



**AMBASSADE
DE FRANCE
EN ALLEMAGNE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Service pour la Science et la Technologie

Technologies Quantiques

Stratégie et Recherche en Allemagne

Rapport rédigé en 2021 par :

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

Mis à jour en 2024 par :

Samuel PUJADE-RENAUD - Chargé de mission scientifique – Politique de recherche et d'innovation / Technologies numériques

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. Stratégie allemande 2022-2032	7
C. Plan d'action 2023-2026	9
D. Projets en cours	11
II. Les spécificités du contexte allemand : le rôle des Länder	13
PRINCIPAUX ACTEURS DE LA RECHERCHE ALLEMANDE EN QUANTIQUE	15
I. Les instituts de recherche	15
A. Communauté des centres de recherche Helmholtz	16
B. Société Max-Planck	21
C. Communauté de centres de recherches Leibniz	26
D. Société Fraunhofer	28
E. L'office national de métrologie (PTB)	31
F. L'Office fédéral allemand pour la sécurité de l'information (BSI)	33
II. La recherche universitaire	34
A. Les clusters d'excellence	34
B. Universités	35
Acteurs	privés
	38
III.	38
A. Grandes entreprises & PME	38
B. Start-ups	39
CARACTERISTIQUES DU PAYSAGE DE LA RECHERCHE ALLEMANDE	41
I. Positionnement de la recherche	41
A. Forces de la recherche allemande	41
	2

B.	Faiblesses de la recherche allemande	41
II.	Domaine de compétences	42
A.	Détection, imagerie et métrologie	42
B.	Communication et cryptographie	43
C.	Informatique	44
D.	Simulation	45
	POSITIONNEMENT INTERNATIONAL	46
I.	Financements européens	46
II.	Comparaisons internationales	46
A.	Publications	46
B.	Brevets	47

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 a débuté en 2018 avec l'élaboration d'une première stratégie du gouvernement fédéral¹, et s'est accentué depuis l'annonce faite par Google en 2019 de la création d'un ordinateur permettant d'atteindre la « suprématie quantique ». L'Allemagne a ensuite 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 Une nouvelle impulsion fut donnée en 2022 avec une nouvelle stratégie allemande en matière de photonique et de technologies quantiques pour les 10 années suivantes³. En un an, l'Allemagne a effectué un important pas en avant pour accompagner le développement des technologies quantiques, avec la publication. **L'Allemagne se distingue ainsi aujourd'hui comme le plus grand soutien à la recherche en informatique quantique en Europe**. Entre 2018 et 2022 près de 2,650 milliards d'euros ont été consacrés par le gouvernement fédéral à la recherche quantique outre-Rhin, tandis qu'un **plan d'action pour les technologies quantiques**⁵ publié en juin 2023, présentant les objectifs et mesures pour les 3 ans à venir, prévoit un **budget de 3 milliards d'euros d'ici 2026**.

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 de nombreux pionniers de la physique quantique ainsi que des instituts de recherche de renommée mondiale. Le pays a également multiplié, ces dernières années, les initiatives d'excellence et coopérations entre

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 BMBF, « Forschungsprogramm Quantensysteme - Spitzentechnologie entwickeln. Zukunft gestalten. », https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/5/31714_Forschungsprogramm_Quantensysteme.html

⁵ BMBF, « Handlungskonzept Quantentechnologien », https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230426-handlungskonzept-quantentechnologien.pdf?__blob=publicationFile&v=3

universités et centres de recherche extra-universitaires, comme le Centre pour la Science Quantique (IQST) à Stuttgart et Ulm, l'Institut de Hanovre pour la Technologie (HITec) à Hanovre, et le Centre pour les Technologies d'Optiques Quantiques à Hambourg. Le ministère fédéral de l'éducation et de la recherche (BMBF) s'est désormais fixé pour objectif de faire en sorte que l'Allemagne se place à la pointe mondiale de l'informatique quantique et des capteurs quantiques au sein de l'association européenne au cours de la prochaine décennie et de développer la compétitivité de l'Allemagne dans les systèmes quantiques.

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)⁷, la Société Fraunhofer⁸ et le Bundestag⁹, entre 2018 et 2020.

⁷ ACATECH, « Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation », <https://www.acatech.de/publikation/innovationspotenziale-der-quantentechnologien/>

⁸ 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

⁹ 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

Stratégie nationale quantique de 2018

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.

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.

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 était prévu que **2 milliards d'euros soient fléchés vers la recherche en technologie quantique**. L'initiative d'informatique quantique du centre de recherche aéronautique et spatiale allemand (DLR) a ainsi été doté de 740 millions d'euros pour la construction de systèmes d'ordinateurs quantiques. Le centre de recherche sur la numérisation et la technologie de la Bundeswehr (dtec.bw) a également été financé par ce plan de relance. Cependant, l'ensemble des projets précis vers lesquelles ces fonds ont été dirigés ne sont pas connus, ni le montant exact alloué aux technologies quantiques.

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 a rendu ses propositions le 9 décembre 2020.¹⁰ Celles –ci portaient 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. Cette organisation n'a cependant toujours pas vu le jour.

B. Stratégie allemande 2022-2032

Paru le 21 juin 2022, le programme *Systèmes quantiques – développer la technologie de pointe, fabriquer l'avenir*¹¹ du Ministère fédéral allemand de l'éducation et de la recherche (BMBF) présente

¹⁰ Bundesregierung, «Roadmap Quantencomputing»

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

¹¹ Quantensysteme – Spitzen Technologie entwickeln. Zukunft gestalten
(https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/5/31714_Forschungsprogramm_Quantensysteme.html)

la stratégie allemande en matière de photonique et technologies quantiques pour les 10 ans à venir.

Constatant que ces technologies présentent un énorme potentiel pour l'économie, la science et la société, la stratégie allemande vise à encourager les innovations et développer les forces de recherche et innovation dans ce domaine. L'**objectif central est de garder l'Allemagne en tête au niveau mondial**, auquel se greffent trois buts adjacents : tendre à **la souveraineté européenne** ; s'assurer que **la société et l'économie allemandes bénéficient** de ces technologies ; et soutenir le **développement durable**.

Pour ce faire, le BMBF présente une stratégie basée sur **trois piliers** :

1. **approfondir la recherche** sur les systèmes quantiques en repoussant les barrières technologiques existantes
2. **développer des applications** porteuses de solutions pour la société ou les acteurs économiques
3. **prendre soin de l'écosystème** : soutien aux chaînes d'innovation, coopérations internationales, formation de talents, implication de la société

La stratégie présente des objectifs clairs et échelonnés :

Informatique quantique	
D'ici 2026	Aboutir à un calculateur quantique compétitif au niveau international avec au moins 100 qubits à commande individuelle, évolutif jusqu'à 500 qubits
	Quadrupler le nombre de start-ups en Allemagne pour atteindre ≥ 20
	Atteindre ≥ 60 utilisateurs finaux en Allemagne , entre autres dans les secteurs de l'économie, la science et la société civile
D'ici 2032	Démontrer l'avantage quantique grâce à au moins deux applications pratiques pertinentes en Allemagne
	Maintenir le leadership mondial en matière de publications (top 3) et de brevets (rejoindre le top 5)
Capteurs quantiques	
D'ici 2026	Cinq nouveaux produits sur le marché
D'ici 2032	≥ 60 entreprises impliquées, dont 10 start-ups
	Maintenir le leadership mondial en matière de publications (top 2) et de brevets (rejoindre le top 5)
Photonique	

D'ici 2026	≥ 30 entreprises de photonique impliquées dans les technologies quantiques
D'ici 2032	≥ 1 nouveau marché de recherche intensive phare ouvert pour l'industrie photonique allemande

Pour atteindre ces objectifs la stratégie annonce la mobilisation des moyens suivants :

1. Fixer et poursuivre **des objectifs mesurables** – suivi du tableau ci-dessus.
2. Stimuler le **transfert de ces technologies : en particulier dans la recherche appliquée et l'industrie** -y compris implication des utilisateurs à un stade précoce dans la planification des mesures de soutien
3. **Détecter en amont** les nouvelles découvertes et **oser la nouveauté** : soutenir les recherches audacieuses et ainsi permettre de réduire les obstacles à la participation des entreprises à des projets à très haut risque – notamment participation d'experts aux perspectives disruptives
4. **Exploiter les points forts de l'Allemagne**, leader mondial dans le domaine de la **photonique** au niveau industriel – appui sur des facteurs de réussite éprouvés
5. **Penser à long terme et dans une perspective de souveraineté européenne** - programme ambitieux et sur 10 ans pour donner une sécurité de planification aux chercheurs
6. **Miser sur la mise en réseau, établir des synergies entre acteurs** du monde économique et scientifiques, entre technologies quantiques et photonique, entre science et industrie, entre fournisseurs et utilisateurs de technologie - soutien aux **entreprises et startups**, prise en compte de l'ensemble de la chaîne de création de valeur, mais aussi **coopération au niveau international**.
7. **Développer les talents et assurer une main-d'œuvre qualifiée de la qualité** - mesures pilotes de formation interdisciplinaire sur mesure et de perfectionnement, pour disposer d'un personnel qualifié et spécialisé.
8. Faire **adhérer la société** – *communication transparente et compréhensible pour accompagner les changements dus aux technologies quantiques ; promotion d'une vision positive de ces technologies.*

C. Plan d'action 2023-2026

Le **plan d'action pour les technologies quantiques**¹² dévoilé le 26 avril et remis au Bundestag le 11 mai 2023 vise à détailler les mesures concrètes qui seront prises dans les trois ans à venir. Les incertitudes liées au développement des technologies étant nombreuses, le gouvernement fédéral se place dans une **démarche évolutive** permettant de réadapter les objectifs et mesures avec souplesse, d'où cette courte durée relative.

¹² https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230426-handlungskonzept-quantentechnologien.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Elaboré sous la direction du ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche (BMBF), le plan d'action a été développé avec la participation des ministères fédéraux de l'Économie et de la Protection du climat (BMWK), des Finances (BMF), de l'Intérieur (BMI), de la Défense (BMVg), de la Santé (BMG) et du Numérique et des Transports (BMDV). La coordination des actions passe par la tenue régulière de réunions interministérielles. La mise en œuvre du plan d'action prévoit d'être réalisée avec un budget d'env. **3 milliards € d'ici 2026** qui se décompose de façon suivante : un budget fédéral d'environ 2,18 milliards €, 850 millions € mis à disposition par les organisations scientifiques extra-universitaires, ainsi qu'un engagement au niveau européen et international pour la promotion de l'informatique quantique.

Les différentes mesures prévues d'ici 2026 pour chaque action sont présentées ci-dessous, avec la mention des ministères impliqués.

A - Mettre les technologies quantiques au service de l'économie, de la société et des institutions publiques	
Développer l'application et l'utilisation des technologies quantiques dans tous les domaines technologiques	Tous ministères
Développer l'informatique quantique pour des applications pratiques dans l'économie, l'administration et la société, en Allemagne et en Europe	BMBF, BMWK
Renforcer les compétences pour la conception et le développement d'algorithmes quantiques	BMBF, BMWK
Mettre en place une industrie connectée de la communication quantique , commercialiser des composants adaptés aux applications, et assurer le transfert de savoir-faire vers l'économie	BMBF, BMF, BMI, BMWK
Accélérer la migration vers la cryptographie à sécurité quantique en Allemagne dans les domaines pertinents (ex : infrastructures critiques)	BMI, BMVg, BMBF
Créer des produits de capteurs quantiques commercialisables grâce à des applications phares	BMBF, BMWK
Développer des horloges optiques pour la prochaine génération de satellites Galilée avec des partenaires européens, faire avancer le développement de la prochaine génération de capteurs quantiques pour satellites	BMWK
Etudier l'utilisation des technologies quantiques dans l'administration publique , notamment dans la sécurité des communications	BMI, BMF
B - Développer la technologie de manière ciblée pour des applications futures	
Renforcer la position de l'Allemagne dans les technologies de base par des mesures ciblées	BMBF, BMWK
Développer des puces de nouvelle génération pour les technologies quantiques (ex : ordinateur quantique, applications de capteurs quantiques)	BMBF, BMWK
Développer du matériel d'informatique quantique orienté vers les applications	BMWK, BMBF
Renforcer les compétences pour la conception et le développement d'algorithmes quantiques	BMBF, BMWK
Développer et mettre sur le marché des composants pour le domaine spatial dans la détection, la navigation et la communication	BMWK

Etablir une infrastructure de qualité et une métrologie quantique fiable pour une standardisation et des caractérisations indépendantes des composants de technologies quantiques	BMWK, BMBF
C - Créer d'excellentes conditions pour un écosystème fort	
Assurer une mise en réseau étroite de tous les acteurs et toutes les activités dans les domaines scientifiques, économiques et politiques	Tous ministères
Renforcer la formation initiale et continue de spécialistes des technologies quantiques, avec un programme cohérent concernant la jeunesse académique, le personnel technique et la formation professionnelle continue	BMBF, BMWK
Créer un climat favorable à la création d'entreprises pour soutenir le développement de spin-offs issues du monde académique	BMBF, BMWK
Interagir de manière étroite avec les partenaires européens à tous les niveaux (coopération technologique, développement de normes communes pour une utilisation responsable et une infrastructure de qualité ...).	<u>Tous les ministères</u>

Le plan d'action souligne l'importance d'**actions communes** et de la **mise en réseau des différents acteurs** pour atteindre l'objectif de **souveraineté technologique**. Sont ainsi prévus :

- La **coordination interministérielle** des actions pour créer synergies et transferts de compétences ;
- Un **rôle croissant du secteur privé vis-à-vis de l'écosystème et des activités de R&D** ;
- La mise en place d'**interfaces interdisciplinaires** pour intégrer les technologies quantiques aux technologies existantes (projets communs, intégration à des programmes existants) ;
- L'implication des **acteurs nationaux mais aussi régionaux (Länder)** ;
- Une **approche stratégique européenne** – en lien avec les mesures et programmes européens existants : Horizon Europe, Digital Europe, QuantERA, EuroHPC, EuroQCI, etc

Enfin, le plan d'action aborde également la question de l'établissement de normes et standards internationaux. Sur cet aspect, **l'Allemagne a adopté un rôle moteur** ; l'organisme de certification allemand DIN a accueilli la première réunion du groupe dédié CEN/CENELEC sur les technologies quantiques à Berlin, en février 2023 – à laquelle une délégation française portée par l'AFNOR a activement participé.

D. Projets en cours

Le BMBF finance de nombreux projets appliqués ayant pour objectif de renforcer la collaboration entre science et industrie¹⁴. Une cinquantaine de ces projets, financés dans le cadre de plusieurs campagnes d'appels d'offre entre 2017 et 2021, sont maintenant terminés, tandis que 140 projets sont toujours en cours.

¹⁴ <https://www.quantentechnologien.de/forschung/projekte.html>

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 :

QuNET¹⁸

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** utilisé par les organismes fédéraux. Cela doit être un premier pas vers la sécurisation des données numériques. 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.

PlanQK¹⁹

Soutenu par le BMWK, l'objectif du projet PlanQK est de **développer une plate-forme pour les applications quantiques**. 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**.

OpenSuperQ²⁰

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.

JUNIQ²¹

¹⁸ BMBF, « BMBF-Initiative QuNET baut hochoveres Quantennetzwerk », <https://www.bmbf.de/de/bmbf-initiative-qunet-baut-hochoveres-quantennetzwerk-10126.html>

¹⁹ BMBF, « PlanQK », <https://plank.de/en/>

²⁰ Union européenne, « OpenSuperQ », <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/content/opensuperq-quantum-computer-based-superconducting-integrated-circuits>

²¹ Centre de compétence de Jülich, « Startschuss für JUNIQ », <https://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/UK/DE/2019/2019-10-25-juniq.html>

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.**

PASQuanS2²²

Ce projet est la suite du projet PASQuanS, démarré en 2018 et terminé en 2022, dont l'objectif était de **créer un environnement dans lequel les atomes froids peuvent être simulés.** Ce nouveau projet vise à développer la prochaine génération de simulateurs quantiques atomiques programmables à grande échelle fonctionnant avec jusqu'à 10 000 atomes. Il est coordonné par l'institut Max Planck d'optique quantique.

QCFD²³

Coordonné par l'Université de Hambourg et financé dans le cadre d'Horizon Europe, le projet **développe un framework de logiciel quantique** pour résoudre un large éventail de problèmes de dynamique des fluides informatiques pertinents pour l'industrie.

Euro-Q-Exa²⁴

Le projet « **European Quantum Computing for Exascale HPC** », ou Euro-Q-Exa, a pour but **d'intégrer des ordinateurs quantiques dans un superordinateur existant et dans le calcul à haute performance (HPC) au Leibniz Supercomputing Centre (LRZ).** Outre le BMBF, qui apporte un financement de 40,1 millions d'euros sur les 45,3 millions d'euros prévus, le consortium européen EuroHPC JU et le ministère bavarois des sciences et des arts sont à l'origine de ce projet.

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

²² Union Européenne, « PASQuanS2 », <https://pasquans2.eu/>

²³ Union Européenne, « QCFD », <https://qt.eu/projects/computing/qcfd>

²⁴ Communiqué de presse du BMBF, <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/pressemitteilungen/de/2023/09/230901-Euro-Q-Exa.html>

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).**

Bavière²⁷

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** afin de renforcer son projet de « **Munich Quantum Valley** », qui bénéficie également de 80 millions d'euros de fonds fédéraux. Ces financements sont 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). En août 2022, cinq projets de recherche ont bénéficié d'un financement total de presque 17 millions d'euros²⁸.

Bade Wurtemberg ²⁹

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-Brigau 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** dédié au financement de la création du « Centre de compétence en informatique quantique du Bade-Wurtemberg » coordonné par les instituts Fraunhofer IAF et IAO, et qui a accueilli le premier ordinateur quantique « Quantum System One » d'IBM en Allemagne. Le Bade-Wurtemberg a par la

²⁷ Fraunhofer-Gesellschaft, « Das Munich Quantum Valley – ein Sprung für Quantenwissenschaft und -technologie », <https://www.mpg.de/16243526/munich-quantum-valley>

²⁸ <https://www.munich-quantum-valley.de/de/neuigkeiten/nachricht/nearly-17-million-euros-funding-for-lighthouse-projects>

²⁹ 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/>

suite annoncé **plusieurs financements de groupes de recherches** en 2021 (19 millions d’euros), 2022³⁰ et 2023³¹ (12 millions d’euros chacun).

Rhénanie-du-Nord-Westphalie³³

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 mais avec un centre de coordination créé en 2019 (« QT.NMWP.NRW »), le Land a annoncé deux financements conséquents en 2020 : le premier pour la construction du centre de compétence de Jülich (environ 25 millions d’euros) et un second pour la création d’un laboratoire des systèmes photoniques quantiques (PhoQS Lab) au sein de Université de Paderborn (environ 30 millions d’euros). En mars 2022, le Land annonce la création du réseau « EIN Quantum NRW » financé pour 5 ans à hauteur de 20 millions d’euros³⁴.

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.

³⁰ Land Bade-Wurtemberg, <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/land-foerdert-verbundforschungsprojekte-zum-quantencomputing-1/>

³¹ Land Bade-Wurtemberg, <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/land-foerdert-verbundforschungsprojekte-zum-quantencomputing-2/>

³³ Land Rhénanie-du-Nord-Westphalie, « Förderung von drei Forschungsbauten », <https://www.land.nrw/de/pressemitteilung/gemeinsame-wissenschaftskonferenz-beschliesst-foerderung-von-drei-forschungsbauten>

³⁴ Land Rhénanie-du-Nord-Westphalie, <https://www.land.nrw/pressemitteilung/ein-quantum-nrw-nordrhein-westfalen-buendelt-seine-kraefte-fuer-den-aufbruch-ins>

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)**³⁵ 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**³⁶.

La répartition des compétences en recherche quantique au sein des centres Helmholtz peut se résumer comme suit³⁷ :

- 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

La communauté des centres de recherche Helmholtz dispose également d'une stratégie dédiée.³⁸

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 **un des principaux centres de recherche en technologie quantique en Allemagne** en raison de l'existence d'un « Supercomputing Centre » et d'infrastructures dédiées. Le centre héberge notamment le « **Jülich UNified Infrastructure for Quantum computing** » (**JUNIQ**)³⁹, une infrastructure publique d'informatique quantique comprenant une plateforme de calcul

³⁵ 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

³⁶Ibid.

³⁷ Bundestag, prec. cit.

³⁸ Helmholtz Gesellschaft, prec. cit.

³⁹ Forschungszentrum Jülich, <https://www.fz-juelich.de/en/ias/jsc/systems/quantum-computing/juniqu-facility/juniqu>

quantique (QC-PaaS) ainsi que des ordinateurs et simulateurs quantiques : le « Jülich Universal Quantum Computer Simulator » (JUQCS), l'ordinateur quantique du projet européen OpenSuperQ ou encore le « quantum annealer » de D-Wave à plus de 5000 qubits. Le centre de recherche de Jülich s'est également illustré en 2019 par la **signature d'un partenariat de recherche en informatique quantique avec Google** pour des recherches communes et la formation d'experts.⁴⁰

Les budgets du FZJ s'élevaient en 2021 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.

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 combinera six domaines de recherche et sept clusters technologiques allant des matériaux quantiques aux systèmes informatiques quantiques complets.⁴⁴ 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.**

b. Le DLR

DLR Quantum Computing Initiative (QCI)

Depuis mai 2022, la **Quantum Computing Initiative QCI**⁴⁵ est coordonné par le DLR pour structurer l'écosystème allemand actif autour de l'informatique quantique. Le BMWK a mis à la disposition de

⁴⁰ 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>

⁴⁴ Centre de recherche de Jülich, « *Helmholtz Quantum Center* », https://www.fz-juelich.de/portal/DE/Forschung/it-gehirn/quantentechnologie/Helmholtz_QuantumCenter.html

⁴⁵ DLR Quantum Computing Initiative, <https://qci.dlr.de/>

cette initiative **740 millions d'euros**⁴⁶ provenant du fonds de relance. L'objectif est de construire un certain nombre de prototypes d'ordinateurs quantiques avec différentes architectures pendant 4 ans au sein d'un consortium composé du DLR, de partenaires industriels et d'autres institutions de recherche. Environ 80 % du financement est réparti entre les partenaires industriels, tandis que le DLR utilise les 20 % restants du financement pour ses propres travaux de recherche et de développement.

Le DLR a mis en place deux centres d'innovations pour le développement commun d'ordinateurs quantiques dans le cadre de l'initiative QCI, à Hambourg et à Ulm.

Centre d'innovation pour l'informatique quantique – Hambourg

Le centre d'innovation DLR de Hambourg, installé sur le campus de NXP Semiconductors (Philips), accueille différents projets d'industriels sur le **développement d'ordinateurs quantiques évolutifs**, avec la participation de l'université technique (TU) de Hambourg. Le DLR finance le centre à hauteur de **208,5 millions d'euros**. Fin 2023, un démonstrateur avec dix qubits ioniques doit être construit dans le cadre d'un premier sous-projet. NXP Semiconductors Germany, Eleqtron ainsi que Parity Quantum Computing Germany de Munich y participent.

Institut des technologies quantiques – Ulm⁴⁷

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.

Deux autres instituts du DLR 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.⁴⁸

⁴⁶ DLR Quantum Computing Initiative, <https://qci.dlr.de/en/dlr-teams-up-with-industry-to-develop-german-quantum-computers/>

⁴⁷ DLR, « Institute of Quantum Technologie », https://www.dlr.de/qt/en/desktopdefault.aspx/tabid-13498/23503_read-54020/

⁴⁸ 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

Institut de géodésie satellitaire et de technologie des capteurs inertiels – Hanovre/Brême⁵⁰

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 - Oberpfaffenhofen⁵¹

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).**

c. 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 solaire⁵²** 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 »⁵³** dont l'objectif est l'étude de nouveaux systèmes quantiques pour l'énergie et les **technologies de l'information**. Le laboratoire est spécialisé dans les domaines suivants : fluide de spin quantique 3D, Bethe Strings, fluide de spin quantique 2D.

⁵⁰ DLR, « Institute for Satellite Geodesy and Inertial Sensing », https://www.dlr.de/si/en/desktopdefault.aspx/tabid-13381/23374_read-54011/

⁵¹ DLR, « Galileo kompetenzzentrum », <https://www.dlr.de/content/de/institutspraesentation/galileo-kompetenzzentrum.html>

⁵² HZB, « über uns », https://www.helmholtz-berlin.de/zentrum/index_de.html

⁵³ HZB, « CoreLab Quantum Materials », https://www.helmholtz-berlin.de/forschung/quellen/corelabs/quantum-materials/index_en.html

d. Le centre Helmholtz de Dresde-Rossendorf - HZDR

Rattaché en 2011 à la communauté des centres Helmholtz, le HZDR⁵⁴ 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**.

e. 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**.⁵⁵

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**.⁵⁶

f. Le Synchrotron d'électrons allemand à Hambourg - DESY

Le DESY est l'un des principaux centres d'accélération de particules au monde, et un des plus importants centres de recherche en physique européen après le CERN à Genève. Le centre de recherche a un budget annuel d'environ 170 millions d'euros.

Le DESY est actif dans la recherche et le développement de l'informatique quantique et des capteurs quantiques. En novembre 2021, le **Centre pour les applications d'informatique quantique (CQTA)** fut

⁵⁴ HZDR, « Quantum Materials and Technology », <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=56050&pNid=603>

⁵⁵ Bundestag, prec. cit.

⁵⁶ KIT, « Institut für QuantenMaterialien und Technologien (IQMT) », <https://www.iqmt.kit.edu/>

inauguré sur le site du DESY à Zeuthen, près de Berlin. Ce dernier est doté d'un budget de **15 millions d'euros pour 5 ans** provenant du Land de Brandebourg. Le CQTA est notamment devenu un **hub de l'IBM Quantum Network**. Ce partenariat lui permet de recevoir des licences d'accès aux ordinateurs quantiques d'IBM pour explorer les questions scientifiques du domaine mais aussi des applications industrielles.

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 brevets) et la participation à des réseaux de recherche nationaux et internationaux. **Aujourd'hui, 11 des 86 instituts Max Planck sont impliqués dans la recherche sur les technologies quantiques à travers la Max Planck Quantum Alliance (MPQA)⁵⁷.** Cette alliance permet l'organisation de la coopération entre les départements ayant des activités dans le domaine des technologies quantiques pour une meilleure visibilité mondiale. Les instituts peuvent être regroupés en grandes catégories de recherche⁵⁸ :

- Informatique et simulation quantiques (Berlin, Dresde, Garching, Halle, Hambourg, Stuttgart, Leipzig et Sarrebruck),
- Communication quantique, dont communication par satellite (Garching et Erlangen),

⁵⁷ Max Planck Quantum Alliance, <https://max-planck-quantum-alliance.mpg.de/>

⁵⁸ Bundestag, prec. cit.

- Métrologie quantique (Hanovre et Erlangen)



Institut Max Planck d'optique quantique (MPQ) – Garching⁵⁹

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

L'institut a également créé, en partenariat avec les deux universités munichoises LMU et TUM, une **école de recherche internationale Max Planck, « IMPRS for quantum Science and Technology »**. Ce programme commun entre les trois institutions offre des programmes doctoraux dans les domaines de la physique des atomes, l'optique quantique, la physique des états solides, la science des matériaux, la théorie de l'informatique quantique et les systèmes quantiques multi-corps. Il s'agit aussi d'une plateforme d'activités communes pour la communauté de recherche scientifique des technologies quantiques.

⁵⁹ Max Planck Gesellschaft, « Max Planck Institut für Quantenoptik », <https://www.mpg.mpg.de/>

Institut Max Planck de physique gravitationnelle (AEI) - Potsdam/Hanovre ⁶⁰

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.

Institut Max-Planck de physique des systèmes complexes (PKS) – Dresde⁶¹

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) – Erlangen⁶²

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

⁶⁰ Max Planck Gesellschaft, « Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik », <https://www.aei.mpg.de/2772/de>

⁶¹ Max Planck Gesellschaft, « Max-Planck-Institut für Physik komplexer », <https://www.pks.mpg.de/>

⁶² Max Planck Gesellschaft, « Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts », <https://mpl.mpg.de/de/>

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

Institut Max-Planck de recherche sur l'état solide (FKF) – Stuttgart⁶³

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) – Dresde⁶⁴

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 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.

Institut Max-Planck pour la structure et la dynamique de la matière (MPSD) – Hambourg⁶⁵

L'Institut Max-Planck pour la structure et la dynamique de la matière (MPSD) est situé 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

⁶³ Max Planck Gesellschaft, « Max-Planck-Institut für Festkörperforschung », <https://www.fkf.mpg.de/de>

⁶⁴ Max Planck Gesellschaft, « Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe », <https://www.cpfs.mpg.de/de>

⁶⁵ Max Planck Gesellschaft, « Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie », <https://www.mpsd.mpg.de/>

particulier dans le domaine des processus physiques et des réactions chimiques très rapides . 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) - Halle⁶⁶

Fondé en 1992, 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 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) - Berlin⁶⁷

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 est dédié au transport quantique et nanoélectronique.

Le centre Max-Planck-UBC-UTokyo pour les matériaux quantiques⁶⁸

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.

⁶⁶ Max Planck, « Gesellschaft, Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik », <https://www.mpg.de/153709/mikrostrukturphysik>

⁶⁷ Max Planck Gesellschaft, « Fritz-Haber-Institut », <https://www.fhi.mpg.de/de>

⁶⁸ Max Planck Gesellschaft, « Max Planck - UBC – Utokyo », <https://www.fkf.mpg.de/mpg-ubc>

C. Communauté de centres de recherches 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 (FBH) – Berlin⁶⁹

L'institut Ferdinand-Braun, aussi connu sous le nom d'institut Leibniz pour la recherche sur la haute fréquence (FBH), 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.

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) - Dresde⁷⁰

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'Oder⁷¹

⁶⁹Ferdinand-Braun-Institut, « quantentechnologie », <https://www.fbh-berlin.de/forschung/quantentechnologie>

⁷⁰ Bubdestag, prec. cit.

⁷¹ Ibid.

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, les circuits micro-ondes destinés à la manipulation de systèmes quantiques ainsi que sur les circuits intégrés électronique-photonique.

Institut Leibniz sur la croissance des cristaux (IKZ) – Berlin⁷²

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. 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) – Iéna⁷³

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.

Institut Max Born d'optique non linéaire et de spectroscopie à impulsions courtes (MBI) - Berlin⁷⁴

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 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

⁷²Leibniz-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>

⁷³ Bundestag, prec. cit

⁷⁴ Max-Born-Institut f. Nichtlineare Optik u. Kurzzeitspektroskopie, « Overview over the MBI research program », <https://mbi-berlin.de/research/research-program>

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) - Berlin⁷⁵

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) - Berlin⁷⁶

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, 76 instituts, > 30.300 employés, budget annuel de 3 Md€ dont 2,6 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. Les travaux menés au sein de la Fraunhofer concernent un grand nombre de domaines d'application des technologies quantiques, à commencer par 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.

La société Fraunhofer est particulièrement active dans le domaine de l'informatique quantique. **Depuis janvier 2021, elle dispose d'un accès exclusif à un ordinateur quantique de 27 qubits supraconducteurs, Quantum System One, exploité par IBM sur le site d'Ehningen (Bade-**

⁷⁵ 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/>

⁷⁶ Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik, « Quantum models for semiconductors », <https://www.wias-berlin.de/research/ats/Quantenmech/?lang=1>

Wurtemberg). Elle a également un accès en nuage à plusieurs ordinateurs quantiques d'IBM aux États-Unis. **Le réseau de compétence de la Fraunhofer sur l'ordinateur quantique** rassemble 19 instituts de la Fraunhofer, organisés de la façon suivante :

- Bade-Wurtemberg – Fraunhofer IAO, IPA, IWM : hardware quantique, systèmes informatiques hybrides
- Bavière – Fraunhofer AISEC, IIS, IKS : sécurité et robustesse des systèmes quantiques
- Berlin – Fraunhofer FOKUS : plateformes quantiques
- Hesse – Fraunhofer IGD, SIT : sécurité et calcul hétérogène
- Rhénanie-du-Nord-Westphalie – Fraunhofer ILT, IMS, SCAI, IAIS : science et ingénierie quantiques
- Rhénanie-Palatinat – Fraunhofer ITWM : HPC quantique (High Performance Computing), algorithmique
- Sachse – Fraunhofer IWU, IIS-EAS, IAIS-EST, IOSB-AST : informatique quantique appliquée
- Thuringe – Fraunhofer IOF, IOSB-AST : plates-formes photoniques, ingénierie des systèmes optiques et composants

Fraunhofer CAP-UK⁷⁸

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'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.

Fraunhofer HHI⁷⁹

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

⁷⁸ Fraunhofer-Gesellschaft, « Quantum Technologies »

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

⁷⁹ Fraunhofer-Gesellschaft HHI, « Field of Research: Quantum Technologies »,

<https://www.hhi.fraunhofer.de/en/fraunhofer-hhi/fields-of-research/quantum-technologies.html>

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.

Fraunhofer IOF⁸⁶

Basé à Iéna (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.

Son président, le Prof. Dr. Andreas Tünnermann, est le **porte-parole de la société Fraunhofer en ce qui concerne la recherche stratégique des technologies quantiques.**

Fraunhofer FOKUS⁹³

Basé à Berlin, l'institut Fraunhofer FOKUS est spécialisé dans le domaine des **technologies de l'information et des communications**. Les recherches de l'institut portent sur la simulation, l'optimisation et l'apprentissage automatique, par exemple l'accès aux algorithmes quantiques via des interfaces ouvertes standardisées, l'assurance qualité, la mitigation des erreurs des systèmes quantiques ainsi que la mise en place de schémas de certification.

Fraunhofer IAF⁹⁴

Basé à Fribourg-en-Brisgau (Bade-Wurtemberg), l'institut Fraunhofer IAF recherche et développe des procédés et des applications adaptés à l'industrie, sur la base de **capteurs et d'ordinateurs quantiques**. La recherche de l'institut se concentre sur l'étude des composants et des systèmes basés sur des matériaux tels que le diamant et le SiC, ainsi que l'intégration des composants dans les systèmes et

⁸⁶ Fraunhofer-Gesellschaft IOF, « Optische Quantentechnologien », <https://www.iof.fraunhofer.de/de/kompetenzen/zukunftstechnologien/Quantentechnologie.html>

⁹³ Fraunhofer-Gesellschaft FOKUS, « Quantum Computing », <https://www.fokus.fraunhofer.de/en/fokus/research-topics/quantum-computing>

⁹⁴ Fraunhofer-Gesellschaft IAF, « Quantum Systems », <https://www.iaf.fraunhofer.de/en/researchers/quantum-systems.html>

l'élaboration de solutions matérielles et logicielles pour les systèmes quantiques de deuxième génération.

Fraunhofer IMS⁹⁷

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.

Fraunhofer IMW⁹⁸

L'institut IMW du management international et de l'économie de la science, basé à Leipzig, est le coordinateur du projet **Quantum Ecosystem Deutschland (Q.E.D.)⁹⁹** financé par le BMBF, qui a pour objectif d'accompagner scientifiquement la mise en place de chaînes d'innovation et de création de valeur souveraines dans l'écosystème de l'informatique quantique en Allemagne. Le projet, divisé en deux modules, doit contribuer à développer des connaissances opérationnelles et des stratégies pour la mise en place à moyen et long terme d'un écosystème d'informatique quantique technologiquement souverain et compétitif au niveau international.

E. L'office national de métrologie (PTB)¹⁰⁰

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.**

⁹⁷ 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>

⁹⁸ Fraunhofer-Gesellschaft IMW, « Q.E.D. Quantum Ecosystem Deutschland », <https://www.imw.fraunhofer.de/de/forschung/reg-transformation-innovationspol/innovationspolitik/projekte/QED.html>

⁹⁹ BMBF, « Q.E.D. Quantum Ecosystem Deutschland », <https://www.quantentechnologien.de/forschung/foerderung/quantencomputer-demonstrationsaufbauten/qed.html>

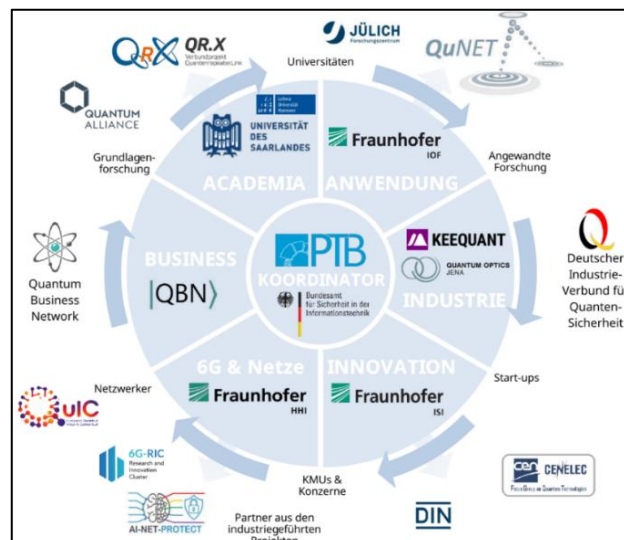
¹⁰⁰ Bundestag, prec. cit.

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).

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.¹⁰¹

Le PTB coordonne depuis janvier 2023 l'initiative **SQUAD¹⁰²** (Schirmprojekt **Quantenkommunikation Deutschland**) qui vise à rassembler l'expertise et l'infrastructure allemande autour de la communication quantique. Le consortium regroupe les partenaires suivants :

- KEEQuant GmbH, Fürth
- Quantum Business Network UG, Munich
- Université de la Sarre (UdS), Sarrebruck
- Institut Fraunhofer ISI, Karlsruhe
- Institut Fraunhofer IOF, Jena
- Institut Fraunhofer Heinrich-Hertz (HHI), Berlin
- Université Leibniz, Hanovre (LUH)



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

¹⁰¹PTB, « Quantum Technology Competence Center (QTZ) », <https://www.ptb.de/cms/nc/en/ptb/competence-centers/qtz.html>

¹⁰² SQUAD, <https://www.squad-germany.de/home>

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 ».

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

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.

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. Cet organisme publie des recommandations de procédures en matière de sécurité quantique, de communication quantique et de standardisation des méthodes.

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.¹⁰³

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 et forment le consortium Quantum Alliance¹⁰⁵.**

Noms du cluster	Organismes impliqués
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)

¹⁰³ Bundestag, prec. cit.

¹⁰⁵ Quantum Alliance, <https://www.quantum-alliance.de/>

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
Integrated Quantum Science and Technology (IQST)	Université de Stuttgart, Université d'Ulm, Institut Max-Planck de recherche sur l'état solide
Photonics, Optics, Engineering Innovation Across Disciplines (PhoenixD)	Université Leibniz de Hannover, TU Brunswick, Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH), PTB, Institut Max Planck pour la physique gravitationnelle

B. Universités

Le BMBF dénombreait, en 2021, 24 universités impliquées dans des projets de recherche publiques liés aux technologies quantiques.¹⁰⁶

Université	Départements	Spécialité
Université Albert-Ludwigs-Freiburg	Freiburger Materialforschungszentrum (FMF)	Ordinateur quantique/simulation Technologie de base pour les systèmes quantiques
Université Eberhard Karls de Tübingen	Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät –	Technologie de mesure quantique Technologies de base pour les systèmes quantiques

¹⁰⁶ BMBF Quanten technologien, « branche », <https://www.quantentechnologien.de/branche.html>

	Physikalisches Institut - Center for Quantum Science	
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 Institut für Angewandte Physik	Technologie de mesure
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	Technologie de base pour les systèmes quantiques

	Lithografie und Strukturübertragung	
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
Université 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

A. Grandes entreprises & PME

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.

¹⁰⁷

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 recensait, en 2021, 30 entreprises impliquées dans des programmes de recherche publiques dont :¹⁰⁸

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

¹⁰⁷ ACATECH, prec. cit.

¹⁰⁸ BMBF Quanten technologien, « branche », <https://www.quantentechnologien.de/branche.html>

Le consortium QUTAC¹⁰⁹ (Quantum Technology and Application Consortium), sans équivalent en France, rassemble des gros industriels allemands impliqués et engagés sur les technologies relatives à l'informatique quantique. **Crée par Infineon, il est coordonné par Lufthansa depuis janvier 2023 et rassemble 13 entreprises : Volkswagen, BMW, Infineon, Trumpf, Siemens, SAP, Munich Re, Merck, Deutsche Telekom, Bosch, Boehringer et BASF.** QuTac a participé en novembre 2022 au premier dialogue franco-bavarois sur les technologies quantiques. Actuellement, 7 projets sont en cours dans le cadre de QuTac, chaque projet étant mené par une entreprise.

L'Allemagne compte également de nombreux acteurs industriels étrangers actifs dans le domaine des technologies quantiques. **IBM** est très présent en Allemagne sur le thème de l'informatique quantique, avec notamment un partenariat avec la Fraunhofer-Gesellschaft pour la **construction à Munich du premier ordinateur quantique en Europe, Quantum System One.** IBM prévoit également la **construction d'un centre de calcul quantique avec accès cloud** à Ehningen d'ici 2024. **Google** effectue de nombreux projets de collaboration avec l'Allemagne, notamment Berlin et Munich. **Cambridge Quantum**, le leader mondial des logiciels quantiques, a ouvert un bureau à Munich pour son expansion en Europe, complétant son équipe de scientifique pour la physique de la matière condensée.

B. Start-ups

Un certain nombre de start-ups en Allemagne sont investies dans les technologies quantiques, en particulier dans le domaine de l'informatique quantique. Nous pouvons entre autres citer :

- **Bosch Quantum Sensing** : créée par le leader industriel Bosch en février 2022 à Ludwigsbourg pour développer des capteurs quantiques.
- **eleQtron** : start-up développant des ordinateurs quantiques et ayant levé plus de 50 millions d'euros.
- **HQS Quantum Simulations** : startup créée en 2018 à Karlsruhe, HQS fournit des méthodes et des logiciels de simulation quantique de pointe pour les scientifiques des matériaux dans l'industrie chimique.
- **Jos Quantum** : fondée en 2018, qui développe des algorithmes pour les ordinateurs quantiques, dans le but d'améliorer les temps d'accélération et d'affiner la prise de décision dans l'industrie financière, les assurances et la gestion de l'énergie.

¹⁰⁹ QUTAC, <https://www.qutac.de/?lang=en>

- **KEEQuant** : fondée en 2020 pour sécuriser la communication et le réseau en utilisant des clefs de sécurité quantiques.
- **Kipu Quantum** : startup d'informatique quantique créée en 2021 à Karlsruhe et qui opère à l'intersection entre les cas d'utilisation des clients, le matériel quantique et les algorithmes quantiques.
- **NVision Imaging Technologies** : basée à Ulm, cette start-up développe des agents d'IRM quantique pour évaluer la réponse précoce des patients au traitement au niveau métabolique. Elle a levée 30 millions d'euros en juin 2023.
- **Plancq** : start-up issue du Munich Quantum Valley/TUM/Max Planck et qui a notamment passé un contrat de 29 millions d'euros avec DLR pour la construction d'un ordinateur quantique
- **Q.ANT** : fondée en 2018, startup basée à Stuttgart dédiée à la photonique et au développement de capteurs et puces photoniques pour ordinateurs quantiques.
- **QC Design** : spin-off de l'Institut de théorie physique de l'Université de Ulm, créée en 2021, focalisée sur la réduction d'erreurs dans les ordinateurs quantiques.
- **Quantum Diamonds** : start-up créée en 2022 à Munich produisant des capteurs quantiques de la taille d'un atome, en diamant et avec une sensibilité sans précédent permettant de résister à des conditions extrêmes.
- **Quantum Optics Jena**, spin-off deep-tech issue de l'Institut de la Fraunhofer IOF, spécialisée dans la communication quantique (clef de sécurité quantique), à Jena.
- **Qudora Technologies** : une entreprise issue du Physikalisch-Technische Bundesanstalt et de la Leibniz Universität Hannover. Créée il y a près de 10 ans, Qudora a pour objectif de construire un ordinateur quantique commercial doté de plus de 50 bits quantiques.
- **IQM** : Bien que finlandaise, la startup IQM, dédiée à la construction d'un ordinateur quantique, est très active au sein de l'écosystème allemand, notamment à Munich.

Caractéristiques du paysage de la recherche allemande

I. Positionnement de la recherche

A. Forces de la recherche allemande

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 facteurs¹¹⁰ :

- 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, et une stratégie nationale en 2022 ;
- 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).

B. Faiblesses de la recherche allemande

Selon les experts¹¹¹, et malgré les initiatives de financement du BMBF, telles que « Enabling Start-up - Unternehmensgründungen in den Quantentechnologien und der Photonik », la principale faiblesse du paysage actuel de la recherche en Allemagne réside dans l'**absence d'apparition de nouveaux acteurs que sont les start-ups liées notamment à un manque de capital-risque et surtout de capital de croissance.**

¹¹⁰ ACATECH, prec. cit.

¹¹¹ Ibid.

Les subventions et la durée de nombreux programmes gouvernementaux ne sont également pas jugés adaptés aux besoins des « technologies de pointe » nécessitant des coûts d'infrastructure élevés et de longues périodes de développement.

Une évaluation du système global d'innovation réalisée par l'académie des technologies ACATECH suggère également une faiblesse de l'Allemagne concernant le transfert de résultats de la recherche vers l'application. Selon l'avis des experts, cela est dû au système académique allemand ne fournissant pas une reconnaissance académique suffisante pour le développement de produits.

II. Domaine de compétences

A. Détection, imagerie et métrologie¹¹²

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.

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.¹¹³

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

¹¹² ACATECH, prec. cit.

¹¹³ Bundestag, prec. cit.

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 du centre de compétence en technologie quantique (QTZ) 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.

B. Communication et cryptographie¹¹⁴

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

¹¹⁴ ACATECH, prec. cit.

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 que KEEQuant ou Quantum Optics Jena, spécialisées dans la cryptographie quantique à base de clés de sécurité quantiques.

Les forces allemandes en matière de communication quantiques sont ainsi regroupés dans **l'initiative SQUAD** (« Schirmprojekt Quantenkommunikation Deutschland ») lancée fin janvier 2023, et coordonnée par le PTB.

C. Informatique¹¹⁵

Le projet Quantum Ecosystem Deutschland¹¹⁶ (Q.E.D.), financé par le BMBF, a publié une [carte interactive](#) qui offre un aperçu complet de l'écosystème de l'informatique quantique en Allemagne et la mise en réseau de ses différents acteurs.

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.

Les universités et centres de recherches 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.

L'Etat fédéral a annoncé dans sa stratégie nationale des objectifs clairs et ambitieux : aboutir à un ordinateur quantique compétitif au niveau international avec au moins 100 qubits à commande individuelle, évolutif jusqu'à 500 qubits, et quadrupler le nombre de start-ups d'informatique quantique. Grâce aux fonds de relance de la crise du COVID, la **Quantum Computing Initiative QCI coordonnée par le DLR** permet de structurer l'écosystème allemand actif autour de cette problématique.

¹¹⁵ ACATECH, prec. cit.

¹¹⁶ Q.E.D., <https://www.quantentechnologien.de/forschung/foerderung/quantencomputer-demonstrationsaufbauten/qed.html>

L'industrie allemande a tardé à montrer des signes d'implication et/ou de volonté de prendre la tête du développement d'un ordinateur. Cependant, le **consortium QUTAC** regroupant 13 industriels allemands majeurs montre les investissements croissants dans ce domaine, initialement occupé par les start-ups.

Enfin, **l'accord entre la société Fraunhofer et IBM** afin d'accueillir un ordinateur quantique sur le sol allemand montre toute l'attractivité de l'offre allemande et de la qualité de sa recherche dans le domaine.

D. Simulation¹¹⁷

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)¹¹⁸.**

L'Allemagne possède également des atouts en matière d'infrastructures. Ainsi, le « **Jülich Universal Quantum Computer Simulator** » (**JUQCS**) permet d'héberger des ordinateurs et simulateurs quantiques performants. Avec 48 qubits, il détient le record mondial du plus grand nombre de qubits simulés.

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 PASQuanS2 (Programmable Atomic Large-Scale Simulation quantique)**, suite du projet PASQuanS2, dont l'objectif est d'augmenter les performances des plates-formes de simulation quantique existantes par un facteur de 10 à 50.

Si aucune entreprise allemande ne domine le marché international de la simulation quantique, la start-up **HQS Quantum Simulations** basée à Karlsruhe est un exemple de jeune pousse allemande prometteuse du domaine. Ayant levée 12 millions d'euros, la start-up participe au projet Euro-Q-Exa, pour lequel elle est chargée de développer des logiciels d'optimisation quantique.

¹¹⁷ ACATECH, prec. cit.

¹¹⁸ Source : Bornmann et al. 2019

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 2020¹¹⁹. 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.¹²⁰** Pour quatre de ces projets, les organismes allemands détiennent même le rôle de chef de file.

II. Comparaisons internationales

A. Publications

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).¹²¹**

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 élevés¹²².

¹¹⁹ Fraunhofer, prec. cit.

¹²⁰ ACATECH, prec. cit.

¹²¹ Ibid.

¹²² Ibid.

B. Brevets

Concernant les brevets, l'Allemagne accuse un certain retard dans le domaine des technologies quantiques de deuxième génération. **L'Allemagne n'est ainsi classée que 8^e en informatique quantique et 6^e en distribution quantique de clé.**¹²³

Aucune entreprise ou institution de recherche allemande n'apparaît dans les 35 premières institutions et entreprises à avoir déposé des brevets en informatique quantique et en distribution quantique de clé¹²⁴. Selon les experts de l'ACATECH, ce retard peut s'expliquer par le système universitaire allemand où, contrairement aux publications, les demandes de brevet n'ont que peu de poids dans la nomination et les procédures d'évaluation.

¹²³ ACATECH, prec. cit.

¹²⁴ Ibid.