**Description**

**Titre : Dispositif de détection de photons micro-ondes uniques**

**Domaine technique**

L'invention se situe dans le domaine des capteurs quantiques et concerne plus particulièrement le domaine de l'instrumentation de mesure de puissance dans la gamme micro-onde du spectre électromagnétique.

L'invention porte sur un dispositif de détection de photons uniques dans la gamme micro-onde. La gamme micro-onde correspond à des fréquences de photon de l'ordre de 1 à 20 GHz.

L'invention porte également sur un procédé de détection de photons micro-ondes uniques mis en œuvre par un tel dispositif.

**Technique antérieure**

Il existe des dispositifs de détection de photons uniques très performants dans les domaines optique et infrarouge. Ces dispositifs ont des efficacités de détection très élevées (proches de l'unité), de faibles bruits d'opération et des modes d'opération quasiment continus. Ils sont notamment mis en œuvre dans la réalisation d'expériences d'optique quantique, par exemple pour préparer des états non classiques, pour générer de l'intrication, ou encore pour produire des clés cryptographiques partagées à distance.

Cependant, dans le domaine micro-onde, les photons sont difficiles à détecter en raison de leur très faible énergie. Or la détection de puissance électromagnétique dans la gamme des micro-ondes est une problématique importante dans divers domaines technologiques : on pourra citer les télécommunications (notamment les technologies 3G, 4G, Wi-Fi), les technologies radar, l'imagerie médicale ou encore l'analyse chimique (notamment la résonance magnétique).

L'utilisation de capteurs quantiques permet de compter les photons uniques dans le domaine micro-onde et donc de résoudre l'aspect corpusculaire du rayonnement électromagnétique. La détection de puissance est réalisée par la mesure du flux de photons par unité de temps. Cela mène à une détection de puissance dont la sensibilité est optimale.

L'article « *Cyclically Operated Microwave Single-Photon Counter with Sensitivity of 1e-22 W / sqrt(Hz)* », Balembois et al., PRApplied (2023) décrit un dispositif de détection de photon micro-onde unique à un bit quantique.

Le brevet FR 3090891 B1 décrit un dispositif 1 de détection de photon micro-onde unique tel que celui représenté à la figure 1.

Le dispositif de détection 1 est un circuit supraconducteur contenant un bit quantique 10, ou qubit, supraconducteur pouvant prendre deux états quantiques notés |g> (pour *ground*, soit l'état fondamental) et |e> (pour *excited*, soit un état excité). Le bit quantique 10 a pour fréquence de transition $f_q$. La différence d'énergie entre les états |g> et |e> est $f_q$ . h, où h est la constante de Planck.

Le bit quantique 10 est représenté par un condensateur agencé en parallèle à une jonction Josephson sur la figure 1.

Un résonateur d'entrée 12 est couplé à une ligne de transmission 16 de photons et au bit quantique 10. Le résonateur d'entrée 12 oscille à une fréquence $f_a$ et permet de recueillir un photon incident 2.

Un résonateur de sortie 14 est couplé au bit quantique 10 et à une ligne de transmission 18 de photons par un couplage capacitif 15. Le résonateur de sortie 14 oscille à une fréquence $f_b$ et permet de relâcher un photon de sortie 3 après la détection du photon incident 2.

Les résonateurs d'entrée et de sortie 12, 14 sont chacun représentés par un condensateur agencé en parallèle à une inductance sur la figure 1.

Un ton de pompe micro-onde 4, c'est-à-dire un signal cohérent, oscillant à une fréquence $f_p$ est appliqué sur le qubit 10 pour activer le processus de détection. Le ton de pompe 4 est transmis au qubit 10 par une ligne de transmission 20.

Une détection d'un photon micro-onde est réalisée lorsque le bit quantique 10 est excité, ce qui est provoqué par le passage du photon dans le dispositif de détection.

En effet, dans un premier temps, le photon incident 2 entre dans le résonateur d'entrée 12.

Le photon incident 2 se combine ensuite avec le ton de pompe 4. Cela active un mélange à quatre ondes dans lequel le photon incident 2 est converti en une excitation du bit quantique 10, qui passe de l'état fondamental |g> à l'état excité |e>, ainsi qu'en un photon de sortie 3 émis dans le résonateur de sortie 14.

Ce processus de mélange à quatre ondes est possible lorsque la fréquence du pompage paramétrique satisfait la conservation de l'énergie $f_p + f_a = f_q + f_b$. Autrement dit, l'énergie du photon incident 2 et d'un photon du ton de pompe 4 doit être égale à l'énergie de l'excitation du bit quantique 10 et d'un photon de sortie 3.

Le photon de sortie 3 créé dans le résonateur de sortie est réémis en tant que photon propageant vers l'extérieur. En l'absence du photon 3 dans le résonateur de sortie, le bit quantique 10 ne peut pas revenir à l'état fondamental en suivant le processus inverse de mélange à quatre ondes : il reste donc à l'état excité.

La mesure de l'état du bit quantique 10 permet de déterminer s'il se trouve dans l'état fondamental ou dans l'état excité, qui correspond à la détection d'un photon incident 2. Si le bit quantique 10 est mesuré dans l'état excité, on enregistre un événement de comptage et on réinitialise le bit quantique dans son état fondamental. Le processus de détection peut alors reprendre.

Cependant, il est possible que le bit quantique 10 soit excité indépendamment de la détection d'un photon micro-onde. Cela peut être provoqué par exemple par du bruit thermique, par une quasiparticule ou par un rayonnement énergétique. Dans ce cas, un événement de comptage sera enregistré en l'absence de photon incident. Ces événements génèrent donc des faux positifs, c'est-à-dire du bruit d'obscurité.

Les sources principales du bruit d'obscurité sont les imperfections du détecteur et les photons thermiques issus de l'environnement.

Lorsque le flux de photons par unité de temps est très faible, le bruit d'obscurité limite la sensibilité du comptage des photons.

Le bruit d'obscurité peut être réduit en minimisant les excitations spontanées du bit quantique, par exemple en améliorant l'écrantage du dispositif, sa thermalisation ou encore en améliorant les techniques de nano-fabrication du dispositif. Ces précautions ne sont toutefois pas toujours suffisantes.

De plus, pour être sensible, le comptage de photon aux fréquences micro-ondes doit être efficace. La probabilité de comptabiliser un événement de détection, lorsqu'un photon incident impacte le résonateur d'entrée, doit être la plus grande possible, si possible arbitrairement proche de l'unité.

La sensibilité d'un dispositif de comptage de photons micro-ondes peut être quantifiée par une quantité notée NEP (acronyme de « *noise equivalent power* », ou

puissance équivalente de bruit) qui correspond à la puissance minimale détectable avec un rapport signal sur bruit de 1 pour un temps d'intégration d'une seconde. Cette quantité est exprimée en $W.s^{1/2}$ et est définie pour un dispositif de comptage de photons par l'équation :

$$NEP = h.f_a.\sqrt{\alpha}/\eta$$

où h est la constante de Planck, $f_a$ la fréquence d'opération du détecteur, α le compte d'obscurité en Hz ou $s^{-1}$ et η l'efficacité du détecteur, c'est-à-dire la probabilité d'obtenir un signal de détection lorsqu'un photon arrive sur le détecteur.

Le brevet US9692423B2 concerne un système de lecture de bits quantiques qui permet de compter un nombre de photons micro-onde incidents de manière non destructrice.

Il existe un besoin pour un dispositif de détection de photons micro-ondes uniques qui minimise le bruit d'obscurité tout en proposant une efficacité élevée.

Le but de l'invention est de répondre au moins en partie à ce besoin.

**Exposé de l'invention**

Pour ce faire, l'invention concerne, selon l'un de ses aspects, un dispositif de détection de photon micro-onde unique, comportant :

- un système quantique multi-état comportant N qudit(s), N étant supérieur ou égal à 1, le système étant capable d'opérer, en réponse à la réception d'un photon micro-onde incident, un nombre X supérieur ou égal à 2 de transitions énergétiques entre des niveaux énergétiques répartis entre le(s) N qudit(s), ces transitions énergétiques correspondant à des fréquences respectives $f_1$, …, $f_X$,
- un ensemble de résonnateurs définissant X+1 modes électromagnétiques de fréquences respectives $f_{M,1}$ à $f_{M,X+1}$,
- un système de pompage paramétrique pour appliquer X tons de pompe de fréquences $f_{p,i}$ respectives, vérifiant $f_{M,i} + f_{p,i} = f_i + f_{M,i+1}$ avec chaque entier i allant de 1 à X, de manière à convertir en fréquence, par pompage paramétrique, l'excitation contenue dans un mode électromagnétique i en une excitation du mode électromagnétique i+1 et une transition i du qudit concerné,
- un système de lecture des niveaux d'énergie du ou des qudit(s) du système quantique fournissant une information renseignant sur la réception ou non d'un photon micro-onde incident.

Le terme « qudit » désigne un sous-système quantique à au moins deux niveaux énergétiques, c'est-à-dire capable d'opérer au moins une transition énergétique. Un qubit est un qudit à deux niveaux. Un « qubit » présente ainsi un état fondamental et un état excité.

Le dispositif de détection est ainsi configuré pour convertir un photon du mode électromagnétique $M_i$ et un ton de pompe de fréquence $f_{p,i}$ en une excitation du qubit $Q_i$ et un photon du mode électromagnétique $M_{i+1}$, pour i compris entre 1 et X inclus.

Le processus de conversion est connu en soi, étant décrit notamment dans le brevet FR3090891. Il est activé par la combinaison du photon du mode électromagnétique $M_i$ et du ton de pompe de fréquence $f_{p,i}$ et consiste en une interaction modulable à quatre ondes.

Le ton de pompe de fréquence $f_{p,i}$ est de préférence appliqué au qubit $Q_i$.

De préférence, le dispositif de détection est configuré de sorte que la conversion du photon du mode électromagnétique $M_X$ en une excitation du qubit $Q_X$ ait un taux de transfert $\Gamma_X$ inférieur ou égal au taux de dissipation $\kappa_w$ du mode électromagnétique de sortie $M_{X+1}$.

Le photon incident peut être transmis au résonateur d'entrée par une ligne de transmission couplée à ce résonateur. Le photon de sortie du résonateur de sortie peut être évacué par une ligne de transmission couplée à ce résonateur.

La fréquence du photon incident peut être comprise entre 1 et 25 GHz, avantageusement entre 1 et 20 GHz. En particulier, elle peut être comprise entre 4 et 8 GHz.

Le dispositif de détection est de préférence opéré à une température cryogénique inférieure à 1 K, de préférence inférieure à 20 mK, notamment de l'ordre de 10 mK. Les bits quantiques sont de préférence supraconducteurs.

De préférence, l'ensemble de résonnateurs comporte X+1 résonnateurs définissant les X+1 modes électromagnétiques. Alternativement, l'ensemble de résonnateurs comporte un nombre inférieur à X+1 résonnateurs qui définissent les X+1 modes électromagnétiques. Autrement dit, selon cette variante certains résonnateurs définissent plus de deux modes électromagnétiques.

Le système quantique peut comprendre au moins un qudit sur lequel s'opèrent plus d'une transition, notamment deux transitions, voire les X transitions énergétiques.

Le système quantique peut comprendre au moins deux qudits spatialement distincts, entre lesquels sont réparties les X transitions énergétiques. Par exemple, l'un au moins des

deux qudits est un qubit. Les deux qudits peuvent être des qubits. L'un au moins des deux qudits peut présenter au moins trois niveaux énergétiques, à savoir un niveau fondamental et deux niveaux excités.

Le système quantique peut comprendre un qubit sur lequel s'opère l'une des transitions énergétiques et un qudit à au moins trois niveaux sur lequel s'opère au moins une autre des transitions énergétiques.

Le ou les qudits sont de préférence des qudits supraconducteurs de type transmon.

Le système de lecture peut mesurer l'état de chaque qudit. Alternativement, le système de lecture renvoie une information logique sur l'état du système quantique dans son ensemble, sans fournir d'information spécifique à l'état individuel de chaque qudit.

Par exemple, le système de lecture comprend au moins un résonnateur de lecture, le ou les résonnateur(s) de lecture étant couplé(s) à un ou des qudits correspondants. Le détecteur de photon peut comporter au moins autant de résonnateur(s) de lecture que de qudit(s).

Le système peut comporter un résonateur d'entrée couplé à une source de photons micro-ondes et un résonnateur de sortie couplé à un environnement dissipatif adapté à dissiper un photon micro-onde.

Le résonateur d'entrée peut comporter un dispositif SQUID configuré pour accorder la fréquence du résonateur d'entrée. Cela permet de gagner en efficacité de détection.

Le résonnateur de sortie peut former l'un des résonnateurs de lecture du système de lecture.

Un autre aspect de l'invention concerne un procédé de détection de photon micro-onde unique incident à l'aide d'un dispositif de détection de photon micro-onde, notamment tel que défini ci-dessus, le dispositif de détection comprenant un système quantique multi-état comportant N qudit(s), N étant supérieur ou égal à 1, le système étant capable d'opérer, en réponse à la réception d'un photon micro-onde incident, un nombre X supérieur ou égal à 2 de transitions énergétiques entre des niveaux énergétiques, réparties entre le(s) N qudit(s), ces transitions énergétiques correspondant à des fréquences respectives $f_1$, …, $f_X$, le procédé comportant les étapes suivantes :

a/ appliquer X tons de pompe de fréquences $f_{p,i}$ respectives, vérifiant $f_{M,i} + f_{p,i} = f_i + f_{M,i+1}$ avec chaque entier i allant de 1 à X, de manière à convertir en fréquence, par pompage paramétrique, l'excitation contenue dans un mode

électromagnétique i en une excitation du mode électromagnétique i+1 et une transition i du qudit concerné,

b/ lire des niveaux d'énergie du ou des qudit(s) du système quantique et en déduire une information renseignant sur la réception ou non d'un photon micro-onde incident par le détecteur.

Au moins l'une des transitions énergétiques peut être une transition d'un qubit depuis un état fondamental vers un état excité.

Au moins l'une des transitions énergétiques peut être une transition d'un qudit depuis un état fondamental vers un état excité ou entre deux états excités successifs.

L'étape de lecture des niveaux d'énergie du ou des qudit(s) peut consister à détecter si une majorité de transitions énergétiques a été opérée dans le système quantique. Optionnellement, le système quantique comprend un nombre X impair de transitions énergétiques.

L'étape de lecture des états du ou des qudit(s) peut consister à détecter si les X transitions énergétiques ont effectivement été opérées.

Le procédé peut comporter, préalablement à l'étape a/, une étape d'ajustement de la bande passante du système quantique dans laquelle l'amplitude $A_i$ des fréquences des tons de pompe est déterminée de sorte à ajuster ladite bande passante à une valeur désirée.

Un autre aspect de l'invention concerne un dispositif de détection d'un photon micro-onde unique comprenant :

- un nombre N supérieur ou égal à 2 de bits quantiques $Q_1$, ..., $Q_N$ à deux niveaux énergétiques dont l'état fondamental et un état excité sont contrôlables et détectables, la transition entre les états fondamental et excité de chaque bit quantique $Q_i$ ayant une fréquence $f_{q,i}$ pour i compris entre 1 et N inclus,
- un résonateur d'entrée $R_1$ configuré pour recevoir un photon micro-onde unique incident et ayant une fréquence $f_{r,1}$, le résonateur d'entrée étant couplé à un premier bit quantique $Q_1$ des N bits quantiques,
- un résonateur de sortie $R_{N+1}$ configuré pour évacuer un photon de sortie et ayant une fréquence $f_{r,N+1}$, le résonateur de sortie étant couplé à un N-ième bit quantique $Q_N$ des N bits quantiques,
- un nombre (N-1) de résonateurs bus $R_j$ configurés pour transmettre un photon intermédiaire du bit quantique $Q_{j-1}$ au bit quantique $Q_j$ et ayant chacun une fréquence $f_{r,j}$, pour j compris

entre 2 et N inclus,

- un nombre N de systèmes de lecture chacun couplé à l'un des N bits quantiques de sorte à détecter l'état dudit bit quantique,

- un nombre N de lignes de transmission de pompage paramétrique chacune configurée pour transmettre un ton de pompe à l'un des N bits quantiques et/ou à l'un des résonateurs d'entrée, de sortie ou bus, de sorte qu'un photon d'un résonateur d'entrée ou bus $R_i$ et un ton de pompe de fréquence $f_{p,i} = f_{q,i} + f_{r,i+1} - f_{r,i}$ puissent être convertis en une excitation du bit quantique $Q_i$ et un photon du résonateur bus ou de sortie $R_{i+1}$, pour i compris entre 1 et N inclus.

Grâce au dispositif de détection selon l'invention, le bruit d'obscurité est fortement réduit. En effet, la redondance due à l'utilisation d'une pluralité de qudits permet de limiter les faux positifs provoqués par une excitation indésirée des qudits. L'impact d'un photon incident sur le dispositif de détection déclenche une cascade d'excitation des qudits. Par conséquent, la détection d'un photon peut n'être comptabilisée que lorsque le système de lecture détecte qu'au moins une majorité des transitions énergétiques possibles ont effectivement eu lieu. Un événement qui ne déclencherait qu'une seule transition énergétique ou qu'une minorité de transitions énergétiques peut donc être identifié comme du bruit d'obscurité et écarté.

Dans un cas particulier où le système quantique comprend une chaîne de qubits, la détection d'un photon n'est comptabilisée que lorsque plusieurs au moins des bits quantiques sont mesurés simultanément dans leur état excité. Un événement qui ne déclencherait l'excitation que d'un bit quantique ou d'une minorité de bits quantiques peut donc être identifié comme du bruit d'obscurité et écarté.

Par ailleurs, lorsque l'environnement du dispositif de détection n'est pas suffisamment refroidi, il peut être peuplé de photons thermiques qui peuvent provoquer un comptage erroné et donc générer un bruit d'obscurité. Comme on le verra par la suite, le dispositif de détection selon l'invention permet un ajustement dynamique de sa bande passante à la fréquence du signal à mesurer. Cela réduit de manière considérable le bruit d'obscurité thermique.

Selon une caractéristique avantageuse, les N bits quantiques sont des bits quantiques supraconducteurs de type transmon.

Selon une autre caractéristique avantageuse, chaque système de lecture comprend un résonateur.

De préférence, le système de lecture couplé au N-ième bit quantique $Q_N$ comprend le résonateur de sortie $R_{N+1}$. Il n'est alors pas nécessaire de coupler un résonateur de lecture spécifique au dernier bit quantique $Q_N$ puisque le résonateur de sortie $R_{N+1}$ permet de réaliser la lecture de l'état du qubit.

Alternativement, le système de lecture couplé au N-ième bit quantique $Q_N$ est distinct du résonateur de sortie $R_{N+1}$.

Avantageusement, le résonateur d'entrée, le résonateur de sortie et les résonateurs bus sont des résonateurs micro-ondes supraconducteurs.

Selon une caractéristique avantageuse, le résonateur d'entrée est couplé à une source de photons micro-ondes et le résonateur de sortie est couplé à un environnement dissipatif adapté pour dissiper un photon micro-onde.

Avantageusement, le résonateur d'entrée comporte un dispositif SQUID configuré pour accorder la fréquence du résonateur d'entrée.

L'invention concerne encore un procédé de détection d'un photon micro-onde unique mis en œuvre au moyen d'un dispositif de détection tel que décrit ci-dessus, comprenant les étapes consistant à :

a/ appliquer à chaque bit quantique $Q_i$ un ton de pompe de fréquence $f_{p,i} = f_{q,i} + f_{r,i+1} - f_{r,i}$, pour i compris entre 1 et N inclus ;

b/ mesurer l'état de chaque bit quantique $Q_i$.

Selon un mode de réalisation avantageux, le dispositif de détection comprend un nombre impair de bits quantiques et le procédé comporte, après l'étape b/, une étape c/ de détection dans laquelle on détermine si au moins une majorité (N+1)/2 des bits quantiques est mesurée dans l'état excité, auquel cas un événement de détection est comptabilisé.

Alternativement, le procédé comporte, après l'étape b/, une étape c1/ de détection dans laquelle on détermine si tous les bits quantiques sont mesurés dans l'état excité, auquel cas un événement de détection est comptabilisé.

Selon une caractéristique avantageuse, le procédé comporte, préalablement à l'étape a/, une étape a0/ d'ajustement de la bande passante du dispositif de détection dans laquelle l'amplitude $A_i$ des tons de pompe de fréquence $f_{p,i}$ est déterminée de sorte à ajuster ladite bande passante à une valeur désirée.

En ajustant l'amplitude des tons de pompe, il est possible d'ajuster la bande passante du dispositif de détection. L'adaptation bien choisie de la bande passante du dispositif à la fréquence des photons à détecter permet de réduire fortement le bruit d'obscurité thermique.

De préférence, les amplitudes $A_i$ des tons de pompe sont choisies de sorte que les taux de transfert $\Gamma_i$ de photons dans les résonateurs $R_i$ soient tous égaux à une même valeur $\Gamma$. La bande passante du dispositif est alors déterminée par la valeur de $\Gamma$.

Ainsi, pour détecter un photon micro-onde incident, ce dernier est dans un premier temps reçu dans le résonateur d'entrée du dispositif de détection. En combinaison avec l'application d'un pompage paramétrique, le photon incident est converti en une excitation du premier bit quantique et un photon dans le résonateur bus couplé au premier bit quantique. Ce photon intermédiaire, en combinaison avec l'application du pompage paramétrique, est lui-même converti en une excitation du bit quantique suivant et un photon. De la même façon, l'ensemble des bits quantiques du dispositif de détection est excité. Une étape de lecture de l'état des bits quantiques permet ensuite de confirmer la détection d'un photon incident.

**Brève description des dessins**

[Fig 1] La figure 1 représente un dispositif de détection de photons micro-ondes uniques selon l'art antérieur ;

[Fig 2] La figure 2 représente, de façon schématiqueun dispositif de détection de photons micro-ondes selon l'invention ;

[Fig 3] La figure 3 représente, schématiquement, le fonctionnement du dispositif de détection selon un mode de réalisation de l'invention ;

[Fig 4] [Fig 5] Les figures 4 et 5 illustrent, schématiquement, le fonctionnement du dispositif de détection selon un deuxième mode de réalisation de l'invention ;

[Fig 6] La figure 6 illustre, schématiquement, le dispositif de détection selon un troisième mode de réalisation de l'invention ;

[Fig 7a] La figure 7a illustre, schématiquement, l'excitation d'un qudit dans un premier niveau excité ;

[Fig 7b] [Fig 7c] [Fig 7d] Les figures 7b à 7d sont des graphiques illustrant les mesures effectuées sur le qudit dans le premier niveau d'excitation;

[Fig 7e] La figure 7e illustre, schématiquement, le qudit de la figure 7a à l'état fondamental ;

[Fig 7f] [Fig 7g] [Fig 7h] Les figures 7f à 7h sont des graphiques illustrant les mesures effectuées sur le qudit dans l'état fondamental ;

[Fig 8a] La figure 8a illustre, schématiquement, le qudit amené dans le deuxième niveau d'excitation ;

[Fig 8b] [Fig 8c] [Fig 8d] Les figures 8b à 8d sont des graphiques illustrant les mesures effectuées sur le qudit dans son deuxième niveau d'excitation ;

[Fig 8e] La figure 8e illustre, schématiquement, les mesures effectuées sur le qudit dans son premier niveau d'excitation ;

[Fig 8f] [Fig 8g] [Fig 8h] Les figures 8f à 8h sont des graphiques illustrant les mesures effectuées sur le qudit dans son premier niveau d'excitation ;

[Fig 9a] La figure 9a illustre, schématiquement, un qudit amené dans le deuxième niveau excité ;

[Fig 9b] [Fig 9c] [Fig 9d] Les figures 9b à 9d sont des graphiques illustrant les mesures effectuées sur le qudit dans son deuxième niveau excité ;

[Fig 9e] La figure 9e illustre, schématiquement, le qudit dans son niveau fondamental ;

[Fig 9f] [Fig 9g] [Fig 9h] Les figures 9f à 9h sont des graphiques illustrant les mesures du qudit dans son état fondamental.

[Fig 10] La figure 10 représente un cas particulier d'un dispositif de détection de photons micro-ondes uniques selon l'invention ;

[Fig 11] La figure 11 représente une variante du cas particulier du dispositif de détection de photons micro-ondes uniques illustré sur la figure10 ;

[Fig 12] La figure 12 est un graphique illustrant la probabilité de détection d'une excitation du premier bit quantique du dispositif de la figure 11 en présence d'un signal de sonde.

[Fig 13] La figure 13 est un graphique illustrant la probabilité de détection d'une excitation du premier bit quantique du dispositif de la figure 11 en l'absence d'un signal de sonde.

[Fig 14] La figure 14 est un graphique illustrant la probabilité de détection d'une excitation du deuxième bit quantique du dispositif de la figure 11 en présence d'un signal de sonde.

[Fig 15] La figure 15 est un graphique illustrant la probabilité de détection d'une excitation du deuxième bit quantique du dispositif de la figure 11 en l'absence d'un signal de sonde.

[Fig 16] La figure 16 est un graphique illustrant la probabilité d'une détection simultanée d'une excitation des premier et deuxième bits quantiques du dispositif de la figure 11 en présence d'un signal de sonde.

[Fig 17] La figure 17 est un graphique illustrant la probabilité d'une détection simultanée d'une excitation des premier et deuxième bits quantiques du dispositif de la figure 11 en l'absence d'un signal de sonde.

[Fig 18] La figure 18 illustre la réponse des bits quantiques du dispositif de la figure 11 à un premier flux de photons.

[Fig 19] La figure 19 illustre la réponse des bits quantiques du dispositif de la figure 11 à un deuxième flux de photons.

[Fig 20] La figure 20 illustre la réponse des bits quantiques du dispositif de la figure 11 à un troisième flux de photons.

[Fig 21] La figure 21 représente un troisième mode de réalisation d'un dispositif de détection selon l'invention.

**Description détaillée**

La figure 1 a été décrite en préambule et ne sera pas commentée ci-après.

Par souci de clarté, les mêmes éléments d'un dispositif de détection de photons micro-ondes uniques selon l'état de l'art et d'un dispositif de détection selon l'invention sont désignés par les mêmes références numériques.

La figure 2 représente, schématiquement, un dispositif 100 de détection de photon micro-onde unique selon l'invention, comportant un système quantique à N qudit(s) $Q_{d,1}$ à $Q_{d,N}$, avec N supérieur ou égal à 1. Le système quantique est capable d'opérer un nombre X supérieur ou égal à 2 de transitions énergétiques entre des niveaux énergétiques, ces transitions étant réparties entre le(s) N qudit(s), et correspondant à des fréquences

respectives $f_1$, ..., $f_X$. Afin d'opérer les X transitions énergétiques, le dispositif 100 comprend N sous-système(s), chacun comprenant

- un qudit $Q_1 \ldots Q_N$
- un ensemble de résonnateurs R définissant dans leur ensemble au moins deux modes électromagnétiques M,
- au moins une ligne de transmission 20 configurée pour transmettre un nombre k compris entre 1 et X ton(s) de pompe 4 au(x) qudit(s) concerné(s), chaque ton de pompe 4 permettant d'effectuer un pompage paramétrique dont la fréquence $f_p$ est choisie pour permettre un mélange à quatre ondes faisant transitionner le qudit $Q_i$ concerné d'un état énergétique à un autre,
- au moins un résonnateur de lecture 10 pour détecter l'état du qudit en question.

Tel que représenté, chaque sous-système i est couplé au sous-système suivant i+1 par un mode électromagnétique $M_i$ partagé.

Le premier sous-système se distingue des suivants en ce qu'il est couplé à une ligne de transmission 16 de photon qui est configurée pour transmettre des photons micro-ondes incidents 2 vers le premier mode électromagnétique $M_1$, en l'espèce logé dans un résonateur d'entrée $R_1$. La ligne de transmission 16 est couplée au résonateur d'entrée $R_1$ avec un taux $\kappa_b$. A titre d'exemple, $\kappa_b /(2\pi)$ peut être de l'ordre de 1 MHz. La ligne de transmission 16 peut notamment coupler une source de photons micro-ondes au résonateur d'entrée $R_1$.

Un fonctionnement du dispositif peut être le suivant.

Le nombre X de transitions énergétiques souhaitées est préalablement défini. Les fréquences des tons de pompe 4 à appliquer à chaque sous-système sont également définies au préalable de sorte que $f_{M,i} + f_{p,i} = f_i + f_{M,i+1}$, avec $f_{M,i}$ la fréquence du mode électromagnétique $M_i$, $f_{p,i}$, la fréquence du ton de pompe $P_i$, $f_i$ la fréquence de la transition énergétique i et $f_{M,i+1}$, la fréquence du mode électromagnétique $M_{i+1}$.

Au démarrage du dispositif 100 tous les tons de pompe 4 sont appliqués.

Dans le cas où un photon micro-onde incident rejoint le premier résonnateur $R_1$, l'application du premier ton de pompe entraine une première transition énergétique du premier qudit $Q_{d,1}$ qui résulte en la génération d'un premier photon résultant qui se propage dans le deuxième résonnateur $R_2$. L'application du deuxième ton de pompe entraine une

deuxième transition énergétique qui génère un deuxième photon résultant qui se propage dans le troisième résonnateur, de sorte que les X transitions énergétique peuvent s'opérer.

Le $N^{ième}$ sous-système est couplé au résonnateur $R_{X+1}$ de sortie, configuré pour transmettre un photon de sortie 3 à une ligne de transmission 18 de sortie. Le résonateur de sortie $R_{X+1}$ est couplé à la ligne de transmission 18 de sortie avec un taux de dissipation $\kappa_w$. Le taux de dissipation est élevé par rapport au taux de transfert $\Gamma$, avec par exemple un taux $\kappa_w/(2\pi)$ de l'ordre de 3 MHz pour un taux de conversion de l'ordre de 200 kHz, ce qui rend le résonateur de sortie fortement dissipatif, et permet de transmettre rapidement le photon créé dans le résonateur de sortie $R_{X+1}$ à la ligne de transmission 18. Le processus de conversion inverse, qui ferait disparaître le signal de détection, est ainsi évité.

La ligne de transmission 18 peut ainsi coupler le résonateur de sortie $R_{X+1}$ à un environnement dissipatif, qui peut être une charge froide, telle qu'un objet refroidi à une température cryogénique.

Les X transitions énergétiques sont réparties sur le(s) N qudit(s). Ainsi, un qudit peut subir entre un et X changement(s) d'état, selon le nombre de tons de pompe qui lui sont appliqués.

Chaque sous-système peut comprendre un résonnateur de lecture 10, comme illustré, permettant de déterminer l'état du qudit concerné.

Ainsi, une fois l'ensemble des tons de pompe appliqués, pendant une durée prédéfinie, ces derniers sont éteints afin de permettre la lecture, par le système de lecture, des états du ou des qudit(s). Le dispositif détermine ensuite, sur la base des informations fournies par ce système de lecture, si un photon incident a bien traversé le dispositif.

Par exemple, la détection d'une majorité de transitions énergétiques par rapport au nombre de transitions énergétiques prédéfinies amène à la conclusion qu'un photon incident a bien traversé le dispositif. A l'inverse, la détection d'une minorité de transitions énergétiques par rapport au nombre de transitions énergétiques prédéfinies amène à la conclusion de l'absence de photon incident. Il est entendu qu'il ne s'agit que d'un exemple et que tout autre seuil peut être appliqué. Par exemple, le dispositif peut être configuré pour conclure à la présence d'un photon incident uniquement si l'intégralité des transitions énergétiques a effectivement eu lieu.

La figure 3 illustre un exemple de dispositif de détection 100 selon l'invention, dans lequel le système comprend un unique qudit Q à trois états.

Dans ce cas, le fonctionnement du dispositif est le suivant.

On détermine au préalable que l'on attend X=2 transitions énergétiques. On détermine alors deux tons de pompes dont les fréquences sont telles que : $f_{M,1} + f_{p,1} = f_1 + f_{M,2}$ et $f_{M,2} + f_{p,2} = f_2 + f_{M,3}$.

Au démarrage du dispositif les tons de pompes de fréquences respectives $f_1$, $f_2$ sont appliqués.

Si un photon incident 2 est présent dans le résonnateur d'entrée $R_1$, alors le qudit Q subit, par pompage paramétrique, une première transition énergétique $i_1$ de son état fondamental à un premier état excité, générant un premier photon résultant $P_{R1}$ qui se propage dans le deuxième résonnateur $R_2$. Le qudit dans son premier état excité subit également, par pompage paramétrique, une deuxième transition énergétique $i_2$ de son premier état excité vers son deuxième état excité, générant un deuxième photon résultant $P_{R2}$ qui se propage dans un troisième résonnateur $R_3$ qui forme un résonnateur de sortie. Une fois les tons de pompe éteints, le résonnateur de lecture 10 est utilisé pour déterminer l'état du qudit Q. Si le qudit Q est dans son deuxième état excité, alors il est conclu qu'un photon incident était bien présent. Si le qudit Q est resté dans son état fondamental il est conclu qu'aucun photon incident n'était présent. Enfin, si le qudit Q est dans son premier état excité, il est conclu qu'il s'agit très probablement d'un bruit d'obscurité, et qu'aucun photon incident n'était en réalité présent.

Par « utilisation du résonnateur de lecture », on entend ici le fait d'envoyer une impulsion micro-onde dans le résonnateur de lecture, cette impulsion contenant probablement plusieurs photons. L'impulsion est réfléchie avec une phase additionnelle dépendante de l'état du qudit.

Les figures 4 et 5 illustrent, schématiquement, une variante du dispositif comprenant deux qudits Q1, Q2. Quatre transitions énergétiques sont souhaitées, de sorte que quatre tons de pompe de fréquences respectives f1, f2, f3, f4 sont appliqués au système.

Comme illustré sur la figure 5, le deuxième photon résultant $P_{R2}$ obtenu comme décrit en référence à la figure 3, se propageant dans le troisième résonnateur $R_3$ est ici transformé, par pompage paramétrique au cours d'une troisième transition énergétique $i_3$ en un troisième photon résultant $P_{R3}$ qui se propage dans un quatrième résonnateur $R_4$, cette troisième transition énergétique correspondant à une première transition énergétique du deuxième qudit $Q_2$ qui passe de l'état fondamental au premier niveau excité. Une quatrième

transition énergétique $i_4$ peut avoir lieu sur le deuxième qudit $Q_2$, cette quatrième transition énergétique correspondant à une deuxième transition énergétique du deuxième qudit $Q_2$ qui passe du premier niveau excité au deuxième niveau excité. Cette quatrième transition du système quantique global génère un quatrième photon résultant $P_{R4}$ qui se propage dans un cinquième résonnateur $R_5$ qui forme, en l'espèce, le résonnateur de sortie.

Les tons de pompes sont ensuite désactivés pour permettre la lecture des états des deux qubits $Q_1$, $Q_2$ et conclure à la présence ou à l'absence du photon incident. Par exemple, si l'on détecte que les deux qudits sont chacun dans leur deuxième état excité, il est possible de conclure à la présence d'un photon incident.

La figure 6 illustre une autre variante du dispositif 100 selon l'invention dans lequel le système comprend un premier qudit Q'1 à trois états et un deuxième qudit à deux états Q'2, également appelé « qubit ». Cela correspond à N=2 (2 qudits au total), X=3 (trois transitions au total), k=3 (3 niveaux soient 2 transitions) et K=2 (2 niveaux soit une transition) sur le schéma de la figure 2.

On souhaite dans cet exemple que trois transitions soient réalisées au total dans le système en cas de détection d'un photon incident, et l'on définit au préalable des tons de pompe à trois fréquences f'1, f'2, f'3, les premier et deuxième tons de pompe f'1, f'2 étant appliqués par une première ligne de transmission 20 et le troisième ton de pompe étant appliqué par une deuxième ligne de transmission 21.

Les tons de pompe envoyés à travers les lignes de transmission 20, 21 sont activées pour permettre, en présence d'un photon incident, que les transitions énergétiques soient opérées. En l'espèce, la première transition énergétique correspond à une première transition du premier qudit Q'1, qui passe de l'état fondamental vers le premier niveau excité, la deuxième transition énergétique correspond à une deuxième transition du premier qudit Q'1, qui passe du premier état excité au deuxième état excité et la troisième transition énergétique correspond à une première transition du deuxième qudit Q'2, qui passe de l'état fondamental au premier état excité.

Une fois les tons de pompe éteints, le système de lecture est utilisé pour déterminer les états des qudits Q'1, Q'2 du système et conclure à la présence ou l'absence de photon incident.

Les figures 7a à 7h illustrent une réalisation expérimentale mettant en œuvre le mélange à 4 ondes pour un détecteur ayant un unique qudit à trois états. Les figures 7b à 7d

et 7e à 7h représentent les probabilités en fonction des valeurs de fréquence (première fréquence de pompe en ordonnées et deuxième fréquence de pompe en abscisses). Le qudit est initialisé dans son état fondamental 0, un unique signal de pompe est appliqué (figures 7a à 7d) ou pas (figures 7e à 7h) de telle sorte que le photon incident se propageant dans le premier résonnateur $R_1$ soit converti, ou non, en un premier photon résultant $P_{R1}$ se propageant dans le deuxième résonnateur $R_2$.

Les figures 7b et 7f illustrent la probabilité de trouver le qudit dans son état fondamental, respectivement, lorsque l'on applique un ton de pompe de fréquence f1 et lorsque l'on n'applique pas de ton de pompe. On note que la probabilité est très forte et homogène pour l'ensemble des fréquences sur la figure 7f, alors qu'une bande indique une probabilité très faible à la fréquence f1 sur la figure 7b. Les figures 7c et 7g illustrent la probabilité de trouver le qudit dans son premier état excité 1, respectivement, lorsque l'on applique un ton de pompe de fréquence f1 et lorsque l'on n'applique pas de ton de pompe. On note que la probabilité est homogène et très faible pour l'ensemble des fréquences sur la figure 7g, alors qu'une bande indique une probabilité très forte à la fréquence f1 sur la figure 7c. On peut ainsi déduire de ces quatre figures que l'application du ton de pompe f1 permet d'opérer la transition énergétique du qudit de son état fondamental vers son premier état excité. Les figures 7d et 7h illustrent la probabilité de trouver le qudit dans son deuxième état excité, respectivement, lorsque l'on applique un ton de pompe de fréquence f1 et lorsque l'on n'applique pas de ton de pompe. On note que la probabilité est homogène et très faible pour l'ensemble des fréquences sur les deux figures. Une bande apparaît légèrement sur la figure 7d, lié à des imprécisions de contrôle et de lecture du système. Les figures 8a à 8h illustrent une réalisation expérimentale mettant en œuvre le mélange à 4 ondes pour un détecteur ayant un unique qudit à trois états. Les figures 8b à 8d et 8e à 8h représentent les probabilités en fonction des valeurs de fréquence (première fréquence angulaire de pompe en ordonnées et deuxième fréquence angulaire de pompe en abscisses).

Le qudit est initialisé dans son état « 1 », un unique signal de pompe est appliqué (figures 8a,8b,8c,8d) ou pas (figures 8e,8f,8g,8h) de telle sorte que le photon présent dans le mode intermédiaire défini par le résonnateur $R_2$ soit converti, ou non, dans le mode de sortie défini par le résonnateur $R_3$.

La figure 8a illustre le 2$^{nd}$ mécanisme de conversion, le qudit finissant dans son état « 2 ». Dans cette expérience, les niveaux du qudit peuvent être lus chacun

individuellement. L'expérience consiste en un balayage de la 2nd fréquence de pompe ($\omega_2/2\pi$), à amplitudes fixes, sachant que la première est éteinte, i.e à amplitude nulle (et à fréquence $\omega_1/2\pi$)). On a mesuré la probabilité du qudit d'être mesuré dans son état « 0 » (figures 8b,8f), dans son état « 1 » (figures 8c,8g) ou dans son état 2 (figures 8d,8h).

Les figures 8b,8c et 8d montrent que l'on observe à une unique fréquence de la 2nd pompe un transfert de population du qudit de son niveau 1 (déplétion D) vers son état 2 (ligne verticale L). La population dans l'état 0 est quasi nulle.

Les figures 8f, 8g, 8h confirment que le transfert 1→ 2 de l'état du qudit est bien dû à l'application de 2nd pompe en réglant son intensité à zéro tout en envoyant des photons dans le résonateur intermédiaire.

Les figures 9a à 9h illustrent une réalisation expérimentale mettant en œuvre le mélange à 4 ondes pour un détecteur ayant un unique qudit à trois états. Les figures 9b à 9d et 9e à 9h représentent les probabilités en fonction des valeurs de fréquence (première fréquence angulaire de pompe en ordonnées et deuxième fréquence angulaire de pompe en abscisses).

Le qudit est initialisé dans son état 0, deux signaux de pompe sont appliqués (figures 9a, 9b, 9c et 9d) ou pas (figures 9e, 9f, 9g et 9h) de telle sorte que le photon présenté en entrée (mode d'entrée défini par le résonnateur $R_1$) soit converti, ou non, dans le mode de sortie défini par le résonnateur $R_3$.

La figure 9a illustre le mécanisme de conversion global, le qudit finissant dans son deuxième état excité « 2 ». Dans cette expérience, chacun des niveaux du qudit peuvent être lu individuellement. L'expérience consiste en un balayage des fréquences de pompe ($\omega_1/2\pi$ et $\omega_2/2\pi$), à amplitudes fixes. La probabilité du qudit d'être mesuré dans son état « 0 » correspond aux figures 9b, 9f, dans son état « 1 » aux figures 9c, 9g ou dans son état « 2 » figures 9d, 9h.

On observe, sur les figures 9b, 9c et 9d, à une unique fréquence de la 1ère pompe un transfert de population du qudit de son niveau 0 (déplétion D) vers son état 1 (ligne horizontale L). La population dans l'état 1 a elle-même une déplétion à une unique 2nd fréquence de pompe, signifiant le transfert entre les états 1→ 2 du qudit (zone centrale brillante C sur la figure 9d). La population non nulle dans l'état 1 résulte d'erreur induite par la décohérence de la transition 2→1.

Les figures 9f, 9g et 9h confirment que le transfert 0→ 2 de l'état du qudit est bien dû à l'application des pompes en réglant leurs intensités à zéro, tout en envoyant des photons à détecter à l'entrée du détecteur.

Les figures 10 et 11 illustrent un cas particulier dans lequel le système comprend exclusivement des qubits, c'est-à-dire des sous-systèmes quantiques capables d'opérer exactement une transition énergétique chacun. Alors, le nombre X de transitions énergétiques est égal au nombre N de qudits du système quantique.

Par exemple, sur la figure 10, le premier qubit $Q_1$ est couplé à un qubit successif $Q_i$ par l'intermédiaire d'un résonateur bus $R_i$ configuré pour transmettre un photon intermédiaire 5 du bit quantique $Q_1$ au bit quantique $Q_i$.

Le dispositif 100 peut comporter un ou plusieurs bits quantiques intermédiaires, chaque bit quantique $Q_i$ étant couplé au bit quantique suivant $Q_{i+1}$ par un résonateur bus $R_{i+1}$. Chaque bit quantique $Q_i$ est également couplé à une ligne de transmission 20 permettant la transmission d'un ton de pompe 4 au bit quantique $Q_i$ et à un résonateur de lecture 10 permettant de lire l'état du bit quantique $Q_i$.

Le bit quantique $Q_{N-1}$, soit le dernier des bits quantiques $Q_i$ intermédiaires, est couplé au N-ième bit quantique $Q_N$ par un résonateur bus $R_N$.

Les N bits quantiques du dispositif sont ainsi connectés en série par les résonateurs bus.

Le N-ième bit quantique $Q_N$ est couplé à une ligne de transmission 20 permettant la transmission d'un ton de pompe 4 au bit quantique $Q_N$ ainsi qu'à un résonateur de lecture 10.

Il est également couplé à un résonateur de sortie $R_{N+1}$

Les résonateurs d'entrée, de sortie, de lecture et bus peuvent notamment être des résonateurs micro-onde supraconducteurs.

Les bits quantiques $Q_1$, …, $Q_N$ peuvent notamment être des transmons.

Dans le cadre de l'invention, une ligne de transmission peut notamment être un guide d'onde coplanaire en particulier réalisé en un métal supraconducteur.

Les couplages entre deux éléments du dispositif de détection sont de préférence des couplages capacitifs.

Le résonateur de sortie $R_{N+1}$ peut avantageusement être utilisé en tant que résonateur de lecture, auquel cas il n'est pas nécessaire de disposer un résonateur de lecture spécifique pour le dernier bit quantique $Q_N$.

De manière particulièrement avantageuse, l'amplitude $A_i$ du ton de pompe de fréquence $f_{p,i}$ appliqué au bit quantique $Q_i$ peut être ajustée. En effet, la bande passante du dispositif de détection selon l'invention peut être modifiée de façon dynamique lorsque les amplitudes $A_i$ des tons de pompe sont modifiées. Il est ainsi possible d'ajuster la largeur de la bande passante de sorte à intégrer plus ou moins de signal d'entrée. Cela permet notamment de maîtriser le rapport signal sur bruit du signal d'entrée.

Les amplitudes $A_i$ des tons de pompe peuvent donc être déterminées de sorte à permettre l'excitation des bits quantiques et à sélectionner une bande passante.

Le Hamiltonien de couplage à quatre ondes du dispositif, lorsque les pompes sont appliquées aux fréquences de mélange à quatre ondes, est

$$H = \sum_i g_i A_i (r_i q_i^\dagger r_{i+1}^\dagger + r_i^\dagger q_i r_{i+1})$$

où $r_i$ et $q_i$ sont respectivement les opérateurs quantiques de destruction associés au résonateur $R_i$ et au qubit $Q_i$, $r_i^\dagger$ et $q_i^\dagger$ sont respectivement les opérateurs quantiques de création associés au résonateur $R_i$ et au qubit $Q_i$, $A_i$ est l'amplitude de la pompe appliqué au qubit $Q_i$ et $g_i$ est le taux de mélange à quatre ondes associé au qubit $Q_i$.

Le taux de mélange à quatre ondes $g_i$ dépend du couplage entre les composants du dispositif selon la relation

$$g_i = \sqrt{\chi_i^i \chi_{i+1}^i}$$

où $\chi_j^i$ est le décalage dispersif entre le qubit $Q_i$ et le résonateur $R_j$.

Le taux de transfert d'un photon dans chacun des résonateurs peut être calculé à partir de cet Hamiltonien. L'amplitude de pompe appliquée sur le qubit $Q_i$ permet d'ajuster les taux de transfert $\Gamma_i$, $\Gamma_{i+1}$ d'un photon respectivement dans les résonateurs $R_i$ et $R_{i+1}$ selon la relation :

$$|g_i A_i|^2 = \Gamma_i \Gamma_{i+1}$$

Dans le cas du résonateur d'entrée $R_1$ et du résonateur de sortie $R_{N+1}$, cette relation devient respectivement :

$$|g_1 A_1|^2 = \kappa_b \Gamma_2$$

et

$$|g_N A_N|^2 = \Gamma_N \kappa_w$$

De préférence, pour obtenir une transmission optimale du photon dans la série de résonateurs, on ajuste les amplitudes de pompe $A_i$ de sorte que les taux de transfert $\Gamma_2$, …, $\Gamma_N$ soient tous égaux à une valeur $\Gamma$.

Le taux de transfert et la bande passante du dispositif sont alors déterminés par $\Gamma$ et l'efficacité théorique du dispositif est de 1.

De préférence, pour un fonctionnement optimal du dispositif, les décalages dispersifs du dispositif sont déterminés de sorte que, pour i compris entre 1 et N inclus :

$$g_i^2 = \chi_i^i \chi_{i+1}^i \gg \Gamma$$

On choisit par exemple une valeur de $g_i^2$ supérieure à 5 fois, 10 fois ou 20 fois la valeur de $\Gamma$.

La valeur de $\Gamma$ peut être ajustée tout en gardant une efficacité théorique de 1 tant que la relation $\Gamma < \min(\kappa_b, \kappa_w)$ est respectée.

Des techniques standard peuvent être mises en œuvre pour la fabrication d'un dispositif de détection selon l'invention.

Le dispositif 100, 100' peut être fabriqué sur une plaque de silicium d'une épaisseur de quelques centaines de micromètres couverte d'une couche de niobium d'une épaisseur de l'ordre de 100 nm. Les bits quantiques et les résonateurs d'entrée, de sortie et bus peuvent être réalisés par lithographie sur la couche de niobium. Les longueurs des résonateurs sont choisies en fonction des fréquences souhaitées.

Une détection d'un photon micro-onde unique au moyen du dispositif de détection tel que représenté sur les figures 10 et 11 se déroule de la façon suivante.

Tout d'abord, un photon micro-onde incident 2 est reçu dans le résonateur d'entrée $R_1$ de fréquence $f_{r,1}$. La réception se fait avec un taux $\kappa_b$. Le photon incident 2 pourra être détecté si sa fréquence se trouve dans l'intervalle ($f_{r,1} \pm \Gamma_1/2$).

Le photon incident 2 est ensuite transmis au bit quantique $Q_1$. Il est converti avec un taux $\Gamma_1$ en une excitation du bit quantique et un photon intermédiaire 5 du résonateur bus $R_2$ grâce au pompage paramétrique du bit quantique $Q_1$.

Le photon intermédiaire 5 du résonateur bus $R_2$ est transmis au bit quantique suivant $Q_2$ et le même processus de conversion se répète. Pour un bit quantique $Q_i$ du dispositif où i est compris entre 2 et N-1 inclus, le photon émis dans le résonateur bus $R_i$ est

converti avec un taux $\Gamma_i$ en une excitation du bit quantique $Q_i$ et un photon intermédiaire 5 du résonateur bus $R_{i+1}$.

Le photon intermédiaire 5 du résonateur bus $R_N$ est converti avec un taux $\Gamma_N$ en une excitation du bit quantique $Q_N$ et un photon de sortie 3 du résonateur de sortie $R_{N+1}$.

L'état fondamental et l'état excité d'un bit quantique $Q_i$ du dispositif sont séparés par une énergie $f_{q,i}$ . h où h est la constante de Planck.

Pour i compris entre 1 et (N+1) inclus, un résonateur d'entrée, de sortie ou bus $R_i$ du dispositif a une fréquence $f_{r,i}$.

De préférence, le taux de dissipation $\kappa_w$ du résonateur de sortie $R_{N+1}$ est supérieur au taux de transfert $\Gamma_N$. Cela permet de transmettre rapidement le photon de sortie 3 vers la ligne de transmission 18 et donc d'inhiber efficacement le processus inverse de conversion de photon qui ferait transitionner le bit quantique $Q_N$ de l'état excité à l'état fondamental.

L'état de chaque bit quantique est déterminé par une lecture de ce bit quantique par le résonateur de lecture 10 associé. L'étape de lecture des bits quantiques peut être effectuée en parallèle aux étapes de réception et de conversion des photons ou après ces étapes. Dans ce dernier cas, l'étape de lecture peut être réalisée en l'absence de pompage paramétrique, ce qui permet d'utiliser le résonateur de sortie 14 comme un résonateur de lecture.

Une étape de réinitialisation des bits quantiques dans leur état fondamental peut être réalisée après la lecture de leur état afin de préparer le dispositif à la réception d'un nouveau photon incident 2. La réinitialisation des bits quantiques peut être réalisée par l'excitation des résonateurs bus avec une impulsion micro-onde choisie pour permettre la conversion de l'excitation d'un bit quantique en un photon propageant. De préférence, la fréquence de pompage est choisie pour que l'excitation d'un bit quantique et l'impulsion sur le résonateur bus associé soient converties en un photon du résonateur de lecture associé.

La réinitialisation des bits quantiques peut également se faire en appliquant une impulsion micro-onde sur chaque bit quantique à réinitialiser par la ligne de transmission de pompage paramétrique, cette impulsion étant déterminée de sorte à ramener le bit quantique de son état excité à son état fondamental.

Il est également possible d'attendre la relaxation naturelle des bits quantiques, bien que les taux de transfert d'une réinitialisation active soient bien plus élevés que les taux de relaxation des bits quantiques.

Ainsi, un photon incident 2 arrivant dans le dispositif de détection 100 engendre l'excitation de N qubits successifs plutôt que celle d'un seul qubit.

Selon une première alternative, la détection d'un photon incident est comptabilisée lorsque les N bits quantiques sont mesurés dans leur état excité. Comme les événements d'excitation spontanée des bits quantiques sont indépendants, la probabilité de détecter un faux positif correspond à la probabilité de mesurer simultanément les N bits quantiques dans leur état excité, c'est-à-dire à une probabilité $p_{th}^N$ où $p_{th}$ représente la probabilité d'une excitation spontanée d'un bit quantique.

Le bruit d'obscurité est donc fortement réduit par rapport à un dispositif de détection de l'art antérieur.

De manière avantageuse, un procédé de détection d'un photon incident plus sophistiqué peut être mis en œuvre afin de minimiser l'inefficacité du dispositif de détection, c'est-à-dire les faux négatifs correspondant à la probabilité de ne pas comptabiliser un événement lorsqu'un photon incident 2 parvient au dispositif de détection.

Le principal processus contribuant à l'inefficacité du dispositif est la désexcitation spontanée d'un bit quantique. Ces événements sont indépendants pour chacun des bits quantiques. On note $\bar{\eta} = (1 - \eta)$ la probabilité d'une désexcitation spontanée d'un bit quantique. La probabilité d'avoir au moins une désexcitation spontanée parmi les N bits quantiques est alors $1 - (1 - \bar{\eta})^N \approx N\bar{\eta}$ pour $\bar{\eta} \ll 1$. Cette probabilité augmente donc significativement avec le nombre de bits quantiques.

Pour un nombre N impair, un procédé de détection avantageux consiste à ne comptabiliser une détection que si une majorité de bits quantiques sont mesurés dans leur état excité. Pour un nombre N pair supérieur à 3, on peut ne comptabiliser une détection que si une moitié N/2 ou une majorité N/2 + 1 des bits quantiques sont mesurés dans leur état excité.

On ne se limite donc pas au cas où tous les bits quantiques sont mesurés dans leur état excité. De cette manière, les probabilités de faux positifs et de faux négatifs peuvent toutes les deux être gardées arbitrairement faibles : pour N impair, la probabilité de détecter un faux positif sera de l'ordre de $\binom{N}{\frac{N+1}{2}} p_{th}^{\frac{N+1}{2}}$ et celle de détecter un faux négatif sera de l'ordre de $1 - \binom{N}{\frac{N+1}{2}} \bar{\eta}^{\frac{N+1}{2}}$.

A titre d'exemple, pour N=3, la probabilité de comptabiliser une détection à la majorité des qubits lorsqu'un photon incident est transmis au détecteur est de $3\eta^2(1-\eta)+\eta^3$, soit $1-3\overline{\eta}^2$ lorsque η tend vers 1, contre $\eta^3$ pour une détection à l'intégralité des qubits, soit $1-3\overline{\eta}$ lorsque η tend vers 1. La détection à la majorité des qubits améliore donc significativement l'efficacité du dispositif de détection.

Pour N=3 toujours, la probabilité de comptabiliser une détection à la majorité des qubits lorsqu'aucun photon incident n'est transmis au détecteur est de $3{p_{th}}^2(1-p_{th})+(1-p_{th})^3$, soit $3{p_{th}}^2$ lorsque η tend vers 1, contre ${p_{th}}^3$ pour une détection à la totalité des qubits.

La probabilité d'excitation spontanée $p_{th}$ d'un bit quantique est typiquement de l'ordre de $10^{-3}$ à $10^{-4}$. En pratique, il n'est donc pas nécessaire d'atteindre une probabilité de $p_{th}^3$ de sorte à réduire la probabilité de comptabiliser une détection en l'absence de photon incident. Une probabilité de l'ordre de $3p_{th}^2$ offre des performances satisfaisantes. La détection à la majorité des qubits garde donc de bonnes performances au regard du bruit d'obscurité.

De manière avantageuse, la mise en œuvre d'une détection à la majorité des qubits rend le dispositif de détection plus facile à opérer. En effet, la détection est alors plus robuste à la désexcitation spontanée ou à l'excitation thermique d'un bit quantique individuel que lors d'une détection à l'intégralité des bits quantiques. Il est possible de relaxer en partie certaines contraintes de fonctionnement du dispositif susceptibles d'augmenter la probabilité de désexcitation spontanée sans pour autant impacter la bonne opération du dispositif de détection.

D'autres procédés de détection peuvent être envisagés. En particulier, lorsque tous les bits quantiques ne sont pas identiques et que certains offrent de meilleures performances en ce qui concerne le bruit d'obscurité ou les faux négatifs, une pondération plus importante peut être placée sur ces bits quantiques par rapport aux autres.

La figure 11 illustre un mode de réalisation d'un dispositif 100' de détection de photons micro-ondes uniques selon l'invention. Dans cet exemple, le dispositif 100' comporte deux bits quantiques $Q_1$, $Q_2$.

Le résonateur d'entrée $R_1$ est couplé au bit quantique $Q_1$ et le résonateur de sortie $R_3$ est couplé au bit quantique $Q_2$. Le résonateur de sortie $R_3$ est également utilisé en tant que résonateur de lecture pour lire l'état du bit quantique $Q_2$. Le résonateur de lecture 10

permet de lire l'état du bit quantique $Q_1$. Un résonateur bus $R_2$ relie le bit quantique $Q_1$ au bit quantique $Q_2$.

La présence d'un photon incident dans le résonateur d'entrée $R_1$ et l'application d'un ton de pompe 4 au premier bit quantique $Q_1$ permet de convertir le photon incident et le ton de pompe en une excitation du bit quantique $Q_1$ et un photon intermédiaire du résonateur bus $R_2$. De même, la présence d'un photon intermédiaire dans le résonateur bus $R_2$ et l'application d'un ton de pompe 4 au deuxième bit quantique $Q_2$ permet de convertir le photon intermédiaire et le ton de pompe en une excitation du bit quantique $Q_2$ et un photon de sortie du résonateur de sortie $R_3$.

La lecture de l'état des bits quantiques permet de déterminer si un événement de détection doit être comptabilisé ou non. Si les deux bits quantiques sont mesurés dans leur état excité, un événement de détection est comptabilisé.

Les figures 12 à 17 sont des graphiques illustrant des mesures obtenues avec un dispositif tel que le dispositif 100' représenté à la figure 11.

Dans cet exemple, la fréquence du signal de sonde appliqué à l'entrée du dispositif de détection est de 9 GHz. L'amplitude du signal de sonde et celle des tons de pompe est fixe. Le dispositif de détection possède une efficacité $\eta$ de 20 %.

Cette efficacité est deux fois plus faible que celle typique d'un dispositif de détection à un seul bit quantique en raison des erreurs des deux bits quantiques qui s'additionnent.

Un ton de pompe est appliqué à chacun des deux bits quantiques. Les fréquences des tons de pompe des deux bits quantiques sont balayées individuellement sur un intervalle de fréquence. Pour chaque couple de fréquences de pompe ($f_{p,1}$, $f_{p,2}$), soit ($\omega_1/(2\pi)$, $\omega_2/(2\pi)$), la probabilité qu'un signal soit effectivement détecté sur l'un ou l'autre des bits quantiques est mesurée d'une part lorsqu'un signal de sonde est envoyé dans le résonateur d'entrée, et d'autre part lorsqu'aucun signal de sonde n'est envoyé.

Pour chacune des figures 12 à 17, la fréquence $f_{p,2}$ du ton de pompe du deuxième bit quantique $Q_2$ est représentée en abscisse et la fréquence $f_{p,1}$ du ton de pompe du premier bit quantique $Q_1$ est représentée en ordonnée.

La figure 12 représente la probabilité de détecter un signal sur le premier bit quantique $Q_1$ lorsqu'un signal de sonde est effectivement envoyé. On constate que cette probabilité est élevée, de l'ordre de 0,25, autour d'une fréquence $f_{p,1}$ déterminée, qui est celle

réalisant la condition $f_{p,1} = f_{q,1} + f_{r,2} - f_{r,1}$. Les fréquences $f_{q,1}$, $f_{r,1}$ et $f_{r,2}$ sont en effet constantes au cours de la mesure : le mélange à quatre ondes permettant la conversion du photon incident n'est donc permis que pour cette fréquence $f_{p,1}$ déterminée. On remarque que la fréquence $f_{p,2}$ du ton de pompe du deuxième bit quantique n'a pas d'effet sur le processus de détection du premier bit quantique.

La figure 13 représente la probabilité de détecter un signal sur le premier bit quantique $Q_1$ lorsqu'aucun signal de sonde n'est envoyé. On constate que cette probabilité est uniformément faible, de l'ordre de $3.10^{-3}$. Un bruit légèrement supérieur est observé autour de la fréquence $f_{p,1}$ réalisant la condition $f_{p,1} = f_{q,1} + f_{r,0} - f_{r,1}$. Cela est dû à des faux positifs du premier bit quantique provoqués par le bruit thermique dans le résonateur d'entrée.

La figure 14 représente la probabilité de détecter un signal sur le deuxième bit quantique $Q_2$ lorsqu'un signal de sonde est effectivement envoyé. Une détection sur le deuxième bit quantique $Q_2$ n'est autorisée qu'en présence d'un photon dans le résonateur bus couplant les deux bits quantiques, c'est-à-dire lorsqu'une détection est réalisée sur le premier bit quantique $Q_1$. La zone de probabilité élevée a donc une forme de tache résultant d'un croisement entre la ligne visible sur la figure 12 et une ligne verticale correspondant à la fréquence $f_{p,2}$ réalisant la condition $f_{p,2} = f_{q,2} + f_{r,3} - f_{r,2}$. Cette zone représente l'espace optimal de fonctionnement du dispositif de détection.

La figure 15 représente la probabilité de détecter un signal sur le deuxième bit quantique $Q_2$ lorsqu'aucun signal de sonde n'est envoyé. On constate que le bruit du deuxième bit quantique est relativement important et comporte des zones où le bruit est plus marqué.

La figure 16 représente la probabilité de détecter un signal à la fois sur le premier bit quantique $Q_1$ et sur le deuxième bit quantique $Q_2$ lorsqu'un signal de sonde est effectivement envoyé. Ce résultat correspond à l'espace fréquentiel dans lesquels les conditions de mélange à quatre ondes sont vérifiées sur les deux bits quantiques.

La figure 17 représente la probabilité de détecter un signal à la fois sur le premier bit quantique $Q_1$ et sur le deuxième bit quantique $Q_2$ lorsqu'aucun signal de sonde n'est envoyé. On constate que cette probabilité est beaucoup plus faible que celle de détecter individuellement un signal sur le premier ou sur le deuxième bit quantique. Les zones de probabilité relativement plus élevée (de l'ordre de $10^{-4}$) au centre du graphique sont dues au

bruit d'obscurité provoqué par le bruit thermique résiduel. Les zones de probabilité relativement plus faible (de l'ordre de $10^{-6}$) dans les coins du graphique représentent le bruit intrinsèque du dispositif, soit le bruit d'obscurité lorsque l'efficacité du détecteur est nulle.

Les figures 18 à 20 représentent la réponse des bits quantiques du même dispositif de détection à trois flux différents de photons incidents sur un intervalle de temps d'une seconde.

A la figure 18, aucun flux de photon n'est envoyé au dispositif.

A la figure 19, un flux de 11 photons par seconde est envoyé au dispositif.

A la figure 20, un flux de 46 photons par seconde est envoyé au dispositif.

Les lignes verticales représentent les événements de détection respectivement sur le premier bit quantique $Q_1$, sur le deuxième bit quantique $Q_2$ et les événements de détection simultanés pour les deux bits quantiques $Q_1$ et $Q_2$.

On constate que le bruit d'obscurité est très faible lorsque l'on considère les deux bits quantiques simultanément (on mesure 4 faux positifs par seconde) en comparaison au bruit d'obscurité mesuré individuellement sur chacun des deux bits quantiques.

D'autres variantes et améliorations peuvent être envisagées sans pour autant sortir du cadre de l'invention. En particulier, le dispositif de détection selon l'invention peut également comprendre des moyens de filtrage et/ou d'accord de la fréquence de résonance du résonateur d'entrée et/ou des résonateurs bus et/ou du résonateur de sortie. En particulier, comme représenté dans le mode de réalisation de la figure 21, le dispositif de détection peut comporter un dispositif SQUID intégré au résonateur d'entrée $R_1$ de sorte à permettre d'accorder la fréquence de ce résonateur. Un dispositif SQUID comporte deux jonctions Josephson agencées en parallèle. En induisant un champ magnétique dans le SQUID, l'inductance du résonateur d'entrée $R_1$ peut être réglée, ce qui permet de faire varier sa fréquence. Pour induire le champ magnétique dans le SQUID 11, un courant est acheminé à proximité de ce dernier dans une ligne de flux rapide, c'est-à-dire une ligne de transmission court-circuitée à la masse par une boucle.

**Revendications**

1. Dispositif de détection (100 ; 100') de photon micro-onde unique, comportant :

- un système quantique multi-état comportant N qudit(s), N étant supérieur ou égal à 1, le système étant capable d'opérer, en réponse à la réception d'un photon micro-onde incident, un nombre X supérieur ou égal à 2 de transitions énergétiques entre des niveaux énergétiques répartis entre le(s) N qudit(s), ces transitions énergétiques correspondant à des fréquences respectives $f_1$, …, $f_X$,
- un ensemble de résonnateurs ($R_1$, $R_2$, …) définissant X+1 modes électromagnétiques de fréquences respectives $f_{M,1}$ à $f_{M,X+1}$,
- un système de pompage paramétrique pour appliquer X tons de pompe de fréquences $f_{p,i}$ respectives, vérifiant $f_{M,i} + f_{p,i} = f_i + f_{M,i+1}$ avec chaque entier i allant de 1 à X, de manière à convertir en fréquence, par pompage paramétrique, l'excitation contenue dans un mode électromagnétique i en une excitation du mode électromagnétique i+1 et une transition i du qudit concerné,
- un système de lecture des niveaux d'énergie du ou des qudit(s) du système quantique fournissant une information renseignant sur la réception ou non d'un photon micro-onde incident.

2. Dispositif de détection selon la revendication 1, l'ensemble de résonnateurs comportant X+1 résonnateurs définissant les X+1 modes électromagnétiques.

3. Dispositif de détection selon l'une des revendications précédentes, le système quantique comprenant un qudit sur lequel s'opèrent les X transitions énergétiques.

4. Dispositif de détection selon la revendication 1, le système quantique comprenant au moins deux qudits spatialement distincts, entre lesquels sont réparties les X transitions énergétiques.

5. Dispositif de détection selon la revendication 4, l'un au moins des deux qudits étant un qubit.

6. Dispositif de détection selon la revendication 4, les deux qudits étant des qubits.

7. Dispositif de détection selon la revendication 4, l'un au moins des deux qudits présentant au moins trois niveaux énergétiques.

8. Dispositif de détection selon la revendication 1 ou 2, le système quantique comprenant un qubit sur lequel s'opère l'une des transitions énergétiques et un qudit à au moins trois niveaux sur lequel s'opère au moins une autre des transitions énergétiques.

9. Dispositif de détection selon l'une des revendications précédentes, le ou les qudits étant des qudits supraconducteurs de type transmon.

10. Dispositif de détection selon l'une quelconque des revendications précédentes, le système de lecture mesurant l'état de chaque qudit.

11. Dispositif de détection l'une quelconque des revendications précédentes, le système de lecture comprenant au moins un résonnateur de lecture, le ou les résonnateur(s) de lecture étant couplé(s) à un ou des qudits correspondants.

12. Dispositif de détection selon l'une quelconque des revendications précédentes, comportant au moins autant de résonnateur(s) de lecture que de qudit(s).

13. Dispositif de détection selon l'une quelconque des revendications précédentes, le système comportant un résonateur d'entrée couplé à une source de photons micro-ondes et un résonnateur de sortie couplé à un environnement dissipatif adapté à dissiper un photon micro-onde.

14. Dispositif selon la revendication précédente, le résonateur d'entrée comportant un dispositif SQUID (11) configuré pour accorder la fréquence du résonateur d'entrée.

15. Procédé de détection de photon micro-onde unique incident à l'aide d'un dispositif de détection de photon micro-onde, notamment selon l'une des revendications précédentes, le dispositif comprenant un système quantique multi-état comportant N qudit(s), N étant supérieur ou égal à 1, le système étant capable d'opérer, en réponse à la réception d'un photon micro-onde incident, un nombre X supérieur ou égal à 2 de transitions énergétiques entre des niveaux énergétiques répartis entre le(s) N qudit(s), ces transitions énergétiques correspondant à des fréquences respectives $f_1$, …, $f_X$, le procédé comportant les étapes suivantes :

a/ appliquer X tons de pompe de fréquences $f_{p,i}$ respectives, vérifiant $f_{M,i} + f_{p,i} = f_i + f_{M,i+1}$ avec chaque entier i allant de 1 à X, de manière à convertir en fréquence, par pompage paramétrique, l'excitation contenue dans un mode électromagnétique i en une excitation du mode électromagnétique i+1 et une transition i du qudit concerné,

b/ lire des niveaux d'énergie du ou des qudit(s) du système quantique et en déduire une information renseignant sur la réception ou non d'un photon micro-onde incident par le détecteur.

16. Procédé de détection selon la revendication précédente, au moins l'une des transitions énergétiques étant une transition d'un qubit depuis un état fondamental vers un état excité.

17. Procédé de détection selon l'une des revendications 15 ou 16, au moins l'une des transitions énergétiques étant une transition d'un qudit depuis un état fondamental vers un état excité ou entre deux états excités successifs.

18. Procédé de détection selon la revendication 16, chaque transition énergétique étant une transition d'un qudit entre deux états énergétiques successifs.

19. Procédé de détection selon l'une des revendications 15 à 18, l'étape de lecture des niveaux d'énergie du ou des qudits consistant à détecter si une majorité de transitions énergétiques a été opérée dans le système quantique.

20. Procédé selon la revendication précédente, le système quantique comprenant un nombre X impair de transitions énergétiques.

21. Procédé de détection selon l'une des revendications 15 à 18, l'étape de lecture des états du ou des qudit(s) consistant à détecter si les X transitions énergétiques ont effectivement été opérées.

22. Procédé de détection selon l'une des revendications 15 à 21, comportant, préalablement à l'étape a/, une étape d'ajustement de la bande passante du système quantique dans laquelle l'amplitude $A_i$ des fréquences des tons de pompe est déterminée de sorte à ajuster ladite bande passante à une valeur désirée.

23. Dispositif (100, 100') de détection d'un photon micro-onde unique (2) comprenant :

- un nombre N supérieur ou égal à 2 de bits quantiques ($Q_1$, …, $Q_N$) à deux niveaux énergétiques dont l'état fondamental et un état excité sont contrôlables et détectables, la transition entre les états fondamental et excité de chaque bit quantique $Q_i$ ayant une fréquence $f_{q,i}$ pour i compris entre 1 et N inclus,

- un résonateur d'entrée ($R_1$) configuré pour recevoir un photon micro-onde unique incident (2) et ayant une fréquence $f_{r,1}$, le résonateur d'entrée étant couplé à un premier bit quantique $Q_1$ des N bits quantiques,
- un résonateur de sortie ($R_{N+1}$) configuré pour évacuer un photon de sortie (3) et ayant une fréquence $f_{r,N+1}$, le résonateur de sortie étant couplé à un N-ième bit quantique $Q_N$ des N bits quantiques,
- un nombre (N-1) de résonateurs bus $R_j$ configurés pour transmettre un photon intermédiaire du bit quantique $Q_{j-1}$ au bit quantique $Q_j$ et ayant chacun une fréquence $f_{r,j}$, pour j compris entre 2 et N inclus,
- au moins un système de lecture (10), couplé aux N bits quantiques de sorte à détecter leurs niveaux énergétiques, notamment N ou moins de N systèmes de lecture,
- au moins une ligne de transmission de pompage paramétrique (20), notamment N ou moins de N lignes de transmission, configurée pour transmettre un ton de pompe à l'un des N bits quantiques et/ou à l'un des résonateurs d'entrée, de sortie ou bus, de sorte qu'un photon d'un résonateur d'entrée ou bus $R_i$ et un ton de pompe de fréquence $f_{p,i} = f_{q,i} + f_{r,i+1} - f_{r,i}$ puissent être convertis en une excitation du bit quantique $Q_i$ et un photon du résonateur bus ou de sortie $R_{i+1}$, pour i compris entre 1 et N inclus.

24. Dispositif selon la revendication 23, comprenant un nombre N de systèmes de lecture (10), couplé chacun à l'un des N bits quantiques, de sorte à détecter l'état du bit quantique.

25. Dispositif selon l'une des revendications 23 et 24, comprenant un nombre N de lignes de transmission de pompage paramétrique (20) chacune configurée pour transmettre un ton de pompe à l'un des N bits quantiques et/ou à l'un des résonateurs d'entrée, de sortie ou bus, de sorte qu'un photon d'un résonateur d'entrée ou bus $R_i$ et un ton de pompe de fréquence $f_{p,i} = f_{q,i} + f_{r,i+1} - f_{r,i}$ puissent être convertis en une excitation du bit quantique $Q_i$ et un photon du résonateur bus ou de sortie $R_{i+1}$, pour i compris entre 1 et N inclus.

26. Dispositif (100, 100') de détection d'un photon micro-onde unique (2) comprenant :

- un nombre N supérieur ou égal à 2 de bits quantiques ($Q_1$, …, $Q_N$) à deux niveaux énergétiques dont l'état fondamental et un état excité sont contrôlables et détectables, la transition entre les états fondamental et excité de chaque bit quantique $Q_i$ ayant une

fréquence $f_{q,i}$ pour i compris entre 1 et N inclus,

- un résonateur d'entrée ($R_1$) configuré pour recevoir un photon micro-onde unique incident (2) et ayant une fréquence $f_{r,1}$, le résonateur d'entrée étant couplé à un premier bit quantique $Q_1$ des N bits quantiques,
- un résonateur de sortie ($R_{N+1}$) configuré pour évacuer un photon de sortie (3) et ayant une fréquence $f_{r,N+1}$, le résonateur de sortie étant couplé à un N-ième bit quantique $Q_N$ des N bits quantiques,
- un nombre (N-1) de résonateurs bus $R_j$ configurés pour transmettre un photon intermédiaire du bit quantique $Q_{j-1}$ au bit quantique $Q_j$ et ayant chacun une fréquence $f_{r,j}$, pour j compris entre 2 et N inclus,
- un nombre N de systèmes de lecture (10) chacun couplé à l'un des N bits quantiques de sorte à détecter l'état dudit bit quantique,
- un nombre N de lignes de transmission de pompage paramétrique (20) chacune configurée pour transmettre un ton de pompe à l'un des N bits quantiques et/ou à l'un des résonateurs d'entrée, de sortie ou bus, de sorte qu'un photon d'un résonateur d'entrée ou bus $R_i$ et un ton de pompe de fréquence $f_{p,i} = f_{q,i} + f_{r,i+1} - f_{r,i}$ puissent être convertis en une excitation du bit quantique $Q_i$ et un photon du résonateur bus ou de sortie $R_{i+1}$, pour i compris entre 1 et N inclus.

27. Dispositif de détection selon la revendication 26, les N bits quantiques étant des bits quantiques supraconducteurs de type transmon.

28. Dispositif de détection selon l'une des revendications 26 et 27, chaque système de lecture comprenant un résonateur.

29. Dispositif de détection selon l'une des revendications 26 à 28, le système de lecture couplé au N-ième bit quantique $Q_N$ comprenant le résonateur de sortie $R_{N+1}$.

30. Dispositif de détection selon l'une des revendications 26 à 29, le résonateur d'entrée, le résonateur de sortie et les résonateurs bus étant des résonateurs micro-ondes supraconducteurs.

31. Dispositif de détection selon l'une des revendications 26 à 30, le résonateur d'entrée étant couplé à une source de photons micro-ondes et le résonateur de sortie étant couplé à un environnement dissipatif adapté pour dissiper un photon micro-onde

32. Dispositif de détection selon l'une des revendications 26 à 31, le résonateur d'entrée comportant un dispositif SQUID (11) configuré pour accorder la fréquence du résonateur d'entrée.

33. Procédé de détection d'un photon micro-onde unique mis en œuvre au moyen d'un dispositif de détection (100, 100') selon l'une des revendications 26 à 32, comprenant les étapes consistant à :

a/ appliquer à chaque bit quantique $Q_i$ un ton de pompe de fréquence $f_{p,i} = f_{q,i} + f_{r,i+1} - f_{r,i}$, pour i compris entre 1 et N inclus ;

b/ mesurer l'état de chaque bit quantique $Q_i$.

34. Procédé de détection selon la revendication 33, le dispositif de détection comprenant un nombre impair de bits quantiques, le procédé comportant, après l'étape b/, une étape c/ de détection dans laquelle on détermine si au moins une majorité (N+1)/2 des bits quantiques est mesurée dans l'état excité, auquel cas un événement de détection est comptabilisé.

35. Procédé de détection selon la revendication 33, le procédé comportant, après l'étape b/, une étape c1/ de détection dans laquelle on détermine si tous les bits quantiques sont mesurés dans l'état excité, auquel cas un événement de détection est comptabilisé.

36. Procédé de détection selon l'une des revendications 33 à 35, comportant, préalablement à l'étape a/, une étape a0/ d'ajustement de la bande passante du dispositif de détection dans laquelle l'amplitude $A_i$ des tons de pompe de fréquence $f_{p,i}$ est déterminée de sorte à ajuster ladite bande passante à une valeur désirée.