



Les fermions de Majorana : To qubit or not qubit ?

1 mars 2025

Introduction

Dans l'article « Vous reprendrez bien une louche de physique quantique » ([lien LinkedIn](#)), nous avons exploré les fondements du calcul quantique, qui repose sur la mécanique quantique, théorie décrivant le comportement de la matière et de l'énergie à l'échelle atomique et subatomique.

Contrairement aux bits classiques, limités à deux états (0 ou 1), le qubit – unité fondamentale de l'information quantique – peut exister simultanément dans une superposition de plusieurs états.

Par ailleurs, l'intrication quantique permet à des qubits de partager des états corrélés indépendamment de la distance qui les sépare, ouvrant ainsi la voie à des calculs exponentiellement plus efficaces pour certains problèmes, sous réserve de disposer de dispositifs quantiques performants et d'algorithmes adaptés.

Parmi ces algorithmes, l'algorithme de Shor, développé dans les années 1990, démontre la capacité d'un ordinateur quantique à factoriser de grands nombres bien plus rapidement qu'un système classique, tandis que l'algorithme de Grover offre une accélération quadratique pour la recherche dans des bases de données non structurées.

Néanmoins, la concrétisation du calcul quantique se heurte à plusieurs défis majeurs :

- Décohérence et fragilité des qubits : Les qubits, extrêmement sensibles aux perturbations extérieures, perdent progressivement leur cohérence en raison des interactions avec l'environnement.
- Correction d'erreurs quantiques : Pour compenser la décohérence et les erreurs de manipulation, des codes de correction sophistiqués sont indispensables, impliquant souvent une redondance importante et une complexification des dispositifs.
- Scalabilité : Passer d'un nombre limité de qubits à des systèmes capables de réaliser des calculs pratiques pose des défis d'intégration, de contrôle et de gestion thermique, particulièrement dans des environnements cryogéniques.

Dans un second article également intitulé « Vous reprendrez bien une louche de physique quantique » ([lien LinkedIn](#)), nous avons comparé différentes architectures de qubits, chacune présentant des avantages et des défis spécifiques en termes de génération et de manipulation.

Les qubits supraconducteurs, notamment ceux basés sur des « transmons » – utilisés par IBM Eagle R3 et Google Sycamore – reposent sur l'effet tunnel et les paires de Cooper pour stabiliser l'état quantique.

Par contraste, l'approche de Microsoft mise sur des qubits topologiques issus des fermions de Majorana, ces quasi-particules théoriques qui apparaissent aux interfaces d'éléments supraconducteurs. Grâce à leurs statistiques non abéliennes, cette méthode promet de réduire les besoins en correction d'erreurs et de faciliter la montée en échelle, même si elle reste, à ce jour, essentiellement théorique – Microsoft ayant d'ailleurs rétracté en 2021 certaines publications (initialement parues dans « Science » en 2017 et dans « Nature » en 2018) en raison de critiques méthodologiques et de preuves jugées insuffisantes.

Aujourd'hui, **Microsoft annonce sa première puce quantique à 8 qubit topologiques**, reposant sur une implémentation physique des qubits topologiques via des « topoconducteurs ». Présentés comme de nouveaux matériaux inaugurant un « état de la matière » inédit, ces dispositifs permettent à Microsoft de réduire l'écart en densité de qubits physiques avec IBM (Eagle R3 : 127 qubits) et Google (Sycamore : 77 qubits).

Si cette annonce témoigne d'**avantages théoriques** indéniables, notamment en termes de stabilité des qubits, elle soulève également des questions quant à la capacité de cette technologie à effectuer des calculs quantiques complexes et fiables dans un contexte industriel.

Pour mieux situer l'origine et l'intérêt des fermions de Majorana dans ce contexte, il convient de rappeler quelques éléments fondamentaux de la physique quantique. Paul Dirac, en étendant l'équation de Schrödinger pour intégrer la relativité restreinte, posa

les bases de la description quantique relativiste et prédit l'existence des antiparticules. Inspiré par cette démarche, Ettore Majorana, en 1937, proposa l'existence de particules auto-conjuguées – les fermions de Majorana –, qui, en se réduisant à un seul degré de liberté indépendant, simplifient la description théorique et ouvrent la voie à des symétries plus fines.

Bien que leur existence expérimentale reste à démontrer, ces quasi-particules, tout comme le boson de Higgs avant 2012, illustrent comment des idées théoriques audacieuses peuvent, après de longues investigations, transformer notre compréhension fondamentale de la matière.

Ainsi, la promesse de qubits plus robustes et la perspective d'opérations quantiques sur des dispositifs topologiques positionnent les fermions de Majorana au cœur des enjeux actuels du calcul quantique, tout en illustrant la richesse et la profondeur des interactions entre théorie et expérimentation dans la physique moderne. Mais au-delà de la promesse, Quid de la réalité de cette technologie ?

Des "quasi particules" non-abéliennes

Des Quasi-Particules

Dans l'article « Vous reprendrez bien une louche de physique quantique » ([lien LinkedIn](#)), nous avons abordé la question fondamentale de la « réalité » des descriptions mathématiques en mécanique quantique : les équations représentent-elles une réalité tangible ou bien ne constituent-elles qu'une projection cohérente, une sorte d'ombre de la complexité sous-jacente, rappelant le mythe de la caverne de Platon ?

Les quasi-particules s'inscrivent précisément dans cette réflexion. Elles apparaissent comme des excitations émergentes dans des systèmes quantiques collectifs, notamment en physique de la matière condensée.

Loin d'être des particules élémentaires au sens du modèle standard, elles sont avant tout des constructions mathématiques issues d'une modélisation effective. Ce formalisme permet de décrire de façon simplifiée et calculable des comportements collectifs complexes en introduisant des entités aux propriétés spécifiques – telles que masse, spin ou charge – qui résultent des interactions entre particules fondamentales.

En d'autres termes, les quasi-particules représentent une projection mathématique de la réalité sous-jacente. Elles émergent dans un espace vectoriel qui capture les excitations du système, facilitant ainsi l'analyse et la prédiction de phénomènes autrement inaccessibles par une approche lagrangienne ou hamiltonienne brute.

Parmi les quasi-particules les plus connues, on peut citer :

- Les phonons : excitations associées aux vibrations du réseau cristallin, jouant un rôle clé dans la conduction thermique.
- Les magnons : modes d'ondes de spin dans les matériaux magnétiques.
- Les excitons : paires électron-trou liées apparaissant dans les semi-conducteurs lors de l'excitation électronique.
- Les plasmons : oscillations collectives du plasma d'électrons dans les métaux.
- Les anyons : excitations en deux dimensions, notamment dans l'effet Hall quantique, qui présentent des statistiques intermédiaires entre bosons et fermions et sont étudiées pour leurs applications potentielles en informatique quantique.
- Enfin (liste non exhaustive), les fermions de Majorana : quasi-particules théoriques apparaissant aux interfaces de systèmes supraconducteurs topologiques, caractérisées par leur auto-conjugaison.

Pour un fermion Dirac, le champ ψ et son conjugué de charge ψ_c (défini via l'opérateur de charge conjugaison C) sont distincts. Pour un fermion de Majorana, la condition d'auto-conjugaison s'écrit : $\psi = \psi_c$.

Ces Quasi Particules sont au cœur des recherches en qubits topologiques, car lors de leur "braiding" ou "tressage", l'état global du système subit une transformation unitaire non commutative, protégeant ainsi l'information contre les perturbations locales.

Certains dispositifs expérimentaux – comme les nanofils d'antimoniure d'Indium couplés à des supraconducteurs – visent à faciliter l'émergence des fermions de Majorana et à détecter leur signature via un pic de conductance quantique mesuré par spectroscopie tunnel.

Ce type de dispositifs étaient ceux investigués par Microsoft dans ces premiers articles désormais rétractés et ils sont à la base de l'architecture de la puce quantique Majorana de Microsoft.

Bien que l'**existence expérimentale de fermions de Majorana reste toujours controversée**, leur description mathématique et leurs propriétés théoriques alimentent des perspectives prometteuses pour la réalisation de qubits topologiques stables, essentiels pour le calcul quantique à grande échelle.

Les quasi-particules illustrent parfaitement comment la physique moderne se sert de constructions mathématiques pour « projeter » et exploiter la complexité d'un système quantique, offrant ainsi des outils conceptuels et pratiques pour la compréhension et la manipulation de phénomènes collectifs.

Non-abéliennes

La topologie est une branche fondamentale des mathématiques qui étudie les propriétés qualitatives des espaces invariantes par des déformations continues (étirements, compressions, déformations sans déchirure ni collage). Plutôt que de se focaliser sur des notions métriques telles que la distance, elle met l'accent sur les structures qui définissent la continuité, la convergence et la connectivité d'un espace. Dans le cadre de la topologie et de la théorie des groupes, on introduit des structures algébriques comme les anneaux commutatifs.

Un anneau (ou ring en anglais) est une structure $(R, +, \cdot)$ telle que :

- $(R, +)$ forme un groupe abélien, c'est-à-dire que l'addition est associative, possède un élément neutre 0, que chaque élément admet un opposé et que l'addition est commutative.
- (R, \cdot) est une opération associative. La multiplication est distributive par rapport à l'addition.

Un anneau est dit commutatif lorsque la multiplication est également commutative, c'est-à-dire pour tous $a, b \in R$, on a l'égalité $a \cdot b = b \cdot a$.

On précise que l'appellation « abélien » concerne ici la structure du groupe additif, tandis que « commutatif » s'applique à la multiplication. Dans ce contexte, on parle souvent simplement d'anneau commutatif.

À l'opposé, certains objets en physique quantique, comme les fermions de Majorana, ne se comportent pas de manière abélienne. En effet, la composition de leurs fonctions d'onde (ou l'échange de ces quasi-particules ou "braiding") conduit à des transformations unitaires non commutatives, une propriété essentielle qui sous-tend leur utilisation dans le calcul quantique topologique.

Les fermions de Majorana émergent de la topologie des états supraconducteurs et des contraintes imposées par la symétrie d'auto-conjugaison. Dans l'architecture retenue par Microsoft, le "support physique" du fermion de Majorana qui permet son émergence et son "stockage" est un topoconducteur de type "nanofils supraconducteurs".

Dans un système hébergeant plusieurs fermions de Majorana, la composition (ou superposition) des fonctions d'onde des différents modes ne se contente pas de s'ajouter avec un simple facteur de phase lors d'un échange. En effet, lorsque l'on échange (ou « braide ») deux fermions de Majorana, l'opération correspond à une transformation unitaire non commutative sur l'espace de Hilbert dégénéré du système.

Mathématiquement : Soit U_{ij} l'opérateur associé à l'échange des quasi-particules i et j . Pour ces fermions, on a généralement : $U_{ij}U_{jk} \neq U_{jk}U_{ij}$, ce qui signifie que l'ordre dans lequel les échanges sont réalisés influence l'état final du fait de la non commutativité de l'opération. C'est ce qui caractérise la nature non-abélienne des fermions de Majorana.

Dans le cadre de ces opérations de "braiding", le système de quasi particules conserve l'histoire, la séquence de ces opérations de "braiding".

Modes de Majorana / Fermions de Majorana & aspects technologiques

Distinguons maintenant les "fermions de Majorana" d'une part et les "modes Majorana" d'autre part :

- Fermion de Majorana (physique des particules) : Une (quasi) particule élémentaire qui est sa propre (quasi) antiparticule.
- Mode de Majorana (physique de la matière condensée) : Un état quantique localisé (souvent à l'interface ou aux bords d'un supraconducteur topologique) qui satisfait une condition d'auto-conjugaison et se comporte comme une quasi-particule, avec des propriétés non abéliennes exploitables pour le calcul quantique topologique.
- Les états de **Majorana Zéro-Mode** (MZMs) sont des modes de Majorana particuliers qui émergent sous forme d'états à **énergie nulle** dans des systèmes supraconducteurs topologiques.

Les qubits topologiques à base de Majorana s'appuient sur l'exploitation des modes de Majorana à énergie nulle qui émergent dans des systèmes supraconducteurs topologiques.

Ces modes incarnent la propriété fondamentale d'auto-conjugaison des fermions de Majorana, ce qui les rend particulièrement intéressants pour le calcul quantique, notamment en raison de leur résistance naturelle à la décohérence.

Comment produire des Majorana zéro modes ?

Toutefois, la génération et la manipulation des états de Majorana zéro-modes (MZMs) nécessitent des conditions matérielles strictes, imposant des exigences technologiques de haut niveau :

- **Nanofils semi-conducteurs (InAs, InSb)** : Fournissent un fort couplage spin-orbite, permettant de contrôler les états électroniques.
- **Couche supraconductrice (Al, NbTiN)** : Induit la supraconductivité dans le nanofil par effet de proximité.
- **Champ magnétique (perpendiculaire à l'axe du nanofil)** : Favorise l'entrée du système dans une phase topologique, condition nécessaire à l'émergence des Modes de Majorana.
- **Grilles électrostatiques** : Elles sont l'équivalent des lignes de transmission de micro-ondes dans l'architecture des "transmons". Elles permettent de manipuler les états quantiques des Modes de Majorana.

- **Capacité technologique de lecture haute fidélité** : Garantit une détection précise des états de Majorana, notamment à travers des mesures de parité. Il faut pouvoir détecter et mesurer précisément les états de Majoranas pour pouvoir réaliser des calculs quantiques.

Les topoconducteurs : des alliages spécifiques aux propriétés particulières

Les matériaux à la base des "topoconducteurs" (nanofils supraconducteurs) sont les suivants :

- InAs (Arséniure d'Indium, Indium Arsenide),
- InSb (Antimoniure d'Indium, Indium Antimonide),

Ces matériaux sont des choix privilégiés en raison de leur fort couplage spin-orbite, une propriété qui permet d'exploiter le spin des électrons pour générer des états quantiques protégés, essentiels aux qubits topologiques.

Les matériaux supraconducteurs servent à induire la supraconductivité dans les nanofils semi-conducteurs par effet de proximité, un phénomène clé pour l'émergence des états de Majorana :

- Al (Aluminium),
- NbTiN (Nitrure de Niobium-Titane, Niobium Titanium Nitride),

Al est un choix classique en raison de sa compatibilité avec les nanofils semi-conducteurs et de sa faible dissipation thermique.

NbTiN est utilisé lorsque des champs magnétiques plus intenses sont requis, ce qui est souvent nécessaire pour atteindre la phase topologique où les états de Majorana émergent.

Si les fermions de Majorana sont une notion théorique plus large (en physique des particules, par exemple), dans le contexte de la matière condensée et du calcul quantique, ce sont bien les modes de Majorana – manifestations concrètes de ces fermions – qui sont utilisés pour encoder et manipuler l'information quantique.

Typiquement, on utilise la spectroscopie à effet tunnel pour observer des pics de conductance à zéro biais, qui sont considérés comme une signature potentielle des modes de Majorana dans des systèmes supraconducteurs topologiques.

Toutefois, il est important de noter que l'interprétation de ces pics reste sujette à débat, car d'autres phénomènes pourraient, en principe, produire des signatures similaires (d'où la rétractation des articles initiaux de Microsoft).

Conséquences pour le calcul quantique

Les qubits topologiques basés sur les fermions de Majorana reposent sur l'encodage de l'information dans l'état de parité global des paires de "modes Majorana".

- **Encodage Non Local** : Un qubit logique est formé à partir de deux paires de fermions de Majorana réparties spatialement. L'information est ainsi stockée de manière non locale, rendant le qubit intrinsèquement protégé contre les perturbations locales.
- **Opérations par Braiding** : Les manipulations de ces qubits se font par des échanges contrôlés (braiding) des modes de Majorana. Chaque échange correspond à une opération unitaire qui transforme l'état quantique du système. La non-commutativité de ces opérations (découlant de leur nature non abélienne) permet de réaliser des portes logiques robustes et intrinsèquement protégées contre certaines formes d'erreurs.
- **Robustesse Topologique** : La topologie du système garantit que l'opération de braiding dépend uniquement de la classe d'homotopie du chemin suivi par les quasi-particules, et non des détails géométriques du trajet. Cette propriété offre une résistance naturelle aux perturbations locales et réduit ainsi les besoins en correction d'erreurs dans les calculs quantiques.

Fonctionnement de la puce de Majorana

Dans un second article également intitulé « Vous reprendrez bien une louche de physique quantique » ([lien LinkedIn](#)), nous avons comparé diverses architectures de qubits, chacune présentant des avantages et des défis spécifiques en termes de génération et de manipulation.

Nous avons vu précédemment l'architecture susceptible de favoriser l'émergence de modes de Majorana, tels que les topoconducteurs de type nanofils supraconducteurs.

Toutefois, il reste à comprendre comment manipuler ces modes pour implémenter des portes quantiques.

Par exemple, dans le cas d'IBM et de Google, les qubits physiques reposent sur des transmons supraconducteurs — des dispositifs exploitant les paires de Cooper et l'effet tunnel — qui sont contrôlés avec une grande précision grâce à des impulsions micro-ondes.

La difficulté d'ingénierie ne réside pas tant dans la miniaturisation des transmons, mais plutôt dans la nécessité d'équiper chacun d'eux d'une ou plusieurs micro-lignes de transmission de micro-ondes. Dans des architectures très denses, cette exigence se transforme en un véritable défi d'ingénierie.

Comment "tresser" des modes de Majorana ?

Le braiding des modes de Majorana consiste essentiellement à échanger leurs "positions" dans un système topologique de manière contrôlée. Voici comment ce procédé peut être compris et réalisé :

- **Déplacement Contrôlé :** Dans un dispositif supraconducteur topologique, les modes de Majorana sont souvent localisés aux bords ou aux interfaces d'un système (par exemple, aux extrémités d'un nanofil soumis à un champ magnétique perpendiculaire à l'axe du nanofil). Pour tresser ces modes, on modifie localement les potentiels (électrostatiques, magnétiques, etc. avec les grilles électrostatiques précédemment mentionnées) afin de déplacer les quasi-particules d'un point A à un point B. Ce "déplacement" doit être réalisé de façon continue et adiabatique, c'est-à-dire suffisamment lent pour ne pas exciter le système en dehors de son espace de dégénérescence : Le terme "adiabatique" signifie ici que le processus de manipulation (le "tressage" des modes de Majorana) est effectué lentement par rapport aux échelles de temps caractéristiques du système, de sorte que le système reste dans son état fondamental tout au long de l'opération. Autrement dit, la transition est suffisamment graduelle pour éviter l'excitation de modes supérieurs ou la perte de cohérence, assurant ainsi que l'information quantique encodée est préservée. Dans ce contexte, il ne s'agit pas qu'une particule matérielle ou quasi-particule se déplace de manière classique. Ce qui "bouge", c'est l'état quantique localisé, c'est-à-dire la distribution spatiale du mode de Majorana. En ajustant les potentiels locaux (par exemple, via des portes électrostatiques ou des champs magnétiques), on modifie le couplage entre différentes régions du dispositif. Cela a pour effet de transférer le mode de Majorana d'une région à une autre, sans que l'on puisse parler d'un déplacement physique d'une particule au sens traditionnel : C'est la configuration quantique et la localisation effective de l'état qui sont modifiées.
- **Chemin Topologiquement Protégé :** L'important dans le braiding est que le résultat de l'échange dépend uniquement de la classe d'homotopie du chemin suivi par les modes, c'est-à-dire des grandes caractéristiques du trajet et non de ses détails géométriques. Cette propriété garantit que de petites perturbations ou irrégularités dans le chemin n'altèrent pas la transformation unitaire induite par l'échange. En d'autres termes, même si les quasi-particules "empruntent des trajectoires différentes", tant que ces trajectoires appartiennent à une même "classe" topologique (c'est-à-dire, qu'elles peuvent être continuellement transformées l'une en l'autre sans coupure ni collage), l'effet sur le système sera le même : Cette caractéristique rend le système moins sensible aux erreurs locales ou aux perturbations qui pourraient modifier le chemin des quasi-particules sur de petites distances (comme les vibrations, les imperfections du matériau, variation de température, etc.). Par exemple, imaginez que vous voulez

tordre une corde pour réaliser un nœud. Peu importe que vous passiez par un chemin parfaitement droit ou légèrement sinueux – tant que le nœud final est identique, la façon exacte dont vous avez bougé la corde n'a pas d'importance. "*Le serpent sort du puits, tourne autour de l'arbre et retourne dans le puits*"... peu importe que le serpent tourne à droite ou à gauche autour de l'arbre, cela restera un nœud de chaise. C'est exactement ce que signifie dire que l'opération de braiding (le tressage des quasi-particules) dépend uniquement de la "classe d'homotopie" du chemin : seuls les grands traits du chemin comptent, et non les détails précis du trajet. Cela permet de limiter le besoin de mécanismes complexes de correction d'erreurs, rendant les calculs quantiques plus robustes et fiables. Ainsi, dans un calcul quantique, on a moins besoin de systèmes de correction d'erreurs complexes, puisque le processus est intrinsèquement protégé par la topologie du système.

- **Transformation Unitaire Non-Commutative** : Lorsque deux modes de Majorana sont échangés, l'opération correspond à une transformation unitaire qui agit sur l'espace des états quantiques du système. La particularité est que ces transformations sont non abéliennes : l'ordre dans lequel les échanges sont effectués est crucial, car les opérations ne sont pas commutatives. Cela signifie que braider les modes dans un ordre différent aboutit à un résultat quantique distinct, ce qui est exploitable pour réaliser des opérations logiques sur des qubits.
- **Implémentation en Calcul Quantique** : En pratique, on conçoit des circuits quantiques topologiques où l'information est encodée dans la parité globale des paires de modes de Majorana. Les échanges (braiding) de ces modes sont ensuite utilisés pour implémenter des portes quantiques qui bénéficient de la protection topologique contre la décohérence et les perturbations locales que nous avons identifiées en début de cet article comme des points critiques voire bloquants pour le développement du calcul quantique complexe et fiable.

Le tressage (braiding) des modes de Majorana repose sur la manipulation contrôlée de leurs interactions dans un système supraconducteur topologique.

Bien que ces modes soient souvent décrits comme des quasi-particules, il est important de noter qu'ils ne se déplacent pas au sens classique du terme. **Leur "déplacement" correspond en réalité à une modification des paramètres du système** (tels que les potentiels de grille ou les couplages supraconducteurs), permettant une réorganisation de leur distribution spatiale.

L'ordre des échanges entre ces modes génère des transformations unitaires non commutatives dans l'espace des états quantiques, une propriété clé des statistiques non abéliennes. Ce mécanisme constitue la base du calcul quantique topologique, où l'information est encodée de manière délocalisée entre plusieurs modes de Majorana.

Cette distribution spatiale offre une certaine résilience aux perturbations locales, réduisant les risques de décohérence. Toutefois, cette protection n'est pas absolue : des effets parasites, tels que des couplages résiduels ou des fluctuations environnementales, peuvent altérer la robustesse théorique de ces systèmes.

Par ailleurs, **bien que le tressage des Majoranas permette d'implémenter certaines opérations logiques quantiques, il ne suffit généralement pas à assurer une universalité computationnelle.** Des techniques complémentaires, comme les mesures de parité ou l'introduction d'opérations auxiliaires, sont souvent nécessaires pour réaliser un ensemble complet de portes quantiques.

Ainsi, si les qubits topologiques basés sur les modes de Majorana présentent un potentiel théorique considérable en raison de leur tolérance aux erreurs, leur mise en œuvre pratique reste un défi, nécessitant des avancées expérimentales validées par la communauté scientifique pour exploiter pleinement leur protection topologique.

L'annonce de Microsoft : Entre Sciences et Marketing

Nouveaux états de la matière

La puce s'appuie sur des matériaux dits "topoconducteurs", qui se distinguent par l'émergence d'un nouvel état de la matière. Cet état permet de stabiliser des modes de Majorana, présentant des propriétés topologiques inédites.

Les affirmations de Microsoft sur un « nouvel état de la matière » se réfèrent principalement à l'utilisation innovante des propriétés topologiques des matériaux (les topoconducteurs) pour stabiliser des modes de Majorana et ainsi créer des qubits topologiques robustes.

Bien que des matériaux présentant des propriétés topologiques, comme certains topoconducteurs, soient connus et étudiés depuis plusieurs années, l'innovation revendiquée par Microsoft tient à leur mise en œuvre spécifique dans une architecture de qubits supposée "fonctionnelle".

Concrètement, la différence réside dans :

- **L'application dans l'informatique quantique** : Les topoconducteurs ont été étudiés dans divers contextes, mais leur utilisation pour réaliser des qubits à haute densité et intrinsèquement protégés par la topologie représente une approche nouvelle. Cela permet théoriquement de réduire les erreurs et d'améliorer la scalabilité des dispositifs quantiques.
- **Les propriétés topologiques exploitées** : Le terme « nouvel état de la matière » fait allusion aux états quantiques émergents, notamment aux modes de Majorana, qui, lorsqu'ils sont manipulés par braiding, offrent des transformations unitaires non abéliennes.

Ce comportement, qui découle directement de la topologie des matériaux utilisés, est ce qui pourrait faire la différence avec les technologies existantes (comme les transmons). Toutefois, il convient de noter que ces revendications nécessitent encore des validations expérimentales approfondies pour confirmer leur viabilité et leur supériorité par rapport aux technologies quantiques plus établies.

Robustesse intrinsèque et protection topologique

Grâce à l'encodage de l'information dans des modes de Majorana, les qubits topologiques bénéficient d'une protection naturelle contre les perturbations locales et la décohérence. Cela réduit considérablement le besoin en correction d'erreurs et offre une stabilité supérieure aux architectures traditionnelles.

La revendication selon laquelle l'encodage de l'information dans des modes de Majorana conférerait une « robustesse intrinsèque et une protection topologique » aux qubits topologiques est théoriquement séduisant, mais il mérite une analyse critique sur plusieurs points :

- **Principe théorique versus réalité expérimentale** : En théorie, l'encodage de l'information dans des états topologiquement protégés signifie que les opérations de braiding dépendent uniquement de la classe d'homotopie du chemin suivi par les quasi-particules, rendant ainsi les opérations robustes face aux perturbations locales. Il conviendra de mesurer ce "gain" de stabilité. Toutefois, la réalisation pratique de ce principe reste un défi majeur. Les expériences visant à observer des modes de Majorana et à démontrer leur robustesse se heurtent souvent à des phénomènes parasites et à des signaux ambigus (par exemple, des pics de conductance en zéro biais qui pourraient avoir des origines alternatives - cf la rétractation des articles de Microsoft en raison de preuves expérimentales insuffisantes et biais de confirmation-).
- **Réduction du besoin en correction d'erreurs** : Si l'information est encodée de manière non locale, les erreurs locales devraient théoriquement être moins préjudiciables, réduisant ainsi la charge de la correction d'erreurs. Dans la réalité, la mise en œuvre d'opérations adiabatiques (comme le braiding) impose une lenteur dans les manipulations, et des imperfections de contrôle peuvent toujours introduire des erreurs. De plus, d'autres sources d'erreur non topologiques (bruit environnemental, fluctuations thermiques) peuvent persister, nécessitant malgré tout des mécanismes de correction d'erreurs complémentaires. La stabilité qui est un plus pour le calcul quantique complexe et fiable s'accompagne d'une lenteur des calculs (comme dans la technologie des qubits à ions piégés qui sont stables, mais lents).
- **Stabilité supérieure par rapport aux architectures traditionnelles** : Les architectures basées sur des transmons supraconducteurs, par exemple, ont

montré des progrès significatifs en termes de correction d'erreurs et de cohérence. L'idée que les qubits topologiques pourraient dépasser ces performances repose sur des fondements mathématiques solides. Cependant, la fabrication et le contrôle précis des dispositifs capables de soutenir des modes de Majorana restent à démontrer sur des échelles suffisamment grandes pour réaliser un avantage pratique en termes de stabilité et de densité. La mise en œuvre industrielle de tels dispositifs pourrait révéler des défis non anticipés.

- **Perspective à long terme** : La revendication ouvre la voie à une vision ambitieuse de systèmes quantiques quasi « autonomes » du point de vue de la correction d'erreurs, grâce à une protection topologique intrinsèque. Pour l'instant, cette vision reste majoritairement théorique et en phase de recherche expérimentale. Le chemin vers des dispositifs réellement robustes et évolutifs demeure encore semé d'obstacles, tant sur le plan de la mise en œuvre matérielle que de la compréhension complète des phénomènes topologiques impliqués. Bien que la protection topologique promise par les modes de Majorana représente une avancée "potentiellement révolutionnaire" pour le calcul quantique, il est essentiel de rester prudent quant à l'optimisme des revendications actuelles. Les preuves expérimentales sont encore en développement, et de nombreux défis techniques restent à relever avant de pouvoir affirmer que ces dispositifs offrent une robustesse intrinsèque largement supérieure à celle des technologies quantiques conventionnelles.

Scalabilité

L'approche topologique vise à surmonter les défis d'intégration et de contrôle associés aux systèmes quantiques actuels. La robustesse et la densité des qubits Majorana devraient faciliter la montée en échelle vers des dispositifs quantiques industriels.

La revendication concernant la scalabilité repose sur l'idée que l'approche topologique, en particulier via l'encodage dans des modes de Majorana, pourrait surmonter certains obstacles d'intégration et de contrôle auxquels font face les systèmes quantiques actuels.

Cependant, une analyse critique révèle plusieurs points de réflexion :

- **Théorie prometteuse vs. Réalité expérimentale** : En théorie, la protection topologique permet d'encapsuler l'information de manière non locale, ce qui devrait, en principe, réduire la sensibilité aux erreurs locales et faciliter le couplage de nombreux qubits. De surcroît, là où on pense que pour obtenir un qubit logique fiable, il faudrait agréger 1000 qubits physiques, la stabilité intrinsèque des qubits topologiques devrait permettre d'abaisser cette "règle" empirique de ratio qubits logiques/qubits physiques. Cependant, à ce jour, les preuves expérimentales de la robustesse des modes de Majorana et de leur

manipulation fiable restent encore préliminaires. La difficulté d'observer et de contrôler ces modes sur une échelle suffisante pose un problème majeur pour la montée en échelle.

- **Densité de qubits et intégration** : La revendication suggère que les dispositifs basés sur les qubits topologiques pourraient atteindre une densité plus élevée que les architectures traditionnelles (transmons, spins, etc.), ce qui est en effet attrayant pour les applications industrielles. Toutefois dans cette course à la densification, le transmon, le qubit à spin de silicium ont des tailles "équivalentes" à celle des nanofils supraconducteurs. Les véritables limites à la densification de ces architectures sont l'intégration des systèmes cryogéniques (supraconducteurs et refroidissement à l'hélium-3 liquide et hélium-4 superfluide) et l'intégration des moyens de manipulation des qubits (lignes de transmission micro-ondes pour les transmons, grilles électrostatiques et champs magnétiques pour les qubits topologiques). Même si la densité théorique est prometteuse, l'intégration de ces dispositifs dans une architecture industrielle pose des défis extrêmement complexes. Si Microsoft affirme pouvoir rapidement atteindre une densité de 1 million de Qubits topologiques sur une puce, pour l'heure la puce Majorana-1 ne dispose que de 8 qubits topologiques. Encore une fois, il ne faut pas seulement s'intéresser à la compacité du dispositif de génération de qubits, mais il faut aussi factoriser tous les éléments de contrôle et de manipulation / lecture de ces qubits. La revendication de scalabilité me semble donc très très ambitieuse : si on utilise une loi de Moore optimiste, avec un doublement de densité iso-coût tous les ans, le million de qubits physique serait atteint d'ici 17 ans (bien entendu cette "loi de Moore appliquée à la densité de qubits topologiques n'a aucun fondement technico-scientifique particulier - analogie finesse de gravure et finesse des grilles électrostatiques- et ne sert qu'à fournir une analogie contextuelle).
- **Contrôle et mise à l'échelle** : L'approche topologique vise à simplifier le contrôle en s'appuyant sur des opérations de braiding intrinsèquement protégées. En pratique, la réalisation d'opérations adiabatiques et le contrôle précis des couplages dans des réseaux de qubits topologiques demeurent techniquement exigeants. La montée en échelle vers des dispositifs à grand nombre de qubits nécessitera des avancées considérables en termes de conception et de fabrication (cf analogie loi de Moore).
- **Comparaison avec d'autres architectures** : Si la technologie des qubits Majorana parvient à démontrer de manière concluante sa robustesse et sa facilité d'intégration, elle pourrait offrir un avantage significatif par rapport aux architectures supraconductrices actuelles, qui demandent des dispositifs de correction d'erreurs étendus. Toutefois, d'autres technologies quantiques,

comme celles basées sur les transmons ou les ions piégés, progressent rapidement et disposent déjà de prototypes fonctionnels à plusieurs centaines de qubits. La véritable supériorité en termes de scalabilité des qubits topologiques reste donc à démontrer de manière convaincante. La revendication de scalabilité repose sur une vision ambitieuse où l'approche topologique permettrait de contourner des défis majeurs d'intégration et de contrôle grâce à une robustesse intrinsèque. Cependant, de nombreux obstacles expérimentaux et d'ingénierie subsistent.

La transition d'un concept théorique prometteur à une technologie industrielle fonctionnelle nécessitera encore d'importantes avancées, et il reste à prouver que la densité et la facilité de mise à l'échelle des qubits Majorana surpasseront réellement celles des architectures existantes. En effet, deux approches peuvent s'opposer :

- Des qubits stables mais "lents" (ions piégés, qubits topologiques) qui limitent le recours à des dispositifs matériels et algorithmiques de contrôle d'erreur,
- Des qubits moins stables (mais suffisamment stables) mais rapides (transmons supraconducteurs, qubits photoniques) nécessitant des dispositifs matériels et algorithmiques de contrôle d'erreur,

Seule la commercialisation de ces solutions pourra donner la réponse définitive en définissant la réponse technico-économique optimale pour l'adoption à grande échelle de ces technologies."

Conclusion

Les avancées du calcul quantique reposent sur la puissance de la superposition et de l'intrication, permettant des calculs d'une envergure exponentielle. Si les algorithmes quantiques comme ceux de Shor et Grover témoignent déjà d'un potentiel révolutionnaire, des défis techniques majeurs – notamment la décohérence, la correction d'erreurs et la scalabilité – restent à relever.

L'approche topologique, via l'exploitation des fermions de Majorana et leurs modes non abéliens, offre une promesse de robustesse intrinsèque grâce à un encodage non local, mais sa mise en œuvre industrielle n'est pas encore démontrée et sa preuve expérimentale est en cours d'analyse.

Amazon vient aussi de faire une annonce sur une architecture de cat-qubits (en hommage au chat de Schroedinger) qui revendique elle aussi une réduction des besoins en contrôle d'erreur de 90%. Les cat-qubits sont des qubits "bosoniques", qui exploitent des états cohérents superposés (exemple : $|\alpha\rangle$ et $|- \alpha\rangle$) pour corriger naturellement certaines erreurs comme le basculement de phase. Contrairement aux qubits conventionnels basés sur des systèmes à deux niveaux (comme les qubits supraconducteurs de type transmon), les qubits bosoniques s'appuient sur des degrés

de liberté continue, offrant des avantages en termes de correction d'erreurs quantiques et de robustesse.

La stabilité des qubits, et donc la fiabilisation des calculs quantiques complexes est au cœur de la R&D des grands groupes.

Cette dynamique soulève des questions fondamentales sur la transition entre théorie et pratique et ouvre le débat sur la manière dont l'intégration de nouvelles architectures quantiques pourra transformer notre manière de concevoir l'informatique, la physique des matériaux et, plus largement, notre compréhension de la réalité physique.