

# MÉCANISME DE DÉCOUPLAGE QUANTIQUE ET PRÉSERVATION DE LA COHÉRENCE DES SYSTÈMES QUANTIQUES



## QUANTUM DECOUPLING MECHANISM AND COHERENCE PRESERVATION OF QUANTUM SYSTEMS

| **Andry Nandrianina Franck Ramanaharivony** \* | **Malalâtiana Ramafiarison** | et | **Radoniaina Rasoamanana** |

Université d'Antananarivo | Ecole Doctorale en Science et Technique de l'Ingénierie et de l'Innovation (ED – STII) | Laboratoire de Recherche en Télécommunication, Automatique, Signal et Images (TASI) | BP 1500 Antananarivo 101 | Madagascar |

| DOI: 10.5281/zenodo.14803942 | | Received January 26, 2025 | | Accepted February 1, 2025 | | Published February 5, 2025 | | ID Article | Ramanaharivony-Ref5-2-20ajira260125 |

### RÉSUMÉ

**Contexte** : La décohérence est un défi majeur pour la préservation de la cohérence des qubits dans les systèmes quantiques. En effet, les systèmes quantiques sont très sensibles à toute perturbation, notamment aux bruits, qu'ils soient de basse ou de haute fréquence. Les techniques de découplage comme le Spin Echo et le CPMG offrent des solutions adaptées à différents types de bruit. **Objectifs** : Combiner les techniques Spin Echo et CPMG pour protéger les qubits contre les bruits de basse et de haute fréquence. Cela vise à améliorer la cohérence des qubits sur des périodes prolongées. **Méthodes** : Une séquence de découplage combinée a été développée en intégrant des cycles de Spin Echo dans la séquence CPMG. Cette approche est modélisée mathématiquement. **Résultats** : La combinaison des deux techniques a montré une réduction significative de la décohérence. Les simulations ont confirmé une meilleure protection des qubits dans des environnements bruités. **Conclusion** : Cette combinaison améliore la robustesse des qubits face à une gamme plus large de bruits. Elle ouvre des perspectives pour des applications futures en informatique et en communication quantiques.

**Mots-clés** : *Découplage dynamique, Spin Echo, CPMG, Décohérence, Qubits, Bruit quantique, Préservation de la cohérence.*

### ABSTRACT

**Context**: Decoherence is a major challenge in preserving qubit coherence in quantum systems. Indeed, quantum systems are highly sensitive to perturbations, particularly to noise at both low or high frequencies. Decoupling techniques such as Spin Echo and CPMG offer solutions tailored to different types of noise. **Objectives**: To combine the Spin Echo and CPMG techniques to protect qubits from both low and high-frequency noise. This approach aims to improve qubit coherence over extended periods. **Methods**: A combined decoupling sequence was developed by integrating Spin Echo cycles into the CPMG sequence. This approach is mathematically modeled. **Results**: The combination of the two techniques demonstrated a significant reduction in decoherence. Simulations confirmed better protection of qubits in noisy environments. **Conclusion**: This combination enhances qubit robustness against a broader range of noise. It opens up new prospects for future applications in quantum computing and communication.

**Keywords** : *Dynamic decoupling, Spin Echo, CPMG, Decoherence, Qubits, Quantum noise, Coherence preservation.*

## 1. INTRODUCTION

Les techniques de découplage dynamique constituent un pilier essentiel de l'informatique quantique et du traitement de ce dernier, servant d'outils indispensables pour préserver la cohérence quantique face aux perturbations environnementales [1,2]. Dans la quête d'ordinateurs quantiques pratiques, la préservation des états quantiques contre la décohérence demeure l'un des défis les plus significatifs, impactant directement la fidélité des opérations et la mise à l'échelle des systèmes quantiques [3].

Parmi l'arsenal de techniques développées pour lutter contre la décohérence, l'écho de spin, introduit par Hahn [4], et la séquence Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) [5] se sont révélés être des approches particulièrement puissantes. La technique de l'écho de spin, qui utilise une impulsion  $\pi$  pour inverser l'accumulation de phase, s'est avérée remarquablement efficace pour atténuer les bruits basses fréquences, en particulier dans les systèmes quantiques à l'état solide où le bruit en  $1/f$  prédomine [6]. Cette méthode s'est révélée précieuse pour prolonger les temps de cohérence dans divers systèmes quantiques, allant de la résonance magnétique nucléaire aux qubits supraconducteurs [7,8].

La séquence CPMG, s'appuyant sur les fondements de l'écho de spin, introduit un schéma d'impulsions plus sophistiqué offrant une protection accrue contre les composantes haute fréquence du bruit [9]. Des mises en œuvre expérimentales récentes ont démontré que les séquences CPMG peuvent prolonger les temps de cohérence de plusieurs ordres de grandeur dans certains systèmes [10], les rendant particulièrement attractives pour les applications de mémoire quantique et les mesures de précision [11]. Les analyses théoriques, notamment celles menées par Uhrig [12] et

approfondies par d'autres chercheurs par la suite [13,14], ont permis de mieux comprendre les propriétés de filtrage spectral de ces techniques. Ces études ont révélé que si chaque méthode excelle dans différentes régions spectrales, aucune ne fournit une protection optimale sur l'ensemble du spectre de bruit typiquement rencontré dans les dispositifs quantiques [15].

Le caractère complémentaire des propriétés de filtrage spectral de ces techniques suggère une possibilité intrigante : la combinaison des approches de l'écho de spin et de CPMG pourrait offrir une solution plus complète au problème de la décohérence. Des propositions théoriques récentes ont commencé à explorer des schémas hybrides [16], mais le plein potentiel de ces combinaisons reste largement inexploré, en particulier dans des environnements de bruit réalistes. Des études ont montré que l'application de séquences Carr–Purcell–Meiboom–Gill (CPMG) multiples permet d'étendre le temps de cohérence des qubits à spin d'électrons à plus de 200  $\mu\text{s}$ , représentant ainsi une amélioration de deux ordres de grandeur par rapport aux mesures précédentes [17]. Par ailleurs, l'utilisation de séquences de découplage dynamique concaténées s'est avérée particulièrement efficace pour réduire la décohérence tout en corrigeant les erreurs opérationnelles, offrant ainsi une tolérance aux fautes accrue et une efficacité améliorée dans des environnements non-Markoviens [18].

En outre, des approches mathématiques avancées, telles que la résolution d'équations integro-différentielles par des méthodes de quadrature de Gauss-Legendre, ont démontré leur potentiel pour modéliser des phénomènes complexes, ouvrant des perspectives intéressantes pour la modélisation de la dynamique des qubits soumis à des perturbations environnementales variées [19]. Ces avancées ouvrent la voie à des approches combinées exploitant les synergies entre différentes méthodes de découplage dynamique, avec pour objectif d'améliorer significativement la préservation de la cohérence quantique dans des conditions variées.

## 2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Dans ce rapport, une présentation des deux techniques de découplage sera présentée suivi des méthodes de calculs utiliser pour la combinaison des deux. Pour explorer cette idée de combinaison, cette section présente les équations mathématiques qui modélisent l'effet de chaque méthode sur le qubit.

### 2.1 Découplage quantique par Spin écho

Le Spin Echo est l'une des techniques fondamentales de découplage quantique pour compenser les erreurs causées par la décohérence, notamment dans les systèmes de qubits exposés au bruit basse fréquence. L'idée de base est d'appliquer une impulsion  $\pi$  (rotation de  $180^\circ$  autour de l'axe X) au milieu de l'évolution libre d'un qubit. Cela permet d'inverser l'effet des erreurs accumulées pendant la première moitié du cycle, et donc de restaurer la cohérence.

#### 2.1.1 Modélisation du système

Pour modéliser un système qubit-environnement, l'état d'un qubit isolé évolue sous l'effet de son hamiltonien propre  $H_S$ . Cependant, dans un environnement bruité, le qubit subit des interactions avec le bruit. Cette interaction est modélisée par un hamiltonien d'interaction  $H_{int}$  tel que :

$$H_{int} = \sigma_z \otimes B(t) \quad (1)$$

Où  $\sigma_z$  est l'opérateur de Pauli-Z, décrivant l'effet de déphasage sur le qubit, et  $B(t)$  est une fonction dépendante du temps, représentant l'influence de l'environnement (bruit basse fréquence).

L'évolution du qubit sous cet hamiltonien est décrite par l'opérateur d'évolution unitaire :

$$U(t) = e^{-iH_{int}t} = e^{-i\sigma_z \otimes B(t)t} \quad (2)$$

Sous cet hamiltonien, l'effet principal est une rotation conditionnée du qubit qui dépend de l'interaction avec l'environnement, causant un déphasage progressif entre les états du qubit.

#### 2.1.2 Effet de la décohérence sans découplage

Posons un qubit initialement préparé dans une superposition d'états  $|\psi(0)\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ . Sous l'effet de la décohérence, cet état évolue dans le temps. En l'absence de protection, la cohérence entre les états  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$  est détruite en raison du bruit environnemental.

L'état du qubit au temps  $t$  après interaction avec l'environnement, devient :

$$|\psi(t)\rangle = \alpha e^{-i\phi_0(t)}|0\rangle + \beta e^{-i\phi_1(t)}|1\rangle \quad (3)$$

Où  $\phi_0(t)$  et  $\phi_1(t)$  sont les phases accumulées respectivement par les états  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$  sous l'effet du bruit. Ces phases sont différentes car elles dépendent du bruit  $B(t)$  de manière distincte.

La cohérence de l'état du qubit est mesurée par les termes hors diagonaux de la matrice densité  $\rho(t)$ . En absence de découplage, ces termes décalent avec le temps, représentant la perte d'information due aux bruits.

### 2.1.3 Principe du Spin Echo

Le Spin Echo repose sur l'application d'une impulsion de retournement  $\pi$  à mi-chemin de l'évolution du qubit. Cela permet d'inverser les effets du bruit basse fréquence qui se sont accumulés. L'impulsion  $\pi$  correspond à une rotation de  $180^\circ$  autour de l'axe  $x$  du qubit, représentée par l'opérateur de Pauli  $\sigma_x$ .

Cette impulsion est appliquée après une durée  $\frac{t}{2}$ . L'effet de cette impulsion sur le qubit est de transformer l'hamiltonien d'interaction de la manière suivante :

$$H_{mod} = \sigma_x H_{int} \sigma_x = -\sigma_z \otimes B(t) \tag{4}$$

Ce qui signifie que les erreurs accumulées durant la première moitié de l'évolution sont inversées pendant la seconde moitié.

### 2.1.4 Évolution du qubit avec un Spin Echo

L'évolution totale se divise en deux parties : avant et après l'impulsion  $\pi$  :

#### 2.1.4.1 Avant l'impulsion (de $t = 0$ à $t = \frac{t}{2}$ )

L'évolution de l'état du qubit est donnée par :

$$U\left(\frac{t}{2}\right) = e^{-iH_{int}\frac{t}{2}} = e^{-i\sigma_z \otimes B(t)\frac{t}{2}} \tag{5}$$

L'état du qubit devient alors :

$$\left|\psi\left(\frac{t}{2}\right)\right\rangle = \alpha e^{-i\phi_0\left(\frac{t}{2}\right)}|0\rangle + \beta e^{-i\phi_1\left(\frac{t}{2}\right)}|1\rangle \tag{6}$$

#### 2.1.4.2 Après l'impulsion (de $t = \frac{t}{2}$ à $t = t$ )

L'impulsion  $\pi$  est appliquée à  $t = \frac{t}{2}$ , inversant l'effet de  $H_{int}$ . L'évolution est donc donnée par :

$$U\left(\frac{t}{2} \rightarrow t\right) = e^{-i(-\sigma_z \otimes B(t)\frac{t}{2})} \tag{7}$$

L'état devient alors :

$$|\psi(t)\rangle = \alpha e^{-i\phi_0(t)}|0\rangle + \beta e^{-i\phi_1(t)}|1\rangle \tag{8}$$

En raison de l'impulsion de retournement, les phases accumulées dans la première moitié sont annulées par celles accumulées dans la seconde moitié :

$$\phi_0(t) = \phi_0\left(\frac{t}{2}\right) - \phi_0\left(\frac{t}{2}\right), \quad \phi_1(t) = \phi_1\left(\frac{t}{2}\right) - \phi_1\left(\frac{t}{2}\right) \tag{9}$$

Cela signifie que les déphasages causés par l'interaction avec le bruit sont annulés, restaurant ainsi la cohérence du qubit. Le Spin Echo inverse efficacement les déphasages causés par les bruits basse fréquence, car ces bruits varient lentement au cours du temps. Par conséquent, le retournement appliqué au milieu de l'évolution permet d'annuler les effets de ces fluctuations.

La formule d'évolution globale devient :

$$U_{Spin\ Echo}(t) = e^{-iH_{int}\frac{t}{2}}\sigma_x e^{-iH_{int}\frac{t}{2}} \tag{10}$$

Cette formule ramène le qubit dans un état proche de l'état initial, en neutralisant les perturbations de basse fréquence.

## 2.2 Découplage par séquence Carr-Purcell-Meiboom-Gill

La séquence Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) est une extension du Spin Echo, utilisée pour atténuer les erreurs causées par la décohérence de phase dans les systèmes quantiques. Cette méthode est particulièrement efficace contre les bruits de hautes fréquences en appliquant une série répétée d'impulsions  $\pi$  ( $180^\circ$ ). Cela permet de corriger les erreurs à plusieurs reprises au cours de l'évolution du qubit, prolongeant ainsi la cohérence.

### 2.2.1 Modélisation de l'hamiltonien et de la décohérence

L'interaction entre un qubit et son environnement bruité est modélisé par un hamiltonien d'interaction. L'effet de la décohérence est décrit par un hamiltonien dépendant du bruit environnemental, donné par :

$$H_{int} = \sigma_z \otimes B(t) \tag{11}$$

Où

$\sigma_z$  est l'opérateur de Pauli-Z, décrivant l'effet de déphasage sur le qubit, et  $B(t)$  est une fonction dépendante du temps, représentant le bruit de l'environnement.

Sans aucune protection, l'évolution du qubit sous ce bruit conduit à une accumulation de déphasage entre les états  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$ , ce qui détruit rapidement la cohérence. Le qubit évolue librement sous l'effet de  $H_{int}$  comme suit :

$$U(t) = e^{-iH_{int}t} = e^{-i\sigma_z \otimes B(t)t} \tag{12}$$

### 2.2.2 Principe de la séquence CPMG

La séquence CPMG applique une série d'impulsions de retournement  $\pi$  à intervalles réguliers. Chaque impulsion est une rotation de  $180^\circ$  autour de l'axe X, représentée par l'opérateur  $\sigma_x$ . Ces impulsions sont appliquées après chaque période  $\tau$  pendant la durée totale de l'évolution du qubit.

Le principe est d'appliquer plusieurs retournements pour inverser l'effet du bruit à chaque intervalle de temps, prolongeant ainsi la cohérence. Contrairement au Spin Echo (qui utilise une seule impulsion  $\pi$ ), CPMG applique n impulsions à intervalles réguliers.

### 2.2.3 Modélisation mathématique du CPMG

Pour un qubit soumis à une séquence CPMG, l'évolution de l'état du qubit peut être divisée en plusieurs cycles, chaque cycle correspondant à un intervalle  $\pi$ . La séquence suit le schéma suivant :

- Une première évolution libre pendant
- Application d'une impulsion  $\pi$
- Nouvelle évolution libre pendant  $\tau$
- Application d'une nouvelle impulsion  $\pi$

Le processus continue ainsi jusqu'à la fin de la durée totale  $T$ , avec n impulsions appliquées à des intervalles réguliers.

#### 2.2.3.1 Première moitié de l'évolution

Pendant le premier intervalle  $t = 0$  à  $t = \frac{\tau}{2}$  le qubit évolue sous l'influence de  $H_{int}$  :

$$U\left(\frac{\tau}{2}\right) = e^{-iH_{int}\frac{\tau}{2}} \tag{13}$$

À ce stade, le bruit provoque un déphasage qui dépend de  $B(t)$ . L'état du qubit après cette première évolution est :

$$\left| \psi\left(\frac{\tau}{2}\right) \right\rangle = \alpha e^{-i\phi_0\left(\frac{\tau}{2}\right)}|0\rangle + \beta e^{-i\phi_1\left(\frac{\tau}{2}\right)}|1\rangle \tag{14}$$

#### 2.2.3.2 Application d'une impulsion $\pi$

Après  $\frac{\tau}{2}$ , une impulsion  $\pi$  est appliquée, ce qui effectue une rotation de l'état du qubit autour de l'axe X. Cela revient à appliquer l'opérateur  $\sigma_x$  sur le qubit. L'hamiltonien est ainsi modifié :

$$H_{mod} = \sigma_x H_{int} \sigma_x = -\sigma_z \otimes B(t) \tag{15}$$

Cela inverse le signe de l'interaction avec l'environnement. Cette inversion annule les erreurs de phase accumulées jusqu'à ce point.

#### 2.2.3.3 Deuxième moitié de l'évolution

Dans la seconde moitié de l'intervalle  $t = \frac{\tau}{2}$  à  $t = \tau$ , le qubit évolue sous l'effet de  $H_{mod}$ . Le nouvel opérateur d'évolution est :

$$U\left(\frac{\tau}{2} \rightarrow \tau\right) = e^{-iH_{mod}\frac{\tau}{2}} = e^{i\sigma_z \otimes B(t)\frac{\tau}{2}} \tag{16}$$

Ainsi, après une impulsion de retournement et une évolution complète de durée  $\tau$ , l'effet de  $B(t)$  est annulé, car les contributions de la première et de la seconde moitié de l'évolution se compensent.

Le cycle complet d'évolution est donné par :

$$U_{cycle}(\tau) = e^{-iH_{int}\frac{\tau}{2}} \sigma_x e^{-iH_{int}\frac{\tau}{2}} \tag{17}$$

#### 2.2.3.4 Répétitions des cycles

Pour la séquence CPMG, cette opération est répétée n fois, avec chaque cycle d'impulsion annulant les erreurs

accumulées pendant la période précédente. L'opérateur total d'évolution après n cycles est :

$$U_{total}(T) = \left( e^{-iH_{int}\frac{T}{2}} \sigma_x e^{iH_{int}\frac{T}{2}} \right)^n \tag{18}$$

### 2.2.4 Facteur de cohérence sous CPMG

Le facteur de cohérence  $\Gamma(t)$  sous une séquence CPMG mesure la capacité du qubit à maintenir une superposition cohérente des états  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$ . Sous l'effet d'une séquence avec n impulsions, la cohérence résiduelle est donnée par :

$$\Gamma_{CPMG}(t) \approx \left( \frac{t}{T_2} \right)^n \tag{19}$$

Où  $T_2$  est le temps caractéristique de déphasage (temps de cohérence transverse), et n est le nombre d'impulsions appliquées. Plus le nombre d'impulsions est élevé, plus la suppression de la décohérence est efficace. La séquence CPMG est une méthode efficace pour combattre les bruits de haute fréquence dans les systèmes quantiques. En appliquant des impulsions  $\pi$  répétées, elle neutralise les erreurs accumulées au fil du temps et prolonge la cohérence du qubit. La formule ci-dessus montre que plus n est élevé, plus le facteur de cohérence  $\Gamma_{CPMG}(t)$  est réduit, ce qui signifie une meilleure protection contre la décohérence.

### 2.3 Découplage quantique combiné Spin Echo et CPMG

L'idée derrière la combinaison du Spin Echo et du Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) est de tirer parti des forces de ces deux techniques pour couvrir une gamme plus large de fréquences de bruit. Le Spin Echo est efficace pour les bruits basse fréquence, tandis que le CPMG est optimal pour atténuer les effets des bruits haute fréquence. En combinant ces deux méthodes, on peut améliorer la suppression de la décohérence en utilisant les impulsions du Spin Echo et du CPMG dans une même séquence, offrant une protection robuste contre un large spectre de bruit.

#### 2.3.1 Modélisation du bruit quantique

Un environnement quantique produit généralement des perturbations à travers un spectre de fréquences variées. Modélisons le bruit par un hamiltonien  $H_{int}$ , qui décrit les interactions entre le qubit et l'environnement :

$$H_{int} = \sigma_z \otimes B(t) \tag{20}$$

Où  $B(t)$  représente le bruit environnemental, qui peut être décomposé en deux contributions :

- $B_{basse}(t)$  : Bruit basse fréquence (lente évolution dans le temps).
- $B_{haute}(t)$  : Bruit haute fréquence (rapide variation dans le temps).

L'évolution naturelle du qubit sous l'influence de ce bruit est :

$$U(t) = e^{-iH_{int}t} = e^{-i\sigma_z \otimes (B_{basse}(t) + B_{haute}(t))t} \tag{21}$$

Sans découplage, le qubit accumule un déphasage dû à ces deux types de bruits, ce qui détruit rapidement la cohérence entre les états  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$

#### 2.3.2 Spin Echo pour les bruits basses fréquences

Le Spin Echo est particulièrement efficace pour lutter contre les erreurs de basse fréquence, car il inverse les effets de déphasage lent. Nous appliquons une impulsion de retournement  $\pi$  (Pauli-X) à mi-chemin de l'évolution du qubit.

##### 2.3.2.1 Première étape : évolution initiale

Le qubit évolue pendant une durée  $\frac{t}{2}$  sous l'effet de  $H_{int}$  :

$$U\left(\frac{t}{2}\right) = e^{-iH_{int}\frac{t}{2}} = e^{-i\sigma_z \otimes (B_{basse}(t) + B_{haute}(t))\frac{t}{2}} \tag{22}$$

##### 2.3.2.2 Deuxième étape : application de l'impulsion de retournement $\pi$

L'impulsion  $\pi$  est appliquée, ce qui revient à conjuguer l'hamiltonien par  $\sigma_x$ , inversant l'effet du déphasage accumulé à basse fréquence :

$$H_{mod} = \sigma_x H_{int} \sigma_x = -\sigma_z \otimes (B_{basse}(t) + B_{haute}(t)) \tag{23}$$

L'évolution pendant la seconde moitié de l'intervalle devient :

$$U\left(\frac{t}{2} \rightarrow t\right) = e^{-iH_{mod}\frac{t}{2}} = e^{i\sigma_z \otimes (B_{basse}(t) + B_{haute}(t))\frac{t}{2}} \tag{24}$$

##### 2.3.2.3 Inversion de bruit basse fréquence

Grâce à cette impulsion de retournement, l'effet de  $B_{basse}(t)$  est annulé, et donc le déphasage lent accumulé durant la première moitié de l'évolution est corrigé. Toutefois, les composantes de haute fréquence restent présentes, car elles évoluent trop rapidement pour être corrigées par une seule impulsion  $\pi$ .

### 2.3.3 CPMG pour les bruits hautes fréquences

Le CPMG est efficace pour atténuer les effets des bruits hautes fréquences. Il consiste à appliquer une série répétée d'impulsions  $\pi$  pour corriger les erreurs de déphasage causées par ces bruits. Chaque cycle de CPMG neutralise les perturbations sur des intervalles  $\tau$ , répétant ainsi le principe du Spin Echo mais de manière plus fréquente.

Nous pouvons maintenant combiner ces deux techniques en intégrant les impulsions du Spin Echo dans une séquence CPMG. Voici le processus en deux étapes :

- Application d'impulsions CPMG : Pour lutter contre les bruits haute fréquence, nous appliquons des impulsions  $\pi$  à des intervalles réguliers  $\tau$ . Cela minimise les erreurs de phase accumulées à haute fréquence.
- Cycles de Spin Echo : Pour chaque intervalle  $\tau$  dans la séquence CPMG, nous insérons un cycle de Spin Echo pour annuler les erreurs basse fréquence.

### 2.3.4 Modélisation du découplage combiné

Modélisons l'évolution du qubit avec le découplage combiné. Pour chaque intervalle de durée  $\tau$ , nous avons un cycle Spin Echo combiné avec une impulsion CPMG.

#### 2.3.4.1 Evolution dans un cycle

L'évolution durant un cycle complet (intervalle  $\tau$ ) devient :

$$U_{cycle}(\tau) = e^{-iH_{int}\frac{\tau}{2}}\sigma_x e^{-iH_{int}\frac{\tau}{2}} \tag{25}$$

Le bruit basse fréquence  $B_{basse}(t)$  est annulé par les cycles Spin Echo, tandis que les erreurs de haute fréquence  $B_{haute}(t)$  sont corrigées par les impulsions CPMG répétées à des intervalles réguliers.

#### 2.3.4.2 Répétitions des cycles

Pour une séquence avec n impulsions CPMG, le qubit évolue selon la séquence répétée :

$$U_{total}(T) = \left( e^{-iH_{int}\frac{\tau}{2}}\sigma_x e^{iH_{int}\frac{\tau}{2}} \right)^n \tag{26}$$

Chaque cycle protège le qubit contre les deux types de bruit simultanément : le Spin Echo annule les erreurs lentes et le CPMG neutralise les erreurs rapides.

### 2.3.5 Facteur de cohérence combiné

Le facteur de cohérence pour cette combinaison peut être exprimé comme une superposition des contributions des deux méthodes. Pour chaque intervalle  $\tau$ , nous avons une contribution de suppression de la décohérence pour les deux types de bruit :

$$\Gamma_{comb}(t) \approx \left( \frac{t}{T_2^{basse\ frequency}} \right)^{n_{spin\ echo}} \left( \frac{t}{T_2^{haute\ frequency}} \right)^{n_{CPMG}} \tag{27}$$

Avec  $n_{spin\ echo}$  est le nombre de cycles de Spin Echo pour traiter les bruits basse fréquence,  $n_{CPMG}$  est le nombre d'impulsions CPMG pour atténuer les bruits haute fréquence.

La combinaison des techniques Spin Echo et CPMG permet de créer une séquence de découplage robuste capable de neutraliser les effets d'une large gamme de bruits. Le Spin Echo corrige les erreurs dues au bruit basse fréquence, tandis que le CPMG corrige les erreurs à haute fréquence. La superposition des deux stratégies permet de maintenir la cohérence des qubits sur des périodes plus longues dans des environnements bruités. Cette combinaison est particulièrement utile pour des systèmes quantiques exposés à des perturbations variées, offrant une protection plus complète contre la décohérence.

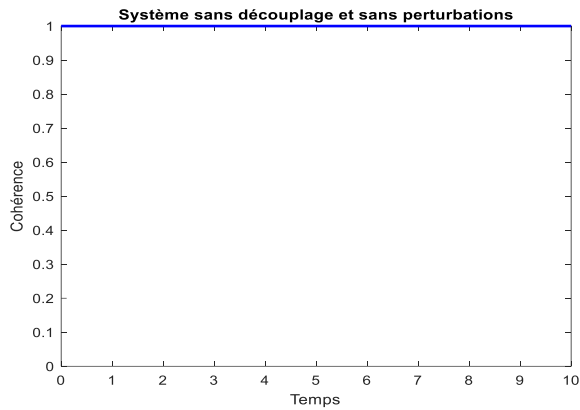
## 3. RÉSULTATS

Dans cette section une comparaison de l'effet des différentes techniques de découplage sur la cohérence des qubits en présence de perturbations environnementales seront présentés par des simulations. Les simulations ont été réalisées pour cinq scénarios distincts, illustrant l'impact du bruit sur la cohérence quantique et l'efficacité des méthodes de découplage appliquées.

Voici ce qui est montré sur les simulations :

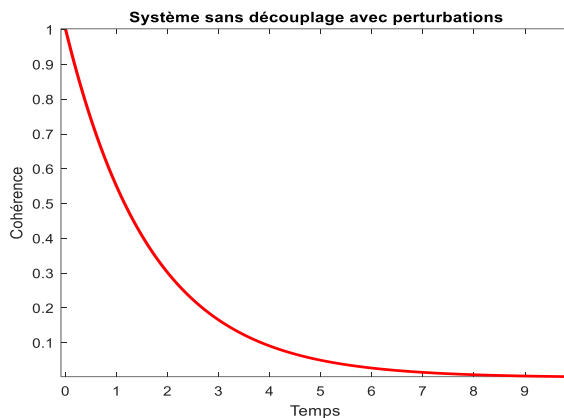
- Courbe : La courbe représente la cohérence quantique en fonction du temps sans aucune perturbation ni découplage.
- Axe des X : Il représente le temps (en secondes ou unités arbitraires selon le contexte de la simulation).
- Axe des Y : Il représente la cohérence du qubit, qui varie entre 0 (perte totale de la cohérence) et 1 (cohérence parfaite).

**3.1 Scénario numéro 1 : Système quantique sans découplage quantique dans un environnement sans perturbations de bruits**



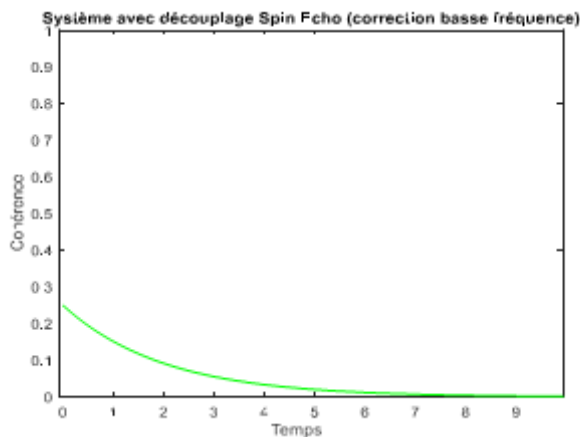
**Figure 1 :** Système quantique sans découplage quantique dans un environnement sans perturbations de bruits.

**3.2 Scénario numéro 2 : Système quantique sans découplage quantique dans un environnement bruité**



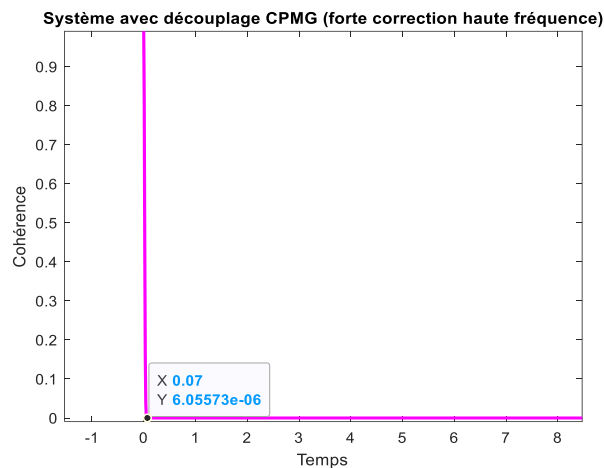
**Figure 2 :** Système quantique sans découplage quantique dans un environnement bruité.

**3.3 Scénario numéro 3 : Système quantique avec découplage quantique spin écho dans un environnement bruité**



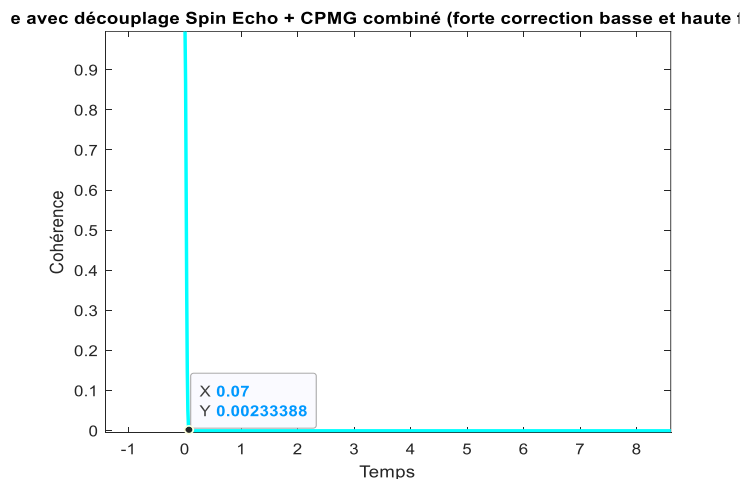
**Figure 3 :** Système quantique avec découplage quantique spin écho dans un environnement bruité.

### 3.4 Scénario numéro 4 : Système quantique avec découplage quantique CPMG dans un environnement bruité



**Figure 4 :** Système quantique avec découplage quantique CPMG dans un environnement bruité.

### 3.5 Scénario numéro 5 : Système quantique avec le découplage combiné



**Figure 5 :** Système quantique avec le découplage combiné.

## 4. DISCUSSION

### 4.1 Système quantique sans découplage quantique dans un environnement sans perturbations de bruits

La première figure présente la dynamique de la cohérence quantique d'un qubit en l'absence de toute perturbation et sans technique de découplage. Comme prévu, la cohérence reste constante et maximale à 1 tout au long de la simulation. Ce résultat montre le comportement idéal du qubit, où aucune interaction avec l'environnement ne vient altérer l'état quantique. C'est le point de référence pour comparer l'impact des perturbations.

### 4.2 Système quantique sans découplage quantique dans un environnement bruité

La seconde figure met en évidence l'effet des perturbations sur un qubit sans l'application de techniques de découplage. Sous l'influence d'un bruit mixte (basse et haute fréquence), la cohérence diminue rapidement, ce qui illustre la perte d'information quantique. À un certain moment, la cohérence chute sous les 0.5, indiquant une perte de la moitié de la superposition quantique. Ce résultat démontre la nécessité de recourir à des techniques de découplage pour protéger le qubit.

### 4.3 Système quantique avec découplage quantique spin écho dans un environnement bruité

La troisième figure montre le résultat de l'application de la technique de Spin Echo, conçue pour compenser les erreurs causées par le bruit basse fréquence. Par rapport à la figure 2, la cohérence est mieux maintenue, en particulier aux premiers instants, ce qui montre l'efficacité de cette technique contre les erreurs lentes. Toutefois, la perte de cohérence finit par se manifester avec les bruits de haute fréquence non corrigés, confirmant que le Spin Echo n'est pas suffisant pour un bruit à large bande.

#### 4.4 Système quantique avec découplage quantique CPMG dans un environnement bruité

Dans cette figure, la réponse du système quantique soumis à des bruits basse fréquence avec l'application du découplage CPMG. Comme illustré dans l'image, pour une valeur de  $X = 0.07$ , l'amplitude de la cohérence est extrêmement faible, avec une valeur de  $Y \approx 6.06 \times 10^{-6}$ .

Ce faible niveau de cohérence indique que le CPMG seul n'est pas très efficace pour contrer les bruits basse fréquence, qui dégradent la cohérence du système de manière significative. L'amplitude très réduite montre une perte rapide de la cohérence, ce qui confirme que le CPMG est plus adapté pour traiter les bruits de haute fréquence, et moins performant pour des perturbations à basse fréquence.

#### 4.5 Système quantique avec le découplage combiné

La figure montre le système soumis au découplage combiné, et les résultats sont nettement plus favorables. Pour  $X = 0.07$ , l'amplitude de la cohérence est beaucoup plus élevée, avec une valeur de  $Y \approx 0.00233$ , soit plusieurs ordres de grandeur supérieure à celle obtenue avec le CPMG seul. Cette valeur reflète l'efficacité du découplage combiné pour protéger le système contre les perturbations de haute et basse fréquence. L'application simultanée du Spin Echo et du CPMG permet de mieux atténuer les effets des bruits sur une large gamme de fréquences, ce qui se traduit par une meilleure préservation de la cohérence des qubits. Le découplage combiné offre donc une solution plus robuste pour maintenir l'intégrité du système quantique dans un environnement bruité.

## 5. CONCLUSION

En combinant les forces de **Spin Echo** et **CPMG**, il est possible d'obtenir un découplage plus robuste contre une gamme plus large de fréquences de bruit. Cette approche ouvre des perspectives pour des applications en informatique quantique et en communication quantique où la préservation de la cohérence sur de longues périodes est cruciale.

## 6. RÉFÉRENCES

- Viola L, Knill E, Lloyd S. Dynamical Decoupling of Open Quantum Systems. *Nature*. 1999;398(6724):339-42.
- Lidar DA, Brun TA. *Quantum Error Correction*. Cambridge University Press; 2013.
- Preskill J. Quantum Computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*. 2018;2:79.
- Hahn EL. Spin Echoes. *Phys Rev*. 1950;80(4):580-94.
- Meiboom S, Gill D. Modified Spin-Echo Method for Measuring Nuclear Relaxation Times. *Rev Sci Instrum*. 1958;29(8):688-91.
- Bylander J, Gustavsson S, Yan F, Yoshihara F, Harrabi K, Fitch G, et al. Noise spectroscopy through dynamical decoupling with a superconducting flux qubit. *Nat Phys*. 2011;7(7):565-70.
- Oliver WD, Welander PB. Materials in superconducting quantum bits. *MRS Bull*. 2013;38(10):816-25.
- Vandersypen LMK, Chuang IL. NMR techniques for quantum control and computation. *Rev Mod Phys*. 2005;76(4):1037-69.
- de Lange G, Wang ZH, Risté D, Dobrovitski VV, Hanson R. Universal Dynamical Decoupling of a Single Solid-State Spin from a Spin Bath. *Science*. 2010;330(6000):60-3.
- Biercuk MJ, Uys H, VanDevender AP, Shiga N, Itano WM, Bollinger JJ. Optimized dynamical decoupling in a model quantum memory. *Nature*. 2009;458(7241):996-1000. Available on: <https://doi.org/10.1088/0953-4075/44/15/154002>
- Maze JR, Stanwix PL, Hodges JS, Hong S, Taylor JM, Cappellaro P, et al. Nanoscale magnetic sensing with an individual electronic spin in diamond. *Nature*. 2008;455(7213):644-7.
- Uhrig GS. Keeping a Quantum Bit Alive by Optimized  $\pi$ -Pulse Sequences. *Phys Rev Lett*. 2007;98(10):100504. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.100504>
- Yang W, Wang ZY, Liu RB. Preserving qubit coherence by dynamical decoupling. *Front Phys*. 2011;6(1):2-14.
- Suter D, Álvarez GA. Colloquium: Protecting quantum information against environmental noise. *Rev Mod Phys*. 2016;88(4):041001.
- Cywiński L, Lutchyn RM, Nave CP, Das Sarma S. How to enhance dephasing time in superconducting qubits. *Phys Rev B*. 2008;77(17):174509.
- Wang ZY, Liu RB. Protection of quantum systems by nested dynamical decoupling. *Phys Rev A*. 2011;83(2):022306.
- Bluhm H., Foletti S., Neder I., Rudner M., Mahalu D., Umansky V., and Yacoby A. Dephasing Time of GaAs Electron-Spin Qubits Coupled to a Nuclear Bath Exceeding 200  $\mu$ s. *Nature Physics*. 2011; Available on: <https://www.nature.com/articles/nphys1856>
- Khodjasteh K., and Lidar D. A. Fault-Tolerant Quantum Dynamical Decoupling. *Physical Review Letters*. 2005; Available on: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.180501>
- Álvarez G. A., and Suter D. Measuring the Spectrum of Colored Noise by Dynamical Decoupling. *Physical Review Letters*. 2011; Available on: <https://arxiv.org/abs/1106.1553>



How to cite this article: Andry Nandrianina Franck Ramanaharivony, Malalatiiana Ramafiarison | et Radoniaina Rasoamanana. MÉCANISME DE DÉCOUPLAGE QUANTIQUE ET PRÉSERVATION DE LA COHÉRENCE DES SYSTÈMES QUANTIQUES. *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2025; 20(2): 28-36. [DOI/ 10.5281/zenodo.14803942]

This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>