « feuille de route »**. Ce groupe d'experts, présidé par Stefan Filipp, professeur à l'université technique de Munich (TU Munich), et Peter Leibinger, vice-président de la direction du groupe Trumpf a rendu ses propositions le 9 décembre 2020.⁸ Celles-ci portent sur la création de nouvelles structures et procédures d'attribution avec la « mise en place immédiate et compétitive de plateformes et de réseaux de compétences » et la création d'une organisation interrégionale, l'Association quantique allemande (Deutschen Quantengemeinschaft - DQG, dont l'objectif serait de coordonner les différents acteurs impliqués.

Les premiers appels d'offre pour les hubs et les réseaux de compétences devraient être lancés au cours du premier trimestre 2021.

E. Projets en cours

En 2017, le BMBF a lancé trois projets pilotes devant renforcer la collaboration entre science et industrie :

BrainQSens⁹

Ce projet vise au **développement d'un démonstrateur de capteur quantique à base de diamant**. Ce capteur sera capable de mesurer avec précision les champs magnétiques n—nal. Disposant d'un financement de **2,8 millions d'euros (dont 80% provient du BMBF)**, il implique l'institut de physique de l'Université de Stuttgart, l'entreprise Robert Bosch (site de Renningen), l'institut de physique, de mathématique et d'informatique de l'Université Johannes Gutenberg de Mayence et l'institut l'optique quantique de l'université d'Ulm.

Opticlock¹⁰

Ce projet vise au **développement d'une horloge optique compacte** et robuste pour la synchronisation des grands réseaux de communication. **Financé à hauteur de 6 millions d'euros (dont 75% provient du BMBF)**, il implique les entreprises Toptica Photonics (site de Gräfelfing), Menlo Systems (site de

⁸ Bundesregierung, «Roadmap Quantencomputing» <https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Roadmap-Quantencomputing-bf-C1.pdf>

⁹ BMBF, « BrainQSens », <https://www.quantentechnologien.de/forschung/foerderung/pilotprojekte-quantentechnologien/brainsens.html>

¹⁰ BMBF, « Opticlock », <https://www.opticlock.de/info/>

Planegg), HighFinesse Laser and Electronic Systems (site de Tübingen), Qubig (site de Munich), VACOM Vakuum Komponenten & Messtechnik (site de Großlobbichau), l'office national de métrologie (PTB), l'institut Leibniz Ferdinand-Braun et le département de physique de l'Université de Siegen.

QUBE¹¹

Le projet « Quantum Key Distribution with Cube-Sat » (QUBE) a pour objectif le **développement de matériel de communication sécurisé** intégrant la technologie de distribution quantique de clé dans des nanosatellites (CubeSat). Financé à hauteur de **3,12 millions d'euros (dont 97% provient du BMBF)**, il implique le centre de compétence Galileo d'Oberpfaffenhofen (DLR), l'institut Max-Planck de physique de la lumière d'Erlangen, le centre pour la télématique de Wurtzbourg et l'entreprise OHB System (site d'Oberpfaffenhofen).

Fin 2020, le BMBF recense une cinquantaine de projets financés dans le cadre de plusieurs campagnes d'appels d'offre entre 2017 et 2019.

En dehors de ces projets financés via les appels d'offre du BMBF, on retrouve **une dizaine de projets d'envergure** développés en partenariat avec le gouvernement fédéral, au sein des instituts de recherche ou financé via l'Union européenne :

QuNET¹²

En novembre 2019, le BMBF a lancé le projet pilote QuNET sur la communication quantique mené par la société Fraunhofer, la société Max Planck et le DLR. L'initiative a pour objectif **d'établir un réseau quantique de communication de données**. Cela doit être un premier pas vers la sécurisation des données numériques. QuNET sera utilisé par les organismes fédéraux. Dans un premier temps, les scientifiques ont pour mission de **construire un réseau entre les différentes institutions du gouvernement afin d'établir une communication sécurisée et non manipulée**. La deuxième phase du projet sera d'intégrer ce réseau aux différentes initiatives européennes afin d'en faire un partenariat européen. Des sites de tests seront implantés en Bavière, en Saxe et en Thuringe.

¹¹ DLR, « QUBE », https://www.dlr.de/kn/en/desktopdefault.aspx/tabid-4307/6939_read-51752/admin-1/

¹² BMBF, « BMBF-Initiative QuNET baut hochsicheres Quantennetzwerk », <https://www.bmbf.de/de/bmbf-initiative-quenet-baut-hochsicheres-quantennetzwerk-10126.html>

PlanQK¹³

Soutenu par le BMWi, l'objectif du projet PlanQK est de **développer une plate-forme pour l'intelligence artificielle (IA)**. La plate-forme devrait contribuer à la **création et à la promotion d'un écosystème, composé de spécialistes de l'IA, de l'informatique quantique**, de développeurs, d'utilisateurs, de clients, de prestataires de services et de consultants. La plate-forme PlanQK fournit la base technique pour la **construction d'une communauté pour l'intelligence artificielle assistée par technologie quantique**. La plateforme PlanQK est gérée par des institutions scientifiques partenaires, qui travaillent ensemble à des solutions dans trois domaines d'application de l'IA que sont : « la prévision et la classification », « la maintenance et la détection » et « la planification et l'optimisation ».

OpenSuperQ¹⁴

Le but de ce projet de l'UE est de **concevoir, construire et tester un ordinateur quantique** qui contiendrait jusqu'à 100 qubits utilisables et serait disponible pour les utilisateurs selon un modèle cloud accessible. **Le projet implique le centre de recherche de Jülich.**

JUNIQ¹⁵

Avec JUNIQ, le centre de recherche de Jülich **exploite le premier ordinateur quantique sur le sol européen, hors d'un laboratoire. Il s'agit d'un ordinateur quantique adiabatique de D-WAVE.**

QUEST¹⁶

Lancé en septembre 2019, ce projet s'inscrit dans le cadre du cluster d'excellence « Matter and Light for Quantum Computing » (ML4Q) et a pour but de **développer des architectures dans lesquelles les ordinateurs quantiques tolèrent des pannes et peuvent être mis en réseau. Financé dans le cadre de la stratégie d'excellence allemande**, ce projet implique l'université de Cologne, l'Université Rheinische Friedrich-Wilhelms de Bonn, le centre de recherche de Jülich, les chaires de génie des lasers LLT et de génie des systèmes optiques TOS de l'université RWTH d'Aix-la-Chapelle.

¹³ BMBF, « PlanQK », <https://planqk.de/en/>

¹⁴ Union européenne, « OpenSuperQ », <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/content/opensuperq-quantum-computer-based-superconducting-integrated-circuits>

¹⁵ Centre de compétence de Jülich, « Startschuss für JUNIQ », <https://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/UK/DE/2019/2019-10-25-juniq.html>

¹⁶ Fraunhofer-Gesellschaft ILT, « Projekt Quest », <https://www.ilt.fraunhofer.de/de/technologiefelder/quantentechnologie.html#1756853473>

QRANGE¹⁷

Lancé en 2018, le projet QORANGE s'intéresse aux dispositifs de génération de nombres aléatoires quantiques (QRNG) en développant trois prototypes différents permettant de rendre cette technologies moins chers, plus rapides et plus sûrs que les dispositifs existants. Le projet dispose d'un budget de **3,2 millions d'euros** et fait partie des projets sélectionnés dans le cadre du **projet européen « Quantum Flagship »**. **L'industriel allemand BOSCH est partie prenante du projet.**

UNIQORN¹⁸

Via des composants optimisés pour les applications quantiques, le projet UNIQORN vise à transformer des **systèmes d'optique quantique entiers en systèmes sur puce (SoC)**, conduisant à des **solutions hautement miniaturisées** pour une intégration plus poussée au niveau système et réseau. Ce projet a obtenu un financement Horizon 2020. **L'Université de Paderborn, l'institut Fraunhofer HHI et l'entreprise VPIphotonisc GmbH** participent au projet.

MetaboliQs¹⁹

L'objectif du projet MetaboliQs est d'exploiter la dynamique quantique du diamant à température ambiante pour permettre une imagerie cardiaque multimodale sûre pouvant aider à mieux **diagnostiquer les maladies cardiovasculaires**. Le projet dispose d'un financement de 6 millions d'euros et fait partie de l'initiative européenne **« Quantum Flagship »**. L'Université TU Munich, l'institut Fraunhofer IAF et l'entreprise NVISION Imaging Technologies (Ulm) participent au projet.

S2QUIP²⁰

Le projet S2QUIP (Scalable Two-Dimensional Quantum Integrated Photonics) vise à développer des microsystèmes hybrides photoniques quantiques évolutifs et rentables sur puce en intégrant des matériaux semi-conducteurs bidimensionnels (2DSM) dans des circuits nanophotoniques de pointe compatibles CMOS. Le projet fait partie de l'initiative européenne **« Quantum Flagship »**. **L'université TU Munich et l'entreprise Laser Quantum (Munich)** participent au projet.

¹⁷ QRANGE, « About QRANGE », <https://qrangle.eu/>

¹⁸ UNIQORN, « mission », <https://quantum-unigorn.eu/home/technology-lines/security-verification-analysis/>

¹⁹ MetaboliQs, « Home », <http://www.metaboligs.eu/>

²⁰ S2QUIP, « Home », <https://www.s2quip.eu/index.php>

F. Projets de recherches impliquant des partenaires franco-allemands

On dénombre actuellement 10 projets de recherche associant des équipes de recherche et/ou industriels franco-allemands

Nom du projet	Descriptif	Partenaire français	Partenaire allemand
CiViQ	Le projet a pour objectif de développer des services de sécurité améliorés sur le plan quantique et pouvant être combinés avec des techniques cryptographiques modernes (technologie QKD).	CNRS LIP6 Sorbonne Université Institut d'optique de Palaiseau INRIA Telecom Paris Tech Orange Lab Lannion	Fraunhofer HHI Institut Max-Planck de physique de la lumière (MLP) Deutsche Telekom Coriant
Quantum Internet Alliance	Le projet QIA vise à développer un Internet quantique permettant des applications de communication quantique entre deux points quelconques sur Terre.	CNRS : UPMC, IRIF, LIP6 Sorbonne Université VERIQLOUD Muquans MYCRYO	Institut Max-Planck pour la physique des microstructures (MPI) Université de Stuttgart TOPTICA Swabian instruments SAP
Qombs	L'objectif de ce projet est de développer une plate-forme quantique permettant de concevoir et de réaliser une nouvelle génération de peignes de fréquence laser à cascade quantique.	CNRS Thales	TU Munich MenloSystems
PASQuaS	L'objectif de ce projet est de créer un environnement dans lequel les atomes froids peuvent être simulés. La simulation peut alors également être utilisée pour générer des qubits supraconducteurs	CNRS : Laboratoire Kastler Brossel, Institut d'optique théorique et appliquée Atos Muquans MYCRYOFIRM ALS Azur Light BULL SAS	Institut Max Planck d'optique quantique FU Berlin Centre de recherche Jülich Université d'Heidelberg TOPTICA

macQsimal	L'objectif de ce projet est de concevoir, développer, miniaturiser et intégrer des capteurs quantiques d'une sensibilité exceptionnelle, afin de mesurer les éléments physiques observables dans cinq domaines clés : les champs magnétiques, le temps, la rotation, le rayonnement électromagnétique et la concentration de gaz.	CNRS : Laboratoire Kastler Brossel	Université de Stuttgart Bosch
ASTERIQS	Ce projet concerne principalement la technologie des capteurs quantiques sur une base optique, en cherchant l'adéquation des diamants dopés comme capteurs quantiques.	CNRS ENS Paris Saclay, Thales (coordinateur)	Université d'Ulm Universität de Stuttgart Université de la Sarre Université de Mayence TTI-Technologie-Transfer-Initiative (incubateur de start-up de l'Université de Stuttgart) Fraunhofer IAF Bosch, NVISION
AQTI ON	L'objectif est de développer et exploiter un ordinateur quantique robuste et compact à piège à ions, basé sur un matériel quantique évolutif et des normes industrielles.	Atos AKKA Digital	Universität de Mayence Fraunhofer IOF TOPTICA
QMICS	L'objectif de ce projet est de mettre en place un câble de réseau local à micro-ondes quantiques sur une distance de plusieurs mètres. Cette architecture doit permettre la mise en place de protocoles de communication quantiques.	CNRS ENS Lyon	Walther-Meißner pour la recherche sur les basses températures
SQUARE	Le projet vise à établir une nouvelle plate-forme pour l'informatique quantique, les réseaux et les communications quantiques	CNRS Institut de Recherche de Chimie de Paris Thales	KIT Université de Stuttgart attocube
PhoQuS	Ce projet vise à développer une nouvelle plate-forme pour la simulation quantique, basée sur les fluides quantiques photoniques.	CNRS Sorbonne Université Université de Paris	Université Rhénane Frédéric-Guillaume de Bonn

II. Les spécificités du contexte allemand : le rôle des Länder

En parallèle des programmes de financement du gouvernement fédéral s'ajoutent, dans une plus faible mesure, des financements des organismes de recherche publics dont les budgets proviennent des Länder (NB : la répartition du financement entre l'État fédéral et les Länder varie d'un organisme de recherche à l'autre : contribution des Länder à hauteur de 10% du budget institutionnel pour les centres Helmholtz, 48% pour les instituts Max-Planck, 16% pour les instituts Fraunhofer, 48% pour les instituts Leibniz).

Par ailleurs et indépendamment de la stratégie du gouvernement, les Länder peuvent financer des projets de recherche au niveau régional.

L'intérêt des Länder pour les technologies quantiques n'est cependant pas encore très développé. Trois régions allemandes semblent cependant se lancer dans la course aux technologies quantiques : La Bavière, le Bade-Wurtemberg et la Rhénanie-du-Nord-Westphalie (NRW).

Bavière²¹

Indépendamment de la stratégie fédérale, la Bavière finance, dans le cadre du High Tech Agenda, les technologies quantiques à hauteur de **300 millions d'euros (budget initial de 72 millions d'euros, porté à 120 millions en septembre 2020 puis 300 millions en 2021)** afin de renforcer son projet de « Munich Quantum Valley ». Ces financements seront destinés à financer les propositions conjointes de l'Académie bavaroise des sciences, de la Société Fraunhofer, de l'Université Ludwig-Maximilian de Munich, de la Société Max Planck et de l'université technique de Munich portant, notamment, sur la création d'un centre d'informatique et de technologies quantiques (ZQQ).

Bade Wurtemberg²²

En avril 2019, le Land du Bade-Wurtemberg a annoncé son soutien à un projet de consortium entre différents instituts Fraunhofer basés à Fribourg-en-Brisgau à hauteur de **5 millions d'euros**. En mars 2020, le Land a annoncé un plan de soutien à la recherche quantique de **40 millions d'euros**. Cette

²¹ Fraunhofer-Gesellschaft, « Das Munich Quantum Valley - ein Sprung für Quantenwissenschaft und -technologie », <https://www.mpg.de/16243526/munich-quantum-valley>

²² Land Bade-Wurtemberg, « Land fördert anwendungs-orientierte Forschung zu Quantencomputing », <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/land-foerdert-anwendungs-orientierte-forschung-zu-quantencomputing/>

somme sera dédiée au financement de la création du « Centre de compétence en informatique quantique du Bade-Wurtemberg » devant accueillir l'ordinateur quantique d'IBM.

Le 7 janvier 2021, le Bade-Wurtemberg a annoncé un financement supplémentaire **de 19 millions d'euros** destinés à financer six groupes de recherches portés par des instituts Fraunhofer et/ou DLR et impliquant des universités du Land.²³

Rhénanie-du-Nord-Westphalie²⁴

Avec 11 centres de recherches sur son territoire, la Rhénanie-du-Nord-Westphalie est l'un des Länder les plus impliqués dans la recherche quantique. Sans stratégie dédiée, le Land a annoncé deux financements conséquents l'année dernière : le premier pour la construction du centre de compétence de Jülich (environ 25 millions d'euros) et plus récemment pour la création d'un laboratoire des systèmes photoniques quantiques (PhoQS Lab) au sein de l'Université de Paderborn (environ 30 millions d'euros).

Basse-Saxe

Officiellement créé le 1 janvier 2021 la "Quantum Valley Lower Saxony" regroupera l'université Leibniz de Hanovre, l'université technique de Braunschweig, l'office national de métrologie (PTB), l'institut Albert Einstein (Max Planck), l'institut de géodésie satellitaire et de technologie des capteurs inertiels du DLR et l'entreprise de technologie médicale Sartorius AG avec pour objectif de développer un ordinateur quantique basé sur la technologie des pièges à ions d'ici à 2025. Le consortium espère obtenir des financements dans le cadre du plan de relance allemand. Le Land, en partenariat avec la fondation Volkswagen a annoncé un financement de **25 millions d'euros** pour ce projet dont 9 millions d'euros dès l'année 2021. La Basse-Saxe estime à 220 millions d'euros son investissement dans les technologies quantiques ces dix dernières années.²⁵

²³ Land Bade-Wurtemberg, «19 Millionen Euro für Forschungsprojekte zum Quantencomputing», <https://stm.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/19-millionen-euro-fuer-forschungsprojekte-zum-quantencomputing/>

²⁴ Land Rhénanie-du-Nord-Westphalie, « Förderung von drei Forschungsbauten », <https://www.land.nrw.de/pressemitteilung/gemeinsame-wissenschaftskonferenz-beschliesst-foerderung-von-drei-forschungsbauten>

²⁵ TU Braunschweig, «25 Millionen Euro für Quantencomputer», <https://magazin.tu-braunschweig.de/pi-post/25-millionen-euro-fuer-quantencomputer/>

PRINCIPAUX ACTEURS DE LA RECHERCHE ALLEMANDE EN QUANTIQUE

I. Les instituts de recherche

Au nombre de quatre, les organismes de recherche extra-universitaires allemands sont au cœur de la stratégie du gouvernement fédéral dont la stratégie repose, en partie, sur des structures déjà existantes.

A. Communauté des centres de recherche Helmholtz

Les centres de recherche Helmholtz, en tant qu'organisme spécialisé dans la recherche fondamentale en réponse aux grands défis de société (budget annuel de 4,7 Mrd€) sont depuis plusieurs années **en pointe sur les sujets quantiques**, notamment grâce à une activité de recherche développée au sein du **DLR (centre de recherche aéronautique et spatiale)**, du **FZJ (centre de recherche de Jülich)**, du **HZB (centre Helmholtz de Berlin)**, du **HZDR (centre Helmholtz de Dresde-Rossendorf)** et du **KIT (Institut de recherche de Karlsruhe)**. Ces centres sont particulièrement impliqués dans des projets avec des partenaires universitaires et extra-universitaires allemands mais également européens, de même qu'avec des industriels. Selon la communauté des centres Helmholtz, près de **500 personnes (sur 40 000 employés)**²⁶ travaillent actuellement directement à la recherche sur les technologies quantiques au sein des différents instituts. **Les coûts annuels de recherche dans ce domaine sont estimés à 77,42 millions d'euros**²⁷.

La répartition des compétences en recherche quantique au sein des centres Helmholtz peut se résumer comme suit²⁸ :

- Technologies de l'information du futur (contrôle des phénomènes basés sur le spin, contrôle des états collectifs) : FZJ, HZB
- Supercalculateur et Big Data: FZJ, KIT
- Spatial (communication et navigation) : DLR
- Science et technologie des nanosystèmes (STN) : HZDR, FZJ, HZB

²⁶ Helmholtz Gesellschaft, « Quantum technologies in the Helmholtz association background and strategy » https://www.helmholtz.de/fileadmin/user_upload/01_forschung/QT_in_the_Helmholtz_Association.pdf

²⁷ Ibid.

²⁸ Bundestag, prec. cit.

La communauté des centres de recherche Helmholtz dispose également d'une stratégie dédiée.²⁹

a. Le Centre de recherche de Jülich - FZJ

Connu pour être une des plus grandes structures de recherche en Europe (5 800 employés), le centre de recherche de Jülich est probablement **le principal centre de recherche en technologie quantique en Allemagne** en raison de l'existence d'un « Supercomputing Centre » et d'infrastructures dédiées. Le centre de Jülich **abrite notamment le « Jülich Universal Quantum Computer Simulator (JUQCS) »**³⁰, développé dans le cadre d'une collaboration internationale et utilisé en 2018 pour établir le record mondial de simulation d'ordinateurs quantiques (48 qubits), ainsi que **le projet d'ordinateur quantique européen OpenSuperQ (actuellement en construction)** au sein de l'institut Peter Grünberg.

Les budgets du FZJ (budgets en cours et financements approuvés pour les prochaines années) s'élèvent à 27,11 millions d'euros pour l'informatique quantique, 2,63 millions d'euros pour les capteurs quantiques, 32,6 millions d'euros pour les matériaux quantiques, 2,44 millions d'euros pour les simulations quantiques et 10,42 millions d'euros pour les infrastructures. **Le centre a également déposé des demandes de subventions pour 50 millions d'euros concernant l'informatique quantique et les matériaux**³¹.

Le centre de recherche de Jülich s'est également illustré par la **signature d'un partenariat de recherche en informatique quantique avec Google**.³² Le partenariat comprend des recherches communes et la formation d'experts dans les domaines du matériel informatique quantique et des algorithmes quantiques.

b. Helmholtz Quantum Center (HQC) - Jülich

En janvier 2020, la communauté des centres Helmholtz a annoncé la création du Helmholtz Quantum Center (HQC) de Jülich, un **institut devant devenir le centre de recherche principal de la communauté Helmholtz pour la recherche et le développement de la technologie quantique. Financé à hauteur de 50 millions d'euros, le HQC testera différentes approches technologiques et différents types de qubits**.³³

²⁹ Helmholtz Gesellschaft, prec. cit.

³⁰ Bundestag, prec. cit.

³¹ Helmholtz Gesellschaft, prec. cit.

³² Centre de recherche de Jülich, « *Quantencomputer: Forschungszentrum Jülich und Google vereinbaren Partnerschaft* » <https://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/UK/DE/2019/2019-07-08-quantencomputer-fzj-google.html>

³³ Centre de recherche de Jülich, « Helmholtz Quantum Center », https://www.fz-juelich.de/portal/DE/Forschung/it-gehirn/quantentechnologie/Helmholtz_QuantumCenter.html

Le centre combinera six domaines de recherche et sept clusters technologiques allant des matériaux quantiques aux systèmes informatiques quantiques complets. Le nouveau centre accueillera également deux nouveaux instituts de contrôle et d'informatique quantique, ainsi que l'Institut JARA d'information quantique, qui a été créé au sein de l'Alliance de recherche de Jülich - Aix-la-Chapelle. **Les installations du laboratoire de Jülich, qui font partie du projet européen « Quantum Flagship », seront également hébergées dans le nouveau bâtiment.**

Le HQC sera ouvert aux universités régionales, aux partenaires nationaux et européens du monde scientifique et industriel pour des projets communs dans des domaines de recherche sélectionnés. Des laboratoires et des bureaux seront mis à la disposition des scientifiques invités, ainsi que des lieux de rencontre spéciaux pour l'échange d'idées.

Les travaux du Helmholtz Quantum Center ont commencé début 2020. **Le centre doit être pleinement opérationnel à partir de 2025.**

c. Le DLR

Parmi les sept nouveaux instituts créés en juillet 2019 au sein du DLR, trois ont pour objectif le développement des technologies quantiques. Le gouvernement fédéral apporte un soutien d'environ **9 millions d'euros par an à chaque centre, auquel s'ajoute un budget de 7 millions d'euros par centre et par an financé par le Land dans lequel se trouve chaque centre.**³⁴

Institut des technologies quantiques - Ulm³⁵

L'objectif de l'institut des technologies quantiques d'Ulm (Bade-Wurtemberg) est de **développer des instruments de précision pour les applications spatiales basées sur les technologies quantiques et, en étroite coopération avec l'industrie, de les amener à la maturité de prototypes.** Il constitue ainsi un **pont entre la recherche fondamentale et l'industrie.**

Les recherches sont réparties entre quatre départements principaux : métrologie quantique, information et communication quantiques, nanophysique quantique et contrôle quantique des ondes

³⁴ DLR, « DLR stärkt Technologie standort Deutschland mit sieben neuen Instituten », https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2019/02/20190627_dlr-staerkt-technologiestandort-deutschland-mit-sieben-neuen-instituten.html

³⁵ DLR, « Institute of Quantum Technologie », https://www.dlr.de/qt/en/desktopdefault.aspx/tabid-13498/23503_read-54020/

de matière chargée ; et trois départements transversaux : ingénierie quantique, intégration des micros et nanosystèmes et physique quantique théorique.

Institut de géodésie satellitaire et de technologie des capteurs inertiels - Hanovre/Brême³⁶

Cet institut se consacre principalement aux questions **de recherche dans le cadre de l'utilisation des technologies et des capteurs quantiques et développe des techniques de mesure quantique pour des applications innovantes, jusqu'à la réalisation de solutions prototypes**. Les applications sont destinées aux **mesures par satellite de phénomènes naturels sur Terre**, comme l'étude des pertes de masse de glace ou les effets de l'irrigation des champs sur la disponibilité de l'eau potable.

Centre de compétence Galileo - Oberpfaffenhofen³⁷

Le centre de compétence Galileo sur le site du DLR à Oberpfaffenhofen (Bavière) développe des technologies pour la **prochaine génération de satellites de navigation**. L'objectif est de concevoir des applications entièrement nouvelles. Celles-ci iront de la localisation à court terme et de haute précision aux applications de contrôle de systèmes autonomes ou automatisés. **L'Institut participe également au développement du système européen de navigation par satellite Galileo et au projet du gouvernement fédéral QuNET (communication quantique).**

d. Le centre Helmholtz de Berlin - HZB

Le centre Helmholtz de Berlin mène des **recherches fondamentales dans les domaines de la structure de la matière et de l'énergie solaire³⁸** sur deux sites à Berlin-Wannsee (Campus Lise Meitner) et à Berlin-Adlershof (Campus Wilhelm Conrad Röntgen). Le centre exploite deux grandes infrastructures de recherche, le réacteur expérimental de Berlin (BER II) et l'anneau de stockage d'électrons BESSY II.

Le centre dispose **d'un laboratoire dédié aux technologies quantiques, le « CoreLab for Quantum Materials »³⁹** dont l'objectif est l'étude de nouveaux systèmes quantiques pour l'énergie et les technologies de l'information.

³⁶ DLR, « Institute for Satellite Geodesy and Inertial Sensing », https://www.dlr.de/si/en/desktopdefault.aspx/tabid-13381/23374_read-54011/

³⁷ DLR, « Galileo kompetenzzentrum », <https://www.dlr.de/content/de/institutspraesentation/galileo-kompetenzzentrum.html>

³⁸ HZB, « über uns », https://www.helmholtz-berlin.de/zentrum/index_de.html

³⁹ HZB, « CoreLab Quantum Materials », https://www.helmholtz-berlin.de/forschung/quellen/corelabs/quantum-materials/index_en.html

Le laboratoire est spécialisé dans les domaines suivants : fluide de spin quantique 3D, Bethe Strings, fluide de spin quantique 2D.

e. Le centre Helmholtz de Dresde-Rossendorf - HZDR

Rattaché en 2011 à la communauté des centres Helmholtz, le HZDR⁴⁰ basé à Dresde (Saxe) travaille dans les domaines de l'énergie, la santé et la matière. Le HZDR a développé un programme de recherche « Matter, Materials and life » (MML) dédié à **l'étude des états quantiques comme les fluides de spin ou le contrôle cohérent de systèmes quantiques à l'échelle du nanomètre**. Le centre dispose également d'un « laboratoire de magnétisme à haut champ » où des champs magnétiques pulsés puissants (jusqu'à 100 Tesla) peuvent être générés. Cette infrastructure permet **d'étudier les propriétés mécaniques quantiques fondamentales du magnétisme et de développer de nouveaux composants tels que des supraconducteurs à haute température**.

f. L'institut de technologie de Karlsruhe - KIT

Plus grand institut de recherche allemand, le KIT a la particularité d'être à la fois une université et un centre de recherche Helmholtz.

En partenariat avec le FZJ et le HZB, le KIT **étudie les concepts de systèmes et d'infrastructures de traitement quantique de l'information. L'objectif est de développer des architectures évolutives et des algorithmes quantiques pour la représentation de problèmes réels**.⁴¹

Outre ses activités dans le domaine de l'informatique quantique, les activités de recherche du KIT portent principalement sur le **domaine des matériaux quantiques**. Le KIT dispose d'un institut dédié (*Institut für QuantenMaterialien und Technologien- IQMT*) dont l'objectif est de **comprendre les phénomènes quantiques dans la matière condensée et les systèmes moléculaires, et de développer de nouveaux dispositifs basés sur ces effets qui serviront de base aux futures technologies quantiques**.⁴²

⁴⁰ HZDR, « Quantum Materials and Technology », <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=56050&pNid=603>

⁴¹ Bundestag, prec. cit.

⁴² KIT, « Institut für QuantenMaterialien und Technologien (IQMT) », <https://www.iqmt.kit.edu/>

B. Société Max-Planck

La société Max-Planck (recherche fondamentale, 84 instituts, > 24.000 employés, budget annuel de 1,7 Md€ hors financements tiers) a commencé à s'intéresser à l'optique quantique dès le début des années 80. **Ses contributions à la stratégie nationale passent par la poursuite du développement de travaux de recherche fondamentale d'excellence dans ce domaine.** Les chercheurs de la Max-Planck ont notamment largement contribué à la rédaction d'un document stratégique en janvier 2017 (« QUTEGA ») qui a servi de base à la stratégie du gouvernement.

La contribution de la Max-Planck à la stratégie nationale réside ainsi dans sa capacité à développer de nouveaux sujets de recherche (et leurs brevetages) et la participation à des réseaux de recherche nationaux et internationaux. **Aujourd'hui 9 des 84 instituts Max Planck s'intéressent aux technologies quantiques.** Ils peuvent être regroupés en grandes catégories de recherche⁴³ :

- Informatique et simulation quantiques (Berlin, Dresde, Garching, Halle, Hambourg et Stuttgart),
- Communication quantique, dont communication par satellite (Garching et Erlangen),
- Métrologie quantique, en particulier la technologie des capteurs interférométriques à haute sensibilité (Hanovre et Erlangen)

Institut Max Planck d'optique quantique (MPQ) - Garching⁴⁴

Fondé en 1981, l'institut Max-Planck d'optique quantique est l'un des plus importants sites de recherche dans ce domaine en Allemagne. Comptant aujourd'hui 351 employés, ses recherches sont centrées sur le thème de la lumière et de la matière dans des conditions extrêmes. L'institut compte actuellement cinq départements de recherche :

- Spectroscopie laser
- Dynamique quantique
- Physique théorique
- Physique de l'attoseconde
- Systèmes quantiques à particules multiples

⁴³ Bundestag, prec. cit.

⁴⁴ Max Planck Gesellschaft, « Max Planck Institut für Quantenoptik », <https://www.mpg.mpg.de/>

L'Institut Max-Planck de physique gravitationnelle, aussi connu sous le nom d'Institut Albert Einstein (AEI), mène des recherches fondamentales en mathématiques, analyse de données, astrophysique et physique théorique ainsi que des recherches appliquées dans les domaines de la physique des lasers, de la technologie du vide, de l'isolation des vibrations et de l'optique classique et quantique. L'institut est particulièrement connu pour ses recherches sur les ondes gravitationnelles et sur l'unification des deux théories fondamentales de la physique - la relativité générale et la mécanique quantique - en une seule théorie de la gravité quantique.

Historiquement implanté à Potsdam, l'institut compte deux départements à Hanovre (Interférométrie laser et astronomie des ondes gravitationnelles, gravité quantique et théories unifiées) permettant une coopération renforcée avec l'Institut de physique gravitationnelle de l'Université Leibniz de Hanovre.

L'institut compte également des groupes de recherche temporaires :

- Le groupe « Exceptional Quantum Gravity » à l'AEI Potsdam. Financé via un ERC, ses recherches portent sur une approche basée sur la symétrie pour une théorie cohérente de la gravité quantique ;
- Le groupe « gravité, champs quantiques et information » à l'AEI Potsdam. Ce groupe de recherche indépendant, financé par la Fondation Alexander von Humboldt par le biais du prix Sofia Kovalevskaya, travaille à l'interface de la physique gravitationnelle et de la physique des hautes énergies en utilisant la science de l'information quantique ;
- Le groupe « Epistémologie historique de la quête de la théorie du tout » à l'AEI Potsdam. Ce groupe de recherche s'intéresse de l'histoire de la quête d'une théorie de la gravité quantique. Le groupe est un groupe de recherche conjoint entre l'institut Max-Planck d'histoire des sciences de Berlin et de l'Institut Max-Planck de physique gravitationnelle de Potsdam.

L'institut Max-Planck pour la physique gravitationnelle coopère, au sein de groupes de recherche internationaux, avec :

- Le département « gravité quantique et théories unifiées » de l'Institut de physique théorique de l'Académie des sciences de Chine ;

⁴⁵ Max Planck Gesellschaft, « Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik », <https://www.aei.mpg.de/2772/de>

- Le département « gravité quantique et théories unifiées » de l'Institut mathématique de Chennai (Inde) ;
- Le département « gravitation quantique et théories unifiées » de l'Indian Institute of Technology Kanpur (Inde) ;
- Le département « gravitation quantique et théories unifiées » de l'université Jilin de Changchun (Chine) ;
- Le département de relativité observationnelle et de cosmologie de l'Institut Tata de recherche fondamentale de Mumbai (Inde).

Institut Max-Planck de physique des systèmes complexes (PKS) - Dresde⁴⁶

Fondé en 1992, L'Institut Max-Planck pour la physique des systèmes complexes couvre des domaines de recherches allant de la physique classique à la physique quantique. Il dispose de trois départements permanents dont le **département de physique quantique « corrélations électroniques » où sont menées des recherches dans le domaine de la matière condensée.**

En collaboration avec l'Université technique de Dresde et d'autres institutions de recherche non universitaires du réseau scientifique DRESDEN-concept, le MPI PKS **participe au cluster d'excellence « ct.qmat : Complexity and Topology in Quantum Materials »**, qui est organisé conjointement par l'Université de Wurtzbourg et l'Université technique de Dresde et dont l'objectif est de développer une compréhension approfondie des phénomènes quantiques en général et d'identifier les matériaux dans lesquels ces phénomènes sont observés en laboratoire. Ce cluster a également pour vocation d'attirer et de former des étudiants et des scientifiques de haut niveau.

Institut Max-Planck de physique de la lumière (MLP) - Erlangen⁴⁷

Créé en 2009, l'institut Max-Planck de physique de la lumière s'inscrit dans la longue tradition de recherche en optique à l'université d'Erlangen-Nuremberg. L'institut est composé de quatre départements dont le département dit « Marquardt » du nom de son directeur et **spécialisé dans l'optique quantique dans les circuits supraconducteurs, le transport dans les systèmes photoniques, les questions fondamentales de la physique quantique des particules multiples et la dynamique non linéaire en non-équilibre et la décohérence. Il compte également un département dit « groupe**

⁴⁶ Max Planck Gesellschaft, « Max-Planck-Institut für Physik komplexer », <https://www.pks.mpg.de/>

⁴⁷ Max Planck Gesellschaft, « Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts », <https://mpl.mpg.de/de/>

émérite Leuchs » spécialisé dans l'optique quantique tant pour les questions fondamentales que les applications pratiques.

L'institut compte également plusieurs groupes de recherche indépendants dont :

- Le groupe de recherche de Maria Chekhova dans le domaine des fibres de cristaux quantiques et photoniques ;
- Le groupe de recherche de Claudiu Genes dans le domaine de la théorie de l'optique quantique ;
- Le groupe de recherche de Christoph Marquardt dans le domaine du traitement quantique de l'information ;
- Le groupe de recherche de Birgit Stiller dans le domaine de l'optoacoustique quantique.

L'institut dispose d'un programme de coopération renforcée avec l'Université d'Ottawa concernant les recherches sur le développement de sources laser à très haute intensité, le développement de méthodes optiques pertinentes pour la science de l'information quantique, et la fabrication de composants pour la photonique classique et quantique.

Institut Max-Planck de recherche sur l'état solide (FKF) - Stuttgart⁴⁸

L'Institut Max-Planck de recherche sur l'état solide concentre ses recherches sur les matériaux complexes et sur la physique et la chimie à l'échelle du nanomètre et plus spécifiquement les processus de transport des électrons et des ions. L'institut compte 7 départements dont le **département « systèmes quantiques à particules multiples »** dont les recherches portent sur les systèmes dans lesquels les corrélations électroniques jouent un rôle majeur, le **département « matériaux quantiques »** et le **département « électronique quantique à l'état solide »**.

Institut Max-Planck de physique chimique du solide (CPFS) - Dresde⁴⁹

Inauguré en 2001, l'institut Max-Planck de physique chimique du solide s'intéresse à l'étude expérimentale de phases intermétalliques présentant des propriétés structurales, chimiques et physiques nouvelles. Les recherches se concentrent sur la production et l'étude de composés intermétalliques caractérisés par des formes inhabituelles de magnétisme, de supraconductivité et de

⁴⁸ Max Planck Gesellschaft, « Max-Planck-Institut für Festkörperforschung », <https://www.fkf.mpg.de/de>

⁴⁹ Max Planck Gesellschaft, « Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe », <https://www.cpfs.mpg.de/de>

transitions métal-semiconducteur. **L'orientation de recherche vise à créer une coopération étroite entre la chimie et de la physique.**

Le CPFS est divisé en quatre domaines de recherche, deux pour la chimie et deux pour la physique dont le département physique des matériaux dont l'objectif est d'effectuer des recherches sur les états collectifs formés par les fluides électroniques en forte interaction. Le département s'intéresse aux états ordonnés à basse température, mais aussi aux « zones de reproduction » de ces états, notamment l'environnement fortement fluctuant proche des points critiques quantiques. Grâce à la collaboration avec les départements de chimie, les chercheurs ont accès à des installations permettant de travailler avec des éléments hautement toxiques. L'institut dispose également d'instruments de pointe dont des cryostats à basse température.

Institut Max-Planck pour la structure et la dynamique de la matière (MPSD) - Hambourg⁵⁰

L'Institut Max-Planck pour la structure et la dynamique de la matière (MPSD) est situé dans le quartier hambourgeois de Bahrenfeld **sur le campus du synchrotron à électrons allemand DESY**. L'institut mène principalement des recherches fondamentales dans le domaine de la physique et de la chimie expérimentale et théorique, en particulier dans le domaine des processus physiques et des réactions chimiques très rapides qui peuvent être étudiés par spectroscopie à temps ultra-courts en utilisant des sources de rayonnement pulsé telles que les lasers à électrons libres FLASH et European XFEL, qui sont situés à proximité de l'institut.

L'institut compte trois départements dont un département « dynamique de la matière condensée » au sein duquel la dynamique des solides est analysée à l'aide de techniques de mesure à résolution temporelle afin de contrôler certaines propriétés des matériaux. L'objectif est d'étudier la dynamique structurelle des électrons, des spins et du réseau atomique dans les systèmes quantiques solides.

Institut Max-Planck pour la physique des microstructures (MPI) - Berlin⁵¹

Fondé en 1960, l'institut Max Planck pour la physique des microstructures est organisé en un département expérimental et un département théorique. L'activité de recherche porte principalement sur les spécificités de la formation et des propriétés des structures micro et nano-solides, tant en

⁵⁰ Max Planck Gesellschaft, « Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie », <https://www.mpsd.mpg.de/>

⁵¹ Max Planck, « Gesellschaft, Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik », <https://www.mpg.de/153709/mikrostrukturphysik>

recherche fondamentale qu'en recherche appliquée. Un intérêt particulier est accordé aux systèmes de faible dimension tels que les surfaces et les interfaces, les couches minces, les fils et **les points quantiques**.

Institut Fritz-Haber (FHI) - Berlin⁵²

L'Institut Fritz-Haber se concentre sur la compréhension des processus de catalyse au niveau moléculaire et sur la physique moléculaire. L'institut se compose actuellement de cinq départements (chimie inorganique, science des interfaces, physique moléculaire, chimie physique et théorie).

Un des groupes de travail de l'institut (groupe de recherche de Matthias Koch) est dédié au transport quantique et nanoélectronique.

Le centre Max-Planck-UBC-UTokyo pour les matériaux quantiques⁵³

Le centre Max-Planck-UBC-UTokyo est une initiative de collaboration entre la société Max-Planck (Allemagne), l'université de la Colombie-Britannique (Canada) et l'université de Tokyo (Japon) qui **regroupe des scientifiques de renom international et une vaste infrastructure de recherche sur les matériaux quantiques**. Ce partenariat soutient des projets de collaboration, des échanges universitaires, des ateliers annuels et des collèges doctoraux pour les étudiants de troisième cycle et postdoc.

C. Communauté de centres de recherche Leibniz

La communauté des instituts de recherche Leibniz (recherche fondamentale, 91 instituts répartis dans 5 sections, budget annuel de 1,9 Md€) consacre ses recherches dans le domaine quantique essentiellement à la **photonique**. **La communauté Leibniz se démarque avec le lancement d'un processus stratégique en 2018 ayant abouti à la création d'un campus scientifique « Photonic Quantum Technologies Berlin (QuantecB) » qui impliquera à terme l'ensemble des universités berlinoises.**

On recense dix instituts Leibniz impliqués dans la recherche quantique.

Le Ferdinand-Braun-Institut (FHB) - Berlin⁵⁴

⁵² Max Planck Gesellschaft, « Fritz-Haber-Institut », <https://www.fhi.mpg.de/de>

⁵³ Max Planck Gesellschaft, « Max Planck - UBC - Utokyo », <https://www.fkf.mpg.de/mpg-ubc>

⁵⁴ Ferdinand-Braun-Institut, « quantentechnologie », <https://www.fbh-berlin.de/forschung/quantentechnologie>

L'institut Ferdinand-Braun, aussi connu sous le nom d'institut Leibniz pour la recherche sur la haute fréquence (FHB), effectue des recherches sur les technologies électroniques et des composants, modules et systèmes optiques à base de semi-conducteurs composés, notamment pour les émetteurs et sources de lumière à haute fréquence de l'infrarouge à l'UV. L'institut est, par ailleurs, internationalement reconnu pour ses travaux sur les semi-conducteurs composés III/V. **L'objectif des travaux sur les technologies quantiques du FBH est de transférer ces connaissances à la réalisation d'applications mobiles et des modules électro-optiques à haut rendement énergétique dans divers domaines d'application.**

En juin 2018, le FBH a été nommé **chef de file du projet de campus scientifique « Photonic Quantum Technologies Berlin (QuantecB) »**. La même année, il a bénéficié d'une augmentation équivalente à un tiers de ses financements (environ 4 millions d'euros) afin **de développer un nouveau domaine de recherche « Technologie quantique intégrée » en coopération avec l'Institut de physique de l'université Humboldt, où deux à trois chaires devraient être créées.**

Institut Leibniz pour la recherche sur l'état solide et les matériaux (IFW) - Dresde⁵⁵

L'Institut Leibniz pour la recherche sur l'état solide et les matériaux de Dresde (IFW) mène des recherches sur les semi-conducteurs, les matériaux et les dispositifs magnétiques, qui pourront être utilisés à l'avenir. **L'institut s'est spécialisé autour de la question des limites techniques dans le domaine de la technologie de l'information quantique (taille des systèmes quantiques à semi-conducteurs, extensibilité des structures quantiques vers des réseaux toujours plus grands).**

Institut Leibniz pour la microélectronique innovante (IHP) - Francfort sur l'Oder⁵⁶

L'Institut Leibniz pour la microélectronique innovante (IHP) se concentre sur la recherche et le développement de systèmes à base de silicium, de circuits à ultra-haute fréquence et de technologies, y compris la recherche sur les nouveaux matériaux associés.

L'institut est spécialisé dans le développement de nouveaux systèmes de matériaux concernant les semi-conducteurs IV, circuits micro-ondes (cryogéniques) SiGe/III-V destinés à la manipulation de systèmes quantiques ainsi que sur les circuits intégrés électronique-photonique basés sur le SiGe ou III-V pour le contrôle et la manipulation de la lumière.

⁵⁵ Bubdestag, prec. cit.

⁵⁶ Ibid.

Institut Leibniz sur la croissance des cristaux (IKZ) - Berlin⁵⁷

L'Institut Leibniz sur la croissance des cristaux (IKZ) effectue des recherches sur les principes scientifiques et techniques concernant la croissance, le développement, le traitement et la caractérisation physico-chimique des solides inorganiques cristallins, en particulier les cristaux de semi-conducteurs, d'oxydes et de fluorures. **L'IKZ se caractérise ainsi par son rôle de « fournisseur » de matériaux.** Depuis 2018, l'IKZ dispose d'un **centre dédié aux cristaux pour la génération et le contrôle de la lumière indispensable aux technologies photoniques quantiques.** L'IKZ travaille également sur des cristaux Si28 comme base matérielle concevable (« vide semi-conducteur ») pour l'informatique quantique.

Institut Leibniz pour les technologies photoniques (IPHT) - Berlin⁵⁸

L'Institut Leibniz pour les technologies photoniques (IPHT) effectue des recherches sur les procédés et systèmes photoniques de haute sensibilité, efficacité et résolution. L'institut dispose d'un **département dédié à la détection quantique** où est examiné le déplacement des charges électriques dans les biomatériaux.

L'IPHT mène également des recherches dans les domaines suivants :

- Photonique quantique avec confinement de lumière ;
- Compteurs de photons uniques avec des supraconducteurs ;
- QuBits supraconducteurs dans les circuits numériques ;
- Détection d'axion avec des magnétomètres optiques ;
- Capteurs quantiques supraconducteurs.

Institut Max Born d'optique non linéaire et de spectroscopie à impulsions courtes (MBI) - Berlin⁵⁹

L'Institut Max-Born d'optique non linéaire et de spectroscopie à impulsions courtes (MBI) mène des recherches fondamentales dans le domaine de l'optique non linéaire et de la dynamique à court terme dans l'interaction de la matière avec la lumière laser et les rayons X et des applications qui en résultent. Le MBI exploite une infrastructure expérimentale pour la spectroscopie non linéaire et la recherche

⁵⁷Leibniz-Institut für Kristallzüchtung, « HZB & IKZ bundle their competencies in crystalline energy and quantum materials », <https://www.ikz-berlin.de/en/oeffentlichkeitsarbeit/aktuelles-meldung/hzb-ikz-bundle-their-competencies-in-crystalline-energy-and-quantum-materials>

⁵⁸ Bundestag, prec. cit

⁵⁹ Max-Born-Institut f. Nichtlineare Optik u. Kurzzeitspektroskopie, « Overview over the MBI research program », <https://mbi-berlin.de/research/research-program>

structurelle dans la gamme de temps ultra-rapide allant de l'atto à la picoseconde. **Dans le domaine des technologies quantiques, l'institut est spécialisé dans l'observation du transport en champ libre par l'émission de porteurs de charge en THz et les techniques d'écho de photons dans le domaine spectral infrarouge.**

Institut Paul Drude pour l'électronique des semi-conducteurs (PDI) - Berlin⁶⁰

L'Institut Paul Drude pour l'électronique solide (PDI) s'intéresse à la recherche fondamentale en physique des matériaux pour les composants micro et optoélectroniques. **La recherche de l'institut se concentre en particulier sur les systèmes de faible dimension dans les semi-conducteurs nanostructurés pouvant être utilisés de manière prospective dans les technologies quantiques.** L'institut réalise notamment des recherches sur les réseaux de polarisation dans des microcavités de semi-conducteurs, qui pourrait convenir aux simulations quantiques.

Institut Weierstrass pour l'analyse appliquée et la stochastique (WIAS) - Berlin⁶¹

L'Institut Weierstrass pour l'analyse appliquée et la stochastique mène des recherches visant à la résolution de problèmes complexes. **Le WIAS travaille notamment sur les méthodes mathématiques pour les technologies quantiques.**

D. Société Fraunhofer

La société Fraunhofer (recherche appliquée / recherche partenariale, 72 instituts, > 26.600 employés, budget annuel de 2,6 Md€ dont 2,2 Md€ de financements sur contrats) est très en pointe sur la recherche dans les technologies quantiques à travers notamment le regroupement de plusieurs instituts Fraunhofer autour de projets conjoints (par ex. le projet-phare « QUILT » dans le domaine de l'imagerie quantique, ou encore le projet soutenu par le Land de Bade-Wurtemberg autour de quatre instituts à Fribourg-en-Brigau dans le domaine des capteurs quantiques). **Les travaux menés au sein de la Fraunhofer concernent un grand nombre de domaines d'application des technologies quantiques, à commencer par les technologies de base servant de briques quantiques modulables pour des applications dans le domaine des sciences de matériaux, de la photonique ou encore de la microélectronique, jusqu'à l'imagerie, la métrologie, la communication ou encore le calcul. Dans le cadre d'un programme stratégique prioritaire « Agenda Fraunhofer 2022 », la société Fraunhofer**

⁶⁰ Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, « Controlling free electrons in quantum circuits », <http://www.pdi-berlin.de/de/research/core-research-areas/nanoanalytics/scientific-highlights/article/controlling-free-electrons-in-quantum-circuits/>

⁶¹ Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik, « Quantum models for semiconductors », <https://www.wias-berlin.de/research/ats/Quantenmech/?lang=1>

prévoir un investissement d'environ 20 millions d'euros pour soutenir de vastes activités de recherche.

On compte 14 instituts Fraunhofer impliqués dans la recherche sur les technologies quantiques. Ces derniers sont réunis dans un « centre de compétence » virtuel des instituts Fraunhofer. Ils peuvent être classés en fonction des domaines de compétences suivants⁶² :

- Technologies à photon unique avec sources de photons déterministes, paires de photons intriqués et plates-formes de conversion de fréquence paramétrique intégrée : CAP-UK, HHI, IAF, ILT, IMM, IOF, IOSB, IPM, ITWM
- Interfaces photoniques et technologies intégrées de guides d'ondes et micro-optique : CAP-UK, HHI, IAF, ILT, IOF
- Ingénierie des matériaux et les procédés de fabrication de haute précision pour les milieux quantiques sous forme de points quantiques et les arrangements étendus de points quantiques avec des propriétés adaptées dans les transporteurs et matrices définis : IAF, IMM, IWM
- Modélisation de systèmes quantiques complexes concernant la décroissance de la cohérence et la structure des niveaux d'énergie et analyses théoriques des mécanismes de transfert quantique et du transport quantique de l'information : ITWM, IWM, SCAI
- Intégration de l'IA et des méthodes d'apprentissage machine pour analyser l'interaction complexe des composants individuels dans les technologies quantiques modulaires pour l'optimisation des systèmes et les scénarios de test : ITWM, SCAI
- Intégration de la distribution de clés quantiques dans les protocoles cryptographiques classiques et dans la connexion des réseaux de communication quantiques aux architectures de sécurité classiques : AISEC, SIT
- Cryptographie post-quantique AISEC, SIT

Fraunhofer CAP-UK⁶³

Basé à Glasgow (Royaume-Uni), l'institut Fraunhofer CAS dispose d'une compétence spécifique sur le **rôle de la photonique dans la technologie quantique**. L'expertise du Fraunhofer CAP comprend, entre autres, les domaines suivants : lasers à largeur de raie étroite et leur caractérisation, conception d'un système complet, verrouillage et stabilisation des sources laser, réduction de la taille, du poids et de

⁶² Bundestag, prec. cit.

⁶³ Fraunhofer-Gesellschaft, « Quantum Technologies »

<https://www.cap.fraunhofer.co.uk/en/ApplicationsBusinessFields/QuantumTechnologies.html>

la puissance des systèmes laser, conception mécanique pour des performances robustes, conversion des fréquences, systèmes d'atomes froids, sources de photons quantiques, amélioration quantique de la détection, détection d'un faible nombre de photons.

L'institut Fraunhofer CAP est également impliqué dans des projets développés dans le cadre de l'initiative britannique sur les quanta et plus spécifiquement sur des projets liés au développement de lasers et à la réalisation de systèmes complets incorporant des atomes froids.

L'institut Fraunhofer CAP participe à deux des quatre plus grands projets QT d'InnovateUK :

- Pioneer Gravity : Des capteurs de gravité pour la productivité des infrastructures, la connaissance de la situation et la vision de l'invisible ;
- 3QN : vers une nouvelle industrie britannique des nouveaux récepteurs quantiques dans les marchés mondiaux des satellites naissants (distribution quantique de clé).

Fraunhofer HHI⁶⁴

Basé à Berlin, Institut Fraunhofer HHI dispose d'un département dédié aux réseaux photoniques. **Ce département travaille sur la distribution rapide d'une clé cryptographique utilisant la communication quantique (transmission par fibre optique et en espace libre).** L'institut a développé un système basé sur l'incertitude temps-fréquence, où l'information est encodée soit dans le temps d'arrivée, soit dans la fréquence des photons dans la gamme de longueur d'onde de 1550 nm. La recherche est axée sur l'optimisation des composants du système et l'utilisation conjointe de la communication classique et de la communication quantique sur le même support.

L'institut participe aux projets NanoPhot, Q.Link.X, QuNET QuPAD financé par le gouvernement fédéral.

Fraunhofer IAP⁶⁵

Basé à Postdam, l'institut Fraunhofer IAP est spécialisé dans la recherche et le développement d'applications des polymères. Outre la production et le traitement des polymères au sein du laboratoire, **l'institut dispose d'une usine pilote et propose également un service de caractérisation**

⁶⁴ Fraunhofer-Gesellschaft HHI, « Field of Research: Quantum Technologies », <https://www.hhi.fraunhofer.de/en/fraunhofer-hhi/fields-of-research/quantum-technologies.html>

⁶⁵ Fraunhofer-Gesellschaft IAP, « Nanomaterialien und Quantum Dots », https://www.iap.fraunhofer.de/de/Forschungsbereiche/Funktionale_Polymersysteme/nanomaterialien_quantumdots.html

des polymères. Dans le domaine quantique, **l'institut dispose d'une compétence spécifique concernant la recherche sur les nanoparticules et les points quantiques.**

Fraunhofer ILT⁶⁶

Basé à Aix-la-Chapelle, l'institut Fraunhofer ILT est l'un des principaux instituts de recherche dans le domaine du développement et des applications laser. Avec environ 570 employés et plus de 19 500 m² de surface nette, l'institut dispose de compétences principalement dans le développement de nouvelles sources et de nouveaux composants de faisceaux laser, de technologie de mesure et d'essai laser et de technologie de production laser. Cela comprend, par exemple, la coupe, l'ablation, le perçage, le soudage et la soudure ainsi que le traitement de surface, la microfabrication et la fabrication d'additifs.

L'institut est impliqué dans trois projets de recherche :

- « QUEST » : Dans le cadre de ce projet, les chercheurs d'Aix-la-Chapelle se concentrent sur le développement de convertisseurs de fréquence quantiques qui convertissent efficacement les photons émis par les systèmes qubit ayant des longueurs d'onde comprises entre 800 et 900 nm en ceux ayant des longueurs d'onde comprises entre 1500 et 1600 nm⁶⁷ ;
- « QFC-4-1QID » : Né de la coopération entre le QuTech de Delft (Pays-Bas), l'Université technique de Delft et l'Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée (TNO) et financé par la société Fraunhofer pour une durée initiale de trois ans, ce projet vise au développement de convertisseurs de fréquences quantiques (QFC). Dans ce cadre, le Fraunhofer ILT se concentre sur le développement de convertisseurs à faible bruit utilisant des cavités de surélévation et des cristaux à polarisation non périodique. Après avoir mis en place et évalué les différentes approches de la conversion quantique des fréquences, la technologie sera adaptée aux systèmes de spin-qubit à semi-conducteurs dans une phase ultérieure du projet, qui sont étudiés à l'Institut d'information quantique de l'université RWTH d'Aix-la-Chapelle,⁶⁸
- « QUILT » : Ce projet conjoint à six instituts (IOF, IPM, ILT, IMS, IOSB et ITWM) doit permettre d'étudier les six gammes de longueurs d'onde spécifiques et encore largement inexplorées,

⁶⁶ Fraunhofer-Gesellschaft ILT, « Greundbegriff »,

<https://www.ilt.fraunhofer.de/de/technologiefelder/quantentechnologie.html#441685709>

⁶⁷ Fraunhofer-Gesellschaft ILT, « Projekt Quest »,

<https://www.ilt.fraunhofer.de/de/technologiefelder/quantentechnologie.html#1756853473>

⁶⁸ Fraunhofer-Gesellschaft, « Quantenbits ins Glasfasernetz bringen: Start des Projekts QFC-4-1QID »,

<https://www.ilt.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/pm2019/pressemitteilung-2019-10-15.html>

pour l'imagerie quantique. Dans le cadre de QUILT, le Fraunhofer ILT développe des sources de photons paramétriques pour les applications d'imagerie dans l'infrarouge moyen (MIR). Le projet a été lancé en octobre 2017⁶⁹.

Fraunhofer IMM⁷⁰

Basé à Mayence (Rhénanie-Palatinat), l'institut Fraunhofer IMM est spécialisé dans le développement de technologie énergétique et chimique ainsi que dans les systèmes d'analyse et la technologie des capteurs.

L'institut est divisé en deux domaines de recherche : le génie énergétique et chimique et les systèmes et capteurs d'analyse. Le premier dispose notamment de chercheurs spécialisés dans les technologies des nanoparticules, notamment la production de nanoparticules métalliques, d'oxyde métallique, semi-conductrices et polymères pour l'encapsulation de principes actifs ou sous forme de points quantiques.

Fraunhofer IOF⁷¹

Basé à Jéna (Thuringe), l'institut Fraunhofer IOF est l'un des pionniers de la recherche appliquée sur la technologie quantique en Allemagne. L'institut a développé une compétence dans les domaines suivants :

- Communication optique avec une sécurité physiquement mesurable ;
- Microscopie dans des gammes de longueurs d'onde non développées ;
- Images optiques avec une dose de rayonnement minimale ;
- Imagerie et analyse spectrale dans les milieux diffusants, tels que les tissus ou la fumée ;
- Mise à l'échelle des ordinateurs quantiques.

L'institut Fraunhofer IOF est le coordinateur du projet QUILT sur les méthodes quantiques pour des solutions d'imagerie avancées.

⁶⁹Fraunhofer-Gesellschaft, « Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions - QUILT », <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/fraunhofer-initiativen/fraunhofer-leitprojekte/quilt.html>

⁷⁰ Fraunhofer-Gesellschaft IMM, « über uns », https://www.imm.fraunhofer.de/de/ueber_uns.html

⁷¹ Fraunhofer-Gesellschaft IOF, « Optische Quantentechnologien », <https://www.iof.fraunhofer.de/de/kompetenzen/zukunftstechnologien/Quantentechnologie.html>

Fraunhofer IOSB⁷²

Basé sur plusieurs sites de recherche à travers l'Allemagne (Karlsruhe, Ettlingen, Ilmenau, Lemgo, Görlitz et Rostock), l'institut Fraunhofer IOSB dispose d'un budget de fonctionnement de 64 millions d'euros et compte plus de 700 employés.

En ce qui concerne les technologies quantiques, l'institut Fraunhofer IOSB s'intéresse particulièrement aux **algorithmes quantiques et à leur application industrielle ainsi qu'aux applications cryptographiques post-quantiques et aux schémas de distribution quantique de clé**. L'institut travaille notamment sur de nouvelles approches de la programmation quantique.

Fraunhofer IPM⁷³

Basé à Fribourg-en-Brigau, l'institut Fraunhofer IPM est spécialisé dans les systèmes de mesure optiques et les composants pour le contrôle de production, la détection d'objets et de formes ainsi que la technologie des gaz et des procédés. En outre, l'institut effectue des recherches dans le domaine des systèmes caloriques et thermoélectriques.

Ces dernières années, l'institut a développé une compétence dans le domaine de **l'imagerie et des capteurs quantiques**. A ce titre il participe aux projets de recherche QMILT et QMAg.

Fraunhofer ITWM⁷⁴

Basé à Kaiserslautern (Rhénanie-Palatinat), l'institut Fraunhofer ITWM est spécialisé dans la recherche en mathématiques industrielles. Les chercheurs conçoivent principalement des simulations informatiques de processus techniques, des composants logiciels, du conseil et de l'assistance aux solutions de système.

⁷² Quantum Flagship, Fraunhofer IOSB, <https://qt.eu/about-quantum-flagship/community/directories/fraunhofer-iosb/>

⁷³ Fraunhofer-Gesellschaft IPM, « Quantensysteme für die Messtechnik nutzen », <https://www.ipm.fraunhofer.de/de/gf/gastechnologie-spektroskopie/komp/sensorik/quantensensoren.html>

⁷⁴ Fraunhofer-Gesellschaft ITWM, « Kompetenzzentrum Quantencomputing Rheinland-Pfalz », <https://www.itwm.fraunhofer.de/de/Anwendungsfelder/quantencomputing.html>

Concernant les technologies quantiques, l'institut Fraunhofer ITWM est compétent dans le domaine de **l'imagerie, la modélisation, la simulation et l'optimisation des méthodes quantiques** sans contact et plus particulièrement :

- les technologies de base en modèles quantiques : développement d'un jumeau numérique pour la prédiction quantitative des expériences d'optique quantique ;
- les systèmes expérimentaux d'analyse structurelle térahertz : utilisation de paires de photons intriqués (VIS-THz) pour améliorer l'efficacité de la détection.

A ce titre, l'ITWM participe est partie prenante du projet QUILT.

Fraunhofer IWM⁷⁵

Basé à Fribourg-en-Brisgau (Bade-Wurtemberg), l'institut Fraunhofer IWM est spécialisé en mécanique des matériaux. **En partenariat avec les instituts IAF et IPM, l'IWM participe au projet de recherche QMAG** visant au transfert de la recherche fondamentale en magnétométrie quantique vers des applications industrielles concrètes, à travers la mise au point de magnétomètres quantiques imageurs hautement intégrés offrant une haute résolution spatiale et une sensibilité optimisée.

Fraunhofer SCAI⁷⁶

Basé à Sankt Augustin (Rhénanie du Nord-Westphalie), l'institut Fraunhofer SCAI est spécialisé dans le domaine des mathématiques appliquées, du numérique et de l'informatique.

Les recherches de l'institut SCAI en technologies quantiques portent principalement sur la recherche de **nouveaux algorithmes, l'IA, le numérique et l'optimisation quantique** et leurs applications industrielles.

Fraunhofer AISEC⁷⁷

Basé à Garching (Bavière), l'institut Fraunhofer AISEC est spécialisé dans la recherche pour la sécurité appliquée et intégrée. L'institut, qui compte 90 employés, travaille sur **l'intégration de la distribution de clés quantiques et la cryptographie post-quantique**.

⁷⁵ Fraunhofer-Gesellschaft, « QMAG », <https://www.qmag.fraunhofer.de/>

⁷⁶ Fraunhofer-Gesellschaft SCAI, « Quantencomputing », <https://www.scai.fraunhofer.de/de/geschaftsfelder/high-performance-computing/quantencomputing.html>

⁷⁷ Bundestag, preci.cit

Fraunhofer SIT

Basé à Darmstadt (Hesse), l'institut Fraunhofer SIT est spécialisé dans la sécurité de l'information. Les recherches de l'institut portent sur les **processus post-quantiques**, en particulier pour les applications à ressources limitées dans les systèmes embarqués (construction automobile, industrie 4.0) et les applications internet (commerce électronique ...).⁷⁸

L'institut est également **spécialisé en cryptographie post-quantique (PQC)**,⁷⁹ les chercheurs ont notamment développé un outil permettant de simuler l'effet de la PQC sur l'utilisation de l'outil « Trusted Platform Module » et les éventuelles modifications nécessaires.

Fraunhofer IMS⁸⁰

Basé à Duisburg (Rhénanie du Nord-Westphalie), l'institut IMS est spécialisé en microélectronique. L'institut développe des détecteurs de photons uniques extrêmement rapides et puissants pour l'imagerie avec des photons intriqués et participe au projet de recherche QUILT.

E. L'Office national de métrologie (PTB)⁸¹

Crée en 1887, l'office national de métrologie (Physikalisch-Technische Bundesanstalt - PTB) est responsable de la traçabilité dans le domaine de la métrologie. **Cet établissement est connu pour avoir joué un rôle majeur dans les sciences quantiques, c'est en effet au sein du PTB qu'Otto Lummer et Wilhelm Wien ont développé en 1895, le premier radiateur à cavité pour la production de rayonnement thermique de type corps noir, dont les résultats ont conduit Max Planck à quantifier le rayonnement thermique en plusieurs domaines, donnant la naissance à la physique quantique.**

Le PTB, qui a vu ses compétences en recherche quantique fortement augmenté au fil des années, est aujourd'hui un acteur incontournable du paysage de la recherche allemande. Basé à Brunswick (Basse-Saxe) et Berlin, le PTB a consolidé un réseau de recherche regroupant l'université Leibniz de Hanovre, l'université technique de Brunswick, l'institut de technologie de Hanovre (HITec) et le laboratoire d'analyse et de nanométrie émergente (LENA).

⁷⁸ Fraunhofer-Gesellschaft SIT, « Post-Quantum-Kryptografie », <https://www.sit.fraunhofer.de/de/postquantum/>

⁷⁹ Fraunhofer-Gesellschaft SIT, « Post-Quantum TPM », <https://www.sit.fraunhofer.de/de/pgc-tpm/>

⁸⁰ Fraunhofer-Gesellschaft IMS, « Einzelphotonen-Detektoren für Quantum Imaging », <https://www.ims.fraunhofer.de/de/Geschaeftsfelder/CMOS-Image-Sensors/Anwendungen/Einzelphotonen-Detektoren-fuer-Quantum-Imaging.html>

⁸¹ Bundestag, prec. cit.

Depuis 2019, le PTB a créé en son sein le « centre de compétence pour la technologie quantique » (*Quantum Technology Competence Center* - QTZ) dont l'objectif est de faire le lien entre monde académique et industriel et de permettre à ces derniers d'accéder à l'expertise du PTB en matière de technologie quantique. Ce centre se concentre sur le développement et le transfert de technologies dans les domaines suivants : composants et technologie, étalonnage et services, installations pour les utilisateurs, formation et soutien aux start-ups.⁸²

Le PTB dispose d'une compétence dans quatre grands domaines de recherche :

1. Métrologie électrique quantique

Le PTB est le seul institut national de métrologie au monde à disposer de lignes de production complètes pour les étalons quantiques supraconducteurs et semi-conducteurs ainsi que pour les étalons quantiques électriques constitués de couches de graphène. Sur cette base, le PTB a pu établir une position de leader mondial dans le domaine des étalons quantiques électriques.

2. Métrologie quantique pour le temps et la fréquence, ordinateur quantique et simulation quantique

La PTB est également l'un des leaders mondiaux dans le développement d'horloges atomiques optiques et des périphériques associés, tels que les pièges atomiques microstructurés, les lasers ultra-stables, les liaisons par fibres optiques pour la transmission de fréquences et les horloges optiques portables. Dans ce cadre, il participe au projet financé par le BMBF « opticklock ».

Le PTB étudie notamment les applications possibles d'horloges transportables dans le domaine de la géodésie. En outre, des pièges à ions microstructurés pour les horloges optiques évolutives et le traitement de l'information quantique sont développés au sein de l'établissement.

3. Mesure des plus petits champs magnétiques

Le PTB exploite un centre d'instrumentation financé par la DFG afin de rendre accessible à des utilisateurs externes des technologies de mesure quantique des champs magnétiques ultrafaibles.

4. Communication quantique, cryptographie quantique et radiométrie quantique

⁸²PTB, « Quantum Technology Competence Center (QTZ) », <https://www.ptb.de/cms/nc/en/ptb/competence-centers/qtz.html>

Le PTB est compétent dans le calibrage des détecteurs à photon unique ainsi que le calibrage des détecteurs à nanofils supraconducteurs avec la plus petite incertitude de mesure au monde.

En outre, le PTB développe des sources de photons uniques caractérisées comme sources de rayonnement standard pour la radiométrie et la communication quantique.

F. L'Office fédéral allemand pour la sécurité de l'information (BSI)

L'Office fédéral allemand pour la sécurité de l'information (*Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik* - BSI) travaille activement sur les effets potentiels des ordinateurs quantiques sur les infrastructures de sécurité informatique actuelles.

Le BSI est ainsi impliqué dans des projets de recherche concernant la communication quantique et en particulier la **distribution de clés cryptographiques utilisant les effets de la mécanique quantique (distribution quantique de clé)**. Le BSI participe, avec les fabricants et des instituts de recherches (notamment le PTB), à l'élaboration de critères pour l'évaluation de la sécurité contre de potentielles attaques. Le BSI fournit des critères étendus, neutres sur le plan technologique, pour l'évaluation des générateurs de nombres aléatoires.⁸³

Le BSI participe en tant que membre « consultatif » aux projets Horizon 2020 « PQCrypto » et « SAFEcrypto ».

II. La recherche universitaire

A. Les clusters d'excellence

Dans le cadre de l'initiative d'excellence, une politique mise en place par le BMBF et destiné à renforcer les liens entre les instituts de recherche et les universités, 57 pôles d'excellences allemands ont été sélectionnés en 2018 et recevront un financement d'environ 7 millions d'euros sur 7 ans. **Sur les 75 pôles d'excellences, sept travailleront exclusivement sur les technologies quantiques.**⁸⁴

⁸³ Bundestag, prec. cit.

⁸⁴ DFG, « Current Clusters of Excellence », https://www.dfg.de/en/funded_projects/current_projects_programmes/list/index.jsp?id=EXS

Noms du cluster	Universités impliquées
Matter and Light for Quantum Information (ML4Q)	Université de Cologne, RWTH Aix-la-Chapelle, Université de Bonn, centre de compétence de Jülich, Université Heinrich-Heine de Düsseldorf
Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST)	Université Ludwig Maximilian de Munich, TU Munich, Institut Max-Planck d'optique quantique (MPQ), Académie des Sciences bavaroise, Institut Walther-Meißner pour la recherche sur les basses températures
QuantumFrontiers - Light and Matter at the Quantum Frontier	Université de Hanovre, TU Brunswick, Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH), PTB, Institut Max Planck pour la physique gravitationnelle, Université de Brême, Centre de technologie spatiale appliquée et de microgravité de Brême (ZARM)
Complexity and Topology in Quantum Materials (CT. QMAT)	Université de Wurtzbourg, TU Dresde, Centre Helmholtz Dresde-Rossendorf (HZDR), Institut Leibniz IFW, Institut Max-Planck pour la physique chimique des solides, Institut Max Planck pour la physique des systèmes complexes, Centre bavarois de recherche énergétique appliquée (ZAE Bavière)
CUI: Advanced Imaging of Matter	Université de Hambourg, DESY, Institut Max Planck pour la structure et la dynamique de la matière, XFEL
STRUKTUREN: Emergenz in Natur, Mathematik und komplexen Daten	Université de Heidelberg, Institut d'études théoriques de Heidelberg (HITS), Institut Max Planck d'astronomie (MPIA), Institut central de

	santé mentale, Institut Max Planck de physique nucléaire
Cyber Security in the Age of Large-scale Adversaries (CASA)	Université de Bochum, TU Munich, Institut Fraunhofer pour les flux de matériaux et la logistique, TU Brunswick, Université de Duisburg-Essen

B. Universités

Le BMBF dénombre 24 universités impliquées dans des projets de recherche publiques liés aux technologies quantiques.⁸⁵

Université	Départements	Spécialité
Ludwig-Maximilians-Universität Munich	Fakultät für Physik Experimental Quantum Physics (XQP)	Enchevêtrement atome-photon Enchevêtrement photonique Cryptographie quantique Sources de photons uniques
Universität Albert-Ludwigs-Freiburg	Freiburger Materialforschungszentrum (FMF)	Ordinateur quantique/simulation Technologie de base pour les systèmes quantiques
Universität Eberhard Karls de Tübingen	Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät Physikalisches Institut - Center for Quantum Science	Technologie de mesure quantique Technologies de base pour les systèmes quantiques
Freie Universität Berlin	Institut für Theoretische Physik Institut für Informatik	Ordinateur quantique /simulation
Universität Humboldt Berlin	Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät - Institut für Physik	Technologie de base pour les systèmes quantiques
Universität Friedrich-Alexander Erlangen-Nürnberg		
Universität Friedrich-Schiller Jena	Physikalisch-Astronomische Fakultät	Technologie de mesure

⁸⁵ BMBF Quanten technologien, « branche », <https://www.quantentechnologien.de/branche.html>

	Institut für Angewandte Physik	
Universität Johannes Gutenberg Mayence	FB 08 Physik, Mathematik und Informatik - Institut für Physik	Ordinateur quantique /-simulation Technologie de mesure Technologie de base pour les systèmes quantiques
Universität Julius Maximilians Würzburg	Fakultät für Physik und Astronomie - Physikalisches Institut - Technische Physik	Technologie de base pour les systèmes quantiques
Universität Leibniz Hanovre	Fakultät für Mathematik und Physik - Institut für Quantenoptik Hannoversches Zentrum für Optische Technologien (HOT)	Technologie de base pour les systèmes quantiques
RWTH Aix-la-Chapelle	Fakultät 1 - Mathematik - Informatik - Naturwissenschaften - Fachgruppe Physik - II. Physikalisches Institut	
Universität Rheinische Friedrich-Wilhelms Bonn	Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät - Physik/Astronomie - Physikalisches Institut	Technologie de base pour les systèmes quantiques
TU Berlin	Fakultät II - Mathematik und Naturwissenschaften - Institut für Festkörperphysik - Sekr. - EW 5-3	Communication quantique Technologie de base pour les systèmes quantiques
TU Braunschweig	Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften	
TU Chemnitz	Zentrum für Mikrotechnologien Lithografie und Strukturübertragung	Technologie de base pour les systèmes quantiques
TU Munich	Physik Department - Walter Schottky Institut Zentrum Mathematik	Communication quantique Technologie de base pour les systèmes quantiques Ordinateur quantique/simulation
Universität de la Sarre Sarrebruck	Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät - AG Experimentalphysik Fachrichtung Physik	Technologie de base pour les systèmes quantiques Technologie de mesure Communication quantique

Universität de Hambourg	Zentrum für optische Quantentechnologien	Technologie de base pour les systèmes quantiques Ordinateur quantique /-simulation Communication quantique
Universität de Constance	Mathematisch-Naturwissenschaftliche Sektion - FB Physik - Nanomechanische Systeme	Technologie de base pour les systèmes quantiques
Universität de Paderborn	Fakultät für Naturwissenschaften - Department Physik - Mesoskopische Quantenoptik - Department Physik - Integrierte Quantenoptik	Technologie de base pour les systèmes quantiques
Universität de Regensburg		Ordinateur quantique /-simulation
Universität de Siegen	Fakultät IV - Department Physik - Lehrstuhl für Quantenoptik	Technologie de base pour les systèmes quantiques
Universität de Stuttgart	Physikalisches Institut Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik - Institut für Intelligente Sensorik und Theoretische Elektrotechnik Fakultät 8 Mathematik und Physik - Institut für Funktionelle Materie und Quantentechnologien	Technologie de base pour les systèmes quantiques Technologie de mesure
Universität d'Ulm	Fakultät für Naturwissenschaften - FB Physik - Institut für Quantenoptik Institut für Theoretische Physik	Technologie de base pour les systèmes quantiques Technologie de mesure
Universität de Münster	Institut für Didaktik der Physik Physikalisches Institut Center for Nanotechnology (CeNTech)	Communication quantique Technologie de base pour les systèmes quantiques

III. Acteurs privés

De grandes entreprises allemandes, telles que BASF, Bayer, BMW, Bosch, Daimler et VW, sont parmi les pionniers dans l'expérimentation de la technologie quantique pour des simulations et des ordinateurs quantiques pour résoudre les problèmes de recherche ou d'optimisation des matériaux.⁸⁶

Les entreprises allemandes, telles que Bosch, Siemens ou Zeiss mais également des PME, sont également en bonne position concernant la technologie des capteurs et l'imagerie qui devraient jouer un rôle majeur sur les marchés mondiaux pour les produits basés sur les technologies quantiques.

Le BMBF recense 30 entreprises impliquées dans des programmes de recherche publiques dont :⁸⁷

Tailles de l'entreprise	Nom de l'entreprise
Grandes entreprises	Accenture, AKKA DSW, BALLUFF, Carl Zeiss AG, Deutsche Telekom AG, GRINTECH, Jena-Optronik, LAYERTEC, Qioptiq Photonics, Robert Bosch, SCHOTT AG, TOPTICA Photonics AG
Moyennes entreprises	Active Fiber Systems, Main Incubator, Menlo Systems, Nanoscribe, TransMIT, VDI Technologiezentrum
Petites entreprises/ Start-ups	Diamond Materials, Ecodiamond, Entropy, Junge Tüftler , Kiutra, M Squared Lasers UG, neoLASE, PicoQuant, Q.ant, Quantum Business Network UG, QUARTIQ, Qubig

⁸⁶ ACATECH, prec. cit.

⁸⁷ BMBF Quanten technologien, « branche », <https://www.quantentechnologien.de/branche.html>

Caractéristiques du paysage de la recherche allemande

I. Positionnement de la recherche

L'ensemble des rapports présentant le paysage de la recherche quantique en Allemagne s'accordent sur le fait que le pays dispose d'une « **bonne position de départ** » pouvant s'expliquer par plusieurs facteurs⁸⁸ :

- Un grand nombre de grandes entreprises et de PME a exprimé un intérêt pour les technologies quantiques ;
- Un intérêt des pouvoirs publics exprimé par la mise en place d'un programme-cadre dès 2018 ;
- Une tradition historique de recherche dans le domaine de la technologie laser : les PME allemandes occupent déjà une position forte au niveau international en ce qui concerne les lasers et les photons hautement spécialisés ;
- Un avantage industriel déjà affirmé dans le domaine de la microélectronique et des matériaux, les pouvoirs publics allemands consacrent d'ailleurs une stratégie nationale à ce domaine ;
- L'Allemagne dispose d'un bon réseau d'experts académique renforcé par le lancement de nouveaux programmes d'études en ingénierie quantique au sein des universités de Sarre, de Munich (TU Munich) ou encore de Brunswick (TU Braunschweig).

II. Domaines de compétences

A. Détection, imagerie et métrologie⁸⁹

Pour des raisons historiques (voir chapitre consacré au PTB), l'Allemagne dispose d'un solide réseau universitaire et extra-universitaire dans le domaine de la détection, de l'imagerie et de la métrologie quantique. Des liens étroits entre la recherche fondamentale menée dans les universités et les instituts de recherche extra- universitaires tels que le PTB, le DLR, la Fraunhofer et la Max-Planck existent déjà. En outre, l'Allemagne participe, via ses instituts de recherche, à des projets internationaux de coopération de premier plan.

⁸⁸ ACATECH, prec. cit.

⁸⁹ ACATECH, prec. cit.

L'office national de métrologie (PTB) participe ainsi aujourd'hui à des projets conjoints avec l'Institut national des normes et des technologies (NIST) des États-Unis, l'Institut national de métrologie (NMIJ) et l'Institut national de recherche physique et chimique (RIKEN) au Japon, le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), Systèmes de Référence Temps Espace (SYRTE) en France, l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM) en Italie et le Laboratoire national de physique (NPL) en Grande-Bretagne. Les travaux portent notamment sur le développement de la prochaine génération de montres optiques et de résonateurs optiques. Récemment, la transmission de fréquence la plus précise au monde par fibres optiques a été réalisée entre Paris et Brunswick, démontrant la possibilité de comparer rapidement et précisément des horloges optiques. Ces coopérations devraient se renforcer dans les années à venir.⁹⁰

En dehors du PTB, il faut également souligner le développement de premiers projets d'applications avec le programme Q-Mag de l'institut Fraunhofer de Fribourg ainsi que les coopérations mises en place par les centres de recherche Fraunhofer, l'Université de Stuttgart et l'industrie (notamment Intel et Siemens Healthineers) pour le développement de technologies diamant NV pour la mesure à haute résolution de courants et de champs magnétiques ultra-faibles pouvant être utilisés, à terme, pour des applications médicales ou en géodésie (mesure des champs magnétiques).

Enfin, le cluster **d'excellence Quantum Frontier basé à Brunswick et Hanovre** a connu une croissance considérable du nombre de publications dans le domaine de la détection quantique et de la métrologie entre 2010 et 2016, démontrant le dynamisme de l'activité de recherche dans ce domaine au sein d'une université allemande.

En outre, **un intérêt relativement important a été manifesté par l'industrie allemande pour ce domaine** avec des investissements précoces dans la R&D. Parmi les grandes entreprises allemandes à forte intensité de R&D dans ce domaine, on peut citer Bosch, Siemens, TRUMPF et Zeiss.

L'Allemagne compte également des start-ups prometteuses, telles que Q.ANT et NVISION IMAGING Technologies, dont l'activité principale est axée sur les applications quantiques.

La mise en place d'un centre de compétence en technologie quantique (QTZ) d'ici à 2025 au sein du PTB dans le but de soutenir les entreprises dans la mise en œuvre des résultats de la recherche sur les technologies quantiques doit permettre au pays de conserver son avance en R&D dans ce domaine.

⁹⁰ Bundestag, prec. cit.

B. Communication et cryptographie⁹¹

Avec le DLR, l'Allemagne dispose d'une des principales institutions de recherche au monde dans le domaine de la communication quantique dans l'espace par laser. L'agence allemande peut par ailleurs compter sur le **soutien du gouvernement fédéral**, particulièrement intéressé par cette technologie et principal financeur du projet « Quantum Key Distribution with Cube-Sat (QUBE) » visant à développer du matériel pour une communication globale, à l'épreuve des écoutes, par satellite et du **projet pilote QuNET visant à établir un réseau quantique de communication de données**.

Les grandes entreprises allemandes investissent également dans le développement des technologies de communication quantique, cryptographie et/ou cryptographie post-quantique.

C'est le cas notamment des entreprises Infineon, SAP et Deutsche Telekom - cette dernière a d'ailleurs investi en 2018 dans la société suisse de cryptographie quantique ID Quantique. L'entreprise Infineon développe, quant à elle, des technologies dites de cryptographie post-quantique pour des applications sans contact puce permettant de protéger des documents d'identité sensibles.

L'Allemagne a également des start-ups prometteuses telles qu'InfiniQuant (Erlangen), spécialisée dans la cryptographie quantique ou QuantiCorSecurity (Darmstadt), qui se concentre sur la cryptographie post-quantique.

C. Informatique⁹²

Dans ce domaine, l'Allemagne a **longtemps privilégié la recherche fondamentale** permettant au pays de disposer aujourd'hui d'un réseau de recherche solide et d'infrastructures de pointe, en particulier au sein du **centre de recherche de Jülich**. Des projets de collaboration ont, en outre, été mis en place entre le centre de recherche de Jülich, Google et D-Wave et entre l'Université de la Bundeswehr à Munich et IBM.

Deux universités (Saarland) et centres de recherches (Jülich) allemands sont également fortement impliqués dans le projet OpenSuperQ, le projet phare de l'UE en matière de quantification, qui a pour but de développer un ordinateur quantique allant jusqu'à 100 qubits supraconducteurs.

⁹¹ ACATECH, prec. cit.

⁹² ACATECH, prec. cit.

L'Etat fédéral a annoncé en 2020 son objectif de développer deux ordinateurs quantiques allemands via, notamment, les fonds du plan de relance COVID. Le développement de ces ordinateurs devrait passer par des appels offres dont les contours ne sont pas encore connus.

En septembre 2019, la société Fraunhofer a annoncé avoir conclu un accord avec la société américaine IBM afin d'accueillir un ordinateur quantique sur le sol allemand. Cette annonce fait suite à une rencontre entre la chancelière allemande Angela Merkel et la directrice d'IBM Ginni Rometty.

Finalement, c'est le 30 janvier 2020 que le président de la société Fraunhofer a pu annoncer que l'ordinateur sera prêt à être utilisé le 1er janvier 2021 et se situera sur le siège allemand d'IBM à Ehningen, dans le Bade-Wurtemberg. Le centre sera prévu pour accueillir à la fois les scientifiques et les moyennes et grandes entreprises avec pour objectif de faire avancer le domaine de l'informatique quantique pour l'industrie et les processus orientés application.

Au lendemain de l'annonce de la fin des négociations entre IBM et la Société Fraunhofer, le BMBF a révélé une nouvelle initiative pour le quantique. Dotée à hauteur de 300 millions d'euros, cette initiative vise à développer un ordinateur « made in Germany ». Ce budget s'ajoutera aux 70 millions déjà prévus à cet effet dans le cadre de la stratégie nationale allemande. Pour la ministre de l'Éducation et de la Recherche, il s'agit surtout de permettre à l'Allemagne de se lancer dans une course qui « n'est pas terminée », Anja Karliczek ayant tenu à rappeler que la technologie des ordinateurs quantiques ne devrait pas être maîtrisée avant une quinzaine d'années. Outre le développement technologique, l'initiative vise à garantir le développement et la conservation d'un savoir-faire au sein des entreprises allemandes.

D. Simulateur⁹³

Les chercheurs allemands font partie des leaders mondiaux dans le domaine des simulations quantiques. **Entre 2012 et 2016, on compte 101 publications allemandes dans ce domaine, plaçant le pays en deuxième position mondiale, derrière les Etats-Unis (177) mais devant la Chine (67) et le Royaume-Unis (55).**

Les instituts allemands jouent également un rôle de premier plan dans les projets phares de l'UE en matière de simulation quantique. **L'Institut Max-Planck d'optique quantique est actuellement chef de file du projet PASQuaS (Programmable Atomic Large-Scale Simulation quantique)** dont l'objectif

⁹³ ACATECH, prec. cit.

est d'augmenter les performances des plates-formes de simulation quantique existantes par un facteur de 10 à 50.

Positionnement international

I. Financements européens

L'Allemagne est le pays avec le plus grand nombre de projets et le plus grand total de financements accordés dans le cadre du 7e programme-cadre de l'UE et d'Horizon 2020.⁹⁴ Le pays a reçu 165 millions d'euros de financements européens via H2020 pour des projets liés aux technologies quantiques. Avec 21,42 millions d'euros, la société Max-Planck est le premier bénéficiaire de ces fonds suivis de l'université TU Munich (10,78 millions) et les centres Fraunhofer (9,5 millions).

L'Allemagne joue également un rôle central dans le programme EU Quantum Flagship, dont le budget s'élève à 1 milliard d'euros. **Les instituts ou entreprises allemandes sont présents dans 19 des 20 projets financés par la Commission européenne.**⁹⁵ Pour quatre de ces projets, les organismes allemands détiennent même le rôle de chef de file.

II. Comparaisons internationales

En ce qui concerne le nombre de publications, l'Allemagne occupe une position de premier plan au niveau international. **Entre 2013 et 2018 on comptabilise 1 086 publications allemandes plaçant le pays en troisième position troisième derrière la Chine (2. 986) et les États-Unis (2 494).**⁹⁶

Si l'on regarde la part des publications se trouvant parmi les dix pour cent les plus souvent citées (critère qualitatif), l'Allemagne se place cinquième derrière l'Autriche, la Suisse, les Pays-Bas et le Royaume-Uni, mais au-dessus de la moyenne mondiale.

Une analyse de la co-propriété des publications révèle également que les publications allemandes atteignent des taux de citation particulièrement élevés⁹⁷.

⁹⁴ Fraunhofer, prec. cit.

⁹⁵ ACATECH, prec. cit.

⁹⁶ Ibid.

⁹⁷ Ibid.