



Vous reprendrez bien une louche de physique quantique ? (louche #2)

6 février 2025

Maintenant que nous avons positionné quelques concepts théoriques pour faciliter la compréhension de ce qui va venir, commençons à décrire le fonctionnement de la plateforme quantum.ibm.com

Nous avons vu dans l'article précédent

(https://www.linkedin.com/posts/jeromev_quantum-computing-etatsabrqantiques-activity-7291875882078470145-f4T9?utm_source=share&utm_medium=member_desktop) qu'il existe différentes approches pour créer des Qubits physiques.

La plus connue et la plus mature est celle des Qubits supraconducteurs en dépit de leur sensibilité au bruit et la nécessité de les refroidir à des températures proches du Zéro degré Kelvin (zéro absolu $\sim -273.15^\circ \text{C}$ ou comme son nom l'indique 0 kelvin).

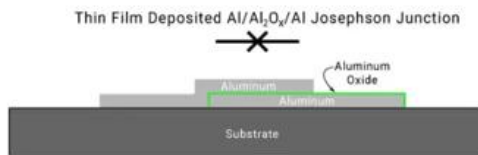
Une fois définis certains concepts liés à la performance et à la stabilité de ces architectures, nous reviendrons plus en détail sur ces différentes architectures.

Puis nous explorerons l'interface utilisateur de la plateforme quantum.ibm.com

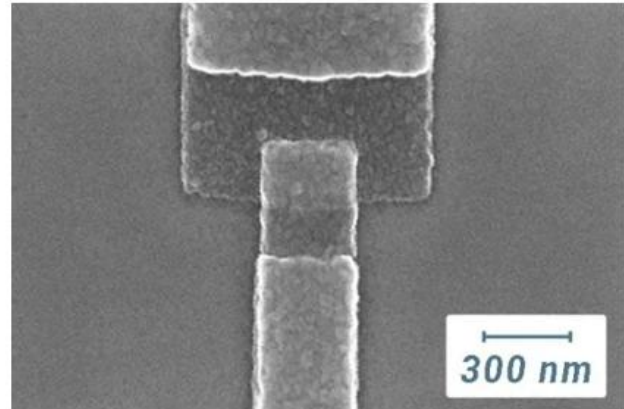
1. Architecture de l'ordinateur quantique d'IBM et principes théoriques

1.1. La jonction Josephson à la base de l'architecture quantique des ordinateurs quantiques IBM

Les processeurs quantiques d'IBM utilisent des **qubits transmons supraconducteurs**, qui sont des circuits électriques miniatures composés de deux éléments principaux : une **jonction Josephson** et un condensateur, reliés en parallèle.



[Source de l'illustration d'une jonction Josephson](#)

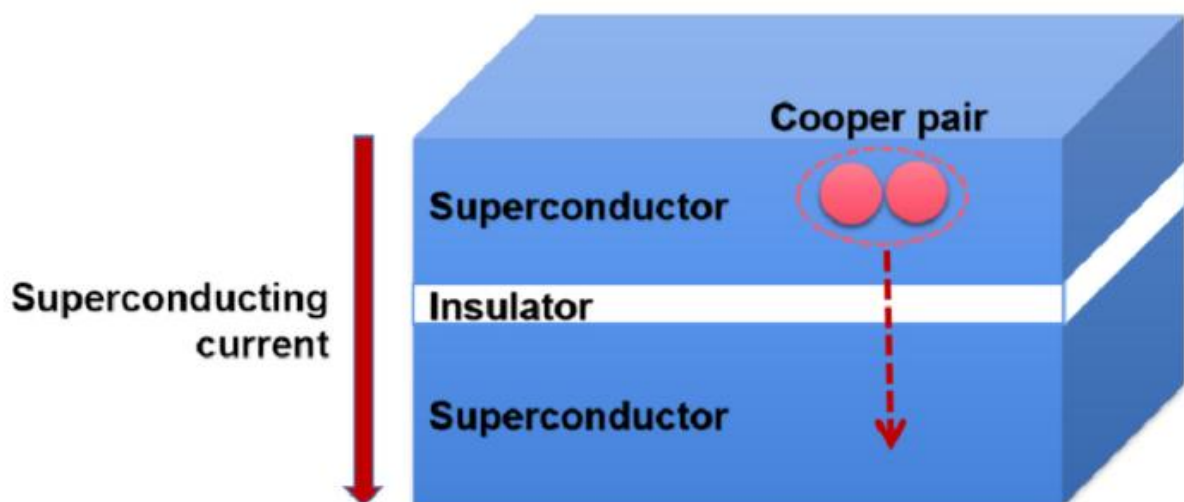


SEM Image courtesy of the Institute for Quantum Computing (IQC) at the University of Waterloo.

Structure d'une jonction Josephson

([source de l'image](#))

La jonction Josephson est un composant spécial fait de deux fines couches de métal supraconducteur séparées par une barrière isolante. À des températures extrêmement basses, les électrons se regroupent par paires, appelées **paires de Cooper**, et peuvent traverser cette barrière isolante grâce à un phénomène appelé **effet tunnel**. C'est ce comportement particulier qui donne aux qubits leurs propriétés uniques nécessaires au calcul quantique.



The structure of the Josephson junction.

Paire de Cooper (deux électrons) et effet tunnel au travers de la couche isolante

[\(source de l'image\)](#)

L'effet tunnel est un phénomène quantique où une particule peut traverser un obstacle ou une barrière (de potentiel), même si, selon les lois de la physique classique, elle n'a pas assez d'énergie pour le faire. Imaginez une bille roulant vers une colline. Si la bille n'a pas assez de vitesse, elle s'arrête avant d'atteindre le sommet.

Mais dans le monde quantique, c'est différent : la bille a une petite chance d'apparaître de l'autre côté de la colline, sans jamais l'avoir franchie "par le haut". Cela se produit parce que, selon la mécanique quantique, les particules comme les électrons ne sont pas de simples points, mais des **ondes de probabilité**.

Ces ondes peuvent "déborder" légèrement au-delà de la barrière, donnant à la particule une petite chance de se retrouver de l'autre côté. C'est grâce à cet effet que les **paires de Cooper** dans les qubits peuvent traverser des barrières isolantes, un phénomène essentiel pour le fonctionnement des processeurs quantiques (découvert en 1962 par Brian Josephson... mais pas dans sa cuisine).

Notez que l'effet tunnel est aussi utilisée en microscopie. La microscopie à effet tunnel fonctionne en balayant une pointe (très très très..) pointue sur la surface d'un échantillon à une très petite distance. La pointe est suffisamment proche de la surface pour que les électrons de l'échantillon puissent traverser la barrière de potentiel entre la pointe et l'échantillon. En mesurant le courant circulant entre la pointe et l'échantillon, la topographie de la surface peut être cartographiée avec une résolution atomique.

[\(video illustrative\)](#)

1.2. Mais revenons à nos transmons

Si on résume :

Une **jonction Josephson** est constituée de :

- **Deux couches de matériaux supraconducteurs**
- **Séparées par une fine barrière isolante**

Grâce à un phénomène quantique appelé effet tunnel, des paires de Cooper (des électrons liés) peuvent traverser cette barrière isolante (barrière de potentiel), même si cela est impossible selon la physique classique.

Propriétés clés :

- La jonction agit comme un inducteur non linéaire.
- Elle introduit une non-linéarité cruciale, c'est-à-dire que l'énergie des niveaux quantiques n'est pas uniformément espacée.

Peut-être vous souvenez vous des vos circuits RLC en électrocinétique et le calcul d'oscillateurs harmoniques. Nous allons utiliser les propriétés du Condensateur et l'adjoindre à la jonction Josephson.

Le **condensateur** dans le circuit sert à :

- **Stocker de l'énergie électrique sous forme de champ électrique.**
- **Contrôler la fréquence d'oscillation du circuit.**

Dans un circuit LC classique (une bobine pour l'inductance L, et un condensateur), les niveaux d'énergie sont également espacés, ce qui n'est pas pratique pour distinguer des qubits. C'est là que la jonction Josephson intervient.

Quand on **couple la jonction Josephson à un condensateur**, on obtient un système appelé **transmon**. Ce système présente :

- **Des niveaux d'énergie quantiques discrets, comme dans un atome.**
- **Des niveaux d'énergie non uniformément espacés grâce à la non-linéarité de la jonction.**

Cela permet de sélectionner uniquement les deux premiers niveaux d'énergie pour former un qubit :

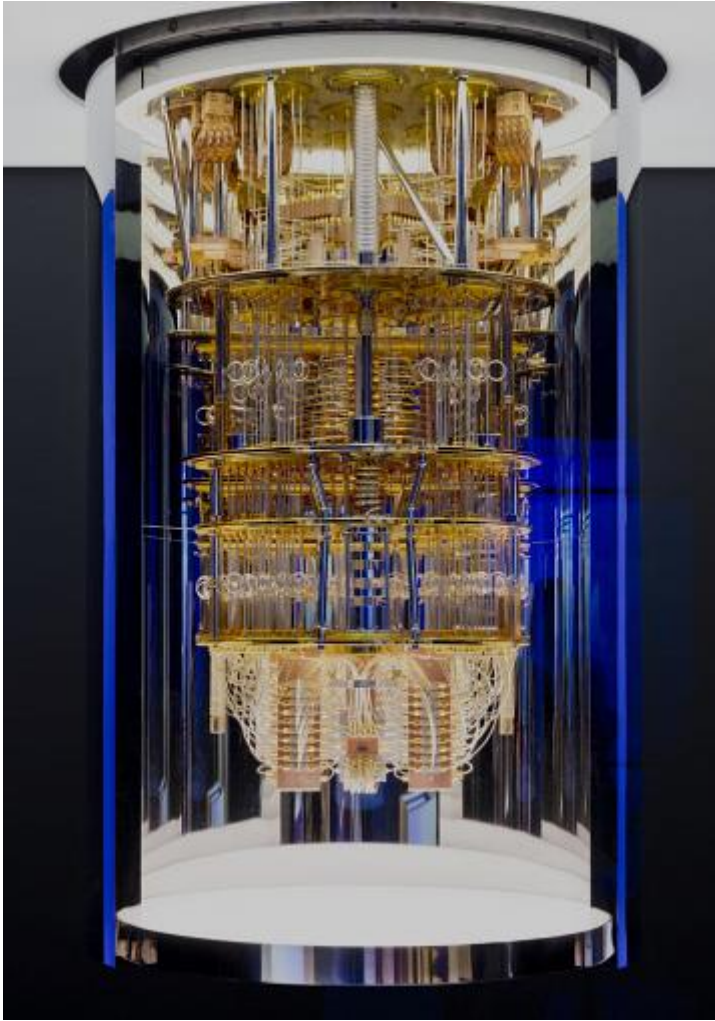
- $|0\rangle$ =état fondamental,
- $|1\rangle$ =premier état excité,

Les états d'énergie supérieurs ($|2\rangle$, $|3\rangle$, etc.) sont suffisamment éloignés pour éviter des transitions indésirables.

2. Fonctionnement de l'ordinateur quantique d'IBM

2.1. Comment manipule-t-on ces Qubits physiques ?

C'est là que ça devient de l'orfèvrerie de haut vol, une ode au génie humain...



Quand je vous disais que c'était de l'orfèvrerie ! Ordinateur Quantique d'IBM déployé à l'université de Sherbrooke, CAN

([source de l'image](#))

Pour contrôler ces qubits, on utilise des signaux micro-ondes envoyés par des lignes de transmission fabriquées directement sur la puce.

En envoyant des impulsions micro-ondes précises — avec des fréquences, des intensités, des formes et des durées soigneusement ajustées — on peut modifier l'état des qubits de manière très contrôlée.

C'est ainsi que l'on réalise des portes quantiques, qui sont les opérations de base des calculs quantiques. La puce est conçue de façon à ce que les qubits soient reliés entre eux selon un motif particulier, appelé réseau hexagonal dense (heavy-hex lattice). Ce schéma de connexion, aussi appelé topologie, est crucial pour optimiser la performance des circuits quantiques.

2.2. Où se trouvent ces bijoux ? Quelles en sont les caractéristiques ?

Il y a 3 ordinateurs quantiques disponibles pour la soumission de "jobs", l'un à Kyiv, l'autre à Brisbane et le dernier à Sherbrooke. Mais au total, il en existe 11 répartis dans différents laboratoires dans le monde.

ibm_kyiv				ibm_sherbrooke				ibm_brisbane			
QPU status		● Online		QPU status		● Online		QPU status		● Online	
Processor type		Eagle r3		Processor type		Eagle r3		Processor type		Eagle r3	
Qubits	2Q error (best/layered)	CLOPS		Qubits	2Q error (best/layered)	CLOPS		Qubits	2Q error (best/layered)	CLOPS	
127	3.34e-3/1.52e-2	30K		127	3.51e-3/1.65e-2	30K		127	3.25e-3/1.81e-2	180K	

Localisation des 3 ordinateurs quantiques IBM disponibles en ligne et leurs caractéristiques.

Chaque ordinateur dispose de 127 Qubits.

On voit mentionné le taux d'erreur de portes à 2 Qubits :

- meilleur (plus faible) taux d'erreur : 0.325% pour Brisbane
- taux d'erreur moyen : 1.81% (lorsque plusieurs couches de portes quantiques sont appliquées) toujours pour Brisbane

Les **portes à 2 qubits** (comme CNOT que nous allons créer *Via* le composer) sont essentielles pour créer des **états intriqués**, nécessaires à la plupart des algorithmes quantiques. Leur fiabilité est donc cruciale.

- **Taux d'erreur bas (<1 %)** : Excellent pour des circuits profonds.
- **Taux plus élevé (>1 %)** : Peut limiter la performance des algorithmes complexes.

On voit aussi mentionné la puissance de calcul en CLOPS (Circuit Layer Operations Per Second)

- **Valeur : 180K CLOPS** pour Brisbane (qui est le plus puissant des 3).
- C'est une unité de mesure développée par IBM pour évaluer la vitesse d'exécution des circuits quantiques.

Un **CLOPS** mesure combien de "**couches de portes logiques**" un processeur peut exécuter par seconde. Cela donne une idée de la **vitesse globale** du processeur, en prenant en compte :

- La rapidité des portes quantiques.
- Les délais de lecture des qubits (temps de mesure).
- La latence des systèmes de contrôle.

Un nombre élevé de CLOPS signifie que le processeur peut exécuter des circuits complexes rapidement, ce qui est essentiel pour des tâches à grande échelle.

2.3. Caractéristiques détaillées de l'ordinateur quantique IBM de Brisbane

Si on regarde en détail l'architecture de l'ordinateur quantique de Brisbane (127 Qubits), on voit la structure en réseau hexagonal dense (heavy-hex lattice). Pour cela il faut s'imaginer en fait que les Qubits 0,1,2,3,4,15,22,21,20,19,18,14 sont intégrés dans un hexagone (ici représenté par un rectangle par commodité) dont les sommets seraient les Qubits (jonction Josephson + Condensateur) 0,2,4,22,20 et 18 (6 sommets donc).

ibm_brisbane Pulse gates ◀ ▶ ↶ ↷ ▶

Details

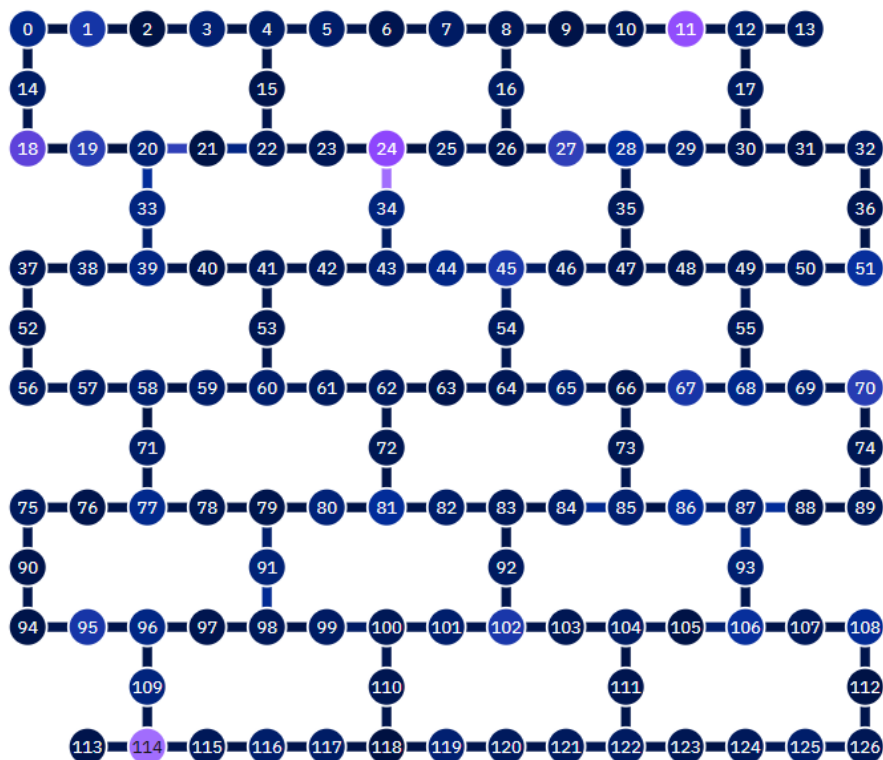
Qubits	2Q error (best)	2Q error (layered)	CLOPS
127	3.25e-3	1.81e-2	180K
Status:	Region:	Processor type ⓘ:	Version:
● Online	us-east	Eagle r3	1.1.67
Total pending workloads:	Your instance usage:	Basis gates:	Median ECR error:
148 jobs	7 jobs	ECR, ID, RZ, SX, X	7.930e-3
Median SX error:	Median readout error:	Median T1:	Median T2:
2.435e-4	1.855e-2	233.27 us	152.18 us

Calibration data

Last calibrated: about 14 hours ago

📍 Map view 📊 Graph view 📄 Table view [Expand map view](#) ⌵

Qubit: Readout assignment error Median 1.855e-2 min 5.615e-3 max 1.719e-1 Connection: ECR error Median 7.930e-3 min 3.247e-3 max 1.864e-1



Architecture détaillée de l'ordinateur quantique de Brisbane et de ses 127 Qubits

On voit aussi apparaître des spécifications plus détaillées sur les performances de cet ordinateur quantique. Outre le nombre de "jobs" dans la queue (148 jobs peuvent durer assez longtemps et il faudra donc être patient pour exécuter son job à la 149ième position dans la queue), le nombre de jobs déjà soumis à cet ordinateur, et son statut "en ligne", on voit apparaître des indications de performance des portes et des mesures :

1. On voit le type de portes logiques disponibles (que l'on peut "provisionner" au travers de l'interface) : ECR, ID, RZ, SX, X... C'est à dire créer en manipulant des impulsions micro-ondes "pré-calibrées" pour manipuler les qubits de telle sorte à ce que l'on puisse créer une porte quantique telle que définie dans cette liste.
2. **2Q Error (Taux d'erreur des portes à 2 qubits)** : déjà abordé ci-dessus.
3. **Median SX Error : 0,024 %** L'opérateur **SX** est une porte de rotation autour de l'axe X. Ce taux très faible indique une bonne fiabilité des opérations sur un seul qubit.
4. **Median ECR Error : 0,793 %** L'**ECR** (Echoed Cross-Resonance Gate) est une porte utilisée pour contrôler l'intrication des qubits. Ce taux est bon pour des architectures à grande échelle.
5. **Median Readout Error : 1,855 %** Ce taux mesure l'erreur lors de la **lecture des qubits** après un calcul. Plus il est bas, plus les mesures sont précises.

Il y a aussi des mesures de cohérence des Qubits :

1. **Median T1 : 233,27 μ s** Le **T1** est le temps de **relaxation**. C'est le temps moyen avant qu'un qubit excité $|1\rangle$ retourne à son état fondamental $|0\rangle$. Plus il est long, mieux c'est. Cela laisse plus de temps pour la mesure fiable d'un observable.
2. **Median T2 : 152,18 μ s** Le **T2** est le temps de **cohérence**. Il mesure combien de temps un qubit peut rester dans une superposition avant de perdre sa cohérence à cause du bruit ou des interférences. Plus le T2 est long, plus le qubit peut maintenir des superpositions et donc des intrications nécessaires aux calculs quantiques.
3. La situation où **T1 > T2** est courante, car la cohérence est souvent plus fragile que la simple relaxation.

Notez qu'on retrouve ces concepts en imagerie médicale, où l'observable est le spin et où on mesure des temps de relaxation et de cohérence (mais qui sont nommés légèrement différemment) :

- **T1 : Temps de relaxation longitudinal**

=> Représente le temps nécessaire pour que les **spins des protons** (dans l'eau des tissus biologiques) reviennent à leur **état d'équilibre** après avoir été perturbés par une impulsion radiofréquence.

=> **Utilité** : Il aide à différencier les tissus en fonction de la façon dont ils récupèrent leur magnétisation. Par exemple, la graisse a un T1 plus court que l'eau.

- **T2 : Temps de relaxation transverse** (mais il s'agit bien de cohérence.... oui je sais ça manque de cohérence justement).

=> Mesure combien de temps il faut pour que la **cohérence des spins** (alignement dans le plan transversal) disparaisse à cause des **interactions locales** entre les protons.

=> **Utilité** : Il est sensible aux différences de texture des tissus et aux anomalies, comme les tumeurs.

Notez que ces durées sont inférieures à la milliseconde !

2.4. Comparaison de différentes architectures de Qubits physiques

Elles sont résumées dans le tableau ci-après :

Architecture	Exemples (Entreprises)	Avantages	Inconvénients	Maturité Technologique
Qubits supraconducteurs	IBM, Google, Rigetti	Vitesse élevée, écosystème mature	Sensible au bruit, besoin de refroidissement extrême	Élevée (commercialisation en cours)
Qubits à ions piégés	IonQ, Quantinuum	Longue cohérence, haute fidélité	Opérations plus lentes, systèmes complexes à grande échelle	Moyenne à élevée (ordinateurs disponibles)
Qubits topologiques	Microsoft	Robustesse aux erreurs, tolérance aux fautes	Pas encore de démonstration fonctionnelle, défis expérimentaux	Faible (encore en R&D)
Qubits à atomes neutres	Atom Computing, PASQAL, QuEra	Scalabilité flexible, connectivité élevée	Technologie émergente, cohérence encore limitée	Moyenne (démonstrations prometteuses)
Qubits photoniques	Xanadu, PsiQuantum	Pas besoin de cryogénie, vitesse de transmission rapide	Perte de photons, détection complexe	Moyenne (prototypes avancés)
Qubits à spin de silicium	Intel, Delft, Université de Sydney	Compatibilité avec la technologie CMOS, faible consommation d'énergie	Faible temps de cohérence, technologie encore expérimentale	Faible à moyenne (en développement)

Différentes architectures de qubits physiques.

Nous allons maintenant les décrire et les comparer plus en détail.

3. Comparaison des architectures de qubits physiques

3.1. Qubits supraconducteurs

État actuel : C'est la technologie la plus mature et commercialisée aujourd'hui. Les géants comme IBM et Google ont démontré des processeurs de plus de 100 qubits (ex : IBM Eagle - les ordinateurs quantiques utilisés sont équipés de la puce Eagle R3-, Google Sycamore - sur lequel Google a une communication marketing "très bruyante"-).

=> Forte communauté de R&D, infrastructure robuste.

=> Progrès rapides grâce à des cycles d'itération courts (circuit imprimé facilement modifiable).

Mais....

=> Sensibilité au bruit (bruit thermique, bruit électromagnétique, défaut dans le matériau supraconducteur..) et nécessité de maintenir des températures proches du zéro absolu. Cette température permet de réduire le "bruit thermique" (changement de niveau d'énergie "inopinés"), maintenir la supraconductivité, augmenter la durée de T2. Cela nécessite des installations de refroidissement très coûteuse (réfrigérateur à dilution utilisant de l'Helium-3 liquide, et de l'Hélium-4 superfluide).

=> Problèmes de scalabilité à très grande échelle (> 1 000 qubits logiques corrigés d'erreurs). Le Qubit physique (jonction de Josephson + condensateur) est le dispositif réel, fabriqué sur la puce.

=> **Le Qubit logique, est un Qubit fiable créé par l'agrégation de plusieurs qubits physiques** avec des codes de correction d'erreurs quantiques (code de surface par exemple). Par exemple, pour obtenir un qubit logique fiable, il faut environ 1000 qubits physiques. Pour rappel, IBM Eagle 3 dispose de 127 qubits physiques, et Google Sycamore dispose de 70 qubits physiques. Nous sommes encore loin des 1000 qubits physique pour créer un qubit logique hyper fiable. IBM va bientôt lancer la puce IBM condor (1121 qubits physiques) et Google prévoit des puces d'un million de qubits physiques à l'horizon 2030.

=> Le problème est que même un taux d'erreur jugé bon (0.1%) pour la 2Q Error devient un problème quand on exécute des millions d'opérations.

=> A chaque fois qu'on ajoute un qubit physique, il faut aussi amener des lignes de transmissions de micro-ondes. Le câblage réel, devient un cauchemar d'ingénierie. Sans évoquer la nécessité de refroidir un grand volume de supraconducteur + lignes de transmission à une température proche du zéro kelvin. La complexité du contrôle d'erreur croît aussi exponentiellement avec le nombre de qubits physiques à corriger.

3.2. Qubits à Ions Piégés

Les qubits à ions piégés sont des atomes chargés électriquement (ions) qui sont suspendus dans le vide grâce à des champs électromagnétiques. Cette technique permet de contrôler et de manipuler les ions de manière extrêmement précise, ce qui en fait l'une des technologies les plus prometteuses pour l'informatique quantique.

Comment cela fonctionne-t-il ?

Piège de Paul (piège radiofréquence - RF trap) : Ce piège utilise des champs électriques oscillants (radiofréquence) pour stabiliser les ions dans l'espace. L'ion est

piégé au centre et flotte littéralement dans le vide (chambre à ultravide), stable, et isolé des perturbations extérieures.

L'ion est ensuite manipulé par des impulsions laser très précises et synchronisées pour créer l'intrication.

Quelles en sont les contraintes techniques ou inconvénients ?

=> Vitesse (équivalent de CLOP d'IBM) plus lente que pour les architectures à supraconducteurs

=> Difficulté à passer à l'échelle du fait de la complexité des systèmes laser et de piégeage. Sa fiabilité ferait qu'on aurait besoin de moins que qubits physiques pour créer un qubit logique.

Quels en sont les bénéfices ou avantages ?

=> Durée de T2 exceptionnelle (cohérence) pouvant atteindre plusieurs centaines de secondes

=> Fidélité élevée des opérations quantiques

Pour quels types d'applications ?

=> Idéal pour des applications nécessitant une précision importante, plutôt qu'une vitesse brute.

3.3. Qubits topologiques

Microsoft a fait le pari risqué d'investir massivement dans les qubits topologiques basés sur des fermions de Majorana (une particule qui est sa propre anti-particule), avec l'idée de construire un système intrinsèquement tolérant aux fautes.

=> Pas de preuve expérimentale solide de la présence des fermions de Majorana stable à ce jour. Les Neutrinos pourraient appartenir à cette famille de fermions qui a une existence toute théorique pour l'heure.

Historique de la "découverte" des fermions de Majorana :

En 2012, des chercheurs ont annoncé avoir observé des quasi-particules de Majorana dans des matériaux supraconducteurs.

Ces "fermions de Majorana" ne sont pas des particules fondamentales, mais des états émergents dans des systèmes quantiques complexes.

Ils apparaissent souvent aux bords de nanofils supraconducteurs ou dans des hétérostructures topologiques.

En 2018, un article de Microsoft annonçait la détection de fermions de Majorana dans des nanofils. En 2021, cet article a été rétracté, car des analyses ultérieures ont montré

que les résultats pouvaient être expliqués par des erreurs expérimentales ou des artefacts. Leurs travaux ont même été remis en question par des articles scientifiques récents.

Comment cela pourrait-il fonctionner ?

En informatique quantique (qubits topologiques) : Les qubits basés sur les fermions de Majorana seraient intrinsèquement tolérants aux erreurs grâce à des propriétés topologiques. L'information serait encodée dans une paire de fermions (ou plus) qui serait moins sujette à des perturbations locales d'un ou l'autre des fermions de la paire. La "décentralisation" de l'information augmenterait sa robustesse aux perturbations locales.

Cette approche reste donc très théorique et constitue le pari de Microsoft relativement à l'informatique quantique. Ce faisant, vu que l'existence même des fermions est très discutée, on est très loin d'une mise en oeuvre technique.

3.4. Qubits à Atomes Neutres

Les qubits à atomes neutres représentent une technologie émergente et prometteuse dans le domaine de l'informatique quantique. Cette approche utilise des atomes neutres individuels (comme le rubidium ou le césium), qui sont piégés et manipulés à l'aide de lasers et de champs optiques.

Comment cela fonctionne-t-il ?

Les atomes neutres sont piégés individuellement dans des "pinces optiques", qui sont des faisceaux laser focalisés créant des puits de potentiel lumineux. Imaginez un rayon laser qui agit comme une "petite main" invisible, capable de maintenir un atome en place.

Les atomes peuvent être disposés en réseaux 1D, 2D, voire 3D, avec des géométries flexibles, ce qui est un atout pour la scalabilité.

L'information est codée dans les états internes de l'atome, souvent des états hyperfins de la structure électronique : $|0\rangle$ =état fondamental, $|1\rangle$ =état excité.

Ces états sont stables et peuvent être manipulés avec une grande précision à l'aide de pulses laser micro-ondes ou optiques.

L'un des atouts majeurs des qubits à atomes neutres est l'utilisation des **états de Rydberg** pour créer des interactions quantiques.

=> **État de Rydberg** : Un atome est excité dans un état où l'un de ses électrons est à une distance très éloignée du noyau. Ces atomes deviennent alors très sensibles aux champs électriques et peuvent interagir fortement avec d'autres atomes proches.

=> **Effet de Blocage de Rydberg (Rydberg Blockade)** : Lorsqu'un atome est excité dans un état de Rydberg, il empêche ses voisins immédiats d'être excités à leur tour. Cela permet de créer des portes quantiques à deux qubits, car l'état d'un qubit influence directement celui d'un autre.

Cette approche pose cependant des défis techniques importants :

=> Les atomes doivent être **parfaitement immobiles** dans le piège optique. Le moindre mouvement peut entraîner une perte de cohérence. Le maintien du vide ultra-poussé est nécessaire pour éviter les collisions avec des molécules d'air.

=> Les **états de Rydberg** sont très sensibles aux perturbations électriques et magnétiques. La durée de cohérence (T_2) des qubits est encore limitée par rapport à d'autres technologies (comme les ions piégés).

=> Nécessité de **lasers ultra-stables** et d'optiques de haute précision. Le contrôle individuel de centaines, voire de milliers d'atomes, demande des systèmes optiques très sophistiqués.

=> Bien que prometteurs, les taux d'erreurs des portes à deux qubits sont encore un peu élevés par rapport aux qubits supraconducteurs ou aux ions piégés.

Mais présente aussi certains bénéfices :

=> Les réseaux d'atomes neutres peuvent être étendus en ajoutant "simplement" plus de pièges optiques. Contrairement aux qubits supraconducteurs, il n'y a pas besoin de câblage complexe pour chaque qubit (mais des lasers ultra-stables et des optiques de haute précision).

=> Possibilité de manipuler des centaines voire des milliers d'atomes dans un seul système. Ça tombe plutôt bien vu les taux d'erreurs qui obligeront à avoir des qubits logiques comportant un grand nombre de qubits physiques.

=> Les atomes peuvent être reconfigurés dynamiquement en changeant la forme des réseaux optiques. Cette flexibilité est idéale pour des algorithmes quantiques spécifiques, notamment en simulation de matériaux et en modélisation de systèmes complexes.

3.5. Qubits photoniques

Les qubits photoniques utilisent des "particules" de lumière, appelées photons, pour stocker et manipuler des informations quantiques. Cette approche est très prometteuse en raison de la vitesse, de la stabilité naturelle des photons, et de la possibilité de créer des réseaux quantiques à grande échelle.

Comment cela fonctionne-t-il ?

Les photons sont manipulés grâce à des composants optiques passifs et actifs :

=> **Fentes et miroirs semi-transparents (beam splitters)** : pour créer des superpositions.

=> **Modulateurs de phase et de polarisation** : pour appliquer des portes logiques quantiques.

=> **Cristaux non linéaires** : pour générer des paires de photons intriqués.

=> **Interféromètres** : pour combiner et mesurer des états quantiques complexes.

Les opérations de base sont **des analogues optiques des portes logiques quantiques**.

Le codage de l'information quantique peut se faire selon plusieurs modalités :

Codage des Qubits :

=> **Polarisation des photons (le plus courant)** : Polarisation horizontale (H) = $|0\rangle$, Polarisation verticale (V) = $|1\rangle$

=> **Chemin optique (dual-rail encoding)** : Le photon dans le chemin optique A = $|0\rangle$, Le photon dans le chemin optique B = $|1\rangle$

=> **Temps d'arrivée (time-bin encoding)** : C'est une variante, avec l'un des chemins optiques plus long (cf interféromètres). Le photon qui arrive plus tôt = $|0\rangle$, le photon qui arrive plus tard = $|1\rangle$

=> **Fréquence des photons** : Utilisation de différentes couleurs (longueurs d'onde) pour coder l'information.

=> L'intrication quantique se fait à l'aide d'interféromètres, ou par génération spontanée de paires à l'aide d'un cristal non linéaire. Le photon est alors converti en une paire de photons intriquée.

Cette technologie pose certains défis technologiques :

=> La détection des photons est délicate, car il faut des **détecteurs très sensibles** capables d'identifier la présence d'un seul photon. Les détecteurs à avalanche ou à transition supraconductrice sont couramment utilisés, mais ils restent coûteux et complexes.

=> Les photons peuvent être perdus lorsqu'ils traversent des fibres optiques, des composants optiques, ou à cause de l'absorption. La perte de photons est un défi majeur pour la correction d'erreurs quantiques.

=> Contrairement aux qubits supraconducteurs ou aux ions piégés, les photons n'interagissent pas naturellement entre eux. Cela rend difficile la création de portes à deux qubits, nécessaires pour les calculs quantiques complexes. Des techniques avancées sont nécessaires, comme l'utilisation de matériaux non linéaires ou d'interférométrie probabiliste.

Et présente certains bénéfices :

=> Les photons peuvent être facilement transmis sur de longues distances via des fibres optiques ou même dans l'air. Cela pose moins de contraintes "environnementales" (réfrigérateur à dilution ou chambre à vide extrême).

=> Possibilité d'intégration sur des **circuits photoniques sur puce**, ce qui facilite la miniaturisation et la fabrication à grande échelle. Les **circuits photoniques intégrés (PIC)** permettent de manipuler des photons sur des puces de silicium, similaires aux circuits électroniques. Cela ouvre la voie à des ordinateurs quantiques photoniques compacts et à des réseaux quantiques globaux.

Les applications (potentielles) de cette technologie sont :

=> **Cryptographie quantique (QKD)** : Les photons sont idéaux pour des communications ultra-sécurisées grâce à des protocoles comme **BB84**.

=> **Réseaux quantiques** : Transmission d'états intriqués sur des distances de plusieurs kilomètres. Pourrait servir de "Bus" (au sens informatique) quantique entre plusieurs ordinateurs quantiques possiblement en architecture hybride (supraconducteurs et photonique par exemple).

=> Le **boson sampling** est un type de calcul quantique où des photons sont envoyés dans des réseaux d'interféromètres. Bien que non universel pour le calcul quantique général, il peut résoudre des problèmes spécifiques plus rapidement que les ordinateurs classiques.

3.6. Qubits à spin de silicium

Les qubits à spin de silicium sont une technologie émergente qui vise à exploiter les propriétés de spin des électrons (ou des noyaux) piégés dans des puits quantiques fabriqués sur des puces de silicium.

Cette approche est prometteuse car elle pourrait permettre de construire des ordinateurs quantiques en s'appuyant sur l'infrastructure des technologies CMOS utilisées dans l'industrie des semi-conducteurs.

Comment cela fonctionne-t-il ?

Le **spin** est une propriété quantique fondamentale des particules, souvent comparée à un "**moment magnétique intrinsèque**".

Pour un électron, le spin peut être dans deux états :

- $|0\rangle = \uparrow$ (spin vers le haut),
- $|1\rangle = \downarrow$ (spin vers le bas),

Ce degré de liberté binaire en fait un excellent support pour coder un qubit. La sphère de Bloch est idéale pour (se) représenter le spin.

Les électrons sont piégés dans des **puits quantiques** (ou points quantiques) fabriqués sur des puces de silicium. Ces puits sont créés par des grilles métalliques nanométriques qui appliquent des potentiels électrostatiques pour confiner un seul électron à un endroit précis.

Le spin est manipulé par des **champs magnétiques** ou des **impulsions micro-ondes**. Deux techniques courantes :

- **Résonance de spin électronique (ESR)** : des micro-ondes font basculer le spin entre les deux états $|\uparrow\rangle$ et $|\downarrow\rangle$.
- **Spin-Orbit Coupling** : exploite l'interaction entre le spin et le mouvement de l'électron dans le cristal de silicium pour des contrôles plus précis.

Pour créer des **portes logiques à deux qubits** (essentiels pour les algorithmes quantiques) :

- On utilise des interactions d'échange de spin (exchange interaction), où deux électrons voisins peuvent échanger leur état de spin si leurs nuages de probabilité se chevauchent.
- Cette interaction est contrôlée par des grilles de potentiel qui modifient la distance entre les électrons piégés.

Quelles sont les contraintes ou inconvénients de cette approche ?

- Sensible au bruit (électromagnétique) : Le spin est sensible aux **fluctuations du champ magnétique**, ce qui peut provoquer des erreurs. C'est d'ailleurs cette propriété qui est utilisée en IRM pour "aligner" les spins en appliquant un champ magnétique très intense (1.5 à 3 Tesla, voir jusqu'à 11 Tesla) et ensuite mesurer les temps de relaxation.
- Le silicium purifié (isotope 28) est utilisé pour réduire les interactions indésirables avec les noyaux de la matrice, améliorant ainsi la cohérence.
- La manipulation de spins individuels nécessite des contrôles électromagnétiques extrêmement précis.
- La variabilité de fabrication à l'échelle nanométrique peut introduire des bruits de charge qui affectent la fidélité des opérations.
- Bien que le silicium permette une miniaturisation, la densité des interconnexions et la gestion des lignes de contrôle restent des défis majeurs pour des systèmes à grande échelle.

Quels en sont les avantages ?

- **Compatibilité avec la technologie CMOS** : Les qubits à spin peuvent être fabriqués avec les mêmes techniques que les puces électroniques classiques, ce qui permet une intégration massive.
- **Miniaturisation** : La petite taille des qubits à spin permet d'envisager des processeurs quantiques avec des milliers, voire des millions de qubits sur une seule puce.
- Avec des techniques avancées (purification isotopique, contrôle des défauts), les qubits à spin peuvent atteindre des temps de cohérence de l'ordre de plusieurs millisecondes, ce qui est très compétitif comparativement aux architectures supraconductrices par exemple.

Pour quelles applications potentielles ?

- Les qubits à spin peuvent théoriquement exécuter **n'importe quel algorithme quantique**, des problèmes d'optimisation aux simulations de matériaux.
- Grâce à leur compatibilité avec la technologie CMOS, les qubits à spin pourraient être facilement intégrés dans des **systèmes hybrides** combinant calcul classique et quantique.
- Potentiel pour des applications en **cryptographie quantique** et en **intelligence artificielle** nécessitant des architectures compactes et rapides.

3.7 Analyse de la maturité technologique : Calculateur Versus Ordinateur

L'informatique quantique suscite un engouement considérable, souvent accompagné d'attentes démesurées quant à son impact imminent sur des domaines comme la cryptographie, l'optimisation ou la simulation de matériaux. Pourtant, malgré des avancées significatives, la technologie en est encore à ses balbutiements.

En dépit des annonces tonitruantes de Google au sujet de sa puce Sycamore et de sa suprématie quantique (elle aurait réalisé un calcul en 5 minutes alors qu'un "ordinateur" traditionnel aurait mis 47 ans pour le faire)... Il faut justement comprendre que Sycamore est plus un calculateur quantique qu'un ordinateur quantique (versatile).

=> Calculateur Quantique (Quantum Calculator)

Un **calculateur quantique** est un système quantique conçu pour effectuer des **calculs spécifiques**. Il est souvent :

- **Optimisé pour des tâches précises**, comme la **simulation de systèmes physiques**, des **problèmes d'optimisation** ou des calculs mathématiques spécialisés.

- **Non universel** : il ne peut pas exécuter n'importe quel type d'algorithme, seulement ceux pour lesquels il a été conçu.
- Moins flexible qu'un ordinateur, mais souvent plus efficace pour des **problèmes ciblés**.

Exemples :

- Le **D-Wave** est un calculateur quantique basé sur l'**annealing quantique**, optimisé pour des problèmes d'optimisation combinatoire.
- Les systèmes de **boson sampling** (comme ceux de **Xanadu**) sont des calculateurs quantiques spécialisés dans des tâches de comptage complexes, mais pas des ordinateurs quantiques universels.
- **Google Sycamore....**

=> Ordinateur Quantique (Quantum Computer)

Un **ordinateur quantique** est une machine capable de :

- **Exécuter des algorithmes quantiques universels**, c'est-à-dire toute une variété de calculs, y compris des algorithmes complexes comme **Shor** (factorisation), **Grover** (recherche rapide dans des bases de données), etc.
- **Gérer des qubits logiques corrigés d'erreurs**, permettant des calculs de longue durée avec des résultats fiables.
- Être programmé de manière flexible, comme un ordinateur classique, mais en exploitant la **superposition**, l'**intrication**, et l'**interférence quantique**.

Exemple :

- Les processeurs d'IBM (comme **Eagle** ou **Condor**) visent à devenir des ordinateurs quantiques universels.

=> Pourquoi Cette Distinction entre calculateur et ordinateur est importante ?

- **Marketing et attentes irréalistes** : Certaines entreprises vendent des calculateurs quantiques spécialisés sous le terme d'"ordinateurs quantiques", créant des attentes exagérées quant à leurs capacités.
- **État de la technologie** : Aujourd'hui, la plupart des systèmes quantiques commercialisés sont encore des calculateurs quantiques spécialisés dans des tâches bien définies. Les ordinateurs quantiques universels, capables de résoudre des problèmes complexes de manière fiable, sont encore en phase de recherche et développement.

- **Différences en matière de scalabilité et de fiabilité** : Un ordinateur quantique peut être très efficace pour des problèmes spécifiques avec peu de qubits, mais il ne peut pas évoluer vers des applications universelles sans une gestion complexe des erreurs. : Certaines entreprises vendent des ordinateurs quantiques spécialisés sous le terme d'"ordinateurs quantiques", créant des attentes exagérées quant à leurs capacités.

3.8. Back to the future : L'informatique quantique en est à un stade similaire à celui de l'informatique classique dans les années 50/60

Ainsi que nous l'avons vu (et allons le voir en manipulant la plateforme d'informatique quantique d'IBM), pour l'heure les "ordinateurs" quantiques en sont à leurs "balbutiements", avec différentes architectures "en compétition", qui pourraient à terme être mises en oeuvre de façon "hybride" pour tirer le meilleur parti des différents bénéfices attendus de chacune des architectures, tout en limitant l'impact de leurs désavantages. En terme de "feuille de route" et d'atteinte de jalons majeurs, on peut anticiper que dans :

- **5 à 10 ans** : Progression vers des **démonstrations de qubits logiques corrigés d'erreurs**.
- **10 à 20 ans** : Développement de processeurs quantiques capables de **résoudre des problèmes pratiques** mieux que les ordinateurs classiques.
- **Au-delà** : Si les obstacles sont surmontés, potentiel pour des applications disruptives dans la chimie quantique (modélisation moléculaire, "drug discovery"), la cryptographie post-quantique, et l'optimisation à grande échelle (.

Ce qu'il faut comprendre, c'est que loin de toutes les annonces "très très très optimistes", voire totalement "fantaisistes" relevant plus de la fiction que de la science, **l'informatique quantique** est à un stade similaire à celui de **l'informatique classique dans les années 1950** : des machines impressionnantes en laboratoire, mais encore loin des usages grand public.

Mais que cela ne tempère pas notre enthousiasme. Voyons ce que nous pouvons d'ores et déjà tester grâce à quantum.ibm.com

4. OK mais tout ça depuis mon PC à la maison ?

Nous avons vu tous les raffinements technologiques qui soutiennent le développement de l'informatique quantique dans des laboratoires en pointe dans leur domaine de recherche.

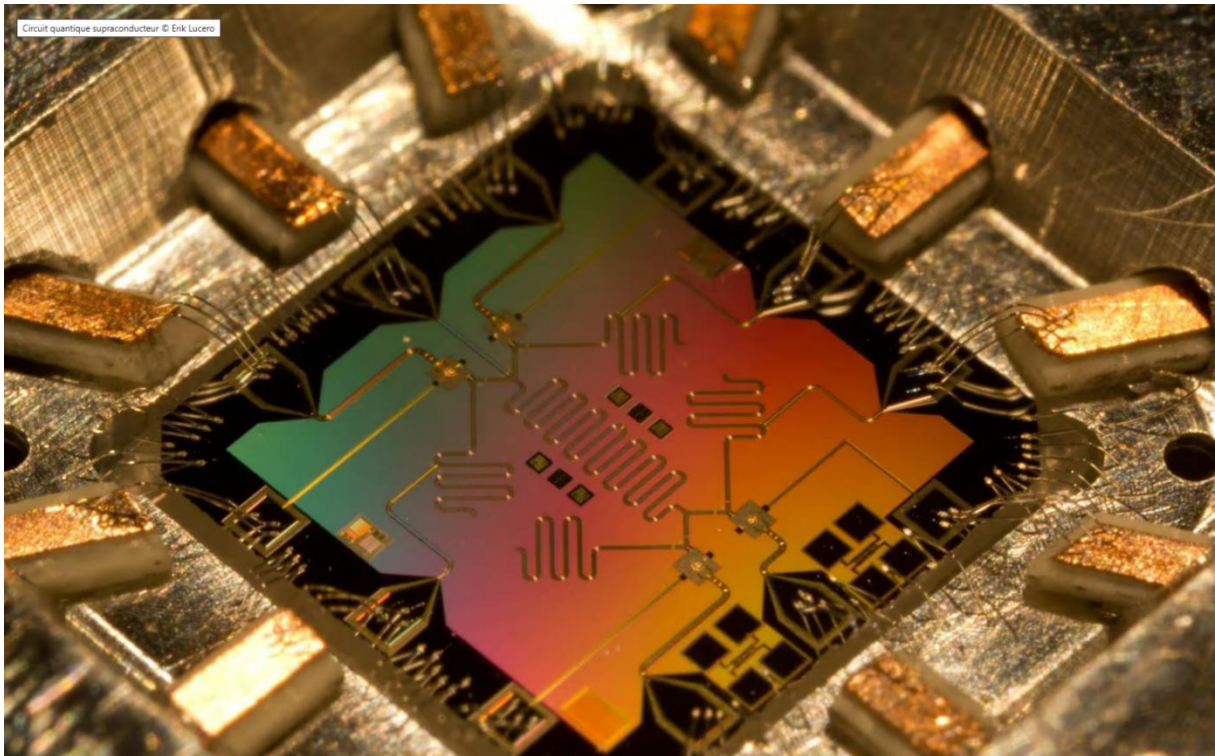
Cela pourrait nous sembler inaccessible...Cela l'était dans les années 1950/1960 : les ordinateurs à tubes à vide (ENIAC, 1945), à transistors (IBM System 360, 1964), à circuits

intégrés (IBM System 370, 1970) n'étaient accessibles qu'aux chercheurs qui les développaient puis à des clients "grands comptes" utilisant ces mainframes.

Désormais, grâce au cloud, cette puissance de calcul est accessible via des plateformes spécialisées dont quantum.ibm.com qui offre 10 minutes de calcul quantique par mois. Le processus est similaire à celui de l'accès à des super calculateurs : il faut définir un job, puis le charger dans la file d'attente de l'ordinateur quantique, et attendre que ce dernier exécute votre job pour pouvoir obtenir le résultat. En fonction de la taille des files d'attente, cela peut prendre plusieurs heures !

Vous pouvez donc depuis votre PC, créer des qubits, les intriquer, créer des portes logiques quantiques... en utilisant des jonctions de Josephson (+ condensateurs), et des lignes de transmission de micro-ondes pour interagir avec les qubits physiques au travers d'une interface utilisateur ergonomique :

- Le processus de contrôle des qubits commence sur votre ordinateur : les instructions sont envoyées via le cloud à des équipements électroniques situés à température ambiante.
- Ces équipements traduisent les instructions en véritables impulsions micro-ondes. Les impulsions voyagent ensuite à travers des câbles jusqu'à un réfrigérateur à dilution, qui refroidit le système à des températures proches du zéro absolu.
- Finalement, les signaux atteignent la puce quantique, passent par des résonateurs et des fils de connexion ultra-fins, avant d'arriver directement aux qubits pour les manipuler.



Détail d'un circuit quantique supraconducteur

[\(source de l'image\)](#)

C'est tout à fait incroyable et émouvant de pouvoir accéder à ces technologies depuis votre ordinateur personnel, et de disposer d'une interface simple pour pouvoir manipuler/configurer des portes quantiques logiques sur cette œuvre d'art technologique ou d'exécuter du code.

Nous allons aborder cette interface et son utilisation dans la "louche #3".