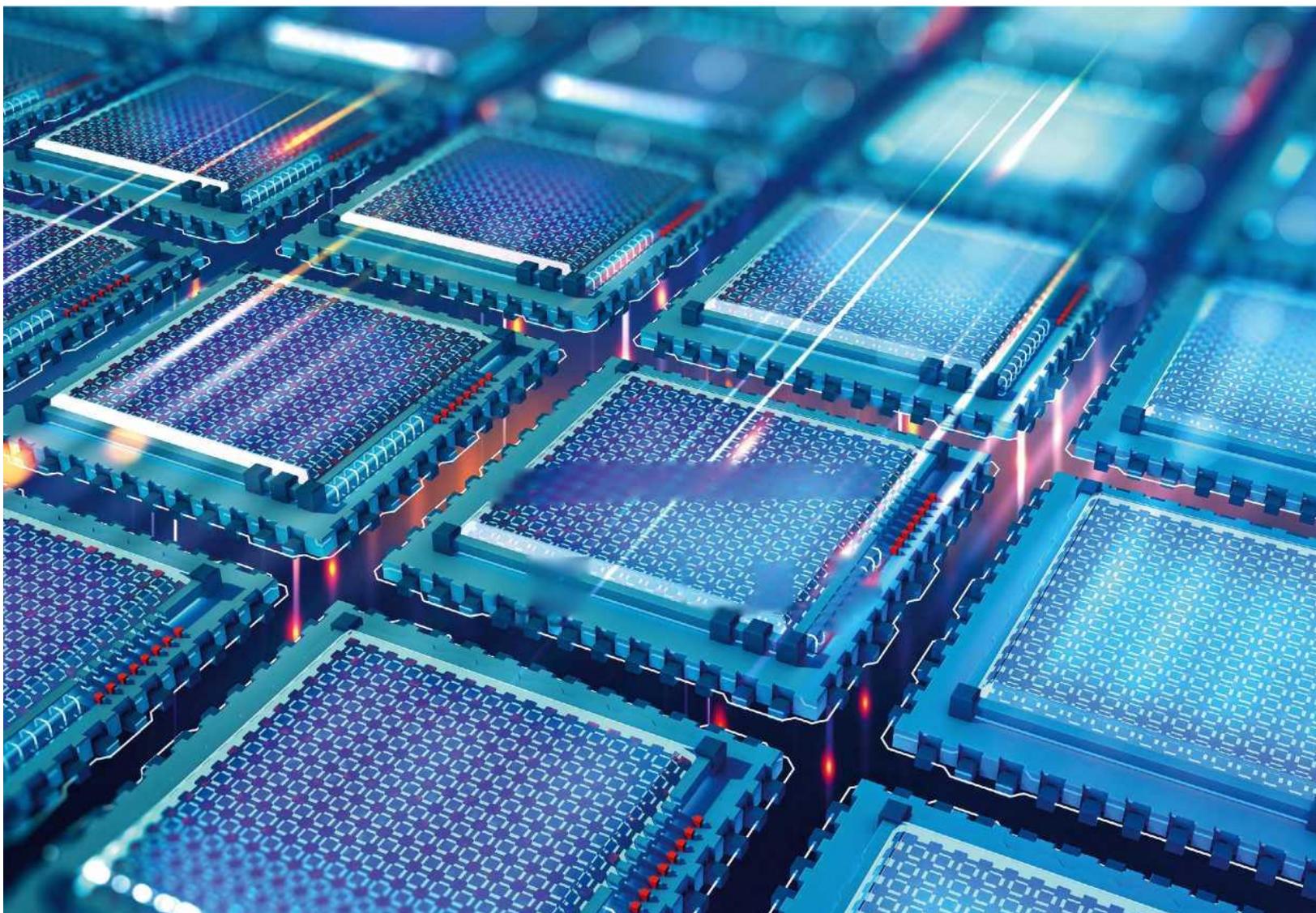




Financé par
l'Union européenne



QUANTUM
FLAGSHIP



Cadre de compétences pour les Technologies Quantiques

élaboré par Franziska Greinert et Rainer Müller
Version 1.0 (mai 2021)



Vue d'ensemble et structure générale



Comment utiliser le cadre de compétences

Le cadre Européen des Compétences pour les Technologies Quantiques vise à cartographier le **paysage des compétences et aptitudes possibles dans le domaine des technologies quantiques**. Il a été élaboré par le QTedu CSA afin de faciliter la planification et la conception de projets d'éducation et de formation en technologies quantiques.

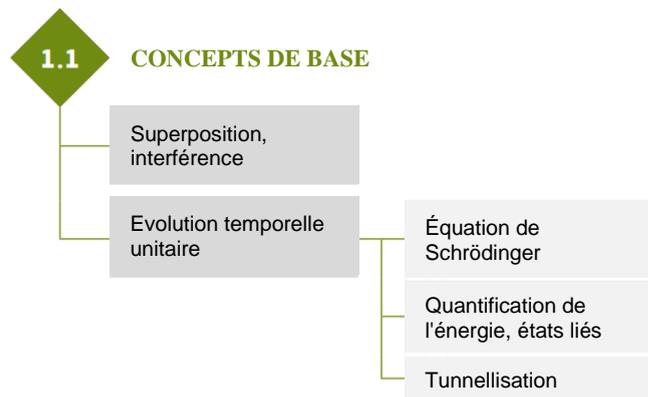
Le cadre de compétences se compose de sept domaines principaux. Ils décrivent la structure générale de Quantum Technologies :

1 CONCEPTS DE LA PHYSIQUE DU QUANTUM

Chacun de ces champs principaux comporte plusieurs sous-champs, par exemple :

- 1.1 CONCEPTS DE BASE
- 1.2 FORMALISME MATHÉMATIQUE
- 1.3 DYNAMIQUE DE QUBIT

Sur la première page de ce document, les principaux champs et sous-champs sont affichés dans un schéma graphique. Pour chaque sous-champ, il y a une page supplémentaire avec plus de détails :



Selon le public cible, chaque offre éducative traitera d'un niveau différent de profondeur et de difficulté. Pour refléter cela, il y a une dimension supplémentaire au Cadre de Compétences qui n'est pas montrée dans les graphiques. Pour chaque entrée, un **niveau de compétence** peut être spécifié : de A1 (Sensibilisation) à C2 (Innovation). Ces niveaux ont été élaborés pour le Cadre Européen de Référence Linguistique ; il est également utilisé, par exemple, dans le Cadre Européen DigCompEdu pour les compétences numériques. L'utilisation des niveaux de compétence facilite l'adaptation des offres d'éducation et de formation aux besoins des groupes cibles.

- | | | | |
|-----------|------------------------|-----------|--------------------|
| A1 | Sensibilisation | A2 | Exploration |
| B1 | Intégration | B2 | Expertise |
| C1 | Leadership | C2 | Innovation |

Le Cadre de compétences a été élaboré par l'équipe QTedu selon une approche ascendante. Entre l'été 2020 et le printemps 2021, nous avons mené une étude Delphi en trois étapes avec de nombreux participants de la communauté QT. Les résultats ont été affinés grâce à des entretiens avec des experts pour chaque sous-domaine.

Les technologies quantiques évoluent rapidement. De nouvelles technologies seront développées, d'autres deviendront moins importantes. Le Cadre de compétences devra être adapté en conséquence. Ainsi, le Cadre de compétences est un document évolutif qui sera mis à jour à intervalles réguliers. Les suggestions d'ajouts et de corrections sont les bienvenues à tout moment.

Veillez contacter :
Rainer Müller et Franziska Greinert
f.greinert@tu-braunschweig.de
QTedu – Action de coordination et de soutien pour le domaine quantique
Education technologique

Ce cadre fait partie d'un projet ayant reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne au titre de la convention de subvention n° 951787.



© Union européenne, 2021



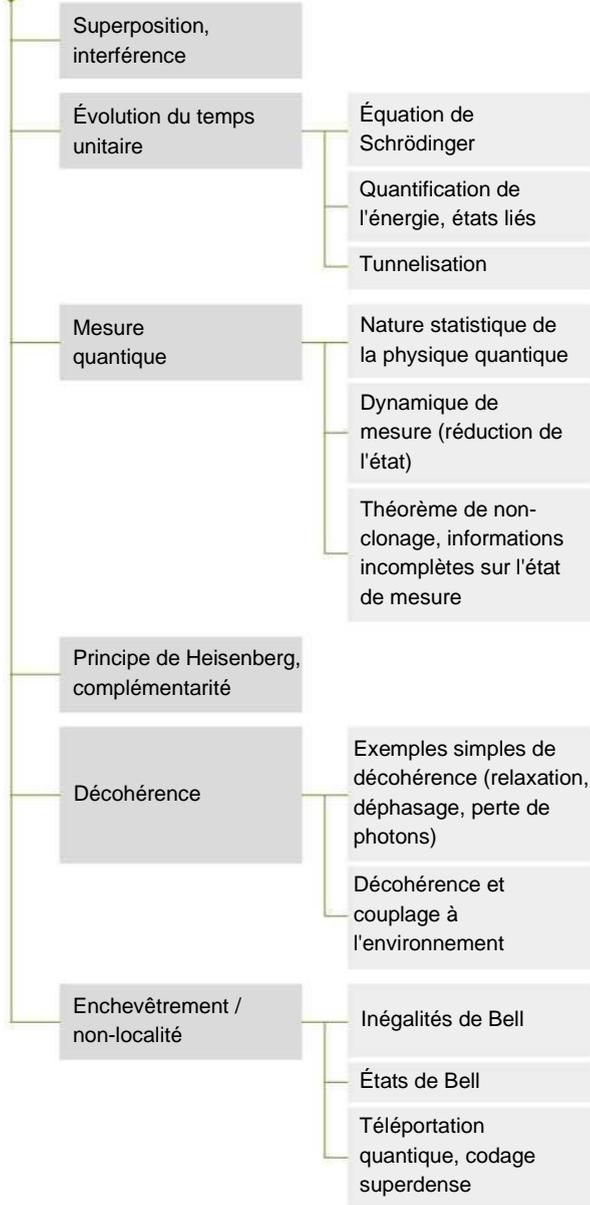
La politique de réutilisation des documents de la Commission européenne est mise en œuvre par la décision 2011/833/UE de la Commission du 12 décembre 2011 relative à la réutilisation des documents de la Commission (JO L 330 du 14.12.2011, p. 39).

Sauf indication contraire, la réutilisation de ce document est autorisée par la licence Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Cela signifie que la réutilisation est autorisée, à condition qu'un crédit approprié soit accordé et que toute modification soit indiquée.

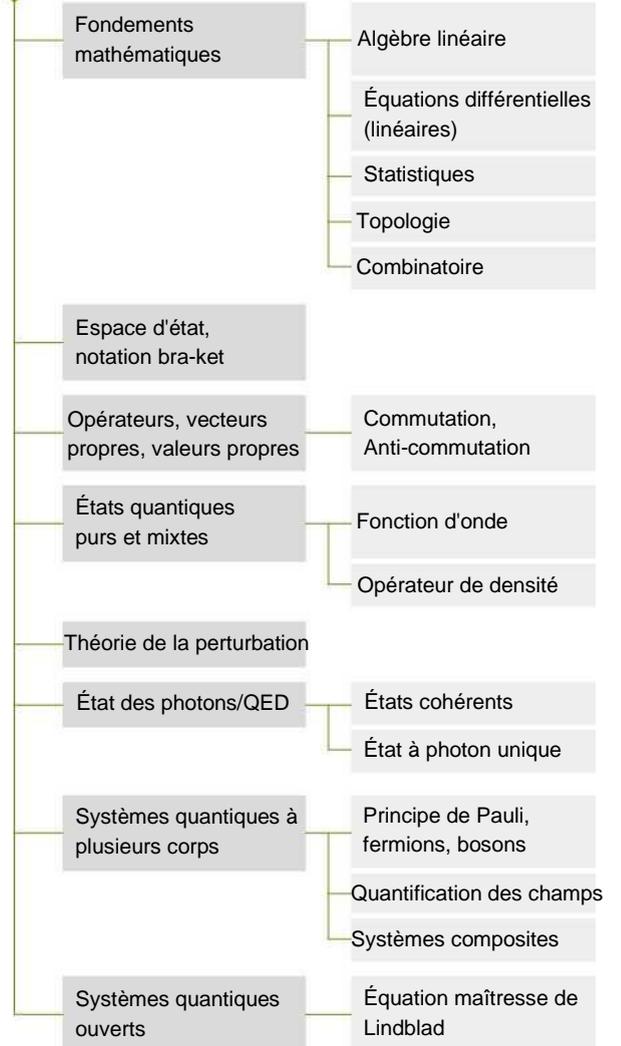
1

CONCEPTS DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE

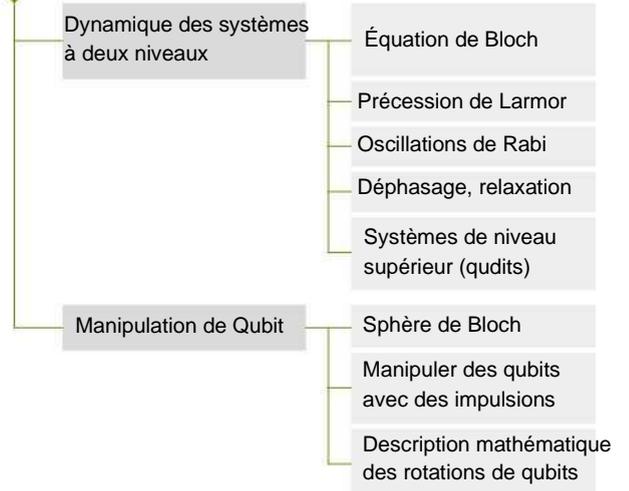
1.1 CONCEPTS DE BASE



1.2 FORMALISME MATHÉMATIQUE



1.3 DYNAMIQUE DE QUBIT



FONDITIONS PHYSIQUES DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

2.1

LA PHYSIQUE ATOMIQUE COMME BASE DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

Transitions hyperfine et autres

Niveaux électroniques et
transitions interdites

Effets de Zeeman et de Stark

États de Rydberg

Niveaux vibratoires ou
rotationnels dans les molécules

Gaz quantiques dégénérés et
statistiques quantiques

2.2

L'OPTIQUE QUANTIQUE COMME BASE POUR LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

Interactions des photons avec les
atomes et la matière

Degrés de liberté de polarisation

Sphère de Poincaré

Bunching, antibunching, états
comprimés

Apprentissage par machine quantique

2.3

LA PHYSIQUE DES SOLIDES COMME BASE POUR LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

Propriétés de l'état solide

Structure de la bande

Transport électrique

Propriétés optiques

Semi-conducteurs

Supraconductivité

Effet de Josephson

Dispositifs SQUID

Nanostructures

Gaz électronique 2D

Points quantiques

Nanofils

Science des matériaux

Science des surfaces

Phénomènes mésoscopiques

Effets topologiques

3

TECHNOLOGIES DE BASE

3.1

TECHNOLOGIES OPTIQUES

- Optique classique
- Lasers
- Sources de photons uniques
- Sources de photons enchevêtrés
- Systèmes opto-électroniques et opto-mécaniques
- Détecteurs à photon unique
- Photonique, fibres

3.2

TECHNOLOGIE DE L'ETAT SOLIDE

- Micro et nanoélectronique
- SQUID

3.3

TECHNOLOGIE DE LABORATOIRE

- Technologie du vide
- Cryogénie
- Électronique
- Micro-ondes, technologie RF
- Refroidissement laser
- Stabilisation laser
- Analyse du bruit
- Techniques de blindage
- Technologie des salles blanches
- Micro- et nano-structuration

3.4

CONTOLE EXPERIMENTAL

- Software
- Hardware
- Algorithmes de contrôle quantique

4

MATÉRIEL POUR ORDINATEURS ET CAPTEUR QUANTIQUES

4.1

DISPOSITIFS SUPRACONDUCTEURS

Types de qubits supraconducteurs : charge, flux, transmon, fluxonium

Jonctions Josephson pour la métrologie

4.6

MATIÈRES D'INITIALISATION, MANIPULATION ET LECTURE DES QUBITS

Micro-ondes

Lasers

Résonateurs (ex : lecture et portes de qubits supraconducteurs)

Commutateurs, déphaseurs, délais

4.2

DISPOSITIFS BASES SUR LE SPIN

Centres NV

Points quantiques semiconducteurs

4.3

ATOMES NEUTRES ET IONS

Pièges à ions

Atomes de Rydberg

Gaz quantiques froids

Réseaux optiques

4.7

L'UTILISATION DE PLATES-FORMES MATÉRIELLES POUR L'INFORMATIQUE QUANTIQUE

Critères de DiVincenzo

Limites de la NISQ

Limites propres à la plateforme

Intégration, emballage, graduation

Analyse comparative

Middleware

Intégration avec du matériel classique

4.4

NOUVEAUX CONCEPTS DE QUBIT

Qubits topologiques

Qubits à spin moléculaire

4.5

SYSTÈMES PHOTONIQUES

Réseaux optiques linéaires

Circuits intégrés photoniques

Techniques d'échantillonnage de boson

5

INFORMATIQUE QUANTIQUE ET SIMULATION

5.1

PORTES QUANTIQUES

- Portes à qubit unique
- Portes à deux qubits et plus

5.4

CORRECTION D'ERREUR QUANTIQUE

- Mécanismes de décohérence physique (découplage dynamique)
- Atténuation des erreurs
- Code de correction d'erreur quantique

5.2

LANGUES, OUTILS ET PLATEFORMES DE PROGRAMMATION QUANTIQUE

- Plateformes graphiques
- Kits de développement logiciel
- Langages de programmation

5.5

SIMULATION QUANTIQUE

- Simulateurs quantiques numériques
- Simulateurs quantiques analogiques et recuits quantiques

5.3

ALGORITHMES QUANTIQUES ET TECHNIQUES INFORMATIQUES

- Algorithme Shor, recherche de sous-groupes cachés
- Algorithme de Grover, amplification d'amplitude
- Algorithmes d'optimisation quantique
- Apprentissage par machine quantique
- Outils
 - Transformée de Fourier quantique
 - Estimation de la phase quantique
 - Algorithmes d'algèbre linéaire quantique
 - Marches quantiques
 - Commerce électronique
- Autres algorithmes : Vue d'ensemble du zoo d'algorithmes quantiques

6

CAPTEURS QUANTIQUES ET MÉTROLOGIE

6.1

CAPTEURS DE CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE

- Capteurs centraux NV
- Capteurs d'atomes de Rydberg
- Magnétomètres atomiques, OPM
- Capteurs supraconducteurs (nanowires, jonctions de tunnels supraconducteurs, détecteurs à inductance cinétique)

6.5

HORLOGES ATOMIQUES

- Horloges à micro-ondes
 - Horloges atomiques
 - Horloges CPT
- Horloges optiques
 - Horloges à ions piégés
 - Atomes neutres dans les réseaux optiques
 - Horloges logiques quantiques
- Horloges nucléaires
- Horloges atomiques transportables

6.2

CAPTEURS DE TEMPÉRATURE, DE PARTICULES ET DE PRESSION

- Capteurs à base de spin-qubit
- Capteurs de gaz de spectroscopie de précision
- Capteurs optomécaniques

6.6

DOMAINES D'APPLICATION DES CAPTEURS QUANTIQUES

- Métrologie au niveau quantique unique
 - Définition des unités SI
- Médecine et biologie moléculaire
 - Détection magnétique des signaux neuronaux et cardiaques
 - Imagerie (ex : cellules vivantes)
 - Diagnostic par micro-ondes
- Ressources naturelles, génie civil et surveillance de la terre
 - Génie civil
 - Relevés souterrains
 - Surveillance des infrastructures
 - Exploration des ressources naturelles
 - Prévention des risques naturels
 - Surveillance de la Terre
- Transport et navigation
 - Détection précise du moment et de la position
- Contrôle dans les processus industriels
 - Inspection en microélectronique
 - Minutage et synchronisation ultraprécis

6.3

SENSIBILISATION INERTIELLE ET DE GRAVITÉ

- Capteurs microélectromécaniques (MEMS)
- Interféromètres atomiques
- Capteurs rotatifs de nanoparticules

6.4

IMAGERIE QUANTIQUE

- Imagerie fantôme, tomographie
- Appareils photo monophotoniques, et à sous-bruit
- Radar quantique, lidar quantique

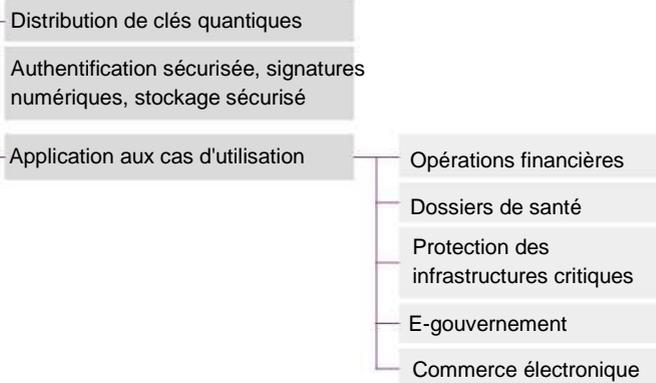
6.7

INTÉGRATION DES CAPTEURS ET DETECTION HYBRIDE

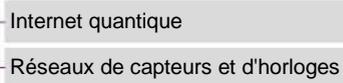
7

COMMUNICATION QUANTIQUE

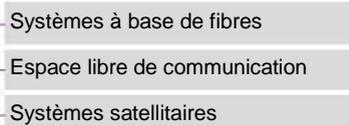
7.1 CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUE



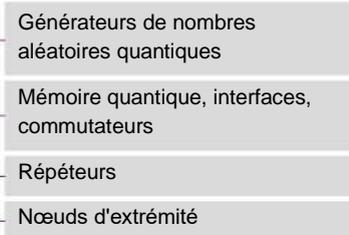
7.2 RÉSEAUX QUANTIQUES



7.3 INFRASTRUCTURES POUR LA COMMUNICATION QUANTIQUE



7.4 MATÉRIEL POUR LA COMMUNICATION QUANTIQUE



8

SOFT SKILLS ET COMPÉTENCES PRATIQUES

8.1

COMPÉTENCES PRATIQUES / EXPÉRIMENTALES

8.6

COMPÉTENCES EN MATIÈRE D'ENSEIGNEMENT ET DE SENSIBILISATION

8.2

PROGRAMMATION CLASSIQUE

- Langages de programmation
- Algorithmes classiques
- Classes de complexité
- Cryptographie classique
- Cryptographie post-quantique

8.7

COMPÉTENCES EN MATIÈRE DE RESEAUTAGE ET DE COMMUNICATION

- Communication avec des experts dans les domaines d'application
- Communication avec les clients

8.3

COMPÉTENCES EN GESTION ET EN LEADERSHIP

- Vue d'ensemble, potentiel et limites
- Incidence économique de l'intervalle QT
- L'esprit d'entreprise
- Conception et mise en œuvre du projet

8.8

ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE, RECHERCHE RESPONSABLE ET INNOVATION

8.9

CONNAISSANCES DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE, NORMALISATION, CERTIFICATION

8.4

CONNAISSANCE DES PROCESSUS INDUSTRIELS

8.5

CONNECTION DE QT AUX APPLICATIONS ET AUX CAS D'UTILISATION

- Connaissances dans les domaines des cas d'utilisation
- Cartographie des cas d'utilisation aux algorithmes quantiques
- Reconnaître l'avantage du quantique
- Appliquer la théorie de la complexité