



**INNOVATION
DÉFENSE
LAB**

QUANTIQUE, POUR QUOI FAIRE ?

Restitution de l'étude et rencontre avec des fournisseurs de solution

29 janvier 2020

accueil@innovationdefense-lab.fr



Ordre du jour

- A.** Présentation de l'Innovation Défense Lab et du déroulé de la journée
- B.** Restitution de l'étude « Quantique, pour quoi faire? »
- C.** Présentations de 2 organismes présents



**INNOVATION
DÉFENSE
LAB**

A. Présentation de l'Innovation Défense Lab et du déroulé de la journée





**INNOVATION
DÉFENSE
LAB**

Intervenants :

Franck Bilau

Tisseur, Innovation Défense Lab

Vincent Joséphine

Manager, Starburst

Sébastien Leclerc

Consultant senior, Starburst





**INNOVATION
DÉFENSE
LAB**

Présentation de l'Innovation Défense Lab



agenceinnovation.dir.fct@intradef.gouv.fr



**INNOVATION
DÉFENSE
LAB**

B. Restitution de l'étude « Quantique, pour quoi faire ? »



Ordre du jour

A. Objectifs de l'étude

B. Familiarisation avec les principes de la mécanique quantique

C. Analyse des applications par grandes technologies quantiques

C.1 Capteurs

C.2 Communications et cryptographie

C.3 Calcul et simulation

D. Dynamiques des investissements dans les technologies quantiques

Cette étude vise à analyser les cas d'usage des technologies basées sur la mécanique quantique

Rappel des objectifs de l'étude

- Identifier les **grandes technologies** reposant sur la mécanique **quantique**
- Analyser les **applications** issues de ces technologies ainsi que leur **maturité**, et identifier les grands projets

Ordre du jour

A. Objectifs de l'étude

B. Familiarisation avec les principes de la mécanique quantique

C. Analyse des applications par grandes technologies quantiques

C.1 Capteurs

C.2 Communications et cryptographie

C.3 Calcul et simulation

D. Dynamiques des investissements dans les technologies quantiques

La physique quantique a permis de découvrir plusieurs propriétés remarquables déjà mises en application

Quelques notions de physique quantique

Définition

La physique quantique (ou mécanique quantique) est une théorie qui traite du **comportement des objets physiques au niveau microscopique** (atome, noyau, particules)¹⁾

Principes²⁾ différentiant par rapport à la physique classique

Mécanique classique

L'énergie d'un système peut prendre des valeurs continues

Les ondes et les corpuscules sont des systèmes séparés avec des propriétés différentes

Un système est dans un seul état à un moment « t »

Des objets distants ne peuvent avoir une influence directe l'un sur l'autre

Mécanique quantique

Principe de quantification de l'énergie
L'énergie d'un système n'évolue pas de manière continue, elle prend des valeurs discrètes bien précises, appelées « quanta »

Dualité onde-corpuscule
Les systèmes peuvent présenter à la fois des propriétés de corpuscule (atome, particule) et d'onde (lumière, électricité)

Principe de superposition quantique
Certains systèmes peuvent adopter simultanément plusieurs états et ne se fixer que lors d'une mesure

Principe d'intrication quantique
Des groupes de particules distants peuvent présenter des états dépendants les uns des autres quelle que soit la distance qui les sépare

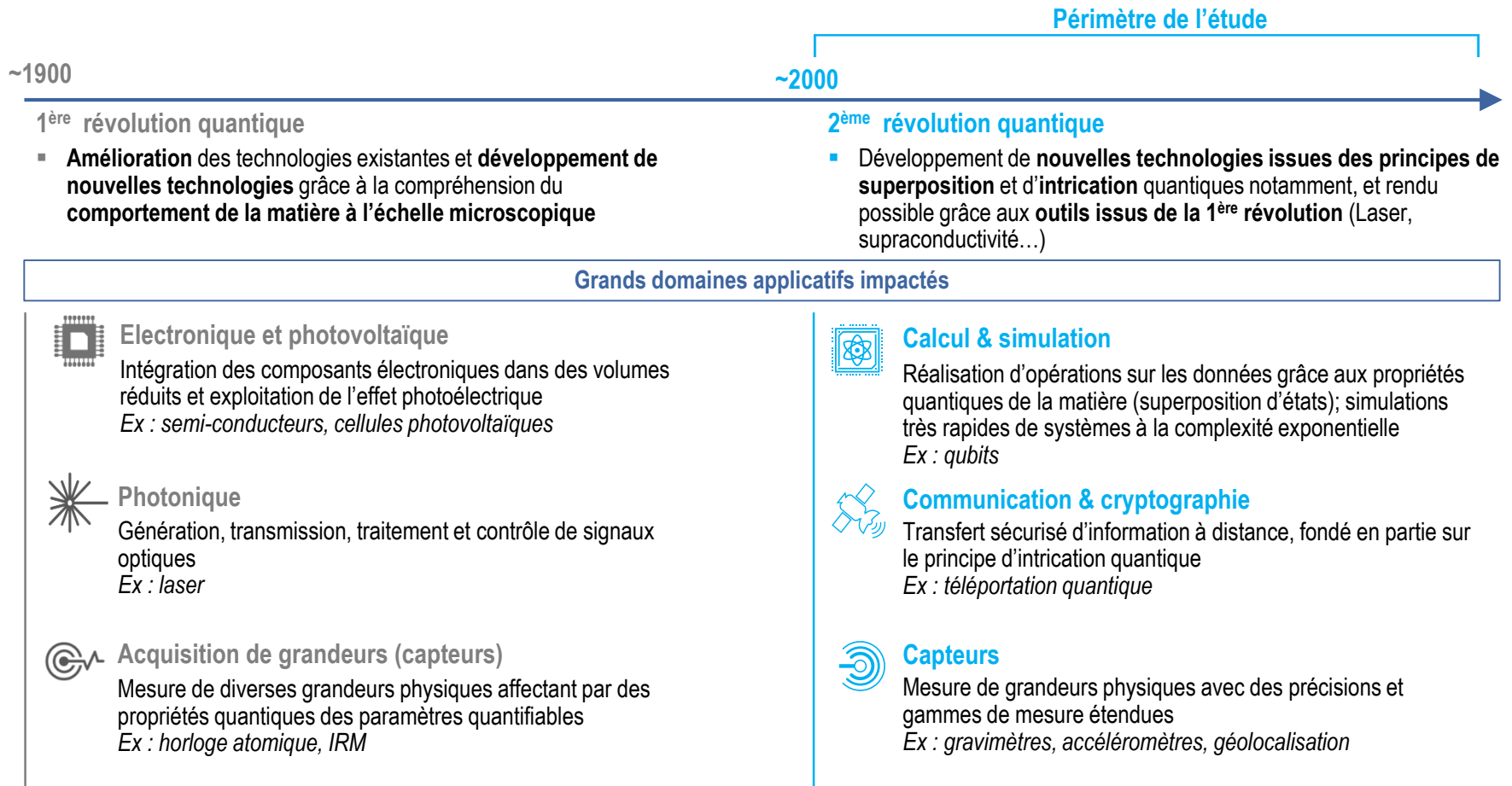
Effets et propriétés remarquables (non-exhaustifs)

- **Effet photoélectrique** : émission d'électron sous l'influence de la lumière
Ex : panneaux solaires, circuits intégrés
- **Résonance magnétique nucléaire (RMN)** : mesure de la résonance d'atomes soumis à un champ magnétique
Ex : IRM³⁾, Spectroscopie RMN
- **Effet LASER** : génération de rayonnement lumineux spatialement et temporellement cohérent
Ex : laser, fibres optiques
- **Effet tunnel** : capacité d'un électron dans certaines conditions, à franchir une barrière de potentiel malgré une énergie insuffisante
Ex : diodes, microscopes à effet tunnel
- **Supraconductivité** : conductivité électrique sans résistance
Ex : stockage/ transport d'énergie

1) Extrait de la définition Larousse 2) Sélection de principes 3) Imagerie par Résonance magnétique

L'étude se focalisera principalement sur les technologies et applications issues de la deuxième révolution quantique

Domaines technologiques issus de la physique quantique



Ordre du jour

A. Objectifs de l'étude

B. Familiarisation avec les principes de la mécanique quantique

C. Analyse des applications par grandes technologies quantiques

C.1 Capteurs

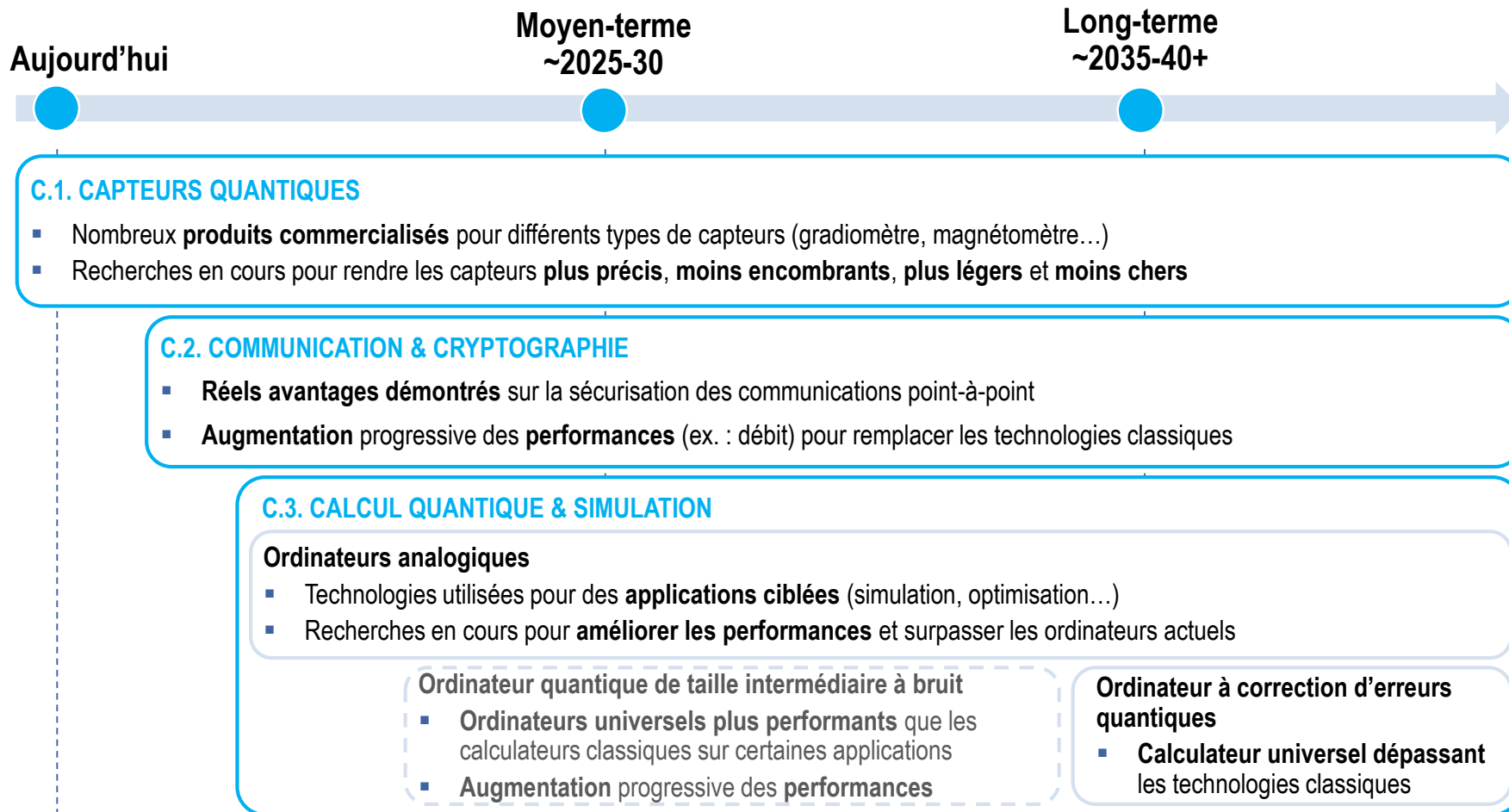
C.2 Communications et cryptographie

C.3 Calcul et simulation

D. Dynamiques des investissements dans les technologies quantiques

Les capteurs et les technologies de communication et cryptographie sont actuellement les technologies quantiques les plus matures

Maturité des grandes technologies quantiques par rapport aux technologies classiques



Ordre du jour

A. Objectifs de l'étude

B. Familiarisation avec les principes de la mécanique quantique

C. Analyse des applications par grandes technologies quantiques

C.1 Capteurs

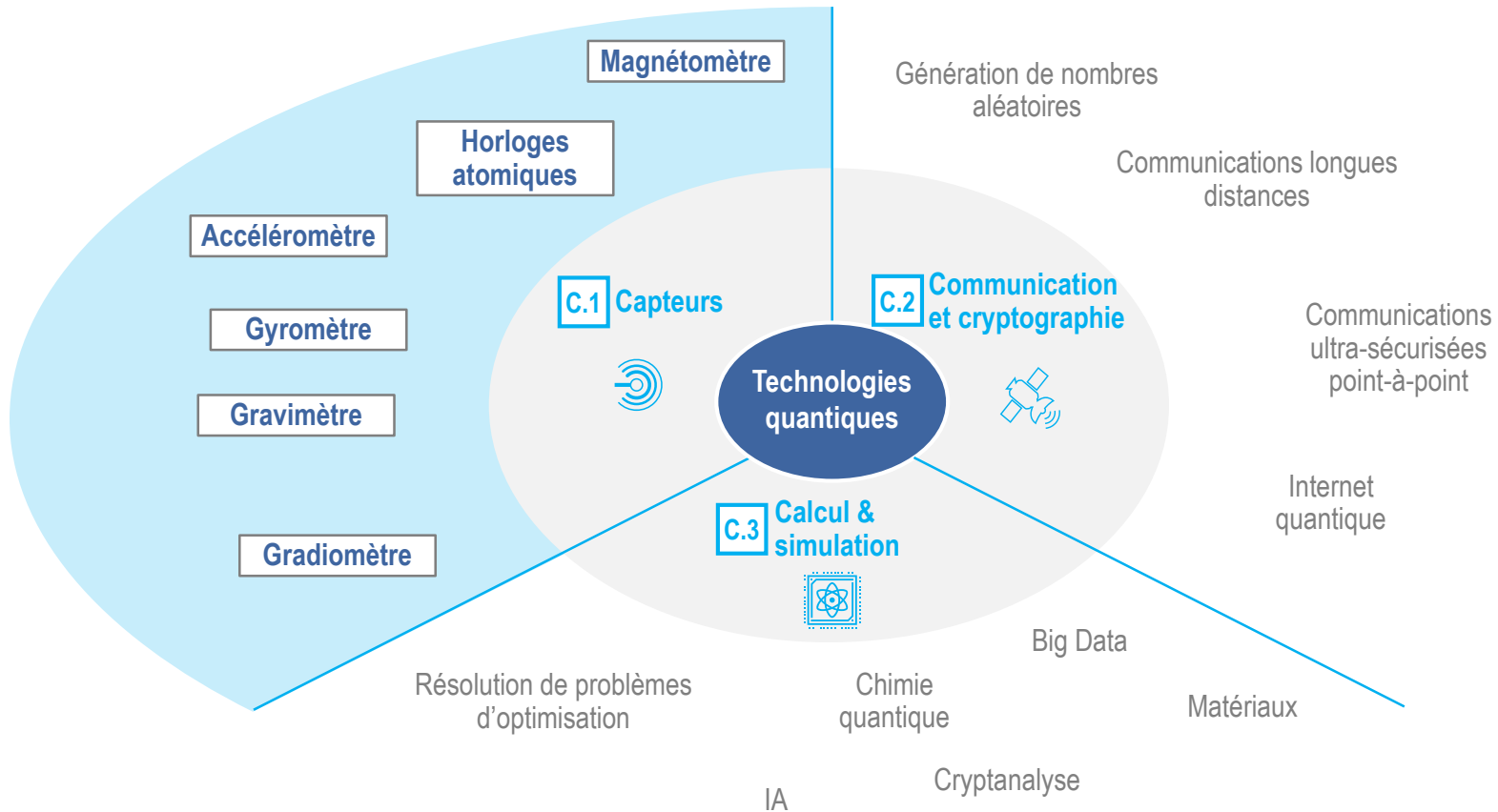
C.2 Communications et cryptographie

C.3 Calcul et simulation

D. Dynamiques des investissements dans les technologies quantiques

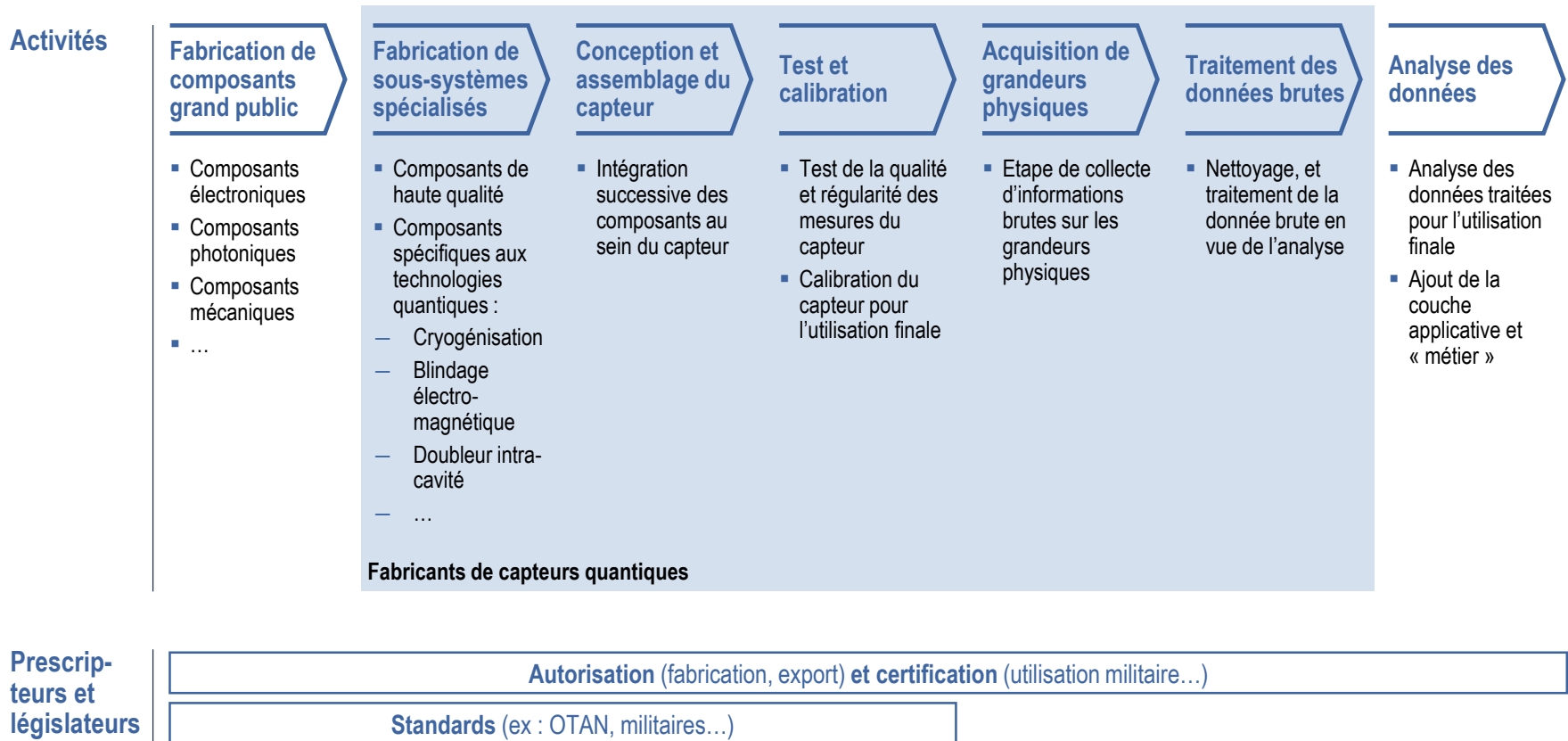
Les technologies quantiques répondront à une multitude d'applications regroupées en 3 grands domaines

Aperçu des applications basées sur les capteurs quantiques



Les concepteurs de capteurs quantiques vont de la fabrication de systèmes spécialisés jusqu'au traitement des données brutes

Chaîne de valeur pour l'acquisition de grandeurs physiques



L'exploitation de phénomènes quantiques dans les capteurs est explorée principalement par les laboratoires et les startups

Description des principales¹⁾ technologies de capteurs quantiques et acteurs impliqués

	Interférométrie atomique	Centres NV (diamants)	Boîtes quantiques (CMOS ²⁾)	Lumière comprimée
Description	<ul style="list-style-type: none"> Mouvements d'un ou plusieurs atomes (refroidis par laser) mesurés par interférométrie Mouvements liés à l'intensité des forces environnantes 	<ul style="list-style-type: none"> Niveau d'énergie des électrons d'une cavité (dans une structure de diamant) sensible au champ magnétique extérieur 	<ul style="list-style-type: none"> Photons incidents interceptés simultanément par des cristaux semi-conducteurs (boîtes quantiques) et transformés en un signal électrique 	<ul style="list-style-type: none"> Modification de l'ensemble des positions et quantités de mouvement possibles d'un photon pour réduire le bruit et augmenter la précision de mesure
Acteurs⁴⁾	<p>Laboratoires</p>			
Startups				<p>Non identifié à date</p>
Grands groupes	<p>Non identifié à date</p>			

1) Uniquement les technologies les plus explorées sont présentées ici 2) Complementary Metal Oxide Semiconductor 3) Appareil permettant la mesure des variations (du gradient) du champ (magnétique ici) 4) Non exhaustif 5) Propriété interne d'une particule, assimilée au moment cinétique

Les capteurs quantiques permettent une meilleure sensibilité des mesures et à terme une meilleure stabilité sur le terrain

Avantages et inconvénients des capteurs quantiques

+

Avantages

- **Sensibilité accrue des mesures** : les capteurs quantiques permettent de mesurer de plus petites variations des grandeurs d'intérêt
- **Stabilité améliorée** : les capteurs quantiques conviennent aussi à des mesures plus longues et répétées, sans besoin de réétalonnages très réguliers (valable en laboratoire)

-

Inconvénients/ barrières technologiques

- **Consommation d'énergie très importante** : l'exploitation des phénomènes quantiques se fait le plus souvent sous cryogénie, à une température proche de 0K
- **Encombrement important hors du laboratoire** : volume et masse des capteurs souvent incompatibles avec une utilisation sur le terrain
- **Impact des perturbations extérieures non négligeable** : les systèmes de mesure quantiques sont encore très sensibles aux champs magnétiques extérieurs et aux vibrations du sol

Les principaux champs d'application de ces technologies sont la mesure d'accélération et la mesure de champ magnétique

Applications et cas d'usage des principales¹⁾ technologies de capteurs

Applications	Description	Cas d'usage	Interférométrie atomique	Centres NV	Boîtes quantiques	Lumière c.
Accéléromètre, Gyromètre, Gravimètre et Gradiomètre	<ul style="list-style-type: none"> Respectivement instrument de mesure de l'accélération, de l'accélération de la pesanteur (locale) et du gradient de cette accélération de la pesanteur 	<ul style="list-style-type: none"> Détection de cavités souterraines (eau, pétrole...), détection de sous-marins Systèmes de navigation autonomes terre / mer / air Géodésie satellitaire (ex. : suivi de la fonte des glaces, cartographie des courants marins...) 	✓			
Horloge	<ul style="list-style-type: none"> Instrument de mesure du temps 	<ul style="list-style-type: none"> Brouilleurs d'ondes²⁾ 	✓			✓
Magnétomètre	<ul style="list-style-type: none"> Instrument de mesure de l'intensité et de la direction d'un champ magnétique 	<ul style="list-style-type: none"> Surveillance sous-marine³⁾ Localisation de munitions⁴⁾ Navigation Interception électromagnétique Etude de la structure des protéines Cartographie du champ terrestre 		✓		✓

XXX : Cas d'usage potentiellement pertinents pour la Défense

1) Uniquement les technologies, applications et cas d'usage les plus explorés sont présentés 2) « Chip-Scale Atomic Clock », outil de brouillage portable

3) Gravimètre classique actuellement utilisé par la marine américaine 4) Utilisation actuelle de magnétomètres classiques du type « Foerster »

D'autres applications, comme l'acquisition d'images et le LIDAR sont en développement et pertinents pour la Défense

Applications et cas d'usage des principales¹⁾ technologies de capteurs

Applications	Description	Cas d'usage
Machine IRM²⁾	<ul style="list-style-type: none"> Technique d'imagerie médicale non invasive de l'intérieur du corps humain 	<ul style="list-style-type: none"> Imagerie précise du corps humain
Capteur d'image²⁾	<ul style="list-style-type: none"> Composant convertissant un rayonnement électromagnétique incident (l'image) en un signal électrique analogique 	<ul style="list-style-type: none"> « Étiquettes quantiques », capteurs détectant des marqueurs à l'échelle moléculaire Amélioration des capteurs d'image Observation de sources lumineuses lointaines
Observatoire d'ondes gravitationnelles³⁾	<ul style="list-style-type: none"> Système de détection et de mesure des ondes gravitationnelles³⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> Détection d'étoiles à neutrons (en astronomie)
Détection d'objets⁴⁾	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation de l'illumination quantique pour l'amélioration des technologies radar et/ ou LIDAR pour la détection d'objets à distance 	<ul style="list-style-type: none"> Détection de personnes, d'objets et de véhicules furtifs

	Interférométrie atomique	Centres NV	Boîtes quantiques	Lumière c.
	✓			
			✓	
				✓
Amélioration techno.				

XXX : Cas d'usage potentiellement pertinents pour la Défense

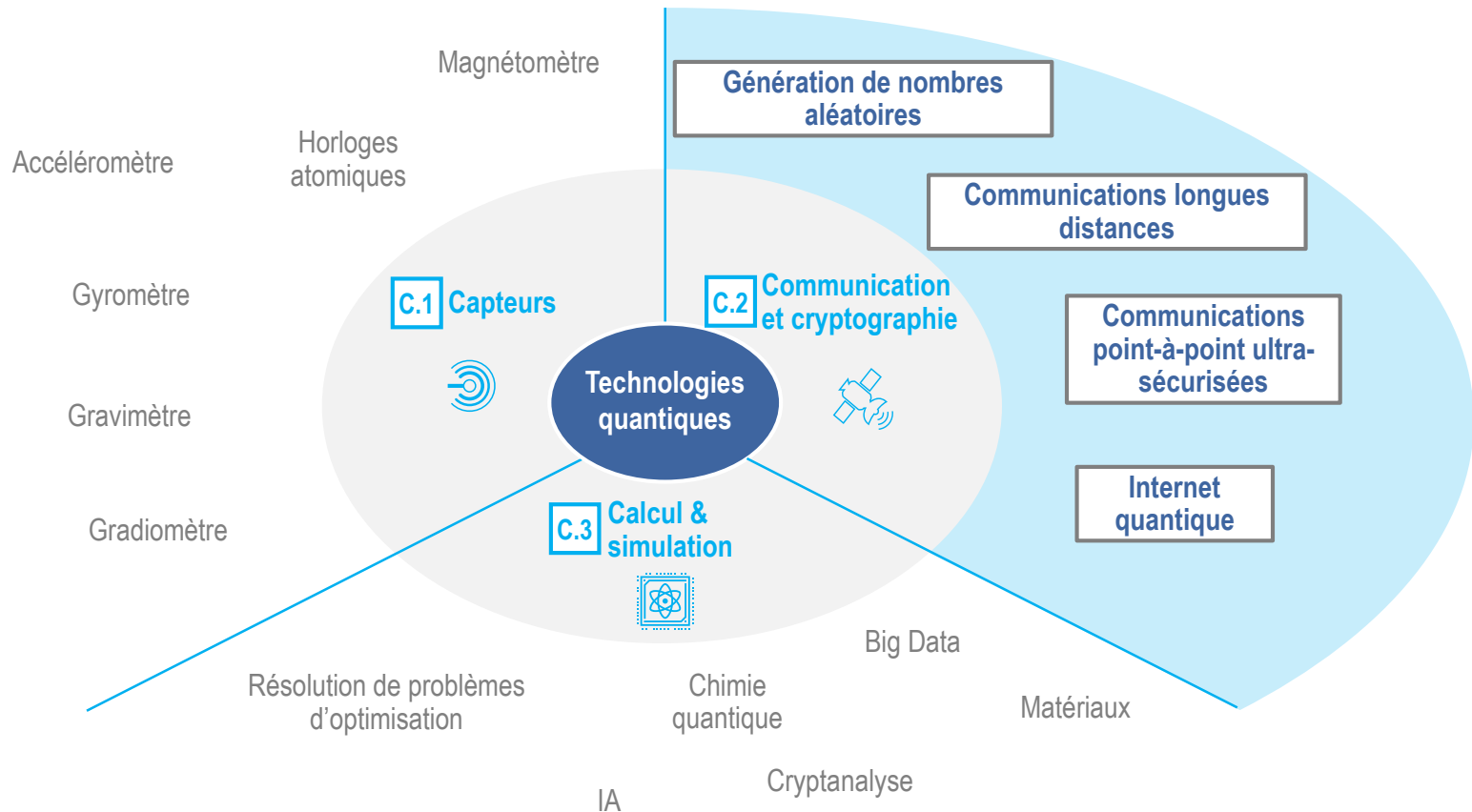
- 1) Uniquement les technologies, applications et cas d'usage les plus explorés sont présentés
- 2) Applications issues des technologies de la 1^{ère} révolution quantique et pouvant être améliorées avec des technologies de la 2^{ème} révolution
- 3) Oscillation de la courbure de l'espace temps se propageant à grande distance
- 4) Application à long terme sous réserve d'augmentation des performances de la technologie

Ordre du jour

- A. Objectifs de l'étude
- B. Familiarisation avec les principes de la mécanique quantique
- C. Analyse des applications par grandes technologies quantiques
 - C.1 Capteurs
 - C.2 Communications et cryptographie
 - C.3 Calcul et simulation
- D. Dynamiques des investissements dans les technologies quantiques

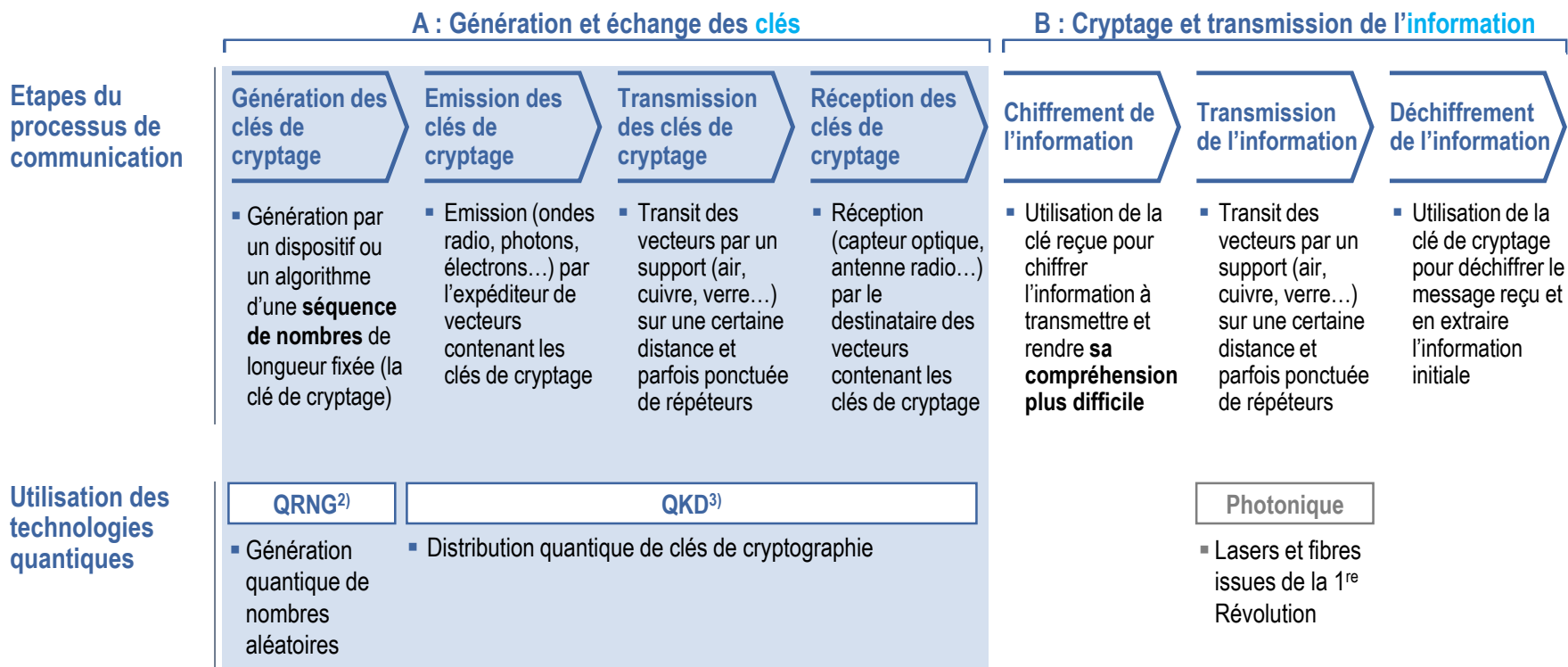
Les technologies quantiques répondront à une multitude d'applications regroupées en 3 grands domaines

Aperçu des applications basées sur la communication & la cryptographie quantique



Les technologies quantiques interviennent dans la génération des clés de cryptage ainsi que dans leur émission et leur réception

Rôles des technologies quantiques dans le processus de communication cryptée¹⁾





Utilisation de technologies issues de la 2^e révolution quantique

1) Illustration avec un cas simple d'échange de clés cryptographiques 2) Quantum Random Number Generator 3) Quantum Key Distribution

Les technologies quantiques permettent de générer des clés purement aléatoires et de détecter toute interception de messages

Applications des technologies quantiques pour la communication cryptée

Application	Description	Technologies identifiées ¹⁾	Acteurs ¹⁾
Générateurs quantiques de nombres aléatoires (QRNG²⁾)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dispositif physique permettant la génération de nombres purement aléatoires ▪ Chiffres regroupés en séquences et utilisés comme clés cryptographiques 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Photons uniques <ul style="list-style-type: none"> – Bits 0 et 1 associés aux probabilités d'absorption ou de réflexion d'un photon émis ▪ Grands nombres de photons <ul style="list-style-type: none"> – Bits associés à la distribution statistique d'un ensemble de photons émis 	
Distribution de clés quantiques entre 2 points de communication (QKD³⁾)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Infrastructure physique d'échange de clés reposant sur les technologies de photonique quantique (pour leur émission et leur réception) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Emission <ul style="list-style-type: none"> – Atténuation de lasers – Sources de photons uniques / jumeaux⁶⁾ ▪ Réception <ul style="list-style-type: none"> – Photodiodes à avalanche – Détecteurs supraconducteurs 	
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Protocole⁵⁾ d'échange de clés secrètes exploitant les propriétés quantiques des systèmes 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Protocole⁵⁾ <ul style="list-style-type: none"> – Algorithmes de détection des intrusions⁷⁾ 	

La **combinaison** de ces deux applications rend possible la construction de **réseaux de communication quantique point-à-point** (ex. entre 2 bâtiments)

1) Non exhaustif 2) Quantum Random Number Generator 3) Quantum Key Distribution 4) Pseudo Random Number Generator

5) Ensemble de règles et de contraintes encadrant la communication, ici essentiellement BB84, BBM92 et CV-QKD

6) Source générant des paires de photons intriqués 7) Exploitation du principe de non-clonage pour détecter les interceptions de la communication

La communication quantique assure une inviolabilité théorique des communications mais impose de fortes contraintes d'usage

Avantages et inconvénients des communications quantiques

+

Avantages

- **Inviolabilité de l'information** : impossibilité théorique qu'un message crypté avec une clé purement aléatoire soit déchiffré, **quelles que soient les capacités technologiques adverses**
- **Détection des intrusions** : possibilité de détecter toute tentative extérieure d'interception des communications grâce à la **téléportation quantique** et au **principe de non-clonage**

-

Inconvénients/ barrières technologiques

- **Sensible au brouillage** : impossibilité de communiquer en cas d'intrusions répétées
- **Infrastructures dédiées contraignantes** : communication quantique ne pouvant se faire que par des **canaux spécifiques** avec un **facteur de forme important**
- **Communication de point-à-point et portée restreinte** : atténuation du signal lumineux et **perte de l'intrication** nécessitant l'utilisation de « nœuds de confiance » réguliers (>50km), où l'information est convertie en signal classique
- **Débit limité** : **débit d'informations** transmises **bien inférieur** aux technologies classiques, car limité par le temps de génération et d'échange des clés

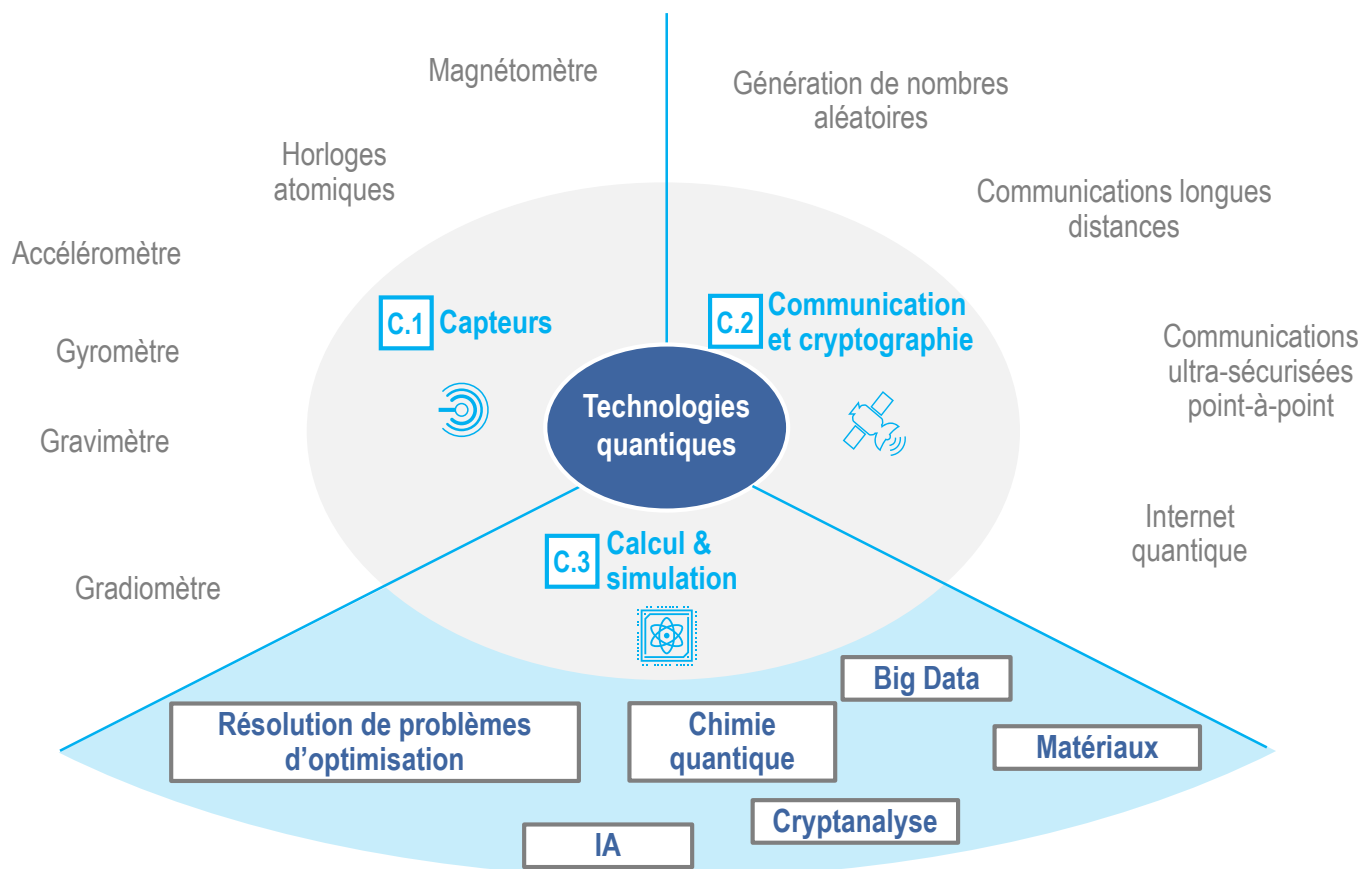
1) Méthode force brute : utilisation de la puissance de calcul pour le décryptage d'informations

Ordre du jour

- A. Objectifs de l'étude
- B. Familiarisation avec les principes de la mécanique quantique
- C. Analyse des applications par grandes technologies quantiques
 - C.1 Capteurs
 - C.2 Communications et cryptographie
 - C.3 Calcul et simulation
- D. Dynamiques des investissements dans les technologies quantiques

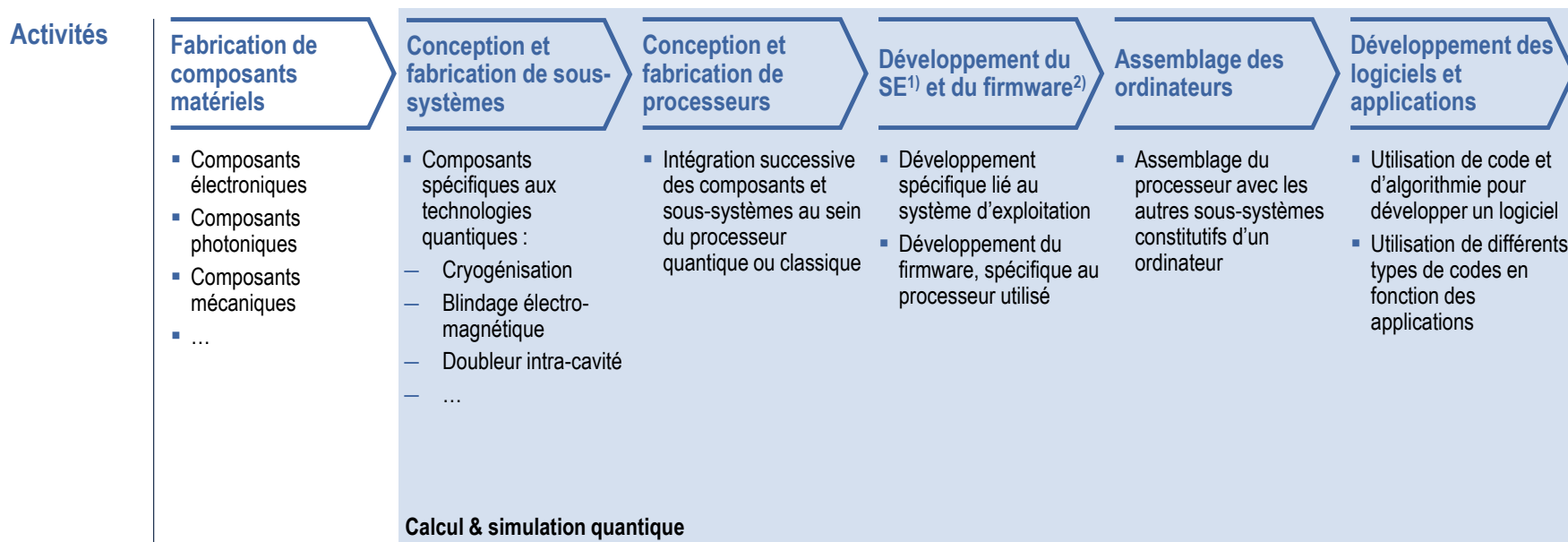
Les technologies quantiques répondront à une multitude d'applications regroupées en 3 grands domaines

Aperçu des applications basées sur le calcul & la simulation quantiques



Le développement du calcul quantique va de la fabrication de systèmes spécialisés jusqu'à la conception d'applications dédiées

Chaîne de la valeur pour le calcul & la simulation



Prescripteurs et législateurs

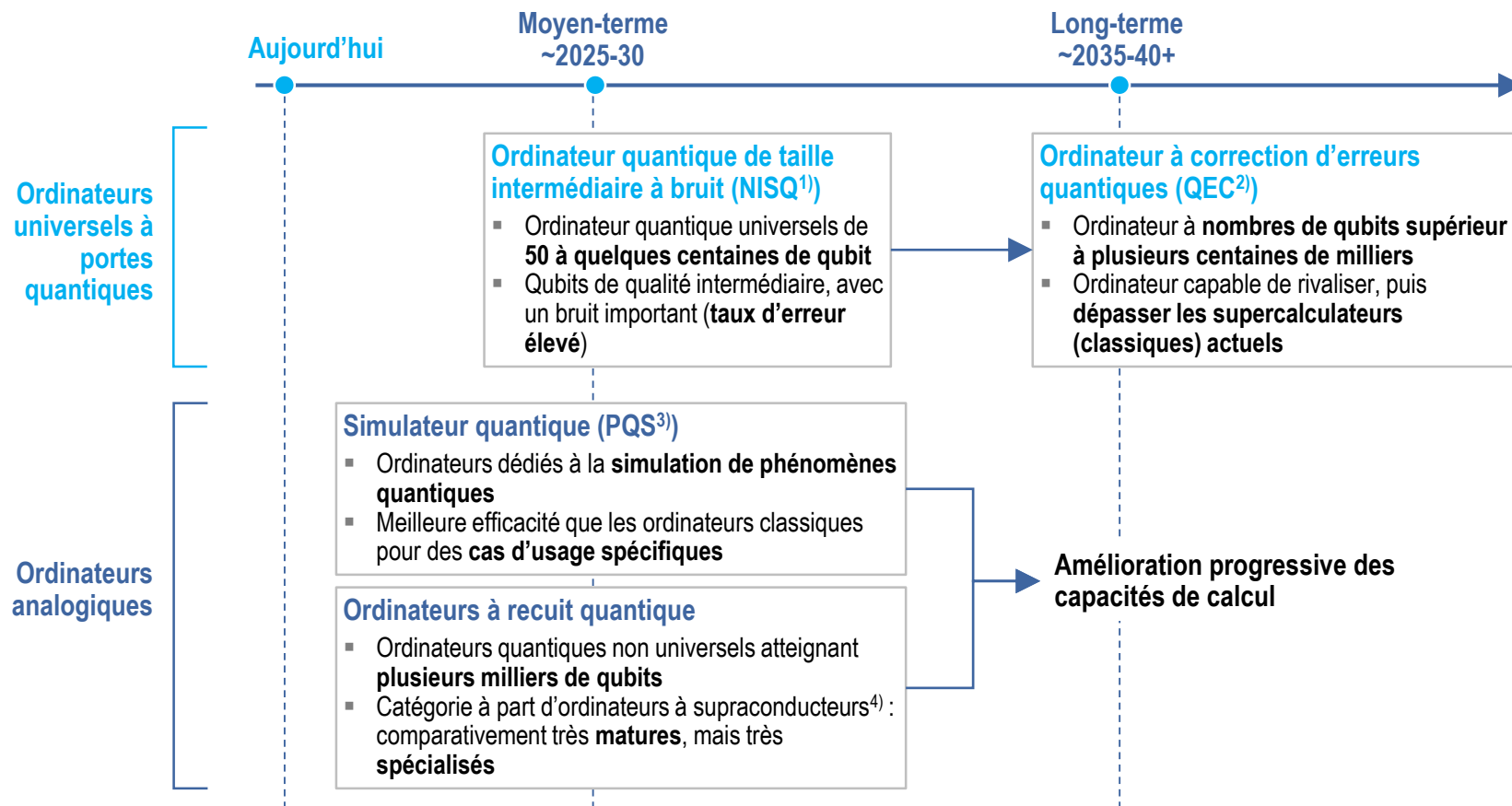
- **Entrée en usage des ordinateurs quantiques amenée à être standardisée**
- **NIST (National Institute of Standards and Technologies, Etats-Unis) attendu de jouer un rôle majeur sur le sujet**

1) Système d'Exploitation

2) Logiciel dédié au fonctionnement du processeur

Il existe 2 types d'ordinateurs quantiques, dont seuls les ordinateurs universels seront capables de dépasser les capacités actuelles

Catégories d'ordinateurs quantiques et horizons temporels associés



1) Noisy Intermediate-Scale Quantum 2) Quantum Error Correction 3) Programmable Quantum Simulation (il existe d'autres significations à ce sigle dans ce domaine)
4) Voir slide suivante sur les technologies quantiques

La nature des qubits et la méthode de mesure de leur état caractérisent les différentes technologies d'ordinateur quantique

Description des principales¹⁾ technologies d'ordinateurs quantiques

	Supra-conducteurs ²⁾ à recuit quant.	Ions piégés	Atomes neutres	Optiques (linéaires)	Supra-conducteurs ²⁾	Boîtes quantiques (CMOS ⁶⁾)	Centres NV (diamants)	Topologiques (fermions de Majorana)
Analogiques	[Barre bleue]							
Portes quant.	[Barre bleue]							
Description	<ul style="list-style-type: none"> Matrice de qubits dans un état proche de la solution y convergeant progressivement 	<ul style="list-style-type: none"> Ion suspendu sous vide et dont la mesure du niveau énergétique définit l'état du qubit 	<ul style="list-style-type: none"> L'état d'énergie d'un ensemble d'atomes disposés en matrice définit l'état du qubit 	<ul style="list-style-type: none"> Le sens de polarisation d'un photon définit l'état du qubit 	<ul style="list-style-type: none"> Le sens de circulation du courant supraconducteur définit l'état du qubit 	<ul style="list-style-type: none"> Le sens de polarisation d'un électron dans un semi-conducteur définit l'état du qubit 	<ul style="list-style-type: none"> Le niveau d'énergie d'une cavité créée dans une structure de diamant définit l'état du qubit 	<ul style="list-style-type: none"> L'état du spin des électrons aux deux bouts de fils supraconducteur définit l'état du qubit
Exemples d'acteurs								

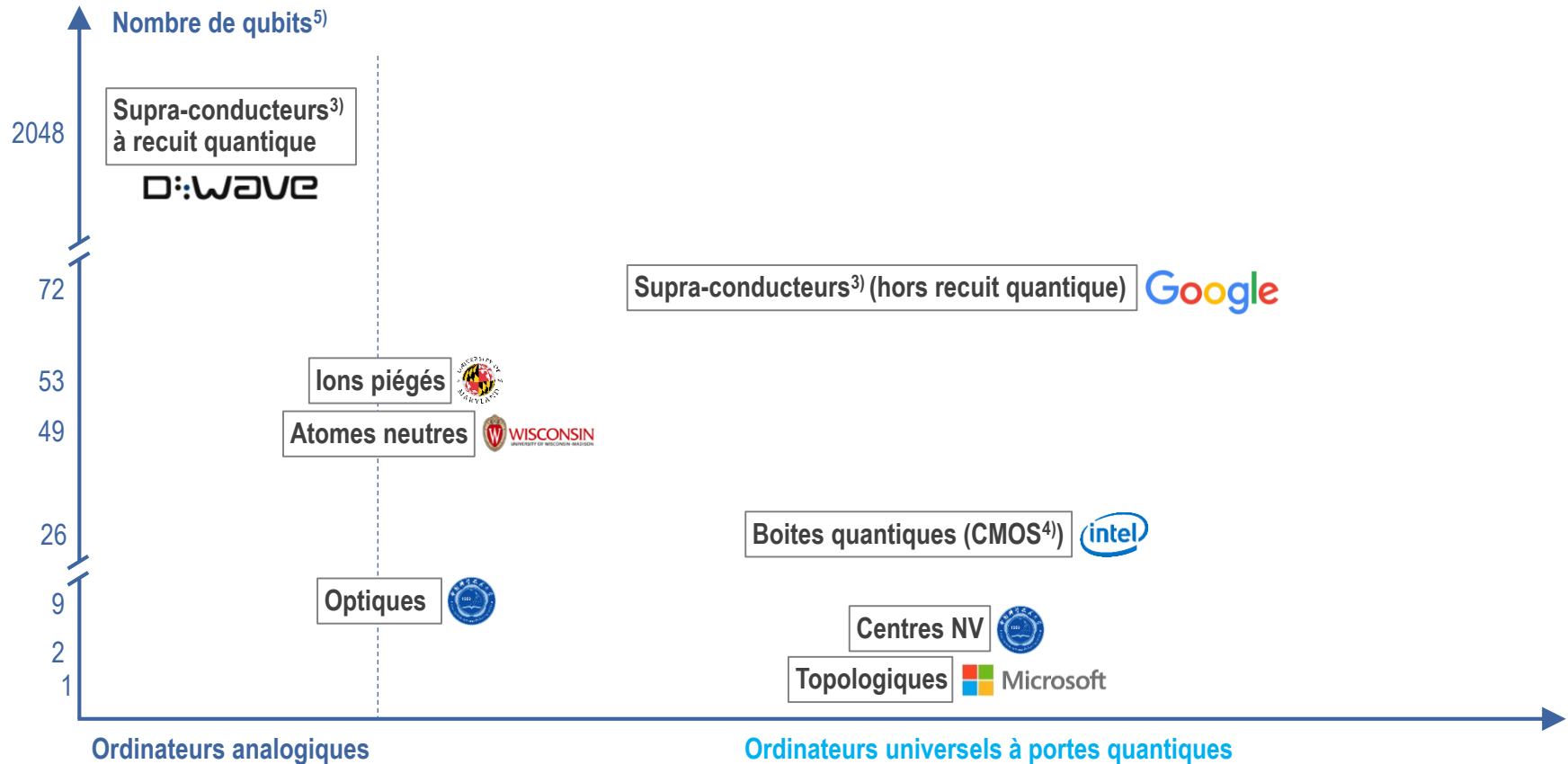
1) Les technologies les moins matures ne sont pas étudiées (ex : RMN liquide, atomes neutres...) 2) Conducteurs de résistance nulle à très basse température

3) Ordinateur quantique non-universel, contrairement aux autres cités 4) QDTI 5) Université de Sciences et Technologies de Chine

6) Complementary Metal Oxide Semiconductor

La supra-conductivité est la technologie la plus avancée en terme de nombre de qubits, tant pour l'ordinateur analogique qu'universel

Positionnement¹⁾ relatif des différentes technologies²⁾ de processeurs quantiques



1) Le nombre de qubit n'est que l'un des indicateurs de la maturité d'un processeur quantique, la qualité est aussi cruciale (taux d'erreur, temps de cohérence...)

2) Les technologies les moins matures ne sont pas étudiées (ex : RMN liquide...) 3) Conducteurs de résistance nulle à très basse température

4) Complementary Metal Oxide Semiconductor 5) Maximum atteint pour chaque technologie et uniquement dans la catégorie « ordinateur universel » quand les deux existent

Les processeurs quantiques ont comme principal avantage la parallélisation des calculs, permettant à terme une puissance inédite

Avantages et inconvénients des processeurs quantiques

+ Avantages

- **Capacité de calcul massivement parallèle** : traitement d'un **grand nombre d'opérations en même temps** (contrairement à un processeur classique qui les réalise successivement)
- Exemples :
 - Pour un processeur de N qubits, réalisation de **2^N calculs en même temps** (2^N états superposés)
 - Pour un calcul complexe prenant **2^{300} s** (supérieur à l'âge de l'Univers) à un ordinateur classique, un ordinateur quantique y passe **2 x 300s**

- Inconvénients

- **Qubits sujets à la décohérence** – temps de fonctionnement limité – au bout duquel ils quittent leur état de superposition
- **Complexité et forts coûts** de mise en place induits par la **nécessité d'une température très faible** pour la plupart des technologies
- **% d'erreur encore trop important** par rapport aux processeurs classiques
- **Spécialisation de certains processeurs pour certaines applications**, par construction et technologies utilisées
- **Difficulté de mise au point des nouveaux algorithmes** pour résoudre les problèmes posés

L'ordinateur universel sera principalement utilisé pour la cryptanalyse, l'optimisation ainsi que l'apprentissage pour l'IA

Applications des différentes catégories d'ordinateurs quantiques

Ordinateurs universels à portes quantiques

Cryptanalyse

- Augmentation considérable des capacités de déchiffrement par les **algorithmes quantiques**. **Capacité à décomposer très rapidement de grands nombres entiers en facteurs premiers (algorithme de Shor¹)** notamment), menaçant les systèmes cryptographiques à clés publiques (clés RSA utilisées sur Internet par exemple)

Big Data, Machine Learning

- Grande efficacité dans le traitement de **larges quantités de données** avec des algorithmes de machine learning (véhicules autonomes, conception de pièces aéronautiques...)

Optimisation (2)

- Résolution de **problèmes d'optimisation inaccessibles aux supercalculateurs actuels** (trajectoires complexes, pilotage de systèmes en essaim, réseaux...)

Ordinateurs analogiques

Simulation

- Simulation de phénomènes quantiques pour les **molécules** et les **réactions chimiques** (réactions nucléaires, nouvelles molécules chimiques...)

Optimisation (1)

- Résolution de **problèmes d'optimisation linéaires** très spécifiques, notamment les problèmes combinatoires (gestion de flux routiers et logistiques,...)

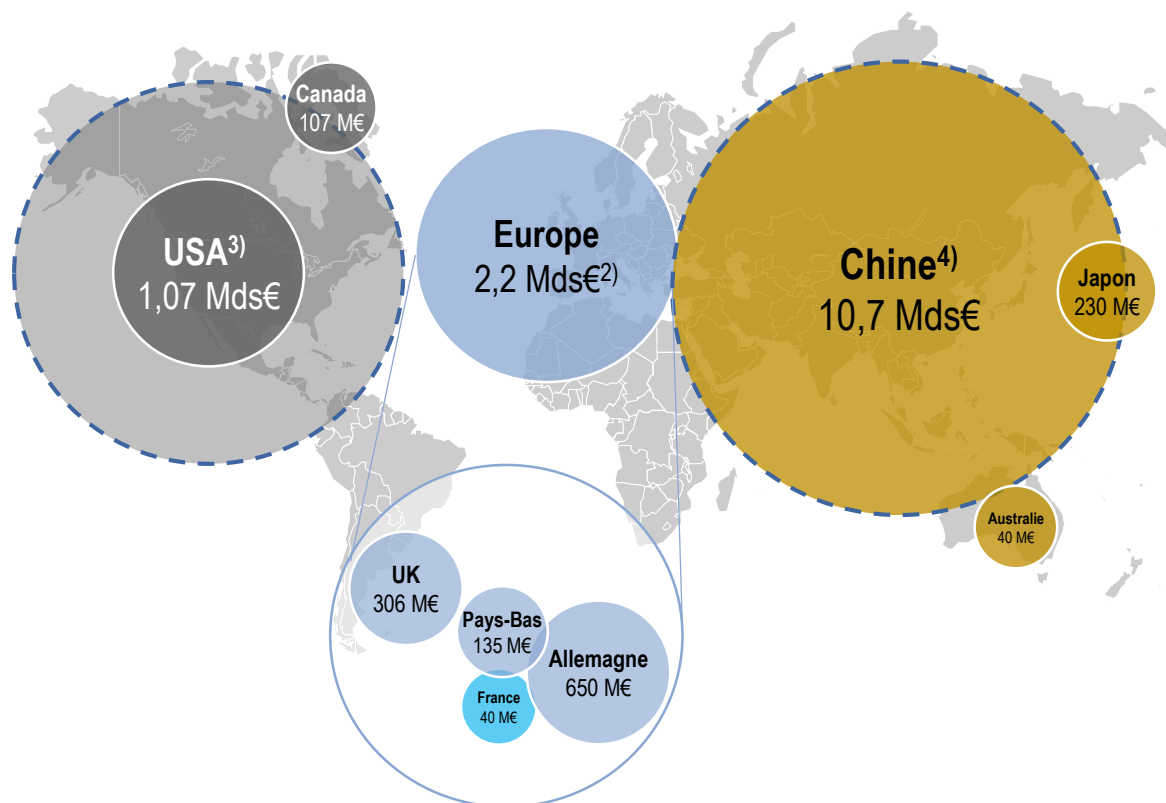
1) Algorithme de factorisation des nombres entiers développé par Peter Shor en 1994 et destiné à l'informatique quantique

Ordre du jour

- A. Objectifs de l'étude
- B. Familiarisation avec les principes de la mécanique quantique
- C. Analyse des applications par grandes technologies quantiques
 - C.1 Capteurs
 - C.2 Communications et cryptographie
 - C.3 Calcul et simulation
- D. Dynamiques des investissements dans les technologies quantiques

A date, la Chine est le pays allouant le plus de financements publics au développement des technologies quantiques avec ~10,7 Mds €

Vue d'ensemble des principaux financements publics¹⁾ sur les technologies quantiques



Remarques

- **Chine** – Financement annoncé de 8.9Mds pour un nouveau centre de recherche dédié
- **USA** – Budget civil comptabilisé (Department of Energy, National Science Foundation et NIST). Financements des agences militaires et de renseignements confidentiels
- **Europe** – 1,2 Mds€ sur 10 ans venant du Quantum Flagship Project
- **Australie** – Nombreux partenariats et projets collaboratifs (Europe, Canada, USA)
- **France** – Fonds alloués par le CEA et le CNRS non pris en compte car non divulgués

ⓘ Incertitude sur les montants communiqués par les sources publiques. Les investissements militaires non communiqués sont probablement déterminants

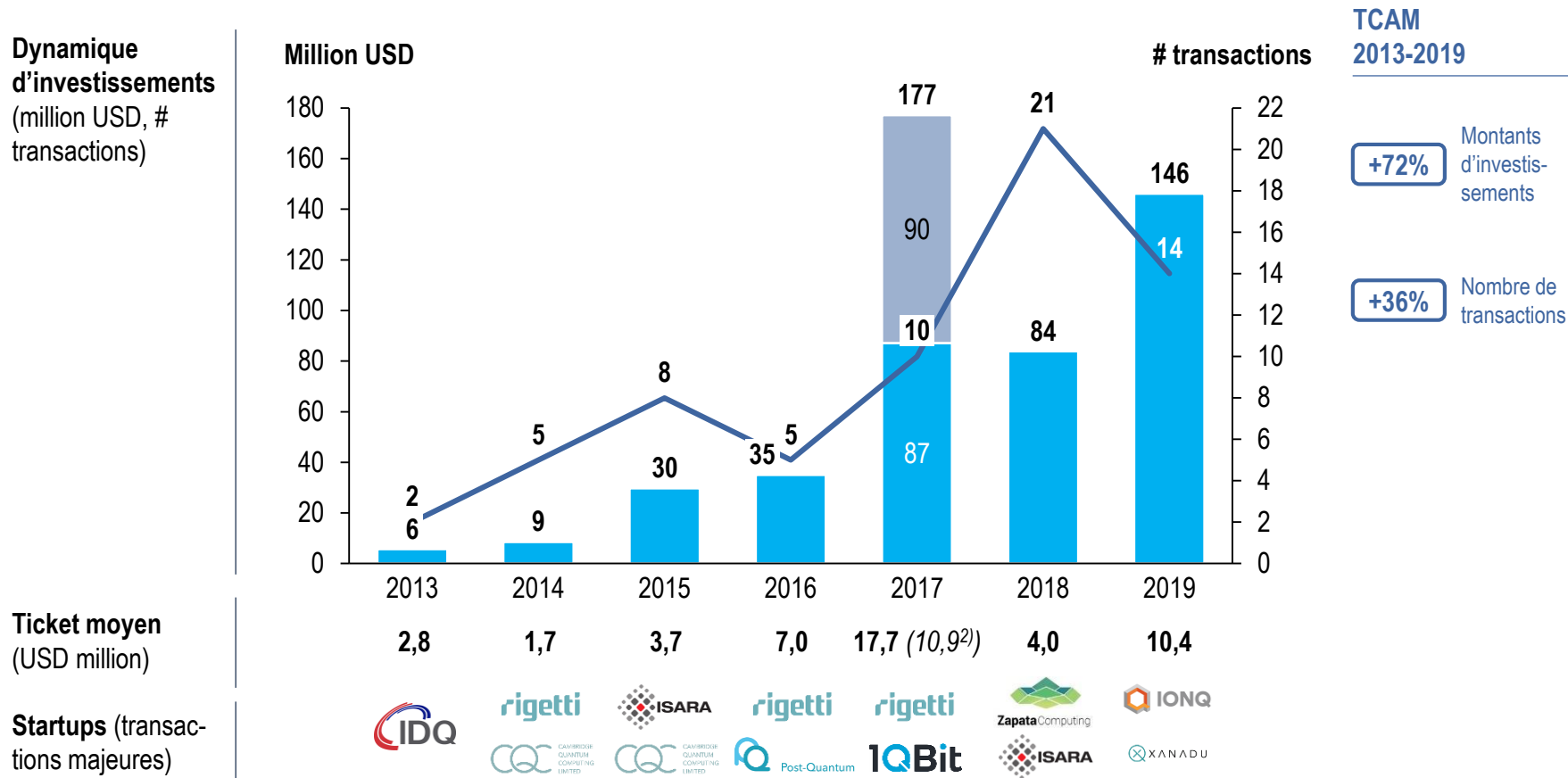
1) Investissements pouvant s'étaler sur plusieurs années 2) Fonds provenant du Quantum Flagship ainsi que des principaux états membres

3) Financements des agences militaires non compris 4) Chiffres communiqués par la Chine

Taux de conversion en euros à date du 28/05/2019 : £ : 1.13 et \$: 0.89

A l'échelle mondiale, les montants d'investissements dans les startups du quantique ont augmenté de c. 70% p.a. depuis 2013

Dynamique d'investissements¹⁾ dans les startups³⁾ [million USD ; global]



Ticket moyen
(USD million)

Startups (transactions majeures)

— Nombre de transactions (montant publié) ■ 2 investissements Rigetti (2017) ■ Montants d'investissements [million USD]

1) Type d'investissement considérés : tout investissement hors fusion / acquisition 2) Hors Rigetti 3) Non exhaustif



**INNOVATION
DÉFENSE
LAB**

C. Présentation de 2 organismes





**INNOVATION
DÉFENSE
LAB**



STARBURST

AUREA
TECHNOLOGY

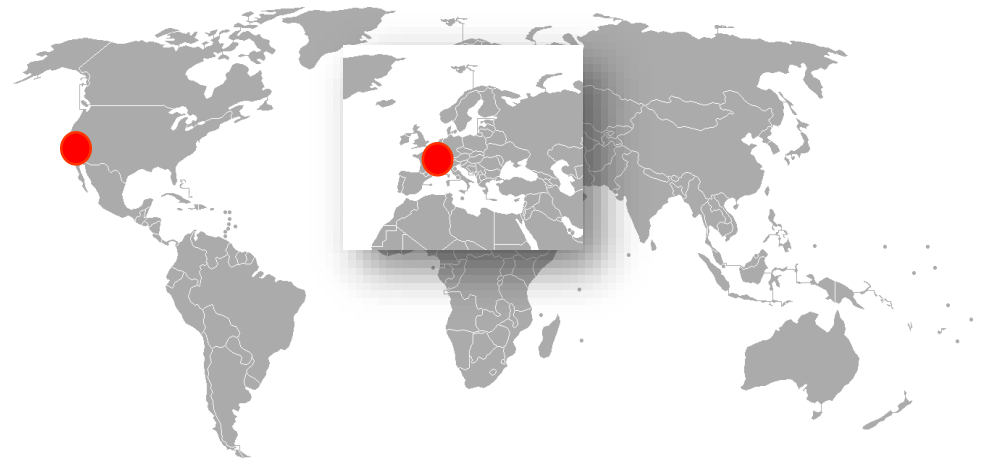
AUREA Technology *Corporate*



18 Rue Alain Savary
25000 – Besançon
France

AUREA Technology : Who are we ?

- **Founded in 2010**
- **Location: France, USA**
- **Strong R&D (> 50% PhDs)**
- **Innovation Awards winner**
- **200 customers worldwide**
- **“One-Stop-Shop for quantum instruments”**

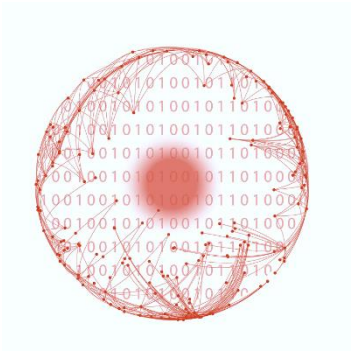


AUREA Technology : Who are we ?

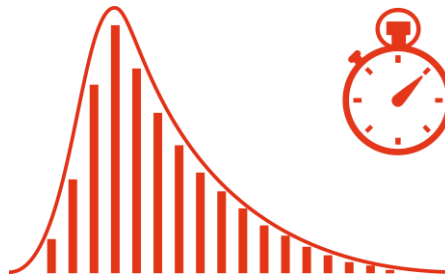
- **Expertise**

Turn-key high-performance quantum instruments, photon detection, fast timing electronics associated with the latest communications and software technologies

- **Main Assets**



Quantum Optics



Time Resolved



Fiber sensing

Leadership – Portfolio Quantum

QUANTUM METROLOGY

- Coincidence measurements
- Photon sources characterization
- Quantum Optical Coherence Tomography



Twin Photon Source
TPS



Time correlation
CHRONOXEA

QUANTUM CRYPTOGRAPHY

- Coincidence measurements
- Photon sources characterization
- Quantum Optical Coherence Tomography



*Time Correlated
Single Photon Counter*
LYNXEA



Photon counter
SPD_OEM

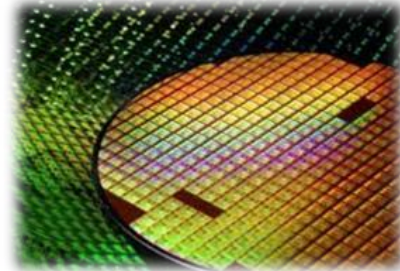
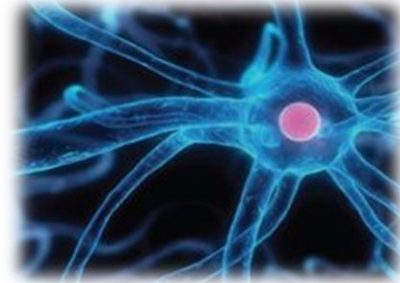
QUANTUM SENSING

- Geiger-mode LIDAR
- Quantum Optical Time-Domain Reflectometer

Application domains

APPLICATIONS

- Quantum technologies
- Telecom (quantum cryptography)
- Energy
- Nanotechnology
- Semiconductors
- Biology (lifetime measurements, FLIM)
- Defence & Space



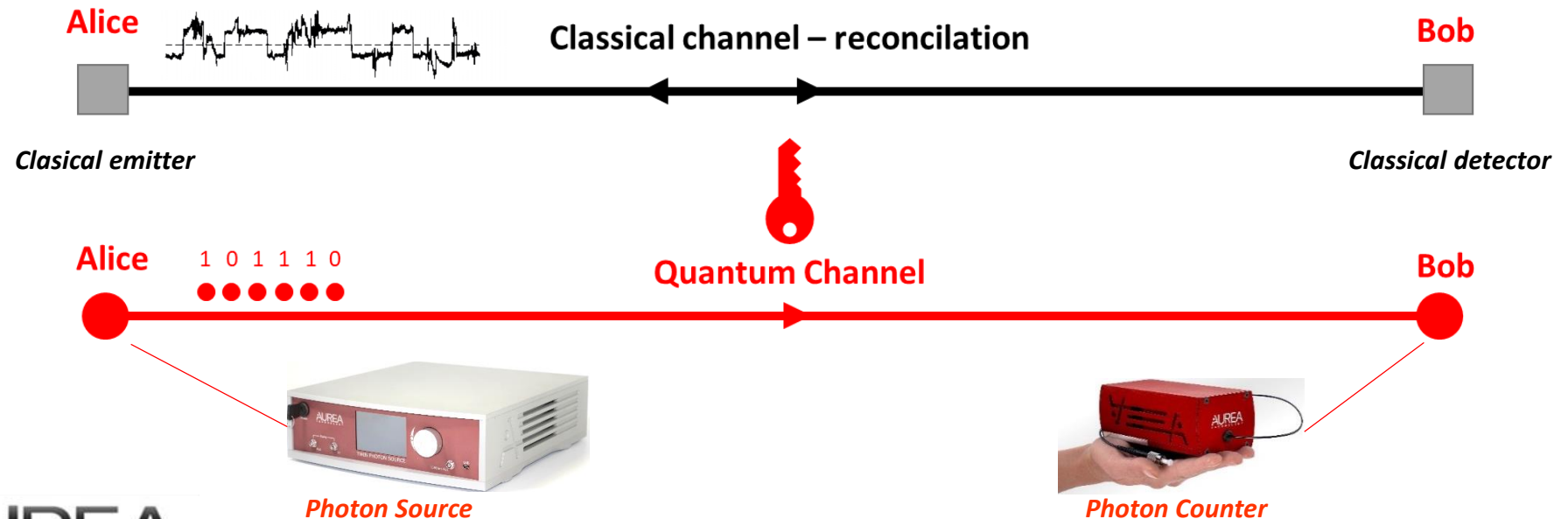
Quantum Key Distribution for safe-networks

PRINCIPLE

- Photon encoding/decoding through the quantum channel : Polarization – frequency – phase
- Reconciliation on classical channel
- **Instant detection of an eavesdropper on the line** thanks to the quantum properties of single photons

APPLICATION

- QKD network implementation
- **Terrestrial or satellite** key exchange
- Secure public and private networks



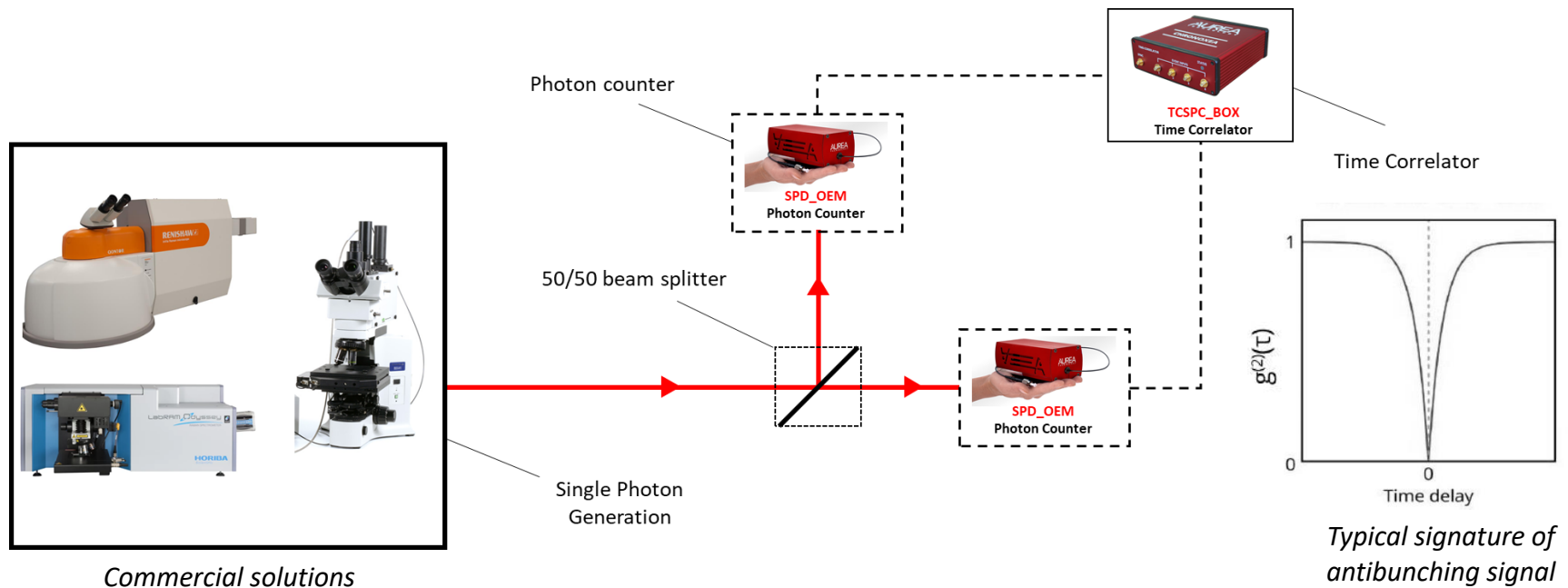
Single Photon source characterization

PRINCIPLE

- Emission of single photons
- « Antibunching » measurements
- Verify the purity of single photons
- Characterize the single photon source

APPLICATION

- Biology : single molecule study
- Biomedical : single cell study
- Semiconductor / Nanotechnology
- Quantum dot qualification



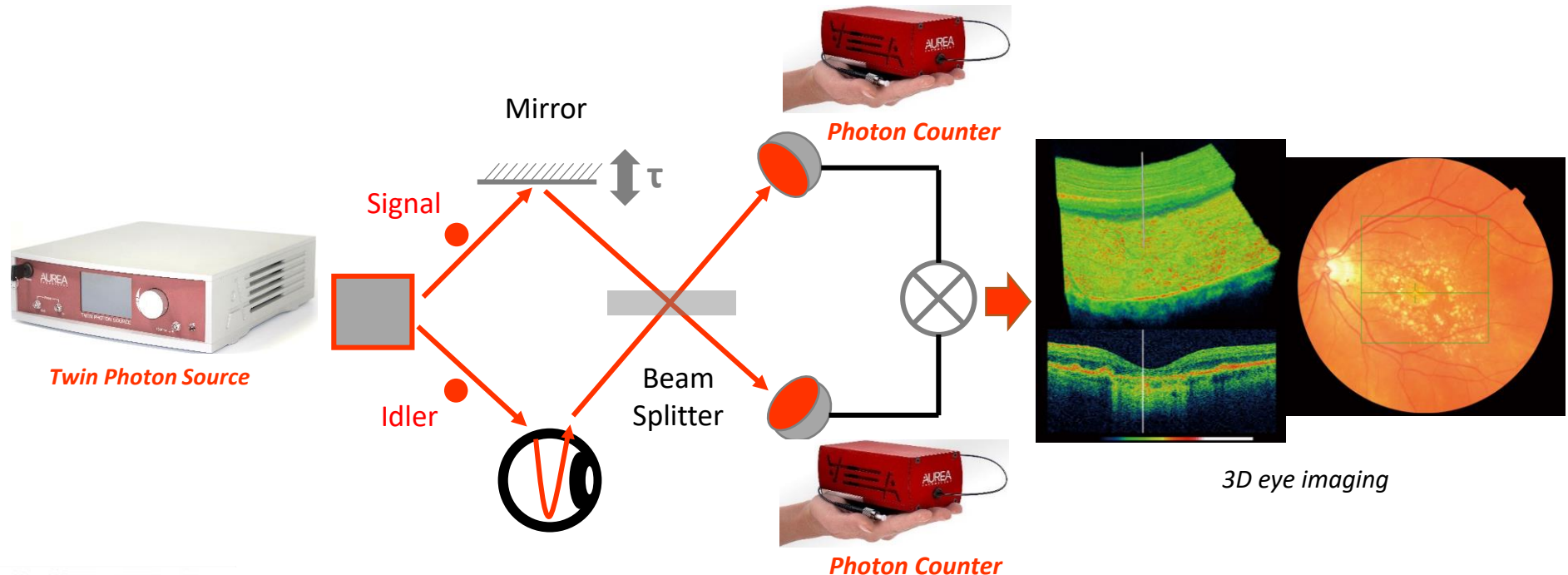
Quantum Tomography for 3D imaging

PRINCIPLE

- Uses of entangled twin photons
- Interferences between the Signal (reference) and Idler (investigate the tissue)
- Optical dispersion-cancelled measurement
- **High-spatial resolution**

APPLICATION

- Biological 3D imaging
- Microstructure 3D imaging
- Optical Coherence Tomography (Ophthalmology)



Hybrid Technologies

CLASSICAL



Emission
Picosecond laser

QUANTUM



Detection
Photon Counting



Timing
Time correlator

HYBRID TECHNOLOGIES



Lifetime mapping



Quantum OTDR

BUILDING-BLOCK



TURN-KEY CONFIGURATION

Lifetime mapping for semiconductors

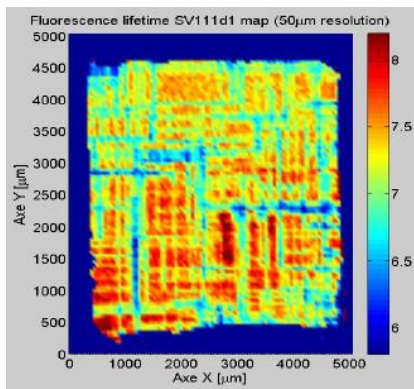
PRINCIPLE

- Excitation : ps laser source
- Detection : photon counting technology
- Time correlation electronics for timing
- **High spatial resolution**
- **High timing resolution**

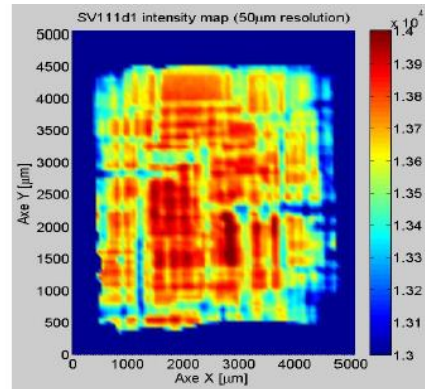
APPLICATION

- Lifetime & Intensity measurements
- Semiconductors qualification
- Quality control
- Quantum dots qualification
- Local magnetic fields measurements

ETH zürich



*Lifetime mapping
of semiconductors samples*



*Intensity mapping
of semiconductors samples*



*FLIM mapping system[™]
FLUOXEA*

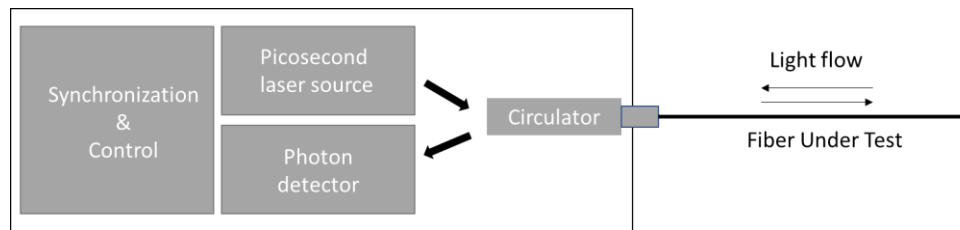
q-OTDR for high resolution fiber sensing

PRINCIPLE

- Excitation : ps laser source
- Detection : photon counting technology
- TCSPC electronics for time-of-flight measurements
- Compatible with « special fibers » :
 - Electromagnetic fields
 - Radiation
 - Temperature
 - Fiber bendings
- **High-spatial resolution**
- **Ultra-high sensitivity**

APPLICATION

- Nuclear reasearch & safety
- Ultra-fine defects detection
- Telecom optical network
- Aeronautics, Defence & Space
- Fiber sensing



Block diagram of the q-OTDR



High resolution fiber sensor
q-OTDR

Conclusion

QUANTUM & CLASSICAL TECHNOLOGIES

- Strong potential of Quantum Technologies (performances, accuracy, speed..)
- **Hybrid approach (classical + quantum) to take the best of Quantum and Classical photonics technologies**
 - Cryptography : Optical secure communication (QKD)
 - Metrology : Non-Destructive characterization methods...
 - Biomedical : Molecules & cells characterization...
 - High performance fiber sensing : Energy, Space, Defence...

HOW ABOUT THE FUTURE ?

- Explore the potential of Quantum and Hybrid technologies
- Looking for industrial and research partnerships to develop new technologies and applications

Thank you



Johann Cussey
Johann.cussey@aureatechnology.com

18 Rue Alain Savary
25000 – Besançon
France

January 20



**INNOVATION
DÉFENSE
LAB**

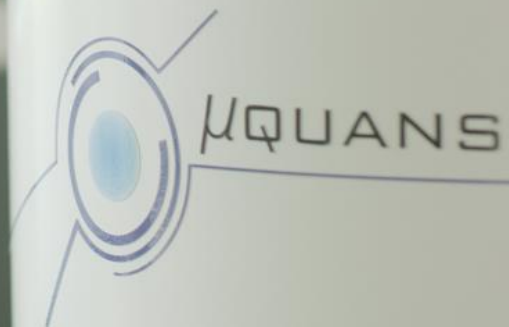


μQUANS



μQUANS

Muquans & Quantum Sciences



Dr. Jean Lautier Gaud

MUQUANS: QUANTUM SENSORS & LASER SYSTEMS FOR SENSING AND METROLOGY

- ✓ Company created in 2011
- ✓ 28 employees
- ✓ Technology transfer from **LNE-SYRTE, LP2N laboratories and LPL**



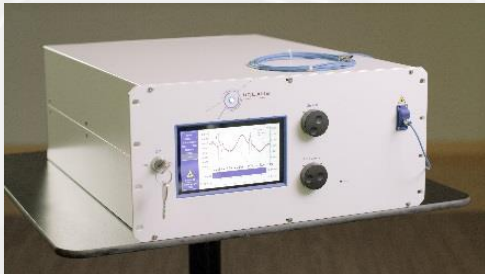
Cold atom gravity meter ($\Delta g/g \approx 10^{-9}$)



Cold atom atomic clock for VLBI ($\Delta f/f \approx 10^{-15}$)



Laser solutions ($\Delta \lambda/\lambda \approx 10^{-10}$)



Optical frequency transfer ($\Delta f/f \approx 10^{-20}$)



ABSOLUTE QUANTUM GRAVIMETER (AQG)

An industrial **Absolute Quantum Gravity meter** based on laser-cooled atoms

V. Ménot et al., Nature Scientific Reports, vol. 8, 12300 (2018)

Sensitivity, long-term stability, repeatability: $10^{-9} g$

→ *Detects 100 kg at 1 m*

→ *Detects variation of aquifer at 1 cm resolution at km depth*



- ✓ **Atom interferometry with cold Rb atoms**
- ✓ **Several units sold and delivered to customers**
- ✓ **Applications: underground resources monitoring, geodesy, volcano monitoring**



ABSOLUTE DIFFERENTIAL GRAVIMETER (A-DIG)

An industry-grade device measuring simultaneously g and dg / dz

Stability, repeatability: $10^{-10} g / m$

→ Detects a void of $1 m^3$ at 1.5 m depth in 8 s

- ✓ Atom interferometry with cold Rb atoms
- ✓ Validated demonstrator
- ✓ Applications: civil engineering, void & cavity detection

Rapid project *Gradiom* ending end of 2019



Muquans key partner with LNE-SYRTE laboratory



MUQUANS' LASER SYSTEM FOR QUANTUM SIMULATION



Enable the most advanced platforms based on atoms to develop a near-term generation of fully programmable quantum simulator

- *Integrated Intelligent laser system*
- *Industry-grade system providing state-of-the-art performances*



Muquans key partner of Quantum Flagship project **PASQUANS**

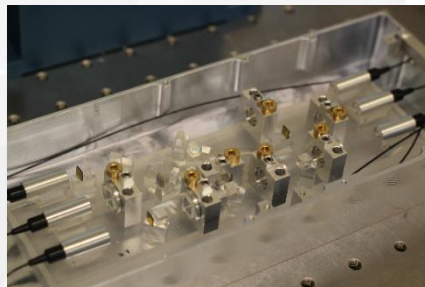


Muquans exclusive supplier of the start-up **PASQAL**



MUQUANS' LASER SYSTEM FOR QUANTUM COMMUNICATION

→ Laser systems and components for **Quantum Photonics** in the telecom range (QKD, squeezed light, quantum networks)



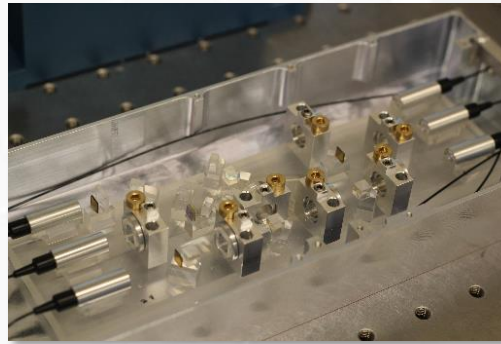
→ Laser systems and components for **Quantum Memory** based on cold atoms



Credit: Julien Laurat's team, LKB

Muquans key partner of Quantum Flagship project **QIA**





Cold atom sensors AND supply chain for Quantum Technologies

VISIT

www.muquans.com

CONTACT

jean.lautier@muquans.com

FOLLOW US ON LINKEDIN

www.linkedin.com/muquans

