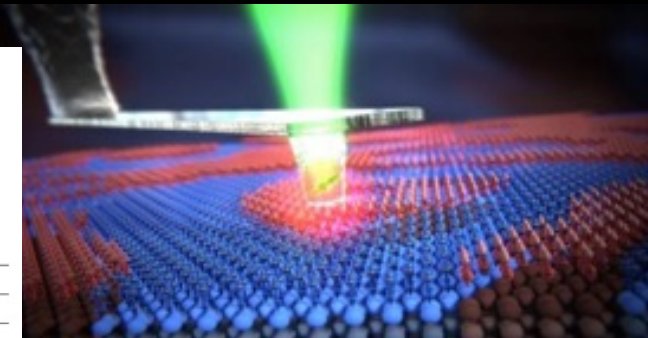
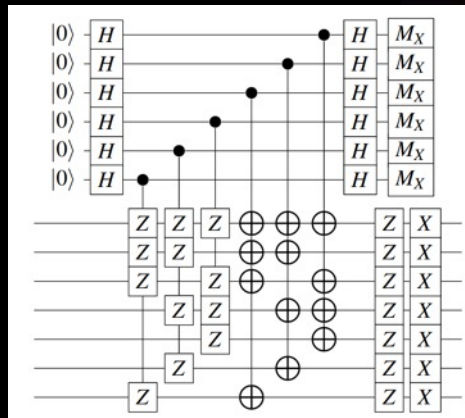
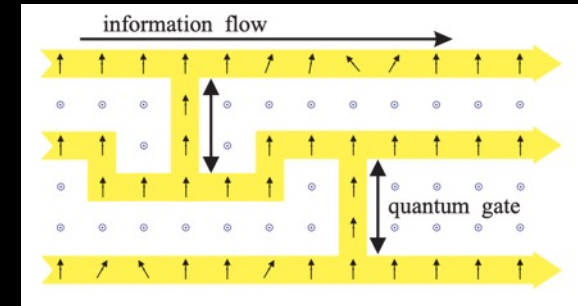
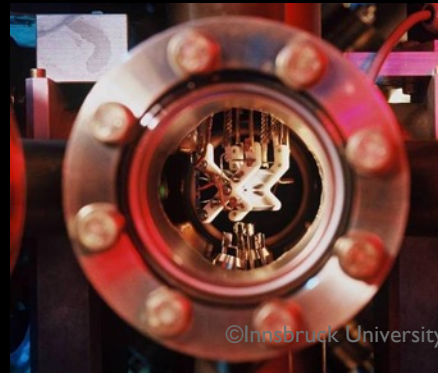


La seconde révolution quantique



ARTEQ – Formation interdisciplinaire aux sciences et technologies quantiques

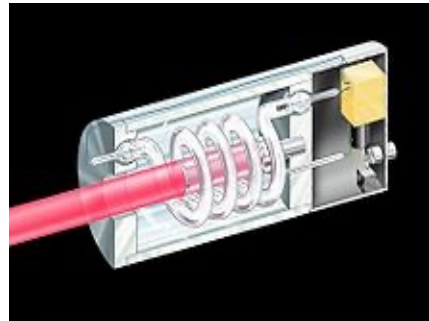
école
normale
supérieure
paris—saclay

LA PREMIERE REVOLUTION QUANTIQUE

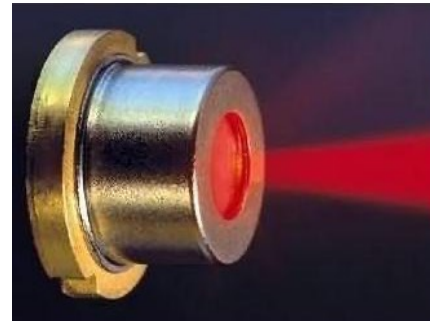
Connaissance précise et modélisation des niveaux d'énergie quantifiés



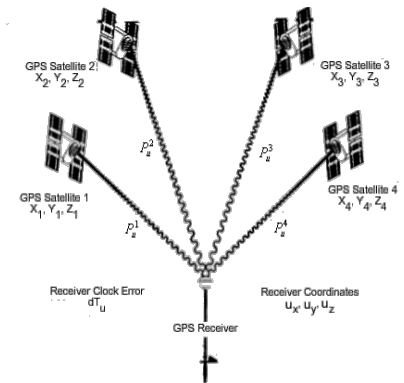
Transistor
1947



Laser à rubis
1960



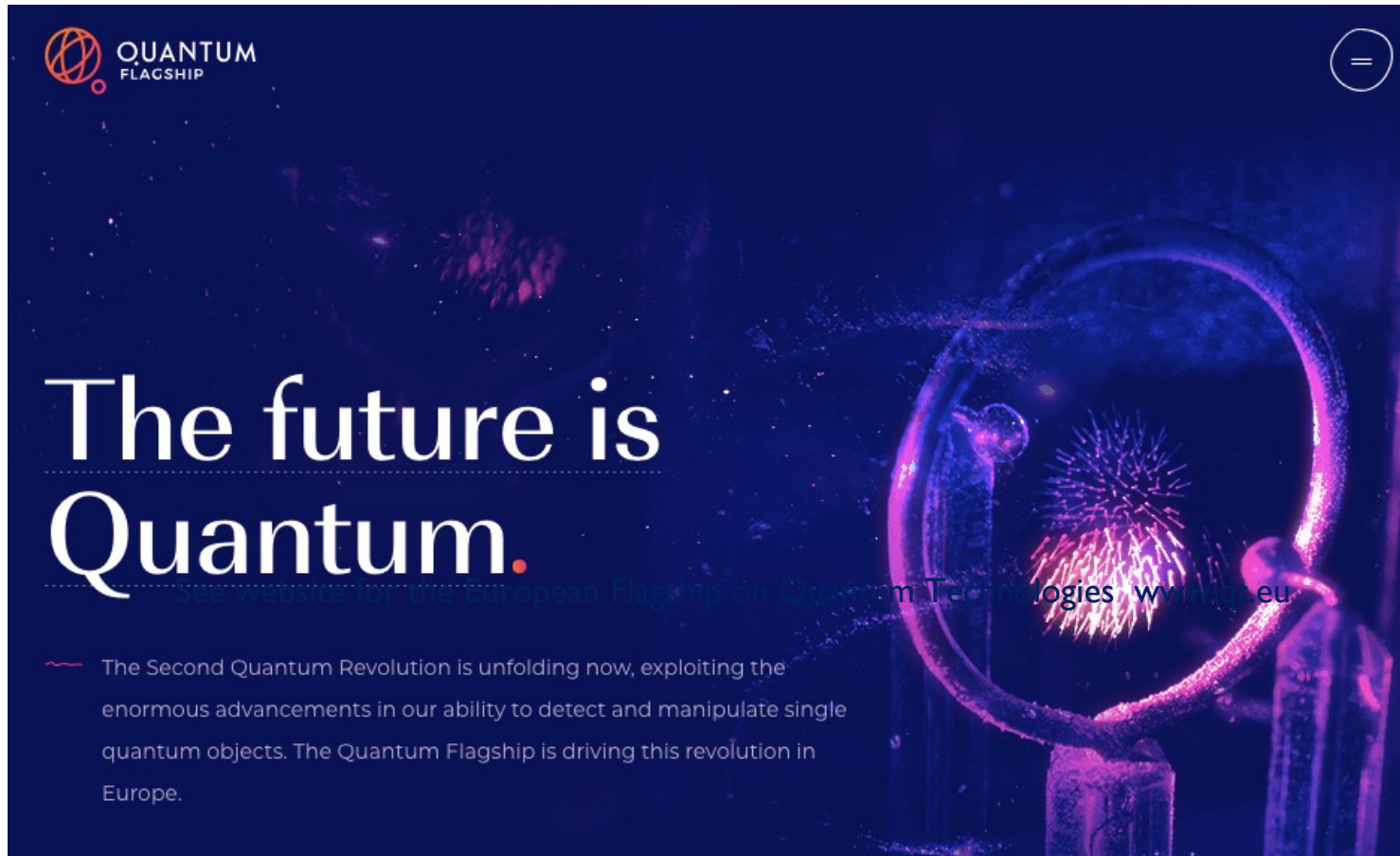
Diode laser
1962



GPS
1995

VERS UNE SECONDE REVOLUTION QUANTIQUE

Exploiter les superpositions d'états quantiques et l'intrication d'objets quantiques individuels

A promotional graphic for the Quantum Flagship initiative. The background is a dark blue space scene with a glowing, complex quantum structure on the right. The text 'The future is Quantum.' is prominently displayed in white. The Quantum Flagship logo is in the top left, and a small circular icon with an equals sign is in the top right. A line of text at the bottom explains the Second Quantum Revolution.

 **QUANTUM
FLAGSHIP**

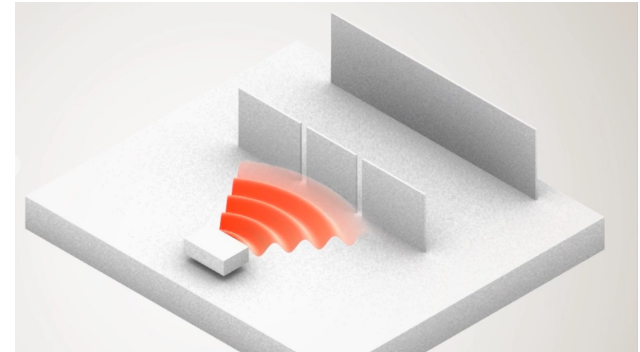
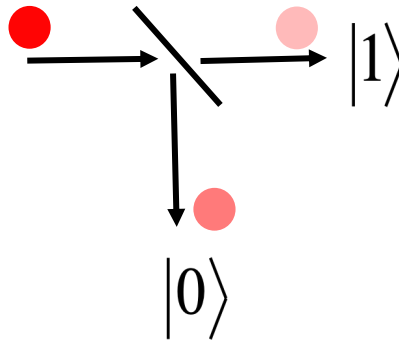


The future is Quantum.

see website for the European Flagship on Quantum Technologies www.iqteu.eu

— The Second Quantum Revolution is unfolding now, exploiting the enormous advancements in our ability to detect and manipulate single quantum objects. The Quantum Flagship is driving this revolution in Europe.

SUPERPOSITION COHÉRENTE D'ETATS QUANTIQUES

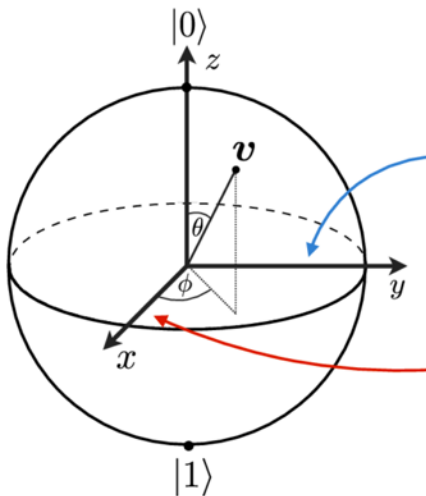


Du bit classique d'information $|0\rangle$ $|1\rangle$

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1, \quad \alpha, \beta \in \mathbb{C}$$

Pole states: au qubit



$$|i+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + i|1\rangle)$$

$$|i-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - i|1\rangle)$$

$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

$$|-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$$

INTRICATION QUANTIQUE



$$\frac{|0_A, 0_B\rangle + |1_A, 1_B\rangle}{\sqrt{2}}$$

Credit: N. Hanacek/NIST

Intrication

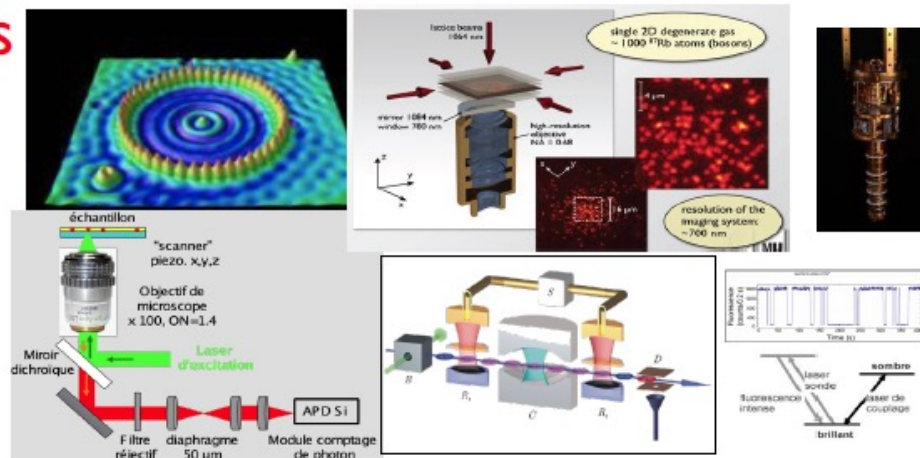
- Un concept révolutionnaire, deviné par Einstein et Bohr, conceptualisé de façon extraordinaire par Bell, tests expérimentaux par Aspect
- Utilisations pratiques proposées par Feynman et d'autres (Bennett & Brassard).
- Manipulation d'une quantité énorme d'information: parallélisme à grand échelle

QUBIT : OBJET QUANTIQUE INDIVIDUEL

Objets quantiques individuels

- Contrôle expérimental
- Description théorique (Monte-Carlo quantique)

Naturels: électrons, atomes, ions,
photons uniques, paire de photons

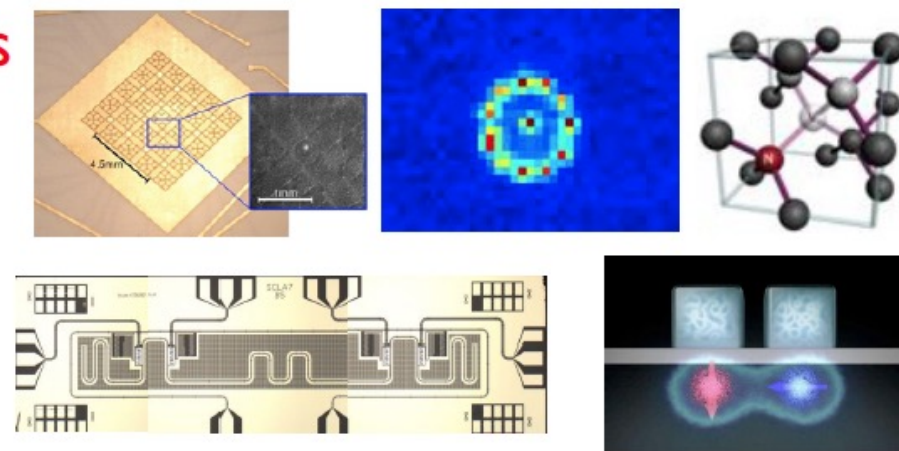


Objets quantiques individuels

- Contrôle expérimental
- Description théorique (Monte-Carlo quantique)

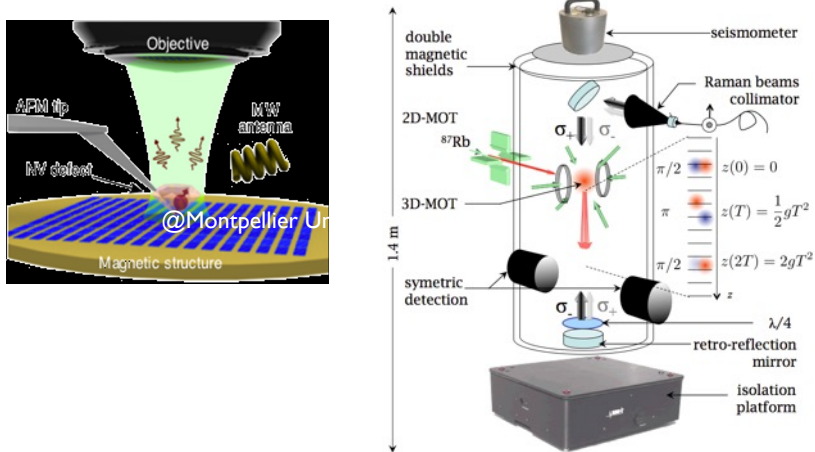
Naturels: ions, atomes de Rydberg

Artificiels: supraconducteurs,
impuretés du silicium, centres NV...

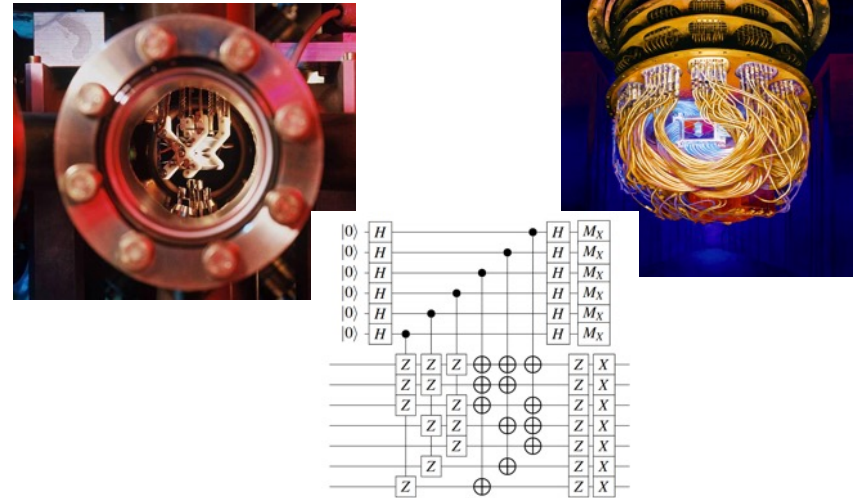


TECHNOLOGIES QUANTIQUES

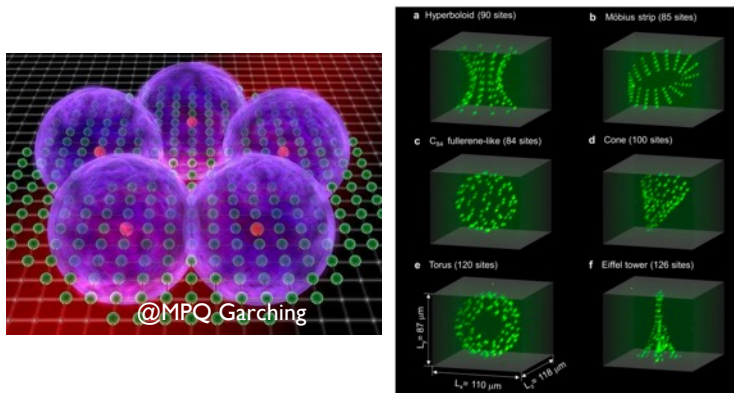
Quantum sensing



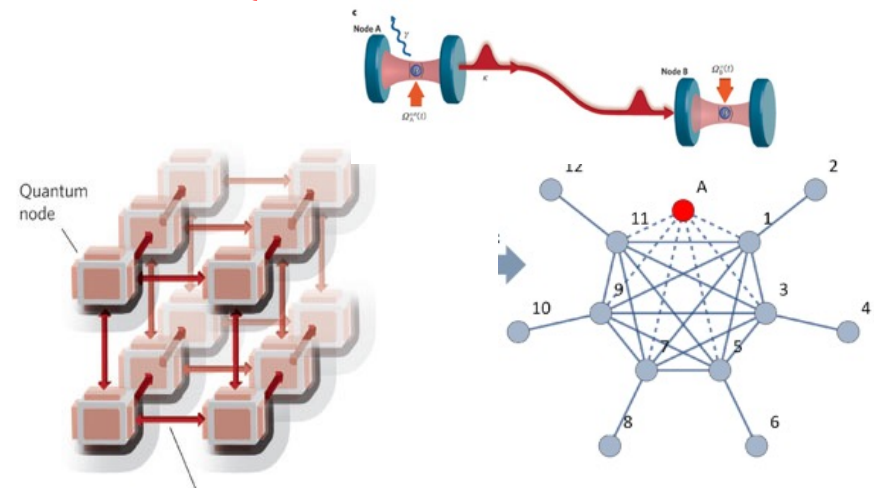
Quantum computing



Quantum simulation



Quantum communications



DEFIS DE LA SECONDE REVOLUTION QUANTIQUE



?



Challenge
fortement
interdisciplinaire



Ingénierie

Mathématiques et IA

Physique quantique



Informatique
Théorie de l'information

PLAN QUANTIQUE NATIONAL ET « ECOSYSTEME »



21 janvier 2021 au C2N
1800 M€

Formation – Recherche amont
R&D : innovation, maturation
Start-ups et grands groupes
Structuration de la communauté



22 mai 2026 au GENCI
(Bruyères-le-Châtel)
1000 M€

Développement de
l'industrie
Recherche amont
Continuer à développer la
formation à tous les niveaux



- Soutenir la recherche avec une politique intégrative vis-à-vis des équipes
- Développer les formations initiales et l'interdisciplinarité
- Mettre en place des actions de formation continue
- Renforcer les liens entre recherche, innovation et industrie, enjeux sociétaux
- Transversalité sur Paris-Saclay et lien avec les ONR (plan quantique national)

Gouvernance :
Direction
Comex

15 membres

*Assure le lien avec les
GS partenaires*

Institutions
partenaires

*UPSaclay et IP Paris
CEA, CNRS, INRIA, ONERA*

Comité institutionnel

Communauté
scientifique

*33 unités de recherches
91 équipes sur des domaines
et thématiques
coeur et connexes*

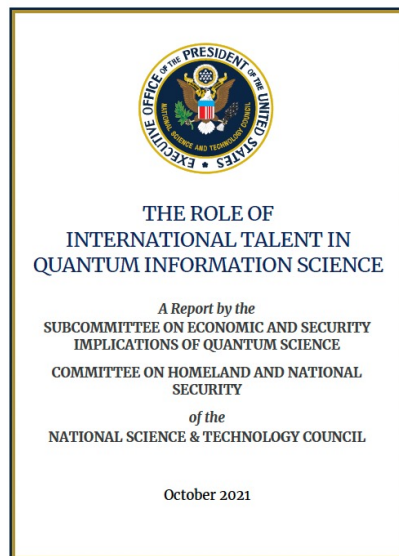
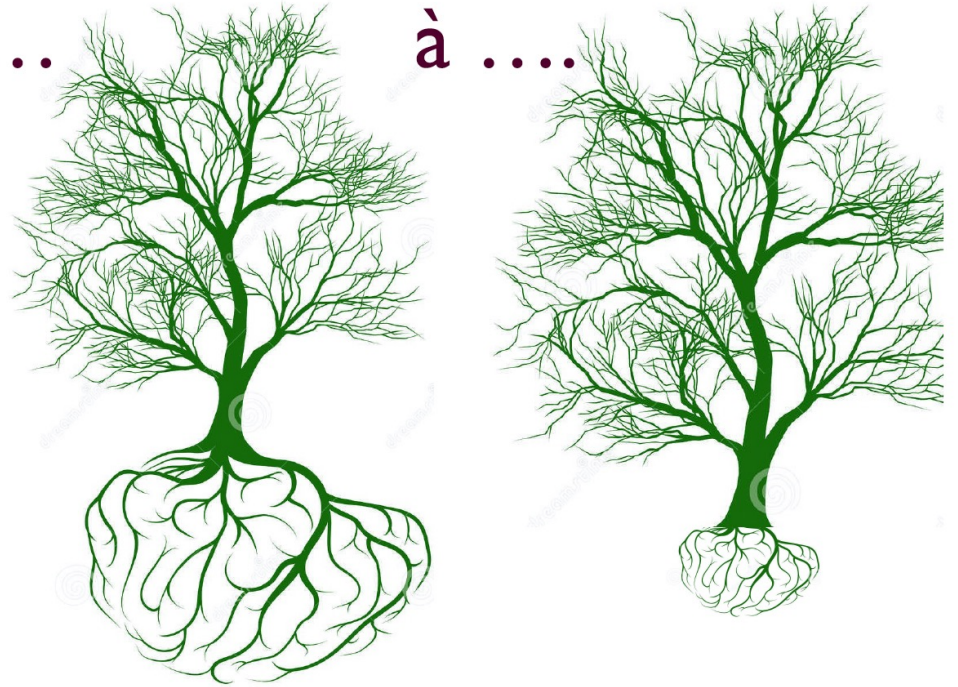
université
PARIS-SACLAY



NOURRIR LE DEVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE

Pour ne pas aller de ... à

Vivier d'embauche
Temps long de la formation
par la recherche
Maintien de la recherche
amont

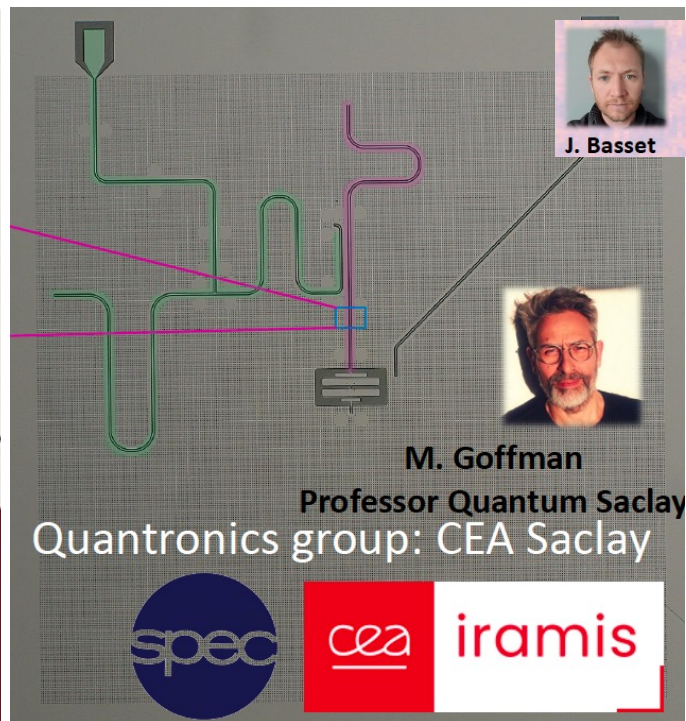
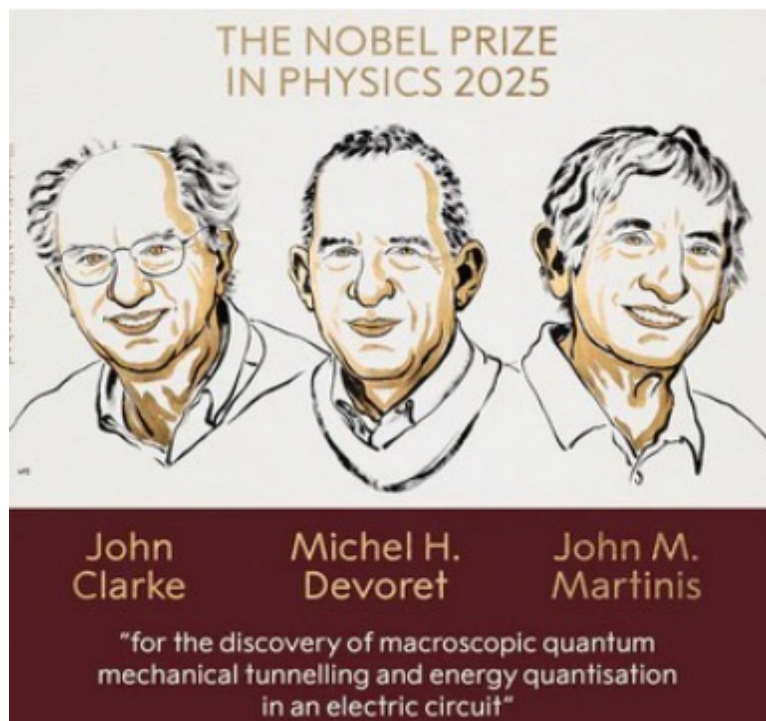


The NSTC worries about the quantum talent shortage in the USA and advocates a balanced approach between hiring international talent and protecting national security.

Budget total 60 M€ - 22 établissements partenaires

Aim: Coordinating & structuring the national ecosystem in higher education to meet the strategic skill-needs of research and industry

Programs ranging from Bachelor to PhD degrees



ARTeQ - Année de recherche en technologies quantiques

école
normale
supérieure
paris—saclay

quantum

université
PARIS-SACLAY

Formation créée en 2020 entre le M1 et le M2 dans la discipline d'origine

Annuler Déplacer l'objet (Z)

OU

Passerelle vers un M2 sciences, technologies et information quantique

1er semestre (septembre-janvier)

- Modules de formation
- Travaux pratiques
- Modules d'ouverture pluridisciplinaire

2e semestre (février-juillet)

Stage en laboratoire
académique ou industriel
(France ou étranger)

Diplôme universitaire de l'ENS Paris-Saclay et l'Université Paris-Saclay.

- Possibilité de suivre la formation dans le cadre du double diplôme IOGS-ENS Paris-Saclay
- L'ENS Paris-Saclay est l'établissement référent pour l'inscription et le suivi pédagogique
- Droits d'inscription : identiques à celui en master (243 € pour l'année)
- Enseignements du premier semestre à l'ENS Paris-Saclay (et Télécom Paris)
- Bourse d'étude sur le premier semestre (600 € par mois si stage sur Paris-Saclay)

ARTeQ : modules de formation

ARTeQ : Modules d'enseignement au 1^{er} semestre

- ❑ Prendre en compte la diversité des formations initiales des étudiant.es
- ❑ Laisser du temps pour le travail personnel
- ❑ Proposer des « regards croisés » sur les sujets : information-physique, théorie, expérience

Septembre - décembre

Crash-course de physique quantique (36h)	J-F. Roch (<u>LuMIn</u>) & L. Lachaud (ENS-PS)
Crash-course en théorie de l'information classique et quantique (30h)	M. <u>Weilenmann</u> (Telecom <u>ParisTech</u> , LTCl)
Éléments de physique pour les technologies quantiques (36h)	S. Schwartz (<u>Onera</u>) & J-F. Roch (<u>LuMIn</u>)
Éléments d'informatique pour les technologies quantiques (40h)	M. De <u>Visme</u> , Renaud <u>Vilmart</u> & Luc Lapointe (LMF)
Calcul quantique (36h)	B. <u>Valiron</u> (LISN)
Quantum hardware, lumière et matière (36h)	P. <u>Senellart</u> (C2N) & J-D. Pillet (Ecole Polytechnique, PMC)
Matière quantique et simulation quantique (36h)	J. Bloch (C2N) & M-O. <u>Goerbig</u> (LPS)

Janvier - février

Travaux pratiques	* Illustration des fondamentaux quantiques * Initiation aux micro-ondes dans les TQ
Formation à la programmation quantique	Langages <u>Qiskit</u> et <u>Perceval</u> (<u>Quandela</u>)
Séminaire	Sensibilisation à l'entrepreneuriat (E. <u>Langrognnet</u>)
Visites	LCF, C2N, ONERA, QCMX

ARTeQ : applications aux cas d'usage

Semaine “Practical quantum computing” Jean Senellart (Quandela)

- **4 séances de cours/notebooks. Thèmes 2025 :**

Computing with single photons

Quantum Computing frameworks

Quantum Algorithm zoo

- **2 jours de mini-hackaton**

→ **Use case** à solutionner (sujet 2026 tiré de la Qiskit Quantum Fallfest 2025)

→ **Accompagnement** par un mentor

→ **Accès au calculateur** via le Cloud

→ **Restitution orale** de la solution proposée

→ **Réflexion sur l'impact** industriel de l'algorithme développé

ARTeQ : informatique classique

Classical computing for quantum scientists Olivier Ezratty

cours 1: **histoire de l'informatique**

grandes générations de technologies des lampes aux circuits intégrés, les approches systèmes, l'origine du succès d'IBM, la naissance de la micro-informatique, architecture des ordinateurs.

cours 2: **histoire des semi-conducteurs**

architecture des processeurs, techniques de fabrication, loi de Moore et « More than Moore », les mémoires cache, SRAM, DRAM et Flash, les techniques de stockage, les architectures parallèles (SIMD, ...) et le HPC (du Cray au Frontier).

cours 3: **panorama de l'IA**

origines et histoire, domaines (IA symbolique, IA connexionniste), le machine learning, le deep learning, les questions de dimensionnement, les LLMs, le hardware de l'IA (Nvidia et autres). Le lien avec l'IA dans le calcul quantique.

ARTeQ : sensibiliser à l'innovation

Sensibilisation à l'entrepreneuriat Eric Langrognet (Limpidea)

- **Jour 1 : Qu'est-ce qu'une entreprise ? Early stage**

Idées reçues, angles morts vs. la réalité. Les dimensions clés dans la création d'entreprise, les pièges classiques qui mènent à l'arrêt prématuré des projets, témoignage d'un créateur d'entreprise en "early stage".

- **Jour 2 : Techno push vs. market pull ? Mid stage**

notion de l'adéquation entre domaines d'application / intensité du besoin / création de valeur pour le client, importance du marché : "go-to-market", témoignage d'un créateur d'entreprise plus avancé dans son projet.

- **Jour 3 : Aspects financiers - Final stage**

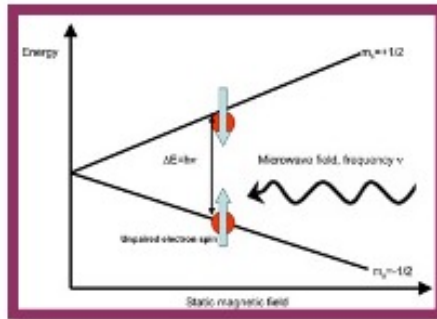
Construire les projections financières en lien avec la stratégie de pénétration du marché, stratégies de financement, importance de l'équipe de fondateurs, témoignage d'un entrepreneur dont l'entreprise est à ce stade de développement.

ARTeQ : enseignements expérimentaux (depuis 2024-2025)

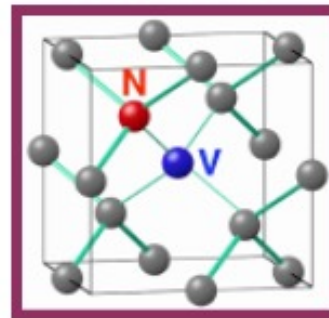
Inégalités de
Bell



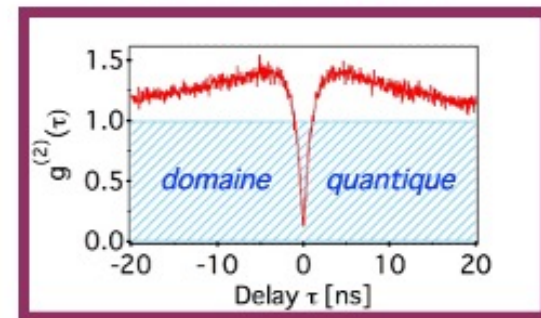
Résonance de spin



Magnétométrie
à centres NV



Source
de photons uniques



Conception de circuits micro-
ondes (logiciel Sonnet)



Génération et
contrôle de signaux



Qubit supraconducteur



Journée amont organisée avec le département SIEN (Eric Yourc'h)

Notions de base sur les micro-ondes et l'instrumentation : mixer, circulateur, paramètres S et mesures avec un analyseur de réseau vectoriel (VNA)

ARTeQ : participation à une école de recherche



Quantum NEST

Niveau Master / 1^{er} année PhD

60+ étudiants: QUARMEN, ARTeQ + autres



Edition 2023 : Trieste (Italie)

Edition 2024 : Erice (Sicile, Italie)

Edition 2025 : Palerme (Sicile, Italie)

Edition 2026 : Varenna (Italie)

ARTeQ : stages de recherche

Stages 2023-2024

IBM Quantum & University of Melbourne (Australia)
Institut de physique de l'Université Claude Bernard Lyon 1
Institut de Recherche en
Informatique Fondamentale (IRIF, Paris Cité)
Laboratoire Charles Fabry (LCF, IOGS)
Laboratoire de physique des solides (LPS, Univ. PS)
Laboratoire Méthodes Formelles (LMF, ENS PS)
Labo. d'informatique de Sorbonne Université (LIP6, Jussieu)
Laboratoire d'Informatique de l'Ecole Polytechnique (LIX, IPP)
LuMIn (ENS PS)
ONERA (Palaiseau)
OVHcloud (Roubaix)
Pasqal (Massy)
Quandela (Massy)
Renault - Technocentre Guyancourt (78)
Université de Rennes
Université de Sherbrooke (Canada)

Stages 2024-2025

German Aerospace center, Ulm, Allemagne
ONERA
Fraunhofer Institut, Allemagne
NYU Shanghai quantum lab, Chine
Laboratoire Kastler Brossel, Collège de France
CEA Saclay
Cambridge, Angleterre
Institut quantique Sherbrooke, Canada
Laboratoire de Physique des Solides, Gif sur Yvette
ENS Ulm, Paris
Universidad Autonoma de Barcelona, département des Télécommunications
Riken, Wakō, Japan
Durham, Angleterre
Barcelone, Espagne
Weling, Paris
ENS Paris-Saclay, LuMIn
NYU Shanghai quantum technology lab, Chine
Quandela, Palaiseau
Peking University, Chine

Bilan et défis pour la suite ?



Remise des diplômes à la promotion 2020-2021 04 février 2022



Défi principal : comment coupler la formation à l'IA

Est-ce qu'elle aura encore sa place avec l'intégration des enseignements technologiques dans les autres filières ?

Renouvellement : deux voies dont une pour l'accueil d'étudiants étranger