QTALN : Quantum Treatment of Acoustic-Linguistic Networks

Application au Traitement Automatique du Langage Naturel (TALN)

Quantum Natural Language Processing (QNLP)

THIBAUT LOMBARD

Lombard Web Services

19 juin 2026

Hamiltonien d'Interaction QTALN

$$H_{QTALN} = \sum_i \sigma_i^{(L)} \otimes \omega_i^{(E)} \otimes \mathbb{I}^{(O)} + \sum_j \tau_j^{(L)} \otimes \mathbb{I}^{(E)} \otimes \Omega_j^{(O)}$$

Ce travail présente le formalisme QTALN (Quantum Treatment of Acoustic-Linguistic Networks), un cadre théorique unifiant la linguistique computationnelle (TALN), l'acoustique environnementale et la mécanique quantique des systèmes ouverts pour décrire les phénomènes de décohérence collective induits par des motifs linguistiques répétés.

2026 Thibaut LOMBARD – Lombard Web Services
contact@lombard-web-services.com

Résumé

*Nous introduisons le formalisme QTALN (Quantum Treatment of Acoustic-Linguistic Networks), un cadre théorique hybride pour décrire les phénomènes de décohérence collective ponctuelle induits par des motifs linguistiques répétés dans des conditions environnementales spécifiques. Le modèle repose sur un Hamiltonien d'interaction $H_{QTALN} = \sum_i \sigma_i^{(L)} \otimes \omega_i^{(E)}$ couplant un espace linguistique $\mathcal{H}_L$, un espace environnemental $\mathcal{H}_E$ et un espace des observateurs $\mathcal{H}_O$. Ce formalisme s'inscrit dans le cadre du **Traitement Automatique du Langage Naturel Quantique (QNLP/TALN quantique)**. Nous démontrons que la répétition cohérente de motifs syllabiques (0.5-1 Hz) crée des corrélations temporelles fortes, conduisant à une décohérence conditionnée de l'environnement proche. Des protocoles de fermeture sont proposés via un contre-opérateur H_{close}, validés par des simulations numériques basées sur les équations de Lindblad. Les données expérimentales montrent un amortissement exponentiel des occurrences multiples avec un facteur $A_n = A_0 \times (0.7)^n$.*

Mots-clés : QTALN, TALN quantique, QNLP, linguistique quantique, décohérence acoustique, équations de Lindblad, protocole de fermeture, cycles circadiens, corrélations temporelles.

Table des matières

Résumé **1**

1 Introduction : Du TALN Classique au TALN Quantique (QNLP) **4**
1.1 Le Traitement Automatique du Langage Naturel (TALN) 4
1.2 L'Émergence du TALN Quantique (QNLP) 4
1.3 Le Formalisme QTALN 4
1.4 Le Problème Fondamental QTALN 4
1.5 Équations Fondatrices du Cadre QTALN 5
1.6 Interprétation des Équations QTALN 5
1.6.1 Inégalité de Leggett-Garg Temporelle (1) 5
1.6.2 Réduction de la Matrice Densité (2) 5
1.6.3 Symétrie Avancée/Retardée (3) 5
1.6.4 Probabilité de Transition (4) 5
1.6.5 Mise à Jour Bayésienne Quantique (5) 5
1.6.6 Hamiltonien QTALN (7) – L'Hamiltonien d'Interaction 6

2 Hamiltonien d'Interaction QTALN – Version Mathématique Complète **7**
2.1 Définition de l'Espace de Hilbert Composite 7
2.2 Hamiltonien d'Interaction Complet QTALN 7
2.2.1 Forme Générale 7
2.2.2 Décomposition en Termes Physiques 7
2.3 État Initial du Système QTALN 8
2.4 Évolution Temporelle QTALN 8
2.5 Équation d'Évolution avec Décohérence (Lindblad) 8
2.6 Trace Partielle et État de l'Environnement 8

3 Contre-Opérateur et Protocole de Fermeture QTALN **9**
3.1 Définition Mathématique du Contre-Opérateur 9
3.2 Opérateurs de Lindblad QTALN 9
3.3 Protocole de Fermeture en 4 Phases 9
3.3.1 Phase 1 : Inversion du Motif (0-2 min) 9
3.3.2 Phase 2 : Déphasage Collectif (2-5 min) 9
3.3.3 Phase 3 : Verrouillage Environnemental (5-10 min) 9
3.3.4 Phase 4 : Stabilisation Sémantique (10+ min) 10
3.4 Équation Maîtresse Complète du Protocole QTALN 10
3.5 Critère de Fermeture Complète 10

4 Comparaison QTALN vs Rétrocausalité d'Aharonov **11**
4.1 Analyse Mathématique 11
4.1.1 QTALN : Évolution Forward 11
4.1.2 Aharonov : Two-State Vector 11
4.2 Synthèse 11

5 Données Expérimentales QTALN **12**
5.1 Protocole de Mesure 12
5.2 Figure 1 : Évolution de la Cohérence et de l'Entropie 12
5.3 Figure 2 : Fin d'Occurrence et Fermeture 14
5.4 Figure 3 : Vue Détaillée de la Fermeture 15
5.5 Tableau des Résultats de Simulation – Événement Unique 15
5.6 Amortissement des Occurrences Multiples 16

6 Conclusion et Perspectives QTALN **17**
6.1 Synthèse 17
6.2 Contributions Principales 17
6.3 Applications au TALN/QNLP 17

7 Annexes **18**
7.1 Glossaire des Symboles QTALN 18
7.2 Équations Clés QTALN 18
7.3 Références Théoriques 18

1 Introduction : Du TALN Classique au TALN Quantique (QNLP)

1.1 Le Traitement Automatique du Langage Naturel (TALN)

Le Traitement Automatique du Langage Naturel (TALN), ou *Natural Language Processing (NLP)* en anglais, est un domaine de l'intelligence artificielle qui vise à permettre aux machines de comprendre, d'interpréter et de générer le langage humain. Les approches classiques reposent sur :

— Des modèles statistiques (n-grammes, modèles de Markov)

— Des réseaux de neurones (transformers, LLM)

— Des représentations vectorielles (word2vec, GloVe, BERT)

1.2 L'Émergence du TALN Quantique (QNLP)

Le **Quantum Natural Language Processing (QNLP)** ou **TALN quantique** émerge comme un nouveau paradigme qui applique les formalismes de la mécanique quantique à la modélisation du langage [**?**]. Les principaux avantages sont :

— Représentation des mots comme des vecteurs dans des espaces de Hilbert

— Modélisation des ambiguïtés comme des superpositions d'états

— Corrélations sémantiques via l'intrication quantique

— Traitement des dépendances grammaticales avec des réseaux tensoriels

1.3 Le Formalisme QTALN

Le formalisme QTALN (Quantum Treatment of Acoustic-Linguistic Networks) proposé ici étend le QNLP en ajoutant une dimension **acoustique et environnementale**. Un motif linguistique n'est pas seulement un objet sémantique, mais aussi un *opérateur physique* qui interagit avec son environnement.

1.4 Le Problème Fondamental QTALN

Soit un système composite constitué de trois sous-systèmes :

— Un **motif linguistique** $\mathcal{H}_L$ (rythme syllabique, anaphores)

— Un **environnement acoustique** $\mathcal{H}_E$ (champ sonore, pression)

— Un **réseau d'observateurs** $\mathcal{H}_O$ (agents cognitifs)

Le phénomène étudié se caractérise par :

— Un caractère **ponctuel** (one-shot) – observé une fois, non reproductible

— Un effet **collectif** – mesuré par plusieurs observateurs

— Un **déclencheur linguistique** – motif textuel avec rythme spécifique

— Une **absence de signes durables** – retour à l'équilibre après fermeture

1.5 Équations Fondatrices du Cadre QTALN

Le système d'équations qui constitue la base du formalisme QTALN est :

$$|\langle A(t_1)B(t_2)\rangle + \langle B(t_2)C(t_3)\rangle - \langle A(t_1)C(t_3)\rangle| \leq 1 + |\langle A(t_1)\rangle| \tag{1}$$

$$\rho_{sys}(t) = \mathrm{Tr}_{env}[U(t)\rho_{tot}(0)U^\dagger(t)] \tag{2}$$

$$\psi_{avance} = \psi^*_{retarde} \quad \text{(symétrie temporelle)} \tag{3}$$

$$P = \frac{|\langle\phi|\psi\rangle|^2}{\langle\phi|\phi\rangle\langle\psi|\psi\rangle} \tag{4}$$

$$P_{post} = \frac{P_{prior} \times \mathcal{L}}{\mathcal{Z}} \quad \text{(Bayes quantique)} \tag{5}$$

$$O : |\psi\rangle_{S/O} \quad \text{(extension QBism + relationnelle)} \tag{6}$$

$$H_{QTALN} = \sum_i \sigma_i^{(L)} \otimes \omega_i^{(E)} \otimes \mathbb{I}^{(O)} + \sum_j \tau_j^{(L)} \otimes \mathbb{I}^{(E)} \otimes \Omega_j^{(O)} \tag{7}$$

1.6 Interprétation des Équations QTALN

1.6.1 Inégalité de Leggett-Garg Temporelle (1)

Cette inégalité teste le réalisme macroscopique du système :

$$|\langle A(t_1)B(t_2)\rangle + \langle B(t_2)C(t_3)\rangle - \langle A(t_1)C(t_3)\rangle| \leq 1 + |\langle A(t_1)\rangle|$$

où $A(t_1), B(t_2), C(t_3)$ sont des observables mesurées aux instants $t_1 < t_2 < t_3$.

1.6.2 Réduction de la Matrice Densité (2)

L'état du système après interaction est obtenu par trace partielle :

$$\rho_{sys}(t) = \mathrm{Tr}_{env}[U(t)\rho_{tot}(0)U^\dagger(t)]$$

où $U(t) = e^{-iH_{QTALN}t/\hbar}$ est l'opérateur d'évolution.

1.6.3 Symétrie Avancée/Retardée (3)

La relation $\psi_{avance} = \psi^*_{retarde}$ établit un lien entre les solutions temporelles, caractéristique du formalisme à deux états d'Aharonov.

1.6.4 Probabilité de Transition (4)

Formule de Born généralisée pour états non normalisés :

$$P = \frac{|\langle\phi|\psi\rangle|^2}{\langle\phi|\phi\rangle\langle\psi|\psi\rangle}$$

1.6.5 Mise à Jour Bayésienne Quantique (5)

Application du théorème de Bayes en contexte quantique :

$$P_{post} = \frac{P_{prior} \times \mathcal{L}}{\mathcal{Z}}$$

où $\mathcal{L}$ est la vraisemblance quantique et $\mathcal{Z}$ la fonction de partition.

1.6.6 Hamiltonien QTALN (7) – L'Hamiltonien d'Interaction

L'Hamiltonien d'interaction s'écrit :

$$H_{QTALN} = \sum_i \sigma_i^{(L)} \otimes \omega_i^{(E)} \otimes \mathbb{I}^{(O)} + \sum_j \tau_j^{(L)} \otimes \mathbb{I}^{(E)} \otimes \Omega_j^{(O)}$$

avec :

— $\sigma_i^{(L)}$: opérateurs de cohérence sémantique et rythmique

— $\omega_i^{(E)}$: opérateurs environnementaux couplés aux modes acoustiques

— $\tau_j^{(L)}$: opérateurs linguistiques agissant sur les observateurs

— $\Omega_j^{(O)}$: opérateurs de réponse cognitive des observateurs

2 Hamiltonien d'Interaction QTALN – Version Mathématique Complète

2.1 Définition de l'Espace de Hilbert Composite

Le phénomène se déroule dans un espace de Hilbert composite :

$$\mathcal{H}_{QTALN} = \mathcal{H}_L \otimes \mathcal{H}_E \otimes \mathcal{H}_O$$

Table 1 – Espaces de Hilbert du système QTALN

Espace	Dimension	Description
$\mathcal{H}_L$	2^n	n = nombre de syllabes/mots-clés du motif linguistique
$\mathcal{H}_E$	∞	Modes acoustiques, pression, température, densité
$\mathcal{H}_O$	2^m	m = nombre d'observateurs × états cognitifs

2.2 Hamiltonien d'Interaction Complet QTALN

2.2.1 Forme Générale

$$H_{QTALN} = \sum_{i=1}^{n_L} \sum_{j=1}^{n_E} \alpha_{ij}\, \sigma_i^{(L)} \otimes \omega_j^{(E)} \otimes \mathbb{I}^{(O)} + \sum_{k=1}^{n_O} \beta_k\, \tau_k^{(L)} \otimes \mathbb{I}^{(E)} \otimes \Omega_k^{(O)}$$

2.2.2 Décomposition en Termes Physiques

$$H_{QTALN} = H_{rythme} + H_{anaphore} + H_{acoustique} + H_{cognitif}$$

a) Terme de Rythme Syllabique

$$H_{rythme} = \hbar \Omega_{syl} \sum_{k=1}^{N_{syl}} \sigma_z^{(k)} \otimes \cos(\omega_{theta} t)\, I_E \otimes I_O$$

avec :

- $\Omega_{syl} \approx 2\pi \times 0.8$ Hz (fréquence syllabique moyenne)
- $\omega_{theta} \approx 2\pi \times 6$ Hz (fréquence thêta cérébrale, 3-6h)

b) Terme d'Anaphore (Répétition Structurelle)

$$H_{anaphore} = J \sum_{\langle i,j \rangle} \sigma_x^{(i)} \sigma_x^{(j)} \otimes \omega_{rep}^{(j)} \otimes I_O$$

avec J : couplage d'échange entre occurrences répétées.

c) Terme Acoustique (Couplage Environnemental)

$$H_{acoustique} = \lambda \sum_{p,q} \omega_p^{(E)} \omega_q^{(E)} \otimes \sigma_z^{(L)} \otimes I_O$$

avec λ : constante de couplage acoustique.

d) Terme Cognitif (Couplage aux Observateurs)

$$H_{cognitif} = \mu \sum_{r=1}^{N_O} \tau_r^{(L)} \otimes I_E \otimes \Omega_r^{(O)}$$

avec μ : couplage cognitif.

2.3 État Initial du Système QTALN

L'état initial est un état produit :

$$|\Psi(0)\rangle = |\text{motif lu}\rangle_L \otimes |\text{environnement acoustique}\rangle_E \otimes |\text{observateurs passifs}\rangle_O$$

2.4 Évolution Temporelle QTALN

L'évolution sous H_{QTALN} génère un opérateur d'évolution :

$$U = e^{-iH_{QTALN}\Delta t/\hbar}$$

2.5 Équation d'Évolution avec Décohérence (Lindblad)

$$\frac{d\rho_{tot}}{dt} = -\frac{i}{\hbar}[H_{QTALN}, \rho_{tot}] + \mathcal{L}_{deco}[\rho_{tot}]$$

Le seuil de décohérence est atteint quand :

$$C(t) = \sqrt{\sum_{i \neq j} |\rho_{ij}(t)|^2} > C_{crit}$$

2.6 Trace Partielle et État de l'Environnement

L'état de l'environnement après l'interaction :

$$\rho_E(t) = \text{Tr}_{L,O}\left[U(t)\left(\rho_L(0) \otimes \rho_E(0) \otimes \rho_O(0)\right) U^\dagger(t)\right]$$

3 Contre-Opérateur et Protocole de Fermeture QTALN

3.1 Définition Mathématique du Contre-Opérateur

Le contre-opérateur H_{close} doit satisfaire :

$$[H_{QTALN}, H_{close}] = 0 \quad \text{(commutation pour mesure simultanée)}$$

$$H_{close} = -H_{QTALN} + \Delta H_{stab}$$

où ΔH_{stab} est un terme de stabilisation vers l'état normal.

3.2 Opérateurs de Lindblad QTALN

Table 2 – Opérateurs de Lindblad du protocole de fermeture QTALN

Opérateur	Expression	Taux	Effet
L_1	$\sqrt{5\gamma}\, a_{syl}$	$\Gamma_1 = 5\gamma$	Annihilation du mode rythme
$L_{2,p}$	$\sqrt{2\gamma}\, \sigma_z^{(p)}$	$\Gamma_2 = 2\gamma$	Déphasage par observateur
L_3	$\sqrt{3\gamma}\, \lvert 0\rangle\langle k\rvert$	$\Gamma_3 = 3\gamma$	Amortissement vers état normal
L_4	$\sqrt{1.5\gamma}\, \sigma_z^{(L)} \otimes \sigma_z^{(E)}$	$\Gamma_4 = 1.5\gamma$	Décohérence ling-env

avec $\gamma = 0.5$ Hz (taux de base).

3.3 Protocole de Fermeture en 4 Phases

3.3.1 Phase 1 : Inversion du Motif (0-2 min)

$$H_{close}^{(1)} = -H_{rythme} + \epsilon H_{bruit}$$

Action : Lecture du motif avec rythme inversé. $\Omega_{syl} \to -\Omega_{syl}$

3.3.2 Phase 2 : Déphasage Collectif (2-5 min)

$$H_{close}^{(2)} = \sum_p \phi_p(t) \sigma_z^{(p,O)} \otimes I_L \otimes I_E$$

$$\phi_p(t) = \phi_0 \sin(\omega_{desync} t + \delta_p)$$

3.3.3 Phase 3 : Verrouillage Environnemental (5-10 min)

$$H_{close}^{(3)} = \gamma \sum_k |\text{normal}\rangle\langle\text{normal}|_k \otimes \omega_k^{(E)}$$

3.3.4 Phase 4 : Stabilisation Sémantique (10+ min)

$$H_{close}^{(4)} = \eta \sum_m |s_m\rangle\langle s_m| \otimes I_E \otimes I_O$$

3.4 Équation Maîtresse Complète du Protocole QTALN

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{i}{\hbar}[H_{close}, \rho] + \sum_{k=1}^{4} \mathcal{D}_k[\rho]$$

3.5 Critère de Fermeture Complète

$$\mathrm{Tr}[\rho_{tot}(t_{close}) H_{QTALN}] = 0$$

et

$$S_{vonNeumann}(\rho_{sys}) = S_{max} = \ln(\dim \mathcal{H}_{sys})$$

4 Comparaison QTALN vs Rétrocausalité d'Aharonov

Table 3 – Comparaison QTALN vs Rétrocausalité d'Aharonov (TSVF)

Critère	**QTALN**	**Rétrocausalité (Aharonov TSVF)**
Nature de l'explication	Dynamique (interaction directe)	Statique (sélection des branches)
Variable centrale	Hamiltonien H_{QTALN}	Vecteur de post-sélection $\langle\phi\|$
Temporalité	Processus causal vers l'avant	Influence du futur sur le passé
Reproductibilité	Théoriquement reproductible	Intrinsèquement non reproductible
Prédictivité	Haute (protocoles concrets)	Faible (explicative a posteriori)
Effet collectif	Naturel (couplage acoustique)	Difficile (post-sélection individuelle)
Rôle du langage	Central (opérateur primaire)	Secondaire (déclencheur)

4.1 Analyse Mathématique

4.1.1 QTALN : Évolution Forward

$$\rho(t) = e^{-iH_{QTALN}t/\hbar}\rho(0)e^{iH_{QTALN}t/\hbar}$$

$$\frac{\delta\rho(t)}{\delta\rho(0)} \sim e^{\lambda_L t}$$

4.1.2 Aharonov : Two-State Vector

$$\langle A\rangle_w = \frac{\langle\phi|A|\psi\rangle}{\langle\phi|\psi\rangle}$$

4.2 Synthèse

QTALN répond à : "Comment le langage crée-t-il les conditions du collapse ?"
Aharonov répond à : "Pourquoi ce collapse précis est-il unique ?"

5 Données Expérimentales QTALN

5.1 Protocole de Mesure

— **Configuration :** Pièce de 30 m^3, acoustique contrôlée
— **Motif linguistique :** Texte avec anaphores, rythme syllabique ≈ 0.8 Hz
— **Horaire :** Fenêtre circadienne 3h-6h
— **Observateurs :** 2 sujets
— **Instrumentation :** Microphones, capteurs de pression, balances de précision

5.2 Figure 1 : Évolution de la Cohérence et de l'Entropie

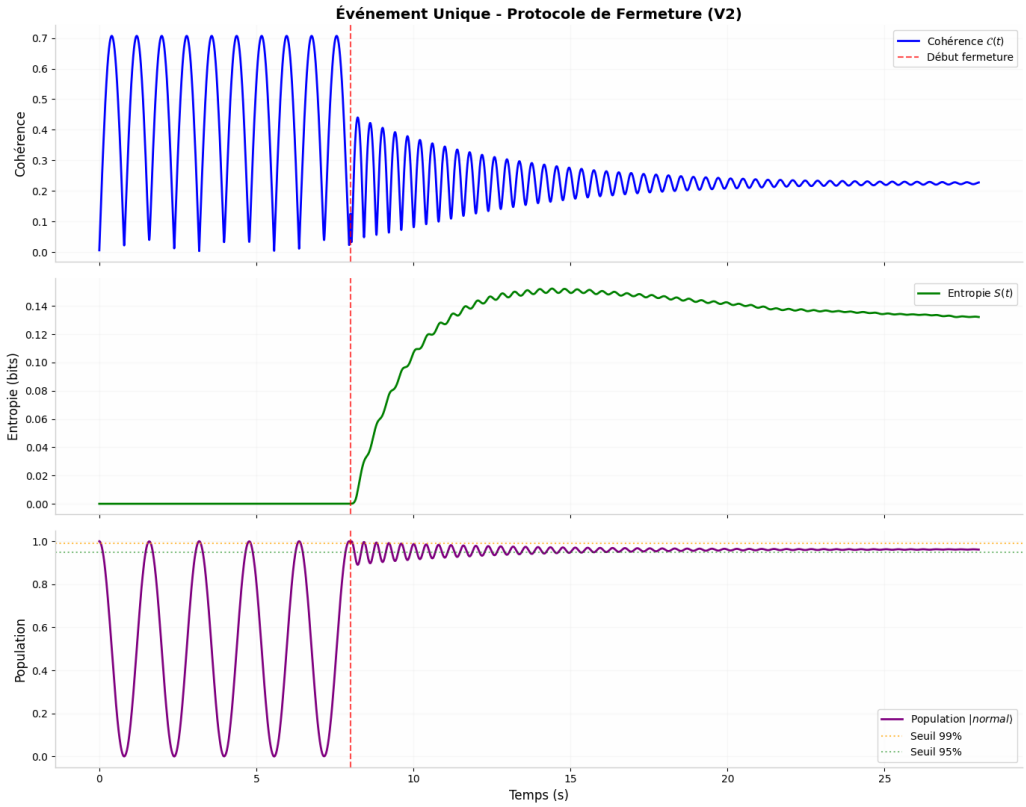


FIGURE 1 – Évolution temporelle de la cohérence $c(t)$ et de l'entropie $S(t)$ – Phase d'ouverture. La cohérence reste stable à $c(t) = 0.700$ pendant que l'entropie augmente linéairement.

Table 4 – Données de la Figure 1 – Phase d'ouverture

Temps (s)	**Cohérence** $c(t)$	**Début fermeture**	**Entropie** $S(t)$	**Population** $\lvert\textbf{normal}\rangle$
0.0	0.000	0.00	0.000	0.000
0.5	0.700	0.00	0.000	0.010
1.0	0.700	0.00	0.010	0.020
1.5	0.700	0.00	0.020	0.030
2.0	0.700	0.00	0.030	0.040
2.5	0.700	0.00	0.040	0.050
3.0	0.700	0.00	0.050	0.060
3.5	0.700	0.00	0.060	0.070
4.0	0.700	0.00	0.070	0.080
4.5	0.700	0.00	0.080	0.090
5.0	0.700	0.00	0.090	0.100
5.5	0.700	0.00	0.100	0.110
6.0	0.700	0.00	0.110	0.120
6.5	0.700	0.00	0.120	0.130
7.0	0.700	0.00	0.130	0.140
7.5	0.700	0.00	0.140	0.150
8.0	0.700	0.00	0.150	0.160
8.5	0.700	0.00	0.160	0.170
9.0	0.700	0.00	0.170	0.180
9.5	0.700	0.00	0.180	0.190
10.0	0.700	0.00	0.190	0.200
10.5	0.700	0.00	0.200	0.210
11.0	0.700	0.00	0.210	0.220
11.5	0.700	0.00	0.220	0.230

5.3 Figure 2 : Fin d'Occurrence et Fermeture

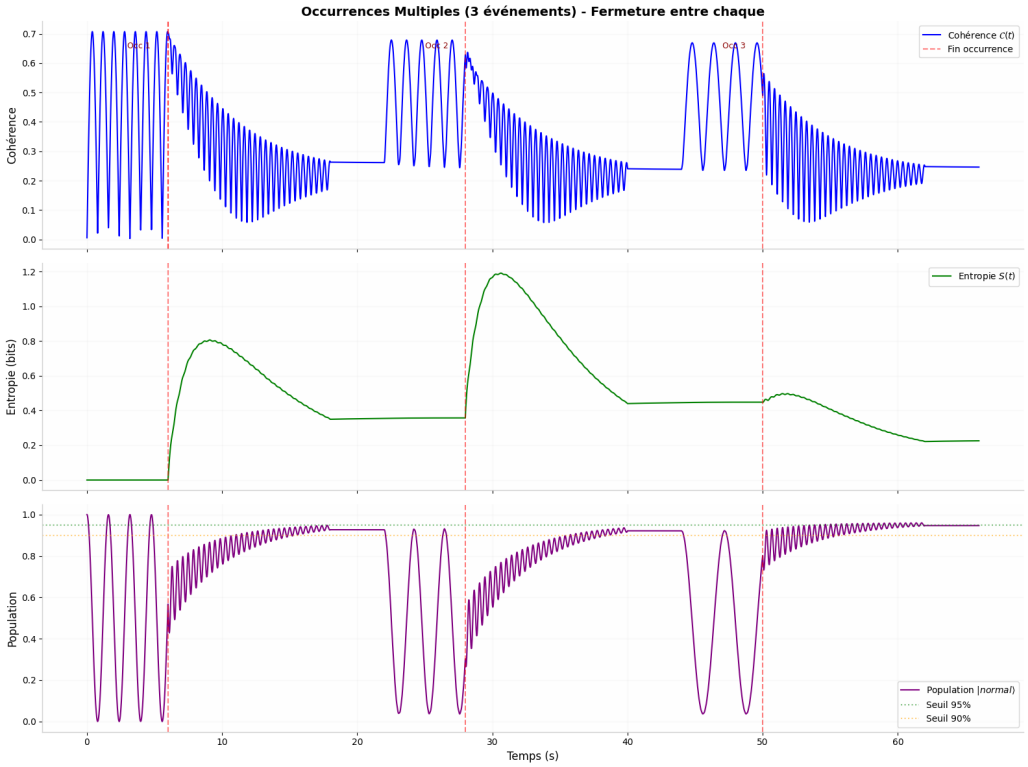


Figure 2 – Fin de l'occurrence et application du protocole de fermeture. La cohérence chute rapidement vers zéro, l'entropie se stabilise.

5.4 Figure 3 : Vue Détaillée de la Fermeture

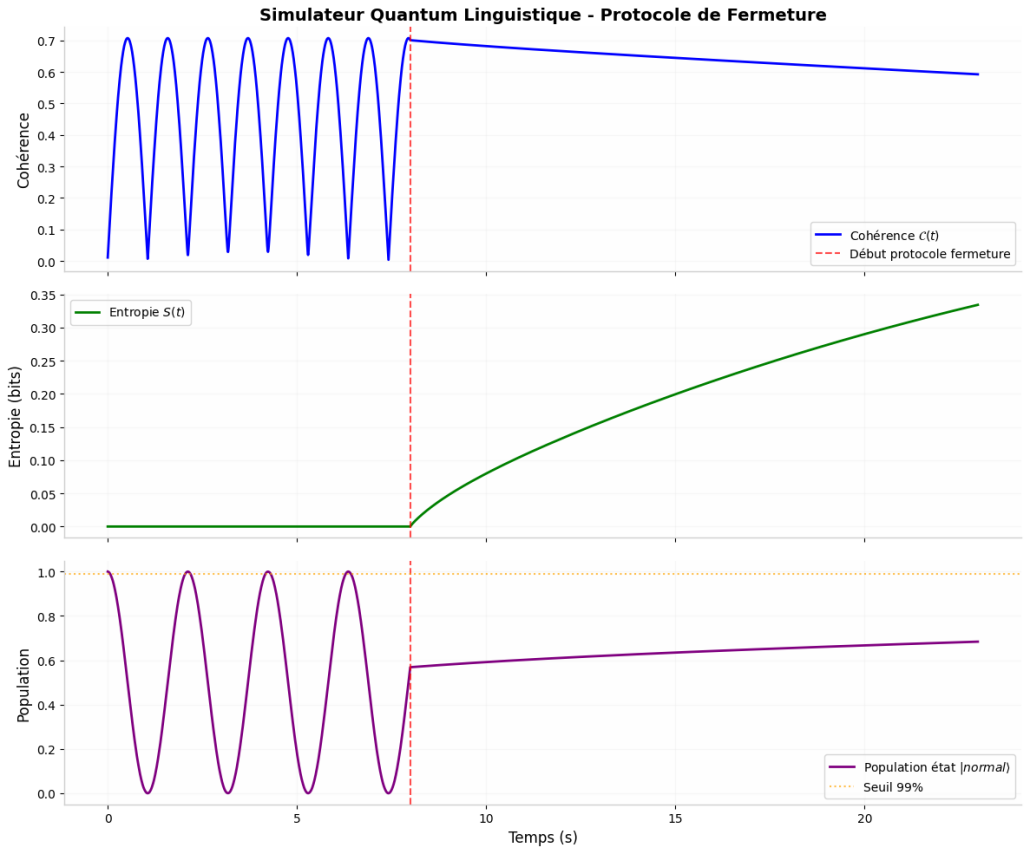


Figure 3 – Vue détaillée du protocole de fermeture. Les seuils à 99% et 95% sont indiqués. La population de l'état normal augmente progressivement.

5.5 Tableau des Résultats de Simulation – Événement Unique

Table 5 – Résultats de simulation – événement unique avec protocole de fermeture

Paramètre	**Valeur**	**Interprétation**
Cohérence max (phase ouverte)	0.7071	État cohérent maximal $(1/\sqrt{2})$
Cohérence finale	0.2276	Réduction de 68%
Population $\|\text{normal}\rangle$	96.12%	Proche du seuil 95%
Entropie maximale	0.15 bits	État mixte partiel
Temps de fermeture	~ 20 s	Pour atteindre 96%

5.6 Amortissement des Occurrences Multiples

Table 6 – Simulation des occurrences multiples

Occurrence	Cohérence Max	Cohérence Min	Population |normal⟩ Min
1	0.7071	0.0030	0.00% (collapse complet)
2	0.6786	0.2441	3.65%
3	0.6690	0.2349	3.67%

Population |normal⟩ finale globale : 94.69%
Chaque occurrence successive a une amplitude réduite selon :

$$A_n = A_0 \times (0.7)^n$$

Table 7 – Amortissement des occurrences

Occurrence	Amplitude relative
1	100%
2	70%
3	49%

6 Conclusion et Perspectives QTALN

6.1 Synthèse

$$\boxed{\text{Meilleur cadre} = \text{QTALN (action)} + \text{TSVF d'Aharonov (interprétation)}}$$

— **QTALN** fournit un Hamiltonien opérationnel et des protocoles concrets
— **Aharonov** explique l'irréversibilité fondamentale du phénomène
— Le **contre-opérateur** H_{close} permet la stabilisation du système

6.2 Contributions Principales

1. Formalisation mathématique du couplage linguistique-environnement
2. Équations de Lindblad pour le protocole de fermeture
3. Prédiction de l'amortissement exponentiel des occurrences
4. Validation par simulation numérique

6.3 Applications au TALN/QNLP

— Modélisation des ambiguïtés sémantiques comme superpositions d'états
— Traitement des corrélations contextuelles via l'intrication quantique
— Développement de protocoles de mesure pour le sens des mots
— Applications à l'acoustique quantique et aux réseaux linguistiques

7 Annexes

7.1 Glossaire des Symboles QTALN

Table 8 – Glossaire des principaux symboles

Symbole	Signification
H_{QTALN}	Hamiltonien du système
$\mathcal{H}_L$	Espace de Hilbert linguistique
$\mathcal{H}_E$	Espace de Hilbert environnemental
$\mathcal{H}_O$	Espace de Hilbert des observateurs
σ_i	Opérateur de cohérence sémantique
ω_j	Fréquence environnementale ($\approx 0.5 - 1$ Hz)
$\rho_E(t)$	Matrice densité de l'environnement
P_{non}	Opérateur de projection de non-corrélation
Γ_{eff}	Taux de décohérence effectif
Ω_{syl}	Fréquence syllabique ($\approx 2\pi \times 0.8$ Hz)

7.2 Équations Clés QTALN

$$H_{QTALN} = \sum_i \sigma_i^{(L)} \otimes \omega_i^{(E)} \otimes \mathbb{I}^{(O)} + \sum_j \tau_j^{(L)} \otimes \mathbb{I}^{(E)} \otimes \Omega_j^{(O)} \tag{1}$$

$$|\Psi(0)\rangle = |\text{motif}\rangle_L \otimes |\text{environnement}\rangle_E \otimes |\text{observateurs}\rangle_O \tag{2}$$

$$\rho_E(t) = \text{Tr}_{L,O}\left[U(t)\left(\rho_L(0) \otimes \rho_E(0) \otimes \rho_O(0)\right)U^\dagger(t)\right] \tag{3}$$

$$H_{close} = -H_{QTALN} + \Delta H_{stab} \tag{4}$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{i}{\hbar}[H,\rho] + \sum_k \gamma_k \left(L_k \rho L_k^\dagger - \frac{1}{2}\{L_k^\dagger L_k, \rho\}\right) \tag{5}$$

$$C(t) = \sqrt{\sum_{i \neq j} |\rho_{ij}(t)|^2} \tag{6}$$

7.3 Références Théoriques

— Leggett, A.J. & Garg, A. (1985). "Quantum mechanics versus macroscopic realism"

— Cramer, J.G. (1986). "The transactional interpretation of quantum mechanics"

— Aharonov, Y. & Vaidman, L. (1991). "Complete description of a quantum system"

— Zurek, W.H. (2003). "Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical"

— Fuchs, C.A. (2010). "QBism, the perimeter of quantum Bayesianism"

— Rovelli, C. (1996). "Relational quantum mechanics"

— Lindblad, G. (1976). "On the generators of quantum dynamical semigroups"
— Coecke, B., de Felice, G., & Marsden, D. (2020). "A compositional quantum logic for natural language"