



IBM Institute for
Business Value

Quantum Decade

Guide sur la sensibilisation, la
préparation et l'avantage



IBM peut vous aider

Les partenariats en informatique quantique entre les fournisseurs de technologies et les organisations visionnaires se multiplient. Leur objectif : développer des cas d'utilisation de l'informatique quantique et les applications correspondantes pour résoudre des problèmes du monde réel auparavant insolubles. Le réseau IBM Quantum Network est un écosystème mondial regroupant plus de 140 entreprises listées par Fortune 500, des institutions universitaires de premier plan, des jeunes entreprises et des laboratoires de recherche nationaux bénéficiant d'ordinateurs quantiques d'IBM et de l'apport de scientifiques, d'ingénieurs et de conseillers. Les participants collaborent pour accélérer les avancées dans le domaine de l'informatique quantique qui peuvent déboucher sur des applications commerciales précoces. Les organisations ayant rejoint le réseau IBM Quantum Network peuvent expérimenter la manière dont leurs enjeux importants peuvent s'appliquer à un véritable ordinateur quantique. Aujourd'hui, elles peuvent accéder à plus de 20 systèmes informatiques quantiques, dont un processeur quantique IBM de 65 qubits via la plateforme IBM Cloud. D'ici 2023, nous prévoyons qu'un ordinateur quantique de 1 000 qubits sera disponible pour explorer des problèmes pratiques importants dans divers secteurs d'activité. Visitez <https://www.ibm.com/quantum-computing/> pour plus d'informations.

IBM Institute for Business Value

L'IBM Institute for Business Value (IBV) fournit des informations sectorielles fiables et basées sur la technologie en combinant l'expertise de penseurs du secteur d'activité, d'universitaires de premier plan et d'experts de domaine avec des données de recherche et de performance mondiales. Le portefeuille de leadership intellectuel de l'IBV comprend des recherches approfondies, des analyses comparatives et des comparaisons de performances, ainsi que des visualisations de données qui facilitent la prise de décisions commerciales dans les régions, les secteurs et les technologies. Pour plus d'informations, suivez @IBMIBV sur Twitter, et pour recevoir les dernières informations par courriel, visitez ibm.com/ibv

Quantum Decade

Guide sur la sensibilisation,
la préparation et l'avantage



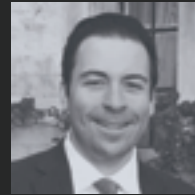
Un ingénieur d'IBM Quantum travaille sur le « super réfrigérateur », un réfrigérateur à dilution de 12 pieds de haut, conçu et construit par IBM Quantum pour abriter des systèmes quantiques de plus de 1000 qubits à une température proche du zéro absolu.

Quantum Decade

Table des matières

ii	IBM face à la décennie appelée Quantum Decade
iv	Perspectives globales
vii	Avant-propos
1	Introduction
9	Chapitre 1 : Prise de contact quantique et l'ère de la découverte
29	Chapitre 2 : La préparation quantique et la puissance de l'expérimentation
49	Chapitre 3 : L'avantage quantique et la quête de la valeur commerciale
69	Guides sectoriels :
71	<i>Compagnies aériennes</i>
77	<i>Banques et marchés financiers</i>
83	<i>Produits chimiques et pétroliers</i>
89	<i>Soins de santé</i>
95	<i>Sciences de la vie</i>

IBM face à la décennie appelée Quantum Decade



Anthony Annunziata

Directeur en chef de la
découverte accélérée
IBM Quantum



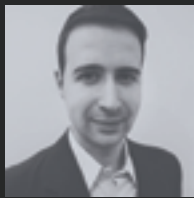
Joseph Broz

Vice-président
Croissance et marchés
IBM Quantum



David Bryant

Directeur en chef de programme
IBM Quantum



Joel Chudow

Responsable mondial des
partenariats stratégiques et
industriels
IBM Quantum



Charles Chung

Conseiller pour l'industrie
de l'électronique
IBM Quantum



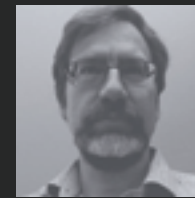
Christopher Codella

Ingénieur émérite pour
l'avenir de l'informatique
IBM Quantum



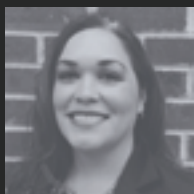
Dan Colangelo

Directeur de programme
Service Parts Planning
Systèmes IBM



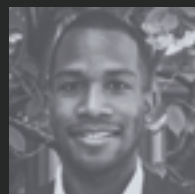
Scott Crowder

Vice-président
IBM Quantum
CTO
Systèmes IBM



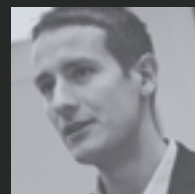
Kristal Diaz-Rojas

Adjointe exécutive de
Jamie Thomas, directeur
général
Systèmes IBM



Stefan Elrington

Responsable mondial des
jeunes entreprises
IBM Quantum



Frederik Flöther

Conseiller pour le secteur
des sciences de la vie et
l'industrie des soins de santé
IBM Quantum



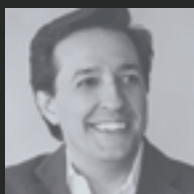
Jay Gambetta

Fellow IBM et vice-
président de Quantum
Computing
IBM Quantum



Jeannette Garcia

Directrice principale,
algorithmes, applications et
théorie
IBM Quantum



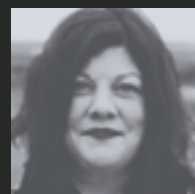
Darío Gil

Vice-président principal et
directeur en chef
Recherche IBM



Jonas Gillberg

Conseiller pour l'industrie
chimique et pétrolière
IBM Quantum



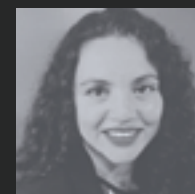
Heather Higgins

Associée chargée des
services sectoriels et
techniques
IBM Quantum



Michael Hsieh

Chef de file pour le
secteur public
IBM Quantum



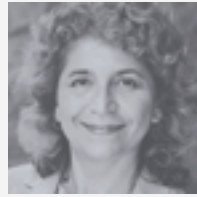
Noel Ibrahim

Conseillère pour le secteur
des services financiers
IBM Quantum



Blake Johnson

Chef de la plateforme quantique
IBM Quantum



Mariana LaDue

Conseillère pour le secteur des
voyages et transports
IBM Quantum



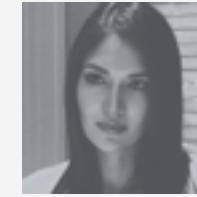
Jesus Mantas

Associé délégué principal
Services d'affaires mondiaux
IBM



Tushar Mittal

Directeur principal de produit
IBM Quantum



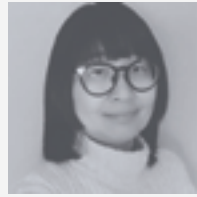
Zaira Nazario

Chef technique, théorie,
algorithmes et applications
IBM Quantum



Imed Othmani

Associé chargé des services-
conseils sectoriels
IBM Quantum



Hanhee Paik

Membre de la division Recherche
IBM Quantum



Nitin Parekh

Alliances pour le développement
commercial et recherche
en matière de propriété
intellectuelle
Siège social d'IBM



Bob Parney

Chef de file du processus
industriel
IBM Quantum



Jean-Stephane Payraudeau

Associé délégué -- Gestion des
offres, actifs, IBM Institute for
Business Value et Centres de
compétences sectoriels
Services d'affaires mondiaux IBM



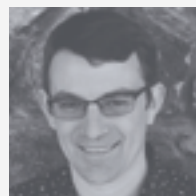
Veena Pureswaran

Associée adjointe et responsable
mondiale de la recherche sur
l'informatique quantique
IBM Institute for Business Value



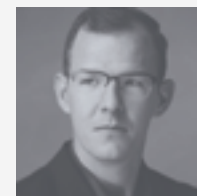
Edward Pyzer-Knapp

Membre principal de l'équipe
technique et responsable de la
recherche sur la modélisation et
la simulation enrichies par l'IA à
l'échelle mondiale
Recherche IBM



Chris Schnabel

Directeur en chef de la gestion
des offres
IBM Quantum



Travis Scholten

Chercheur en applications quantiques
IBM Quantum



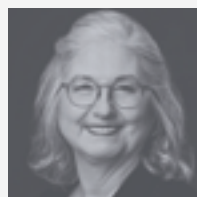
James Sexton

Fellow IBM et directeur en chef des
systèmes axés sur les données
Recherche IBM



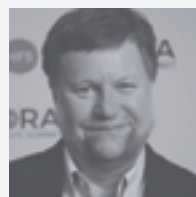
Claudine Simson

Directrice en chef, intelligence artificielle
de base, sciences exploratoires, grands
comptes stratégiques et directrice
exécutive mondiale, pétrole et gaz/
énergie/ produits chimiques
Siège social d'IBM



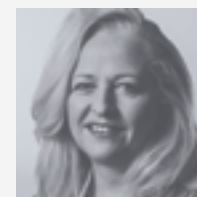
Galen Smith

Directrice de programme, chaîne
d'approvisionnement, chaîne de
blocs, IA et IoT
Systèmes IBM



Robert Sutor

Chef, exposants quantiques
IBM Quantum



Jamie Thomas

Directrice générale de la stratégie
et du développement des systèmes
Systèmes IBM



Kenneth Wood

Directeur général du développement
commercial à l'échelle mondiale
IBM Quantum

Quantum Decade Perspectives globales

Nous remercions les autorités
de l'informatique quantique
suivantes qui ont partagé leur
expertise avec nous :



Ching-Ray Chang

Professeur émérite
Département de physique
Université nationale de Taïwan



Richard Debney

Vice-président
Technologie numérique
BP



Todd Hughes

Directeur en chef technique
Projets et initiatives stratégiques
CACI



Ilyas Khan

Fondateur et CEO
Informatique quantique de
Cambridge



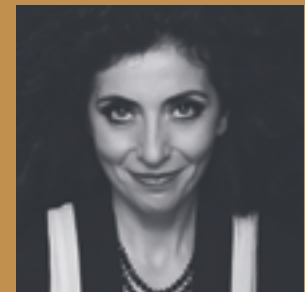
Glenn Kurowski

Vice-président principal et chef
de la technologie
CACI



Doug Kushnerick

anciennement chez Technology
Scouting and Ventures
Recherche et ingénierie
d'ExxonMobil



Sabrina Maniscalco

Professeure d'information et de
logique quantiques
Université de Helsinki
Chef de la direction
Algorithmiq Oy



Ajit Manocha

Président et CEO
SEMI



Prineha Narang

Professeure adjointe de sciences
computationnelles des matériaux
Université Harvard



Jeff Nichols

Directeur adjoint du laboratoire
Laboratoire national d'Oak Ridge



Christopher Savoie

Fondateur et CEO
Zapata Computing



Irfan Siddiqi

Professeur de physique à
l'Université de Californie
Berkeley



**Colonel (retraité)
Stoney Trent**

Fondateur et président
Bull Run Group



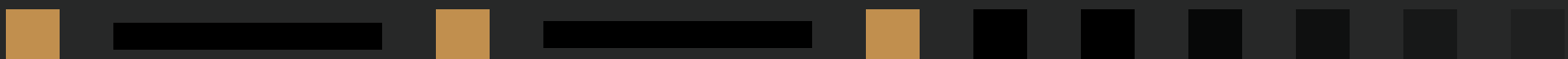
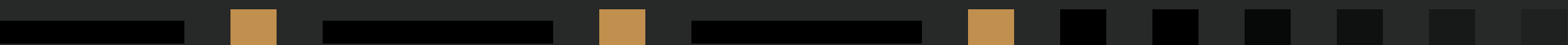
Peter Tsahalís

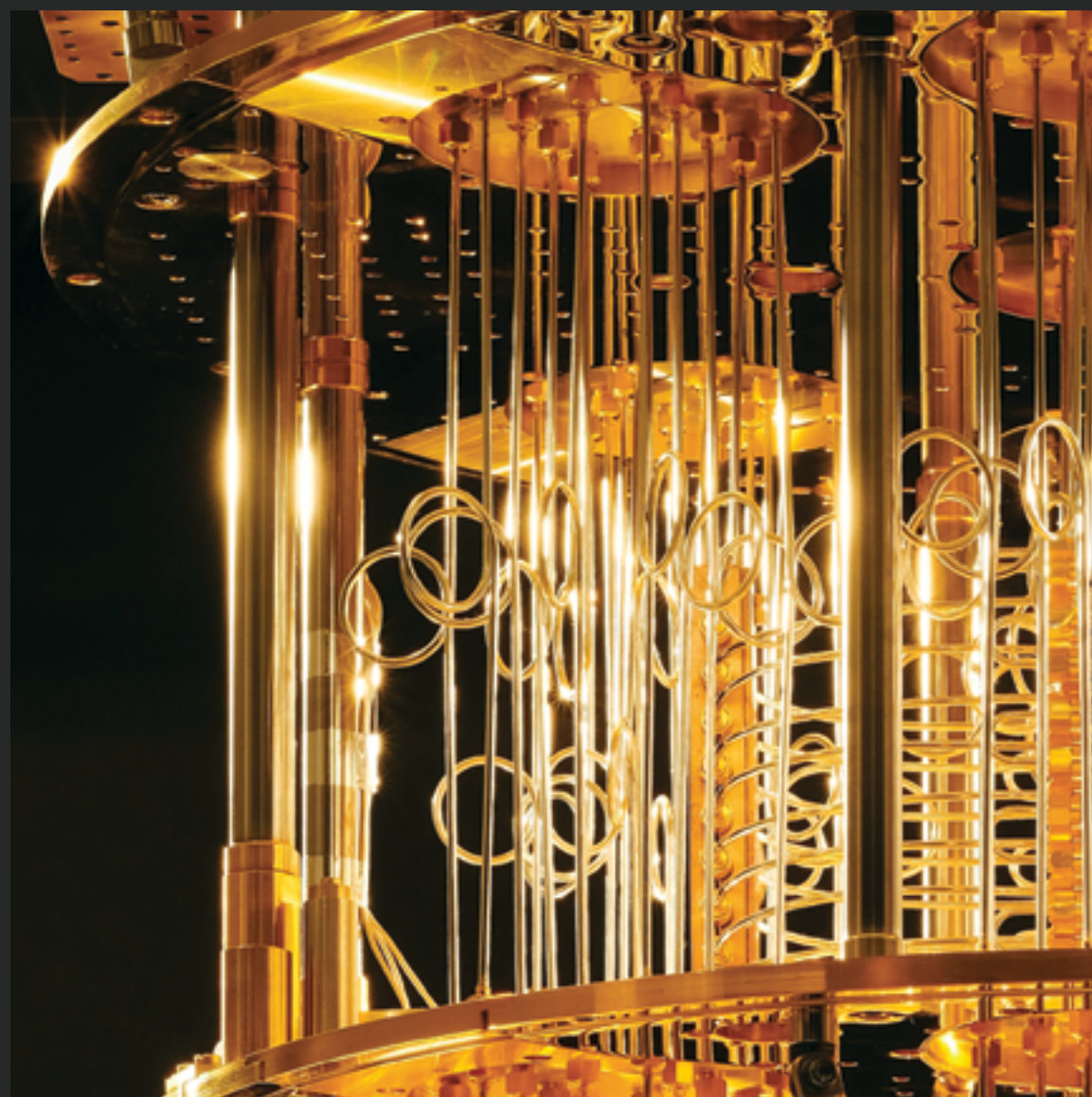
CIO des services stratégiques
et de la technologie avancée
Wells Fargo



Christian Weedbrook

Chef de la direction
Xanadu Quantum
Technologies





*Les composants internes de l'informatique
quantique sont maintenus à des
températures proches du zéro absolu.
Les lignes de contrôle des micro-ondes
contiennent des boucles pour permettre la
contraction lorsque l'appareil se refroidit.*



Darío Gil

Vice-président principal et directeur en chef de la division Recherche IBM

Avant-propos

D'abord, il y avait la théorie.

Charlie Bennett a écrit pour la première fois les mots « théorie de l'information quantique » dans son carnet en 1971.

Paul Benioff, Richard Feynman, Yuri Manin et d'autres pionniers de l'informatique quantique du début des années 1980 ont utilisé les mathématiques et la mécanique quantique théorique pour défendre leur cause. Leur message était clair : pour accélérer le progrès, il fallait simuler la nature. Nous devons imiter le comportement étrange des atomes et créer un ordinateur quantique.

Puis vinrent les qubits. C'est ainsi qu'avec la construction du premier ordinateur quantique à deux qubits en 1998, la théorie s'est transformée en réalité. Les qubits sont les éléments constitutifs d'un ordinateur quantique. Aujourd'hui, chez IBM, nous les fabriquons à partir de minuscules circuits supraconducteurs qui se comportent comme des atomes. Ils peuvent se trouver simultanément dans plusieurs états, interférer et être intriqués, de sorte que lorsqu'un qubit change d'état, son associé intriqué en fait autant.

Cela semble ahurissant, et ça l'est.

C'est le royaume étrange mais merveilleux de l'infiniment petit, et nous avons réussi à reproduire ses pouvoirs. En effet, ce sont ces étranges capacités des qubits à se trouver dans plusieurs états à la fois, à s'enchevêtrer et à interférer qui devraient permettre aux futurs ordinateurs quantiques d'effectuer des calculs plus puissants qu'un ordinateur classique traditionnel.

Nous y sommes presque. Nous vivons dans la Quantum Decade, alors que les ordinateurs quantiques s'apprêtent à surpasser leurs cousins classiques dans l'exécution de tâches significatives, réalisant ainsi ce que nous appelons l'avantage quantique. Nos qubits sont de plus en plus stables, capables de rester plus longtemps dans leur monde quantique et de nous permettre d'exécuter des calculs toujours plus complexes. Depuis des années maintenant, des chercheurs et des développeurs de l'industrie et du milieu universitaire utilisent les ordinateurs quantiques d'IBM via le nuage pour créer de nouveaux algorithmes qui seront cruciaux pour l'avenir. Ils se préparent pour l'ère quantique.

Je vous invite à vous joindre à eux.

En bricolant aujourd'hui des ordinateurs quantiques, nous façonnons le monde de demain. Que vous soyez une banque, une entreprise pharmaceutique, une compagnie aérienne ou un géant de l'industrie manufacturière, l'informatique quantique pourrait vous donner une longueur d'avance. De minuscules qubits vont parcourir une myriade de possibilités pour effectuer une recherche sur la meilleure configuration moléculaire d'un nouveau matériau ou d'un médicament, prédire avec précision votre risque financier ou choisir la manière optimale d'expédier vos marchandises de Melbourne à Atlanta.

Lisez le guide *Quantum Decade* pour découvrir la façon dont vous pouvez, vous aussi, vous préparer pour les ordinateurs quantiques et comment cette technologie de pointe peut vous aider, vous et votre secteur, à prospérer au moment où les ordinateurs quantiques arriveront à maturité.

Parce que ce moment est plus proche que vous ne le pensez.



Le « plafond » du « super-réfrigérateur », vu de l'intérieur et vers le haut

Connaissances

Priorités d'un monde post-pandémique

Alors que des industries entières sont confrontées à une plus grande incertitude, les modèles sectoriels deviennent plus sensibles aux nouvelles technologies et en dépendent. L'informatique quantique est sur le point d'étendre la portée et la complexité des problèmes commerciaux que nous pouvons résoudre.

L'avenir de l'informatique

L'intégration de l'informatique quantique, de l'intelligence artificielle et de l'informatique classique dans des flux de travaux hybrides multi-nuages sera à l'origine de la révolution informatique la plus importante depuis 60 ans. Les flux de travaux quantiques vont radicalement modifier le fonctionnement des entreprises.

L'entreprise axée sur la découverte

Les entreprises passeront de l'analyse des données à la découverte de nouvelles façons de résoudre les problèmes. De concert avec l'hyper-automatisation et l'intégration ouverte, cela permettra à terme d'introduire de nouveaux modèles d'affaires.

Quantum Decade

Introduction

Pendant des décennies, l'informatique quantique a été considérée comme une technologie futuriste : elle modifierait tout, si jamais elle passait du fantastique au pratique. Même ces dernières années, malgré des milliards de dollars d'investissement dans la recherche et une vaste couverture médiatique, cette technologie est parfois écartée par les décideurs de la vie réelle comme étant trop obscure et constituant une quête lointaine réservée aux universitaires et aux théoriciens. Alors que nous entrons dans la décennie appelée Quantum Decade, la décennie où les entreprises commencent à voir la valeur commerciale de l'informatique quantique, cette perspective devient rapidement un anachronisme.

Parce que l'informatique quantique arrive à maturité, et que les dirigeants qui ne comprennent pas la Quantum Decade et ne s'y adaptent pas risquent d'être à la traîne et de se retrouver, dans les faits, des années en arrière. Au cours des prochaines années, nous prévoyons une profonde révolution informatique qui pourrait bouleverser considérablement les modèles d'affaires établis et redéfinir des secteurs complets. Historiquement, les crises ont été à l'origine à la fois de nouvelles technologies et de leur adoption généralisée. La première guerre mondiale a donné naissance à des processus de fabrication qui sont toujours en place aujourd'hui. La guerre froide a accéléré la création du réseau Arpanet, le prédécesseur d'Internet, à la fin des années 60. Et maintenant la COVID-19 a entraîné un besoin accru d'agilité, de résilience et de maturité numérique accélérée. Nous prévoyons que l'informatique quantique - combinée aux technologies avancées existantes - aura un impact considérable sur l'évolution de la science et du monde des affaires. En accélérant la découverte de solutions aux grands défis mondiaux, l'informatique quantique pourrait déclencher des perturbations positives nettement plus abruptes que les vagues technologiques des dernières décennies.

Perspective

Notions de base

Comprendre la puissance exponentielle de l'informatique quantique

Les bits informatiques classiques peuvent stocker des informations sous forme de 0 ou de 1. Le fait que le monde physique conserve une structure fixe est conforme à la mécanique classique. Mais lorsque les scientifiques ont pu explorer la matière subatomique, ils ont commencé à voir des états plus probabilistes : la matière prenait de nombreuses caractéristiques possibles dans différentes conditions. Le domaine de la physique quantique est apparu pour explorer et comprendre ce phénomène.

La puissance de l'informatique quantique repose sur deux pierres angulaires de la mécanique quantique : l'interférence et l'intrication. Le principe d'interférence permet à un ordinateur quantique d'abandonner les solutions indésirables et d'améliorer les solutions correctes. L'intrication signifie qu'à l'état combiné, des qubits contient plus d'informations qu'indépendamment. Ensemble, ces deux principes n'ont aucune analogie classique et leur modélisation sur un ordinateur classique nécessiterait des ressources exponentielles. Par exemple, comme le décrit le tableau ci-dessous, pour représenter la complexité d'un ordinateur quantique de 100 qubits, il faudrait plus de bits classiques qu'il n'y a d'atomes sur la planète Terre.

Qubits	2	3	10	16	20	30	35	100	280
Bits classiques nécessaires pour représenter un état intriqué	512 bits	1 024 bits	16 kilo-octets	1 mégaoctets	17 mégaoctets	17 gigaoctets	550 gigaoctets	plus que tous les atomes de la planète Terre	plus que tous les atomes de l'univers

Jusqu'au énième degré
La puissance de la croissance exponentielle

« La période de temps entre la première révolution industrielle et la seconde a été d'environ 80 ans, et de la seconde à la troisième d'environ 90 ans. Mais la période de temps entre le troisième et le quatrième révolution a été réduite à environ 45 ans grâce aux bouleversements engendrés par les semi-conducteurs tels que l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA), l'apprentissage machine, la réalité virtuelle et le 4G. Je m'attends à ce que l'informatique quantique et de nombreuses autres perturbations accélèrent encore le temps nécessaire à l'industrie 5.0, qui sera d'environ 30 ans. »

Ajit Manocha
Président et CEO SEMI

Les éléments constitutifs de l'informatique quantique sont déjà en train d'émerger. Les systèmes d'informatique quantique fonctionnent sur le nuage à une échelle sans précédent, les compilateurs et les algorithmes progressent rapidement, les communautés de talents spécialisés dans l'informatique quantique se multiplient et les principaux fournisseurs de matériel et de logiciels publient des feuilles de route technologiques. L'applicabilité de la technologie n'est plus une théorie mais une réalité à comprendre, une stratégie à élaborer et à planifier. Et bonne nouvelle : les mesures que vous devez prendre pour vous préparer à l'adoption future de l'informatique quantique vont commencer à profiter à votre secteur *dès maintenant*.

L'informatique quantique ne va pas remplacer l'informatique classique, elle va l'élargir et la compléter. Mais même pour les problèmes que les ordinateurs quantiques peuvent mieux résoudre, nous aurons toujours besoin d'ordinateurs classiques. Étant donné que l'entrée et la sortie des données se feront sur des ordinateurs classiques, les ordinateurs quantiques et les programmes quantiques nécessiteront une combinaison de traitements classiques et quantiques.

Ce sont précisément les progrès de l'informatique classique, auxquels s'ajoutent les progrès de l'intelligence artificielle, qui sont à l'origine de la plus importante révolution de l'informatique depuis la loi de Moore il y a près de 60 ans.¹ L'informatique quantique complète une trinité de technologies : l'intersection des bits classiques, des qubits et des « neurones » de l'intelligence artificielle. Les synergies créées par cette triade - et non seulement par l'informatique quantique - sont le moteur de l'avenir de l'informatique (voir figure 1).

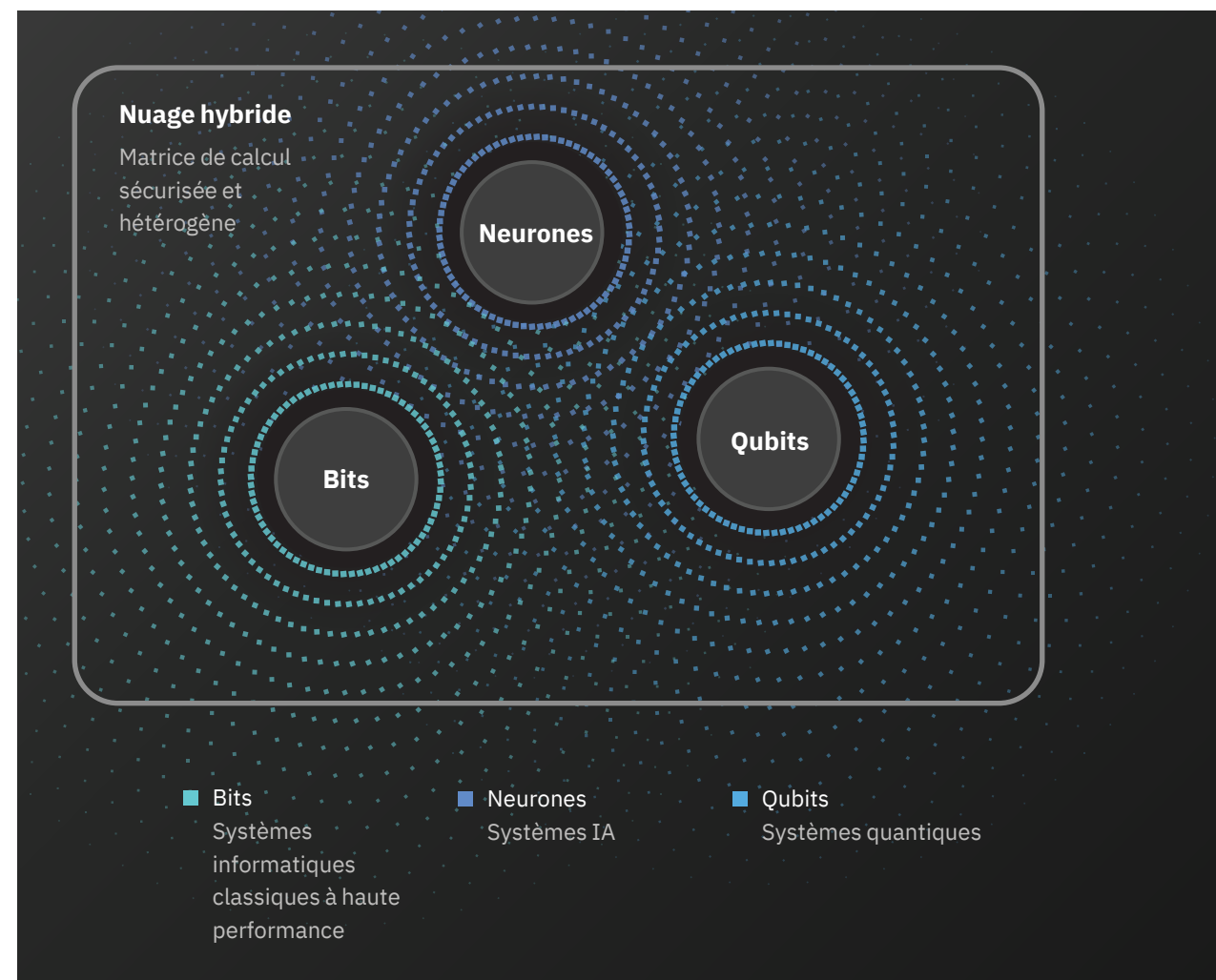


Figure 1
La révolution informatique la plus passionnante depuis 60 ans
La convergence de trois technologies majeures

L'IBM Institute for Business Value (IBV) s'est profondément engagé dans la réalisation de plus d'une douzaine d'études basées sur l'industrie et la pratique de l'informatique quantique.² Nous avons enrichi cette recherche de nouvelles idées glanées lors d'entretiens avec plus de 50 experts, dont des chercheurs d'IBM en informatique quantique ainsi que des clients, des partenaires et des universitaires. Le présent document sur Quantum Decade fournit aux cadres des stratégies pour se préparer à la prochaine transformation organisationnelle issue de l'informatique quantique. Il identifie les facteurs, les thèmes et les actions les plus importants à mener lors de ce point d'inflexion significatif.

Qu'est-ce qui fait que cette décennie sera considérée comme Quantum Decade? À quoi ressemblera un monde quantique? Et que peuvent et doivent faire maintenant les dirigeants clairvoyants et les organisations pour s'éduquer et se positionner efficacement? Les enseignements clés s'articulent autour de trois phases de l'évolution organisationnelle : sensibilisation, préparation et avantage quantique (voir figure 2).

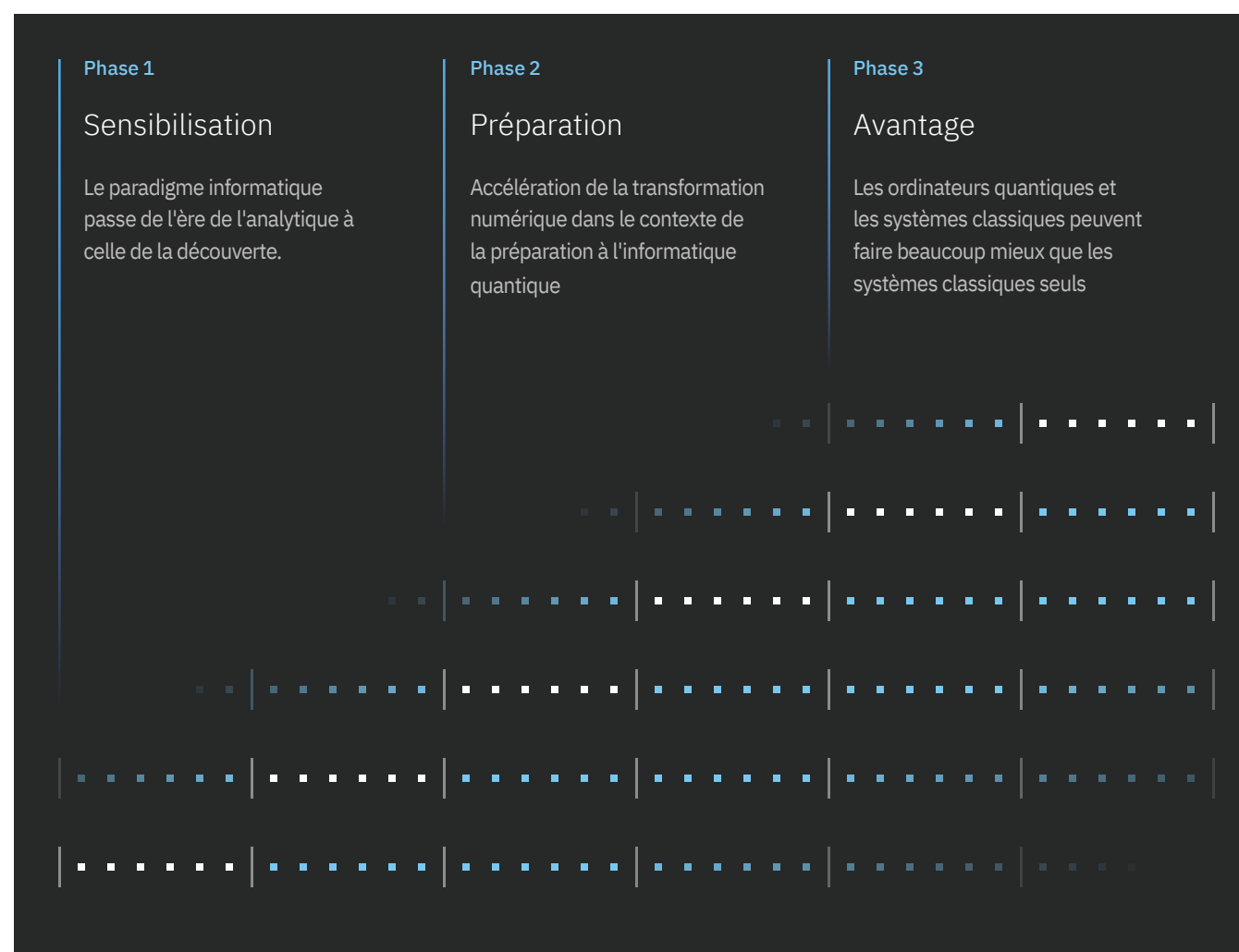


Figure 2

Le chemin vers l'avantage quantique

Adopter une stratégie fondamentale de la transformation numérique

Sensibilisation

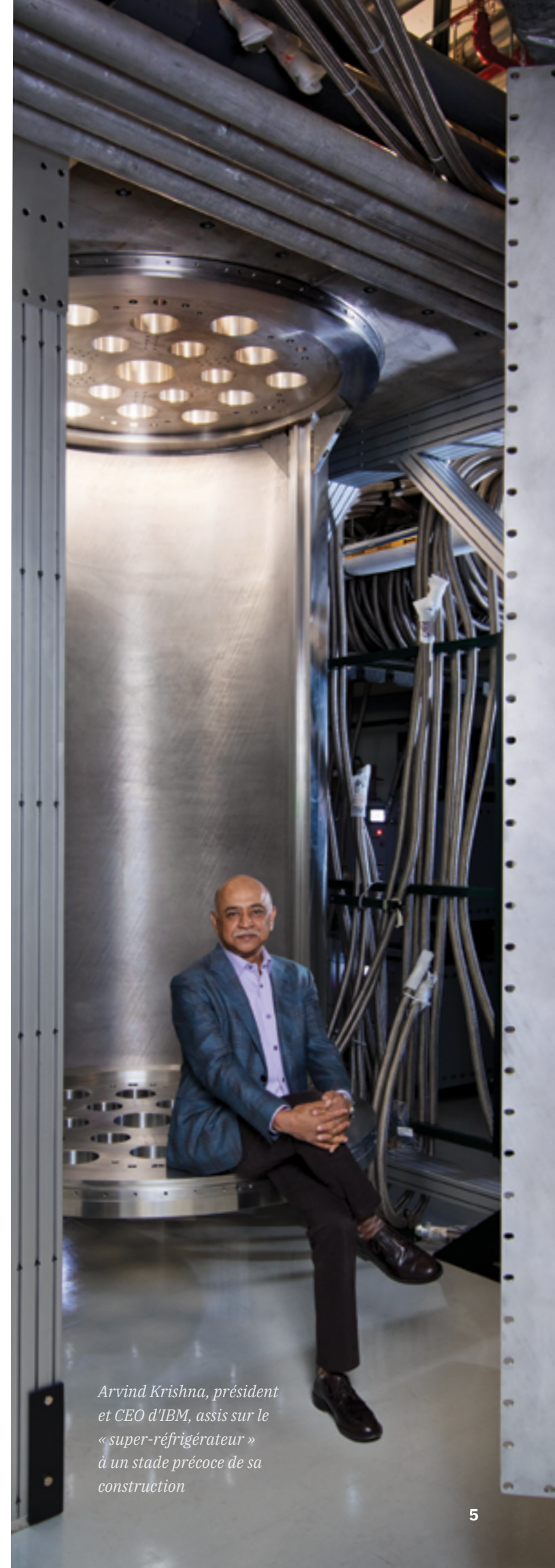
Selon l'étude d'IBV de 2021 menée auprès des chefs de la direction, 89 % des plus de 3 000 chefs d'entreprise interrogés *n'ont pas* cité l'informatique quantique comme une technologie clé pour obtenir des résultats d'affaires au cours des deux ou trois prochaines années.³ Pour le court terme, c'est compréhensible. Mais l'informatique quantique à 1 000 qubits devrait être disponible dès 2023 dans quelques années seulement.⁴ Compte tenu du potentiel perturbateur de la technologie au cours de cette décennie, les chefs de la direction devraient commencer à mobiliser des ressources pour saisir les premiers enseignements et entamer dès maintenant leur passage au quantique. Les chefs de la direction qui ignorent le potentiel du quantique prennent un risque substantiel, car les conséquences seront bien plus importantes que le fait d'avoir laissé passer l'intelligence artificielle il y a dix ans.⁵

La phase 1 de la stratégie quantique exige une reconnaissance réelle du fait que le paysage est en train de changer. Le changement principal est un paradigme informatique qui passe de l'ère de l'analytique (examen des données établies et apprentissage à partir de celles-ci) à l'ère de la découverte (examen plus approfondi et création de modèles plus précis pour la simulation, la prévision et l'optimisation). Il existe un réel potentiel pour découvrir des solutions qui étaient auparavant impossibles.

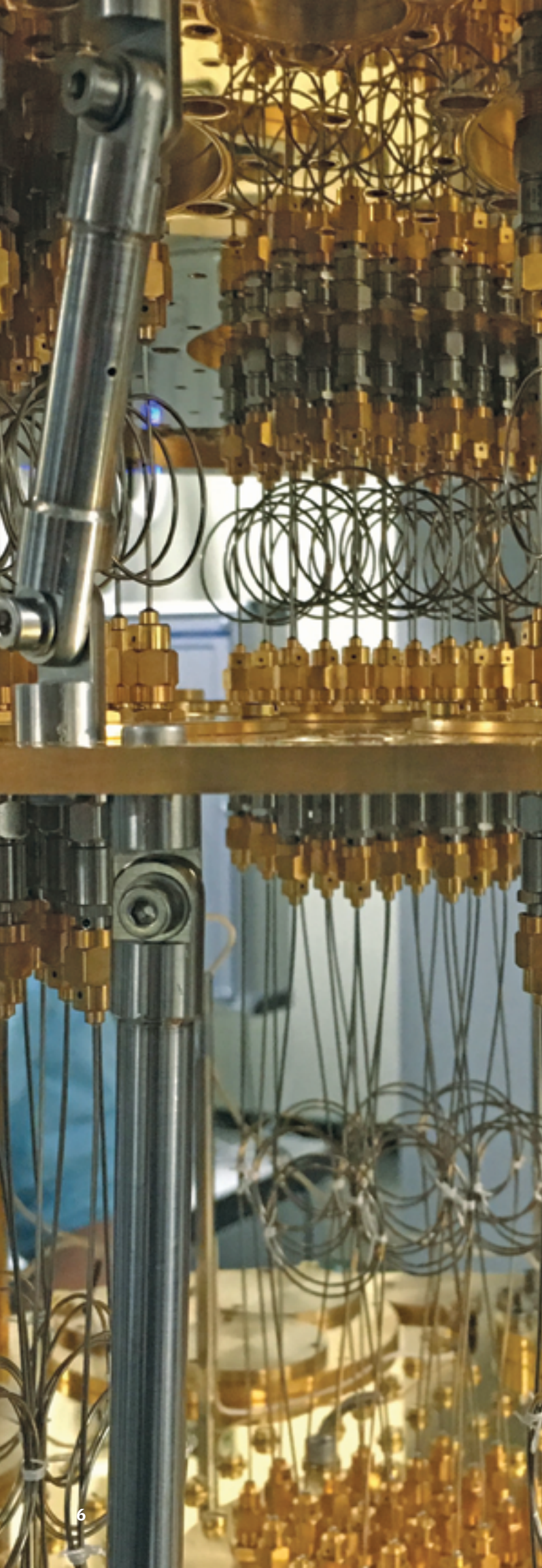
« Les chefs de la direction des 500 grandes entreprises listées par Fortune ont une occasion unique dans leur vie. Ils ne peuvent pas se permettre de faire du rattrapage. Il est temps de briser les traditions et de s'informer sur ce que l'informatique quantique peut faire pour eux. »

Ilyas Khan

Fondateur et CEO
de Cambridge Quantum Computing



Arvind Krishna, président et CEO d'IBM, assis sur le « super-réfrigérateur » à un stade précoce de sa construction



Préparation

Les entreprises ne peuvent pas encore utiliser l'informatique quantique pour résoudre les grands problèmes. Mais l'informatique quantique a bouleversé les délais et dépassé les attentes à chaque phase du développement. Il n'est pas trop tôt pour que les responsables organisationnels examinent comment l'avènement de cette nouvelle technologie pourrait modifier les plans et les attentes. La phase 2 demande une enquête approfondie sur la question suivante : comment votre modèle d'affaires pourrait-il être perturbé et remodelé? Comment l'informatique quantique pourrait-elle surcharger vos flux de travail actuels en matière d'IA et d'informatique classique? Quelle est l'application phare de l'informatique quantique pour votre secteur d'activité? Comment pouvez-vous approfondir les capacités de votre organisation en matière d'informatique quantique, que ce soit en interne ou par le biais d'écosystèmes? C'est le moment d'expérimenter et d'itérer avec la planification de scénarios. Recherchez ou maintenez des talents qui maîtrisent l'informatique quantique et sont capables d'éduquer les parties prenantes internes sur les possibilités, et associez-vous à des ressources informatiques quantiques pointues.

Mais une autre question cruciale est tout aussi importante : que doit mettre en place votre organisation aujourd'hui pour appliquer l'informatique quantique lorsqu'elle sera prête pour la production? En fait, poser les bases de l'informatique quantique, c'est aussi améliorer l'informatique classique. Des compétences accrues en matière de données, d'intelligence artificielle, et de nuage sont nécessaires pour préparer un terrain fertile à l'informatique quantique. Accélérer votre transformation numérique dans le contexte de la préparation à l'informatique quantique vous fournira une voie pragmatique à suivre tout en bénéficiant dès maintenant d'avantages importants. Car l'informatique quantique ne vise pas à vaincre l'informatique classique. La trinité de l'informatique quantique, de l'informatique classique et de l'intelligence artificielle forme un partenariat progressif et itératif qui les rend plus puissantes ensemble que séparément.

« Quand on pense à l'informatique quantique aujourd'hui, on pense aux chercheurs qui essaient de trouver comment appliquer l'informatique quantique. Dans dix ans, ces questions trouveront une réponse. À ce moment-là, il s'agira de savoir si vous utilisez l'informatique quantique d'une manière différente des autres. »

Prineha Narang

Professeure adjointe des sciences computationnelles des matériaux,
Université Harvard

« Il y a une énorme concurrence dans l'espace des « grands problèmes » du secteur de l'énergie. Celui qui y arrivera le premier aura un avantage considérable. »

Doug Kushnerick

Technology Scouting and Ventures
ExxonMobil Research and Engineering

Avantage

La phase 3, l'avantage quantique, se produit lorsqu'un travail informatique pour un secteur ou le domaine scientifique se fait de manière plus efficace, plus abordable, ou avec un résultat de meilleure qualité en utilisant des ordinateurs quantiques. C'est le point où les ordinateurs quantiques plus les systèmes classiques peuvent faire nettement mieux que les systèmes classiques seuls. À mesure que les progrès en matière de matériel, de logiciels et d'algorithmes dans le domaine de l'informatique quantique s'unissent, on assiste à une amélioration réelle des performances par rapport à l'informatique classique, et de nouvelles possibilités d'avantage quantique vont apparaître dans tous les secteurs. Mais la priorisation des *bons* cas d'utilisation, notamment ceux qui peuvent véritablement *transformer* une organisation ou un secteur d'activité, est essentielle pour atteindre la valeur commerciale du quantique.

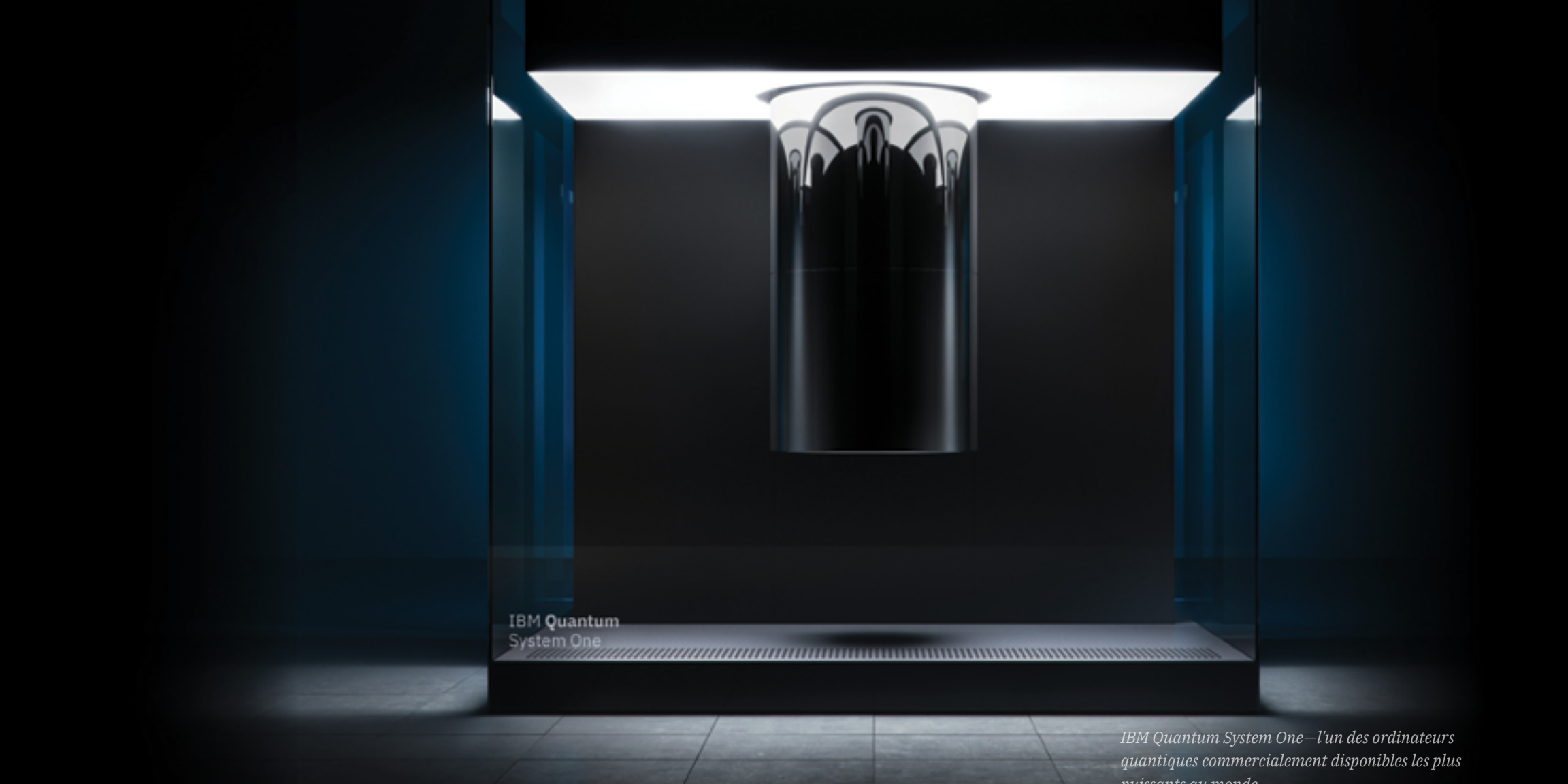
L'obtention de l'avantage quantique ne se fera pas du jour au lendemain. Mais même si cet avantage peut progresser après plusieurs mois ou années, il peut déclencher des réalisations exponentielles en matière d'utilisation et d'apprentissage. De la création de nouveaux matériaux aux traitements médicaux personnalisés, en passant par les changements radicaux des modèles d'affaires dans l'ensemble de l'économie, le changement est inéluctable. Les organisations qui améliorent leurs capacités informatiques classiques et explorent agressivement le potentiel de transformation sectorielle seront les mieux placées pour tirer profit de l'avantage quantique.

« Le meilleur de l'informatique quantique est encore à venir. Il existe des applications pour lesquelles nous supposons que l'avantage quantique va jouer. Et il y a un espace plus vaste d'applications informatiques quantiques que nous ne connaissons pas encore. C'est ce qui va redéfinir ce qui est possible. »

Irfan Siddiqi

Directeur en chef de l'Advanced Quantum Testbed
Lawrence Berkeley National Laboratory
Professeur de physique
à l'Université de Californie, Berkeley



A photograph of the IBM Quantum System One quantum computer. The device is a large, cylindrical, metallic structure with a complex, multi-layered top section, housed within a dark, industrial-looking environment. The lighting is dramatic, with a bright light source from above creating a strong glow and casting deep shadows. The text "IBM Quantum System One" is visible on the lower left side of the device's base.

IBM Quantum
System One

IBM Quantum System One—l'un des ordinateurs quantiques commercialement disponibles les plus puissants au monde

Connaissances

S'attaquer aux problèmes du monde

Qu'il s'agisse de la découverte de nouveaux médicaments, de la gestion des risques financiers ou de la réorganisation des chaînes d'approvisionnement, il est urgent d'accélérer la résolution de problèmes sociétaux, macroéconomiques et environnementaux de plus en plus complexes à l'échelle mondiale.

Le jalon des 1 000 qubits

Le matériel associé à l'informatique quantique est en passe de changer d'échelle, allant de 127 qubits en 2021 à 1 000 qubits en 2023, pour aboutir à l'informatique quantique pratique, caractérisée par des systèmes exécutant des circuits exempts d'erreurs et une adoption généralisée en 2030. Les environnements de développement infonuagiques à code source ouvert faciliteront l'utilisation des ordinateurs quantiques.

L'avenir du multi-nuage hybride

De nombreux programmes quantiques impliquent des interactions entre le matériel classique et quantique. Mais ces interactions introduisent des latences, ou délais, qu'il faut réduire pour optimiser la capacité. Cela fait des multi-nuages hybrides la technologie d'avenir la plus viable pour l'informatique quantique.

La puissance des écosystèmes

Les écosystèmes d'informatique quantique qui offrent des possibilités d'innovation collaborative et de développement de logiciels libres deviennent rapidement des terrains fertiles pour former les utilisateurs à appliquer l'informatique quantique à des problèmes réels.

Chapitre 1

Sensibilisation au quantique et ère de la découverte

Lorsque de nouvelles technologies émergent, il peut être difficile de les comprendre entièrement, surtout lorsqu'elles sont aussi complexes que l'informatique quantique. Mais le développement d'une compréhension de base est essentiel pour aligner de manière appropriée la technologie et la stratégie commerciale.

Dans ce chapitre, nous expliquons le bien-fondé de l'informatique quantique, ce qui se passe actuellement pour créer un point d'inflexion, et nous explorons ensuite comment la triade de l'informatique classique, de l'intelligence artificielle et de l'informatique quantique nous fera passer de l'ère de l'analytique, qui consiste à extraire des données pour en tirer des enseignements, à une ère définie par l'expérimentation et la découverte accélérées. Nous décrivons également les implications pour les entreprises dans un environnement axé sur la découverte.

Les arguments en faveur de Quantum Decade

Pression croissante pour résoudre les problèmes exponentiels

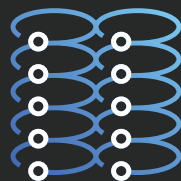


Découverte de nouveaux matériaux

Gestion des risques financiers complexes

Réingénierie des chaînes d'approvisionnement pour la résilience

Technologie quantique à un point de basculement



Changement d'échelle du matériel de 127 qubits en 2021 à 1 000 qubits en 2023

Développements logiciels pour une informatique quantique harmonieuse

Améliorations algorithmiques et meilleures qualité, capacité et variété des circuits

Mise à l'échelle des écosystèmes quantiques



L'innovation ouverte favorise l'apprentissage collaboratif

Des utilisateurs formés à appliquer l'informatique quantique à des problèmes du monde réel

> 2 milliards de circuits par jour pour IBM Quantum Services

La dite Quantum Decade sera motivée par la pression grandissante de résoudre les plus grands problèmes de calcul du monde des affaires et de la société, une trajectoire vers 1 000 qubits d'ici 2023 et une informatique quantique pratique d'ici la fin de la décennie, ainsi que des écosystèmes de développeurs capables de libérer cette puissance sur des problèmes réels et insolubles (voir figure 3).

Un sentiment d'urgence accru pour résoudre les grands problèmes

Imaginez la découverte de nouveaux matériaux pour les panneaux solaires qui nous aident à obtenir de l'énergie propre plus efficacement. Ou encore la simulation précise de pièces d'avion en quelques minutes plutôt qu'en quelques années. Imaginez que le développement d'un médicament qui peut parfois durer une décennie, se concrétise en quelques mois.

De plus en plus, ces problèmes relèvent d'une science ambitieuse, qui modifie le secteur et s'appuie sur des données. Dans ce domaine, la découverte d'entreprise s'appuie sur les données et l'intelligence artificielle, accélérant les cycles d'exploration qui permettent aux organisations de réunir des connaissances, de résoudre des problèmes et d'améliorer leurs opérations et leurs offres.⁶

Les problèmes à l'échelle planétaire, tels que le changement climatique, la faim dans le monde et la possibilité de nouvelles pandémies, nécessitent de nouveaux outils puissants pour réaliser des percées. L'informatique quantique peut contribuer à accélérer la résolution de ces problèmes informatiques complexes auxquels sont confrontés les entreprises et la société.

Figure 3

Pourquoi cette décennie est-elle connue sous le nom de Quantum Decade?

Trois facteurs nous y encouragent

« Nous devons appliquer l'informatique quantique pour améliorer la vie humaine. La nouvelle génération doit tirer profit de l'informatique quantique. »

Ching-Ray Chang

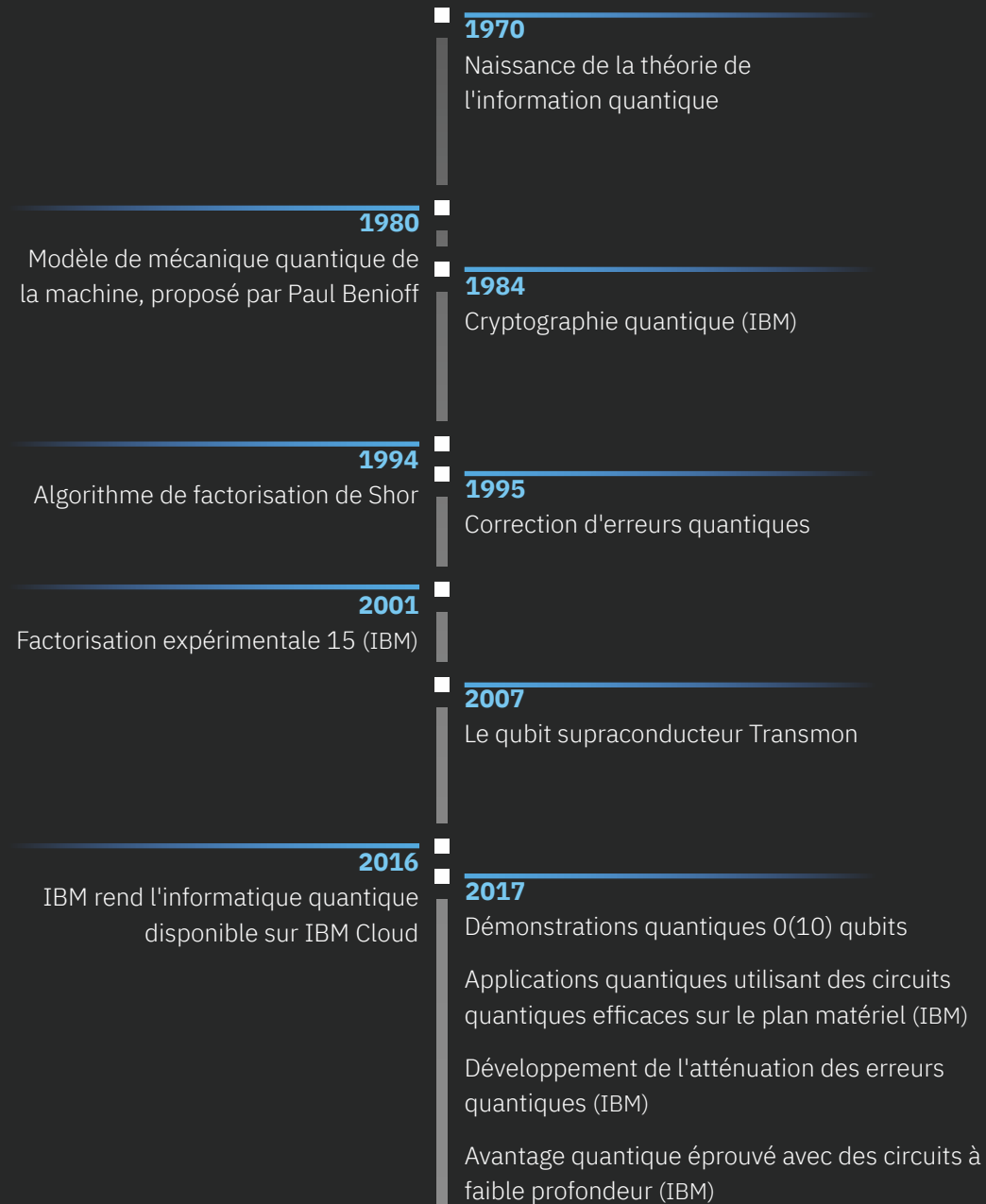
Professeur Émérite,
Département de Physique
à l'Université nationale de Taiwan

Les informations dont nous avons besoin pour réaliser des percées significatives dans la résolution de problèmes mondiaux existent peut-être déjà, mais il nous manque la puissance de calcul pour les exploiter et les utiliser de manière productive. Pour comprendre pourquoi, il faut retourner en arrière. L'informatique classique a donné naissance à l'ère de l'analytique. Les systèmes existants reposent sur le stockage et la manipulation de bits de calcul individuels, enregistrés sous forme de 1 ou de 0, qui nous permettent de traiter de vastes volumes de données. Les ordinateurs quantiques fonctionnent d'une manière fondamentalement différente par l'intermédiaire de bits quantiques ou qubits, qui peuvent représenter l'information en utilisant plus de dimensions (voir Perspective, « Faits incroyables sur l'informatique quantique » à la page 15). En exploitant les propriétés de la mécanique quantique, les ordinateurs quantiques excellent dans le défi consistant à évaluer des multitudes d'options qui se prêtent bien à ces propriétés et à explorer des problèmes qui étaient jusqu'à présent insolubles.

Le point de basculement quantique

L'informatique quantique n'est pas nouvelle. Elle a fait l'objet de théories et d'expériences depuis qu'elle a été postulée pour la première fois par Paul Benioff, Richard Feynman et d'autres au début des années 80.⁷ Dans les années 90, des fonctions mathématiques et algorithmiques préliminaires ont été mises en place; les années 2000 ont été consacrées à la représentation physique des qubits; et dans les années 2010, il a été démontré que les systèmes multi-qubits étaient viables et accessibles sur le nuage (voir figure 4).

Figure 4 Un grand bond en avant
*Jalons historiques de
l'informatique quantique*



2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Exécution de circuits quantiques sur IBM Cloud	Démonstration et prototype d'applications quantiques	Exécution d'applications quantiques 100 fois plus rapides sur IBM Cloud	Circuits dynamiques pour une variété accrue de circuits, une plus grande complexité algorithmique	Développement simplifié grâce à des flux de travail quantiques conçus dans le nuage	Appel de services de plus de 1 000 qubits de l'API infonuagique et investigation de la correction d'erreurs	Flux de travail quantiques améliorés grâce à l'informatique haute performance et aux ressources quantiques

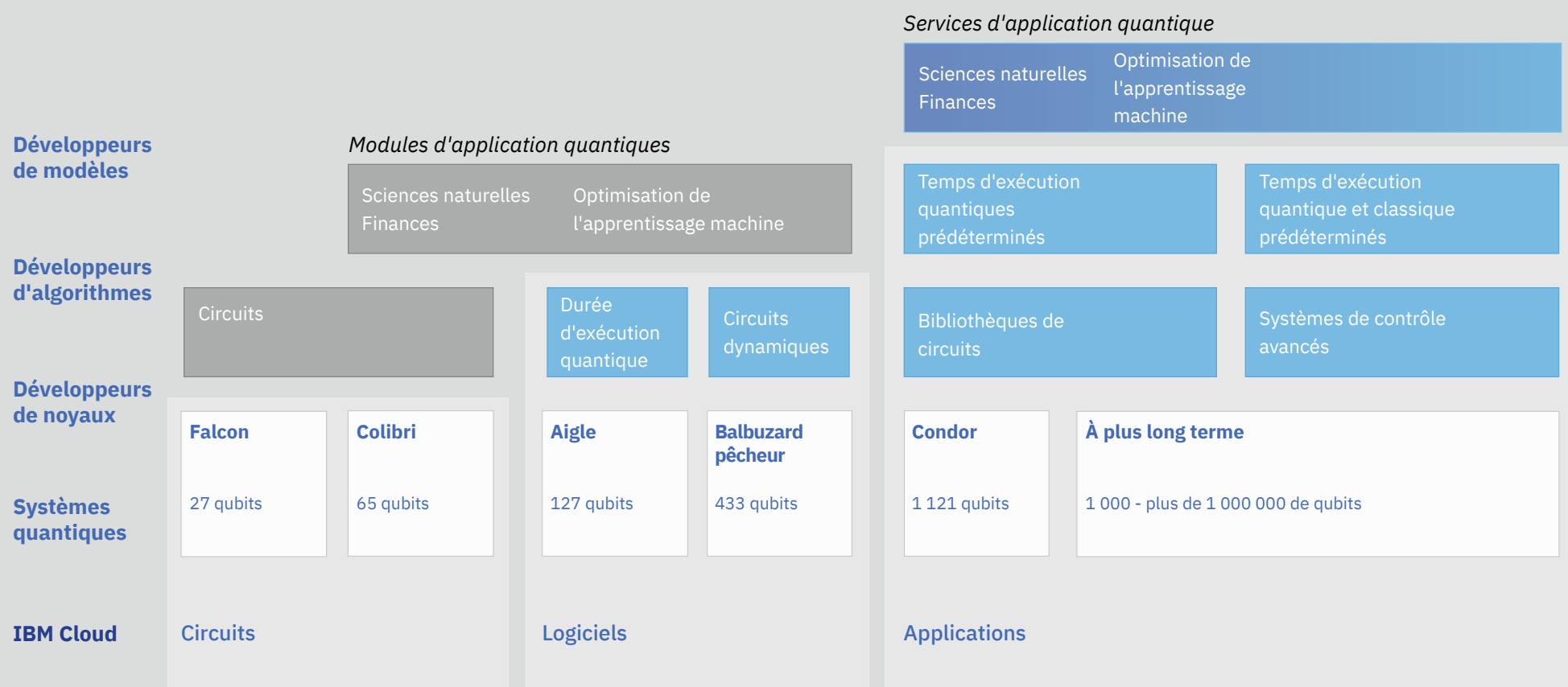


Figure 5
Le parcours de certification en informatique quantique d'IBM
Progrès récents et perspectives d'avenir

Alors, que se passe-t-il maintenant? L'avancée de l'informatique quantique a atteint un point de basculement. En 2020, la référence en informatique quantique était un système IBM avec 65 qubits. Ce chiffre devrait presque doubler en 2021, tripler pour atteindre plus de 400 qubits en 2022 et plus que doubler à nouveau pour atteindre plus de 1 000 qubits en 2023. Au-delà de l'augmentation du nombre brut de qubits, des contrôles et des infrastructures cryogéniques plus efficaces et plus denses contribueront à améliorer les performances des qubits individuels, tout en limitant le bruit et l'encombrement. Les scientifiques et ingénieurs quantiques introduiront également des techniques de correction et d'atténuation des erreurs susceptibles d'accroître la variété des problèmes pouvant être résolus par les ordinateurs quantiques (voir figure 5).⁸

Il existe plusieurs approches pour créer des qubits, comme la supraconductivité, les photons et les ions piégés, chacune ayant ses caractéristiques et ses capacités de mise à l'échelle respectives. Les qubits sont souvent utilisés comme un jalon, mais ils ne disent pas tout, ils ne sont qu'un élément du tableau d'ensemble. Par exemple, le concept de circuit quantique est essentiel. Semblable à un circuit en informatique classique, un circuit quantique représente l'ensemble des opérations effectuées sur des qubits dans le temps.

Trois attributs clés sont nécessaires pour créer des ordinateurs quantiques qui peuvent être utilisés de manière productive pour résoudre des problèmes de valeur commerciale : *qualité*, *capacité* et *variété*. En 2019, IBM a développé le volume quantique (VQ) pour mesurer la puissance de calcul d'un ordinateur quantique. Le VQ traite des questions très techniques, notamment les erreurs de porte et de mesure, la diaphonie, la connectivité des appareils et l'efficacité des compilateurs. D'autres fournisseurs commencent à signaler leurs progrès en matière de qualité informatique en utilisant des VQ.

IBM a réussi à doubler son volume quantique chaque année. En fait, IBM a doublé ce volume trois fois en 2020. Il s'agit d'un niveau d'augmentation conforme à la loi de Moore, même si la loi de Moore elle-même a diminué pour l'informatique traditionnelle (voir Perspective, « L'informatique classique (or -) Le problème de la loi de Moore » à la page 16).

« La loi de Moore arrive à sa fin et l'informatique classique atteint ses limites au moment même où la demande commence à augmenter. »

Richard Debney

Vice-Président, Technologie Numérique chez BP

Perspective

Trois types de problèmes à résoudre par l'informatique quantique

À court ou moyen terme, l'informatique quantique pourrait être particulièrement apte à résoudre trois types de problèmes :

simulation

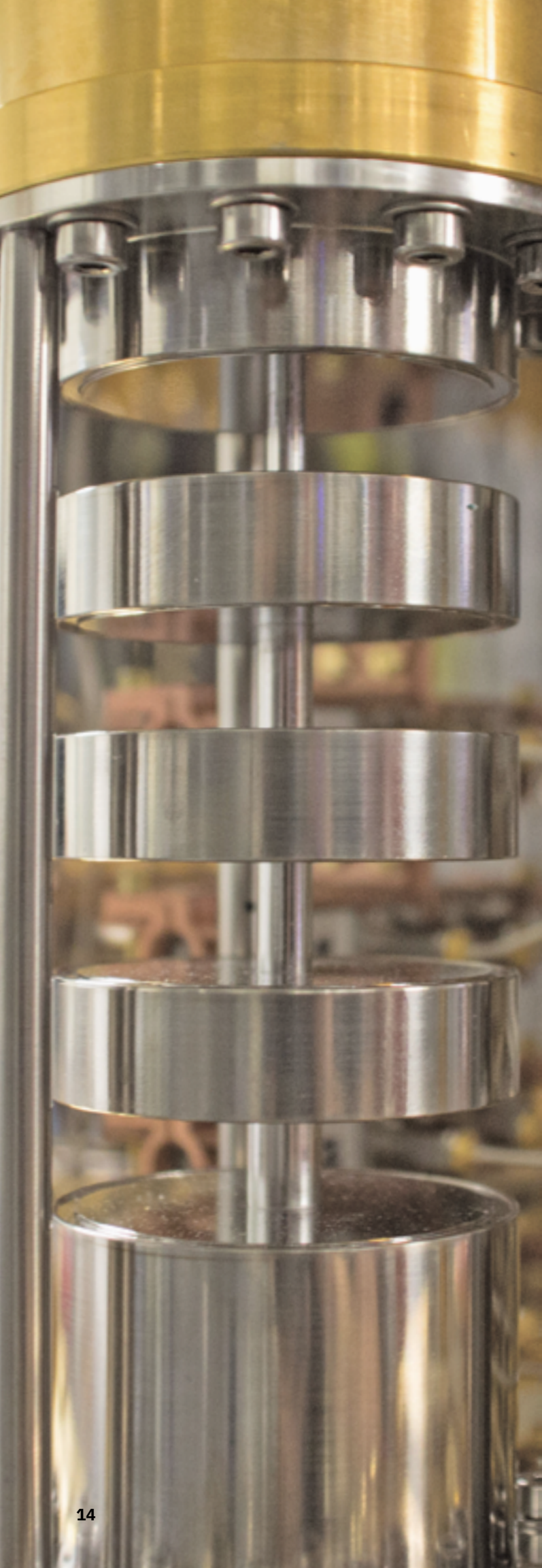
telle que les processus et systèmes de modélisation qui se produisent dans la nature,

recherche et graphique

impliquant la recherche de la meilleure solution ou de la solution optimale dans une situation où de nombreuses réponses possibles existent,

algèbre

y compris les applications d'apprentissage machine.



La deuxième condition pour l'exploitation des ordinateurs quantiques est une augmentation de la *capacité* du système. Le nombre d'opérations à virgule flottante par seconde (FLOPS) dans un système haute performance classique est un exemple de mesure de capacité classique. La capacité d'un ordinateur quantique est une mesure du nombre de circuits quantiques qu'un système peut exécuter par tranche de temps. Les programmes quantiques sont une combinaison d'instructions classiques et de circuits quantiques qui reposent sur la mémoire classique. Par conséquent, un ordinateur quantique est une combinaison de ressources classiques et de ressources informatiques quantiques qui sont rapprochées pour exécuter efficacement des programmes quantiques. Lorsque le programme fait appel aux frontières classiques et quantiques, ces appels introduisent des latences, ou délais, qui doivent être réduits pour optimiser la capacité. La capacité du système dépend aussi fortement de la technologie des qubits sous-jacente et peut vraisemblablement déterminer quelle technologie réussira à fournir une valeur commerciale.

La troisième condition d'exploitation est la *variété*, c'est-à-dire la capacité de créer des circuits plus complexes et dynamiques. Les circuits dynamiques utilisent des instructions classiques à très faible temps d'attente qui peuvent s'intégrer aux mesures du circuit quantique pour définir les prochaines opérations du circuit quantique. Cela permet de construire des circuits quantiques plus efficaces et constitue une capacité fondamentale nécessaire à la correction des erreurs quantiques. La correction d'erreurs quantiques peut protéger les informations quantiques en utilisant de multiples qubits physiques pour coder les informations dans un seul qubit logique. En termes de variété, les ordinateurs quantiques doivent être capables d'exécuter une diversité de circuits pour résoudre efficacement une variété de problèmes (voir étude de cas, « Woodside Energy » à la page 17).

Perspective

Des faits étonnants sur l'informatique quantique

(que vous n'avez peut-être pas besoin de connaître)

Le moins que l'on puisse dire, c'est qu'une grande partie de l'informatique quantique est contre-intuitive. Vous devez certes comprendre la puissance et le potentiel de l'informatique quantique pour élaborer des stratégies et évaluer les cas d'utilisation, mais la bonne nouvelle est que vous n'avez pas besoin d'être un physicien ou un théoricien quantique — vos partenaires et vos écosystèmes sont là pour ça. Mais voici quand même quelques faits intéressants :

Premier fait. L'informatique quantique exploite un principe fondamental de la mécanique quantique, selon lequel un système physique dans un état défini peut quand même se comporter de manière aléatoire. Le système est dans *une superposition*, qui est une combinaison linéaire de deux ou plusieurs états.

Deuxième fait. Les bits de calcul classiques sont soit un 0, soit un 1. Mais dans l'informatique quantique, les bits quantiques, ou qubits, peuvent se trouver dans un nombre infini d'états en même temps, une superposition de 0 et de 1. Pensez à une pièce de monnaie. Si vous jouez à pile ou face avec une pièce de monnaie, elle atterrit soit d'un côté, soit de l'autre. Mais si vous faites tourner une pièce sur elle-même, ses possibilités dimensionnelles augmentent de façon exponentielle.

Troisième fait. Dans le même ordre d'idées, en logique binaire, soit les choses « sont », soit elles « ne sont pas ». Les ordinateurs quantiques n'ont pas cette limitation, ce qui permet un reflet plus précis de la réalité.

Quatrième fait. Les superpositions ne sont pas intrinsèquement quantiques. Par exemple, lorsque plusieurs notes de musique créent un son simultanément, l'air environnant est en superposition. La mécanique quantique a ceci de particulier que, dans certaines circonstances, lorsque vous mesurez une superposition quantique, vous obtenez des résultats aléatoires, même si l'état du système est défini.

Cinquième fait. Le fait de mesurer un bit classique ne le modifie pas. Si un bit est un 0, il se mesure comme un 0. Il en va de même pour un 1. Mais si le qubit est dans une superposition quantique, le fait de le mesurer le transforme en un bit classique, reflétant un 0 ou un 1.

Sixième fait. *L'intrication* est une caractéristique d'un système quantique dans lequel deux qubits séparés se comportent de manière individuellement aléatoire, mais sont inexplicablement corrélés. Deux qubits intriqués mesurés individuellement peuvent donner des résultats aléatoires. Mais si le système est considéré dans son ensemble, l'état de l'un dépend de l'autre. Le système combiné contient plus d'informations que les parties individuelles. Difficile à comprendre? Einstein avait baptisé ce phénomène « action effrayante à distance ».⁹

Septième fait. Les ordinateurs quantiques peuvent utiliser l'interférence pour abandonner les chemins qui mènent à des solutions incorrectes et améliorer les chemins contenant la solution correcte.

Huitième fait. Le bruit fait perdre aux qubits leurs propriétés mécaniques quantiques, d'où la nécessité de les maintenir isolés de toute source de bruit. Il existe différentes façons de créer des qubits. Une façon populaire consiste à exploiter la supraconductivité pour créer des dispositifs dont les propriétés mécaniques quantiques peuvent être contrôlées à volonté. Mais pour que les qubits puissent fonctionner, ils doivent être conservés dans un « super-réfrigérateur » à des températures extrêmement basses de 10 à 20 millikelvins — plus froides que le vide spatial.

Perspective L'informatique classique

Le problème de la
loi de Moore

En 1965, Gordon Moore a observé que le nombre de transistors sur une zone donnée d'une puce informatique en silicium doublait chaque année. Il a prédit que ce doublement de densité se poursuivrait à l'avenir, bien que le délai ait été révisé ultérieurement à 18 ou 24 mois.¹²

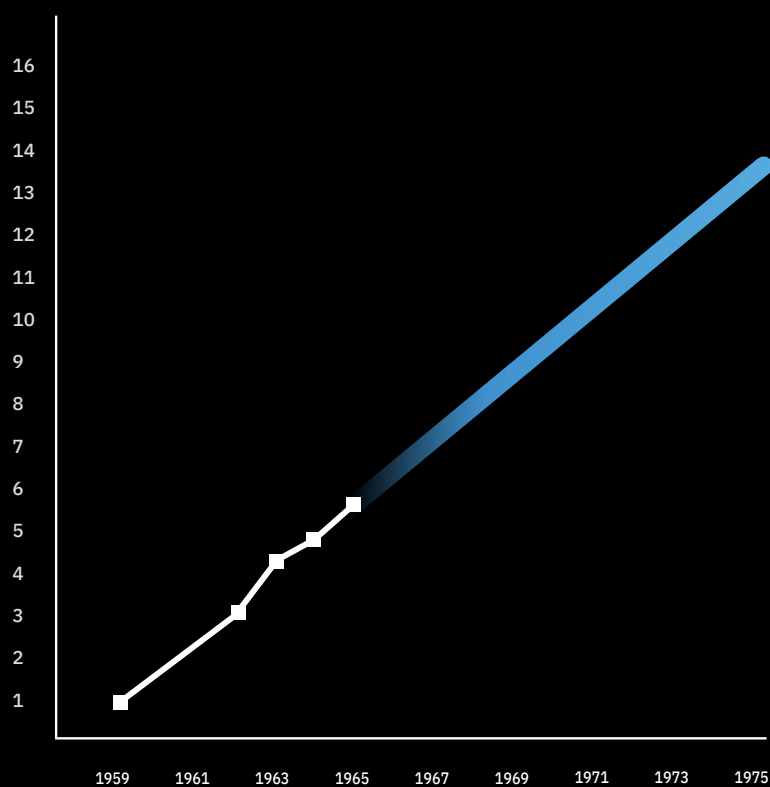
Pour que la loi de Moore survive aussi longtemps, les concepteurs de puces et les ingénieurs ont constamment réduit les dimensions des fonctionnalités sur les puces. Les laboratoires les plus avancés expérimentent aujourd'hui des puces qui ne mesurent que 5 nanomètres. (Un nanomètre est un milliardième de mètre.) Ces fonctionnalités sont si petites que certaines doivent être mesurées en atomes individuels.

Mais aujourd'hui, les limites physiques créent de sérieux obstacles à la loi de Moore. Certains dirigeants dans le domaine des puces tentent de démontrer le coût exorbitant et les efforts massifs nécessaires pour poursuivre dans ce sens. On estime que l'effort de recherche pour maintenir la loi de Moore sur les rails jusqu'ici a été multiplié par 18 depuis 1971. Et les installations nécessaires à la création de puces modernes coûteront 16 milliards de dollars chacune d'ici 2022.¹³

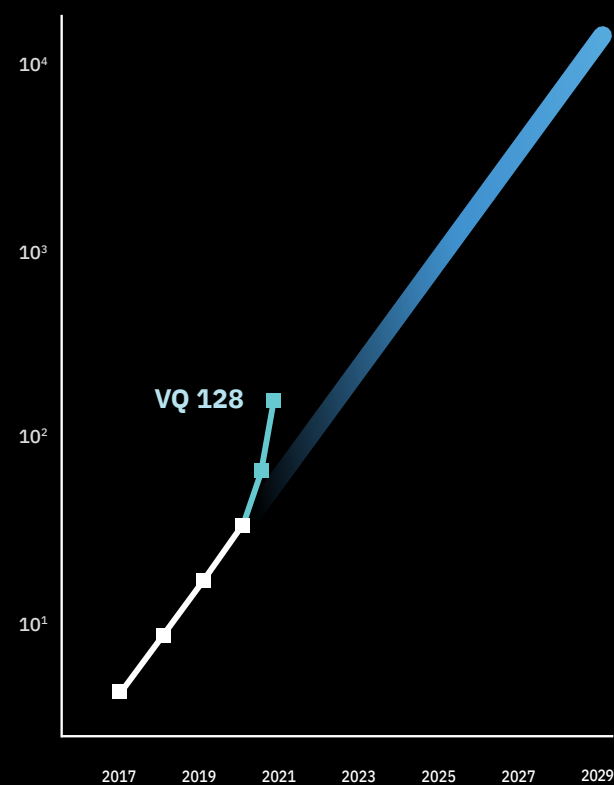
Cela signifie que le ralentissement des progrès de l'informatique classique ne fait que renforcer l'importance de l'intégration de l'informatique quantique aux systèmes classiques.


Doubler le changement
d'échelle du volume quan-
tique par 2 fois par an

Log² du nombre de calculs par fonction intégrée



Volume quantique (VQ)





Woodside Energy

Introduction de noyaux quantiques dans les flux d'apprentissage machine classiques¹³

Dans l'apprentissage machine classique, les algorithmes utilisent parfois des noyaux (mesures de similarité entre deux données) pour résoudre des problèmes de classification ou de régression. Habituellement, les noyaux sont utilisés pour augmenter la dimensionnalité des données afin de les séparer, ce qui renforce l'exactitude de l'algorithme. Récemment, des chercheurs d'IBM ont prouvé l'existence de noyaux quantiques offrant un avantage superpolynomial sur tous les classificateurs binaires classiques possibles et ne nécessitant que l'accès à des données classiques.

Les chercheurs de Woodside Energy, l'un des principaux producteurs de gaz naturel en Australie, ont vu une occasion intéressante de collaborer avec les chercheurs en mécanique quantique d'IBM. Les noyaux quantiques pourraient-ils être déployés de manière pratique dans des flux d'apprentissage machine classique, pertinents pour l'industrie?

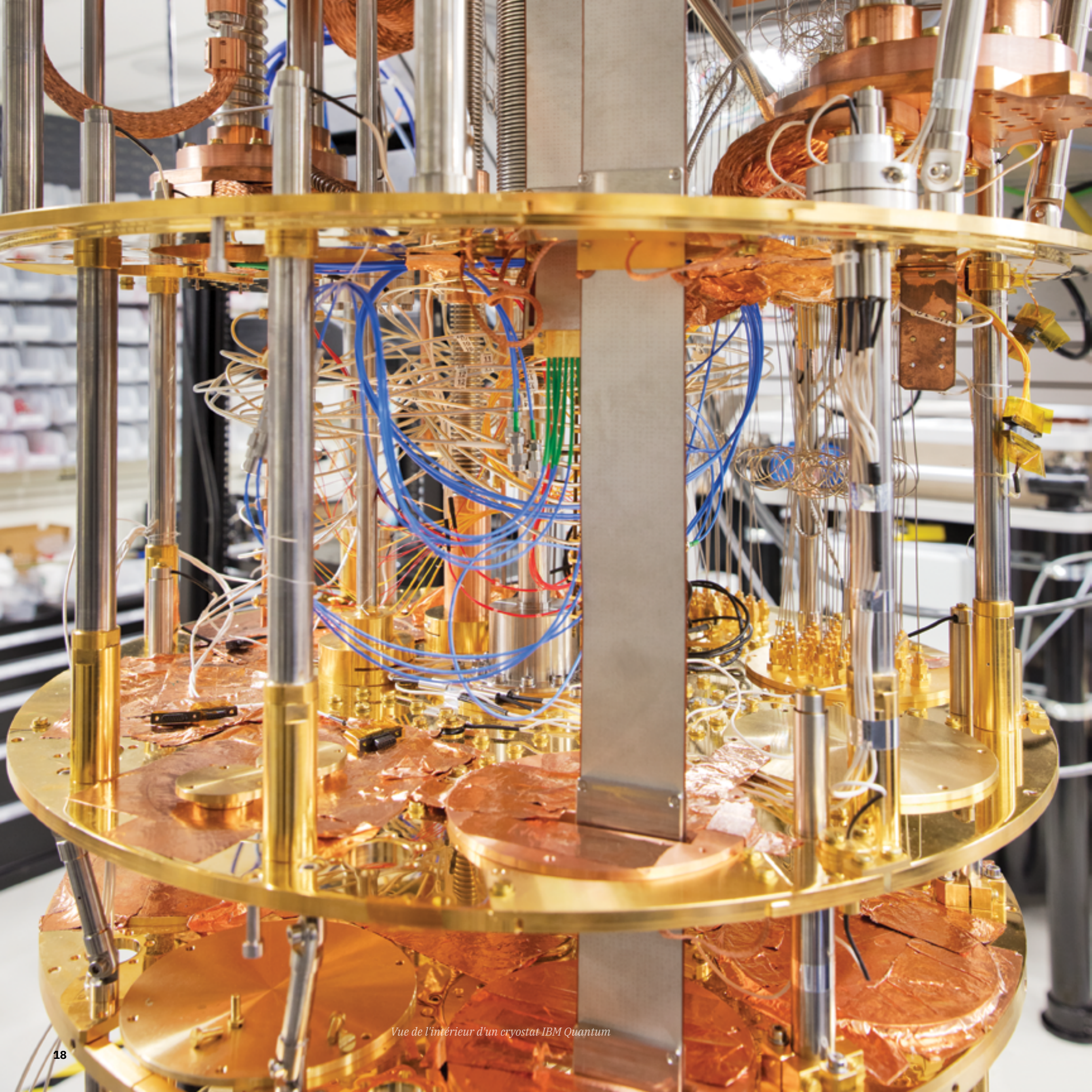
Dans le cadre de leur exploration de l'informatique quantique, les équipes ont voulu comprendre comment définir ces noyaux à l'aide de circuits quantiques et réduire la quantité de ressources informatiques quantiques nécessaires pour les évaluer. Il s'agissait de relier les propriétés des circuits quantiques aux propriétés des noyaux et d'évaluer le fonctionnement de ces noyaux.

La façon courante d'utiliser les noyaux quantiques dans les flux d'apprentissage machine classiques nécessite une requête à un processeur quantique pour chaque valeur de noyau à calculer. Au lieu d'évaluer chaque valeur de cette manière, afin de réduire les appels à l'ordinateur quantique et de le rendre plus pratique, l'équipe a entamé des recherches combinant

des noyaux quantiques avec des algorithmes classiques d'achèvement de matrice qui répondent à la question suivante : En prenant un ensemble de valeurs de noyau calculées à l'aide d'un ordinateur quantique, les chercheurs pourraient-ils utiliser ces informations avec l'algorithme classique pour prédire avec précision ce que pourrait être une valeur non calculée?

L'étude de cette approche a soulevé certaines questions essentielles, notamment : l'exploitation des techniques d'achèvement de pointe pourrait-elle réduire le nombre de requêtes requises, rendant ainsi l'utilisation des noyaux quantiques plus pratique, plus rapidement? Ces noyaux apportent-ils des avantages utiles à Woodside Energy, tels qu'une meilleure exactitude de la classification dans ses ensembles de données sectorielles? Peut-on faire des prédictions reliant les propriétés des circuits quantiques à la facilité avec laquelle les noyaux quantiques peuvent être complétés?

Woodside Energy considère cette recherche comme un « projet exploratoire » qui établit une base pour des expériences ultérieures. L'entreprise poursuit cette ligne de réflexion en recherchant dans la documentation d'autres familles de circuits quantiques utilisées comme blocs fonctionnels pour d'autres applications. À l'avenir, les données supplémentaires peuvent aider Woodside à affiner ses prédictions sur la faisabilité des noyaux quantiques et sur les domaines dans lesquels ils pourraient être les plus utiles. Un cas d'utilisation potentiel : l'application de cette technologie à l'analyse pétrophysique des données de diagraphie des puits.



Vue de l'intérieur d'un cryostat IBM Quantum

« L'informatique quantique n'est pas seulement une extension de l'informatique classique. Nous ne pouvons pas simplement transporter les problèmes aux ordinateurs quantiques. Nous devons les diviser et créer des communautés capables d'appliquer efficacement cette technologie aux bons problèmes. »

Richard Debney

Vice-président, Technologie Numérique
chez BP

Mais la vitesse et la puissance de l'informatique quantique ne suffisent pas à définir la la décennie comme Quantum Decade. L'augmentation exponentielle des qubits est impressionnante, mais si cette force de calcul brutale est inaccessible et inapplicable aux problèmes réels, ce n'est qu'une théorie abstraite.

Heureusement, la puissance du quantique est accessible. Historiquement, si vous vouliez la puissance de calcul, vous deviez créer ou installer et mettre à jour les machines vous-même. Mais maintenant, grâce au nuage, même les ordinateurs quantiques les plus sophistiqués sont accessibles.

En fait, un programmeur peut s'asseoir devant son ordinateur portable et créer un circuit quantique à l'aide de portes quantiques. Lorsque le logiciel envoie le circuit via le nuage à un ordinateur quantique, la machine convertit ces portes en impulsions micro-ondes. À leur tour, les impulsions commandent les qubits physiques, qui exercent leur magie sur le problème à résoudre. Les résultats sont renvoyés, retraduits en bits classiques, au programmeur.¹⁴ Cette interface harmonieuse va rendre accessible l'informatique quantique aux communautés de développeurs d'aujourd'hui.

Les écosystèmes ouverts se développent

Il y a dix ans, les experts en informatique quantique étaient principalement des physiciens titulaires d'un doctorat travaillant dans des laboratoires, une ressource précieuse qui reste rare. Mais des communautés de développeurs qui n'ont pas nécessairement un doctorat ou d'autres physiciens commencent à apparaître. Ces communautés comprennent, entre autres, des chimistes, des ingénieurs électriques et des mathématiciens. Ils apprennent et appliquent les concepts quantiques, même dans des environnements informatiques classiques.

Des écosystèmes favorisant l'innovation ouverte ont vu le jour et forment des développeurs de logiciels pour appliquer l'informatique quantique à des problèmes réels. IBM a lancé une de ces communautés à code source ouvert, Qiskit, afin de créer les outils et les bibliothèques nécessaires aux développeurs de systèmes quantiques. La communauté propose également le développement des compétences à des milliers d'étudiants du quantique. Plus de 2 milliards de circuits quantiques sont exécutés par jour par IBM Quantum Services à l'aide de véritables ordinateurs quantiques.

De l'analyse à la découverte

Les progrès de l'informatique quantique ont été importants, mais quelles sont leurs implications pratiques? Comment influenceront-ils sur notre capacité à résoudre des problèmes complexes à grande échelle?

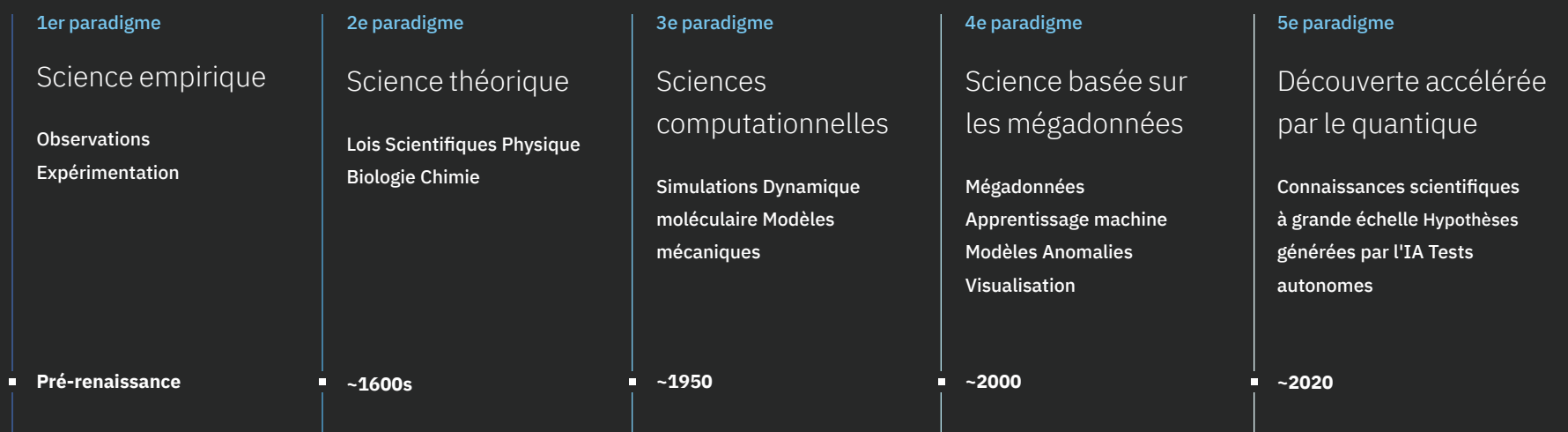
À ses débuts, la science était empirique et théorique. Les gens observaient et mesuraient des phénomènes, tels que le mouvement des objets; ils formulaient des hypothèses et des prédictions sur les raisons de ces phénomènes; et ils les testaient à répétition. Les ordinateurs et par la suite l'intelligence artificielle et les superordinateurs ont changé la donne, ouvrant ainsi l'ère de l'analytique. Nous pouvons désormais ingérer des quantités massives de données et élaborer des modèles fondés sur le comportement des systèmes. Nous pouvons également modéliser des systèmes chimiques, déplacer des atomes individuels et simuler la façon dont certains matériaux se comporteront ou réagiront après des millions d'utilisations.

Mais certains défis restent hors de notre portée. Bien que nous soyons capables de modéliser un système chimique, ces modèles classiques fonctionnent bien pour les problèmes pour lesquels nous disposons déjà de données. Ces modèles ne sont pas basés sur la physique sous-jacente du comportement des molécules et sont donc imprécis. Nous ne disposons pas d'outils nécessaires pour combler ces lacunes. Aussi puissante soit-elle, l'informatique classique a des limites fondamentales face à des problèmes exponentiels (voir figure 6).

Figure 6

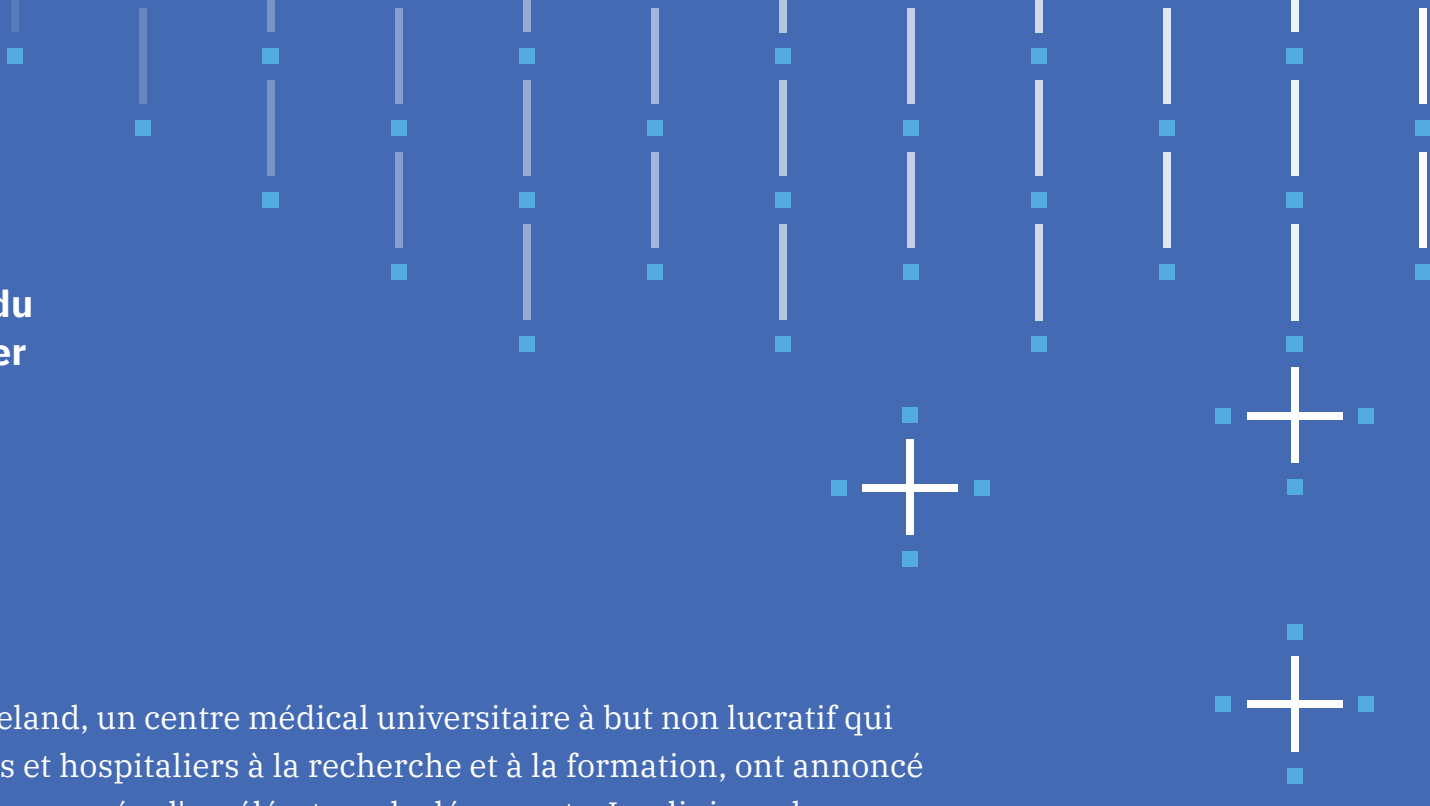
Progrès à travers les âges

La voie de la découverte accélérée par le quantique



Augmentation de la vitesse, automatisation et échelle





**IBM et clinique de
Cleveland**
**Utiliser la puissance du
quantique pour relever
les grands défis des
soins de santé¹⁷**

IBM et la clinique de Cleveland, un centre médical universitaire à but non lucratif qui intègre les soins cliniques et hospitaliers à la recherche et à la formation, ont annoncé un partenariat de 10 ans pour créer l'accélérateur de découverte. La clinique de Cleveland et IBM s'efforceront de faire progresser la découverte dans le domaine des soins de santé et des sciences de la vie grâce à une informatique performante utilisant des technologies hybrides multi-nuages, l'IA et l'informatique quantique.

Grâce à l'accélérateur de découverte, les chercheurs prévoient d'utiliser une technologie informatique avancée pour générer et analyser des données afin d'aider à améliorer la recherche dans le nouveau Centre mondial de recherche sur les agents pathogènes et la santé humaine. La recherche devrait se concentrer sur des domaines tels que la génomique, la transcriptomique unicellulaire, la santé des populations, les applications cliniques et la découverte de produits chimiques et de médicaments.

En tant qu'élément essentiel à ce projet, IBM prévoit d'installer un système IBM Quantum System One sur le campus de la clinique de Cleveland, pour la première fois aux États-Unis. Ce programme quantique sera conçu pour interagir avec les universités, le gouvernement, les secteurs d'activité, les jeunes entreprises et d'autres organisations. Il s'appuiera sur l'entreprise mondiale de la clinique de Cleveland pour servir de base à un nouvel écosystème quantique pour les sciences de la vie, axé sur le développement des compétences quantiques et la mission du centre.

Outre IBM Quantum System One installé sur place, la clinique de Cleveland aura accès au parc actuel d'IBM, qui compte plus de 20 systèmes quantiques, accessibles via le nuage. IBM prévoit de dévoiler son premier système quantique de plus de 1 000 qubits de nouvelle génération en 2023, et la clinique de Cleveland devrait être le site de réseau du premier système sur site du secteur privé.

« Cette décennie sera considérée comme Quantum Decade si nous parvenons à appliquer l'informatique quantique pour découvrir une chose, jusqu'ici inimaginable, qui fait progresser notre champ d'investigation vers l'avenir. »

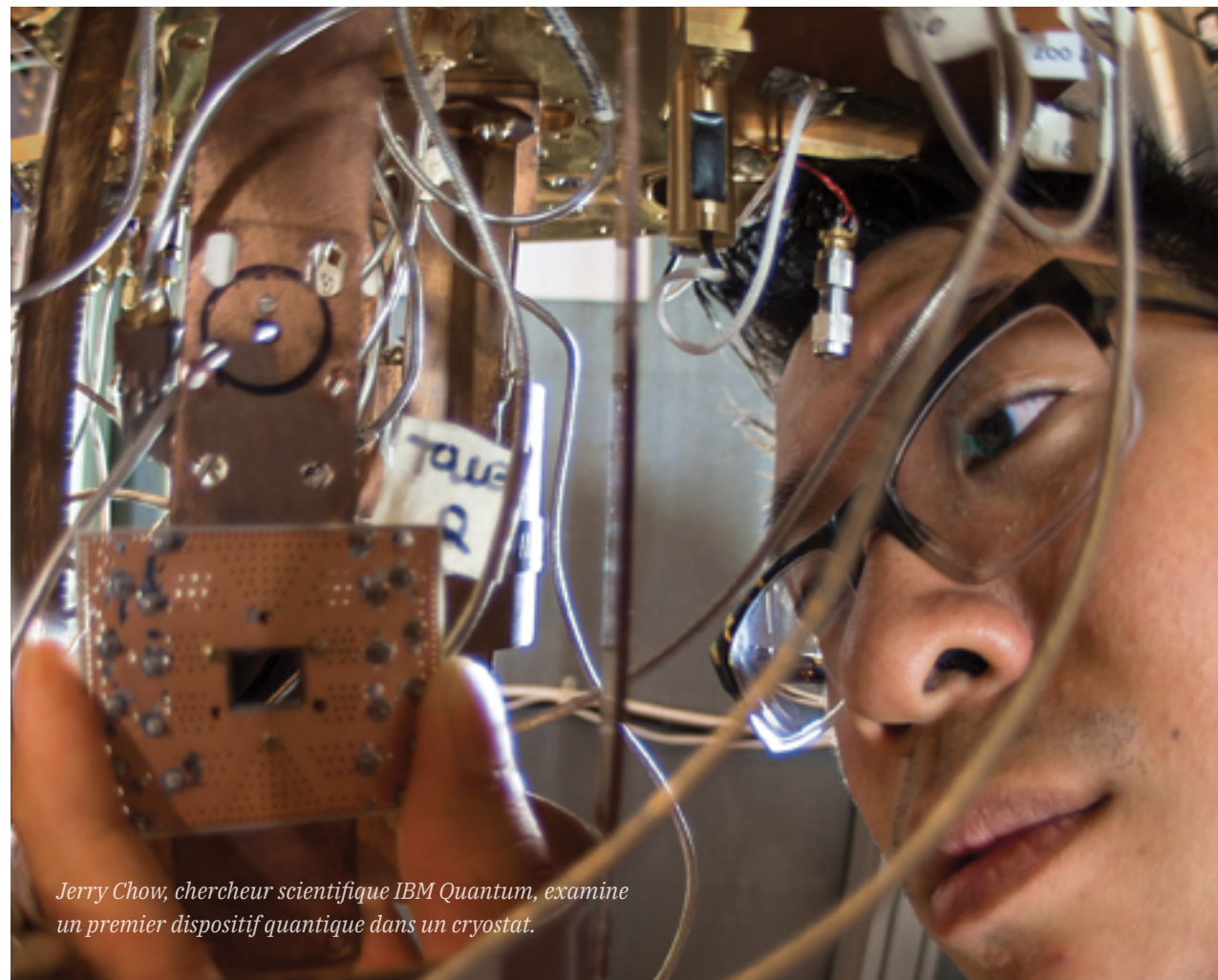
Todd Hughes

Directeur Technique en chef, Projets et Initiatives Stratégiques
CACI

C'est là qu'intervient l'informatique quantique, de concert avec les ordinateurs classiques et l'intelligence artificielle. Cette triade est prête à générer des découvertes à un rythme radicalement plus rapide. Considérez l'impact étonnant de la recherche impliquant l'ARN m, une molécule d'ARN monocaténaire complémentaire à l'un des brins d'ADN d'un gène.¹⁸ Cette recherche a accéléré le développement du vaccin contre la COVID-19 : le décodage du virus pour la création du vaccin n'a pris que quelques semaines, suivi de mois d'essais cliniques et d'une large diffusion en un an.¹⁹ Pourtant, cela n'a été possible que parce que nous disposions déjà d'une décennie de recherches sur l'ARN m à notre actif.

Avec l'informatique quantique, ce type de découverte pourrait être encore plus rapide, surtout lorsqu'on part de rien, accélérant considérablement le développement et l'efficacité des vaccins et en atténuant l'impact de futures pandémies.

Un grand nombre de nos meilleures pratiques en matière de soins de santé reste une approximation : extrapoler des informations à partir de grands ensembles de données et les appliquer à des individus. À bien des égards, nous en sommes encore à des techniques d'essai et d'erreur - plus sophistiquées, certes, mais il ne s'agit guère de traitement adapté à chaque individu. Les capacités d'évolution de l'informatique quantique laissent entrevoir la possibilité de créer un jour une médecine personnalisée, en adaptant la thérapeutique au génome de l'individu (voir l'étude de cas « IBM et la clinique de Cleveland »).



Jerry Chow, chercheur scientifique IBM Quantum, examine un premier dispositif quantique dans un cryostat.

« Le processus de découverte de matériaux est d'une lenteur insupportable. Les entreprises n'ont pas le temps d'expérimenter à l'infini. L'informatique quantique peut nous permettre de faire un bond exponentiel dans le domaine de la découverte. »

Doug Kushnerick

Technology Scouting and Ventures
ExxonMobil Research



Ce rêve peut devenir une réalité en améliorant la façon dont l'expérimentation est réalisée. Vous vous souvenez peut-être des bases de la méthode scientifique lorsque vous étiez enfant : une séquence qui va de l'observation, à la question, l'hypothèse, l'expérience, les résultats, et finalement la conclusion. Avec l'informatique classique, nous avons pu augmenter la vitesse de ce processus. La triade de l'informatique classique, de l'intelligence artificielle et de l'informatique quantique peut propulser la méthode scientifique (voir figure 7).

La capacité sans précédent de modéliser des systèmes complexes va accélérer la capacité d'extraire, d'intégrer et de valider afin de pouvoir tirer des conclusions. Nous utilisons déjà l'intelligence artificielle pour générer automatiquement des hypothèses et les laboratoires robotisés pour automatiser l'expérimentation physique. La plus grande capacité de l'informatique quantique élargira les possibilités qui peuvent être évaluées avant de passer à l'expérimentation physique, et accélérera par conséquent l'ensemble du processus de découverte. « Pour la première fois, la boucle dans la méthode scientifique est bouclée », comme l'indique le document *2021 Science and Technology Outlook* du groupe de recherche IBM . « Chaque percée est un pas vers la réalisation du rêve de la découverte comme un processus autopropulsé, continu et sans fin. »²⁰

En accélérant la découverte et en mettant en pratique plus rapidement les connaissances, toutes sortes d'avancées seront possibles. Les soins de santé ne sont qu'un des domaines d'application. Autre scénario : l'informatique quantique peut servir à la recherche de nouveaux matériaux. Ces capacités peuvent améliorer l'efficacité des panneaux solaires, des éoliennes et de la durée des batteries. Comme nous le verrons dans les guides sectoriels à la page 69, les applications à des industries spécifiques sont innombrables.

Figure 7

Changement d'échelle de la méthode scientifique

Des questions aux hypothèses et rapports

L'entreprise axée sur la découverte

En termes organisationnels, la décennie que l'on appelle Quantum Decade donnera naissance à un nouveau type d'entreprise axée sur la découverte (voir figure 8). Tout comme le nuage a virtualisé de plus en plus l'entreprise traditionnelle, l'arrivée du quantique ouvrira de nouvelles possibilités.

La triade informatique révolutionnera la façon dont les entreprises gèrent et exploitent les plateformes commerciales génératrices de marché grâce à *des flux de travail intelligents* ou pilotés par l'IA. En examinant la manière dont les gens travaillent, l'intelligence artificielle permet déjà de déterminer les flux de travail les plus efficaces ou les plus performants. Les tâches peuvent ensuite être transférées à des systèmes traditionnels ou quantiques – un ou plusieurs ordinateurs quantiques travaillant de concert avec un système informatique classique – selon la meilleure option. Une fois que les informaticiens ont établi un flux de travail, un utilisateur n'a pas besoin de savoir où et comment le calcul est effectué. Aucune connaissance spécialisée en informatique quantique n'est requise.

Il y a dix ans à peine, ceux qui ont su apprécier le potentiel de l'intelligence artificielle ont pris des mesures pour s'y préparer et mettre en œuvre ce qu'ils pouvaient en cours de route sont aujourd'hui en tête de file.²¹ Nous sommes aujourd'hui dans décennie dite Quantum Decade et, à mesure que nous accélérons le rythme des découvertes, les entreprises de tous types doivent y prêter une attention particulière.

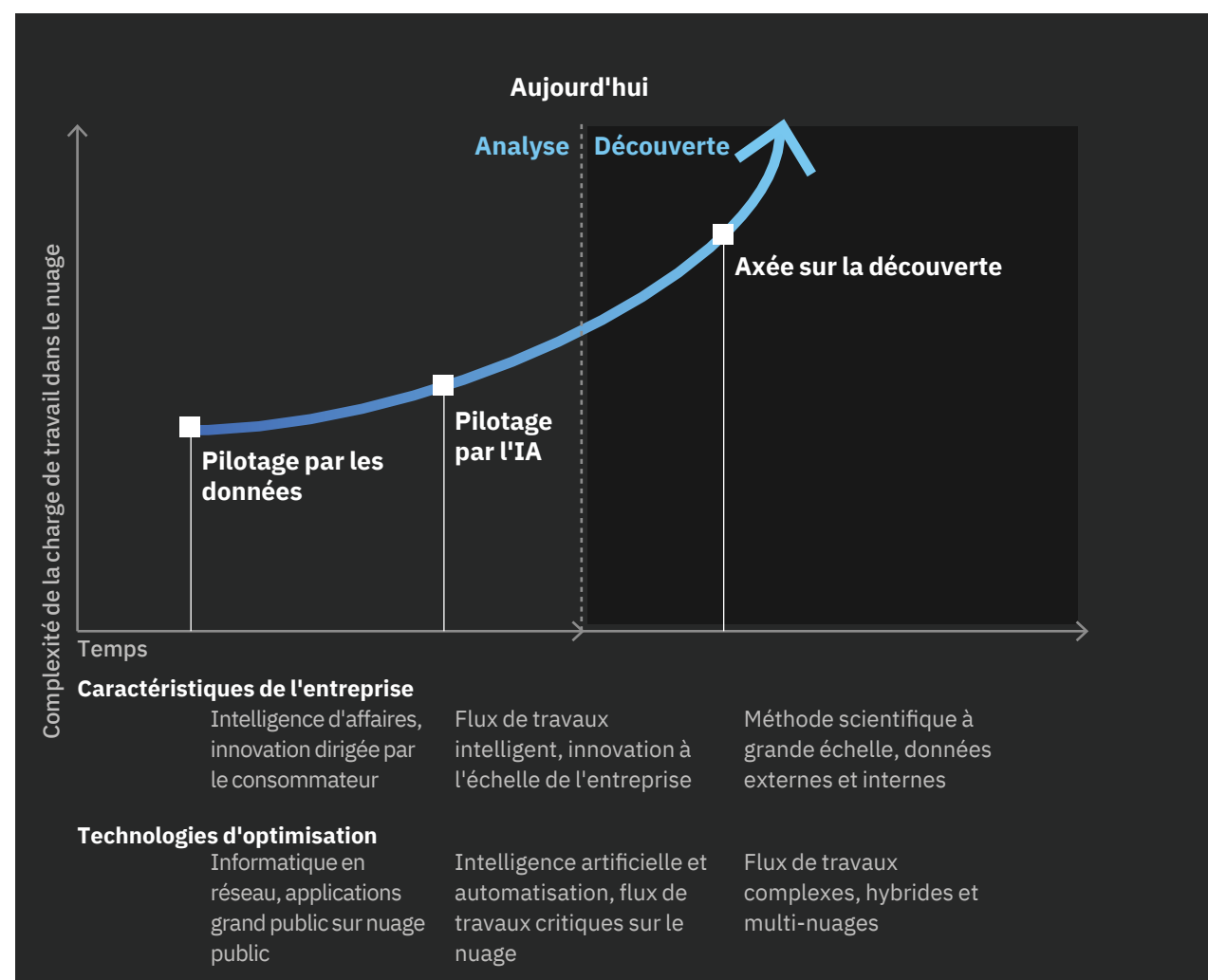
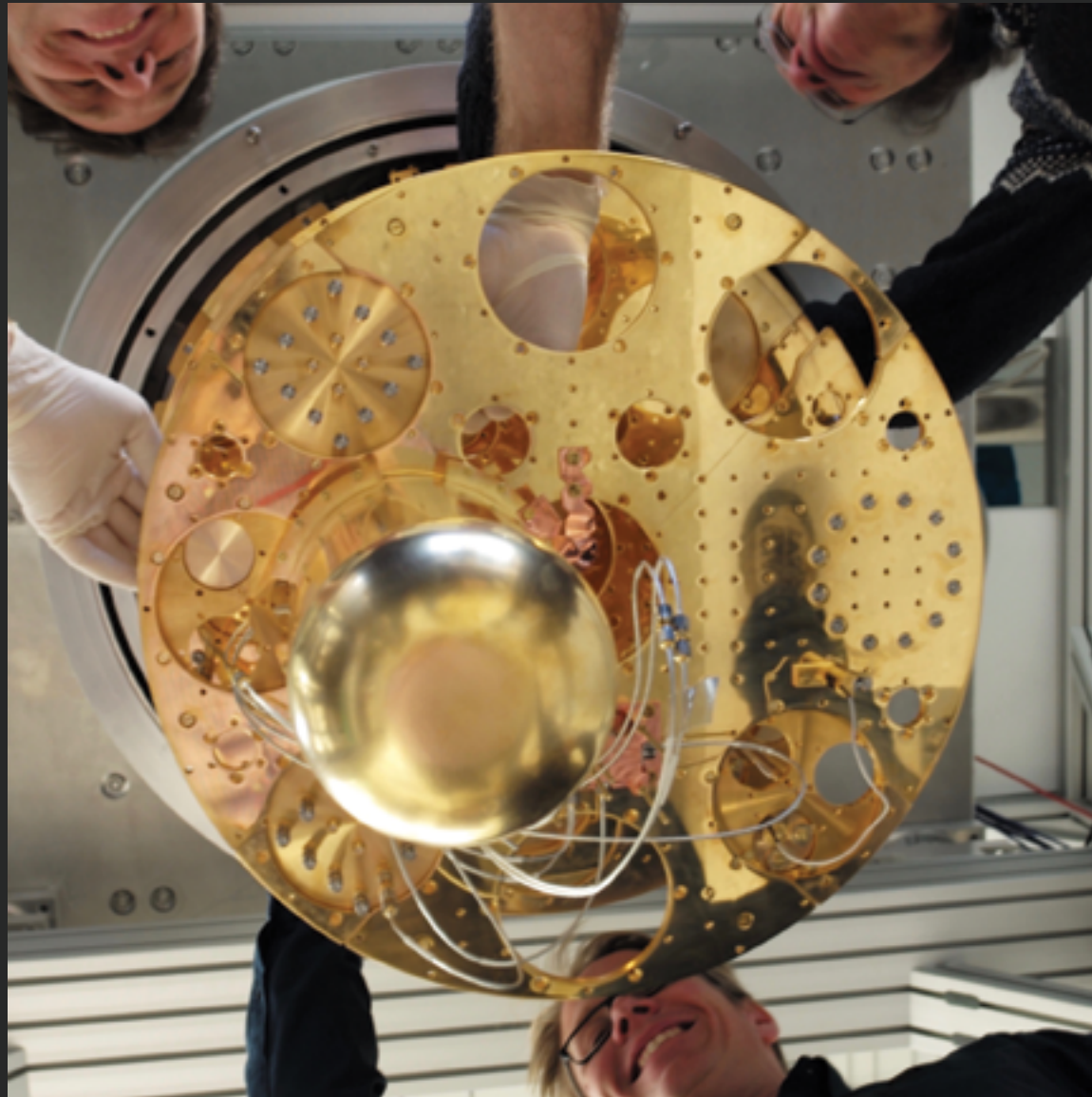


Figure 8

Une nouvelle normalité
Émergence de l'entreprise axée sur la découverte



Une vue du dessous d'un cryostat IBM Quantum

■ Questions qui se posent

1ère question

Comment votre équipe, vos cadres et votre conseil d'administration définiraient-ils les arguments en faveur de l'informatique quantique?

3e question

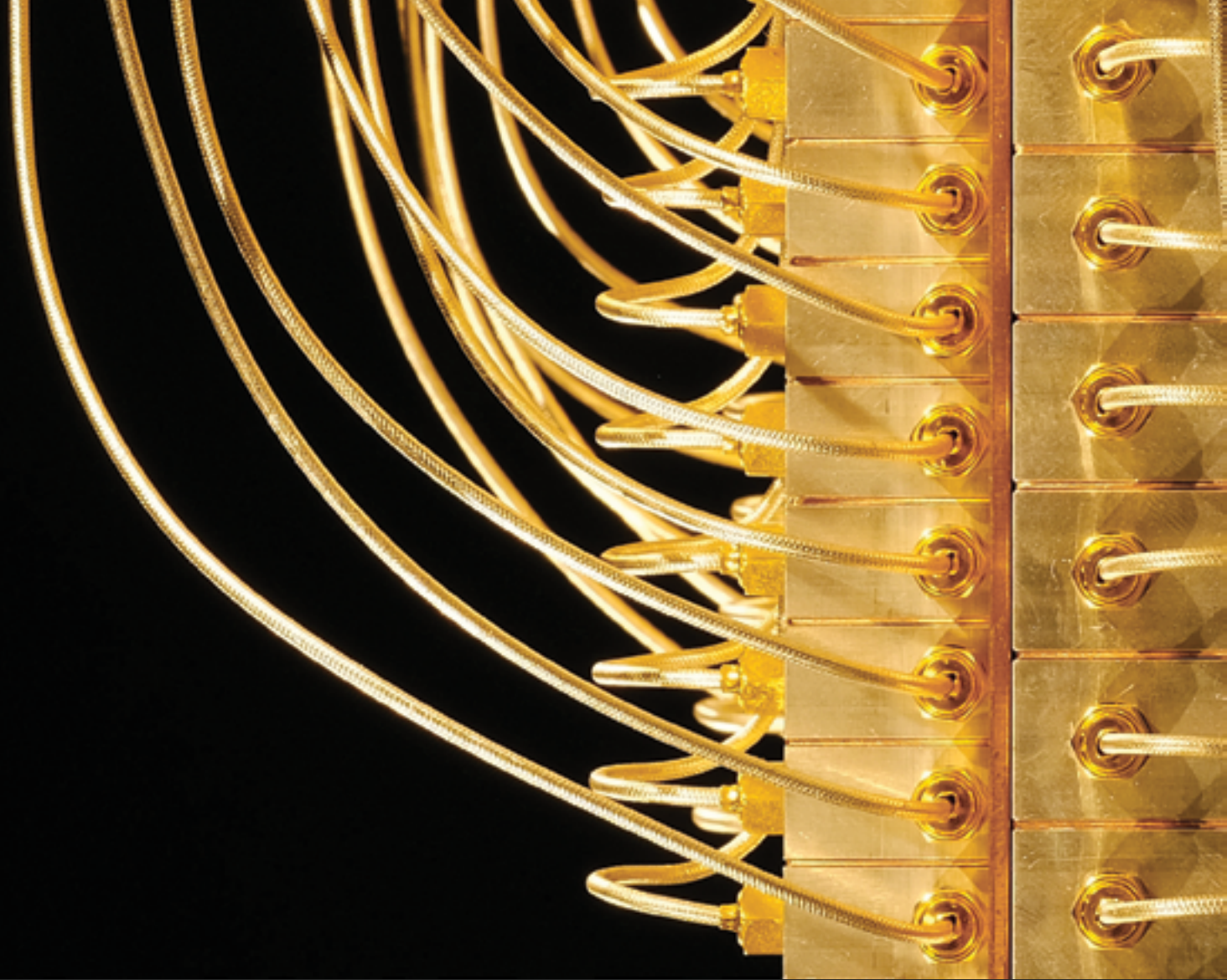
Comment vous formez-vous, vous et vos talents clés, sur les possibilités de l'informatique quantique?

2e question

Quelles mesures prenez-vous pour devenir ou concurrencer une entreprise axée sur la découverte qui inclut l'informatique quantique?

4e question

Quels sont les écosystèmes viables vous permettant d'accéder à des capacités informatiques quantiques puissantes et évolutives sur le nuage?



Connaissances

La puissance de la connaissance du quantique

Vous pouvez développer des partenariats et joindre des écosystèmes pour acquérir un savoir-faire quantique hautement technologique. Ce dont vous avez besoin dans votre équipe, c'est d'un savoir-faire en matière de potentiel informatique quantique — un savoir-faire qui peut vous aider à déterminer les avantages pour votre organisation.

L'opportunité cachée du flux de travail

Tirer plus de profit de l'informatique quantique nécessite l'examen des flux de travail pour déceler les possibilités de l'informatique quantique et les modes d'interaction avec les systèmes classiques. Mais la préparation nécessitera plus que la connaissance informatique quantique et l'expérimentation. Il faudra préparer votre entreprise classique à intégrer en profondeur l'informatique quantique dans de nouvelles méthodes de travail et de nouveaux modèles d'affaires.

Ne faites pas cavalier seul

Vu la vitesse à laquelle l'informatique quantique s'améliore et se développe, il est difficile pour de nombreuses entreprises de suivre le rythme. Faire partie d'un écosystème de l'informatique quantique peut donner accès à des technologies et à des talents qui ne seraient peut-être pas accessibles autrement.

Chapitre 2

La préparation quantique et la puissance de l'expérimentation

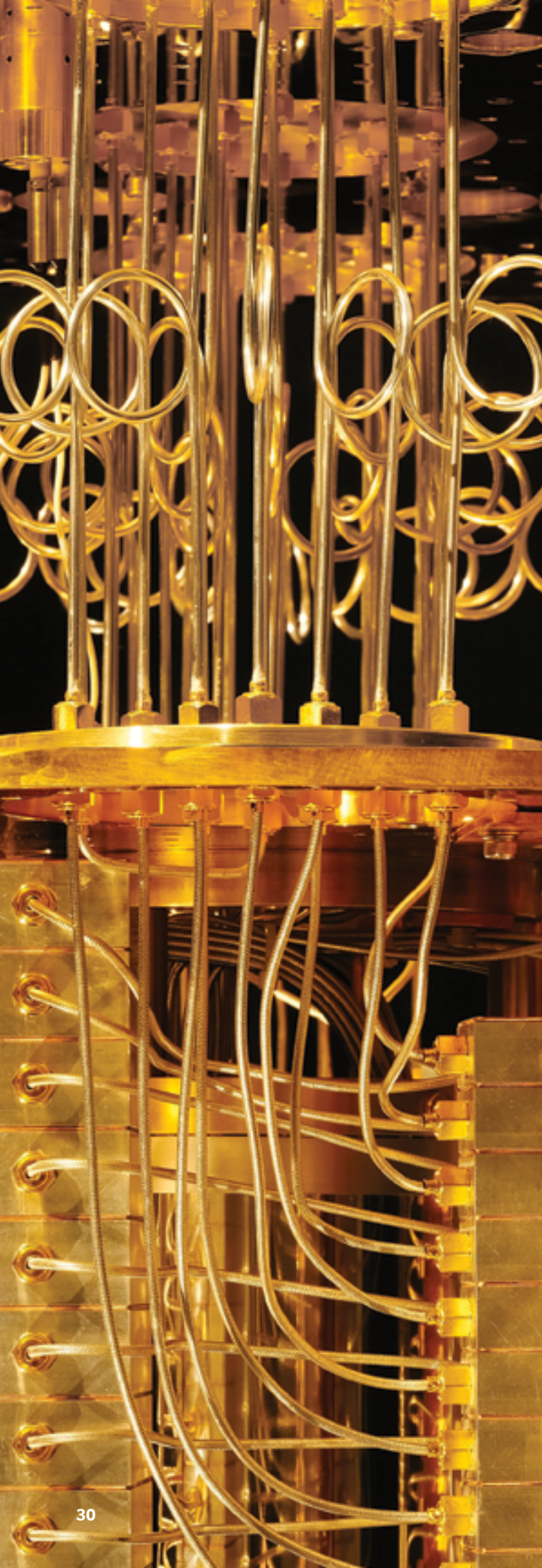
« Il ne fait aucun doute que la technologie de l'informatique quantique sera prête pour les entreprises au cours de cette décennie. Il y aura de multiples machines quantiques avec des millions de qubits d'ici 2030 », déclare Christian Weedbrook, chef de la direction de Xanadu Quantum Technologies.

« La question qui se pose : êtes-vous prêts? »

La réponse courte est « peut-être, si vous agissez maintenant ». La préparation à l'informatique quantique est un état en constante évolution qui dépend de votre approche générale et de votre investissement dans l'innovation, ainsi que des nouveaux talents et compétences, et de la maturité numérique globale. Cette préparation comprend l'adoption de technologies de développement telles que l'automatisation, l'intelligence artificielle et le multi-nuage hybride; votre volonté d'analyser, d'expérimenter et d'itérer avec des capacités informatiques en évolution; la sophistication de vos flux de travail; et l'ensemble de vos compétences organisationnelles.

Votre secteur d'activité et votre emplacement comptent aussi. Le degré de préparation des industries à l'informatique quantique varie en fonction de la pression concurrentielle et de la concentration, des exigences en matière de croissance et d'innovation, et du potentiel de l'informatique quantique pour résoudre les problèmes de calcul propres à l'industrie. Les pays et les régions peuvent varier en fonction du contexte géographique, principalement en ce qui concerne l'investissement, la formation et les compétences, la réglementation et la disponibilité de l'écosystème. Et les écosystèmes eux-mêmes doivent être prêts à fournir un service de soutien viable. Il n'en reste pas moins qu'un partenariat avec l'écosystème optimal peut être un moyen astucieux d'atténuer les fluctuations de l'état de préparation, quel que soit votre emplacement ou votre secteur d'activité.

Pensez-y de la manière suivante : prendre une longueur d'avance dans une technologie telle que l'informatique quantique est analogue à la puissance des intérêts composés. Attendre quelques années et laisser les premiers adoptants en tête de peloton peut leur donner une longueur d'avance exponentielle.



Expériences dès la
conception :
Application de la
méthode quantique
connaissance des
problèmes réels

Nouvelle encourageante : vous n'avez pas besoin d'un doctorat en informatique quantique pour vous lancer. Oui, le monde des qubits, de la superposition et de l'intrication peut constituer un terrain glissant réservé aux experts quantiques, et il faut des compétences de niveau doctorat pour créer une propriété intellectuelle innovante. Mais en développant des partenariats et en joignant des écosystèmes pour acquérir un savoir-faire informatique quantique hautement technologique, cela peut être surmontable. Tout ce dont vous avez besoin dans votre équipe, c'est d'un savoir-faire en matière de potentiel informatique quantique — un savoir-faire qui peut vous aider à déterminer les avantages pour votre organisation.

L'aspect passionnant et stimulant de ces connaissances consiste à les appliquer à des problèmes d'affaires. Quelles sont les limites actuelles de votre secteur d'activité? Creusez plus profondément. Quelles sont les causes de ces limites? Comment la dissolution de ces barrières apparemment infranchissables pourrait-elle remodeler votre secteur d'activité? Où sont les pierres d'achoppement dans la façon dont vous mobilisez le traitement et concevez les flux de travaux aujourd'hui? Où se dirigent votre secteur d'activité et votre organisation dans 10 ans?

Les problèmes complexes du monde réel ne pourront peut-être pas être résolus tant que nous n'aurons pas progressé vers une informatique quantique tolérante aux pannes, le point culminant de Quantum Decade. Il s'agit d'une classe d'informatique quantique dans laquelle vous pouvez exécuter des programmes quantiques polyvalents compilés à l'aide de ressources quantiques et classiques. Les ordinateurs tolérants aux pannes intègrent des procédures qui aident à empêcher les erreurs de se multiplier et de se propager, ce qui leur permet d'exécuter des circuits quantiques arbitrairement proches de l'exactitude, même lorsque leurs composants physiques sont défectueux.

Nous sommes déjà en train d'apprendre comment l'informatique quantique peut contribuer à notre compréhension des problèmes, même s'il s'agit de grands problèmes. Le quantique aide les chercheurs à explorer le développement de nouveaux matériaux. Avec le temps, le quantique peut contribuer à développer des engrais efficaces et respectueux de l'environnement pour soutenir la chaîne d'approvisionnement alimentaire mondiale. À un niveau véritablement cosmique, il pourrait être un joueur clé dans l'étude des mystères de la composition de notre univers.²²

« Les cadres doivent comprendre ce que l'informatique quantique peut résoudre dans la prochaine décennie. Ils doivent examiner l'ensemble, évaluer le coût et déterminer l'avantage. »

Jeff Nichols

Directeur Adjoint de Laboratoire
Oak Ridge National Laboratory

« Il ne s'agit pas seulement de décomposer, mais de repenser et de recomposer les problèmes pour les ordinateurs quantiques. »

Christopher Savoie
Fondateur et CEO
de Zapata Computing

Mais pensons à plus court terme. Pour atteindre la préparation quantique, vous devez définir l'art du possible *maintenant* par l'évaluation de la portée des problèmes, l'expérimentation et l'itération. Il peut s'agir d'une seule approche ou d'une combinaison de plusieurs approches utilisées indépendamment ou ensemble (voir figure 9).

— **L'approche pyramidale.** Les problèmes essentiels à l'industrie sont, par nature, complexes. Cette approche implique l'expérimentation et l'apprentissage de manière itérative, en utilisant des techniques classiques de décomposition et d'heuristique pour proposer une myriade de solutions potentielles. Ensuite, les processus quantiques identifient un sous-ensemble de solutions optimales qui aboutissent, dans cette analogie, au sommet de la pyramide. En d'autres termes, les approches classiques peuvent fournir un bon ensemble d'options de solution, que les systèmes quantiques peuvent ensuite optimiser. Cela permet d'affiner des ensembles de solutions plus vastes et de transcender des options théoriques plus petites qui n'ont pas de conséquence importante.

— **L'approche d'analyse et d'extraction.** Résoudre un problème complexe dans son intégralité pourrait nécessiter un million de qubits. Pour l'instant, la stratégie doit consister à extraire les parties qui sont solubles avec l'informatique classique et à réserver les autres segments à l'informatique quantique et à son extrême puissance de calcul. C'est comme une dissection. Le problème subit une analyse à différents stades : préparation, déconstruction, puis résolution de chaque partie déconstruite.

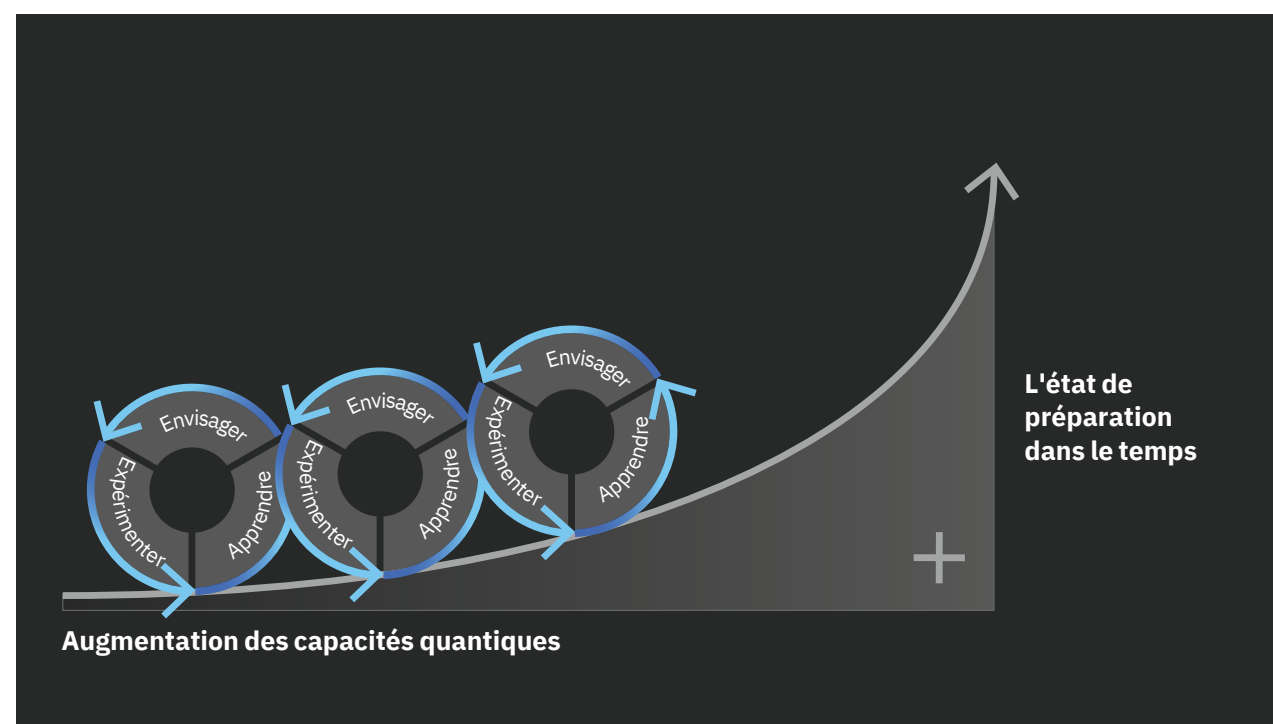
Pour l'instant, cela revient généralement à aligner le calcul classique sur la compréhension des données, leur décomposition et le calcul qu'elles peuvent gérer; les capacités quantiques s'alignent sur le calcul spécialisé. En outre, ce processus de déconstruction et de reconstruction du problème de différentes manières permet de *le voir* différemment et de donner des perspectives qui peuvent assurer une valeur finale encore plus importante grâce à l'informatique quantique.

— **L'approche cadricielle de mise au banc d'essai.** L'informatique classique et l'informatique quantique sont loin d'être statiques. Elles s'améliorent et évoluent constamment, notamment l'informatique quantique. Les expériences permettent d'évaluer les problèmes par rapport aux capacités classiques et quantiques à un moment donné, puis de les ré-exécuter avec du matériel, des logiciels, des algorithmes, des capacités de correction d'erreurs améliorés. Le fait d'isoler et d'identifier ces améliorations spécifiques de l'informatique quantique et de les appliquer stratégiquement à des ensembles de problèmes plus larges peut aider à avancer la préparation quantique et le parcours vers l'avantage quantique.

Le potentiel de l'informatique quantique est énorme, même si les concepts à proprement parler sont ésotériques. Mais l'expérimentation et l'itération de l'informatique quantique peuvent démontrer la puissance de la conceptualisation hors des sentiers battus (voir l'étude de cas « IBM Services Supply Chain » à la page 32). Lorsque vous évaluez des scénarios et développez des expériences pour votre secteur d'activité, la création d'un parcours de certification tangible pour la préparation quantique peut ramener l'ésotérique sur terre. L'essentiel est d'expérimenter le matériel informatique quantique de pointe, très probablement par le biais d'un écosystème.

Figure 9

Envisager, expérimenter, apprendre
*Approches expérimentales pour
l'apprentissage appliqué*



**IBM Services
Supply Chain²³
Une recherche
quantique pour
une prévision
de la demande
plus précise**

Prévoir l'avenir, est-ce possible? Dans tous les secteurs d'activité, les entreprises font de leur mieux dans une multitude de domaines : prévision de la demande, prévision des stocks, prévision des capacités, etc.

Mais les techniques classiques de prévision informatique peuvent souffrir d'une faible précision. Par exemple, pour la prévision de la demande, le défi d'aligner les chaînes d'approvisionnement sur une demande qui évolue rapidement est redoutable. Même des améliorations constantes des prévisions de seulement 1 % peuvent avoir un impact financier important. Dans les services, il y a une plus grande part de demande indépendante motivée par des caractéristiques de défaillance variables. C'est dans cet esprit que les chercheurs d'IBM préparent une démonstration qui associe des techniques de calcul quantique et classique pour rendre la prévision de la demande plus efficace.

À cette fin, les chercheurs travaillent avec IBM Services Supply Chain (SSC), une organisation chargée d'assurer la maintenance des centres de données en stockant et en livrant des pièces détachées remplaçables sur place. Les millions de dollars d'inventaire d'IBM SSC comprennent plus de 2 000 pièces différentes réparties dans 114 entrepôts situés aux États-Unis. En fonction de la gravité du problème, la livraison doit avoir lieu dans l'une des quatre fenêtres de synchronisation spécifiques : deux heures, quatre heures, un jour ou deux jours. Par conséquent, le défi de la prévision d'IBM SSC consiste à prévoir combien de pièces sont nécessaires, quand et où.

Les chercheurs ont utilisé une stratégie en deux étapes pour le scénario. La première était d'appliquer la classification des modèles de demande avec des exemples de modèles qui incluent :

Rapide

La demande est continue

Lente

La demande est intermittente, avec des périodes sans aucune demande

Inactive

La demande devient inactive

Rare

Peu de commandes ou commandes uniques

Ensuite, les chercheurs ont exécuté l'algorithme de prévision approprié pour le modèle de demande. La classification et les prévisions pourraient être réalisées en utilisant une combinaison de techniques classiques et quantiques (voir la figure ci-dessous). L'informatique classique et quantique fonctionnent ensemble comme une équipe, l'informatique quantique constituant la plus grosse partie du flux de travail.

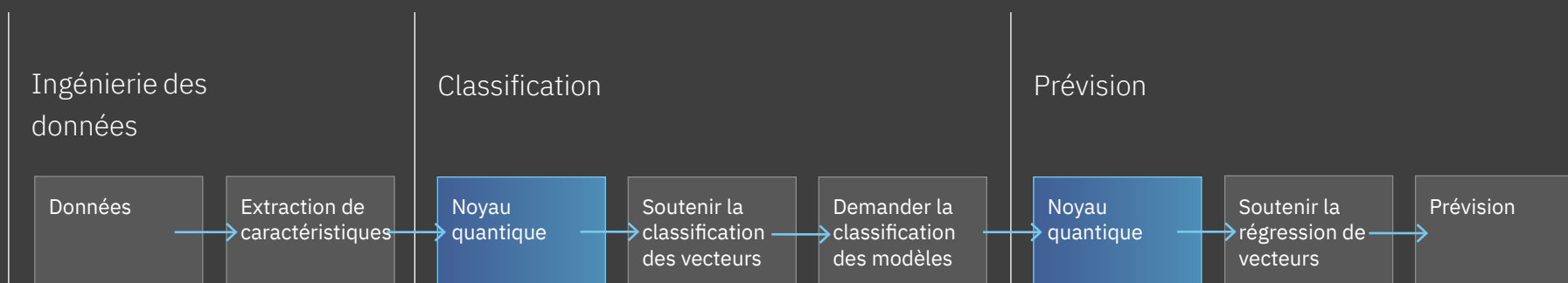
Les modèles de machine d'apprentissage quantique ont le potentiel d'une plus grande généralisation, ce qui signifie que les algorithmes de prévision pourraient atteindre une plus grande exactitude avec de nouvelles données. Alors que l'informatique classique peut compléter ces flux de travail sans l'informatique quantique, à mesure que les chercheurs affinent leurs techniques, ils comprennent mieux le rôle que peut jouer l'informatique quantique. Cela va être essentiel dans des domaines tels que la maintenance prédictive, où les capteurs IoT constituent de plus en plus une source de données. Et pour la maintenance liée à la sécurité, comme les pièces d'avion, les performances accrues et l'exactitude des modèles d'apprentissage machine quantiques pourraient devenir une nécessité.

Comme pour de nombreuses expériences d'informatique quantique, ce travail de classification et d'information est à la fois fondamental et évolutif, offrant aux chercheurs d'IBM la plateforme pour explorer les algorithmes quantiques et les capacités de prévision d'affaires. À l'issue de cette formation, les chercheurs disposeront d'une démonstration tangible du mappage d'un problème d'affaires à l'informatique quantique. Et cela permettra d'illustrer un point essentiel : l'informatique classique et l'informatique quantique ne sont pas en concurrence. Il s'agit plutôt de technologies complémentaires qui, ensemble, peuvent être plus efficaces.

Combiner le classique et le quantique

Le flux de travail des prévisions

Activité quantique



Flux de travail fondés sur le quantique

Penser petit et de manière incrémentielle peut être une voie d'acheminement rapide vers l'avantage quantique, en particulier lors de l'intégration de l'informatique quantique dans vos flux de travail.

Un flux de travail est essentiellement une structure arborescente de tâches, avec des fonctionnalités couvrant les interactions adaptatives entre clients et fournisseurs, le soutien à la décision de la haute direction, la formation ciblée des employés, et d'autres applications IA.²⁴ Cependant, les flux de travail peuvent rencontrer des difficultés pour calculer de manière exhaustive et en temps voulu de grandes quantités de données complexes. Par conséquent, les entreprises peuvent être contraintes d'employer des approximations calculées, même face à des demandes pressantes du marché. Les exemples pourraient inclure des flux de travail impliquant des réseaux complexes tels que la distribution, le transport, les communications ou la logistique.

Les applications de l'informatique quantique concernent presque toujours l'accélération d'un processus ou d'un sous-processus dans un flux de travail. Obtenir plus de valeur de l'informatique quantique requiert

le réexamen des flux de travaux pour les opportunités en informatique quantique et les modes d'interaction avec les systèmes classiques (voir étude de cas, « Écrans OLED » à la page 36).

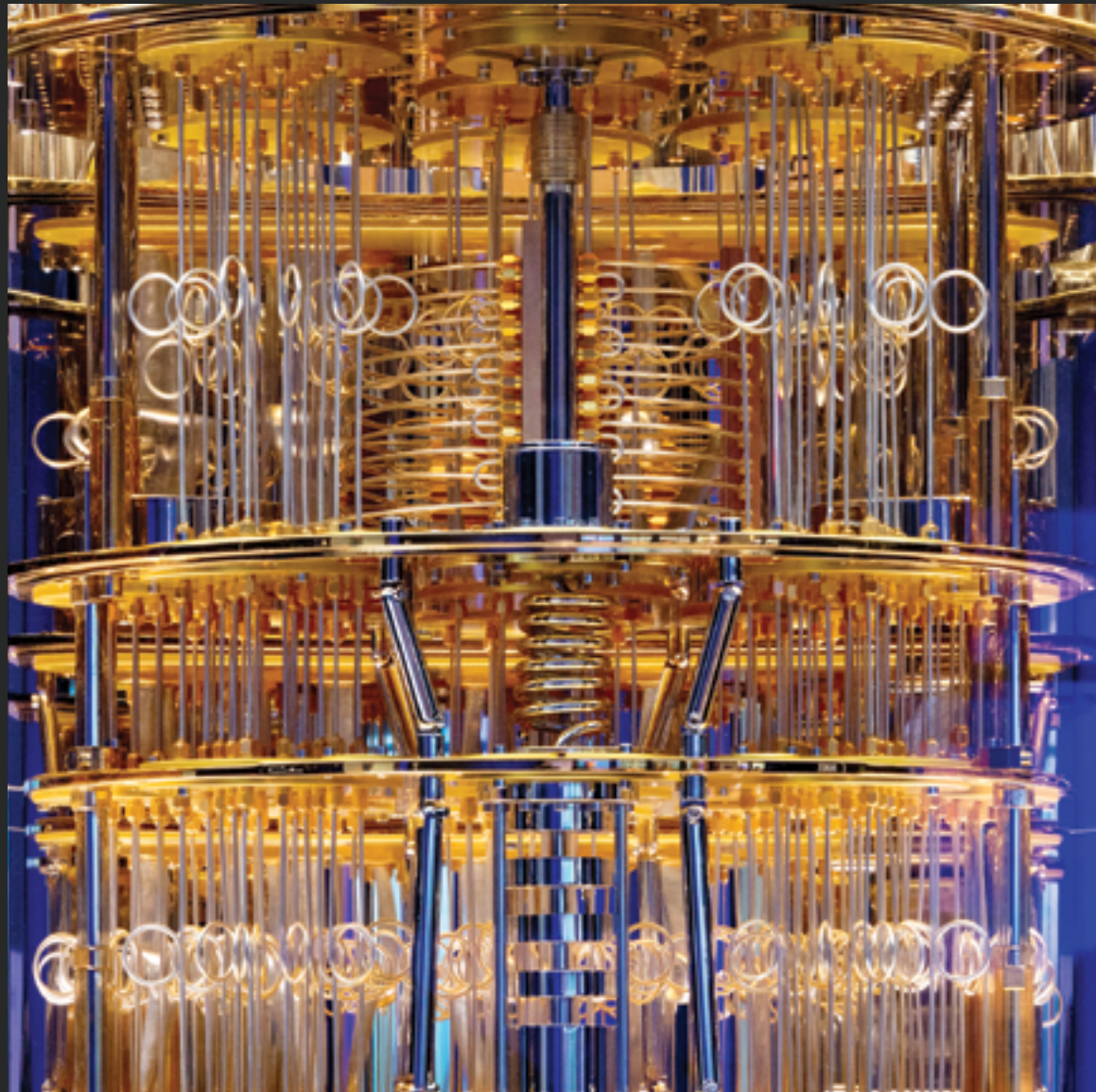
Pour évaluer l'informatique quantique de cette manière, il faut se concentrer sur la transformation sectorielle. Comment associer l'informatique quantique à l'informatique classique dans un contexte particulier? Quelles sont les sous-sections du flux de travaux les mieux adaptées à l'informatique quantique? L'analyse intellectuelle nécessaire à l'évaluation des flux de travail pour l'informatique classique par rapport à l'informatique quantique peut donner lieu à une nouvelle perspective sur le flux de travail lui-même, tout comme la gamme potentielle de résultats que l'informatique quantique offre. L'informatique quantique peut être propice à des calculs qui génèrent des percées inattendues produisant de nouvelles économies, des méthodologies plus pointues et des modes d'interaction plus significatifs avec les parties prenantes internes et externes.

« Les ordinateurs quantiques ne cannibaliseront pas les ordinateurs classiques. Les ordinateurs quantiques aideront à certaines optimisations difficiles présentes dans les flux de travail. Le quantique sera additif. »

Christopher Savoie
Fondateur et CEO
de Zapata Computing

« Nous devons passer plus de temps à déterminer quelle partie du flux de travail l'informatique quantique peut traiter. Pas de physique mystérieuse, mais les problèmes de mission et d'affaires qu'elle peut résoudre de manière transformatrice. »

Glenn Kurowski
Vice-Président Principal et Chef de la Technologie
CACI



Écrans OLED

Des écrans plus lumineux et plus efficaces grâce à la simulation quantique²⁵

Quelle est la seule chose qui s'interpose entre les humains et leurs téléphones? Les écrans, également connus sous le nom d'écrans plats. Mais ces écrans sont l'un des composants les plus gourmands en énergie dans les téléphones intelligents, limitant souvent la durée de vie des batteries.

De nouveaux matériaux plus évolués peuvent produire des affichages plus lumineux qui sont plus efficaces et moins gourmands en énergie. Mais le développement de ces nouveaux matériaux nécessite des méthodes de recherche traditionnelles en laboratoire, qui demandent beaucoup de travail et de temps. Le processus couvre plusieurs étapes de développement, dont l'identification des matériaux, le développement de processus, le prototypage de dispositifs et les tests de qualification.

Mais les ordinateurs quantiques peuvent générer un rythme plus soutenu. L'informatique quantique peut aider à commercialiser de nouveaux matériaux grâce à une modélisation moléculaire plus rapide et plus précise des matériaux ainsi que de leurs interactions avec les processus de fabrication et les conditions d'exploitation. Ces nouveaux matériaux peuvent produire des écrans plus lumineux, moins puissants et moins coûteux, ce qui pourrait accélérer leur commercialisation et permettre aux entreprises de proposer plus rapidement des produits plus attrayants et plus compétitifs.

La simulation des matériaux à l'aide de l'informatique classique a actuellement une application limitée dans le développement de

nouveaux matériaux. Le temps nécessaire pour simuler avec précision des scénarios moléculaires d'une complexité suffisante dépasse rapidement les délais pratiques. Par conséquent, sans simulations informatiques précises, il faut recourir à des méthodes expérimentales laborieuses et coûteuses.

Avec la stratégie informatique quantique, les simulations quantiques peuvent être utilisées dans l'ensemble du flux de travail pour simuler de manière plus réaliste les matériaux et leurs interactions avec le fonctionnement des dispositifs, les processus de fabrication, et les conditions d'exploitation. Des simulations de matériaux plus complexes et plus précises au niveau moléculaire peuvent permettre une expérimentation productive sur l'ordinateur, réduisant ainsi la recherche en laboratoire et le développement de la fabrication, qui sont coûteux et fastidieux.

Ces flux de travail de simulation de matériaux pilotés par l'informatique quantique peuvent créer des avantages stratégiques et concurrentiels pour les produits, tels que des écrans plus lumineux et moins gourmands en énergie. Et les retombées financières potentielles sont considérables. Une simple augmentation de 1 % des revenus par an pourrait représenter 320 millions de dollars supplémentaires pour le marché des écrans OLED.²⁷



Le flux de travail intelligent : ajouter la puissance du quantique

« Les flux de processus ne permettent pas à eux seuls d'appréhender la véritable complexité du travail. L'informatique quantique modifiera la relation entre les personnes, la technologie et le travail. »

Colonel (retraité) Stoney Trent, Ph.D.

Fondateur et Président de
The Bulls Exploitation Group

Chez IBM, nous définissons les flux de travaux intelligents comme des systèmes étendus de bout en bout qui, par l'application de la technologie à grande échelle, définissent l'expérience client et influencent les résultats économiques.²⁸ Ces flux de travaux sont plus expansifs que de simples processus et utilisent traditionnellement des technologies telles que l'automatisation, la chaîne de blocs, l'intelligence artificielle, la 5G, le nuage et l'informatique de périphérie pour contribuer à des résultats exceptionnels. La division Recherche IBM démontre que l'utilisation de ces technologies de l'informatique classique dans les flux de travail peut tripler les avantages.²⁹ L'incorporation de la puissance de l'informatique quantique a le potentiel de l'améliorer de façon exponentielle (voir figure 10).

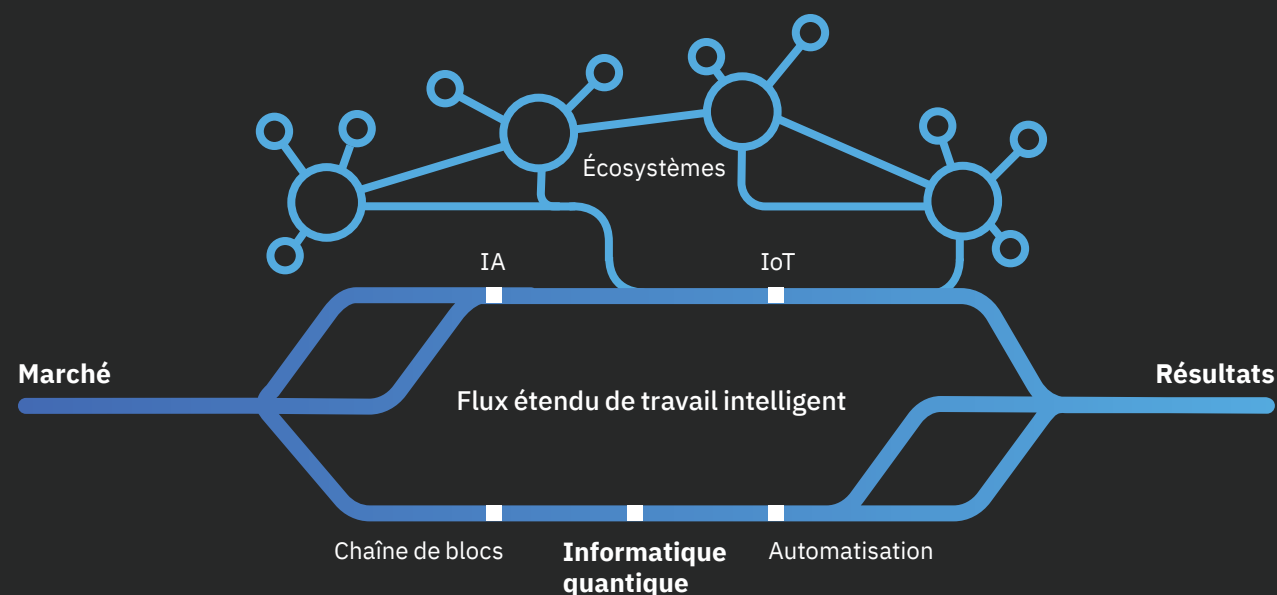
En fait, nous approchons d'une révolution qui fait évoluer l'informatique vers des environnements hautement hétérogènes. De plus en plus, l'informatique classique, l'intelligence artificielle et l'informatique quantique seront intégrées dans des flux de travaux intelligents gérés sur un multi-nuage hybride.

Alors que vous évaluez l'informatique quantique dans le contexte des flux de travaux intelligents, voici une analogie. Les processus fonctionnent en tant que réseau organisationnel fédérateur. Mais les flux de travaux intelligents servent de système nerveux à l'organisation, en bref, ils sont interconnectés et interdépendants. Ces flux de travaux diffèrent des processus simples, car ils extraient des informations de l'écosystème, détectent et déterminent la réponse appropriée et envoient une rétroaction à d'autres flux de travaux.³⁰ L'informatique quantique, avec sa capacité à évaluer de nombreuses options, excelle en la matière.

Figure 10

L'injection de choc

Flux de travaux intelligents fondés sur l'informatique quantique



« Ce serait très bizarre si une plateforme infonuagique majeure en 2030 n'avait une composante quantique. Le quantique aura un impact plus important que l'intelligence artificielle ou les superordinateurs. »

Christian Weedbrook

CEO
de Xanadu Quantum Technologies

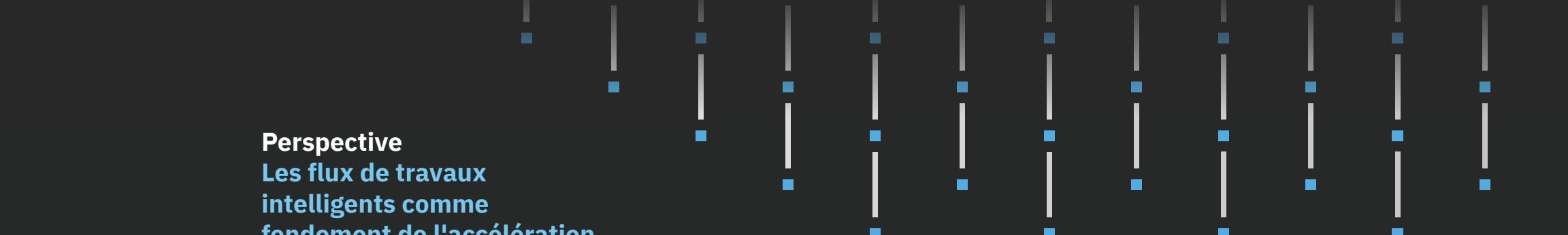
Les flux de travaux intelligents sont des modèles élaborés de manière créative, avec une stratégie nouvelle, tant pour les données que pour la technologie innovante. La mise en place ces flux de travaux et l'amélioration des capacités requises en matière d'IA, de données et de nuage, peuvent profiter à votre entreprise dès maintenant, tout en jetant les bases du quantum (voir Perspective, « Flux de travaux intelligents », page 40). D'autres considérations incluent la réalité de l'informatique quantique, la résolution du cryptage Rivest-Shamir-Adleman(RSA), la cryptographie à courbe elliptique (ECC), et la nécessité de migrer vers la cryptographie existante de sécurité quantique.³¹

De par leur définition même, les flux de travaux intelligents sont intrinsèquement basés sur une combinaison de technologies — et cette combinaison peut et doit inclure l'informatique quantique. Pour commencer, les flux de travaux intelligents se développent dans une architecture ouverte et faiblement couplée, qui *relie* les applications et les approches techniques. Leur capacité à tirer parti des environnements hybrides est essentielle, étant donné que la plupart des organisations accèdent à l'informatique quantique sur le nuage au lieu de développer leur propre infrastructure. Même si votre organisation utilise une approche plus simple, l'établissement de certains flux de travaux intelligents fondamentaux peut constituer une excellente transition vers l'informatique quantique.

Dans ce cadre de flux de travaux intelligents, l'informatique quantique peut être considérée comme un accélérateur de prime abord — une technologie qui vient propulser l'informatique classique là où une puissance supplémentaire est nécessaire. Mais en réalité, l'informatique quantique est un *catalyseur* de révolutions profondes de modèles d'affaires qui peuvent générer des services et des modes de consommation perturbateurs.

Pour que ces révolutions aient lieu, les entreprises doivent développer une boussole stratégique qui les guide vers de meilleures opportunités. Elles doivent également renforcer la capacité à appliquer l'informatique quantique dans les environnements d'affaires classiques du point de vue de la technologie, des processus et des personnes. En résumé, les entreprises doivent mettre en place une infrastructure réceptive au quantique et, lorsque la technologie sera pleinement exploitée, elles seront prêtes.





Perspective Les flux de travaux intelligents comme fondement de l'accélération de l'informatique quantique³²

Le développement de flux de travaux intelligents peut vous aider à vous préparer à l'informatique quantique, générant des avantages organisationnels dès maintenant. Les quatre étapes ci-dessous décrivent un cadre global intégrant les technologies émergentes, l'organisation des données et l'adoption d'un environnement hybride multi-nuage. Une fois cette infrastructure en place, les organisations peuvent passer à l'analyse des sous-flux pour trouver des possibilités d'accélération de l'informatique quantique.

1.
Intégrer les technologies émergentes, dont l'intelligence artificielle et l'apprentissage machine, pour modifier les méthodes de travail.

Appliquer d'autres technologies émergentes pour créer des flux de travail hautement dynamiques et intelligents qui changent radicalement la façon dont le travail est effectué et les nouvelles expériences sont conçues. En particulier, renforcer l'intelligence artificielle et les capacités d'apprentissage machine, qui s'associent exceptionnellement bien à l'informatique quantique.

2.
Valoriser les données.

Tirer parti des données organisées à travers des flux de travaux intelligents pour exploiter les groupes de valeur les plus importants. Mettre en place une gouvernance robuste pour susciter la confiance dans vos données et vos modèles d'IA afin que les décisions puissent être poussées vers les premières lignes de l'organisation. Identifier les composants du flux de travaux d'une complexité exceptionnelle qui bénéficieraient d'algorithmes quantiques.

3.
Déployer par le biais du multi-nuage hybride.

Profiter du passage à un multi-nuage hybride pour accéder aux données et en faire un nouvel usage, héberger des flux de travaux intelligents et moderniser les applications de manière ouverte et sans risque. Utiliser cette flexibilité pour rechercher des occasions d'expérimenter l'informatique quantique basée sur le nuage.

4.
Évaluer les sous-flux les mieux adaptés à l'accélération de l'informatique quantique.

Explorer les options relatives aux émulateurs quantiques ou, mieux encore, rejoindre un écosystème de l'informatique quantique à code source ouvert. Une telle communauté donne accès à l'informatique quantique sur une échelle gérable, fournissant un laboratoire d'expérimentation à faible engagement. L'utilisation de l'informatique classique et de l'informatique quantique doit être chorégraphiée pour que l'informatique quantique augmente le plus efficacement possible les fonctions classiques.

Pour arriver à ce point, il faut des capacités clés (voir figure 11). Aucune d'entre elles ne concerne la maîtrise de la technologie quantique à proprement parler. Il s'agit plutôt d'améliorer les compétences des entreprises, les capacités techniques et les stratégies prospectives qui permettront à la révolution de l'informatique quantique de prendre racine et de prospérer.

Bonne nouvelle : l'adoption d'une approche pragmatique, agile et itérative de l'informatique quantique ne vise pas seulement à récolter des bénéfices futurs. Cette stratégie peut commencer à produire des avantages commerciaux importants dès aujourd'hui. Par exemple, la mise en place d'un modèle de livraison dynamique moderne et d'une plateforme d'innovation ouverte par le biais d'un multi-cloud hybride peut générer des bénéfices importants pour votre entreprise classique.³³ En même temps, ces stratégies font progresser votre capacité à intégrer de manière transparente l'informatique quantique lorsqu'elle sera prête pour la production.

En améliorant dès maintenant votre environnement informatique classique tout en investissant dans l'expérimentation et dans des flux de travail prêts pour le quantique, vous êtes mieux placé pour accélérer votre chemin vers l'avantage quantique.

Figure 11

Bases solides

Poser les bases de l'informatique quantique



La recherche de talents dans l'écosystème de l'informatique quantique

Dans cette économie mondiale et complexe, aucune entreprise ne peut tout faire elle-même. Nous nous appuyons sur des partenaires, une expertise spécifique et des écosystèmes pour tirer le meilleur parti de ce qui est disponible et pour exploiter et démontrer notre propre valeur ajoutée.

Vu la vitesse à laquelle l'informatique quantique s'améliore et se propage, il est difficile pour de nombreuses entreprises de suivre le rythme, et le coût d'agir en solo pourrait être prohibitif. Faire partie d'un écosystème de l'informatique quantique peut permettre d'accéder à cette technologie alors que cela ne serait peut-être pas possible autrement. Ces écosystèmes permettent également de mieux comprendre les implications de l'informatique quantique et la manière dont elles sont liées à vos problèmes commerciaux.

Déterminer exactement quels sont ces problèmes, et comment l'informatique quantique peut les résoudre, demande de l'expertise. Les organisations peuvent s'efforcer de constituer leur propre équipe interne d'informatique quantique, et dans une certaine mesure, cela pourrait être nécessaire. Mais les écosystèmes constituent un complément précieux ou même une substitution aux talents internes de l'informatique quantique, en particulier pour des tâches très techniques.

En raison de la disponibilité limitée, les tentatives de création ou d'apport de compétences en informatique quantique en interne sont très difficiles. Mais les écosystèmes les plus avancés ont déjà des talents en stock.

Le fait de garder les questions suivantes à l'esprit peut aider à aligner efficacement les écosystèmes sur les besoins en talents.³⁴

Quel est votre type de problème d'affaires? Vous ne possédez peut-être pas encore l'expertise pour expliquer votre problème en termes de capacités quantiques, mais vous avez sans doute une perspective plus large. S'agit-il d'un problème de simulation basé sur la chimie? Ou bien cherchez-vous des algorithmes quantiques qui améliorent l'apprentissage machine? Peut-être que votre principale préoccupation est la sécurité à l'ère quantique? Les écosystèmes potentiels sont plus efficaces lorsqu'ils travaillent déjà sur des cas d'utilisation pertinents à votre problème spécifique et incluent des experts qui comprennent les enjeux de votre secteur d'activité.

Quelles sont les organisations et les penseurs les plus importants au monde dans le domaine de l'informatique quantique dans votre secteur? En raison du rythme rapide de l'innovation dans le domaine de l'informatique quantique, vous avez besoin de partenaires qui sont à la pointe des percées scientifiques et de leur application à la résolution de problèmes (voir figure 12). La différence entre un partenariat avec des joueurs de niveau 1 et de niveau 2 peut faire la différence entre faire partie d'un scénario compétitif « le gagnant remporte tout » et être laissé pour compte.

« À ce stade, il est beaucoup plus judicieux de s'associer pour acquérir des compétences quantiques que de les acquérir. »

Doug Kushnerick

Technology Scouting and Ventures
ExxonMobil Research

« Je gère un capital intellectuel qui n'est même pas encore formé. »

Irfan Siddiqi

Directeur en chef de Quantum Systems Accelerator

Department of Energy (DoE)

National Quantum Information Science (QIS) Research Center

Quel est le dosage optimal de conseillers par rapport au personnel interne?

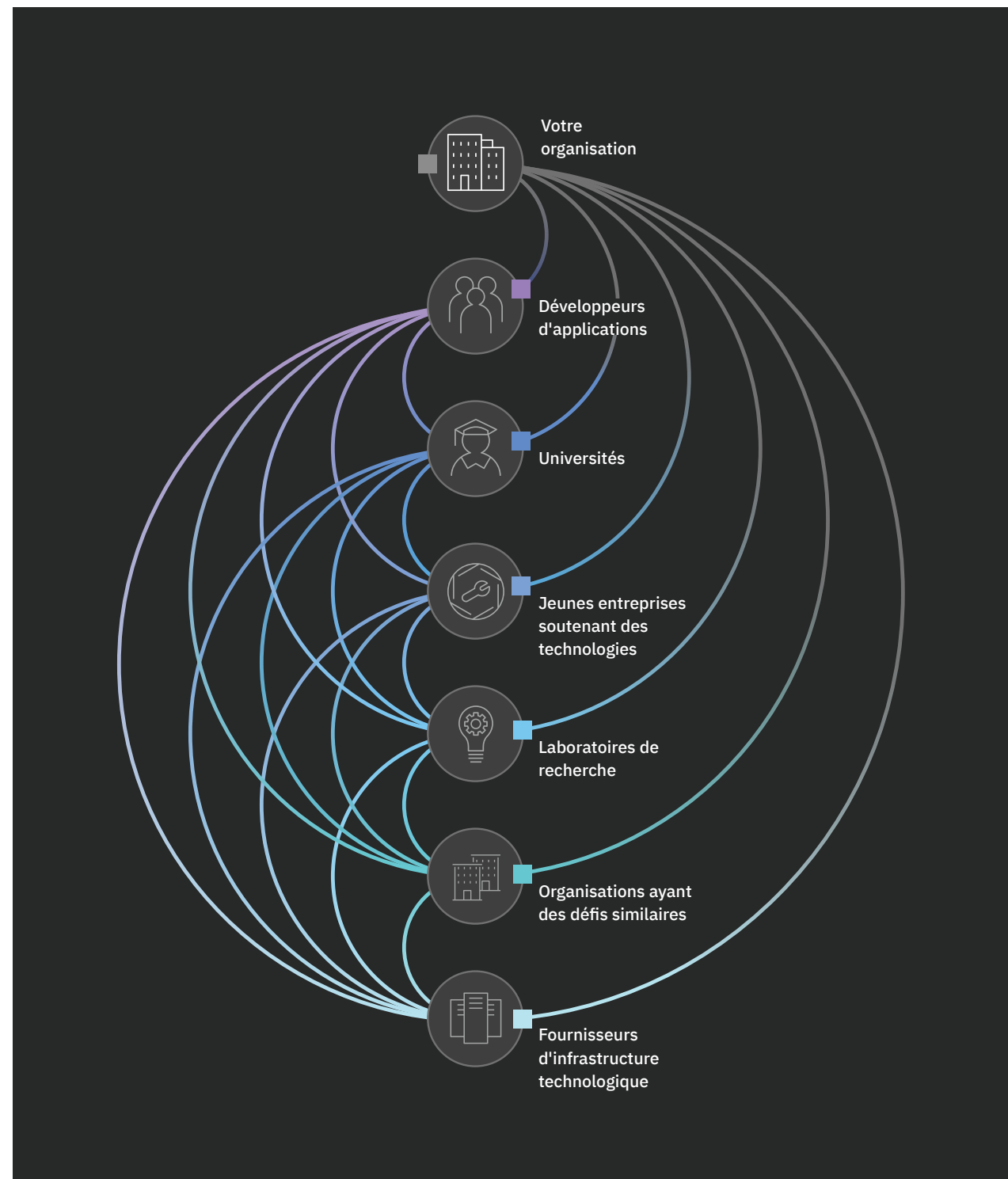
Le bon écosystème d'informatique quantique pour vous contient la bonne combinaison de participants de l'écosystème qui se concentrent sur vos problèmes d'affaires aux côtés de vos professionnels commerciaux techniques, notamment :

- **Un fournisseur de services de technologie quantique** qui offre un accès facile à des systèmes informatiques quantiques basés sur le nuage, un cadre de programmation à code source ouvert, des ressources éducatives telles que des tutoriels et des documents de recherche, des chercheurs informatiques quantiques, des conseillers en informatique quantique, une assistance technique et une communauté collaborative activement engagée dans la résolution de défis quantiques.
- **Des développeurs en informatique quantique** qui comprennent le développement d'applications d'informatique quantique à l'aide d'un code source ouvert et d'un accès à des bibliothèques de développement d'applications, et qui ont accès à du matériel d'informatique quantique réel.
- **Des partenaires d'enseignement et des universités** menant des recherches pertinentes en informatique quantique et formant des experts en informatique quantique que vous pourrez éventuellement embaucher dans votre équipe.

Figure 12

Quels sont vos super-pouvoirs?

Trouver la bonne combinaison de composants de l'écosystème



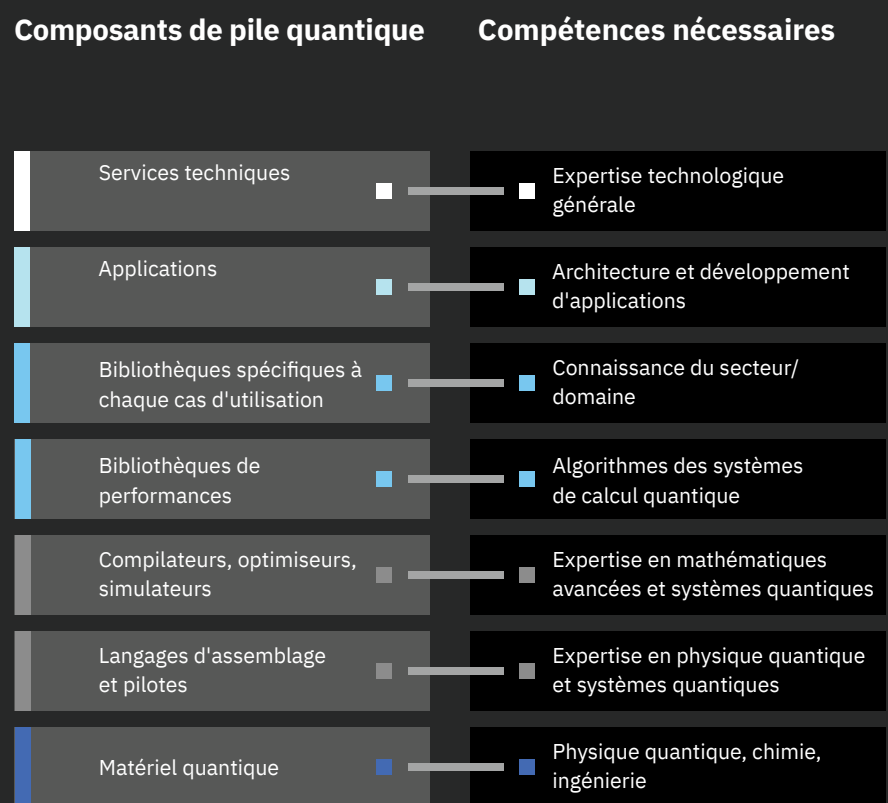


Figure 13

Cap sur le succès

Quels sont les éléments et les compétences qui peuvent vous aider à atteindre la connaissance de l'informatique quantique?

Si le développement d'au moins quelques talents en interne est une priorité, une première étape peut consister à rechercher des plateformes communautaires. Ces écosystèmes « pratiques » permettent aux développeurs d'accéder à des outils pour créer et exécuter des algorithmes informatiques quantiques sur du matériel informatique ou des simulateurs quantiques. Par exemple, la communauté de l'informatique quantique d'IBM propose le cadriciel à code source ouvert Qiskit. Ces plateformes sont ouvertes à la fois aux étudiants – un groupe critique – et aux équipes informatiques des organisations.

Une option moins spécialisée consiste à former de petites équipes pour commencer à identifier les problèmes – qu'il s'agisse de percées qui changent l'industrie ou d'accélérateurs de flux de travaux pour lesquels l'informatique quantique peut jouer un rôle. Les membres de l'équipe n'ont pas besoin d'une expertise en informatique quantique de niveau doctorat, mais ils doivent avoir suffisamment de connaissances en la matière pour évaluer les capacités quantiques par rapport aux besoins sectoriels et organisationnels (voir figure 13).

Lorsque vous recrutez pour l'informatique quantique, quel est le talent optimal? Des chercheurs de l'Institut de technologie de Rochester et de l'Université du Colorado Boulder ont fourni des informations intéressantes. Ils avaient interrogé les responsables de plus de 20 entreprises de technologie quantique basées aux États-Unis, et les réponses avaient fait apparaître deux voies communes.

« L'industrie des semi-conducteurs et l'informatique quantique aux États-Unis sont confrontées à des difficultés pour recruter des diplômés en STEM. D'abord parce qu'elles doivent rivaliser pour les ingénieurs avec des entreprises de logiciels et de médias sociaux plus connues, et ensuite parce que le nombre de diplômés en STEM a diminué par rapport aux autres pays au cours des 30 dernières années. »

Ajit Manocha

Président et CEO

SEMI

D'une part, les organisations avaient déclaré qu'elles recherchaient des candidats qui étaient « conscients » du quantique. Cela englobait une compréhension globale des concepts quantiques et la capacité de discuter et d'appliquer ces concepts, en d'autres termes, la connaissance du quantique. Les candidats n'auraient pas nécessairement besoin d'une connaissance exhaustive des équations et de la théorie.³⁵ Nos spécialistes chez IBM soulignent que cette connaissance de l'informatique quantique peut souvent être une reconversion, c'est-à-dire qu'il s'agit d'apprendre suffisamment d'informatique quantique pour augmenter l'expertise du domaine et trouver comment intégrer l'informatique quantique dans ce domaine.³⁶

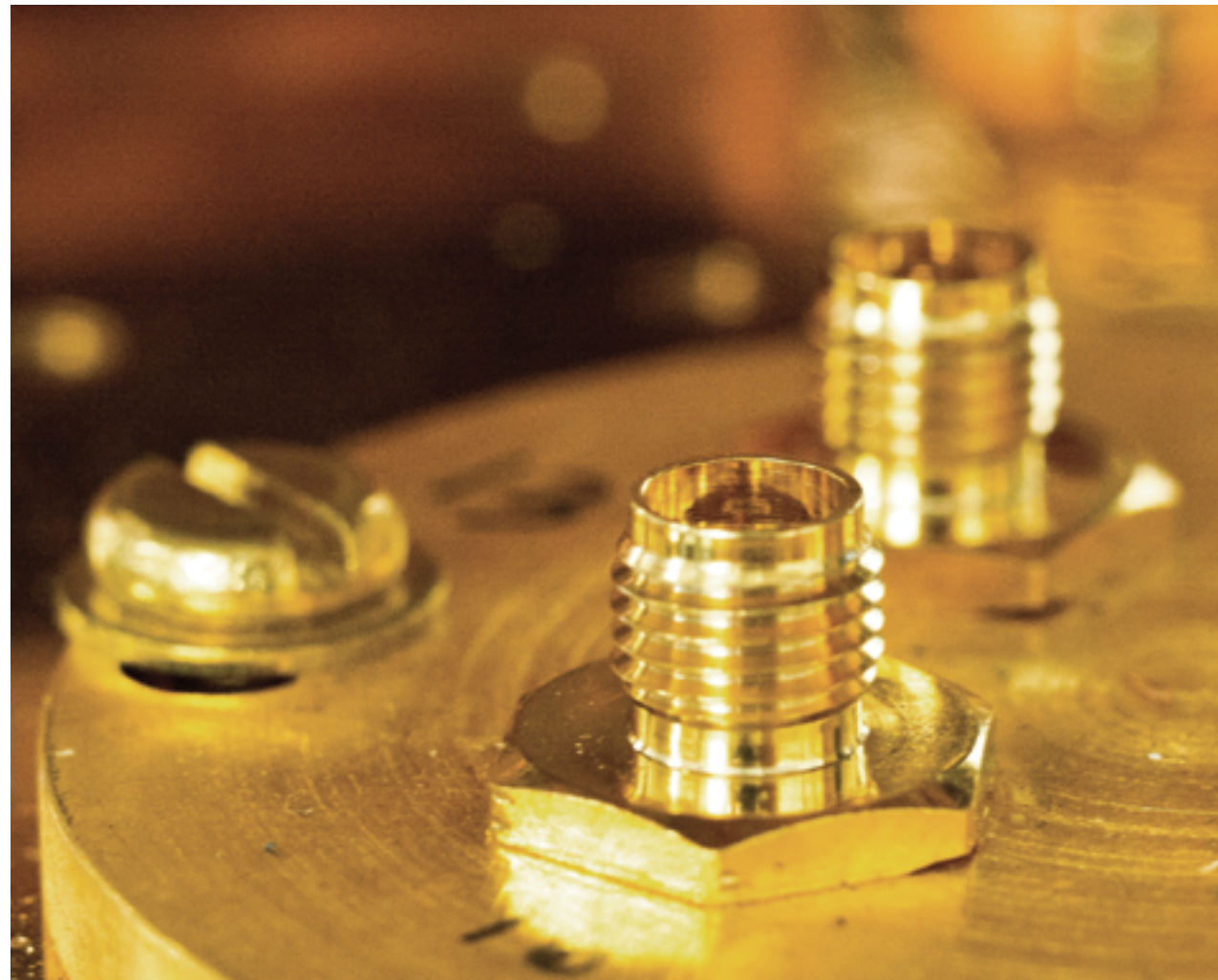
D'autre part, selon l'étude, les candidats ayant des compétences pratiques en laboratoire seraient préférés à ceux qui n'en avaient pas.³⁷ Un expert sectoriel d'IBM estime qu'il n'existe aujourd'hui qu'environ 3 000 travailleurs qualifiés dans le secteur quantique, et que cette base doit être doublée ou quadruplée.³⁸ Pas plus tard qu'en octobre 2018, *Le New York Times* rapportait que moins de 1 000 personnes dans le monde faisaient de la recherche de pointe en informatique quantique.³⁹

Acquérir ce niveau de compétences techniques approfondies peut s'avérer difficile, surtout lorsqu'on est en concurrence avec des universités, des jeunes entreprises et des fournisseurs. Cette pénurie de talents peut renforcer l'attrait d'écosystèmes bien établis, dotés de leurs propres équipes quantiques talentueuses.

« S'il y a bien une chose qui va ralentir décennie dite Quantum Decade, ce ne sera probablement pas la technologie. Ce sera le personnel qualifié. Nous aurons accès au capital, il y aura beaucoup d'intérêt, et la technologie sera là. En fait, nous aurons besoin de gens. »

Prineha Narang

Professeure Adjointe des Sciences Computationnelles des Matériaux,
Université Harvard





■ Questions qui se posent

1ère question

Comment la dissolution de ces barrières apparemment infranchissables pourrait-elle remodeler votre secteur d'activité?

Quels types d'expériences en informatique quantique pourriez-vous mener maintenant, en vue d'atteindre ces objectifs?

3e question

Les flux de travaux intelligents qui utilisent des technologies telles que l'automatisation, la chaîne de blocs, l'intelligence artificielle, la 5G, le nuage et l'informatique de périphérie créent un environnement idéal pour le quantique.

Comment la mise en place de ces éléments de base peuvent-ils favoriser votre entreprise aujourd'hui?

2e question

Comment associer l'informatique quantique à l'informatique classique dans un flux de travail particulier?

Quelles sont les sous-sections du flux de travail les mieux adaptées à l'informatique quantique?

Comment cette évaluation modifie-t-elle les perspectives et les possibilités liées à vos processus?

4e question

Quelles mesures pouvez-vous prendre pour favoriser la connaissance de l'informatique quantique au sein de votre organisation?

Quels écosystèmes pouvez-vous joindre pour accéder à une expertise informatique quantique pointue?



Connaissances

Un processus et non une destination

Lorsque l'informatique quantique démontre sa supériorité sur l'informatique traditionnelle pour un problème spécifique, c'est ce qu'on appelle l'avantage quantique. Il s'agit d'une évolution progressive, par vagues qui marquent à la fois des progrès et des pauses, mais qui, en fin de compte, font avancer la technologie.

Il existe trois catégories de problèmes dans lesquels le quantique excelle

L'informatique quantique est particulièrement astucieuse pour les simulations de la nature, les problèmes algébriques, notamment l'apprentissage machine, les équations différentielles et le traitement des matrices, ainsi que les problèmes de recherche et de graphique quantiques.

La matrice de priorisation de l'informatique quantique

L'évaluation de l'impact commercial potentiel des applications quantiques peut être difficile. Nous vous montrons comment évaluer quelles applications potentielles sont les mieux placées pour offrir des avantages commerciaux optimaux.

Chapitre 3

L'avantage quantique et la quête de la valeur commerciale

L'avantage quantique . tel que présenté à la page 7 . est obtenu, lorsqu'une tâche informatique d'intérêt pour les affaires ou la science peut être effectuée de façon plus efficace, plus abordable, et qu'elle est d'une meilleure qualité grâce aux ordinateurs quantiques. C'est là où les ordinateurs quantiques et les systèmes classiques peuvent faire nettement mieux que les systèmes classiques seuls.

Mais l'avantage quantique n'est pas un événement dramatique, survenant d'un seul coup. Il sera plus ambigu, arrivant par vagues qui progressent et s'arrêtent à la fois, mais qui, en fin de compte, déplacent la technologie vers la réalisation concrète d'une valeur commerciale. Chaque cas d'utilisation a son propre calendrier pour l'avantage quantique. Le partenaire du système ou de l'écosystème de l'informatique quantique que vous choisissez peut également influencer ce calendrier et cet avantage. Heureusement, l'avantage quantique peut bénéficier d'un effet domino dans lequel les succès d'un cas d'utilisation peuvent se répercuter sur les autres.

« Une accélération exponentielle peut se produire après un premier cas d'utilisation. Ce que nous apprenons de ces premiers cas d'utilisation peut être appliqué à d'autres. »

Sabrina Maniscalco

Professeur d'information et de Logique Quantiques,
CEO de l'Université de Helsinki, Algorithmiq Oy

Alors que nous évaluons le temps qu'il nous faudra pour atteindre l'avantage quantique, il est utile de comprendre un peu les systèmes actuels et de savoir où nous en sommes. Les qubits d'aujourd'hui sont sujets à des erreurs dues aux limitations du matériel et au bruit de l'environnement. Si les qubits supraconducteurs qui vivent à une température proche du zéro absolu ne sont pas protégés du bruit en étant maintenus dans le vide, les vibrations ou les photons parasites qui frappent le dispositif pourraient gâcher un calcul. Il en va de même pour la chaleur et les effets ambiants. Rappelez-vous que l'informatique quantique est construite sur la physique de la mécanique quantique, et que c'est le modèle pour les interactions au niveau atomique, électronique et photonique. Le couplage avec l'environnement pourrait perturber ce que nous faisons dans notre système.

Plus précisément, les qubits du matériel quantique sont appelés *qubits physiques*. Actuellement, les cas d'utilisation de l'informatique quantique sont rendus possibles par les types d'algorithmes dont nous disposons, mais nous sommes limités à leur mise en œuvre à l'aide de qubits physiques bruyants. Bien que nous pensions qu'il est possible d'atteindre les premiers exemples de l'avantage quantique avec des qubits physiques, nous devons passer à des qubits logiques pour atteindre la pleine valeur de l'informatique quantique. Les qubits logiques sont créés en combinant le logiciel avec des centaines de qubits physiques pour

« Pour que l'informatique quantique soit un avantage, il faut avoir confiance dans les résultats. Voyez-le de cette façon. Si un ordinateur quantique concevait un parachute pour vous, seriez-vous prêt à le porter et à sauter d'un avion? »

« Par exemple, trois installations quantiques différentes aboutiraient-elles aux mêmes réponses, avec des taux d'erreur et des ensembles de réponses similaires? C'est par le consensus que l'on acquiert la confiance. »

Peter Tsahalís

CIO des Services Stratégiques et des Technologies Svancées
chez Wells Fargo

mettre en œuvre la correction des erreurs. Avec ce type de donnée de qubit, les erreurs provenant du bruit affectant le matériel sous-jacent peuvent être à la fois détectées et corrigées. La mise en œuvre de la correction des erreurs quantiques est un but crucial pour cette décennie.

Alors que nous entrons dans décennie appelée Quantum Decade, une question importante se pose : à mesure que les résultats de l'informatique quantique transcendent véritablement ceux de l'informatique classique, comment les évaluer? Ils ont largement dépassé la validation des techniques et des ordinateurs traditionnels. Lors d'une recherche théorique, le résultat peut ne pas être aussi conséquent. Mais dans les scénarios qui ont un impact sur la santé et la sécurité dans le monde réel, c'est une question redoutable.

Par nécessité, nous devons nous éloigner de la validation classique, elle ne se prête tout simplement pas aux multiples facettes de l'informatique quantique. Cela pourrait signifier la tenue de bancs d'essai sur différents modes d'ordinateurs quantiques, voire différents écosystèmes. La validation et la quantification des résultats pourraient en fin de compte placer certains systèmes au-dessus d'autres en termes de fiabilité et d'exactitude. C'est encore un autre facteur qui peut influencer les vagues de l'avantage quantique.

Chez IBM, nous voyons ces vagues s'aligner en trois phases (voir figure 14).

- **La première vague est à marée basse et à faible intensité.** Il peut y avoir des rumeurs dans certains secteurs d'activité et milieux universitaires, mais les résultats globaux ne sont pas fortement médiatisés. Ceux qui ont la clairvoyance d'expérimenter la technologie peuvent y voir un intérêt, puis des moyens de l'améliorer, puis des applications dans d'autres domaines et de nouveaux algorithmes.
- **La deuxième vague est à marée haute.** Les percées sont plus structurées et plus courantes. Les conversations sur l'informatique quantique gagnent du terrain. De plus en plus d'organisations s'alignent sur les écosystèmes, expérimentent des environnements de services informatiques quantiques basés sur le nuage et testent l'informatique quantique avec un succès croissant.
- **La troisième vague? Le tsunami arrive.** Beaucoup de changements arrivent, et les industries sont transformées. L'apprentissage machine quantique passe au premier plan, et les avancées deviennent de plus en plus complexes et révolutionnaires. C'est là que décennie dite Quantum Decade atteint son crescendo, avec une forte poussée des calculs quantiques exempts d'erreurs.

En définitive, la troisième vague confère un avantage quantique aux organisations, aux utilisateurs finaux et à la société dans son ensemble. Comment fabriquer des avions avec des métaux moins corrosifs et voler de manière plus sûre avec moins de maintenance? Comment le secteur médical peut-il mieux personnaliser les diagnostics, les traitements et les produits pharmaceutiques (voir étude de cas, « IBM et clinique de Cleveland » à la page 22)?

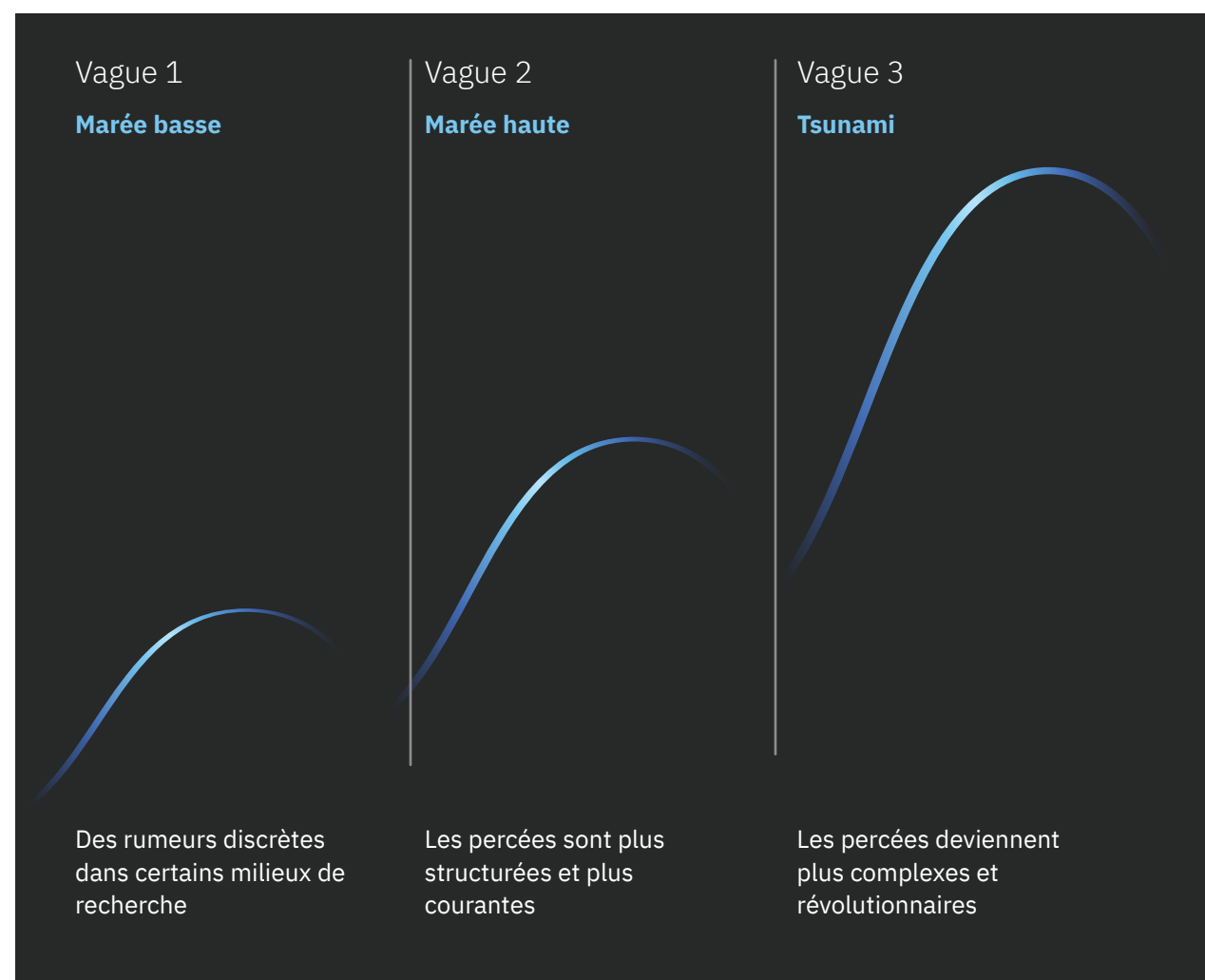
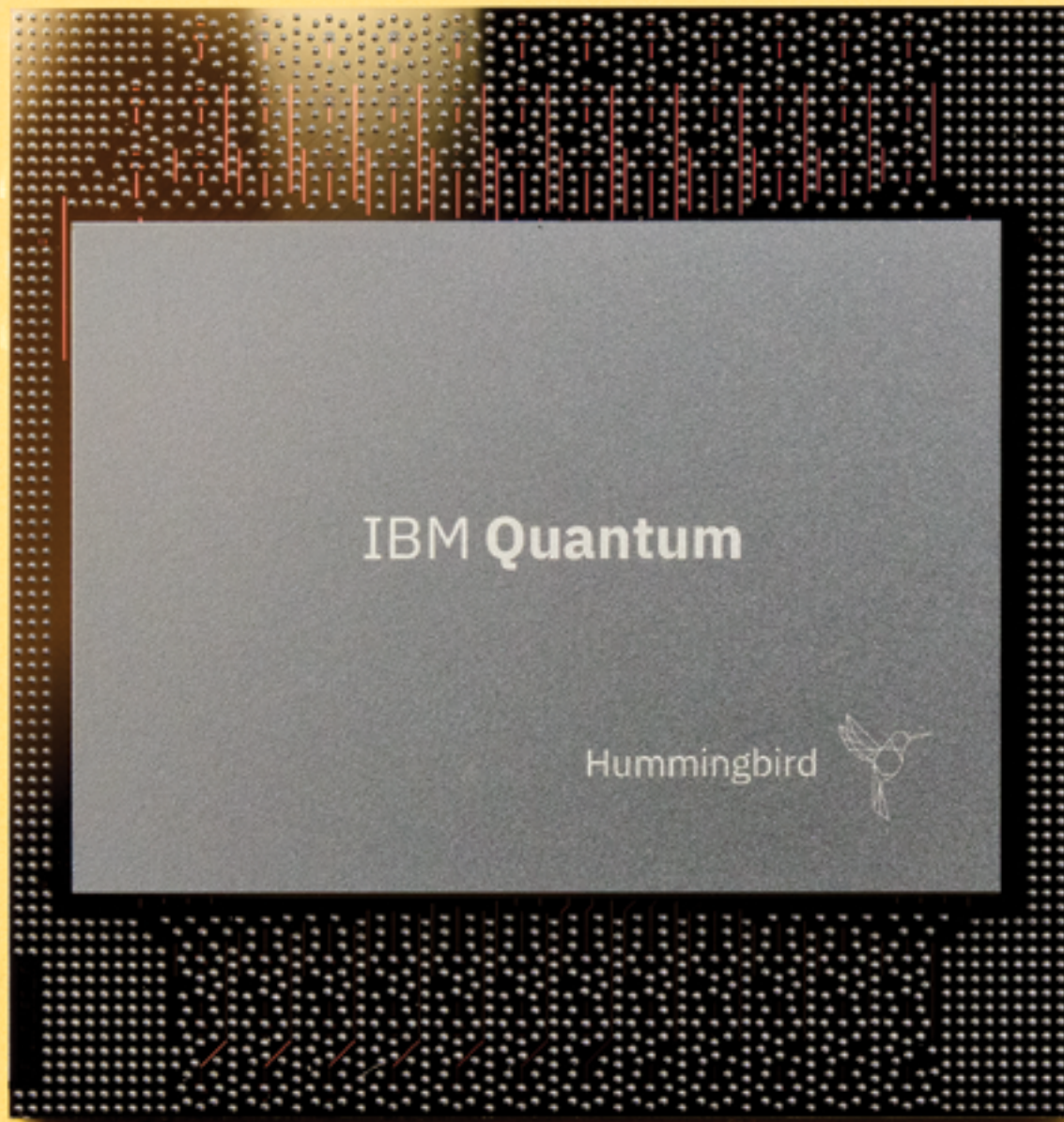


Figure 14

Les trois vagues

De la marée basse au tsunami



IBM Quantum

Hummingbird



● Le processeur quantique IBM Quantum Hummingbird de 65 qubits, légèrement plus grand qu'une pièce d'un centime américain

Pour mettre les choses en perspective, certains experts estiment que l'informatique quantique est là où était l'IA en 2010. Vu la nature exponentielle de la technologie, l'informatique quantique risque de décoller encore plus vite.

« Dans 10 ans, nous aurons réalisé ce qui a pris 40 à 50 ans à l'informatique classique. Dans les années 60, 70 et 80, l'informatique était un créneau spécialisé, presque un art sombre. Mais d'ici 2030, nous aurons compris comment les entreprises peuvent utiliser l'informatique quantique, sans connaissance approfondie de son fonctionnement réel. »

Ilyas Khan

Fondateur et CEO

de Cambridge Quantum Computing

Toutefois, il faudra investir dans des cas d'utilisation soigneusement étudiés pour révéler les applications phare de l'informatique quantique par secteur d'activité. Pour vous aider à évaluer le potentiel commercial de l'informatique quantique pour votre secteur d'activité, nous allons d'abord examiner comment l'informatique quantique peut aider des catégories spécifiques de problèmes, puis nous adopterons une approche méthodique pour hiérarchiser les cas d'utilisation. Nous avons également inclus un vaste ensemble de guides sectoriels décrivant des cas d'utilisation et des scénarios à la page 69, des guides détaillés de ce que l'informatique quantique pourrait signifier pour vous.

Finalement, l'avantage quantique se résume aux résultats.

« En fin de compte, les cadres ont besoin de capacités. Ils se soucient des réponses apportées à leurs problèmes d'affaires. Ils sont indifférents quant à la manière dont cela se fait, et cela ne changera pas. On ne s'adresse pas aux chefs d'entreprise en leur présentant des solutions quantiques en soi. On leur propose des moyens de mieux optimiser leur secteur. »

Christopher Savoie

Fondateur et CEO

de Zapata Computing

L'informatique quantique à son meilleur : trois classes de problèmes⁴⁰

Que pourrait signifier la commercialisation de l'informatique quantique pour votre organisation? Quels types de problèmes sont les meilleurs candidats pour l'avantage quantique?

À court et moyen terme, l'informatique quantique pourrait apporter des avantages sectoriels dans trois domaines : la simulation, la recherche et les problèmes algébriques (voir figure 15).

Simulation quantique des processus naturels

Parce que la mécanique quantique décrit le fonctionnement de la nature à un niveau fondamental, l'informatique quantique est bien adaptée à la modélisation des processus et des systèmes qui se produisent dans la nature (voir l'étude de cas « Chercheurs d'IBM : Exploration de la simulation moléculaire de l'eau »).

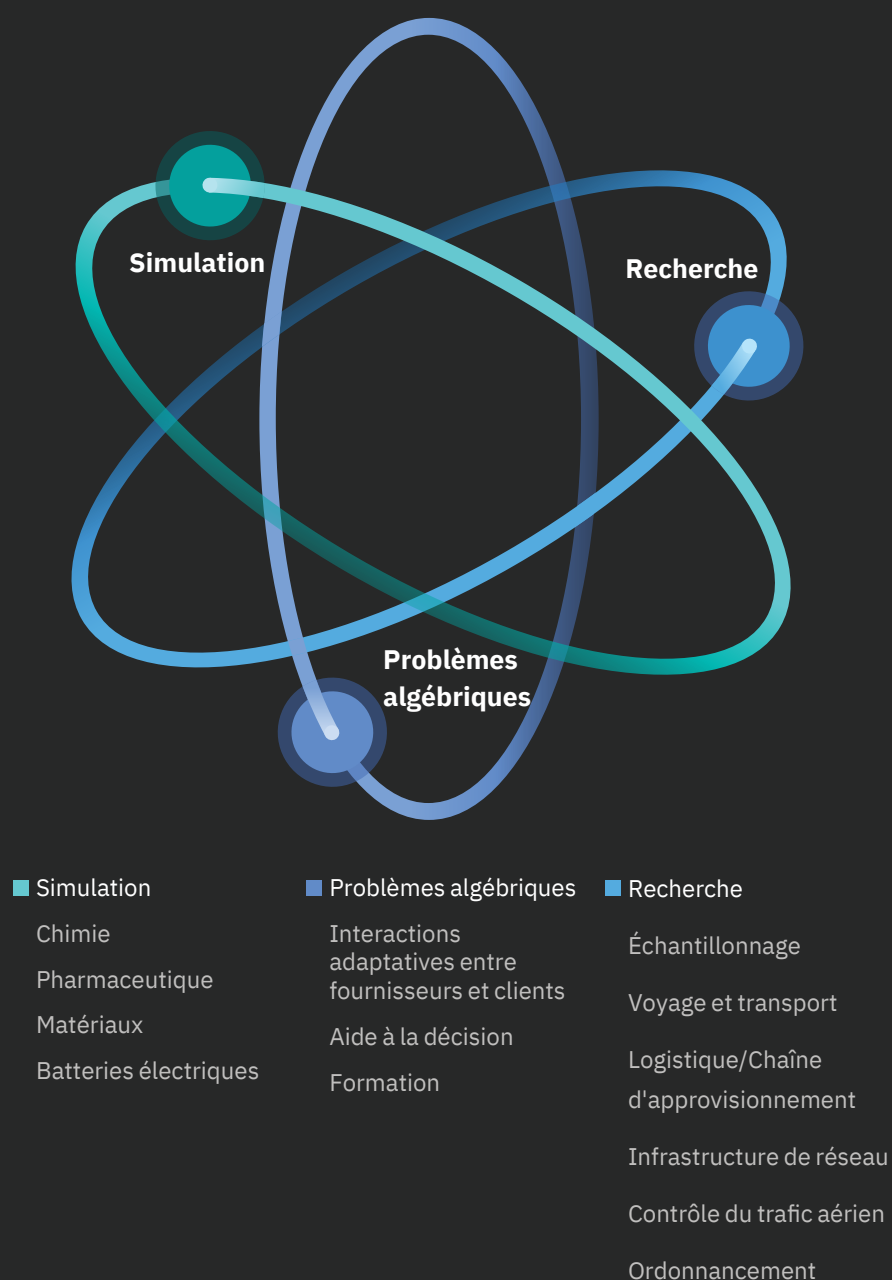


Figure 15

Où le caoutchouc rencontre la route

Usages anticipés de l'informatique quantique

Chercheurs d'IBM
Exploration de la
simulation moléculaire
de l'eau⁴¹



L'avenir n'est pas seulement l'informatique quantique. C'est plutôt la convergence de l'informatique quantique, de l'informatique classique et de l'intelligence artificielle qui a le pouvoir de transformer la donne. En combinant les calculs classiques et quantiques de manière non triviale, en échangeant l'un pour l'autre, on peut améliorer leurs capacités et accroître ce qui est possible avec les ressources disponibles.

Les méthodes décrites ici exploitent les ressources classiques et quantiques pour capturer les corrélations quantiques et *doubler* la taille du système qui peut être simulé sur du matériel quantique.

En exploitant les symétries du problème, les chercheurs d'IBM ont mis au point une technique permettant de diviser les circuits quantiques en circuits plus petits, capturant les aspects les plus difficiles du calcul et ne nécessitant que la moitié du nombre de qubits du circuit complet. Cette stratégie leur a permis non seulement de réduire le nombre de qubits nécessaires, mais aussi de rendre les circuits quantiques requis moins profonds. Chaque petit circuit a été exécuté séparément sur un ordinateur quantique et les sorties ont été combinées à l'aide de techniques classiques de post-traitement.

Les chercheurs ont testé cette méthode dans une simulation moléculaire de l'eau. Dans ce cas, les parties des problèmes difficiles à simuler pourraient être réduites à 10 orbitales, ou fonctions d'onde. Ces orbitales ont pu être représentées sur cinq qubits d'un processeur IBM Quantum pour calculer l'énergie de mise à la terre de la molécule dans la simulation la plus précise à ce jour.

Des méthodes de ce type ont le potentiel d'évoluer en faisant deux fois plus avec les ressources disponibles, en échangeant les calculs quantiques et classiques pour étendre la portée de calcul des systèmes de calcul quantique. Cette méthode peut s'avérer productive dans les flux de découverte de matériaux.

Problèmes de recherche et de graphes

L'art de résoudre les problèmes d'optimisation consiste à rechercher la « meilleure solution » ou la solution optimale dans une situation où il existe de nombreuses réponses possibles. Prenons l'exemple de la création d'un calendrier de livraison d'un colis. Mathématiquement, il existe plus de 3,6 millions de combinaisons possibles pour planifier 10 livraisons dans des créneaux horaires adjacents.⁴² Mais quel calendrier représente la solution optimale, compte tenu de variables telles que les contraintes de temps des destinataires, les retards potentiels et la durée de conservation des marchandises transportées? Même en appliquant des techniques d'approximation, le nombre de possibilités est toujours trop important pour qu'un ordinateur classique puisse les explorer (voir étude de cas, « ExxonMobil »).

Par conséquent, les ordinateurs classiques prennent aujourd'hui de nombreux raccourcis pour résoudre des problèmes d'optimisation importants. Malheureusement, leurs solutions ne sont pas toujours optimales. Les entreprises qui pourraient bénéficier de la recherche quantique et de l'optimisation des graphes sont, entre autres :


- Les entreprises de télécommunications mettant à niveau leur infrastructure réseau
- Les prestataires de soins de santé optimisant les traitements des patients
- Les gouvernements améliorant le contrôle du trafic aérien
- Les organisations développant des horaires de travail
- Les universités préparant les horaires des cours

Bien que personne n'ait encore fourni de preuve mathématique confirmant que l'informatique quantique pourrait conférer une accélération exponentielle aux problèmes de recherche et de graphe, les chercheurs s'efforcent de le démontrer de manière heuristique. Les entreprises avant-gardistes explorent déjà la résolution de problèmes d'optimisation à l'aide de l'informatique quantique dans leur quête pour devancer leurs concurrents. Leur prévoyance pourrait s'avérer justifiée après la confirmation des premières démonstrations de l'avantage quantique dans l'optimisation.

Problèmes algébriques

Les problèmes algébriques comprennent les systèmes d'équations linéaires, les équations différentielles nécessaires aux problèmes industriels, les problèmes liés à l'apprentissage machine et les opérations sur les matrices. Les problèmes mathématiques comme certaines méthodes d'apprentissage machine et de tarification des options en finance impliquent le mappage et l'évaluation de fonctions sur un espace paramétrique multidimensionnel.

L'état des qubits dans un ordinateur quantique est lui-même un espace complexe de haute dimension capable d'explorer des aspects des données inaccessibles aux ordinateurs classiques. En fait, une symbiose entre l'intelligence artificielle et l'informatique quantique commence à générer un cycle vertueux de progrès dans les deux domaines. Par exemple, les algorithmes quantiques peuvent améliorer l'apprentissage machine dans le domaine du regroupement des données.⁴³ Mais l'apprentissage machine peut aider à mieux comprendre les systèmes quantiques.⁴⁴ D'autres entreprises qui pourraient tirer profit de ce type d'apprentissage sont les entreprises de produits de consommation et de vente au détail qui adaptent leurs offres de marketing (voir l'étude de cas « Chercheurs d'IBM Quantum et de l'Université de Californie, Berkeley » à la page 58).



ExxonMobil Étude de l'utilisation de l'informatique quantique pour aider à optimiser les voyages à l'étranger⁴⁵

Comment orchestrer des dizaines de milliers de navires marchands traversant les océans pour livrer les biens de consommation que nous utilisons dans notre vie quotidienne? Près de 90 % des transactions mondiales dépendent du transport maritime. Plus de 50 000 navires, transportant chacun jusqu'à 200 000 conteneurs, se déplacent chaque jour, transportant des marchandises d'une valeur de 14 000 milliards de dollars.

À l'échelle mondiale, l'optimisation d'une telle ampleur de routes maritimes est intraitable pour les ordinateurs classiques. Des équipes de recherche d'ExxonMobil et d'IBM utilisent ce scénario pour étudier comment mapper efficacement les problèmes d'optimisation sur les ordinateurs quantiques.

En 2019, ExxonMobil a été la première entreprise du secteur de l'énergie à joindre le réseau quantique d'IBM, un consortium d'organisations qui bénéficient d'un accès à des systèmes et outils informatiques quantiques avancés. ExxonMobil a utilisé les capacités du réseau pour explorer des méthodes permettant de mapper l'acheminement des navires marchands à l'échelle mondiale sur des ordinateurs quantiques.

L'avantage des algorithmes quantiques réside dans leur capacité à réduire les solutions incorrectes tout en amplifiant les solutions correctes. En utilisant le module d'optimisation quantique Qiskit, ExxonMobil a réussi à tester différents algorithmes quantiques. Selon les aspects du problème, certains algorithmes quantiques heuristiques se sont révélés légèrement plus performants que d'autres, et l'optimisation basée sur le Variational Quantum Eigensolver (VQE) s'est révélée plus performante en fonction du choix de l'ansatz (en termes de physique, il s'agit d'une supposition ou d'une hypothèse éclairée).

Ces recherches pourraient facilement s'appliquer à d'autres industries et cas d'utilisation impliquant des contraintes de temps. Les scénarios pourraient inclure la livraison de marchandises, les services de covoiturage ou la gestion des déchets urbains.

**Chercheurs d'IBM
Quantum et de l'Université
de Californie, Berkeley
Un algorithme gagnant
pour l'apprentissage
machine quantique⁴⁶**

L'apprentissage machine dans un environnement de traitement quantique intrigue les chercheurs. Au cours des dernières années, ils ont proposé des algorithmes d'apprentissage machine quantiques qui promettaient des accélérations quantiques par rapport à leurs homologues classiques.⁴⁷

La plupart de ces algorithmes d'apprentissage supposaient un accès aux données sous forme d'états cohérents de la mécanique quantique, *pourtant, le monde fonctionne avec des données classiques.*

Les chercheurs d'IBM Quantum et de l'Université de Californie à Berkeley ont exploré la possibilité de trouver des circuits difficiles pour les ordinateurs classiques, et de les utiliser pour fournir un avantage dans les tâches d'apprentissage machine nécessitant uniquement l'accès à des données classiques.

Dans le cas de l'apprentissage machine supervisé, les chercheurs de cette étude de cas font correspondre les données à des espaces de dimensions supérieures, ou espaces de caractéristiques, pour travailler avec elles, et l'espace de l'état des qubits multiples est lui-même riche et de haute dimension. En d'autres termes, un environnement quantique amène naturellement les données vers ces hautes dimensions.

Les chercheurs ont utilisé des circuits quantiques pour mapper des données classiques avec l'espace de dimension supérieure de multiples qubits, et pour estimer le noyau quantique, qui est une mesure de similarité entre les éléments de données. Le noyau estimé a ensuite été utilisé dans une machine de vecteur de soutien classique pour calculer les vecteurs de soutien séparant les données.

Fin 2020, les chercheurs ont fourni une preuve rigoureuse de l'avantage quantique d'un circuit de carte de caractéristiques quantique sur tous les classificateurs classiques binaires possibles, nécessitant l'accès à des données classiques uniquement. Cela peut être utile dans des applications telles que la prévision, la prédiction des propriétés à partir de caractéristiques dans les données, ou l'analyse des risques. Pour la première fois, nous avons une preuve formelle théorique de l'avantage quantique en apprentissage machine.

Hiérarchisation des cas d'utilisation pour obtenir la valeur commerciale⁴⁸

« Tout cela se résume à l'application phare et au problème que l'informatique quantique peut résoudre pour votre secteur d'activité. Ce n'est peut-être pas évident, tout comme aux premiers jours d'Internet, mais il s'agit de cas d'utilisation réalisables, et non de problèmes farfelus ou ésotériques. »

Todd Hughes

Directeur Technique en Chef, Projets et Initiatives Stratégiques
CACI

L'évaluation de l'impact commercial potentiel des applications de l'informatique quantique peut s'avérer difficile, notamment en raison de la complexité de cette technologie émergente. Votre organisation a besoin d'un moyen d'évaluer quelles applications potentielles de l'informatique quantique sont les mieux placées pour offrir des avantages commerciaux optimaux.

Une « matrice de priorisation » de l'informatique quantique permet de résoudre ce dilemme. Les cadres de diverses disciplines de votre organisation, notamment la stratégie, les opérations, l'innovation, la technologie de l'information et la gestion des risques, peuvent évaluer l'impact potentiel de l'informatique quantique sur leurs domaines, hiérarchiser les applications, puis mesurer l'avantage quantique au fur et à mesure que l'organisation passe de l'étape d'utilisateur précoce à l'étape d'intégration de l'informatique quantique.

Notre matrice classe les applications quantiques en quatre catégories distinctes :

Les applications « Utilisateur précoce »

sont les plus faciles à mettre en œuvre aujourd'hui.

Les applications « Retardataire »

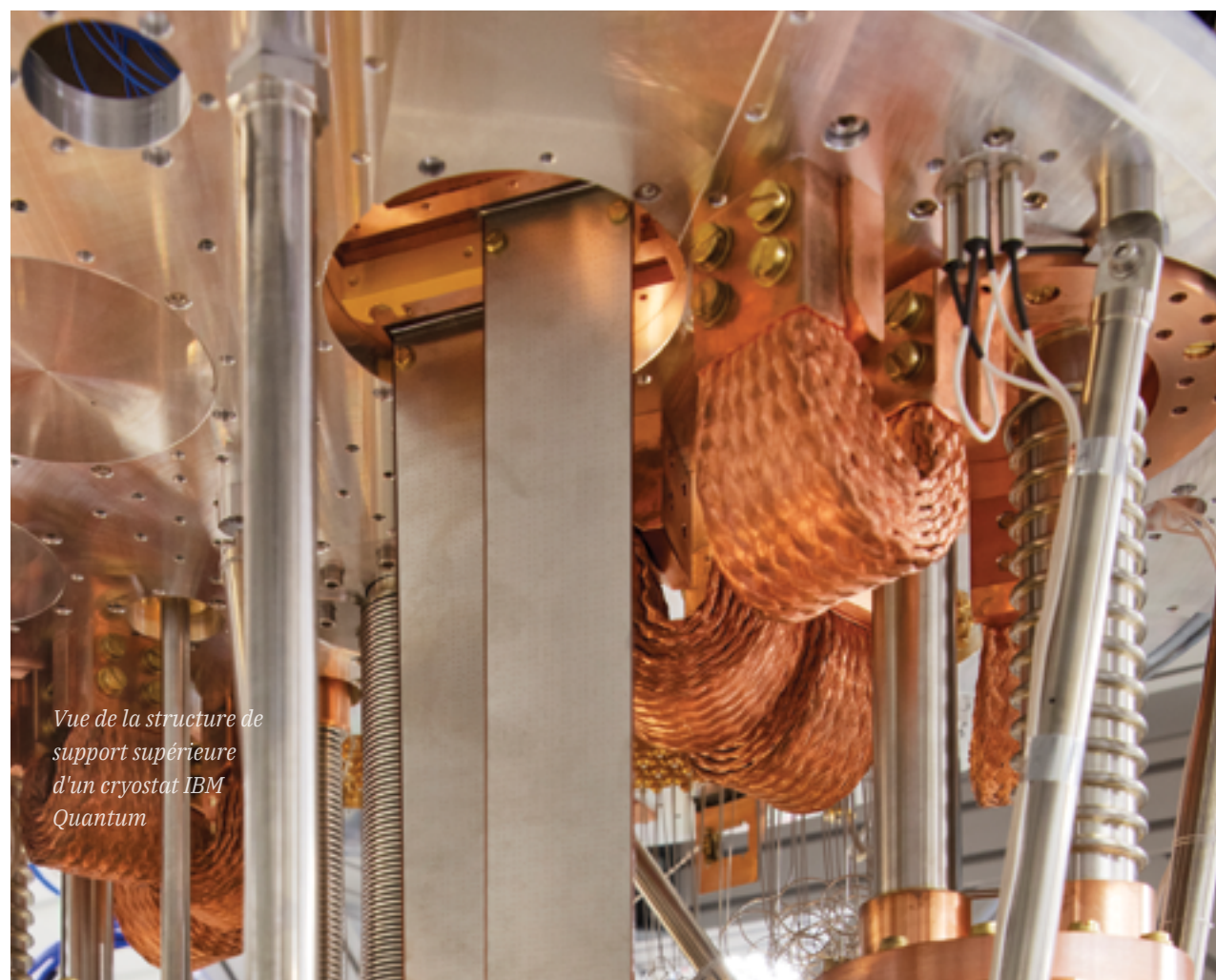
promettent un avantage quantique significatif à l'avenir.

Les applications « Joker »

peuvent ou non apporter un avantage commercial réel.

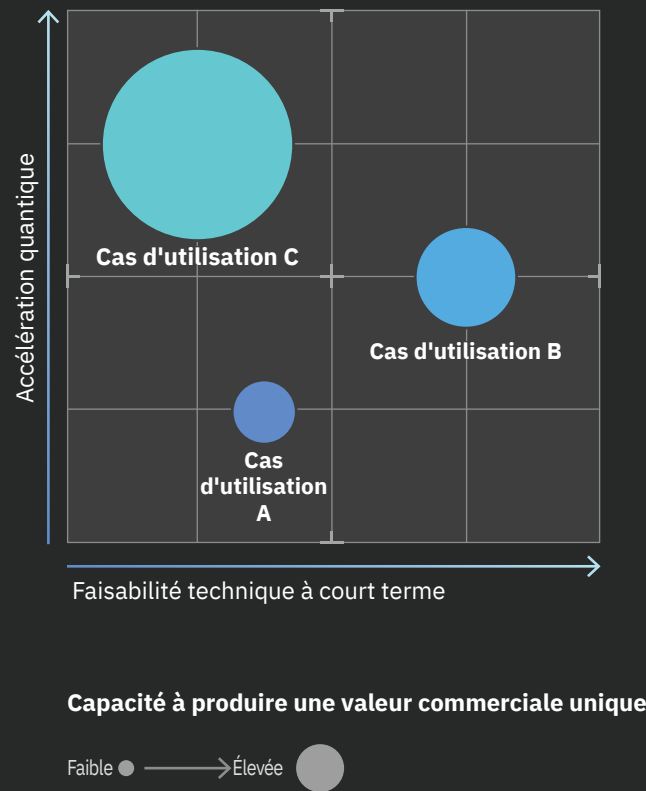
Les applications « Secteur mûr »

peuvent apporter un avantage concurrentiel à l'échelle de l'entreprise.



Vue de la structure de support supérieure d'un cryostat IBM Quantum

Un cadriceil de priorisation testé⁴⁹



Notre matrice de priorisation quantique aide les cadres à évaluer chaque application en trois dimensions (voir figure 16) :

Accélération quantique

Capacité théorique à fournir un avantage technologique par rapport aux solutions informatiques classiques (axe des ordonnées).

Faisabilité technique à court terme

Disponibilité opérationnelle (axe des abscisses).

Impact sectoriel potentiel relatif par cas d'utilisation

Capacité à générer une valeur commerciale unique pour une entreprise spécifique (taille des bulles).

En priorisant ainsi les applications informatiques quantiques, on obtient une vue d'ensemble complète qui permet de représenter graphiquement les compromis décisionnels d'une organisation. Ainsi, vous pouvez prendre des décisions plus éclairées sur l'adoption de l'informatique quantique par votre entreprise en fonction des priorités stratégiques, telles qu'une stratégie de mise sur le marché, une approche d'optimisation des coûts ou le rôle de perturbateur du secteur.

Figure 16

Le cadriceil de hiérarchisation des priorités quantiques

Une représentation visuelle des compromis de décision

L'axe des ordonnées : l'accélération quantique

Globalement, la promesse de l'avantage quantique est de résoudre efficacement des problèmes d'affaires particuliers qui ne sont pas actuellement réalisables (ou dont le coût est prohibitif) en raison des contraintes informatiques actuelles.⁵⁰ Par conséquent, la place d'une application sur l'axe des ordonnées de la matrice de priorisation dépend de l'ampleur théorique de l'amélioration qu'un algorithme quantique spécifique est censé apporter par rapport à une solution classique.

L'avantage quantique d'une application individuelle peut se manifester de différentes manières. Un exemple est un temps d'exécution plus rapide pour effectuer une recherche d'une solution souhaitée ou une meilleure stratégie pour résoudre un problème avec une plus grande exactitude.

L'axe des abscisses : la faisabilité technique à court terme

L'axe des abscisses du cadriciel de priorisation quantique décrit les exigences techniques en matière de matériel et de logiciel quantiques nécessaires pour exécuter avec succès chaque application identifiée. Un aspect clé de cette question est le qubit attendu et les exigences de performance. Le placement sur l'axe des abscisses est également influencé par d'autres considérations relatives au matériel et au logiciel, telles que la conception de la puce et de l'algorithme, l'interconnectivité des qubits, le nombre de portes et de qubits utilisés dans le code, et l'efficacité du compilateur.

Bien que les technologies d'informatique quantique soient à l'état naissant, certains algorithmes, tels que l'algorithme d'optimisation approximative quantique (QAOA) ou les machines QSVM, ont montré leur potentiel à mieux fonctionner sur les systèmes quantiques à court terme en raison de leurs exigences moindres en matière de profondeur de circuit, tandis que d'autres algorithmes auront besoin de systèmes informatiques quantiques mûrs pour exécuter des problèmes plus sophistiqués.⁵¹

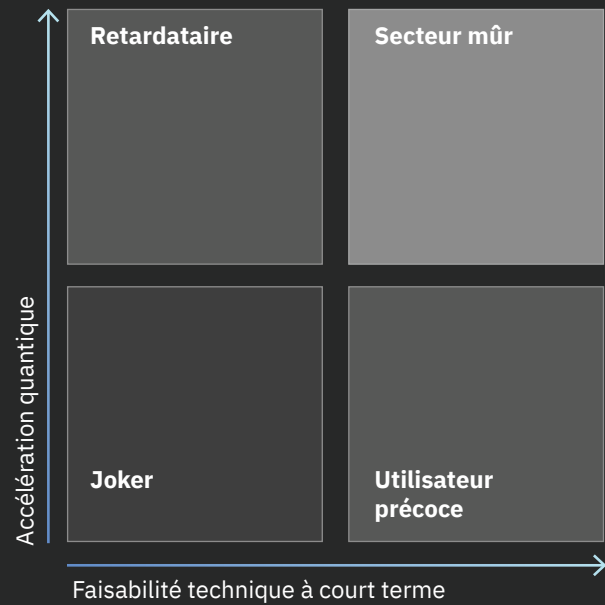
Taille des bulles : impact sur les entreprises

La troisième dimension de la matrice est adaptée à l'impact sectoriel que chaque application est censée avoir pour une entreprise spécifique. Cette dimension intègre les mesures sectorielles choisies exclusivement par chaque organisation. En tant que processus de sélection unique pour chaque entreprise, il est important de réaliser que l'évaluation de l'impact du secteur va au-delà de la simple mesure des résultats économiques.

Les mesures doivent constituer une combinaison de résultats sur le marché et de conséquences sur la concurrence ainsi que l'impact financier. Par exemple, en fonction des objectifs stratégiques d'une organisation, cette dimension peut inclure des mesures de renforcement de la chaîne de valeur, d'amélioration opérationnelle, de perturbation du marché et/ou d'innovation, de croissance de part de marché, de génération de revenus, de réduction des coûts et/ou d'atténuation des risques.



Classification des applications d'informatique quantique⁵²



Comme nous l'avons déjà mentionné, l'utilisation de la matrice de priorisation quantique permet de définir quatre catégories d'applications informatiques quantiques : utilisateur précoce, retardataire, joker et secteur mûr (voir figure 17). L'identification d'une combinaison diversifiée de ces types d'applications prépare votre organisation à réagir rapidement aux avancées révolutionnaires de l'informatique quantique (voir Perspective, « Application de la matrice de priorisation quantique » à la page 64).

Figure 17

Catégories d'applications quantiques
Réponses rapides grâce à des applications diversifiées

Utilisateur précoce

Les applications d'utilisateur précoce sont les plus évidentes. Parce que leurs solutions sont heuristiques, les entreprises peuvent les expérimenter et les utiliser pour développer des talents. Comme les applications d'utilisateur précoce fonctionnent à l'aide des technologies existantes, leur adoption est une étape importante pour les organisations qui apprennent à utiliser l'informatique quantique. L'utilisation de ces applications permet de clarifier la manière d'intégrer l'informatique quantique dans vos processus commerciaux actuels et de créer un élan pour l'adoption de l'informatique quantique. L'adoption d'applications d'utilisateur précoce peut s'avérer essentielle pour maintenir la pertinence du marché, car elles peuvent établir les exigences de base nécessaires pour rester compétitif.

Retardataire

Les applications de retardataire posent le « dilemme de l'innovateur ». Elles promettent le plus grand avantage quantique, mais nécessitent une technologie quantique plus avancée pour résoudre des problèmes sectoriels significatifs. Les applications de retardataire peuvent potentiellement transformer la concurrence dans des industries particulières grâce à leur potentiel d'impact significatif sur la valeur commerciale future. Comme il n'est pas clair quand les applications de retardataire deviendront techniquement réalisables, votre organisation doit suivre de près les progrès de l'informatique quantique. Un nouvel algorithme quantique ou une nouvelle stratégie matérielle pourrait faire passer un « retardataire » vers la faisabilité technique. En raison de leur impact attendu sur les chaînes de valeur d'entreprise, le succès concurrentiel peut revenir de manière disproportionnée aux entreprises qui sont les premières à reconnaître et à mettre en œuvre les applications de retardataire.

Joker

Les applications « Joker » ne disposent pas actuellement d'une voie directe vers l'avantage quantique comme pour les applications d'utilisateur précoce, et elles ne sont pas non plus aussi techniquement réalisables que ces dernières. Bien qu'elles puissent ou non se concrétiser un jour, leur évaluation vous permet de mieux comprendre comment les attributs de l'informatique quantique pourraient s'appliquer au succès futur de votre organisation. Ces applications génériques ne sont pas à écarter complètement. Au fur et à mesure de l'évolution de la technologie quantique, certaines applications « Joker » peuvent se transformer en applications d'utilisateur précoce ou de retardataire.

Secteur mûr

Les applications du secteur mûr sont le nec plus ultra pour les entreprises qui exploitent l'informatique quantique. Bien qu'aucune application n'ait encore démontré l'avantage quantique à l'échelle de l'entreprise, à l'avenir, si les ordinateurs quantiques atteignent une échelle suffisante et si les applications de l'informatique quantique démontrent leur valeur concurrentielle, certaines d'entre elles conféreront un avantage commercial, transformant les modèles d'exploitation des entreprises et les chaînes de valeur du secteur. Certaines applications déjà en cours de développement peuvent placer leurs créateurs sur la voie d'un succès commercial significatif dès à présent.

Perspective Application de la matrice de priorisation quantique⁵³

Pour illustrer le fonctionnement de la matrice, prenons l'exemple d'une enquête sur une application informatique quantique réelle menée par une organisation commerciale de services financiers. Cette institution financière a identifié quatre utilisations potentielles de l'informatique quantique qui sont difficiles à calculer pour les machines conventionnelles :

1. Analyse de la valeur à risque

Renforcer l'atténuation des risques en développant des modèles de simulation des risques plus précis.

2. Prix des dérivés

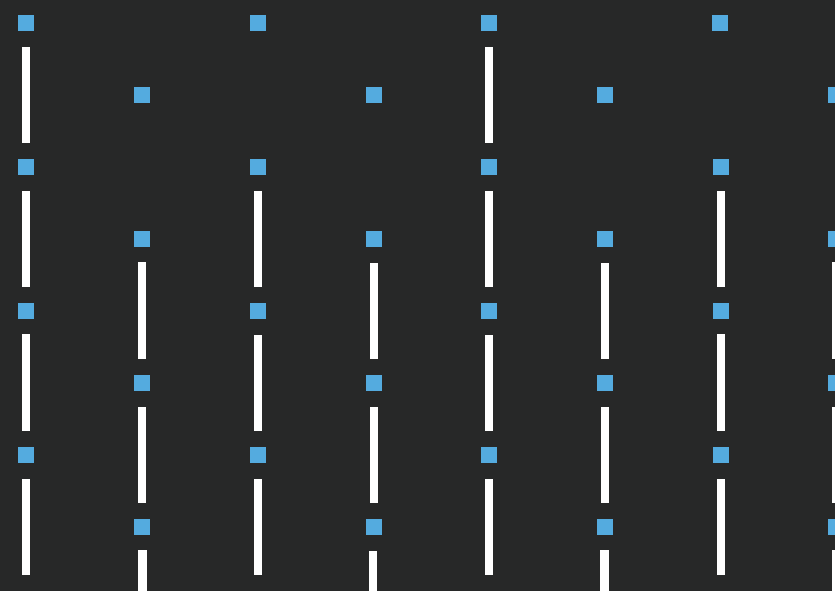
Améliorer le prix des actifs financiers en utilisant des simulations de scénarios de marché.

3. Détection des fraudes

Améliorer la détection de modèles irréguliers pour signaler les transactions frauduleuses et les imposteurs.

4. Pointage des crédits/actifs

Renforcer l'analyse statistique qui segmente la solvabilité financière des clients et la notation des obligations.

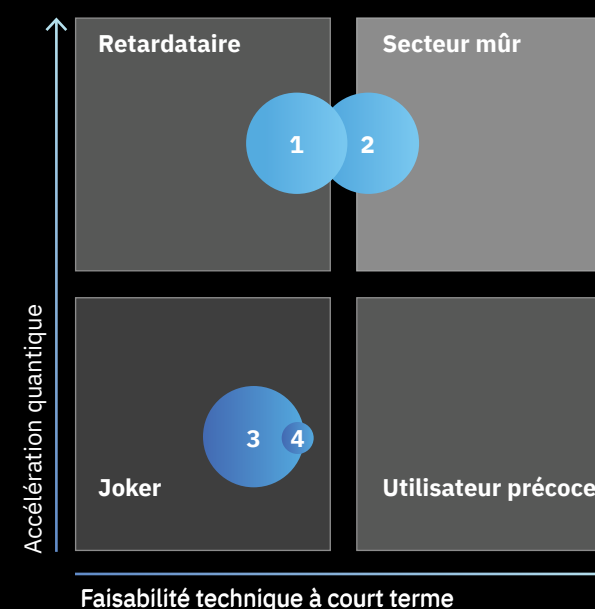


Chacune de ces applications potentielles peut être résolue par un algorithme informatique quantique spécifique qui permet de désigner son niveau d'accélération quantique et son activateur de faisabilité technique (voir figure) :

— L'analyse de la valeur à risque et l'évaluation des produits dérivés sont résolues à l'aide d'un algorithme de simulation, appelé estimation de l'amplitude quantique (QAE), pour estimer les scénarios. Ce type d'algorithme permet une accélération quadratique tout en améliorant la qualité de la solution, même si la correction des erreurs quantiques pourrait diminuer l'avantage. Cependant, cela nécessite des systèmes informatiques quantiques mûrs. Les applications associées à cet algorithme sont généralement identifiées comme celles de retardataire.

— La détection des fraudes et le pointage des crédits/actifs sont résolus à l'aide d'algorithmes d'apprentissage machine pour la classification et la prédiction (QSVM). Ce type d'algorithme peut être exécuté sur des systèmes quantiques à court terme et peut apporter une exactitude accrue. Toutefois, cet avantage doit être prouvé à mesure que la capacité du système quantique augmente, ce qui place généralement les applications associées dans la catégorie des Jokers.

La valeur commerciale que ces applications pourraient collectivement apporter au secteur d'activité des services financiers pourrait dépasser les 10 milliards de dollars au cours de la première année de leur lancement.⁵⁴ L'amélioration de la détection des fraudes et la réduction des pertes monétaires dues au blanchiment d'argent pourraient fournir plus de la moitié du total.



Quatre applications quantiques

1. Analyse de la valeur à risque
2. Prix des dérivés

3. Détection des fraudes
4. Pointage des crédits/actifs

Algorithmes pertinents

- QAE
- QSVM

Priorisation quantique en pratique

Quatre applications financières

Perspective

Tracer un chemin vers la valeur commerciale⁵⁵

Nous avons présenté cinq étapes pour développer une gamme quantique pour votre organisation.

1ère étape

Identifier les compétences en informatique quantique dont votre organisation a besoin.

Déterminer s'il faut les acquérir directement, embaucher un conseiller, et/ou joindre un écosystème quantique existant pour y accéder.

2e étape

Identifier les applications potentielles de l'informatique quantique.

Sélectionner les problèmes ou les opportunités d'affaires susceptibles de bénéficier des capacités uniques de l'informatique quantique, comme ceux qui sont limités par les ressources ou les énormes calculs d'optimisation.

3e étape

Positionner chaque application dans la matrice de priorisation.

Évaluer le profil technologique de chaque application proposée, à la fois en termes d'accélération quantique potentielle et de faisabilité technique à court terme, sur la base des matériels et algorithmes informatiques quantiques les plus récents.

4e étape

Déterminer l'impact commercial attendu.

Évaluer la portée de l'impact commercial prévu en analysant l'avantage concurrentiel potentiel de chaque application et les bénéfices financiers attendus spécifiques à votre organisation.

5e étape

Planifier l'adoption du quantique.

Déterminer si vous allez acheter un ordinateur quantique ou accéder à la dernière technologie de l'informatique quantique par le biais d'un partenariat. Prévoir l'impact de l'informatique quantique sur vos flux de travaux internes, y compris la reprise de la conception de processus et l'allocation de ressources.

■ Questions qui se posent

1ère question

Où voyez-vous votre organisation se positionner au cours de chacune des « trois vagues » de l'avantage quantique?

3e question

Testez la matrice de priorisation quantique.

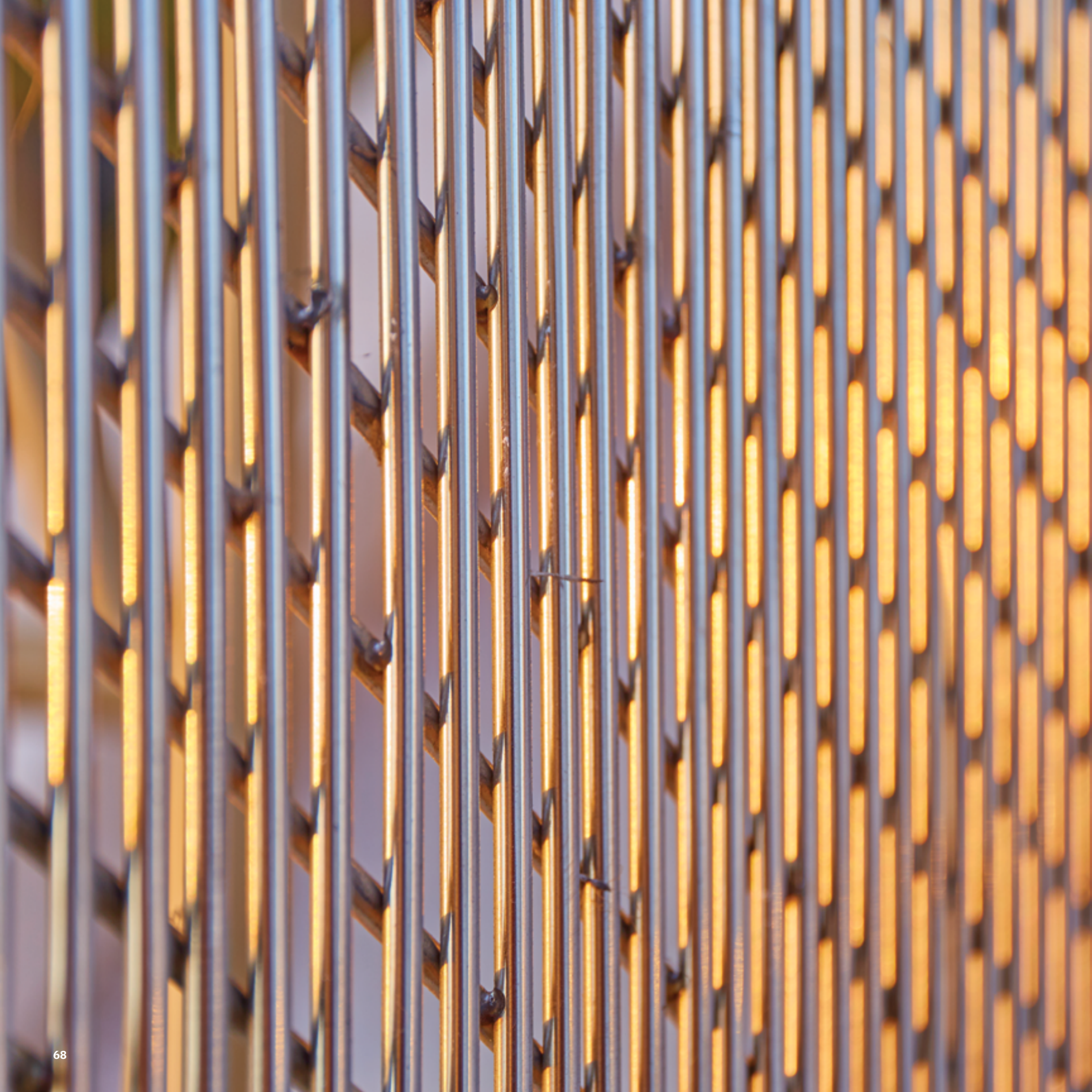
Quels ont été les résultats?

Y a-t-il eu des surprises?

2e question

Réfléchissez aux problèmes insolubles de votre secteur d'activité dont nous avons parlé au chapitre 2.

Comment les cas d'utilisation de type simulation, recherche et algébrique font partie de la solution?



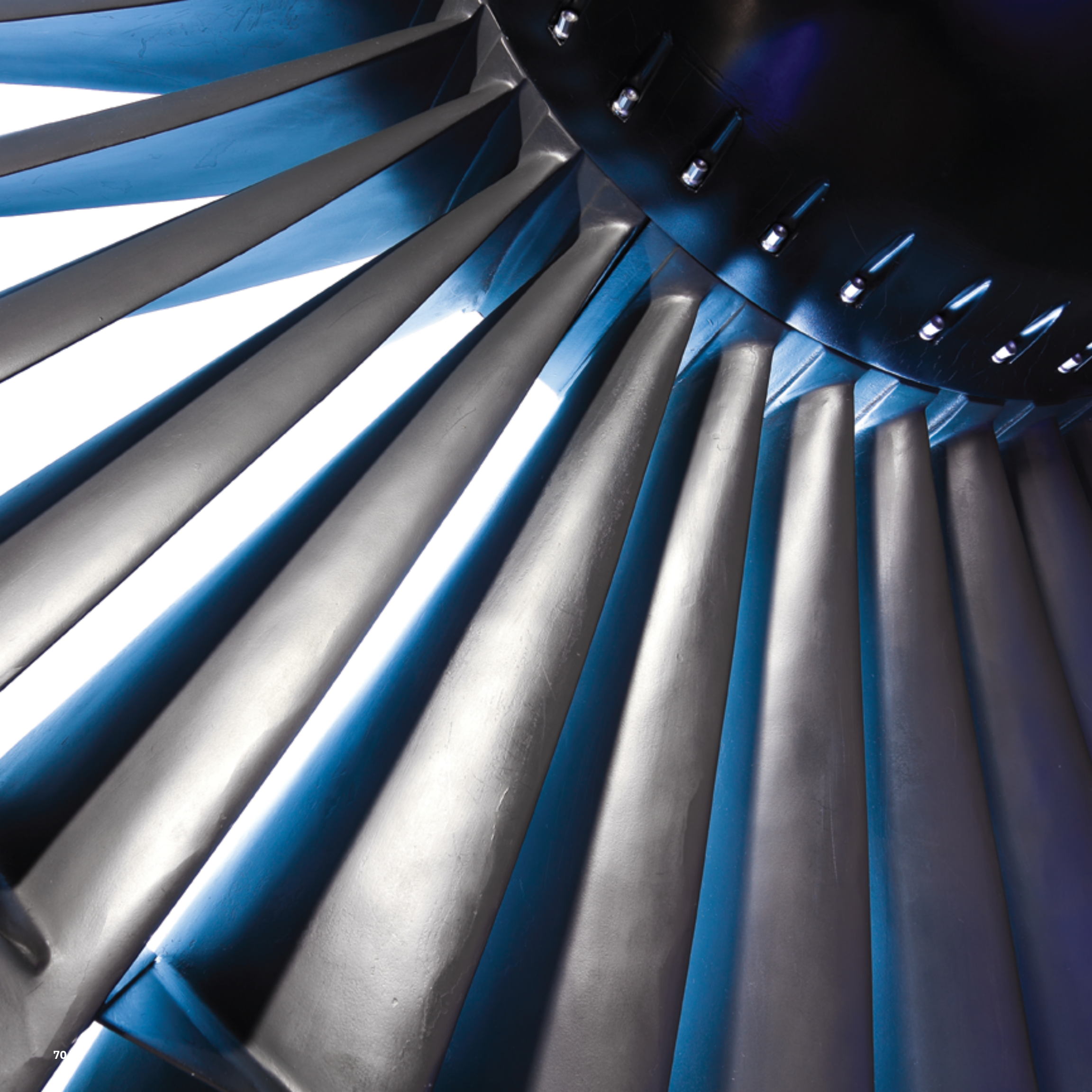
Guides sectoriels

Comme nous l'avons vu, on parle d'avantage quantique lorsqu'une tâche informatique essentielle pour la science ou l'économie peut être exécutée de manière plus efficace, plus rentable ou de meilleure qualité grâce à des ordinateurs quantiques. C'est là que les ordinateurs quantiques associés aux systèmes classiques peuvent transcender ce que les systèmes classiques peuvent faire seuls.

Au fur et à mesure que les progrès matériels, logiciels et algorithmiques de l'informatique quantique convergeront, permettant une amélioration significative des performances par rapport à l'informatique classique, de nouvelles possibilités d'avantages apparaîtront dans tous les secteurs.

Dans cette section, nous fournissons des informations sur l'adoption du quantique dans cinq secteurs spécifiques : compagnies aériennes, banques et marchés financiers, produits chimiques et pétroliers, soins de santé et sciences de la vie. Chaque section contient des observations et des cas d'utilisation spécifiques à l'industrie pour vous guider tout au long du parcours quantique.

Si l'obtention de l'avantage quantique peut prendre un certain temps, elle peut néanmoins déclencher des réalisations exponentielles en matière d'utilisation et d'apprentissage dont votre entreprise — et votre secteur d'activité — peut bénéficier dès maintenant.



Applications de l'informatique quantique

Compagnies aériennes

Les entreprises du secteur des voyages et des transports ont été les plus impactées par la pandémie COVID-19. Des pertes record sont attendues dans les secteurs des compagnies aériennes et de l'hôtellerie, le retour à la croissance n'étant pas attendu avant 2023 ou 2024.⁵⁶ La reprise des voyages dans le monde et le retour au travail exigent l'adoption de mesures financières, sanitaires et de sécurité dans un climat d'incertitude post-pandémique.

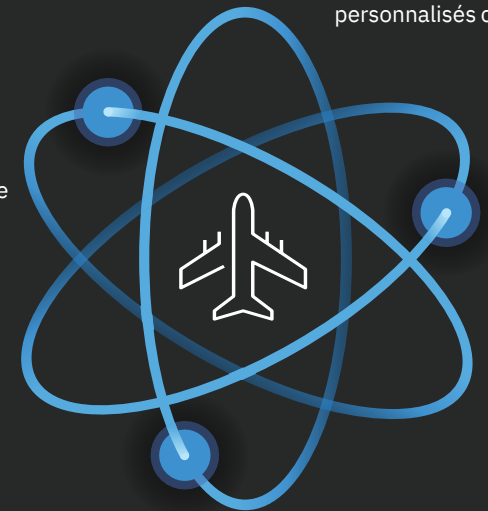
Certaines organisations considèrent la crise comme une occasion non seulement de survivre, mais aussi d'évoluer et de devenir plus fortes. Une stratégie gagnante consiste à regarder au-delà de la survie pour anticiper la demande future qui a été refoulée et préparer la croissance en explorant de nouvelles technologies et solutions et avoir une longueur d'avance. L'informatique quantique est l'une de ces technologies.

L'informatique quantique ouvre la porte à de nouvelles possibilités dans de nombreux secteurs, principalement grâce à une vitesse de calcul plus élevée, à une plus grande exactitude des actions basées sur les données et à la création de nouveaux algorithmes et systèmes capables de relever des défis que les systèmes classiques ne peuvent pas résoudre. Les capacités de l'informatique quantique pourraient jouer un rôle crucial dans la résolution des problèmes sectoriels complexes des compagnies aériennes.

Voici trois cas d'utilisation où l'avantage quantique peut transformer la façon dont les compagnies aériennes cherchent à optimiser leurs opérations et à améliorer l'expérience client.

Cas d'utilisation de l'informatique quantique pour les compagnies aériennes

Démêler
l'interruption
opérationnelle



Optimiser la
planification
réseau à l'échelle
mondiale

Cas d'utilisation

Démêler la perturbation opérationnelle pour les compagnies aériennes (IROPS)

Les pandémies, les tempêtes, les tremblements de terre, les problèmes opérationnels, les problèmes techniques et d'autres défis peuvent bouleverser les horaires des compagnies aériennes et la dotation en personnel. Se remettre de telles perturbations est l'un des problèmes les plus difficiles à gérer pour les compagnies aériennes. Les solutions actuelles sont fragmentées et principalement axées sur les informations opérationnelles, avec moins de considération accordée aux stocks, à la maximisation des profits, voire à l'impact sur le service et la satisfaction des clients.

Les compagnies aériennes composent avec ces perturbations — connues sous le nom de gestion d'opérations irrégulières (IROPS) — en utilisant des algorithmes sous-optimaux sur des ordinateurs classiques. En raison des limitations des ordinateurs actuels, chaque élément spécifique, tel que l'équipage, les créneaux horaires et le matériel, est géré de manière séquentielle et en silo. La reprise à l'échelle du système peut prendre une semaine ou plus, menaçant la satisfaction des passagers, et les effets de second ordre sur les autres vols et aéroports peuvent entraîner des coûts plus élevés pour une compagnie aérienne.

Les limites techniques des solutions IROPS actuelles sont principalement liées aux éléments suivants :

1. Manque de visibilité des données pour intégrer tous les éléments pertinents dans la résolution des perturbations.
Fragmentation du développement de solutions. Différentes parties du problème IROPS — le parc, l'équipage, les passagers, l'impact d'anticipation — sont résolues séparément avec des outils différents, ce qui conduit à des solutions sous-optimales et inefficaces.

C'est la deuxième limitation — le fractionnement du développement de solutions — où l'informatique quantique pourrait intervenir. En raison de la portée massive des IROPS et de la complexité du problème d'optimisation mathématique globale sous-jacent qui en résulte, la résolution d'une seule interruption opérationnelle sur les ordinateurs actuels pourrait prendre des années, voire des siècles. Grâce aux améliorations apportées aux algorithmes quantiques et aux meilleurs systèmes de correction d'erreurs, les compagnies aériennes pourraient :

- Améliorer l'exactitude et la vitesse des simulations de scénarios qui quantifient l'impact des solutions potentielles sur les vols et les passagers futurs — et le faire à temps pour réagir à une perturbation. Les algorithmes de l'informatique quantique se sont déjà révélés efficaces pour choisir les meilleurs scénarios dans les simulations de Monte Carlo utilisées dans le secteur bancaire et financier.⁵⁷
- Fournir un outil de simulation aux analystes des centres de contrôle des opérations afin qu'ils puissent tester de manière proactive des scénarios avant un événement majeur susceptible de perturber les opérations, comme des arrêts de travail du contrôle du trafic aérien ou des équipages ou des retards de livraison des avions. En raison de leur complexité, ces questions ne peuvent être résolues que séparément pour chaque zone fonctionnelle, ce qui contrecarre le développement de solutions intégrées.
- Livrer des outils de conseil aux agents du service à la clientèle et aux systèmes automatisés de service à la clientèle à l'aide de l'apprentissage machine quantique afin de les conseiller sur les meilleures approches à la résolution de problèmes IROPS. Par exemple, un algorithme quantique pourrait conseiller les agents sur la meilleure façon d'indemniser chaque client spécifique dont le voyage a été perturbé, en fonction de ses préférences personnelles en matière de comptant, d'hébergement, de surclassement ou d'autres commodités. Imaginez comment la satisfaction des clients pourrait s'améliorer si vous pouviez le faire aujourd'hui.

Ainsi, les capacités quantiques pourraient raccourcir considérablement le temps de résolution et réduire le coût des opérations irrégulières tout en atténuant leur impact négatif sur les passagers.

Cas d'utilisation

Améliorer les services personnalisés contextuels pour les clients des compagnies aériennes

Pour le secteur mondial du voyage, l'une des actions cruciales pour la pérennité et la reprise est de restaurer la confiance des clients en créant des services personnalisés qui mettent en évidence les mesures de santé et de sécurité. Pour les compagnies aériennes en particulier, il est essentiel de démarquer ces services, d'améliorer l'expérience client et de générer des revenus supplémentaires grâce à des offres personnalisées. Offrir une interaction et des services personnalisés nécessite quatre étapes spécifiques :

1. Collecter et extraire des données, notamment des données sur les clients et des données transactionnelles.
2. Effectuer l'ingénierie des données pour créer des fonctionnalités de données clients.
3. Former des modèles de segmentation de la clientèle basés sur les caractéristiques du contexte client et du parcours.
4. Noter et identifier les meilleures offres en fonction des contextes de voyage individuels des clients.

Les systèmes actuels d'offre personnalisée ne tiennent souvent pas leurs promesses, principalement en raison des limites de l'étape de segmentation de la clientèle. Les méthodes de segmentation en cours s'appuient souvent sur les caractéristiques de base du client, telles que les données démographiques et les données de vente, mais n'incluent pas les données contextuelles, ce qui réduit la pertinence de l'offre recommandée. Les systèmes en cours manquent également de segmentation multidimensionnelle pour saisir efficacement les différences contextuelles dans les préférences, l'intention et le comportement des voyageurs. Une des raisons de l'absence de caractéristiques contextuelles est la capacité de calcul et l'envergure pour traiter le nombre élevé d'éléments de données nécessaires à la création de modèles de segmentation complexes.

La stratégie « segment-of-one » est une stratégie de personnalisation pour laquelle l'évolutivité est probablement le plus grand défi. À mesure que la mise en marché numérique devient de plus en plus sophistiquée, les organisations sont susceptibles de voir augmenter le nombre d'utilisateurs pour lesquels elles doivent créer des expériences personnalisées. C'est une chose de personnaliser une page de renvoi pour un segment de clientèle, mais c'est un défi complètement différent lorsque vous avez des centaines de personnes, plusieurs zones géographiques, une douzaine de sites et des milliers d'endroits où la personnalisation est nécessaire. À ce stade, les stratégies d'individualisation doivent évoluer pour être réalisables.

L'informatique quantique peut résoudre ces problèmes, en améliorant le processus d'individualisation en :

- Soutenant une segmentation plus riche de la clientèle, incorporant des caractéristiques plus complexes des clients pour une segmentation multidimensionnelle des passagers, et permettant une plus grande spécificité dans le profilage contextuel pour améliorer les offres personnalisées.⁵⁸
- Améliorant l'exactitude des modèles d'apprentissage machine qui fournissent des informations et l'interprétabilité des résultats pour aider les spécialistes du marketing ou les agents du service à la clientèle à mieux comprendre les liens de causalité entre les données relatives aux clients et les passagers ravis.
- Potentiellement, optimisant le développement de l'identification d'un nombre dramatiquement plus grand de segments de clientèle finement ajustés qui est ingérable pour les ordinateurs classiques grâce à de meilleures capacités d'apprentissage machine.

Si les compagnies aériennes peuvent tirer parti de l'informatique quantique en la promesse de l'individualisation contextuelle et dynamique, cette individualisation peut alors aider à augmenter les revenus connexes, à offrir une meilleure expérience client, et à soutenir la différenciation de service.

Cas d'utilisation

Optimiser la planification réseau à l'échelle mondiale

Outre la forte baisse de la demande mondiale de voyages due à la pandémie de COVID-19, les compagnies aériennes sont également confrontées à des changements majeurs dans les préférences des clients pour de nouveaux trajets, des réservations proches du départ et des changements d'itinéraire sans frais. Pour relever ces défis, il faut des processus de planification réseau dynamiques et flexibles qui ne peuvent plus dépendre des données historiques de la demande.

L'optimisation réseau, depuis la planification des vols et la répartition des flottes jusqu'à l'ordonnancement des équipages, est au cœur des opérations des compagnies aériennes et a un impact significatif sur les coûts opérationnels. Mais, malgré les efforts considérables déployés pour rationaliser ce processus, il reste d'importantes limitations. Elles sont principalement liées à une approche progressive qui mène à une optimisation locale des sous-processus déployés avec des outils d'aide à la décision isolés. Ces outils génèrent des solutions sous-optimales, locales et non coordonnées.

Par exemple, la planification des trajets des avions n'intègre pas souvent la planification des horaires de l'équipage. De même, la planification des horaires de l'équipage n'inclut pas les temps de bloc, et la planification des temps de bloc ne consigne pas dans la planification du carburant, ce qui a souvent des conséquences néfastes. En outre, la planification réseau ne coordonne généralement pas l'optimisation de ses solutions avec la gestion des revenus (RM) et la tarification, ce qui fait que deux processus majeurs se déroulent quotidiennement avec le même objectif, à savoir l'optimisation des bénéfices, mais avec des modèles et des paramètres distincts.

Cette approche désynchronisée mène à des solutions inférieures en termes de coût total, de profit et d'adaptation au changement. Elle est également source de confusion lors des mises à jour opérationnelles clés, telles que l'introduction de nouveaux types d'avions ou l'ouverture de nouveaux trajets. Alors que la gestion des revenus ou la tarification optimise les offres en fonction de l'horaire, de la capacité et de la configuration de l'avion, la planification réseau peut modifier par inadvertance ces paramètres en fonction de l'optimisation des bénéfices. La principale raison pour laquelle les compagnies aériennes empruntent cette solution répartie est la complexité requise pour résoudre un problème d'optimisation réseau mondial en une seule étape. Il est pratiquement impossible de résoudre ce problème avec les seuls ordinateurs classiques actuels.

À l'avenir, les ordinateurs quantiques, travaillant de concert avec les ordinateurs classiques, devraient activer le réseau de compagnies aériennes pour co-optimiser la flotte, les horaires, les blocs/portes, l'équipage et le carburant, tout en coordonnant dynamiquement avec la gestion des revenus, la tarification, les cibles de coût, les ventes et la gestion des relations client (CRM). Cela s'explique par le fait que les algorithmes d'optimisation quantique peuvent chercher des solutions de manière plus vaste et plus efficace.⁵⁹ Afin de tirer le meilleur parti des futures capacités quantiques, les compagnies aériennes doivent modifier la manière dont elles gèrent leurs opérations réseau, avec des modèles d'exploitation plus centralisés et une intégration plus étroite des données. Les résultats attendus pourraient constituer un avantage concurrentiel pour les compagnies aériennes qui adoptent la technologie quantique.





Applications de l'informatique quantique

Banques et marchés financiers

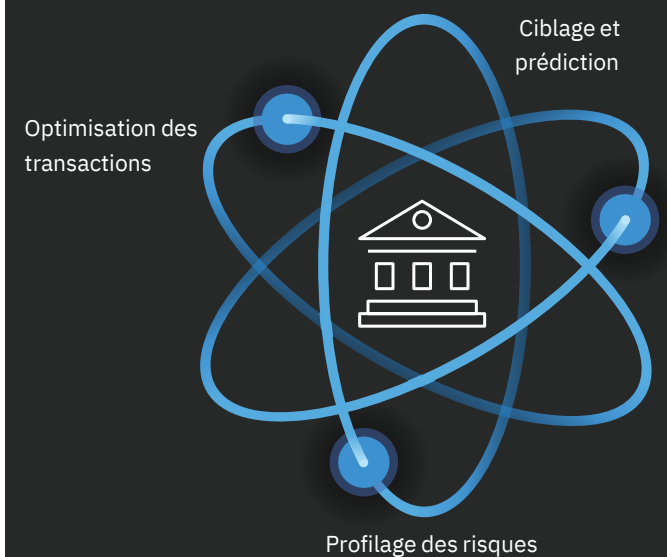
Le secteur financier a l'habitude d'appliquer avec succès la physique pour résoudre ses problèmes les plus épineux. Le modèle Black-Scholes-Merton, par exemple, utilise le concept de mouvement brownien pour fixer le prix d'outils financiers — par exemple, les options d'achat européennes — dans le temps.⁶⁰

L'application de la technologie quantique émergente aux problèmes financiers, en particulier ceux liés à l'incertitude et à l'optimisation sous contrainte, devrait également s'avérer extrêmement avantageuse pour les pionniers. Imaginez que vous puissiez effectuer des calculs qui révèlent des possibilités d'arbitrage plus rentables que vos concurrents ne peuvent pas voir. En outre, l'utilisation de données comportementales pour améliorer l'interaction client et accélérer les réactions à la volatilité du marché (par exemple, le calcul du risque intrajournalier par rapport au risque nocturne) sont quelques-uns des avantages spécifiques que nous attendons de l'informatique quantique.

Alors que les applications commerciales à grande échelle ne seront peut-être pas disponibles avant plusieurs années, l'informatique quantique devrait donner naissance à des produits et services révolutionnaires qui résoudront probablement des problèmes sectoriels très spécifiques d'ici trois à cinq ans.⁶¹ L'informatique quantique peut également permettre aux organisations de services financiers de réorganiser les processus opérationnels tels que les décisions de guichet et d'arrière-guichet concernant la gestion des clients, la gestion de la trésorerie, les transactions et la gestion des actifs, ainsi que l'optimisation des secteurs, notamment la gestion des risques et la conformité.

Les cas d'utilisation spécifiques de l'informatique quantique pour les marchés bancaires et financiers peuvent être classés en trois catégories principales : ciblage et prédiction, profilage des risques et optimisation des portefeuilles.

Cas d'utilisation de l'informatique quantique dans le secteur bancaire et celui des marchés financiers



Ciblage et prédiction

Les clients des services financiers d'aujourd'hui demandent des produits et services personnalisés qui anticipent rapidement l'évolution de leurs besoins et de leurs comportements. 25 % des établissements financiers de petite et moyenne taille perdent des clients en raison d'offres qui ne privilégient pas l'expérience client.⁶⁴ Les modèles de comportement des clients sont complexes, et les aspects manquants de ces relations peuvent empêcher les établissements financiers de fournir des recommandations de produits préemptifs avec une sélection de caractéristiques optimale. Cela peut mener à l'incapacité de saisir des opportunités pour augmenter la part de portefeuille des clients actuels ou d'atteindre les 1,7 milliard d'adultes dans le monde qui n'ont pas accès à une banque.⁶⁵

Un problème similaire existe dans la détection de fraudes. Selon certaines estimations, les institutions financières perdent jusqu'à 10 milliards de dollars de revenus par an en raison de mauvaises pratiques de gestion des données, et les pertes totales dues aux fraudes atteignaient 56 milliards de dollars en 2020.⁶⁶ Les systèmes de détection des fraudes restent très imprécis, avec des résultats avoisinant les 80 % de faux positifs, ce qui incite les établissements financiers à se montrer excessivement réticents au risque.⁶⁷ Pour garantir un bon pointage de crédits, l'intégration des clients peut prendre jusqu'à 12 semaines.⁶⁸ À l'ère du numérique, où 70 % des opérations bancaires se font par voie numérique, les consommateurs ne sont tout simplement pas prêts à attendre aussi longtemps.⁶⁹ Les établissements financiers qui sont trop lents à s'engager efficacement auprès de nouveaux clients les perdent au profit de leurs concurrents plus agiles.

Pour le ciblage des clients et la modélisation des prédictions, l'informatique quantique pourrait changer la donne. Les capacités de modélisation des données des ordinateurs quantiques devraient s'avérer supérieures pour trouver des modèles, effectuer des classifications et faire des prédictions, ce qui n'est pas possible aujourd'hui en raison des difficultés liées aux structures complexes des données.

Profilage des risques

Les établissements financiers sont soumis à une pression croissante pour équilibrer les risques, couvrir les positions de manière plus efficace et effectuer un éventail de tests plus large pour se conformer aux exigences réglementaires. La gestion des liquidités, la tarification des produits dérivés et la mesure des risques peuvent être complexes et les calculs difficiles à effectuer, ce qui rend difficile la gestion correcte des coûts du risque sur les transactions. Aujourd'hui, les simulations de Monte Carlo, la technique privilégiée pour analyser l'impact du risque et de l'incertitude dans les modèles financiers, sont limitées par la mise à l'échelle de l'erreur d'estimation. Simuler tous les risques d'un établissement financier peut être prohibitif et inclure des portefeuilles de nombreuses options, nécessitant ainsi de nombreux échantillons et des heures de travail.

Pour l'avenir, nous nous attendons à des vagues continues d'amendements aux règlements, directives et normes, tels que Bâle III et ses révisions.⁷⁰ Ils nécessiteront un éventail beaucoup plus large de scénarios de stress de gestion des risques. En conséquence, les coûts de conformité devraient plus que doubler dans les années à venir, y compris les pénalités réglementaires et les mesures correctives en cas de non conformité.⁷¹

Face à des demandes de profilage des risques plus sophistiquées et à des obstacles réglementaires croissants, la recherche et les percées dans les capacités informatiques quantiques peuvent accélérer ces très longues simulations de scénarios de risques avec une plus grande précision, tout en testant davantage de résultats.

Cas d'utilisation

Optimisation des transactions

La complexité de l'activité de négociation sur les marchés financiers monte en flèche. Par exemple, le modèle d'ajustement de la valorisation des produits dérivés, l'ajustement à valeur X (XVA) s'est complexifié, incluant désormais le crédit (CVA), le débit (DVA), le financement (FVA), le capital (KVA), et la marge (MVA).⁷²

En raison des exigences de transparence accrues imposées par les réglementations, des processus de validation plus stricts sont appliqués aux transactions, ce qui a un impact sur les calculs de gestion des risques qui doivent aligner les expositions au crédit des contreparties avec l'utilisation des limites de crédit des portefeuilles de produits dérivés.⁷³ En outre, les cadres et les véhicules d'investissement importants ont changé. Par exemple, les fonds cotés en bourse obligataires (ETF) devraient atteindre 2 milliards de dollars américains en 2024, et les investissements environnementaux, sociaux et gouvernementaux (ESG) gagnent en popularité, avec 35 000 milliards de dollars investis dans cette taxonomie d'actifs en 2019.⁷⁴

Dans ce paysage commercial compliqué, les gestionnaires d'investissement s'efforcent d'intégrer les contraintes de la vie réelle, telles que la volatilité du marché et les changements dans la vie des clients, dans l'optimisation du portefeuille. Idéalement, les gestionnaires de fonds aimeraient simuler un grand nombre de scénarios et d'options d'investissement potentiels afin de valider les sensibilités lors de l'estimation des rendements attendus. Actuellement, la recherche de la meilleure stratégie de rééquilibrage qui suit les mouvements du marché est considérablement limitée par les contraintes de calcul et les coûts de transaction.

La technologie quantique pourrait aider à simplifier la complexité des environnements commerciaux d'aujourd'hui. Les capacités d'optimisation combinatoire de l'informatique quantique peuvent permettre aux gestionnaires d'investissement d'améliorer la diversification des portefeuilles, de rééquilibrer les investissements des portefeuilles pour répondre plus précisément aux conditions du marché et aux objectifs des investisseurs, et de rationaliser de manière plus rentable les processus de règlement des transactions pour les grands portefeuilles.





Applications de l'informatique quantique

Produits chimiques et pétroliers

L'industrie chimique contribue à environ 7 % — soit 5 700 milliards de dollars — du produit intérieur mondial, ainsi qu'à quelque 120 millions d'emplois.⁷⁵ Le développement de nouveaux produits chimiques nécessite des travaux de laboratoire coûteux et longs. Aujourd'hui, les simulations classiques de la chimie peuvent aider à guider les essais en laboratoire, mais l'exactitude des calculs diminue à mesure que la complexité des interactions moléculaires augmente.

Lorsqu'on tente d'effectuer des calculs d'énergie dans un système de mécanique quantique tel que les grandes molécules, le calcul de tous les différents paramètres, y compris le mouvement des électrons, devient intraitable sur les ordinateurs conventionnels. En conséquence, la modélisation de nombreuses molécules industrielles devient de plus en plus inexacte ou simplement trop longue pour attendre une solution exacte.

La détermination de la structure électronique des molécules est impérative pour comprendre la réactivité de la molécule. À mesure que la dimension des molécules augmente au-delà de celle de l'hydrogène (H_2), les descriptions mathématiques des molécules qui rendent compte avec précision des interactions électron-électron, des effets nucléaires, etc. deviennent de plus en plus complexes. En fait, lorsqu'un calcul d'interaction de configuration complète est effectué de manière classique, les algorithmes ont une mise à l'échelle exponentielle. Cependant, en raison de la nature des algorithmes quantiques, on a prédit que les calculs de la chimie changeraient d'échelle de façon polynomiale, ce qui constitue une étape prometteuse vers la possibilité d'effectuer des calculs exacts sur des molécules qui sont actuellement hors de portée.

Par exemple, le simple hydrocarbure naphthalène ($C_{10}H_8$) pourrait être modélisé avec ~116 qubits, mais il faudrait un ordinateur classique de 10^{34} bits pour faire de même.⁷⁷ À titre d'exemple, 10^{34} bits représentent 7,1 milliards de fois le volume total des données qui devraient être stockées sous forme électronique d'ici 2025, soit 175 zettaoctets.⁷⁸

L'informatique quantique pourrait modifier la façon dont les produits chimiques sont conçus, les hydrocarbures sont raffinés et les réservoirs de pétrole sont localisés et exploités. Au cours des prochaines années, elle pourrait accélérer le cycle d'accès au marché dans le développement de nouveaux produits chimiques, affiner les stratégies d'investissement à la lumière du renforcement des réglementations environnementales et optimiser les systèmes complexes qui ont un impact direct sur les bénéfiques, tels que les processus de transport, de raffinage et d'installations chimiques.

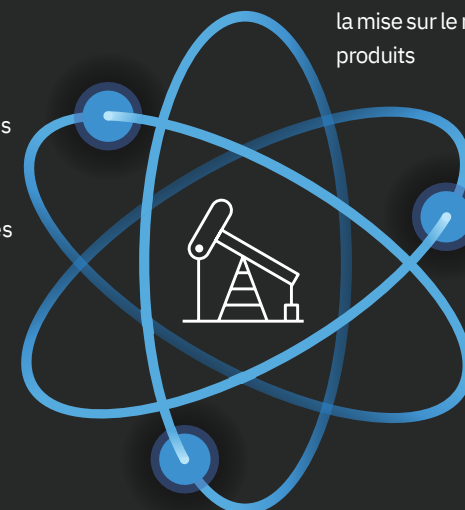
À terme, les ordinateurs quantiques pourraient être en mesure de s'attaquer à la simulation de réservoirs et au traitement d'images sismiques. Par conséquent, on s'attend à ce que l'informatique quantique perturbe fondamentalement le paysage du secteur des produits chimiques et pétroliers. Nous avons identifié trois puissants cas d'utilisation de l'informatique quantique déjà explorés par des entreprises chimiques et pétrolières :

- Développement de produits chimiques, notamment de catalyseurs et de tensioactifs.
- Optimisation de l'acheminement des matières premières, le raffinage et la mise sur le marché des produits.
- Élargissement de la production de réservoirs.

Cas d'utilisation de l'informatique quantique dans l'industrie chimique et pétrolière

Optimiser l'acheminement des aliments, le raffinage et la mise sur le marché des produits

Développer des produits chimiques, notamment des catalyseurs et des agents de surface



Accroître la production des réservoirs

Cas d'utilisation

*Développer des produits chimiques,
notamment des catalyseurs et des
agents de surface*

Dans ce scénario d'utilisation, les entreprises chimiques et pétrolières utilisent des ordinateurs quantiques pour accélérer la découverte et le développement de nouvelles méthodes et matériaux chimiques. Des prototypes d'ordinateurs quantiques, assistés par des ordinateurs classiques, effectuent déjà des simulations de chimie quantique.

En 2017, un article de couverture de *Nature* montrait des représentations des petits sels inorganiques hydrure de lithium (LiH) et hydrure de béryllium (BeH_2) modélisés sur les ordinateurs quantiques d'IBM accessibles au public.⁷⁹ Il sera bientôt possible d'appliquer ces mêmes méthodes variationnelles à des défis dans l'industrie chimique et pétrolière tels que l'application des idées à de nouveaux catalyseurs pour la réduction des émissions ou à des surfactants pour améliorer la reprise de la sous-surface. Ces possibilités, parmi d'autres, ont amené certains à considérer la chimie comme l'application phare de l'informatique quantique.⁸⁰

Cas d'utilisation

Optimiser l'acheminement des matières premières, le raffinage et la mise sur le marché des produits

Il est peut-être surprenant de constater que des approches similaires (utilisant les hamiltoniens) employées dans la modélisation moléculaire peuvent être réorientées vers un large domaine de problèmes d'optimisation, de la logistique du transport et de la chaîne d'approvisionnement à l'optimisation des portefeuilles d'investissement.⁸¹

Dans ce scénario d'utilisation, l'informatique quantique pourrait améliorer les marges bénéficiaires des entreprises chimiques et pétrolières en déterminant les combinaisons optimales d'acheminement des matières premières, de raffinage et de mise sur le marché des produits. L'impact sur une raffinerie peut être considéré comme la perte annuelle estimée du secteur due à l'abandon de l'octane. Les abandons d'octane et de pression de vapeur entraînent une perte annuelle de plus de 4,9 milliards de dollars aux États-Unis et de plus de 4,2 milliards de dollars dans l'Union européenne.⁸²

Cas d'utilisation

Accroître la production des réservoirs

En 1856, Henri Darcy, un ingénieur français qui tentait de concevoir des systèmes de filtration d'eau pour la ville de Paris, a réalisé une expérience simple en faisant couler de l'eau dans un tube rempli de sable. Ses observations ont conduit à la loi de Darcy, la base de tout le domaine de la simulation des réservoirs et de l'ingénierie de production.⁹⁰

Cependant, les développements modernes dans les réservoirs non conventionnels nanoporeux entraînent l'annulation de la loi de Darcy. L'un des résultats est que la hiérarchie mondiale du pétrole a été réorganisée, les États-Unis devenant le premier producteur mondial d'énergie. L'informatique quantique pourrait ouvrir la voie à une nouvelle génération de compréhension de la sous-surface et de simulation des réservoirs en permettant l'exploration de la physique à l'échelle moléculaire dans les réservoirs étanches.

Dans les réservoirs non conventionnels, le pétrole liquide s'écoule comme s'il avait une perméabilité élevée, semblable à celle d'un gaz, avec une production préférentielle pour les hydrocarbures à chaîne courte et en laissant les chaînes longues derrière. La physique est incompatible avec la compréhension conventionnelle de la dynamique de l'écoulement souterrain.

L'utilisation d'ordinateurs quantiques pour modéliser à l'échelle moléculaire les interactions entre les molécules de pétrole, d'eau et de gaz et la surface des roches pourrait contribuer à expliquer la physique à l'origine de la déconnexion entre l'écoulement de Darcy et l'écoulement non Darcy. Si tel était le cas, les avantages seraient considérables.

Par exemple, si le nombre de puits pouvait être réduit de seulement 10 %, la marge brute d'autofinancement des 32 premiers producteurs de pétrole non conventionnel nord-américains passerait d'une perte nette de 1 milliard de dollars (de janvier à septembre 2018) à une marge brute d'autofinancement positive de 8 milliards de dollars (sur la base d'un devis de 6 millions de dollars par puits).⁹²





Applications de l'informatique quantique

Santé

Les données relatives aux soins de santé, telles que les informations provenant des essais cliniques, des registres de maladies, des dossiers médicaux électroniques (EHR), et des dispositifs médicaux, connaissent un taux de croissance annuel composé de 36 %.⁹³ De plus en plus, ces données permettent de relever les défis associés au « quadruple objectif » des soins de santé : une meilleure santé, des coûts moindres, une meilleure expérience pour les patients et une meilleure qualité de vie pour les praticiens de la santé.⁹⁴ En même temps, les consommateurs de soins de santé prennent davantage de décisions et doivent naviguer dans un système de plus en plus complexe.

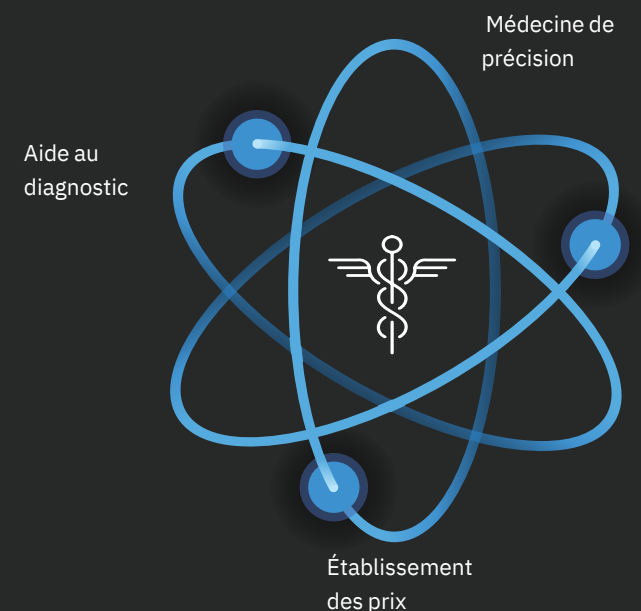
Des investissements importants sont réalisés pour fournir les bonnes données et des connaissances poussées sur le lieu de soins. Les acteurs historiques du secteur comme les nouveaux venus tentent de créer des expériences numériques qui renforcent les comportements sains et préventifs. Malgré cela, la prise en compte des possibilités exponentielles offertes par cette diversité de nouvelles données met à rude épreuve les capacités des systèmes informatiques classiques.

L'informatique quantique a le potentiel de fournir à la fois plus de puissance de calcul et de vitesse. Cependant, elle nécessite un mode de pensée différent, un ensemble de compétences nouvelles et très recherchées, des architectures informatiques distinctes et des stratégies d'entreprise inédites. Cette technologie a également des répercussions immédiates sur la sécurité.⁹⁵ La sécurité est un domaine qui revêt une importance particulière pour les soins de santé, compte tenu des responsabilités et des défis du secteur en matière de protection des données à caractère personnel.

Dans le secteur des soins de santé, comme dans d'autres secteurs, l'utilisation d'ordinateurs quantiques de concert avec des ordinateurs classiques est susceptible d'apporter des avantages substantiels que l'informatique classique seule ne peut pas offrir. En conséquence, on assiste aujourd'hui à une course aux applications quantiques.

Trois cas d'utilisation clés d'informatique quantique sont au cœur de la transformation en cours du secteur des soins de santé : l'aide au diagnostic, les primes d'assurance et la tarification, et la médecine de précision.

Cas d'utilisation de l'informatique quantique pour les soins de santé



Cas d'utilisation

Aide au diagnostic

Un diagnostic précoce, précis et efficace permet généralement d'obtenir de meilleurs résultats et de réduire les coûts de traitement. Par exemple, le taux de survie est multiplié par 9 et les coûts de traitement sont divisés par 4 lorsque le cancer du côlon est diagnostiqué à un stade précoce.⁹⁶ En même temps, pour un large éventail de pathologies, les programmes de diagnostic actuels sont complexes et coûteux.⁹⁷ Même une fois qu'un diagnostic est posé, les estimations suggèrent qu'il est erroné dans 5 à 20 % des cas.⁹⁸

Les techniques d'imagerie médicale, telles que la tomographie par ordinateur, l'IRM et les rayons X, sont devenues au cours du siècle dernier un outil de diagnostic crucial pour les praticiens. Les méthodes de détection et de diagnostic assistées par ordinateur pour les images médicales se sont rapidement développées. Dans le même temps, nombre de ces images sont affectées par le bruit, une mauvaise définition et une faible reproductibilité.

L'une des raisons de ces défis est la nécessité d'adhérer à des protocoles de sécurité stricts. L'informatique quantique a le potentiel d'améliorer l'analyse des images médicales, y compris les étapes de traitement telles que la détection des contours et la concordance des images. Ces améliorations permettraient de renforcer considérablement le programme de diagnostic assisté par image.

En outre, les procédures de diagnostic modernes peuvent inclure des méthodes unicellulaires.⁹⁹ En particulier, les données de cytométrie en flux et de séquençage de cellules uniques nécessitent généralement des méthodes d'analyse avancées, notamment lorsqu'on envisage de combiner des ensembles de données provenant de différentes techniques.¹⁰⁰

L'un des défis est la classification d'information des cellules sur la base de leurs nombreuses caractéristiques physiques et biochimiques. Elles font en sorte que l'espace caractéristique, c'est-à-dire l'espace abstrait dans lequel vivent les variables prédictives, est grand (haute dimension). Cette

classification est importante, par exemple, pour distinguer les cellules cancéreuses des cellules normales. Les approches d'apprentissage machine améliorées par le quantique, telles que les machines à vecteurs de soutien quantique, peuvent améliorer la classification et pourraient stimuler les méthodes de diagnostic unicellulaires.

De plus, la découverte et la caractérisation de biomarqueurs peuvent nécessiter l'analyse d'ensembles de données se terminant par « -omique », telles que la génomique, la transcriptomique, la protéomique et la métabolomique.¹⁰¹ Celles-ci peuvent impliquer un vaste espace de caractéristiques, ainsi que de nombreuses caractéristiques en interaction, ce qui entraîne des interdépendances, des corrélations et des modèles difficiles à trouver avec les méthodes de calcul traditionnelles.¹⁰² L'addition de recherches de biomarqueurs au niveau de l'individu nécessite une modélisation encore plus poussée. Ces caractéristiques suggèrent que l'informatique quantique pourrait aider à découvrir des biomarqueurs, peut-être même pour des individus.

Grâce à l'informatique quantique, les prestataires de soins pourraient améliorer les diagnostics tout en éliminant le besoin de tests de diagnostic invasifs répétitifs. Ils pourront surveiller et analyser en permanence la santé des gens. En plus d'aider les patients, ces améliorations pourraient également profiter aux plans de santé et aux fournisseurs en réduisant les coûts de traitement grâce à des diagnostics plus précoces. Il pourrait même devenir possible de réaliser des méta-analyses pour des procédures de diagnostic plus élaborées afin de déterminer quelle procédure doit être réalisée et à quel moment. Cela pourrait contribuer à réduire davantage les coûts et permettre aux régimes de santé et aux gouvernements de prendre des décisions plus axées sur les données pour les prestataires et les particuliers.

Cas d'utilisation

Primes d'assurance et tarification

La détermination des primes d'assurance maladie est un processus complexe. Un certain nombre de facteurs doit être pris en compte par un plan de santé dans le développement d'une stratégie générale de tarification (sachant que la réglementation de certains pays, comme les États-Unis, peut limiter le nombre de facteurs utilisés pour calculer les primes).¹⁰³ Il s'agit notamment d'interdépendances complexes, telles que le niveau de santé et de risques de maladie, l'adéquation et le coût des traitements, ainsi que l'exposition au risque qu'un régime de santé est prêt à accepter en fonction de la stratégie globale et des réglementations. Alors que les plans de santé ont déjà fait des progrès considérables dans ce domaine en appliquant les méthodes classiques des sciences des données, il reste difficile de réaliser des modèles plus granulaires avec des incertitudes plus faibles.

Une zone clé dans laquelle l'informatique quantique peut aider à optimiser la tarification est l'analyse des risques. En exploitant les connaissances sur les risques de maladie dans la population et en les combinant avec des modèles de risque quantique capables de calculer le risque financier de manière plus efficace, les plans de santé pourraient obtenir des modèles de risque et de tarification améliorés.¹⁰⁴

L'amélioration de la détection des fraudes est un autre levier important par lequel l'informatique quantique peut permettre de prendre des décisions en matière de tarification. Actuellement, les fraudes dans le domaine des soins de santé coûtent des centaines de milliards de dollars seulement aux États-Unis.¹⁰⁵ Les techniques classiques d'exploration de données permettent déjà de détecter et de réduire les fraudes dans le domaine des soins de santé; néanmoins, des méthodes plus efficaces sur le plan informatique sont nécessaires.¹⁰⁶ Les algorithmes quantiques pourraient permettre une classification et une détection des modèles supérieures et ainsi aider à découvrir les comportements anormaux et à éliminer les demandes médicales frauduleuses.¹⁰⁷ On s'attend à ce que les régimes de santé optimisent davantage les stratégies de tarification et proposent des primes réduites en raison de la réduction des coûts associés aux pertes dues aux fraudes et aux programmes de prévention.

L'amélioration des calculs de tarification permettrait de réduire les primes moyennes et d'offrir des options supérieures plus adaptées. La complexité des soins de santé se reflète dans les défis associés à la compréhension des stratégies de tarification. Les nouvelles réglementations qui exigent une transparence et baissent les coûts moyens des soins de santé rendent encore plus importante l'optimisation des modèles de tarification.¹⁰⁸

Cas d'utilisation

Médecine de précision

La médecine de précision vise à adapter les approches de prévention et de traitement à l'individu.¹⁰⁹ En raison de la complexité de la biologie humaine, la médecine personnalisée nécessite de prendre en compte des aspects qui vont bien au-delà des soins médicaux standard. En fait, les soins médicaux n'ont qu'une influence relative de 10 à 20 % sur les résultats; les comportements liés à la santé, les facteurs socio-économiques et les aspects environnementaux comptent pour les 80 à 90 % restants.¹¹⁰ Sur le plan computationnel, les interdépendances et les corrélations entre ces divers contributeurs créent de formidables défis en ce qui concerne l'optimisation de l'efficacité du traitement.

Par conséquent, de nombreuses thérapies existantes n'atteignent pas les effets escomptés en raison de la variabilité individuelle. Par exemple, seul un tiers des patients répond aux thérapies médicamenteuses contre le cancer. Dans certains cas, les conséquences des traitements médicamenteux peuvent être désastreuses; seulement en Europe, jusqu'à 200 000 personnes perdent la vue chaque année en raison d'effets indésirables des médicaments.¹¹¹

Un aspect clé de la personnalisation des approches médicales est la proactivité. Comme nous l'avons mentionné, les traitements précoces et les interventions préventives ont tendance à améliorer considérablement les résultats et à optimiser les coûts. L'apprentissage machine classique s'est déjà montré prometteur pour prédire le risque de maladies futures pour des groupes de patients sur la base des DSE.¹¹² Néanmoins, des défis subsistent en raison des caractéristiques des DSE et d'autres données relatives à la santé, notamment le niveau de bruit, la dimension de l'espace caractéristique pertinent et la complexité des interactions entre les caractéristiques. Cela suggère que les techniques d'apprentissage machine supervisées et non supervisées basées sur le quantique pourraient permettre des prédictions de risques plus précoces, plus précises et plus granulaires.¹¹³ À terme, les médecins pourraient même disposer des outils nécessaires pour comprendre comment le risque d'une personne pour une maladie donnée évolue dans le temps, grâce à un programme de diagnostic virtuel continu basé sur des flux de données permanents provenant des individus.

Toutefois, il ne suffit pas de connaître le risque de maladie d'une personne. Il est tout aussi important de savoir comment intervenir efficacement sur le plan médical pour une personne concernée. L'étude de la sensibilité des médicaments au niveau cellulaire est l'une des voies à suivre dans ce domaine. Par exemple, en tenant compte des caractéristiques génomiques des cellules cancéreuses et des propriétés chimiques des médicaments, des modèles capables de prédire l'efficacité des médicaments anticancéreux à un niveau granulaire sont déjà à l'étude.¹¹⁴ L'apprentissage machine quantique pourrait permettre de nouvelles avancées dans ce domaine et, à terme, activer des modèles d'inférence causale pour les médicaments.

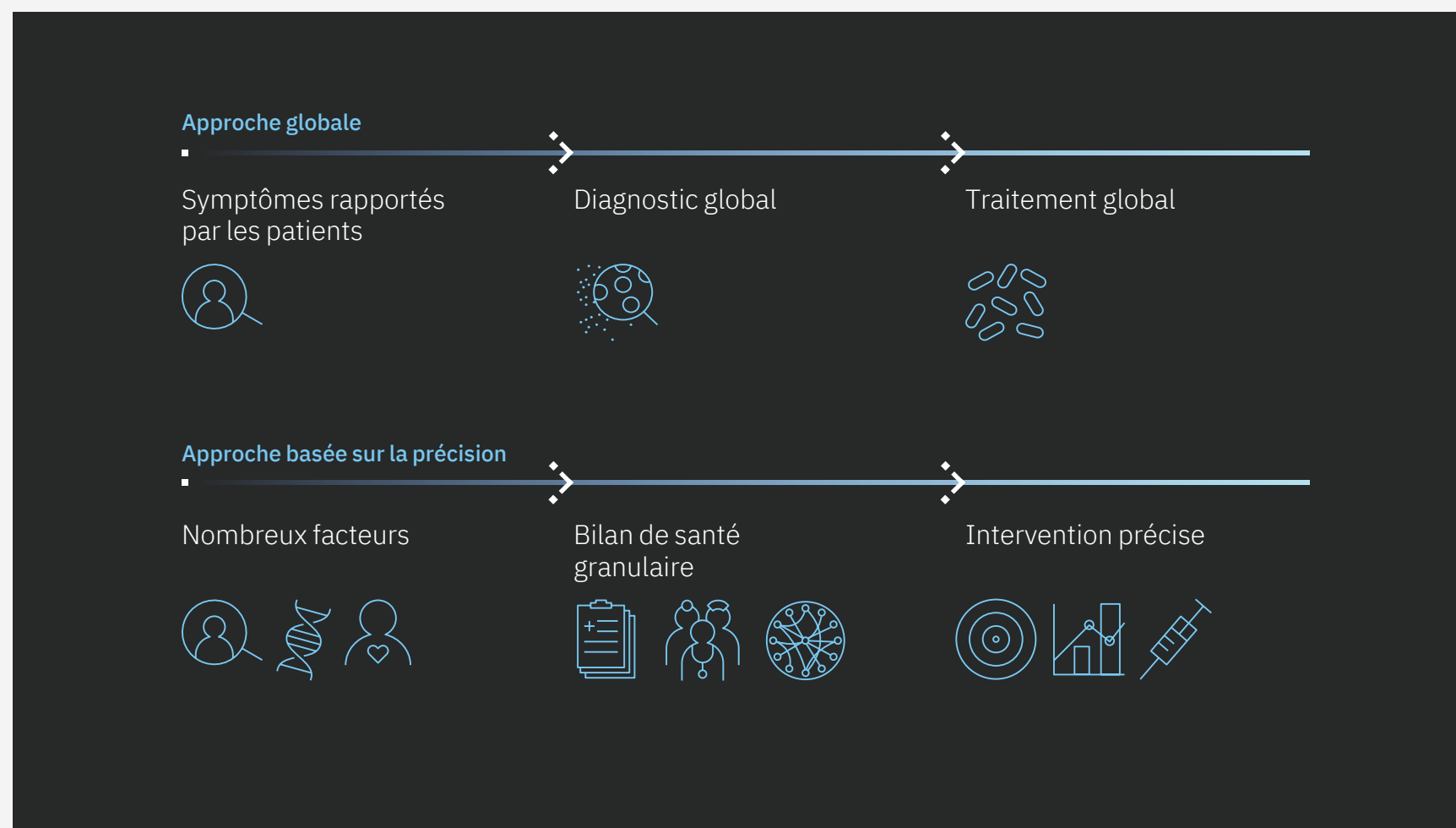
L'objectif de la médecine de précision est ambitieux : identifier et expliquer les relations entre les interventions et les traitements d'une part, et les résultats d'autre part, afin de fournir la meilleure intervention médicale suivante au niveau individuel. Traditionnellement, le diagnostic de l'état d'un patient reposait en grande partie sur les symptômes rapportés par le patient, ce qui est coûteux en temps et aboutit à un diagnostic général et à un traitement associé qui échouent

fréquemment. Nous nous dirigeons maintenant vers un cadre où il est possible d'obtenir des informations à partir de données supplémentaires relatives à la santé pour aboutir efficacement à un bilan de santé continu et précis, ainsi qu'à des interventions personnalisées (voir figure 18). Bien que nous soyons encore loin d'y parvenir, l'informatique quantique pourrait accélérer notre progression vers ce nouveau cadre.

Ce cadre permettrait aux organismes de santé d'optimiser et de personnaliser leurs services à travers tout le continuum de soins. De plus, l'adhésion et l'interaction avec les patients sont également des éléments clés dans les décisions concernant la meilleure intervention médicale suivante pour un patient concerné. La modélisation computationnelle avancée peut également faire partie de ce cadre.¹¹⁵ Par exemple, l'analyse des données sur l'adhésion permet de synchroniser les interventions afin de les optimiser pour les gens.¹¹⁶ À terme, la gestion de la santé de la population à ce niveau de granularité pourrait devenir possible.¹¹⁷

Figure 18

L'informatique quantique a le potentiel d'accélérer la transition du diagnostic et du traitement global à l'intervention de précision sur le bilan de santé.





Applications de l'informatique quantique

Sciences de la vie

Dans les sciences de la vie, les défis majeurs incluent la compréhension des relations entre l'ordre, la structure et la fonction et la manière dont les biopolymères interagissent entre eux, ainsi qu'avec les petites molécules organiques qui sont natives du corps ou conçues comme des médicaments. Ces problèmes sont complexes sur le plan informatique et sont au cœur de l'analyse génomique, de la conception des médicaments et des prédictions de repliement des protéines.

En conséquence, on assiste aujourd'hui à une course interdisciplinaire vers les applications quantiques. D'ici cinq ans, il est possible que l'informatique quantique soit largement utilisée par de nouvelles catégories de professionnels et de développeurs pour résoudre des problèmes autrefois considérés comme insolubles.¹¹⁸

Des tendances telles que la propagation du séquençage efficace à faible coût et l'avènement de l'ère « -omique » amènent les entreprises de sciences de la vie à explorer des moyens de tirer parti de la diversité des nouvelles sources de données. De plus, le secteur des sciences de la vie fait partie de ceux où les gens pourraient le plus directement expérimenter les avantages futurs de l'informatique quantique.

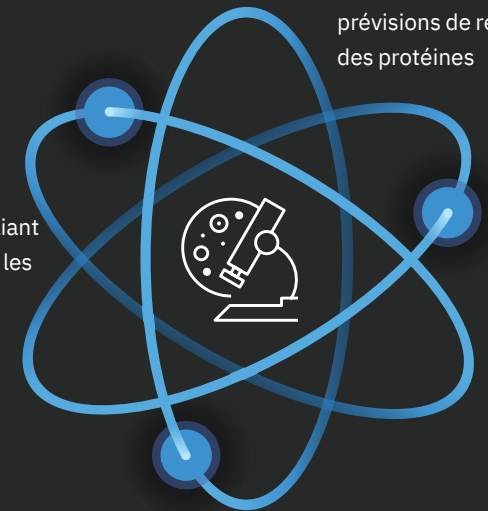
L'exploration et la mise en œuvre de cas d'utilisation de la quantique informatique, associées à de nouveaux progrès scientifiques en matière de matériel quantique informatique et d'algorithmes, devraient favoriser le passage du potentiel à la réalité au cours des prochaines années. L'informatique quantique a le potentiel d'optimiser un ensemble de cas d'utilisation perturbateurs dans les sciences de la vie. Ces cas comprennent :

- La création de thérapies de médecine de précision en reliant les génomes et les résultats.
- L'amélioration des résultats pour les patients en renforçant l'efficacité de la découverte de médicaments à petites molécules.
- Le développement de nouveaux produits biologiques basés sur les prévisions de repliement des protéines.

Cas d'utilisation de l'informatique quantique pour les sciences de la vie

Développement de nouveaux produits biologiques basés sur les prévisions de repliement des protéines

Création de thérapies de médecine de précision en reliant les génomes et les résultats



Amélioration des résultats pour les patients en renforçant l'efficacité de la découverte de médicaments à petites molécules

Cas d'utilisation

Création d'une médecine de précision en reliant les génomes et les résultats

L'investissement de 2,7 milliards de dollars sur 15 ans pour effectuer le séquençage du génome humain et les réductions ultérieures des coûts de séquençage ont contribué à lancer l'ère « -omique ». ¹¹⁹ En conséquence, la compréhension des séquences primaires n'est plus une limite majeure pour les scientifiques. Au lieu de cela, la recherche a consisté à tirer parti des nouveaux outils informatiques pour approfondir notre compréhension sur la manière dont les séquences génomiques se traduisent pour fonctionner. Cependant, ce travail est extrêmement difficile avec les méthodes traditionnelles en raison de la dimension du génome humain (environ 3 milliards de paires de base ADN), de la variation qui existe entre les populations, et du vaste domaine des résultats de santé. ¹²⁰

Les opportunités potentielles à l'intersection de l'informatique génomique et quantique comprennent : ¹²¹

- Découverte et prédiction de motifs : ¹²² ADN, ARN et séquences d'acides aminés ont tous été façonnés par les pressions de l'évolution. L'un des défis bioinformatiques consiste à identifier les motifs dans ces séquences, tels que les motifs qui activent ou inhibent l'expression des gènes et, par conséquent, nous aident à mieux comprendre les mécanismes de régulation des gènes. Les algorithmes classiques d'identification des motifs sont coûteux en termes de calcul car ils nécessitent une recherche exhaustive de tous les arrangements possibles pour une longueur donnée. L'application d'algorithmes d'optimisation

quantique pourrait nous permettre de mieux comprendre la liaison des facteurs de transcription et l'assemblage de novo des génomes.

- Études de type GWAS : ¹²³ le but des GWAS est d'effectuer une recherche d'associations entre un trait ou une maladie sélectionnés et des mutations uniques dans l'ADN. Les méthodes actuelles sont par nature très dimensionnelles et difficiles à calculer. Cela met en évidence le potentiel de l'informatique quantique pour réduire considérablement les listes de gènes candidats qui doivent être validés expérimentalement. L'informatique quantique peut également activer les progrès des modèles de réseaux et de graphes génétiques.
- Prédiction de structure de novo : ¹²⁴ avec la croissance explosive des informations et des technologies de séquençage, il est de plus en plus difficile de comprendre comment les séquences se traduisent en structures et comment elles fonctionnent (voir figure 19). Malgré des méthodes sophistiquées, telles que les modèles d'homologie, les approches classiques visant à prédire la structure de novo ne changent pas d'échelle facilement. ¹²⁵ Par exemple, l'espace de recherche des configurations potentielles de protéines augmente de manière exponentielle avec la taille d'une protéine, rendant les approches par force brute infaisables. L'informatique quantique a le potentiel d'améliorer radicalement les prévisions de structure des molécules d'ARN, des protéines, des complexes ADN-protéines et d'autres constructions.

De telles avancées pourraient éventuellement aider à réaliser la vision de puissants modèles jumeaux numériques. ¹²⁶ Les jumeaux numériques organiques pourraient être utilisés dans les tests pharmacogénomiques pour prédire la réponse d'un individu à des médicaments spécifiques au fil du temps, ce qui permettrait de développer des thérapies de médecine de précision. Des jumeaux numériques externes supplémentaires pourraient être créés afin d'optimiser les installations de recherche ou de soins en mettant à l'épreuve de manière comparative des aspects tels que les procédures, la dotation en personnel, les plans d'installation ou le matériel. Le jour où une équipe médicale pourra dire à un patient : « sur la base de votre génome, nous sommes confiants que ceci sera le résultat spécifique de votre traitement », ne semblera peut-être plus être une utopie.

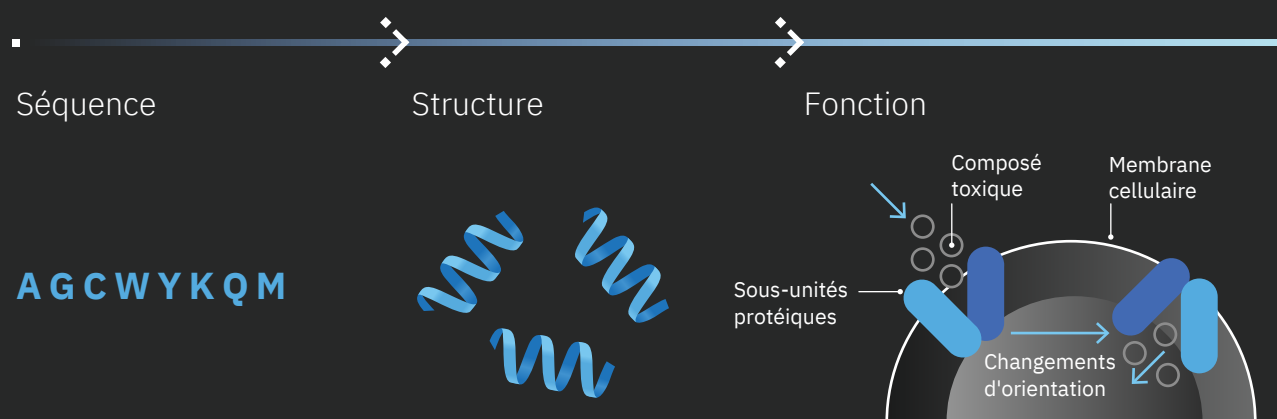


Figure 19

Le dogme séquence-structure-fonction

au cœur de la recherche en biologie

Cas d'utilisation

Amélioration des résultats pour les patients en renforçant l'efficacité de la découverte de médicaments à petites molécules

La conception et la découverte de médicaments à petites molécules a toujours été un processus d'optimisation complexe. Son but : améliorer les résultats des patients en concevant une nouvelle molécule active contre la cible liée à la maladie tout en réduisant simultanément l'activité contre les milliers d'autres cibles du corps afin d'éviter les effets secondaires et les toxicités dangereuses. Pour y parvenir, il faut généralement passer en revue 200 000 à $>10^6$ composés dans des flux de travaux expérimentaux et informatiques, puis en produire quelques milliers et les tester dans la batterie d'essais nécessaire.¹²⁷ Dans ce domaine, l'informatique joue depuis longtemps un rôle, en grande partie grâce aux approches de similitude et de classification pour soutenir le criblage et la structure tridimensionnelle détaillée, ainsi qu'aux calculs énergétiques pour soutenir une conception plus précise basée sur les objectifs.

L'informatique quantique a une diversité d'applications potentielles dans la découverte de médicaments.¹²⁸ La technologie pourrait aider à évaluer un plus grand nombre de molécules candidates et à les évaluer plus précisément en utilisant, par exemple, des méthodes de classification telles que celles employées dans la recherche de pistes et le criblage hors cible. Et cela peut avoir un impact sur la classification associée à la recherche de pistes et à la modélisation hors-cibles dans l'optimisation de pistes ainsi qu'à la modélisation basée sur la physique effectuée dans l'optimisation de pistes lorsqu'une structure protéique tridimensionnelle ou un bon modèle est disponible.

Il est important de pouvoir étudier davantage de molécules potentiellement actives sur le plan pharmacologique, au-delà des quelque 10^7 substances organiques et externes qui ont été rapportées dans la documentation scientifique à ce jour. En fait, le nombre total de composés carbonés possibles dont les masses moléculaires sont similaires à celles des systèmes vivants est d'environ 10^{60} .¹²⁹ Il y a donc plusieurs ordres de grandeur d'espace chimique à explorer, un domaine à fort potentiel. Cela ouvre la voie, par exemple, à une meilleure évaluation des bibliothèques ultra-larges de petites molécules organiques désormais disponibles pour achat avec synthèse « à la demande ».¹³⁰

Un pointage particulièrement précis est possible grâce à des simulations de dynamique moléculaire de complexes protéine-ligand. Ici, l'informatique quantique pourrait offrir des avantages significatifs pour réaliser des approches hybrides de mécanique quantique/moléculaire, ainsi que pour développer les paramètres sous-jacents du champ de force classique. Ces avancées s'appliqueraient à la fois à l'optimisation des pistes et au domaine en pleine expansion de la chimie computationnelle des processus, comme la modélisation de la réactivité enzymatique et de la stéréosélectivité pour soutenir la biocatalyse dans la fabrication de médicaments.¹³¹

Cas d'utilisation

Développement de nouveaux produits biologiques basés sur les prévisions de repliement des protéines

Contrairement aux médicaments à petites molécules, dans le cas des produits biologiques, le médicament est une protéine ou une autre macromolécule. Les médicaments biologiques tels que les anticorps, l'insuline et de nombreux vaccins, sont utilisés depuis des décennies.¹³⁴ Ces dernières années, les sociétés pharmaceutiques ciblent de plus en plus les produits biologiques pour traiter un certain nombre de maladies. La conception de la structure tridimensionnelle des produits biologiques est importante pour la fonction, la spécificité et la stabilité.¹³⁶

Les cas de modélisation de protéines dans le monde réel impliquent l'exploration du nombre énorme de modèles de pliage possibles, comme l'illustre le paradoxe de Levinthal (voir figure 20).¹³⁹ La croissance exponentielle des conformations potentielles avec longueur de chaîne rend le problème difficile pour les ordinateurs classiques. Par exemple, dans un modèle, une chaîne de traitement de 20 acides aminés a 109 conformations potentielles, et les chaînes de 60 et 100 acides aminés ont respectivement 10^{28} et 10^{47} conformations.¹⁴¹ De plus, selon la définition de produit biologique de la Food and Drug Administration américaine, une protéine doit comprendre plus de 40 acides aminés.¹⁴⁴

Alors que de nombreuses protéines peuvent être modélisées de manière adéquate par analogie avec des structures connues, une cible de conception importante et difficile est la boucle hypervariable H3 dans la région déterminant la complémentarité des anticorps. Cette boucle contient typiquement 3-20 résidus mais est parfois beaucoup plus longue, et sa représentation précise a fait l'objet de nombreuses études.¹⁴⁷

L'informatique quantique a le potentiel de surmonter nombre de ces difficultés de calcul, par exemple, en évaluant le grand nombre de structures possibles et en identifiant la plus probable. Une publication récente a démontré que l'informatique quantique pouvait évaluer un peptide dans deux conformations courantes représentées sur un réseau — hélice alpha et feuille bêta — et a mis à profit un algorithme quantique pour la recherche.¹⁵⁰ Il a également été démontré que l'informatique quantique pouvait améliorer considérablement le calcul des champs de force des protéines.¹⁵³ À mesure que le volume quantique augmente, la capacité de l'informatique quantique à évaluer des conformations supplémentaires augmentera en conséquence.¹⁵⁶ Les récents progrès réalisés dans la prédiction de la structure des protéines avec des réseaux classiques d'apprentissage profond suggèrent que les algorithmes quantiques peuvent être particulièrement précieux lors de l'étude de polypeptides comportant des acides aminés non naturels, où les données d'entraînement d'apprentissage machine appropriées sont assez limitées.¹⁵⁹

Enfin, comme pour toutes les applications quantiques potentielles évoquées précédemment, l'informatique quantique pourrait permettre d'autres cas d'utilisation dans des domaines tangentiels. Par exemple, les produits biologiques ont tendance à être beaucoup moins stables que les médicaments à petites molécules. L'optimisation de la chaîne d'approvisionnement des produits biologiques à proprement parler — de la formulation à l'expédition et, finalement, au transport vers les pharmacies, les hôpitaux et même les domiciles — est un processus compliqué qui peut également être amélioré par l'informatique quantique.¹⁶²

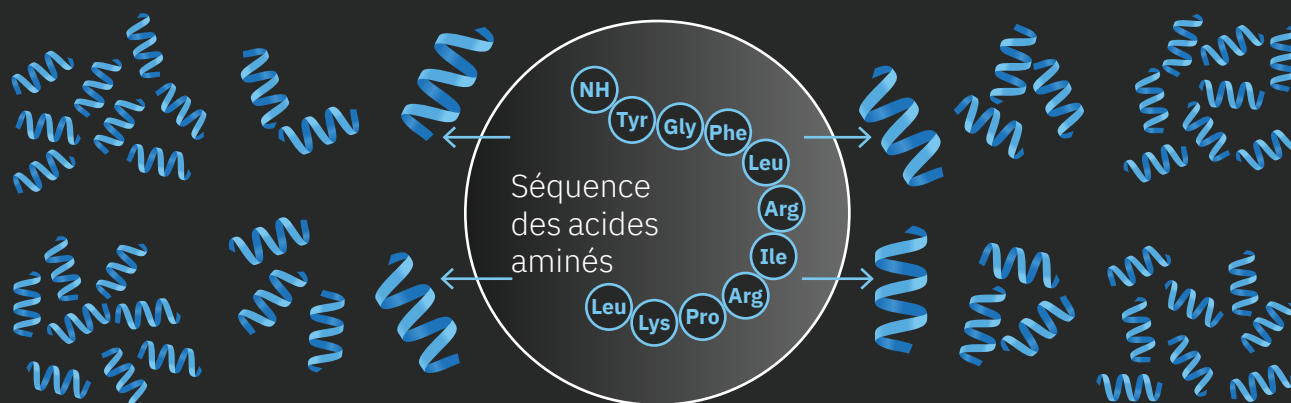
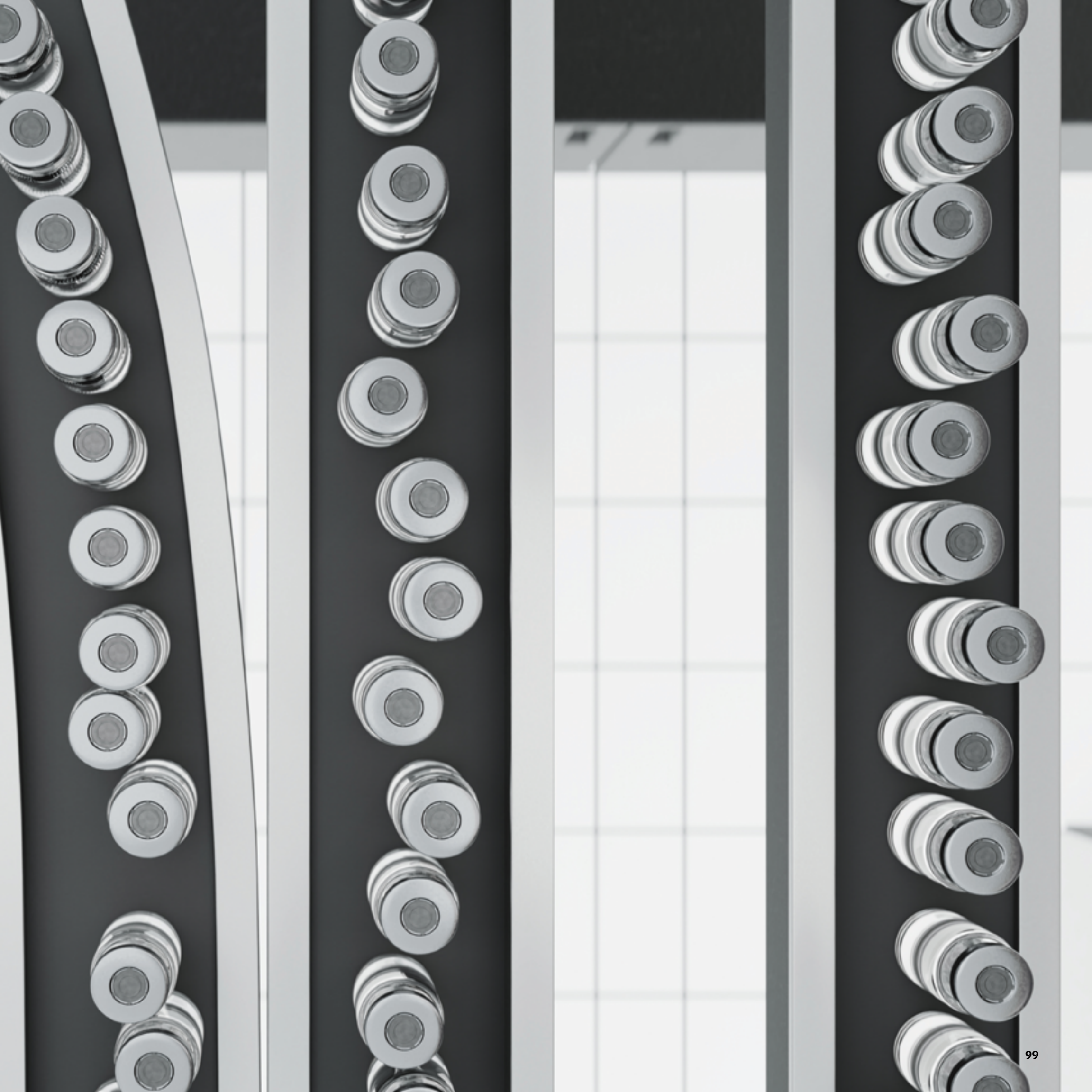


Figure 20

Paradoxe de Levinthal

Même une protéine ne comportant que 100 acides aminés possède environ 10^{47} conformations potentielles. En réalité, cependant, de nombreuses protéines se replient sur leur structure native en quelques secondes.



Notes and Sources

Introduction

Quantum Decade

- 1 “Moore’s Law.” Computer History Museum. Accessed March 19, 2021. <https://www.computerhistory.org/revolution/digital-logic/12/267>
- 2 “Quantum computing.” IBM Institute for Business Value. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/technology/quantum-computing>
- 3 “2021 CEO study: Find your essential.” IBM Institute for Business Value. February 2021. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/c-suite-study/ceo>
- 4 Based on internal IBM information.
- 5 Payraudeau, Jean-Stéphane, Anthony Marshall, and Jacob Dencik, Ph.D. “Digital acceleration: Top technologies driving growth in a time of crisis.” IBM Institute for Business Value. November 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/digital-acceleration>

Chapitre 1

Sensibilisation au quantique et l'ère de la découverte

- 6 “Science and Technology Outlook 2021.” IBM Research. January 2021. https://www.research.ibm.com/downloads/ces_2021/IBMResearch_STO_2021_Whitepaper.pdf
- 7 Benioff, Paul. “The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines.” *Journal of Statistical Physics*. May 1980. https://www.researchgate.net/publication/226754042_The_computer_as_a_physical_system_A_microscopic_quantum_mechanical_Hamiltonian_model_of_computers_as_represented_by_Turing_machines; Chow, Jerry and Jay Gambetta. “The Quantum Experience: Feynman’s vision comes into focus.” ITPortal. May 9, 2016. <https://www.itportal.com/2016/05/09/the-quantum-experience-feynmans-vision-comes-into-focus/>.
- 8 Gambetta, Jay. “IBM’s Roadmap For Scaling Quantum Technology.” IBM Research Blog. September 15, 2020. <https://www.ibm.com/blogs/research/2020/09/ibm-quantum-roadmap/>
- 9 Bernhardt, Chris. *Quantum Computing for Everyone*. The MIT Press. 2019.

- 10 Based on internal IBM information.
- 11 Bell, Lee. “What is Moore's Law? WIRED explains the theory that defined the tech industry.” *WIRED*. August 28, 2016. <https://www.wired.co.uk/article/wired-explains-moores-law>; “Moore’s Law.” Britannica.com. Accessed March 29, 2021. <https://www.britannica.com/technology/Moores-law>
- 12 Rotman, David. “We’re not prepared for the end of Moore’s Law.” *MIT Technology Review*. February 24, 2020. <https://www.technologyreview.com/2020/02/24/905789/were-not-prepared-for-the-end-of-moores-law/>
- 13 Based on internal IBM information.
- 14 “What’s next: The future of quantum computing.” IBM Research video. May 8, 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=zOGNoD07mcU>
- 15 Based on internal IBM information.
- 16 “Cleveland Clinic and IBM Unveil Landmark 10-Year Partnership to Accelerate Discovery in Healthcare and Life Sciences.” IBM News Room. March 30, 2021. <https://newsroom.ibm.com/2021-03-30-Cleveland-Clinic-and-IBM-Unveil-Landmark-10-Year-Partnership-to-Accelerate-Discovery-in-Healthcare-and-Life-Sciences>
- 17 “Messenger RNA (mRNA).” National Human Genome Research Institute. Accessed March 19, 2021. <https://www.genome.gov/genetics-glossary/messenger-rna>
- 18 Wright, Lawrence. “The Plague Year.” *The New Yorker*. December 28, 2020. <https://www.newyorker.com/magazine/2021/01/04/the-plague-year>
- 19 “Science and Technology Outlook 2021.” IBM Research. January 2021. https://www.research.ibm.com/downloads/ces_2021/IBMResearch_STO_2021_Whitepaper.pdf
- 20 Payraudeau, Jean-Stéphane, Anthony Marshall, and Jacob Dencik, Ph.D. “Digital acceleration: Top technologies driving growth in a time of crisis.” IBM Institute for Business Value. November 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/digital-acceleration>

Chapitre 2

La préparation quantique et la puissance de l'expérimentation

- 21 “What problems could quantum computers solve?” Video. IBM Digital Nordic. February 20, 2020. <https://www.ibm.com/blogs/nordic-msp/problems-quantum-computers-solve/>
- 22 Based on internal IBM information.
- 23 Foster, Mark. “Building the Cognitive Enterprise: Nine Action Areas—Deep Dive.” IBM Institute for Business Value. September 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/build-cognitive-enterprise>
- 24 Gao, Qi, Gavin O. Jones, Mario Motta, Michihiko Sugawara, Hiroshi C. Watanabe, Takao Kobayashi, Eriko Watanabe, Yu-ya Ohnishi, Hajime Nakamura, and Naoki Yamamoto. “Applications of Quantum Computing for Investigations of Electronic Transitions in Phenylsulfonyl-carbazole TADF Emitters.” arXiv.org. July 31, 2020. <https://arxiv.org/abs/2007.15795>
- 25 Hong, Gloria, Xuemin Gan, Céline Leonhardt, Zhen Zhang, Jasmin Seibert, Jasmin M. Busch, and Stefan Bräse. “A Brief History of OLEDs—Emitter Development and Industry Milestones.” *Advanced Materials*. March 4, 2021. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.202005630>

- 26 Divyanshi, Tewari. “Organic LED Market.” Allied Market Research. April 2020. <https://www.alliedmarketresearch.com/organic-oled-market>
- 27 Foster, Mark. “Building the Cognitive Enterprise: Nine Action Areas—Core Concepts.” IBM Institute for Business Value. May 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/build-cognitive-enterprise>
- 28 Ibid.
- 29 Ibid.
- 30 “Post-Quantum Cryptography: Post-Quantum Cryptography Standardization.” National Institute of Standards and Technology. April 06, 2021. <https://csrc.nist.gov/Projects/post-quantum-cryptography/post-quantum-cryptography-standardization>
- 31 Foster, Mark. “Building the Cognitive Enterprise: Nine Action Areas—Deep Dive.” IBM Institute for Business Value. September 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/build-cognitive-enterprise>
- 32 Joshi, Shai, Varun Bijlani, Sreejit Roy, and Sunanda Saxena. “Reimagining service delivery: Emerging stronger with the new Dynamic Delivery model.” IBM Institute for Business Value. August 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/service-delivery>; Comfort, Jim, Blaine Dolph, Steve Robinson, Lynn Kesterson-Townes, and Anthony Marshall. “The hybrid cloud platform advantage: A guiding star to enterprise transformation.” IBM Institute for Business Value. June 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/hybrid-cloud-platform>
- 33 Sutor, Robert, Scott Crowder, and Frederik Flöther. “Building your quantum capability: The case for joining an 'ecosystem.'” IBM Institute for Business Value. January 2019. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumeco>
- 34 Shein, Esther. “A more quantum-literate workforce is needed.” TechRepublic. November 18, 2020. <https://www.techrepublic.com/article/a-more-quantum-literate-workforce-is-needed/>
- 35 Internal IBM interview.
- 36 Shein, Esther. “A more quantum-literate workforce is needed.” TechRepublic. November 18, 2020. <https://www.techrepublic.com/article/a-more-quantum-literate-workforce-is-needed/>
- 37 Internal IBM interview.
- 38 Metz, Cade. “The Next Tech Talent Shortage: Quantum Computing Researchers.” *The New York Times*. October 21, 2018. <https://www.nytimes.com/2018/10/21/technology/quantum-computing-jobs-immigration-visas.html>
- 41 Based on internal IBM information.
- 42 Marr, Bernard. “How Quantum Computers Will Revolutionize Artificial Intelligence, Machine Learning and Big Data.” *Forbes*. September 5, 2017. <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/09/05/how-quantum-computers-will-revolutionize-artificial-intelligence-machine-learning-and-big-data/?sh=72ab8ea05609>; Biamonte, Jacob, Peter Wittek, Nicola Pancotti, Patrick Rebentrost, Nathan Wiebe, and Seth Lloyd. “Quantum machine learning.” *Nature*. September 13, 2017. <https://www.nature.com/articles/nature23474>
- 43 Torlai, Giacomo, Guglielmo Mazzola, Juan Carrasquilla, Matthias Troyer, Roger Melko, and Giuseppe Carleo. “Neural-network quantum state tomography.” *Nature*. February 26, 2018. <https://www.nature.com/articles/s41567-018-0048-5>
- 44 Leprince-Ringuet, Daphne. “IBM and ExxonMobil are building quantum algorithms to solve this giant computing problem.” ZDNet. February 11, 2021. <https://www.zdnet.com/article/ibm-and-exxonmobil-are-building-quantum-algorithms-to-solve-this-giant-optimization-problem/>
- 45 Liu, Yunchao, Srinivasan Arunachalam, and Kristan Temme. “A rigorous and robust quantum speed-up in supervised machine learning.” arXiv. org. December 1, 2020. <https://arxiv.org/pdf/2010.02174.pdf>
- 46 Based on internal IBM interviews.
- 47 Yndurain, Dr. Elena and Lynn Kesterson-Townes. “Prioritizing quantum computing applications for business advantage: Charting a path to quantum readiness.” IBM Institute for Business Value. June 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/prioritizing-quantum-apps>. Nomenclature and some details have evolved since publication.
- 48 Ibid.
- 49 Sutor, Bob. “Scientists Prove a Quantum Computing Advantage over Classical.” IBM Research Blog. October 18, 2018. <https://www.ibm.com/blogs/research/2018/10/quantum-advantage-2/>; Sutor, Robert S. *Dancing with Qubits*. Packt Publishing. 2019. <https://www.packtpub.com/data/dancing-with-qubits>
- 50 Moll, Nikolaj, Panagiotis Barkoutsos, Lev S. Bishop, Jerry M. Chow, Andrew Cross, Daniel J. Egger, Stefan Filipp, Andreas Fuhrer, Jay M. Gambetta, Marc Ganzhorn, Abhinav Kandala, Antonio Mezzacapo, Peter Müller, Walter Riess, Gian Salis, John Smolin, Ivano Tavernelli, and Kristan Temme. “Quantum optimization using variational algorithms on near-term quantum devices.” *Quantum and Science Technology*. June 2018. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/aab822>; Havlicek, Vojtech, Antonio D. Córcoles, Kristan Temme, Aram W. Harrow, Jerry M. Chow, and Jay M. Gambetta. “Supervised learning with quantum-enhanced feature spaces.” *Nature*. 2019. <https://arxiv.org/pdf/1804.11326.pdf>
- 51 Yndurain, Dr. Elena and Lynn Kesterson-Townes. “Prioritizing quantum computing applications for business advantage: Charting a path to quantum readiness.” IBM Institute for Business Value. June 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/prioritizing-quantum-apps>. Nomenclature and some details have evolved since publication.
- 52 Ibid.
- 53 “Exploring quantum computing use cases for financial services.” IBM Institute for Business Value. September 2019. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/exploring-quantum-financial>
- 54 Yndurain, Dr. Elena and Lynn Kesterson-Townes. “Prioritizing quantum computing applications for business advantage: Charting a path to quantum readiness.” IBM Institute for Business Value. June 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/prioritizing-quantum-apps>. Nomenclature and some details have evolved since publication.

Chapitre 3

L'avantage quantique et la quête de valeur commerciale

- 39 Gil, Dr. Darío, Jesus Mantas, Dr. Robert Sutor, Lynn Kesterson-Townes, Dr. Frederik Flöther, and Chris Schnabel. “Coming soon to your business—Quantum computing: Five strategies to prepare for the paradigm-shifting technology.” IBM Institute for Business Value. November 2018. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumstrategy#>. Nomenclature and some details have evolved since publication.
- 40 Eddins, Andrew, Mario Motta, Tanvi P. Gujarati, Sergey Bravyi, Antonio Mezzacapo, Charles Hadfield, and Sarah Sheldon. “Doubling the size of quantum simulators by entanglement forging.” arXiv. org. April 22, 2021. <https://arxiv.org/pdf/2104.10220.pdf>

Guide sectoriel

Compagnies aériennes

- 55 Kwok, Linchi. "Will the Hospitality and Travel Industry Recover in 2021?" Hospitality Net. February 18, 2021. <https://www.hospitalitynet.org/opinion/4103064.html>; "Deep Losses Continue Into 2021." International Air Transport Association. IATA press release. November 24, 2020. <https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2020-11-24-01/>
- 56 Woerner, Stefan and Daniel J. Egger. "Quantum risk analysis." *Nature*. February 8, 2019. <https://www.nature.com/articles/s41534-019-0130-6>
- 57 Havlíček, Vojtěch, Antonio D. Córcoles, Kristan Temme, Aram W. Harrow, Abhinav Kandala, Jerry M. Chow, and Jay M. Gambetta. "Supervised learning with quantum-enhanced feature spaces." *Nature*. March 13, 2019. <https://www.nature.com/articles/s41586-019-0980-2>
- 58 Moll, Nikolaj, Panagiotis Barkoutsos, Lev S. Bishop, Jerry M. Chow, Andrew Cross, Daniel J. Egger, Stefan Filipp, Andreas Fuhrer, Jay M. Gambetta, Marc Ganzhorn, Abhinav Kandala, Antonio Mezzacapo, Peter Müller, Walter Riess, Gian Salis, John Smolin, Ivano Tavernelli, and Kristan Temme. "Quantum optimization using variational algorithms on near-term quantum devices." *Quantum Science and Technology*. June 19, 2018. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/aab822>

Guide sectoriel

Banques et marchés financiers

- 59 Rutkowski, Marek. "The Black-Scholes Model." University of Sydney. 2016. http://www.maths.usyd.edu.au/u/UG/SM/MATH3075/r/Slides_8_Black_Scholes_Model.pdf
- 60 Flother, Frederik, Darío Gil, Lynn Kesterson-Townes, Jesus Mantas, Chris Schnabel, and Bob Sutor. "Coming soon to your business—Quantum Computing." IBM Institute for Business Value. November 2018. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumstrategy>; Lacan, Francis, Stefan Woerner, and Elena Yndurain. "Getting your financial institution ready for the quantum computing revolution." IBM Institute for Business Value. April 2019. <https://www.ibm.com/downloads/cas/MBZYGRKY>
- 61 Kaemingk, Diana. "Reducing customer churn for banks and financial institutions." Qualtrics. August 29, 2018. <https://www.qualtrics.com/blog/customer-churn-banking/>
- 62 "Global Findex Database 2017 report. Chapter 2: The Unbanked." The World Bank. 2017. https://globalfindex.worldbank.org/sites/globalfindex/files/chapters/2017%20Findex%20full%20report_chapter2.pdf
- 63 Watson, Greg. "The Future of Client Onboarding for Financial Institutions." CLM Industry Trends Report Series. February 2019. <https://www.fenergo.com/blog/the-future-of-client-onboarding-for-financial-institutions/>; Help Net Security. March 24, 2021. <https://www.helpnetsecurity.com/2021/03/24/total-combined-fraud-losses/>
- 64 Culp, Steve. "Banks Need New Approaches In Complying With Financial Crimes Regulations." *Forbes*. March 5, 2018. <https://www.forbes.com/sites/steveculp/2018/03/05/banks-need-new-approaches-in-complying-with-financial-crimes-regulations/?sh=7e5f18aa4147>
- 65 Agrawal, Amit. "The future of client onboarding." FinTech Futures. September 24, 2018. <https://www.fintechfutures.com/2018/09/the-future-of-client-onboarding/>

- 66 Havlíček, Vojtěch, Antonio D. Córcoles, Kristan Temme, Aram W. Harrow, Abhinav Kandala, Jerry M. Chow, and Jay M. Gambetta. "Supervised learning with quantum enhanced feature spaces." *Nature*, volume 567. March 13, 2019. <https://www.nature.com/articles/s41586-019-0980-2>
- 67 "Basel III: international regulatory framework for banks." Bank for International Settlements. <https://www.bis.org/bcbs/basel3.htm>
- 68 "Regulatory costs expected to more than double for financial services firms, according to survey from Duff & Phelps." *Global Banking & Finance Review*. April 28, 2017. <https://www.globalbankingandfinance.com/regulatory-costs-expected-to-more-than-double-for-financial-services-firms-according-to-survey-from-duff-phelps/>; "The outlook for financial services regulation." *KPMG Horizons*. January 2019. <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/xx/pdf/2019/01/horizons-magazine.pdf>
- 69 Chirikhin, Andrey. "Overview of Credit Valuation Adjustments." June 29, 2017. <https://www.linkedin.com/pulse/overview-credit-valuation-adjustments-buy-side-andrey-chirikhin/>
- 70 "The Evolution of XVA Desk Management. Key findings from practitioners at 37 global financial institutions." Making the Most of XVA Practitioner Perspectives Report. Fintegral and IACEMP. May 2018. <http://iacpm.org/wp-content/uploads/2018/06/IACPM-Fintegral-Making-the-Most-of-XVA-2018-White-Paper.pdf>; Stafford, Philip. "What is Mifid II and how will it affect EU's financial industry?" *Financial Times*. September 15, 2017. <https://www.ft.com/content/ae935520-96ff-11e7-b83c-9588e51488a0>
- 71 Geddes, George. "Bond ETF assets to hit \$2trn by 2024, predicts BlackRock." ETF Stream. June 26, 2019. <https://www.etfstream.com/news/bond-etf-assets-to-hit-2trn-by-2024-predicts-blackrock/>; White, Amanda. "Investors buoyed by ESG frameworks." top1000funds. June 25, 2019. <https://www.top1000funds.com/2019/06/investors-buoyed-by-esg-frameworks/>

Guide sectoriel

Produits chimiques et pétroliers

- 72 "Chemical Industry Contributes \$5.7 Trillion To Global GDP And Supports 120 Million Jobs, New Report Shows." The European Chemical Industry Council. March 11, 2019. <https://cefic.org/media-corner/newsroom/chemical-industry-contributes-5-7-trillion-to-global-gdp-and-supports-120-million-jobs-new-report-shows/>
- 73 Based on IBM calculations.
- 74 Coughlin, Tom. "175 Zettabytes By 2025." *Forbes*. November 27, 2018. <https://www.forbes.com/sites/tomcoughlin/2018/11/27/175-zettabytes-by-2025/?sh=7483bab9b6d8>
- 75 Kandala, Abhinav, Antonio Mezzacapo, Kristan Temme, Maika Takita, Markus Brink, Jerry M. Chow, and Jay M. Gambetta. "Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets." *Nature*. September 13, 2017. <https://www.nature.com/articles/nature23879>
- 76 Bourzac, Katherine. "Chemistry is quantum computing's killer app." *Chemical & Engineering News*. October 30, 2017. <https://cen.acs.org/articles/95/i43/Chemistry-quantum-computings-killer-app.html>
- 77 Stamatopoulos, Nikitas, Daniel J. Egger, Yue Sun, Christa Zoufal, Raban Iten, Ning Shen, and Stefan Woerner. "Option Pricing using Quantum Computers." *ArXiv*. July 5, 2019. <https://arxiv.org/pdf/1905.02666.pdf>
- 78 Cahill, Jay. "Minimizing Valuable Octane Giveaway." Emerson. 2016. <https://www.emersonautomationexperts.com/2016/industry/refining/minimizing-valuable-octane-giveaway/>; "Oil Refineries Market Report 2018-2028." MarketWatch. August 23, 2018.

- 79 “Darcy’s law.” Encyclopaedia Britannica. May 28, 2009. <https://www.britannica.com/science/Darcys-Law>
- 80 Mikulka, Justin. “Fracking in 2018: Another Year of Pretending to Make Money.” Resilience. January 17, 2019. <https://www.resilience.org/stories/2019-01-17/fracking-in-2018-another-year-of-pretending-to-make-money/>; Merva, John. “Oil Economics - How Much Does An Oil And Gas Well Cost?” Seeking Alpha. January 3, 2017. <https://seekingalpha.com/article/4034075-oil-economics-how-much-oil-and-gas-well-cost>
-
- Guide sectoriel**
Santé
- 81 Kent, Jessica. “Big Data to See Explosive Growth, Challenging Healthcare Organizations.” *Health IT Analytics*. December 3, 2018. <https://healthitanalytics.com/news/big-data-to-see-explosive-growth-challenging-healthcare-organizations>
- 82 Bodenheimer, MD, Thomas, and Christine Sinsky, MD. “From Triple to Quadruple Aim: Care of the Patient Requires Care of the Provider.” *Annals of Family Medicine*. November/December 2014. <http://www.annfam.org/content/12/6/573.full.pdf>
- 83 Rjaibi, Walid, Sridhar Muppidi, and Mary O’Brien. “Wielding a double-edged sword: Preparing cybersecurity now for a quantum world.” IBM Institute for Business Value. July 2018. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumsecurity>
- 84 Birtwistle, Mike. “Saving lives and averting costs? The case for earlier diagnosis just got stronger.” *Cancer Research UK*. September 22, 2014. <https://scienceblog.cancerresearchuk.org/2014/09/22/saving-lives-and-averting-costs-the-case-for-earlier-diagnosis-just-got-stronger/>
- 85 Jack, Andrew. “Affordable diagnostics is the missing link in medicine.” *Financial Times*. December 15, 2015. <https://www.ft.com/content/46c4e51a-9451-11e5-bd82-c1fb87bef7af>
- 86 Singh, Hardeep, Ashley N. D. Meyer, and Eric J. Thomas. “The frequency of diagnostic errors in outpatient care: estimations from three large observational studies involving US adult populations.” *BMJ Quality and Safety*. April 17, 2014. <https://qualitysafety.bmj.com/content/qhc/23/9/727.full.pdf>; Graber, Mark L. “The incidence of diagnostic error in medicine.” *BMJ Quality and Safety*. June 15, 2013. https://qualitysafety.bmj.com/content/qhc/22/Suppl_2/ii21.full.pdf
- 87 Wang, Daojing and Steven Bodovitz. “Single cell analysis: the new frontier in ‘Omics.’” US Department of Energy Office of Scientific and Technical Information. January 14, 2010. <https://www.osti.gov/servlets/purl/983315>
- 88 Andreyev, Dmitry S. and Boris L. Zybilov. “Integration of Flow Cytometry and Single Cell Sequencing.” *Trends in Biotechnology*. February 1, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.09.002>
- 89 McDermott, Jason E, Jing Wang, Hugh Mitchell, Bobbie-Jo Webb-Robertson, Ryan Hafen, John Ramey, and Karin D Rodland. “Challenges in biomarker discovery: combining expert insights with statistical analysis of complex omics data.” *Expert Opinion on Medical Diagnostics*. August 27, 2012. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1517/17530059.2012.718329>
- 90 Shahrjooihaghighi, Aliasghar, Hichem Frigui, Xiang Zhang, Xiaoli Wei, Biyun Shi, and Ameni Trabelsi. “An Ensemble Feature Selection Method for Biomarker Discovery.” *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*. 2017. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6420823/pdf/nihms-1016736.pdf>
- 91 “How insurance companies set health premiums.” *HealthCare.gov*. Accessed May 8, 2020. <https://www.healthcare.gov/how-plans-set-your-premiums/>
- 92 Woerner, Stefan and Daniel J. Egger. “Quantum risk analysis.” *npj Quantum Information*. February 8, 2019. <https://www.nature.com/articles/s41534-019-0130-6.pdf>
- 93 “The Challenge of Health Care Fraud.” National Health Care Anti-Fraud Association. Accessed May 8, 2020. <https://www.nhcaa.org/tools-insights/about-health-care-fraud/the-challenge-of-health-care-fraud/>
- 94 Obodoekwe, Nnaemeka and Dustin Terence van der Haar. “A Critical Analysis of the Application of Data Mining Methods to Detect Healthcare Claim Fraud in the Medical Billing Process.” *Ubiquitous Networking*. November 3, 2018. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-02849-7_3
- 95 Yndurain, Elena, Stefan Woerner, and Daniel J. Egger. “Exploring quantum computing use cases for financial services.” *IBM Institute for Business Value*. September 2019. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/exploring-quantum-financial>
- 96 “Trump Administration Announces Historic Price Transparency Requirements to Increase Competition and Lower Healthcare Costs for All Americans.” US Department of Health and Human Services. November 15, 2019. <https://www.hhs.gov/about/news/2019/11/15/trump-administration-announces-historic-price-transparency-and-lower-healthcare-costs-for-all-americans.html>
- 97 Nilesh, Jain. “How precision medicine will change the future of healthcare.” *World Economic Forum*. January 1, 2019. <https://www.weforum.org/agenda/2019/01/why-precision-medicine-is-the-future-of-healthcare/>
- 98 Hood, Carly M., Keith P. Gennuso, Geoffrey R. Swain, and Bridget B. Catlin. “County Health Rankings: Relationships Between Determinant Factors and Health Outcomes.” *American Journal of Preventive Medicine*. February 1, 2016. [https://www.ajpmonline.org/article/S0749-3797\(15\)00514-0/abstract](https://www.ajpmonline.org/article/S0749-3797(15)00514-0/abstract)
- 99 Spilker, Isabell. “A crash test dummy for medicine.” *Best Practice*. March 2018. <https://www.t-systems.com/de/en/newsroom/best-practice/03-2018-digital-twin/digital-twin-and-healthcare-a-crash-test-dummy-for-medicine>
- 100 Ravizza, Stefan, Tony Huschto, Anja Adamov, Lars Böhm, Alexander Büsler, Frederik F. Flöther, Rolf Hinzmann, Helena König, Scott M. McAhren, Daniel H. Robertson, Titus Schleyer, Bernd Schneidinger, and Wolfgang Petrich. “Predicting the early risk of chronic kidney disease in patients with diabetes using real-world data.” *Nature Medicine*. January 7, 2019. <https://rdcu.be/bfKPU>
- 101 Biamonte, Jacob, Peter Wittek, Nicola Pancotti, Patrick Rebentrost, Nathan Wiebe, and Seth Lloyd. “Quantum Machine Learning.” May 14, 2018. <https://arxiv.org/pdf/1611.09347.pdf>
- 102 Menden, Michael P., Francesco Iorio, Mathew Garnett, Ultan McDermott, Cyril H. Benes, Pedro J. Ballester, and Julio Saez-Rodriguez. “Machine Learning Prediction of Cancer Cell Sensitivity to Drugs Based on Genomic and Chemical Properties.” *PLOS One*. April 2013. <https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0061318&type=printable>
- 103 Fogel, Alexander L. and Joseph C. Kvedar. “Artificial intelligence powers digital medicine.” *npj Digital Medicine*. March 14, 2018. <https://www.nature.com/articles/s41746-017-0012-2.pdf>
- 104 Killian, Jackson A., Bryan Wilder, Amit Sharma, Daksha Shah, Vinod Choudhary, Bistra Dilkina, and Milind Tambe. “Learning to Prescribe Interventions for Tuberculosis Patients Using Digital Adherence Data.” *Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. June 24, 2019. <https://arxiv.org/pdf/1902.01506.pdf>
- 105 Coleman, Jr, Charles A., Angus McCann, and Heather Fraser. “Precision health and wellness: The next step for population health management.” *IBM Institute for Business Value*. December 2016. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/phm>

Guide sectoriel

Sciences de la vie

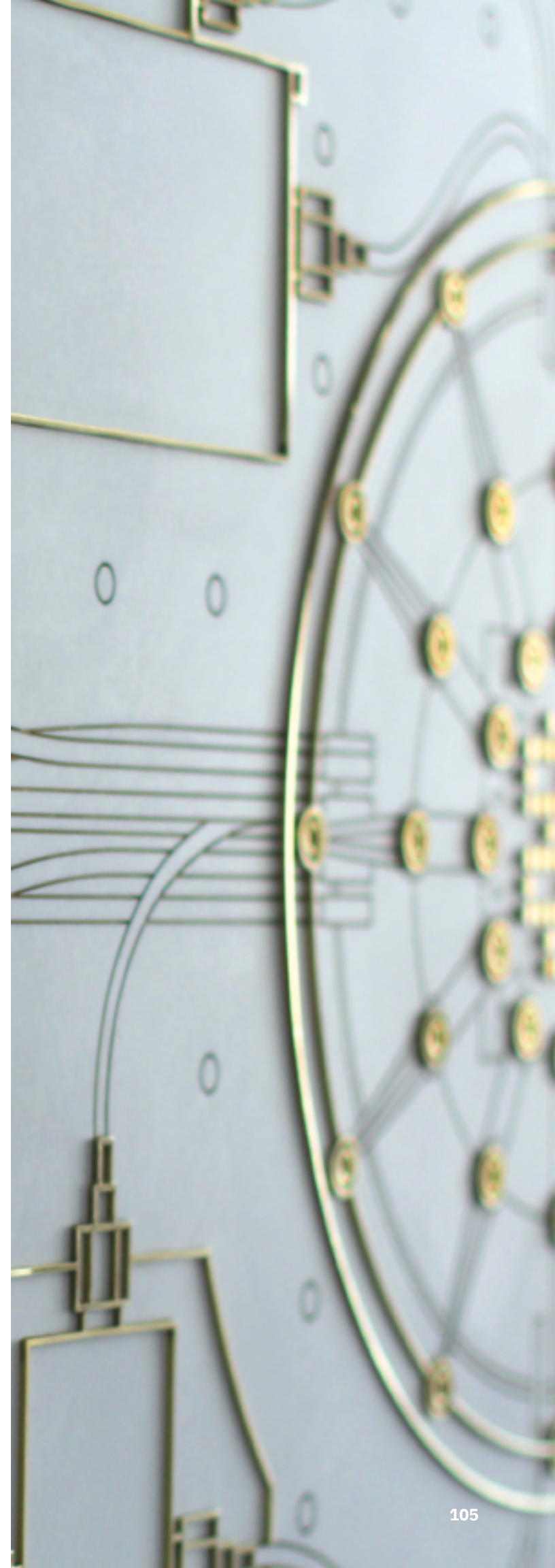
- 106 “5in5: Five innovations that will change our lives within five years.” IBM. 2019. <https://www.research.ibm.com/5-in-5/quantum-computing>
- 107 Tirrell, Meg. “Unlocking my genome: Was it worth it?” CNBC. December 14, 2015. <https://www.cnn.com/2015/12/10/unlocking-my-genome-was-it-worth-it.html>; Kandpal, Raj P., Beatrice Saviola, and Jeffrey Felton. “The era of ‘omics unlimited.” *Future Science*. April 25, 2018. <https://www.future-science.com/doi/full/10.2144/000113137>
- 108 Copeland, Libby. “You Can Learn a Lot About Yourself From a DNA Test. Here’s What Your Genes Cannot Tell You.” *Time*. March 2, 2020. <https://time.com/5783784/dna-testing-genetics>
- 109 Emani, Prashant S., Jonathan Warrell, Alan Anticevic, Stefan Bekiranov, Michael Gandal, Michael J. McConnell, Guillermo Sapiro, Alán Aspuru-Guzik, Justin Baker, Matteo Bastiani, Patrick McClure, John Murray, Stamatios N. Sotiropoulos, Jacob Taylor, Geetha Senthil, Thomas Lehner, Mark B. Gerstein, and Aram W. Harrow. “Quantum Computing at the Frontiers of Biological Sciences.” 2019. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1911/1911.07127.pdf>
- 110 Zambelli, Federico, Graziano Pesole, and Giulio Pavesi. “Motif discovery and transcription factor binding sites before and after the next-generation sequencing era.” *Briefings in Bioinformatics*. April 19, 2012. <https://academic.oup.com/bib/article/14/2/225/208333>
- 111 “Genome-Wide Association Studies Fact Sheet.” National Human Genome Research Institute. August 27, 2015. <https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/Genome-Wide-Association-Studies-Fact-Sheet>
- 112 Das, Rhiju and David Baker. “Automated de novo prediction of native-like RNA tertiary structures.” *PNAS*. September 11, 2007. <https://www.pnas.org/content/pnas/104/37/14664.full.pdf>
- 113 Muhammed, Muhammed Tilahun and Esin Aki-Yalcin. “Homology modeling in drug discovery: Overview, current applications, and future perspectives.” *Chemical Biology & Drug Design*. September 6, 2018. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/cbdd.13388>
- 114 Fuller, Aidan, Zhong Fan, Charles Day, and Chris Barlow. “Digital Twin: Enabling Technology, Challenges and Open Research.” *Deep AI*. October 29, 2019. <https://arxiv.org/pdf/1911.01276.pdf>
- 115 Hughes, JP, S Rees, SB Kalindjian, and KL Philpott. “Principles of early drug discovery.” *British Journal of Pharmacology*. November 22, 2010. <https://bpspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1476-5381.2010.01127.x>
- 116 Cao, Yudong, Jhonathan Romero, and Alán Aspuru-Guzik. “Potential of quantum computing for drug discovery.” *IBM Journal of Research and Development*. November–December 1, 2018. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8585034>
- 117 Dobson, Christopher M., “Chemical space and biology.” *Nature*. December 15, 2004. <https://www.nature.com/articles/nature03192>
- 118 Lyu, Jiankun, Sheng Wang, Trent E. Balius, Isha Singh, Anat Levit, Yurii S. Moroz, Matthew J. O’Meara, Tao Che, Enkhjargal Alгаа, Kateryna Tolmacheva, Andrey A. Tolmachev, Brian K. Shoichet, Bryan L. Roth, and John J. Irwin. “Ultra-large library docking for discovering new chemotypes.” *Nature*. February 6, 2019. <https://www.nature.com/articles/s41586-019-0917-9>
- 119 Cao, Yudong, Jonathan Romero, Jonathan P. Olson, Matthias Degroote, Peter D. Johnson, Maria Kieferova, Ian D. Kivlichan, Tim Menke, Borja Peropadre, Nicolas P. D. Sawaya, Sukin Sim, Libor Veis, and Alan Aspuru-Guzik. “Quantum Chemistry in the Age of Quantum Computing.” *Chemical Reviews*. August 30, 2019. <https://arxiv.org/pdf/1812.09976.pdf>
- 120 Middaugh, C.R. and R. Pearlman. “Proteins as Drugs: Analysis, Formulation and Delivery.” *Novel Therapeutics from Modern Biotechnology. Handbook of Experimental Pharmacology*, vol 137. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-59990-3_3
- 121 Johnston, Sarah L. “Biologic therapies: what and when?” *Journal of Clinical Pathology*. March 2007. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1860592>
- 122 Levinthal, Cyrus, “How to fold graciously.” *Mössbaun Spectroscopy in Biological Systems Proceedings*. 1969. https://www.cc.gatech.edu/~turk/bio_sim/articles/proteins_levinthal_1969.pdf
- 123 Zanzig, Robert, Attila Szabo, and Biman Bagchi. “Levinthal’s paradox.” *Proceedings of the National Academy of Science*. October 7, 1991. <https://www.pnas.org/content/pnas/89/1/20.full.pdf>
- 124 Mezher, Michael. “FDA Finalizes ‘Biological Product’ Definition Ahead of BPCIA Transition.” *Regulatory Focus*. February 20, 2020. <https://www.raps.org/news-and-articles/news-articles/2020/2/fda-finalizes-biological-product-definition-ahaea>
- 125 Marks, C. and C.M. Deane. “Antibody H3 Structure Prediction.” *Computational and Structural Biotechnology Journal*. January 24, 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2001037016301118>
- 126 Robert, Anton, Panagiotis Kl. Barkoutsos, Stefan Woerner, and Ivano Tavernelli. “Resource-Efficient Quantum Algorithm for Protein Folding.” August 7, 2019. <https://arxiv.org/pdf/1908.02163.pdf>
- 127 Mishra, Anurag and Alireza Shabani. “High-Quality Protein Force Fields with Noisy Quantum Processors.” October 29, 2019. <https://arxiv.org/pdf/1907.07128.pdf>
- 128 Chow, Jerry and Jay Gambetta. “Quantum Takes Flight: Moving from Laboratory Demonstrations to Building Systems.” IBM. January 8, 2020. <https://www.ibm.com/blogs/research/2020/01/quantum-volume-32>
- 129 Callaway, Ewen. “‘It will change everything’: DeepMind’s AI makes gigantic leap in solving protein structures.” November 30, 2020. <https://www.nature.com/articles/d41586-020-03348-4>
- 130 Harwood, Stuart, Claudio Gambella, Dimitar Trenev, Andrea Simonetto, David Bernal, and Donny Greenberg. “Formulating and Solving Routing Problems on Quantum Computers.” January 6, 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9314905>

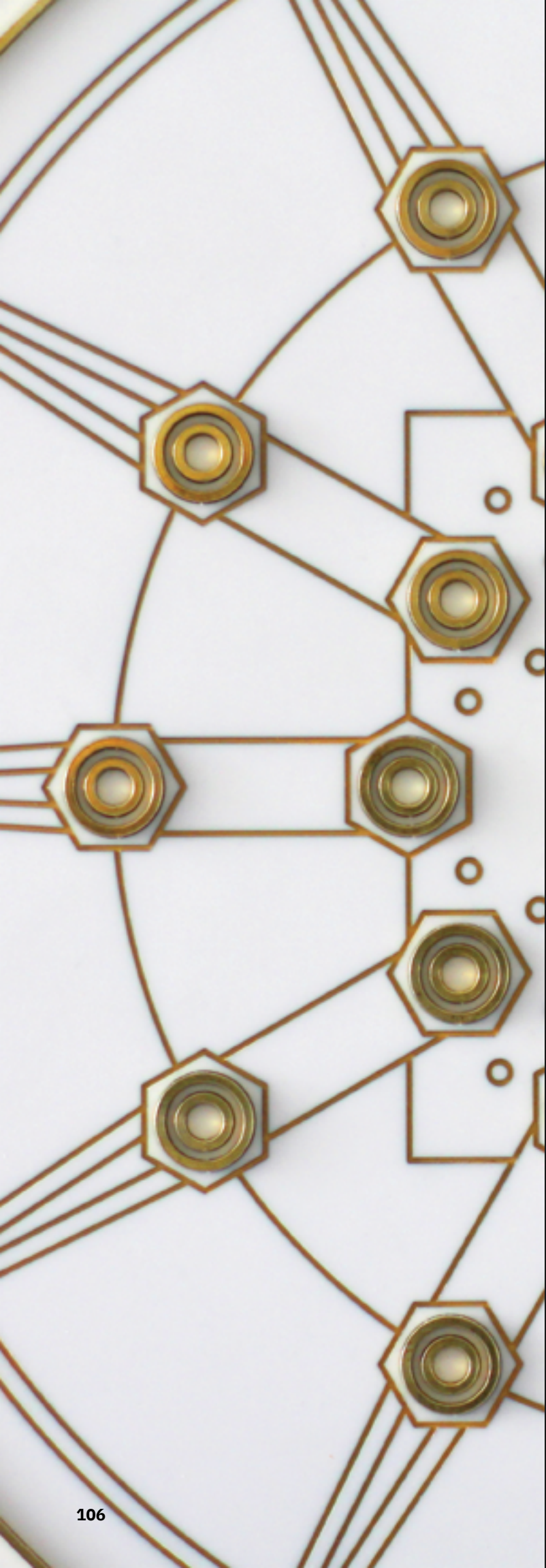
Rapports connexes

Gil, Darío, Jesus Mantas, Robert Sutor, Lynn Kesterson-Townes, Frederik Flöther, et Chris Schnabel. « Coming soon to your business—Quantum computing : Five strategies to prepare for the paradigm-shifting technology. » IBM Institute for Business Value. Novembre 2018. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumstrategy>

Sutor, Robert, Terry Hickey, et Lori Feller. « Taking the quantum leap : Why now? » IBM Institute for Business Value. Février 2018. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumleap>

Sutor, Robert, Scott Crowder, et Frederik Flöther. « Building your quantum capability : The case for joining an ‘ecosystem.’ » IBM Institute for Business Value. Janvier 2019. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumeco>





Quantum Decade

Guide sur la sensibilisation, la préparation et l'avantage

Parraineurs exécutifs

Cindy Anderson
Anthony Marshall
David Zaharchuk

Recherchiste en chef

Veena Pureswaran

Rédactrice en chef et rédactrice principale

Lucy Sieger

Directrice artistique et conceptrice en chef

Anne Marie Lowin Weber

Rédactrice en chef—Guides sectoriels

Kathy Cloyd

Gestion de projet

Mandy Drouin, Rachel Larkin, Joni McDonald, Carrie Ritchie, et Samantha Russell

Soutien à la rédaction et aux communications

Scott Brooks, Amanda Carl, Hugh Collins, Ryan Mandelbaum, Katia Moskvitch, Chris Nay, Novid Parsi, Karsten Strauss et Steven Tomasco

Soutien à la conception

Kristin Biron, Angela Finley, Bruce Jarvis, Sean Keith, Michael Kriegshauser, Stewart Lacey, Nancy Pendleton, Daritza Perez, Nate Saenz, Jill Sherman, Lauren Smith, David Steinert et Andrew Womack

Déploiement et promotion

Wendy Allan, Samantha Davis, Chelsea Dubner, Talita Cristina Paro Fabene, Jordan Hand, Tegan Jones, Maya Kulycky, Kirsten Groupe Principal, Stephen Ollice, Leah Simon, et Mya Singleton

© Copyright IBM Canada Ltée, 2021

IBM Canada Ltée
3600 Steeles Ave. East
Markham ON L3R 9Z7
Canada

IBM, le logo IBM, et ibm.com sont des marques d'International Business Machines Corp., enregistrées dans de nombreux pays. Tous les autres noms de produit ou de service peuvent être des marques d'IBM ou d'autres sociétés. La liste à jour des marques d'IBM est disponible sur le Web sous « Copyright and trademark information » à ibm.com/legal/copytrade.shtml.

Toute l'information contenue dans le présent document est à jour à la première date de publication seulement et peut être modifiée par IBM sans préavis. Les offres ne sont pas toutes disponibles dans tous les pays où IBM fait affaire.

LES RENSEIGNEMENTS CONTENUS DANS LE PRÉSENT DOCUMENT SONT FOURNIS «TELS QUELS» SANS AUCUNE GARANTIE, EXPRESSE OU IMPLICITE, Y COMPRIS TOUTE GARANTIE RELATIVE À LA QUALITÉ MARCHANDE, À LA CONVENANCE À UN USAGE PARTICULIER ET TOUTE GARANTIE OU CONDITION DE NON-CONTREFAÇON. Les produits IBM sont garantis selon les modalités des contrats qui les accompagnent.

Cette publication est fournie à titre de guide seulement. Elle ne vise pas à se substituer à une recherche approfondie ou à l'exercice du jugement professionnel. IBM ne sera pas responsable d'une perte éventuelle subie par une entreprise ou une personne qui se fie à cette publication.

Les données utilisées dans le présent rapport peuvent provenir de sources tierces et IBM ne vérifie pas, ne valide pas et ne contrôle pas ces données de manière indépendante. Les résultats de l'utilisation de ces données sont fournis « tels quels » et IBM n'émet aucune déclaration ou garantie, expresse ou implicite.

**IBM Institute for
Business Value**



ISBN : 978-1-7374011-3-1

