FR_52: Nous pouvons construire des machines quantiques avec de l'électronique conventionnelle

Calculer au moyen de relations sans connaître la valeur avant la mesure

Víctor Estrada Díaz
Einstein-VED --- UNIHOLOG

Documents complémentaires du projet : Planches de construction et de comparaison Q-V · Traducteurs et compilateurs de V · Présentation à la communauté · Index complet des ressources · Relations, mesure et Bell.

Prémisses de la comparaison et de la démonstration

$D_{PROTOCOLO}$ — Protocole et portée de la comparaison opérationnelle.

L'hypothèse de ce travail est qu'il existe une machine physique V, constructible avec de l'électronique conventionnelle, opérationnellement équivalente à une machine quantique Q dans le modèle de calcul considéré. La comparaison sera régie dès le départ par les prémisses suivantes.

1. Symétrie stricte du critère. Q et V doivent être soumises au même protocole opérationnel et aux mêmes restrictions. On n'exigera pas de V un critère qui ne soit pas également applicable à Q, et on n'accordera pas à V une information ou une ressource qui ne soit pas autorisée pour Q. Cette règle s'applique réciproquement aux deux machines.

2. Correspondance explicite des conditions. Chaque comparaison définira les préparations, les entrées, les transformations, les configurations de mesure et les instants de lecture correspondants. Les réalisations physiques peuvent être différentes : ce qui doit coïncider est le protocole opérationnel comparé. Les conditions environnementales et de fonctionnement de chaque réalisation seront déclarées, sans exiger des composants identiques.

3. Égalité d'accès à l'information. Si le protocole n'observe pas les valeurs internes de Q pendant le calcul, il n'exigera pas non plus d'observer celles de V. On n'attribuera pas de résultats observés à des mesures non effectuées dans l'une ou l'autre machine. Les conditions de communication, de contrôle, de synchronisation et de choix des mesures seront explicitées pour les deux. Cette restriction d'accès ne présuppose pas la nature de l'état physique de l'une ou de l'autre et ne démontre pas à elle seule leur équivalence.

4. Distinction entre prédiction et résultat. P représente la probabilité prévue d'obtenir une sortie ; q et v représentent les valeurs enregistrées lors de la mesure de Q et de V, respectivement. Pour une lecture binaire à t = to :

$$q = M_Q(t_0) \in \{0,1\}, \qquad v = M_V(t_0) \in \{0,1\}\,.$$

Notation commune dès le départ. Nous adoptons ξ (xi) pour indiquer que le résultat d'une lecture binaire n'a pas encore été observé. C'est une convention de ce document, appliquée avec un sens identique à Q et à V, et non un symbole universel de la mécanique quantique. Nous écrivons $K(A) = \xi$ pour exprimer notre connaissance du résultat associé à A, et non une attribution de la valeur physique $A = \xi$. Dans les expressions $K(Q(t))$ et $K(V(t))$, nous parlons du résultat de la lecture spécifiée par le protocole, et non de la connaissance complète de l'état de la machine.

Lorsqu'on effectue cette lecture à $t = t_0$, on enregistre $b \in \{0,1\}$. Les flèches qui partent de ξ sont des schémas d'observation et de connaissance, et non des équations d'évolution de l'état physique. Nous réservons ψ à la description de l'état lorsque le modèle l'utilise ; connaître cet état n'équivaut pas à connaître le résultat d'une exécution avant de mesurer. Partager ξ ne présuppose pas que Q et V aient la même dynamique ou la même distribution. Les paires de prédictions présentées dans les confrontations désignent les deux quantités dont l'égalité doit être vérifiée ; elles n'affirment pas leur égalité.

Conventions d'écriture des formules. Pour que les expressions soient lisibles par le compilateur de PUBLICAR, col(a,b) désigne le vecteur colonne de composantes a et b ; mat((a,b),(c,d)) désigne la matrice dont les lignes sont (a,b) et (c,d). Si les entrées sont des blocs, il s'agit de la matrice par blocs correspondante, dont les dimensions compatibles sont déclarées dans chaque modèle. norm(z) est la norme euclidienne, ou la norme hermitienne du vecteur complexe. ket(psi) désigne le même vecteur d'état que la notation de Dirac ; e_0 et e_1 sont les vecteurs de la base de lecture, et e_j est le vecteur de cette base d'indice j dans un registre plus grand. Ces conventions ne changent ni les opérations ni leurs réalisations physiques.

Dans P(a,c_{\mathrm{protocolo}}), P(a,b,x,y) et les expressions analogues, les derniers arguments sont les conditions du protocole : ces fonctions représentent des probabilités conditionnelles, et non des probabilités conjointes avec les contrôles. La même convention s'applique à F pour les fréquences. Uniforme(0,1) désigne la distribution uniforme de référence dont le support de préparation est 0 inférieur ou égal à r et r inférieur à 1 ; elle n'ajoute pas de masse ponctuelle aux extrémités. phys(Q) et phys(V) identifient les réalisations physiques, et non leurs sorties. Les chaînes de relations s'écrivent comme des applications successives ; lorsqu'on spécifie T_j, la récurrence R_j = T_j(R_{j-1}) conserve chaque étape. Pour des bits A et B du domaine {0,1}, la porte NOT s'écrit B = 1 - A. Cela exprime sa table de vérité, et non une négation de propositions. La marque post identifie l'état après une mesure, et non une puissance. c_protocolo est la configuration du protocole, distincte d'une matrice C ou d'un port binaire C. Les diagrammes de lecture montrent le passage du résultat non observé au résultat b appartenant à {0,1} ; la flèche n'est pas une évolution de xi comme s'il s'agissait d'une valeur physique.

Le symbole ξ ne constitue pas une troisième valeur stockée et ne fixe pas de probabilités : celles-ci découlent de la préparation et des opérations. Une fois une sortie enregistrée, cette exécution a un résultat connu ; les probabilités décrivent les prédictions et les fréquences attendues lors des répétitions du protocole. Leur domaine général est [0,1], y compris les cas de certitude et d'impossibilité.

5. Présentation complète de chaque équivalence. Pour chaque opération, on présentera sa définition dans Q, sa réalisation proposée dans V, la correspondance entre les deux et la justification de ses résultats. On distinguera les prémisses supposées, les identités mathématiques dérivées, les règles physiques de lecture et les résultats expérimentaux disponibles. Les règles de prédiction et de mesure utilisées pour Q et V devront être explicites ; l'égalité recherchée ne sera pas introduite comme une prémisse.

6. Critère observable commun. Pour un protocole C dont les sorties correspondantes sont a, l'équivalence exige :

$$P_V\,(a, c_{\text{protocolo}}) = P_Q\,(a, c_{\text{protocolo}})\,.$$

Les comparaisons expérimentales utiliseront des critères statistiques communs, un nombre de répétitions déclaré et des tolérances justifiées. Coïncider sur un résultat isolé ou sur une distribution marginale n'établit pas à soi seul l'égalité de toutes les corrélations ni de tous les protocoles.

7. Portée et composition. Le modèle Q de référence et les protocoles admis seront spécifiés. Pour établir l'équivalence complète dans ce modèle, il faudra justifier les opérations élémentaires, leur composition, les mesures admises et l'extension à plusieurs unités. Une équivalence partielle sera identifiée comme telle. L'équivalence des résultats et un éventuel avantage en ressources seront évalués séparément.

La symétrie des conditions est le point de départ de la démonstration ; l'équivalence opérationnelle complète V = Q est l'hypothèse qui doit être établie par le développement.

Résumé

$D_{HIPOTESISV}$ — Hypothèse d'équivalence physique dont l'étude est proposée, et non théorème obtenu ni prémisse pouvant être tenue pour démontrée.

Ce travail part d'une question très simple : est-il indispensable de construire une machine avec des composants spécifiquement quantiques pour obtenir le comportement de calcul que nous recherchons dans une machine quantique ?

L'hypothèse que je développe ici est que ce n'est pas nécessairement le cas.

Je propose une machine, que j'appellerai **V**, constructible au moyen d'électronique conventionnelle, dont le principe fondamental consiste à renoncer délibérément à connaître les valeurs internes pendant le processus de calcul.

La machine ne stocke pas ξ.

$$\xi\text{:resultado binario no observado}\,.$$

Les valeurs continuent d'appartenir au domaine logique :

$$\{0, 1\}\,.$$

Tant que nous ne mesurons pas, nous ne savons pas laquelle nous avons. Cependant, ignorer les valeurs ne signifie pas ignorer les **relations entre elles**.

Nous pouvons connaître, construire et transformer des relations entre des valeurs inconnues. Nous pouvons propager ces relations, introduire des retards, des phases, des excitations, des inhibitions et des compositions sans effectuer de mesure intermédiaire.

Ce n'est que lorsque nous imposons une mesure à :

$$t = t_0$$

que nous obtenons nécessairement :

$$b \in \{0, 1\} .$$

La proposition consiste à soumettre une machine quantique Q et une machine conventionnelle V à exactement les mêmes conditions opérationnelles et à étudier s'il existe une opération observable de Q que V ne puisse pas répliquer.

V ne vise pas à simuler mathématiquement Q.

V replica Q; no simula Q.

Ce qui est présenté est une hypothèse de travail et une invitation à l'étudier, à en discuter, à l'étendre, à la réfuter ou à la construire.

---

1. L'origine de l'idée

$P_{INVERSION}$ — Un inverseur établit une relation entre l'entrée et la sortie sans exiger leur lecture préalable.

Dans un ordinateur conventionnel, nous voulons connaître et contrôler les états logiques. Mais nous pouvons construire physiquement un circuit conventionnel et **renoncer à connaître la valeur qui parcourt ce circuit**.

Un transistor n'a pas besoin qu'un observateur connaisse la valeur sur laquelle il agit. Une porte NOT non plus.

Si $K(A) = \xi$, nous pouvons construire physiquement :

$$B = (1 - A)$$

sans mesurer A au préalable. Alors :

$$K(A) = \xi, \qquad K(B) = \xi,$$

mais nous savons :

$$A \neq B .$$

ou :

$$A \oplus B = 1 .$$

Nous pouvons ignorer les valeurs et connaître les relations.

2. Ce que signifie ξ

$D_{DESCONOCIDO}$ — Notation épistémologique et domaine binaire.

Nous écrirons $K(A) = \xi$ lorsque la valeur de A est inconnue.

$$\xi \text{ no es un valor}.$$

Nous ne définissons pas $\{0, 1, \xi\}$. Le domaine logique reste :

$$\{0, 1\}.$$

ξ n'est ni un troisième état logique, ni une valeur stockée, ni un signal électronique, ni une superposition que nous devrions implémenter, ni une variable cachée. C'est notre notation pour :

valor desconocido.

Nous pouvons écrire $K(A) = \xi$ pour expliciter que nous parlons de notre connaissance. La machine ne stocke pas ξ.

3. La mesure

$D_{LECTURA}$ — Résultat enregistré à l'instant de l'observation.

Deps: D_DESCONOCIDO

En observant A à $t = t_0$, nous effectuons $M(A, t_0)$ et :

$$M(A, t_0) \in \{0, 1\}.$$

Jamais $M(A, t_0) = \xi$. Par conséquent :

$$\xi \mapsto b \in \{0, 1\}$$

exprime qu'avant, nous ignorons la valeur et qu'après, nous connaissons le résultat.

4. L'effondrement compris comme une mesure

Jusqu'à $t = t_0$, nous ne connaissons pas le résultat. À $t = t_0$, nous mesurons et obtenons $b \in \{0, 1\}$.

Pour ce travail, la conséquence expérimentale suffit :

antes de medir: resultado desconocido;

después de medir: resultado conocido.

5. Deux machines : Q et V

Nous utiliserons Q pour la machine quantique et V pour la machine VED.

> **Nous n'exigerons pas de V une information que nous n'exigeons pas de Q, et nous n'attribuerons pas à V une valeur que nous n'observons pas dans Q.**

Avant de mesurer :

$$K(Q(t)) = \xi, \qquad K(V(t)) = \xi\,.$$

Lors de la mesure :

$$M_Q(t_0) \in \{0,1\}, \qquad M_V(t_0) \in \{0,1\}\,.$$

Ainsi :

$$Q{:}\xi \mapsto b \in \{0,1\}$$
$$V{:}\xi \mapsto b \in \{0,1\}$$

6. Calculer sans mesurer les valeurs internes

La proposition ne consiste pas à cacher à l'utilisateur une variable connue en interne. Pendant le calcul, nous n'utilisons pas la mesure des valeurs internes comme condition nécessaire pour continuer.

Si :

$$K(A) = \xi, \qquad B = (1 - A), \qquad C = B, \qquad D = (1 - C),$$

nous pouvons garder inconnues les valeurs individuelles et connaître toute la structure relationnelle.
L'information de calcul réside dans les relations.

7. Calculer des relations

$D_{RELACIONES}$ — Transformations de relations sans observation intermédiaire.

Deps: D_PROTOCOLO, D_DESCONOCIDO

Représentons les relations par R. Nous pouvons appliquer des transformations :

$$R_j = T_j(R_{j-1}), \qquad j \in \{1, \ldots, n\}\,.$$

Tandis que :

$$K(V_1) = \xi, K(V_2) = \xi, \ldots, K(V_n) = \xi\,.$$

Le principe est :

transformar relaciones sin medir los valores relacionados.

8. Une opération physique n'a pas besoin de connaître son entrée

Pour un inverseur :

$$B = (1 - A)\,.$$

Il n'a pas besoin d'effectuer d'abord $M(A)$. Par conséquent :

$$\xi \mapsto \xi$$

ne signifie pas que rien ne s'est passé : nous connaissons exactement la relation $B = (1 - A)$, bien que A et B soient inconnus.

9. La fonction temporelle $f(t)$

D_{TIEMPO} — Évolution physique et instant de lecture.

Deps: D_LECTURA, D_RELACIONES

Nous introduisons une évolution physique $f(t)$. Elle peut décrire l'évolution de la machine tandis que :

$$K(V(t)) = \xi$$

et que $R(t)$ évolue.

La mesure sélectionne $t = t_0$:

$$M(V(t_0)) \in \{0, 1\}\,.$$

Le résultat binaire provient du fait d'avoir restreint cette première V au mode logique comparable à un qubit, et non du fait que $f(t)$ serait binaire.

10. Le neurone biologique comme inspiration

Une éventuelle V future peut ressembler davantage à un neurone biologique : multiples signaux excitateurs et inhibiteurs, impulsions, trains temporels, retards et rétroaction.

Une unité V pourrait incorporer :

$$\text{excitación},\quad \text{inhibición},\quad \text{retardo},\quad \text{fase},\quad \text{realimentación}\,.$$

Ce travail établit d'abord le principe, et non la construction complète.

11. La phase ϕ

La phase doit être traitée symétriquement :

$$Q' = \Phi_\phi(Q), \qquad V' = \Phi_\phi(V)\,.$$

Ici, Phi_phi désigne l'opération de phase phi de chaque modèle ; on ne présuppose pas que leurs réalisations physiques soient identiques. Le contrôle phi est conservé explicitement, même lorsque l'état n'a pas été observé.

Règle symétrique d'exécution et de lecture. Dans ce protocole, ni Q ni V n'a à déterminer, mesurer ni exposer sa phase interne avant la mesure en $t = t_0$. On n'impose pas à V une lecture préalable qui n'est pas demandée à Q. Appliquer une transformation de phase ne demande pas de lire cette phase au préalable. Un paramètre d'opération explicitement fourni en entrée se distingue d'une valeur interne inconnue. Les opérations s'exécutent sans lectures intermédiaires ; le latch enregistre conjointement les états internes et externes en $t = t_0$. La référence Q n'est consultée qu'après la fin de V.

Nous pouvons connaître :

$$X' = T_\phi(X)$$

sans connaître X ni X' :

$$K(X) = \xi, \qquad K(X') = \xi\,.$$

Par conséquent :

conocer la transformación ≠ conocer el valor transformado .

11.1. Amplitudes : définitions indépendantes et critère de comparaison

$D_{AMPLITUDES}$ — Amplitudes Q et normalisation des signaux V.

Deps: D_PROTOCOLO, D_LECTURA

Pour Q, nous écrivons l'état pur d'une unité dans la base de lecture :

$$\text{ket}\,(\psi_Q(t)) = \alpha_Q(t)e_0 + \beta_Q(t)e_1\,, \qquad |\,\alpha_Q|^2 + |\,\beta_Q|^2 = 1\,.$$

Pour la réalisation candidate de V à base de signaux, soient s0(t) et s1(t) les enveloppes complexes de deux canaux cohérents, décrites au moyen de composantes réelles d'amplitude et de phase. Elles ne représentent pas des bits déjà lus. Si la puissance totale p_norm = |s0|² + |s1|² est positive, nous définissons :

$$\alpha_V = \frac{s_0}{\sqrt{p_{\text{norm}}}}, \qquad \beta_V = \frac{s_1}{\sqrt{p_{\text{norm}}}}\,.$$

La normalisation donne |αV|² + |βV|² = 1. Ce sont des amplitudes normalisées de signaux ; les appeler amplitudes de probabilité exige en outre une règle de lecture qui relie leurs modules au carré aux fréquences des sorties binaires. Cette connexion est développée à la section 12.2. Elle ne se déduit pas uniquement de l'ignorance des valeurs internes.

Le symbole ξ est réservé à la connaissance des sorties non lues. Les expressions d'amplitude décrivent mathématiquement ce modèle de signaux ; elles ne demandent pas de lire, d'estimer ni de calculer les valeurs internes d'une exécution avant $t = t_0$. Connaître la loi d'une transformation ne signifie pas observer les signaux sur lesquels elle agit. On n'identifie pas une amplitude complexe à un résultat binaire ou à une probabilité réelle.

L'objectif de comparaison dans ce modèle de signaux est :

$$\mathrm{col}\,(\alpha_V(t),\beta_V(t)) = e^{i\gamma(t)}\ \mathrm{col}\,(\alpha_Q(t),\beta_Q(t)),$$

avec γ une phase globale commune aux deux canaux. Cette correspondance est un critère suffisant pour les opérations et les mesures du modèle, et non une exigence selon laquelle toute architecture V aurait ces mêmes états internes. L'hypothèse n'est pas introduite comme un résultat : elle est vérifiée au moyen des équations d'évolution et des conditions initiales.

11.2. Évolution temporelle de Q et d'une réalisation V candidate

Pour une Q idéale fermée, nous définissons GQ = HQ/ħ. Son évolution est :

$A_{EVOLUCIONQ}$ — Loi du modèle Q idéal fermé, citée comme référence.

Deps: D_AMPLITUDES

$$i\frac{dz_Q}{dt} = G_Q(t)z_Q(t), \qquad G_Q^\dagger = G_Q\ .$$

L'évolution unitaire engendrée par le hamiltonien est décrite dans [IBM Quantum Learning: Utility II].

Pour V, nous proposons un bloc continu de signaux ayant la spécification réelle suivante. Nous écrivons GV = A + iB, avec A réelle symétrique et B réelle antisymétrique, et s = u + iv. Les composantes doivent satisfaire :

$D_{CIRCUITOV}$ — Loi spécifiée pour le bloc de signaux candidat ; sa réalisation physique reste à valider.

Deps: D_AMPLITUDES

$$\frac{d}{dt}\,\mathrm{col}\,(u,v) = \ \mathrm{mat}\,((B,A),(-A,B))\,\mathrm{col}\,(u,v)\,.$$

Cette équation prescrit des intégrations et des couplages linéaires entre les composantes des signaux. Un circuit candidat devra réaliser ses coefficients au moyen d'éléments et de connexions spécifiés et étalonnés. On n'affirme pas qu'un inverseur, une AND ou une ALU arbitraire satisfassent automatiquement cette loi. C'est une conception dynamique proposée, et non une caractérisation expérimentale du circuit original de l'auteur.

En multipliant et en regroupant ses composantes réelles et imaginaires, on déduit :

$$\dot{s} = (B - iA)s = \ -iG_V\,s\,.$$

La matrice réelle du bloc est antisymétrique. En conséquence :

P_{NORMAV} — Conservation de la norme sous la loi idéale D_CIRCUITOV.

Deps: D_CIRCUITOV

$$\frac{d}{dt}(s^\dagger s) = is^\dagger G_V^\dagger s - is^\dagger G_V s = 0\,.$$

Par conséquent, N est constant dans ce modèle idéal et la normalisation des signaux n'ajoute pas d'évolution non linéaire :

$$i\dot{z}_V = G_V z_V .$$

Les deux lois ont été exposées : l'une est celle du modèle Q de référence ; l'autre est obtenue à partir des couplages réels prescrits pour V. On ne déclare pas à l'avance que leurs développements sont différents.

$T_{AMPLITUDECOND}$ — Équivalence conditionnelle des évolutions idéales.

Deps: D_AMPLITUDES, A_EVOLUCIONQ, D_CIRCUITOV, P_NORMAV

L'égalité des générateurs signifie l'égalité des fonctions GV et GQ sur tout l'intervalle d'évolution considéré, et non seulement à un instant. On les suppose continues sur cet intervalle, de sorte que le problème linéaire avec la préparation initiale déclarée possède une solution unique.

$$(G_V = G_Q \wedge z_V(t_i) = z_Q(t_i)) \Longrightarrow z_V(t) = z_Q(t) .$$

Démonstration sous les hypothèses déclarées : si la préparation et l'étalonnage correspondent avec GV(t) = GQ(t), la différence e = zV − zQ satisfait i ė = GQ e et e(0) = 0. Par unicité de la solution de l'équation linéaire, pour des coefficients continus ou réguliers par morceaux, e(t) = 0. Si GV = GQ + g(t)I, avec g réel, seule apparaît la phase globale exp(−i∫g dt), sans changer les probabilités du registre isolé.

Résultat conditionnel d'évolution. Sous ces lois, cette préparation et cet étalonnage, les amplitudes évoluent de façon identique jusqu'à la lecture, à une phase globale près. Vérifier les coefficients d'un circuit réel est une obligation expérimentale ; elle n'est pas remplacée par l'hypothèse de leur égalité.

11.3. Solution explicite pour deux canaux couplés

$P_{SOLUCION}$ — Solution des lois de deux canaux à coefficients constants.

Deps: A_EVOLUCIONQ, D_CIRCUITOV

Pour des coefficients constants, nous considérons séparément dans chaque modèle une matrice de la forme :

$$G_X = \mathrm{mat}\left((\omega_{0X}, \kappa_X e^{-i\chi_X}), (\kappa_X e^{i\chi_X}, \omega_{1X})\right), \qquad X \in \{Q, V\} .$$

Nous définissons ΩX = (ω0X + ω1X)/2, ΔX = (ω0X − ω1X)/2 et gX = √(ΔX² + κX²). Pour τ = t − ti, cX = cos(gXτ) et hX = sin(gXτ)/gX, avec hX = τ si gX = 0, on obtient :

$$P_{SOLUCION}: \quad \alpha_X(t) = e^{-i\Omega_X \tau}\left[(c_X - i\Delta_X h_X)\alpha_X(t_i) - i\kappa_X e^{-i\chi_X} h_X \beta_X(t_i)\right], \qquad \beta_X(t) = e^{-i\Omega_X \tau}\left[- i\kappa_X e^{i\chi_X} h_X \right.$$

La dérivation utilise (GX − ΩXI)² = gX² I et la série de l'exponentielle. Elle n'a utilisé aucune mesure intermédiaire. Les expressions permettent de comparer les paramètres des deux machines sans imposer d'égalité à leurs sorties : lorsque les conditions initiales, Δ, κ et χ correspondent, le développement coïncide à la phase globale due à Ω près. Si les paramètres ne correspondent pas, on calcule les deux réponses avant de conclure à l'existence ou non d'une différence observable pour le protocole choisi.

Comme vérifications de cette solution :

- Si κ = 0, les canaux conservent leurs modules et accumulent les phases exp(−iω0τ) et exp(−iω1τ) ; la phase relative varie de −(ω1 − ω0)τ dans les deux modèles.

- Si $\Delta = 0$ et que l'entrée est (1,0), les intensités normalisées sont $\cos^2(\kappa\tau)$ et $\sin^2(\kappa\tau)$ dans les deux modèles.
- Si $\Omega = \Delta = \chi = 0$ et $\kappa\tau = \pi/2$, le bloc réalise $-iX$: il échange les amplitudes à une phase globale près.
- Si $\Omega = \chi = 0$, $\Delta = \kappa = g/\sqrt{2}$ et $g\tau = \pi/2$, le bloc réalise $-iH$. Deux blocs de ce type produisent $-I$, équivalent à l'identité pour les lectures du registre isolé.

Ces vérifications contrôlent l'évolution de phase, le transfert entre canaux et la composition. La coïncidence ne provient pas de l'attribution à l'ignorance d'une loi dynamique, mais de la résolution des lois spécifiées.

11.4. Mesure, mélanges et imperfections : portée du développement

Dans Q, la règle de lecture dans la base de référence attribue $|\alpha Q|^2$ et $|\beta Q|^2$. Dans V, cette attribution n'est justifiée que si la lecture physique proposée réalise les probabilités $|\alpha V|^2$ et $|\beta V|^2$; sa démonstration conditionnelle est exposée à la section 12.2. Une même évolution des amplitudes ne permet pas d'omettre la vérification de la lecture et de la mise à jour.

Pour des préparations statistiquement mélangées, on ne moyenne pas les amplitudes comme si toutes les exécutions étaient cohérentes. On compare les états de densité $\rho X = E[zX\, zX^\dagger]$, les opérations et les distributions observables. Cela évite de confondre l'ignorance de la préparation avec une phase cohérente.

Les pertes, les retards imprévus, le bruit et les erreurs de coefficients seront déclarés dans les deux réalisations. On ne compare pas une Q idéale à une V imparfaite pour attribuer la différence à leurs principes, et on n'omet pas non plus les imperfections de V lorsqu'on compare des dispositifs réels. L'égalité des équations idéales est un résultat mathématique conditionnel ; l'égalité des dispositifs exige une caractérisation physique et des tolérances communes. La comparaison d'une architecture V différente de ce modèle de signaux nécessite ses propres lois d'évolution.

Comme vérification supplémentaire des formules, les quatre équations réelles de V ont été intégrées directement et comparées à la solution complexe dans 103 cas d'évolution constante. L'erreur numérique maximale était d'environ 8.49×10^{-12} ; l'erreur de conservation de la norme était d'environ 7.32×10^{-14}. Les blocs X, H et H-H ainsi qu'une séquence de huit segments de contrôle ont également été vérifiés. Ce sont des vérifications numériques du modèle, et non des données d'un dispositif physique ni une preuve des hypothèses de lecture de la section 12.2.

12. Deux chemins et phase relative

$P_{INTERFERENCIA}$ — Identités de somme et de différence de phases cohérentes.

Deps: D_AMPLITUDES

Si :

$$\phi_B - \phi_A = \phi,$$

nous pouvons combiner :

$$R_C \propto e^{i\phi_A} + e^{i\phi_B},$$
$$R_D \propto e^{i\phi_A} - e^{i\phi_B}.$$

Avec $\phi_B = \phi_A + \phi$:

$$R_C \propto e^{i\phi_A}(1 + e^{i\phi}),$$
$$R_D \propto e^{i\phi_A}(1 - e^{i\phi}).$$

Et :

$$P_{INTERFERENCIA}: \quad |1 + e^{i\phi}|^2 = 4\cos(\frac{\phi}{2})^2, \qquad |1 - e^{i\phi}|^2 = 4\sin(\frac{\phi}{2})^2.$$

Cela ne détermine pas à l'avance quelle sortie nous observerons. Avant de mesurer :

$$K(C) = \xi, \qquad K(D) = \xi.$$

12.1. Premier protocole explicite de comparaison Q-V

$D_{PROTOCOLOFASE}$ — Préparation et opérations de la confrontation de phase.

Deps: D_PROTOCOLO, D_AMPLITUDES, P_INTERFERENCIA

Nous fixons un protocole Cφ : préparation de référence, division en deux chemins d'amplitude égale, application d'une phase relative φ, recombinaison et lecture binaire à t = to. Aucune lecture intermédiaire des chemins ne sera effectuée dans l'une ou l'autre machine.

La préparation est une opération spécifiée, et non une obligation d'observer continuellement l'état interne. L'instant to est fixé par rapport au début de chaque exécution au moyen d'une règle temporelle commune.

Développement du protocole dans Q

Dans le modèle idéal d'un qubit, nous représentons la division et la recombinaison par H et le changement de phase par Uφ :

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ mat } ((1,1),(1,-1)), \qquad U_\phi = \text{ mat } ((1,0),(0,e^{i\phi})).$$

Pour la préparation de référence |0⟩, l'état avant la lecture est :

$$HU_\phi He_0 = \frac{1 + e^{i\phi}}{2} e_0 + \frac{1 - e^{i\phi}}{2} e_1.$$

La règle de mesure du modèle Q attribue à chaque sortie le module au carré de son amplitude. Par conséquent :

$$P_Q(q = 0, C_\phi) = \cos(\phi/2)^2, \qquad P_Q(q = 1, C_\phi) = \sin(\phi/2)^2.$$

Cette règle et le rôle de la phase dans les opérations sont décrits dans IBM Quantum Learning: Quantum information. La dérivation précédente applique ces règles au protocole défini ici.

Développement correspondant dans V

Pour préciser les expressions proportionnelles de cette section, nous considérons deux signaux cohérents d'amplitude égale et une recombinaison idéale avec des gains étalonnés. Le facteur commun d'amplitude et de phase est éliminé lors de la normalisation. Les signaux de sortie normalisés sont :

$$c_V(\phi) = \frac{1 + e^{i\phi}}{2}, \qquad d_V(\phi) = \frac{1 - e^{i\phi}}{2}.$$

Ces nombres décrivent des amplitudes et des phases de signaux physiques, et non deux valeurs binaires lues simultanément ni un ξ stocké. Leur réalisation électronique concrète devra spécifier comment les signaux sont produits et combinés. L'écriture mathématique ne remplace pas cette réalisation.

On obtient l'identité :

$$I_C = |c_V|^2 = \cos(\phi/2)^2, \qquad I_D = |d_V|^2 = \sin(\phi/2)^2, \qquad I_C + I_D = 1.$$

Ainsi, sous les conditions de signal déclarées, les intensités normalisées de V coïncident avec les probabilités prévues par Q. Calculer ces grandeurs n'exige pas d'observer les valeurs internes pendant l'exécution ; de même, calculer les amplitudes de Q n'exige pas de les mesurer.

Règle de lecture et portée de l'équivalence

Dans Q, une règle reliant les amplitudes aux probabilités des sorties binaires a été explicitée. Pour compléter la comparaison, il faudra expliciter la règle physique correspondante de V et justifier si elle satisfait :

$$P_V(v = 0, C_\phi) = I_C, \qquad P_V(v = 1, C_\phi) = I_D.$$

Cette exigence est symétrique : les deux descriptions ont besoin d'une connexion entre leur évolution physique et les résultats enregistrés. Elle n'exige pas que V partage le mécanisme physique de Q, ni que l'on mesure préalablement son intérieur. Elle ne permet pas non plus d'identifier automatiquement intensité et probabilité.

Si la lecture de V satisfait ces égalités, l'équivalence des distributions de sortie est établie pour ce protocole idéal :

$$P_V(v = a, C_\phi) = P_Q(q = a, C_\phi), \qquad a \in \{0, 1\}.$$

Ce qui est établi ici est la coïncidence algébrique des intensités normalisées avec les probabilités de référence et la condition précise permettant de la convertir en équivalence de lecture. Elle n'est présentée ni comme une mesure expérimentale ni comme une preuve d'équivalence pour tous les protocoles.

Résultats de référence pour la confrontation

Phase relative φ	P_Q(0)	P_Q(1)	Résultat exigé de la lecture de V
0	1	0	Sortie 0 avec certitude dans le modèle idéal
π/2	1/2	1/2	Les deux sorties avec la même probabilité

Phase relative φ	P_Q(0)	P_Q(1)	Résultat exigé de la lecture de V
π	0	1	Sortie 1 avec certitude dans le modèle idéal
3π/2	1/2	1/2	Les deux sorties avec la même probabilité

La preuve générale de ce protocole comprend toutes les valeurs de φ ; ces quatre cas sont des points de contrôle et ne la remplacent pas. Dans les dispositifs réels, les imperfections des deux machines seront déclarées et les fréquences seront comparées avec des incertitudes statistiques communes. On n'exigera pas d'égalité exacte entre les fréquences d'échantillons finis indépendants.

12.2. Une lecture électronique candidate et sa démonstration conditionnelle

$D_{COMPARADOR}$ — Circuit candidat à seuil et référence temporelle.

Deps: D_LECTURA, D_PROTOCOLOFASE

Pour passer des intensités à une sortie binaire, nous présentons une construction candidate. C'est une extension proposée du modèle V, et non la description d'un prototype déjà construit ni un résultat expérimental. Elle ne présuppose pas non plus que ce mécanisme soit le seul possible.

Ce comparateur est une proposition spécifique, et non une règle supplémentaire de la machine V de l'auteur. Ses conditions ne concernent que cette construction et sa démonstration conditionnelle. Les équations suivantes décrivent le fonctionnement interne du comparateur ; elles n'exigent pas que l'observateur connaisse ou mesure au préalable la phase, les signaux ou le seuil. Elles ne remplacent notamment pas le déclenchement du latch en $t = t_0$ par une lecture anticipée ou une réponse provenant de Q.

Signaux alimentant la lecture

Soient cV et dV les signaux complexes de la section précédente. Leur description peut être donnée au moyen de quatre composantes réelles :

$$c_V = x_C + iy_C, \qquad d_V = x_D + iy_D .$$

Nous définissons les grandeurs physiques que doit produire le bloc de lecture :

$$J_C = x_C^2 + y_C^2, \qquad J_D = x_D^2 + y_D^2, \qquad w = \frac{J_C}{J_C + J_D} .$$

La construction exige J_C + J_D > 0. Si les deux signaux sont nuls, l'exécution est invalide et doit être enregistrée comme telle, sans lui attribuer une probabilité arbitraire. Dans le protocole idéal de la section 12.1 :

$$w = \cos(\phi / 2)^2 .$$

Le circuit candidat transforme les signaux au moyen d'opérations physiques de mise au carré, de somme et de normalisation. Il n'a pas besoin qu'un observateur connaisse les valeurs numériques pendant le calcul. Cette transformation interne des signaux n'est pas identifiée à l'observation externe de la sortie. Ses effets et ses éventuelles perturbations devront être inclus dans la réalisation physique.

Référence temporelle et comparateur

Nous introduisons une référence périodique de phase initiale η et décrivons sa position normalisée à l'instant de lecture par :

$$r(t_0) = \text{ frac } (\frac{\omega t_0 + \eta}{2\pi}), \qquad 0 \le r(t_0) < 1 .$$

Ici, frac prend la partie fractionnaire et ω est la fréquence angulaire de la référence. Un signal en rampe peut représenter cette position de phase. Le comparateur, suivi d'un registre activé à t0, délivre :

$$(r(t_0) < w \Longrightarrow v = 0), \qquad (r(t_0) \ge w \Longrightarrow v = 1) .$$

C'est un mécanisme de lecture défini au moyen de signaux et d'un seuil ; il n'introduit pas ξ comme un état du circuit. Le résultat peut être déterminé par les conditions physiques de chaque exécution même s'il n'est pas connu de l'observateur avant la lecture.

Condition de préparation à justifier

$D_{CONDICIONREFERENCIA}$ — Condition d'uniformité et d'indépendance de la référence ; non une affirmation selon laquelle elle aurait été vérifiée physiquement.

Deps: D_COMPARADOR

La démonstration exige que la phase η soit uniformément distribuée sur [0,2π) entre les préparations, indépendamment de φ et des contrôles du protocole. L'instant t0 est fixé selon la règle commune et n'est pas choisi après consultation de η. Ces conditions impliquent :

$$r(t_0) \mid C_\phi \sim \text{Uniforme } (0, 1) .$$

Ignorer η ne démontre pas que sa distribution est uniforme. La distribution et son indépendance devront être justifiées au moyen du mécanisme de préparation et confrontées à l'expérience. La construction n'exige pas d'interprétation particulière de la probabilité : une distribution sur des préparations inconnues suffit à la dérivation suivante.

La référence et sa préparation sont des ressources physiques déclarées de V. Elles ne fournissent aucune information sur la sortie de Q. Leur admission doit être vérifiée au regard des restrictions du protocole commun. Si celui-ci interdit cette ressource, cette construction candidate ne satisfait pas ses prémisses.

Dérivation des probabilités de lecture

$P_{LECTURAUNIFORME}$ — Probabilités du comparateur sous D_CONDICIONREFERENCIA.

Deps: D_COMPARADOR, D_CONDICIONREFERENCIA

Sous les conditions précédentes, w est fixé par le protocole et :

$$P_V(v=0, C_\phi) = P(r(t_0) < w \mid C_\phi) = \int_0^w dr = w\,.$$

Par complémentarité :

$$P_V(v=1, C_\phi) = 1 - w\,.$$

En substituant la valeur calculée de w :

$$P_V(v=0, C_\phi) = \cos(\phi/2)^2\,, \qquad P_V(v=1, C_\phi) = \sin(\phi/2)^2\,.$$

Proposition conditionnelle. Si V réalise la transformation des signaux de la section 12.1, produit le seuil w indiqué et satisfait les conditions de préparation et de lecture de cette section, elle reproduit la distribution de la lecture finale de Q pour toutes les valeurs de φ dans ce protocole idéal.

La démonstration couvre aussi les extrémités : pour w = 0, le comparateur délivre toujours 1 ; pour w = 1, il délivre toujours 0, puisque r appartient à [0,1). Il n'est pas nécessaire de lire ni de sélectionner au préalable un résultat individuel.

Ce qui a été établi et ce qui reste à construire

Élément	Résultat de ce développement	Validation physique en attente
Transformation de deux chemins	Identité algébrique des amplitudes et des intensités	Circuit et étalonnage de l'amplitude et de la phase
Seuil w	Normalisation définie pour des signaux non nuls	Opérations sur les signaux et précision du seuil
Référence temporelle	Uniformité de r si les conditions de η sont satisfaites	Préparation, indépendance et stabilité
Lecture binaire	Distribution dérivée au moyen du comparateur idéal	Enregistrement à t0, temps de réponse et erreurs

Cette construction implémente une distribution de sortie au moyen d'un mécanisme physique candidat. Elle ne démontre pas à elle seule une architecture quantique complète, un avantage en ressources ni une équivalence de mesures successives. Après chaque lecture, il faudra spécifier l'évolution et la préparation ultérieures de V et les comparer à celles de Q. L'équivalence de plusieurs unités exige aussi des distributions conjointes ; elle ne découle pas automatiquement de cette équivalence d'une seule lecture.

12.3. Mesures successives : construction et équivalence d'une unité idéale

$D_{ACTUALIZACION}$ — Transformation et rétroaction du modèle d'une unité.

Deps: D_CIRCUITOV, D_COMPARADOR, P_LECTURAUNIFORME

La lecture précédente doit être complétée par une transformation après le résultat. Conserver les signaux précédents sans les modifier ne reproduit pas, en général, les mesures successives de Q. Nous proposons le mécanisme idéal de rétroaction suivant, dont le fonctionnement physique doit être validé.

État des signaux et opérations entre les mesures

Nous décrivons une unité V au moyen de deux signaux complexes normalisés :

$$z = \operatorname{col}(\alpha, \beta), \qquad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 .$$

C'est une description mathématique de signaux ; elle ne suppose pas que la sortie binaire ait été observée. L'état de Q correspondant est :

$$\operatorname{ket}(\psi) = \alpha e_0 + \beta e_1 .$$

Pour chaque opération unitaire U admise par le protocole, le bloc de transformation de V doit réaliser z′ = Uz. Une spécification en signaux réels s'obtient en écrivant U = A + iB, avec A et B des matrices réelles :

$$\operatorname{col}(\operatorname{Re} z', \operatorname{Im} z') = \operatorname{mat}((A, -B), (B, A)) \operatorname{col}(\operatorname{Re} z, \operatorname{Im} z) .$$

La matrice réelle est orthogonale si U est unitaire. Elle définit les gains et les combinaisons linéaires qu'exigerait un bloc analogique idéal portant sur quatre composantes réelles. Ce calcul spécifie la transformation ; il n'atteste pas encore d'un circuit construit avec une précision suffisante.

Lecture et rétroaction dans la base de référence

À chaque instant de mesure tk, le seuil w = |α|² est calculé physiquement au moyen du bloc de lecture. Le comparateur délivre 0 lorsque rk < w, et 1 dans le cas contraire. Après l'enregistrement de la sortie, la rétroaction prépare les signaux correspondant au résultat :

$$(v = 0 \Longrightarrow z_{\text{post}} = e_0), \qquad (v = 1 \Longrightarrow z_{\text{post}} = e_1), \qquad e_0 = \operatorname{col}(1, 0), \quad e_1 = \operatorname{col}(0, 1) .$$

Le registre sélectionne le canal conservé et réinitialise la paire de signaux avec une amplitude de référence. Pour une unité isolée, cela coïncide, à une phase globale sans effet observable près, avec l'état après une mesure projective idéale de Q dans cette base.

Si le protocole n'admet qu'une lecture finale à t0, cette rétroaction n'est pas activée pendant le calcul. S'il admet plusieurs mesures, les deux machines sont lues aux mêmes instants t1, …, tm. On n'introduit pas de mesures supplémentaires dans V pour obtenir une information qui ne soit pas disponible dans Q.

Mesure dans une base choisie par le protocole

Soient b0 et b1 les vecteurs orthonormaux de la base choisie, et soit B = (b0 b1) la matrice unitaire dont les colonnes sont ces vecteurs. L'opération de mesure de V est définie en trois étapes :

1. Transformer les signaux dans cette base : y = B†z.
2. Lire au moyen du comparateur avec le seuil w = |y0|².
3. Préparer, après le résultat v, les signaux z⁺ = B ev = bv.

On obtient :

$$P_V(v = a, z, B) = |\, b_a^{\dagger} z|^2, \qquad z_{\text{post}} = b_a\ .$$

La mesure projective correspondante de Q possède ces mêmes valeurs de probabilité et prépare le même vecteur de base, à une phase globale près. La règle de mise à jour de Q est explicitée ici ; on n'exige de V aucune mise à jour absente du modèle Q de référence. Voir IBM Quantum Learning: Quantum information, multiple systems pour la règle de mesure et la mise à jour conditionnée par le résultat.

Renouvellement de la référence de lecture

Il ne suffit pas que chaque rk soit marginalement uniforme. Pour reproduire des séquences, il doit être uniforme conditionnellement à l'historique précédent hk−1 et aux contrôles présents du protocole :

$$r_k \mid (h_{k-1}, C) \sim \text{Uniforme}\ (0, 1)\ .$$

Une référence nouvelle et indépendante à chaque lecture satisfait cette condition. Réutiliser une phase inconnue sans justifier ses corrélations ne suffit pas. La préparation de ces références et leur indépendance sont des obligations physiques de cette construction candidate, et non des résultats déjà obtenus grâce à l'ignorance de l'observateur.

Démonstration pour des séquences finies

$T_{SECUENCIACOND}$ — Équivalence des séquences conditionnée par les règles idéales et le renouvellement de référence déclarés.

Deps: D_PROTOCOLO, D_ACTUALIZACION, P_LECTURAUNIFORME

Nous supposons la même préparation initiale, des blocs V qui réalisent les opérations unitaires correspondantes, la lecture et la rétroaction précédentes et des références satisfaisant la condition de renouvellement. Nous considérons un protocole fini sur un qubit isolé, avec des mesures projectives idéales dans une base quelconque et des décisions pouvant dépendre des résultats précédents. Les mêmes résultats précédents permettent les mêmes décisions dans les deux machines.

Avant la première opération, leurs descriptions d'amplitude coïncident. Chaque opération applique la même transformation U, de sorte que cette correspondance est conservée jusqu'à la première mesure. L'uniformité conditionnelle de r1 fournit la même probabilité pour chaque sortie. Après la sortie a1, V prépare b_a1 et Q se trouve dans ce même état de base.

Par récurrence, pour chaque historique de probabilité non nulle, les deux machines conservent cette correspondance avant l'opération suivante, attribuent les mêmes probabilités conditionnelles à la mesure suivante et préparent des états ultérieurs correspondants. Dans l'égalité suivante, $c_{\text{protocolo}}$ fixe le protocole et ses règles de contrôle ; la barre verticale indique le conditionnement. Pour k = 1, l'historique précédent est vide. Par la règle du produit :

$$P_V(a_1, \ldots, a_m \mid c_{\text{protocolo}}) = \prod_{k=1}^{m} P_V(a_k \mid a_1, \ldots, a_{k-1}, c_{\text{protocolo}}) = P_Q(a_1, \ldots, a_m \mid c_{\text{protocolo}})\ .$$

Les historiques impossibles ont une probabilité nulle dans les deux machines ; ils n'exigent pas de définir un état conditionné par un événement impossible.

Résultat. Cette construction idéale reproduit toutes les distributions de séquences finies d'opérations unitaires et de mesures projectives d'un qubit isolé, sous les conditions déclarées. Elle résout dans ce modèle la lecture ultérieure et la composition temporelle, et pas seulement la distribution d'une mesure finale.

Vérifications distinguant une lecture complète d'un simple échantillonnage

Protocole commun	Prédiction dans Q et dans la V idéale définie
Deux lectures consécutives dans la même base, sans opération intermédiaire	Le second résultat répète le premier avec certitude
Préparer e0, appliquer H deux fois et mesurer dans la base de référence	Sortie 0 avec certitude
Mesurer d'abord dans la base de référence, puis dans la base de H	La seconde sortie a les probabilités 1/2 et 1/2, conditionnellement à l'une quelconque des premières

La première ligne exige la rétroaction ; obtenir seulement la distribution correcte d'une sortie ne la garantit pas. La deuxième exige de conserver la phase et les amplitudes pendant la composition, sans lectures intermédiaires.

Le résultat est conditionnel à la réalisation des blocs idéaux. Il ne démontre pas encore une machine physique validée, des mesures générales avec des effets différents de ceux définis ici, le comportement d'une unité intriquée avec une autre ni l'équivalence complète d'un registre de n qubits. Il ne démontre pas non plus d'avantage en ressources. Ces extensions nécessitent leur propre développement et ne se déduisent pas de la répétition d'unités isolées.

13. Fréquence ne signifie pas cause physique probabiliste

$D_{FRECUENCIAS}$ — Fréquences et probabilités observables de la confrontation.

Deps: D_LECTURA, D_PROTOCOLO

Après n_ensayos expériences mesurées, avec n_ensayos supérieur à zéro, nous pouvons compter N_0 et N_1 et construire :

$$F(0) = \frac{N_0}{n_{\text{ensayos}}}, \qquad F(1) = \frac{N_1}{n_{\text{ensayos}}}.$$

La comparaison opérationnelle demande si :

$$F_Q(0, \phi) = F_V(0, \phi), \qquad F_Q(1, \phi) = F_V(1, \phi),$$

ou :

$$(P_Q(a, \phi), P_V(a, \phi)).$$

14. Chaque mesure constitue une expérience

Une mesure à $t = t_0$ et une autre à $t = t_1$ sont des expériences distinctes, sauf préparation explicite les reliant :

$$E_0 : \xi \mapsto b \in \{0, 1\},$$
$$E_1 : \xi \mapsto b \in \{0, 1\}.$$

E_0 est observée à t=t0 et E_1 à t=t1, avec leurs préparations respectives.

Nous n'introduisons pas de trajectoire connue que nous n'avons jamais mesurée.

15. Mesures alternatives

Soient M_0, M_1 et $x \in \{0, 1\}$. Avant :

$$K(Q) = \xi, \qquad K(V) = \xi.$$

À $t = t_0$:

$$M_x(Q, t_0) \mapsto q \in \{0, 1\},$$
$$M_x(V, t_0) \mapsto v \in \{0, 1\}.$$

La mesure non choisie ne reçoit pas pour autant un résultat observé. Elle exige une autre expérience, qui commence à nouveau avec des valeurs inconnues.

16. Deux unités corrélées

$D_{DISTRIBUCIONCONJUNTA}$ — Distribution des sorties de deux unités.

Deps: D_FRECUENCIAS

Nous avons :

$$K(Q_A) = \xi, \quad K(Q_B) = \xi, \qquad K(V_A) = \xi, \quad K(V_B) = \xi.$$

Avec les configurations $x, y \in \{0, 1\}$, en mesurant à $t = t_0$, nous obtenons (a, b) avec :

$$a, b \in \{0, 1\}.$$

Nous construisons :

$$P_Q(a, b, x, y), \qquad P_V(a, b, x, y).$$

La condition de réplication est :

$$P_V(a, b, x, y) = P_Q(a, b, x, y).$$

17. Ne pas inventer de résultats non mesurés

Nous n'imposons pas à V une table préalable (a_0, a_1, b_0, b_1) si ces résultats n'ont jamais été observés conjointement. Chaque configuration exige ses expériences et la même règle s'applique à Q et à V.

18. Corrélations observables

Nous pouvons associer $0 \mapsto -1$, $1 \mapsto 1$ et construire :

$$E(x,y) = \sum_{a,b \in \{0,1\}} (2a-1)(2b-1)\, P(a,b,x,y)\,.$$

Également :

$$S = E(0,0) + E(0,1) + E(1,0) - E(1,1)\,.$$

La question est :

$$(E_V(x,y), E_Q(x,y))\,.$$

Si une différence observable apparaît, nous trouvons une limite ; sinon, le parallélisme demeure.

18.1. Corrélation conjointe et conditions de séparation

$D_{CORRELACIONES}$ — Corrélations des bits enregistrés et conditions locales.

Deps: D_DISTRIBUCIONCONJUNTA

L'égalité des probabilités marginales ne suffit pas à l'équivalence. Deux sorties peuvent être individuellement équilibrées et, cependant, avoir des corrélations conjointes différentes. Nous utilisons les signes A, B dans {−1,+1} pour les distinguer des bits enregistrés a, b. Avec la convention de cette section, A = 2a − 1 et B = 2b − 1 :

$$E(x,y) = \sum_{a,b \in \{0,1\}} (2a-1)(2b-1) P(a,b,x,y)\,.$$

Si les deux unités V sont séparées et que leurs réponses satisfont une description locale avec des conditions partagées λ indépendantes des choix x, y, la distribution prend la forme :

$$P_V(a,b,x,y) = \int d\mu(\lambda)\, P_A(a \mid x,\lambda) P_B(b \mid y,\lambda)\,.$$

Ici, λ décrit les conditions physiques partagées de la préparation ; ce n'est ni le symbole ξ ni une lecture supplémentaire. Cette factorisation est une hypothèse de localité qui doit être déclarée, et non attribuée automatiquement à toute architecture V.

Nous définissons les réponses moyennes A_x(λ), B_y(λ) dans [−1,1]. Pour chaque λ :

$P_{CHSHLOCAL}$ — Borne des corrélations sous la factorisation locale explicitement déclarée dans D_CORRELACIONES.

Deps: D_CORRELACIONES

$$|A_0(B_0 + B_1) + A_1(B_0 - B_1)| \leq |B_0 + B_1| + |B_0 - B_1| \leq 2.$$

En intégrant, on obtient |S_V| ≤ 2. Cette dérivation n'exige pas d'observer conjointement les résultats de mesures alternatives : elle utilise les probabilités conditionnelles et la factorisation locale, et non une table d'observations contrefactuelles. L'ignorance de λ n'élimine pas cette limite.

$$P_{CHSHLOCAL}: \quad |S_V| \leq 2.$$

Q peut produire S_Q = 2√2. Par exemple, pour l'état de référence (|00⟩ + |11⟩)/√2 et les observables A0 = Z, A1 = X, B0 = (Z + X)/√2 et B1 = (Z − X)/√2, les corrélations sont :

$$E_{00} = E_{01} = E_{10} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \qquad E_{11} = -\frac{1}{\sqrt{2}}.$$

La comparaison CHSH et ses bornes sont documentées dans IBM Quantum: CHSH inequality.

Conséquence pour les prémisses symétriques. Si le protocole Q exige des choix indépendants et l'absence de communication entre les stations pendant la lecture, V doit respecter ces mêmes restrictions. Une architecture V ayant la factorisation locale précédente ne peut pas répliquer ce résultat. S'abstenir d'observer ses valeurs internes ne suffit pas.

Un dispositif central ayant accès à x et à y peut générer cette distribution conjointe, mais ne démontre pas d'équivalence avec deux stations séparées sans communication. Ce sont des protocoles différents. L'absence de signalisation dans les marginales ne prouve pas non plus l'absence de communication interne.

Cette limite n'exclut pas tous les protocoles de calcul centraux de V. Elle impose en revanche de distinguer leur portée de celle d'une équivalence physique universelle, incluant les expériences distribuées de Bell.

19. Composition

Nous partons de $K(V_0) = \xi$ et composons :

$$V_n = R_n \circ R_{n-1} \circ \cdots \circ R_1(V_0).$$

Du point de vue de notre connaissance :

$$\xi \mapsto \xi \mapsto \xi \mapsto \cdots \mapsto \xi$$

et à la fin :

$$\xi \mapsto b \in \{0, 1\}.$$

20. D'une unité à n unités

Avant de mesurer :

$$K(V_1) = \xi, K(V_2) = \xi, \ldots, K(V_n) = \xi.$$

Avec un réseau :

$$R = \{R_1, R_2, \ldots, R_m\},$$

nous pouvons connaître R sans connaître les valeurs individuelles. Les relations évoluent :

$$R_0 \mapsto R_1 \mapsto \cdots \mapsto R_k ,$$

tandis que :

$$\forall i, \quad K(V_i) = \xi .$$

20.1. Audit de symétrie : protocole commun et machines indépendantes

$D_{SIMETRIA}$ — Portée de la comparaison et de ses obligations symétriques.

Deps: D_PROTOCOLO

L'affirmation « si les unités et les connexions sont équivalentes et que l'équivalence est conservée lors de leur composition, les réseaux sont équivalents » est un théorème conditionnel. Elle ne vérifie à elle seule aucune connexion physique et ne démontre pas que les hypothèses sont satisfaites. Les vérifications doivent correspondre aux opérations et aux connexions de la machine V de l'auteur, et non à une représentation ajoutée à partir du modèle Q.

Le critère de confrontation doit partir d'un protocole commun C, défini sans présupposer le résultat d'aucune machine. Il comprend des préparations opérationnellement correspondantes, des contrôles, les connexions autorisées, les restrictions d'accès, les instants et les configurations de lecture, des sorties comparables et les ressources admises. Chaque réalisation implémente ce protocole au moyen de ses propres mécanismes physiques.

Élément de la confrontation	Obligation de Q	Obligation de V
Préparation	Déclarer comment elle réalise l'entrée du protocole	Déclarer comment elle réalise l'entrée correspondante
Opération	Déclarer ou caractériser sa réponse au contrôle commun	Déclarer ou caractériser sa réponse au même contrôle
Connexion	Spécifier les interfaces et la transformation physique conjointe	Spécifier les interfaces et la transformation physique conjointe
Accès interne	Respecter les observations autorisées par C	Respecter les mêmes restrictions
Lecture	Enregistrer les sorties selon les temps et les configurations de C	Enregistrer les sorties selon les temps et les configurations de C
Éléments de preuve	Identifier les prédictions du modèle et les données disponibles	Identifier les prédictions du modèle et les données disponibles

Élément de la confrontation	Obligation de Q	Obligation de V
Ressources et erreurs	Déclarer la communication, le contrôle, la précision et les pertes	Déclarer les mêmes types de ressources et d'erreurs

On n'exige pas de V un espace de Hilbert, des amplitudes stockées ni un mécanisme de mise à jour identique à celui de Q comme condition d'admission. On n'exige pas non plus que Q adopte l'électronique ou la représentation relationnelle de V. Ce qui doit être confronté est la distribution observable complète :

$$(P_Q(a, c_{\text{protocolo}}), P_V(a, c_{\text{protocolo}})).$$

Les prédictions doivent découler des règles déclarées de chaque réalisation, sans ajouter à V une architecture ou un mécanisme différent de ceux spécifiés par l'auteur. La comparaison peut être théorique entre modèles idéaux ou expérimentale entre dispositifs caractérisés ; on identifiera expressément celle qui est effectuée. On ne confondra pas une coïncidence mathématique idéale avec une validation physique de l'une ou l'autre machine.

La nécessité de comparer des distributions conjointes est une règle commune : un réseau Q n'est pas non plus caractérisé pour tous les protocoles par la seule connaissance des distributions de ses unités isolées. L'absence de mesure préalable n'élimine cette obligation dans aucun réseau.

Si une correspondance de composition est proposée, elle devra être vérifiée avec les opérations et les connexions spécifiées indépendamment dans les deux modèles. Des structures internes différentes peuvent produire les mêmes sorties ; la preuve n'exige pas d'imposer à V la structure Q.

Par conséquent, l'étape en attente n'est pas d'« adapter V à la définition interne de Q », mais de définir la connexion physique proposée, son protocole commun avec la connexion Q et de confronter les deux réponses sans supposer leur égalité.

20.2. Construction locale de V1, V2 et V3

Les trois machines V sont déterministes et se construisent avec de l'électronique ou du logiciel conventionnels. La préparation déclare les connexions et les contrôles ; elle ne lit pas les résultats internes non fixés par cette préparation. La mesure est déclenchée une seule fois à $t = t_0$.

- V1 conserve les opérations H, H, l'oracle réversible reçu et H, avec la préparation déclarée (0, 1).
- V2 conserve le registre de travail préparé dans 1, les contrôles préparés dans 0, les multiplications modulaires contrôlées et les connexions de Fourier inverse.
- V3 conserve la préparation et l'ordre des opérations du protocole reçu.

Ces descriptions ne stockent pas de table d'amplitudes conjointes. Les programmes v1.py, v2.py et v3.py utilisent le contrôleur v_relacional.py. Ils sont également inclus dans le dossier portable Traductores_V.

La réalisation connectée reçoit `preparar(plan)` et `disparar(t0)`. La préparation ne délivre pas de résultats ; le déclenchement enregistre une unique lecture conjointe. Une nouvelle consultation renvoie les bits déjà enregistrés et ne répète pas la mesure. Une défaillance du détecteur consomme cette préparation.

Le contrôleur ne parcourt ni le plan de portes ni les résultats possibles au déclenchement. L'enregistrement et la validation des bits reçus ne remplacent pas la dynamique des connexions. Les formules de signaux d'une unité ne sont pas converties en une table d'états de toutes les unités.

Le code actuel prépare les plans et gère la mesure. Il reste à connecter et à vérifier la réalisation conjointe des opérations des trois machines. Sans cette connexion, il signale ce qui reste en attente : il ne calcule pas de sortie à partir de Q et n'en invente pas. Cette distinction décrit l'état du code, elle n'ajoute pas de condition physique à la définition de V.

Les détecteurs des tests vérifient le contrat de préparation et de déclenchement. Leurs bits d'essai ne sont pas des résultats des algorithmes complets. Les résultats des références Q simulées appartiennent au vérificateur, et non à V. La comparaison des tâches complètes et des temps sera effectuée avec les réalisations et les conditions d'exécution identifiées pour les deux.

20.3. Composition des machines internes et propagation de l'effondrement

Règle de construction précisée par l'auteur le 19 octobre 2026 : une machine V peut contenir des modules qui sont eux-mêmes des machines V. Leurs circuits et relations sont connus et préparés, pas les valeurs des variables qui ne sont pas encore fixées :

$$V_t(V_1, \ldots, V_m), \qquad \mathbf{x}_i(t_i) \in \{0,1\}^{r_i} \ .$$

Ici V_t est la machine contenant les modules V_i, et r_i compte les entrées du module i. L'instant t_i désigne le moment où ces entrées sont fixées par la mesure ou par la propagation provenant d'un autre module. Les valeurs se propagent par les relations préparées vers les sorties et les modules suivants. Connaître la relation ne signifie pas connaître ses valeurs avant leur fixation.

Les valeurs explicitement définies comme 0 ou 1 et leurs conséquences se propagent d'abord. Les dépendances partagées sont conservées : on ne choisit pas une sortie indépendante à chaque connexion et on ne relit pas une source pour résoudre chaque nœud.

Dans un protocole à déclenchement unique en $t = t_0$, les instants internes t_i décrivent la fixation et la propagation répondant à ce déclenchement ; ils n'introduisent pas d'observations externes antérieures. Aucun détecteur externe par module ni connaissance préalable des valeurs internes non fixées n'est nécessaire. Cette règle s'applique aussi à la composition modulaire et Fourier de V2. L'état de son implémentation est documenté séparément dans les résultats actuels.

21. Il n'existe pas de ξ stocké

$D_{REGISTROBINARIO}$ — Sortie enregistrée de plusieurs unités.

Deps: D_DESCONOCIDO, D_LECTURA

ξ représente l'ignorance de l'état interne jusqu'à la mesure à $t = t_0$, et non un mot physique stocké :

$$K(V_1) = \xi, \quad K(V_2) = \xi, \quad \ldots, \quad K(V_n) = \xi \ .$$

Lors de la mesure :

$$V(t_0) = (v_1, v_2, \ldots, v_n), \qquad v_i \in \{0, 1\}.$$

Nous obtenons un résultat, jamais ξ.

22. La question des 2^n états

Un système de n bits admet mathématiquement 2^n combinaisons possibles. Pour certaines relations, V n'a pas à les représenter explicitement pendant chaque exécution. Étendre cette propriété à tous les protocoles Q est une question différente qui doit encore être justifiée.

Par exemple :

$$V_2 = (1 - V_1), \qquad V_3 = V_1, \qquad V_4 = (1 - V_3).$$

Nous n'avons pas besoin de construire une table de $2^4 = 16$ combinaisons pour implémenter ces relations.

$$\text{n valores desconocidos} \neq \text{una representación física de } 2^n \text{ estados}.$$

23. V ne représente pas le vecteur d'état de Q

$D_{OBJETIVORELACIONAL}$ — Objectif ouvert d'éviter la représentation exponentielle des amplitudes ; non un résultat démontré.

Deps: D_RELACIONES

Une simulation classique peut tenter de représenter un registre de n unités, où n est un entier non négatif et D = 2^n. Les vecteurs e_0, ..., e_{D-1} forment la base de calcul orthonormale de l'espace complexe de dimension D. Les coefficients α_j sont complexes et j parcourt les entiers de 0 à D-1. Pour un état pur normalisé, la somme de leurs modules au carré vaut un. Avec ces conventions, le développement vectoriel est :

$$\text{ket}(\Psi) = \sum_{j=0}^{2^n - 1} \alpha_j e_j .$$

L'architecture V proposée a pour objectif d'éviter de stocker $\alpha_0, \ldots, \alpha_{2^n - 1}$. Qu'elle puisse le faire pour tous les protocoles du modèle Q choisi doit être vérifié sur les règles propres à V. La procédure relationnelle dont l'étude est proposée est :

$$R_0 \mapsto R_1 \mapsto \cdots \mapsto R_k \mapsto (v_1, \ldots, v_n).$$

24. Réplication, et non simulation

V a sa propre réalisation physique, ses signaux, ses relations, sa propagation, son temps et sa mesure. Nous exigeons l'équivalence des résultats observables :

$$\text{phys}(Q) \neq \text{phys}(V)$$

tandis que nous étudions :

$$Q \equiv_{\text{op}} V .$$

Physiquement différentes, opérationnellement équivalentes.

25. Critère général de réplication

$D_{EQUIVALENCIA}$ — Définition du critère observable, et non affirmation selon laquelle l'équivalence physique universelle aurait été établie.

Deps: D_PROTOCOLO, D_DISTRIBUCIONCONJUNTA

Pour un protocole C avec une correspondance fixe entre les étiquettes de sortie q et v des deux machines :

$$P_Q(q, c_{\text{protocolo}}) .$$

et :

$$P_V(v, c_{\text{protocolo}}) .$$

La réplication opérationnelle exige :

$$P_V(v, c_{\text{protocolo}}) = P_Q(q, c_{\text{protocolo}}) .$$

C'est une affirmation réfutable expérimentalement.

26. Principe de symétrie Q-V

No exigir a V lo que no exigimos a Q.

Et réciproquement : ne pas accorder à V une information que Q n'a pas. La comparaison doit être effectuée selon les mêmes règles.

27. Ce que nous avons trouvé

Nous avons considéré la valeur inconnue, la mesure binaire, les relations, les opérations sans mesure intermédiaire, l'évolution temporelle, la propagation, la phase ϕ, l'interférence, les fréquences, les mesures alternatives, les unités reliées, les configurations indépendantes, les corrélations, la composition, l'extension à n unités et la mesure conjointe.

Nous n'avons pas eu besoin d'introduire ξ comme état physique ni de mesurer les valeurs intermédiaires. L'information nécessaire pour poursuivre le calcul peut résider dans les relations physiques.

28. Une machine électronique conventionnelle différente

Nous pouvons construire une machine dont le principe soit :

no medir mientras se calcula.

Elle peut utiliser des portes logiques, des retards, des oscillateurs, des phases, la somme et la différence, la rétroaction, les impulsions, l'excitation, l'inhibition et les relations temporelles. La nouveauté peut résider dans **l'architecture et la manière d'utiliser l'information**.

29. Au-delà du qubit

Ici, V est délibérément restreinte à une sortie $b \in \{0, 1\}$ pour la comparer à Q. Une architecture V générale pourrait admettre des états et des relations plus riches, y compris un domaine complexe et des architectures inspirées du neurone biologique. Cette extension sort du cadre de ce premier travail.

30. La question change

La question n'est pas « comment simulons-nous Q ? », mais :

> **Existe-t-il une opération observable réalisée par Q qu'une machine V, soumise exactement aux mêmes conditions de connaissance, de propagation et de mesure, ne puisse pas répliquer ?**

31. Conséquence potentielle

Si V peut reproduire les opérations pertinentes de Q, nous pourrions étudier des machines construites avec :

componentes convencionales + valores desconocidos + relaciones conocidas + propagación + medida

pour des tâches aujourd'hui associées aux architectures quantiques.

32. Ce que je n'affirme pas

$D_{ALCANCE}$ — Portée et questions physiques en attente.

Deps: D_HIPOTESISV, D_EQUIVALENCIA, D_OBJETIVORELACIONAL

Ce travail ne présente pas encore une V physiquement construite, une architecture électronique complète, un avantage expérimental de vitesse ni une démonstration expérimentale de tous les algorithmes quantiques.

Il établit un principe de construction et un protocole de comparaison. Les questions restantes sont précisément celles qui rendent intéressante sa construction.

33. Hypothèse de travail

> **Une machine électronique conventionnelle capable de maintenir inconnues ses valeurs internes tout en construisant, conservant, composant et transformant physiquement leurs relations peut répliquer opérationnellement une machine quantique si, sous les mêmes préparations, transformations et mesures, elle reproduit les mêmes distributions observables.**

$$Q \equiv_{\text{op}} V$$

est l'hypothèse que nous proposons d'étudier.

Son schéma minimal :

$$\xi \mapsto \xi \mapsto \cdots \mapsto \xi \mapsto b \in \{0, 1\}$$

Et toujours :

$$\xi\text{:resultado binario no observado}\,.$$

34. Conclusion : une hypothèse de travail ouverte

$D_{ESTADOINVESTIGACION}$ — Conclusions du développement et état de l'hypothèse.

Deps: D_ALCANCE, D_SIMETRIA, T_AMPLITUDECOND, T_SECUENCIACOND

L'idée présentée dans ce travail est simple : **nous pouvons construire une machine avec de l'électronique conventionnelle qui opère sous les mêmes conditions fondamentales que celles que nous avons imposées à une machine quantique.**

Le point de départ est :

$$\xi\text{:resultado binario no observado}\,.$$

ξ n'est pas un troisième état, n'est pas une valeur stockée et n'appartient pas au domaine logique de la machine.

La machine continue à travailler avec 0 ou 1, mais nous renonçons à connaître la valeur pendant que le calcul se déroule.

Ce que nous pouvons en revanche connaître et transformer, ce sont les relations :

$$R_0 \mapsto R_1 \mapsto \cdots \mapsto R_n\,.$$

Ce n'est que lorsque nous effectuons la mesure $t = t_0$ que nous obtenons :

$$b \in \{0, 1\}\,.$$

Nous n'obtenons jamais ξ.

V ne vise pas à simuler mathématiquement Q :

V replica Q; no simula Q.

Cela ouvre une possibilité technologique et conceptuelle : **étudier des machines construites avec de l'électronique conventionnelle capables de reproduire opérationnellement ce pour quoi nous construisons actuellement des machines quantiques**, et explorer des architectures V qui n'auraient pas à rester limitées à la structure de Q.

Ce qui est présenté ici est une **hypothèse de travail**.

Le développement ajouté établit des identités de phase et des constructions idéales conditionnelles pour la lecture et la mise à jour d'une unité, ainsi que les plans de connexions des trois machines V. Il explicite aussi la limite CHSH lorsqu'un protocole distribué local sans communication est exigé. Ces résultats ne constituent ni une démonstration d'équivalence physique universelle ni une validation expérimentale de V.

Le registre joint NOTAS_DESARROLLO_ES_52.md conserve les conditions, les vérifications et les questions ouvertes, afin qu'elles ne se perdent pas lors de la poursuite du travail.

J'encourage les chercheurs en calcul quantique, en électronique, en physique, en mathématiques et en informatique à l'étudier, à en débattre, à tenter de la réfuter, à l'étendre et, surtout, à la construire.

Je ne considère pas cet article comme un point final.

C'est un point de départ.

Il reste beaucoup de travail à faire.

Invitation à une confrontation expérimentale indépendante

Avec les ressources disponibles, nous avons développé l'analyse conceptuelle, les identités et les constructions d'une unité spécifiées ici, ainsi que les plans de connexions et de contrôle de mesure de V1, V2 et V3. Les tests du contrôleur vérifient la préparation et le déclenchement ; ils ne sont pas présentés comme des résultats des algorithmes complets de ces machines.

Ces résultats positifs correspondent aux modèles et aux protocoles analysés ; ils ne constituent pas une preuve d'équivalence universelle de l'architecture physique V. L'analyse identifie aussi des limites, en particulier celle d'une réalisation locale sans communication face aux corrélations CHSH. La vérification expérimentale et la caractérisation de l'architecture relationnelle proposée restent en attente.

Je suis un chercheur indépendant disposant de moyens modestes. Si je ne dispose pas d'un accès à un processeur quantique réel pour effectuer la confrontation, j'invite ceux qui y ont accès à tester la proposition et à partager leurs résultats, qu'ils trouvent des coïncidences ou des différences.

La comparaison doit respecter les prémisses exposées au début : préparations correspondantes, indépendance des entrées lorsque le protocole l'exige, opérations et connexions déclarées et mêmes critères de lecture et d'évaluation pour Q et V. On n'introduira pas dans V de synchronisations ou de corrélations externes qui ne fassent pas partie du protocole.

Une implémentation en Python pourra aider à spécifier et à confronter les règles propres à V ; si elle modélise un circuit encore non construit, ses résultats seront identifiés comme des prédictions de ce modèle. Si elle contrôle et enregistre un circuit V physique, cette réalisation sera documentée. Les résultats Q devront distinguer la simulation de l'exécution sur du matériel réel. L'implémentation de V respectera son architecture relationnelle et ses règles propres, sans les remplacer par une simulation de Q.

Pour que la confrontation puisse être examinée et répétée, je demande que soient partagés les protocoles, les implémentations utilisées, l'identification du processeur, les configurations et les étalonnages pertinents, le nombre de répétitions, les données de sortie et leurs incertitudes statistiques. Les pertes, les sélections de données et les divergences devront également être déclarées.

Le manque d'accès ne confirme ni ne réfute l'hypothèse : il laisse l'expérience en attente. Une coïncidence établira la portée des protocoles confrontés ; une différence reproductible permettra de localiser une limite ou une condition de la proposition qui devra être révisée.

Si la proposition réussit ces confrontations, j'espère que les résultats faciliteront de futures collaborations et que l'accès aux moyens nécessaires cessera d'être un obstacle à la poursuite de son étude. Cette possibilité est une motivation pour mettre le travail à la disposition d'autrui, et non une conclusion expérimentale anticipée.

Víctor Estrada Díaz
Einstein-VED --- UNIHOLOG

Licence : CC BY-NC-SA