TP : Qubit supraconducteur

Philéas Thibault - Boris Baudel - Benjamin Oksenberg

École Normale Supérieure Paris-Saclay - ARTeQ

1. Le circuit quantique supraconducteur

1.0.1 Système à 2 niveaux (spin)

L'hamiltonien du système est donné par :

$$\hat{H} = \frac{\hbar\Omega}{2}\left(|1\rangle\langle 1| - |0\rangle\langle 0|\right) = -\frac{\hbar\Omega}{2}\hat{\sigma}_z$$

Avec :

$$\hat{\sigma}_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Dans un référentiel tournant à la fréquence du qubit Ω, l'état du qubit peut être représenté par un vecteur de Bloch sur la sphère de Bloch :

$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\phi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

La matrice densité associée est donnée par :

$$\rho = |\psi\rangle\langle\psi| = \begin{pmatrix} \cos^2\frac{\theta}{2} & e^{-i\phi}\cos\frac{\theta}{2}\sin\frac{\theta}{2} \\ e^{i\phi}\cos\frac{\theta}{2}\sin\frac{\theta}{2} & \sin^2\frac{\theta}{2} \end{pmatrix}$$

Dans la figure 1 et 2 on observe l'oscillateur LC quantique qui permet de faire un oscillateur anharmonique.

1.0.2 Hamiltonien de Josephson

La jonction Josephson utilise l'hamiltonien de Josephson donné par :

$$\hat{H}_J = -E_J\cos\hat{\Phi} \simeq -E_J\left(1 - \frac{\hat{\Phi}^2}{2\Phi_0^2} + \frac{\hat{\Phi}^4}{4!\Phi_0^4} + \dots\right)$$

L'énergie de transition est donnée par :

$$\delta E_n = -\frac{E_J}{4!\Phi_0^4}\left(\frac{1}{2}\hbar\omega_0 L_J\right)^2 \times (6n^2 + 6n + 3) = -\frac{e^2}{8C}(2n^2 + 2n + 1)$$

Cependant dans notre cas, nous avons a faire à un circuit donné par la figure 3 qui est constitué par un Qubit, un résonateur et un filtre de Purcell. On peut voire à quoi ressemble la circuit réel dans la figure 4.

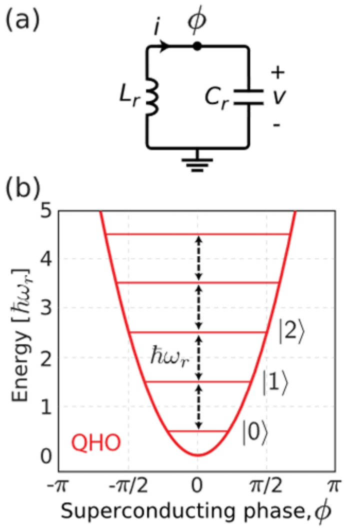

FIGURE 1 – Circuit d'un simple Qubit

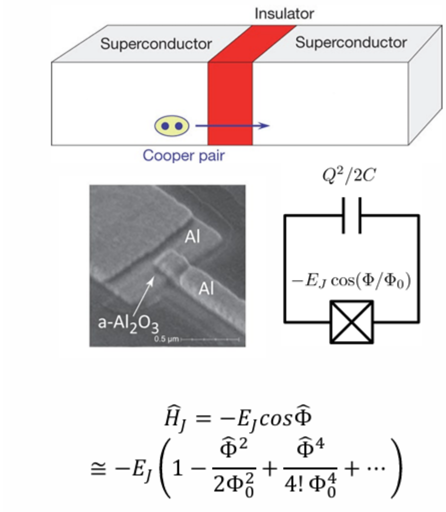

FIGURE 2 – Jonction Josephson

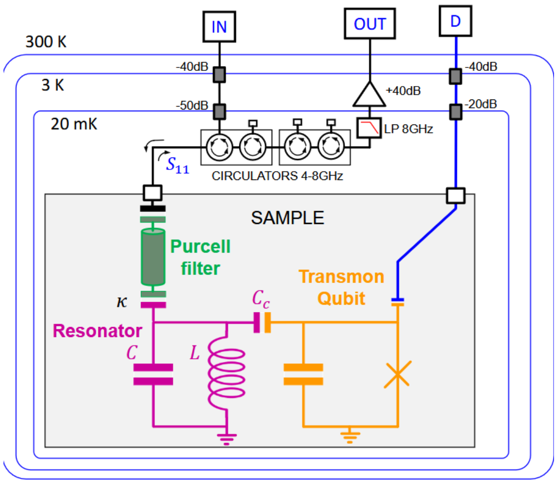

FIGURE 3 – Circuit quantique à étudier avec résonateur, Qubit et filtre de Purcell.

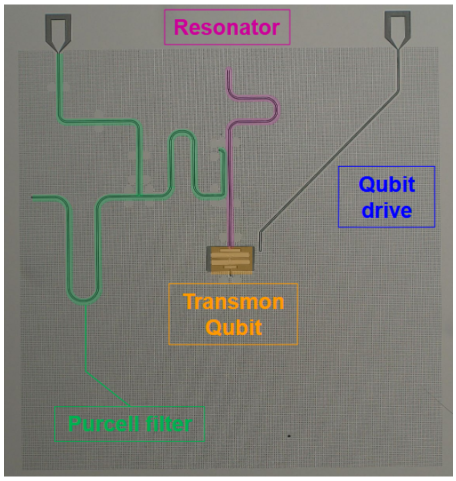

FIGURE 4 – Circuit réel

L'Hamiltonien de notre circuit qui est en figure 3 nous donne l'hamiltonien de Jaynes-Cummings suivant :

$$H_{JC} = \omega_r\left(a^\dagger a + \frac{1}{2}\right) + \frac{\omega_q}{2}\sigma_z + g\left(\sigma_+ a + \sigma_- a^\dagger\right)$$

Le premier terme représente le résonateur, le deuxième le Qubit et le dernier le couplage. Dans le régime dispersif, l'hamiltonien devient :

$$H_{\text{disp}} = (\omega_r + \chi\sigma_z)\left(a^\dagger a + \frac{1}{2}\right) + \frac{\tilde{\omega}_q}{2}\sigma_z$$

Avec :

$$\chi = \frac{g^2}{\Delta}, \quad \tilde{\omega}_q = \omega_q + \frac{g^2}{\Delta}$$

Il apparaît alors que la fréquence du résonance effective du résonateur dépend directement de l'état du qubit en étant déplacée d'un facteur χ.

2. Mesures au VNA

2.1 Résonateur

Le VNA est branché sur la ligne de mesure du résonateur et mesure le signal en réflexion après qu'il soit passé par une série de circulateurs. La mesure de réflexion révèle une fréquence de résonance de 5.9 GHz environ autour de laquelle le déphasage du signal réalise un saut de 2π. En raison du couplage avec le qubit la fréquence de résonance est dédoublé à 5922 et 5925 MHz (Fig.5).

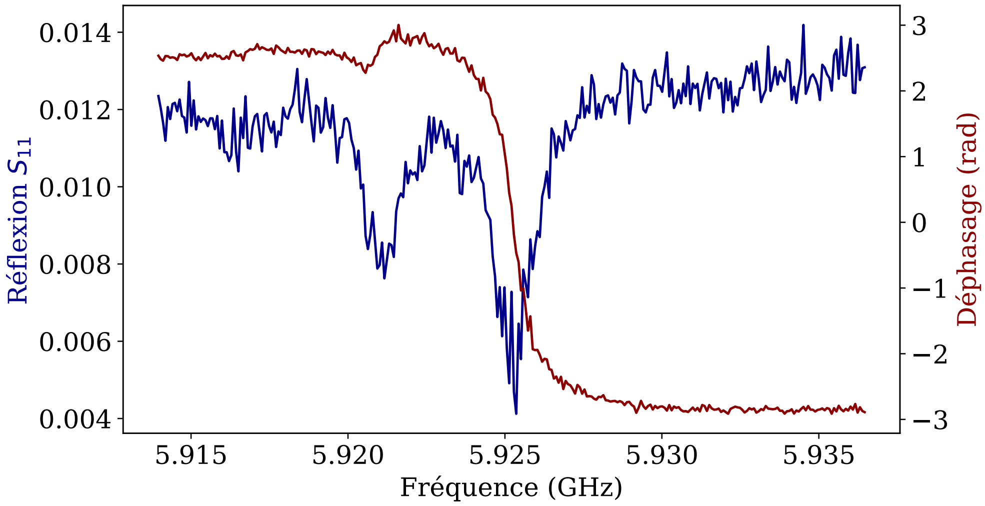

FIGURE 5 – Mesure de la réflexion du résonateur autour de sa fréquence de résonance. Il apparaît deux résonances pour chacune des valeurs du Qubit.

2.2 Spectroscopie deux tons

2.2.1 Fréquence du Qubit

Afin d'identifier la fréquence du qubit on relève la valeur de la réflexion du résonateur à 5925 MHz pour différentes fréquences d'excitation du qubit (Fig.6). Lorsque la fréquence d'excitation est suffisamment proche de celle du qubit, il passe dans l'état excité et la réflexion du signal à 5925 MHz chute. On identifie alors la fréquence de transition du qubit à 3515 MHz.

De plus, en variant la puissance de pompe on constate comme attendu un élargissement de la résonance du qubit.

2.2.2 Transition à deux photons

Lorsque le qubit est pompé avec suffisamment de puissance, il est possible de lui faire effectuer une transition à deux photons vers son second état excité. Pour cela on retire de la ligne d'excitation du qubit un filtre atténuateur de -10 dB afin d'envoyer la puissance nécessaire. Un balayage en fréquence autour de 3400 MHz révèle alors deux chutes de réflexion de la cavité autour de 3393 MHz (Fig.7) correspondant à cette transition. La fréquence de transition entre le fondamental et le second niveau excité est donc d'environ 6786 MHz.

3. Mesure avec une carte FPGA

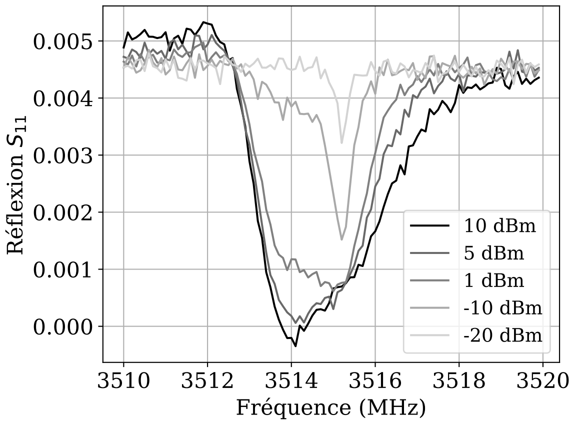

FIGURE 6 – Réflexion d'un signal à 5925 MHz sur le résonateur en fonction de la fréquence d'excitation du qubit et de la puissance de pompe.

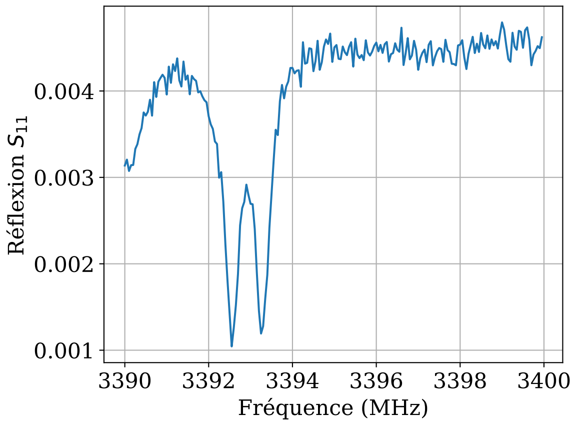

FIGURE 7 – Réflexion d'un signal à 5925 MHz sur le résonateur en fonction de la fréquence d'excitation du qubit permettant d'initier une transition à deux photon vers son second état excité.

3.1 Temps de vol

Nous disposons d'une carte FPGA capable d'émettre et de démoduler des signaux. Nous connectons un des canaux de sortie à un canal d'entrée avec un court câble. Nous envoyons un pulse à 5910 MHz sur le canal de sortie tout en mesurant le signal sur le canal d'entrée. On constate alors qu'il y a un délai de 0.3 µs entre le début de la mesure et la réception du signal (Fig.8). Ce délai est bien trop grand pour être seulement lié au temps de propagation du signal dans le câble, il est en grande partie dû au traitement du signal de la carte FPGA. Sa prise en compte permet alors de synchroniser l'émission et la réception des signaux. Par la suite, nous mesurons le déphasage du signal émis entre 5905 et 5945 MHz. On constate alors qu'en raison du temps de propagation à travers le système le déphasage augmente linéairement. Par un ajustement avec une fonction linéaire on détermine une variation de 19.13 rad/MHz. On réitère la mesure en déphasant au préalable les signaux émis par cette quantité. On mesure alors un déphasage nul à toutes les fréquences.

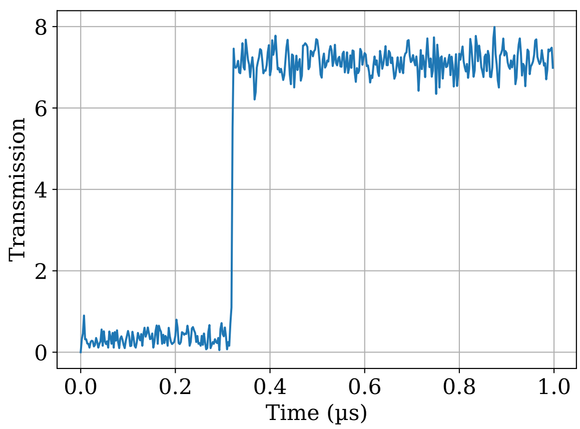

FIGURE 8 – Émission et mesure simultanées d'un pulse avec la carte FPGA. On constate un délai de 0.3 ms

Nous réitérons ces mesures en pansant à travers la ligne du cryostat permettant de mesurer le résonateur en réflexion. On constate alors que le délai entre l'émission et la mesure du signal augmente de 52 ns ce qui représente une longueur de propagation de quelques mètres. Cela est cohérent avec les dimensions du cryostat. Il en va de même avec le déphasage, il est alors de 19.24 rad/MHz.

3.2 Fréquence du Qubit

De façon similaire à la mesure de la fréquence du qubit au VNA, la carte FPGA réalise une mesure de la réflexion du résonateur tout en excitant le qubit à différentes fréquences. La mesure permet d'obtenir un résultat identique : la fréquence du qubit est de 3515 MHz. Mais elle permet notamment de vérifier que les mesures précédentes de délai et de déphasage permettent d'obtenir les résultats voulus.

3.3 Oscillations de Rabi

Des pulses à 3515 MHz de différentes intensités et de différentes longueurs sont envoyés au qubit afin de lui faire effectuer des rotations sur la sphère de Bloch.

3.3.1 Variation de l'amplitude des pulses

Pour débuter on recherche l'amplitude des pulses requises pour faire effectuer au qubit une rotation $\pi/2$ en 100 ns. Le programme permettant de piloter le FPGA prend en paramètre le gain à appliquer au pulses. On fait donc varier ce paramètre tout en faisant joueur au FPGA des séquences de pulses de 100 ns. La mesure de la phase du résonateur révèle alors une oscillation de l'état du qubit en fonction de l'amplitude des pulses (Fig.9). On constate que le qubit passe complètement dans l'état excité pour un gain de 8500. Nous garderons cette valeur de gain par la suite, elle permet d'obtenir la bonne amplitude afin que les pulses $\pi/2$ durent 100 ns.

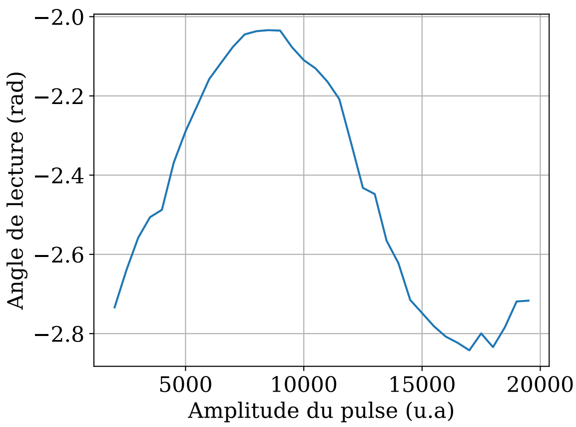

FIGURE 9 – Phase de réflexion du résonateur à 5925 MHz en fonction de l'amplitude d'un pulse d'excitation du qubit de 100 ms.

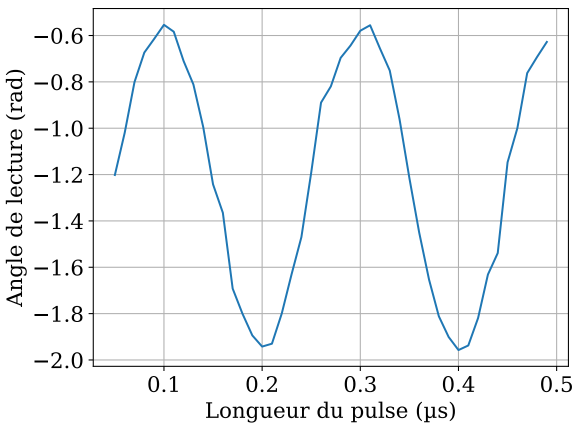

FIGURE 10 – Phase de réflexion du résonateur à 5925 MHz en fonction de la longueur d'un pulse d'excitation à 3515 MHz.

3.3.2 Variation de la longueur des pulses

Des pulses de différentes longueurs sont envoyés au qubit afin d'observer les oscillations de Rabi. On retrouve bien une période d'oscillation de 200 ns. Leurs amplitude sur un temps de l'ordre de la dizaine de microsecondes en raison du temps de cohérence limité du système.

3.4 Temps de cohérence T_1

Un pulse π est envoyé au qubit afin de le faire passer dans l'état excité. Après un délai τ, l'état du qubit est sondé par l'intermédiaire du résonateur. On mesure ainsi la probabilité qu'après un instant τ le qubit ait conservé sont état. En répétant la mesure pour différents délais, on constate que la probabilité d'occupation de l'état excité décroît de façon exponentielle avec le temps. Un ajustement de courbe nous permet alors d'estimer le temps de cohérence T_1 à 27 ± 2 µs.

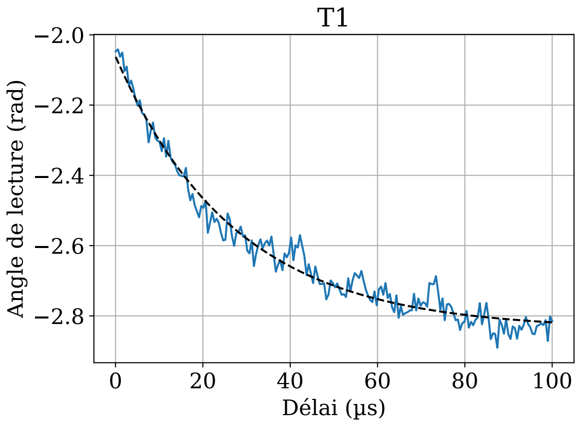

FIGURE 11 – Phase de réflexion du résonateur en fonction du délai de mesure après l'émission d'un pulse $\pi/2$.

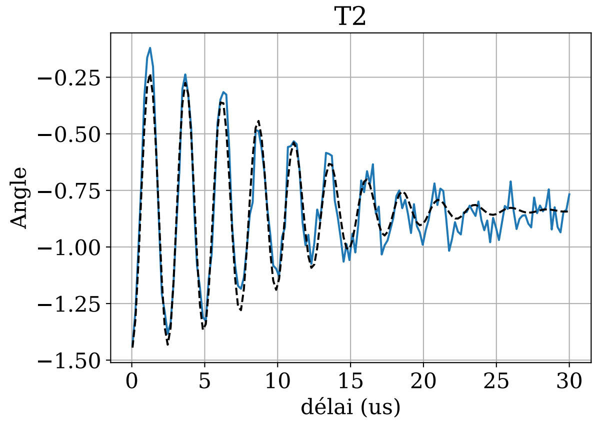

FIGURE 12 – Phase de réflexion du résonateur en fonction du délai entre l'émission de deux pulses π. En raison du léger écart en fréquence entre les pulses et le qubit, des oscillations apparaîssent.

3.5 Oscillations de Ramsey

Une séquence comportant de deux pulses $\pi/2$ séparés d'un interval de temps τ est envoyé au qubit. Le premier pulse permet de positionner l'état du qubit sur l'hémisphère de la sphère de Bloch. Le second pulse l'amène dans l'état excité si son état n'a pas été altéré entre temps. En raison d'un léger décalage $\Delta\omega$ entre la fréquence d'excitation et la fréquence du qubit, son état va précesser sur l'équateur à la fréquence $\Delta\omega$. On constate en effet qu'à l'issue du second pulse l'état du qubit oscille (Fig.12). Un ajustement des résultats avec la fonction $t \longrightarrow e^{-\left(\frac{t}{T_2}\right)^2} \cos(\omega t + \phi)$ nous permet alors d'estimer le temps de cohérence $T_2^* = 13 \pm 1$ µs. L'ajustement n'est pas idéal, l'utilisation de la phase de la réflexion sur le résonateur ne donne en réalité pas directement la probabilité de trouver le qubit dans un état ou un autre, ce qui a pour effet de déformer les courbes obtenues.

4. Conclusion

Au cours de ce TP, nous avons pu mesurer l'état d'un qubit supraconducteur par l'intermédiaire d'un résonateur dont la fréquence de résonance est déplacée. Nous avons tout d'abord identifié cette fréquence de résonance à l'aide d'un VNA. Puis, nous avons manipulé l'état du qubit avec une carte FPGA. Cela nous a permis de réaliser des mesures de temps de cohérence T_1 et T_2 et de constater des oscillations de Rabi puis Ramsey.