-FR_52: planches de construction et de comparaison Q-V

Auteur : Víctor Estrada Díaz
Cadre : UNIHOLOG - Machine V
Date : 10 octobre 2026

Références du projet : Document de base · Traducteurs et compilateurs de V · Présentation à la communauté · Index complet des ressources.

Double licence – Éthique et utilisation

- **Texte (CC BY-NC-SA 4.0)** : partage et adaptation ; utilisation non commerciale, attribution à Víctor Estrada Díaz et partage dans les mêmes conditions.
- **Code (HL3)** : utilisation commerciale autorisée uniquement si elle respecte les principes éthiques. Sont interdits : guerres, violations des droits humains, dommages à l'environnement, exploitation, surveillance de masse et discrimination.

Principes éthiques déclarés par l'auteur : respect de la dignité humaine, pas d'utilisation lucrative sans autorisation et interdiction des utilisations nuisibles.

Déclaration : estradad.es/licencia.php. Informations complémentaires : CC BY-NC-SA 4.0 · HL3. ORCID : 0000-0001-9942-1021.

Ce document rassemble les seize planches du projet. Son objectif est de décrire les constructions, de préparer leurs connexions et d'étudier ce qui se passe lors de leur exécution. La comparaison de Q et V doit prendre en compte le problème, la préparation, les opérations, les résultats et les temps d'exécution ; elle n'exige pas que deux exécutions individuelles produisent le même échantillon.

Dans l'interprétation proposée par l'auteur, l'incertitude quantique trouve son origine dans une propriété interne de l'espace-temps : pour fixer ce que nous savons et ce que nous ignorons, nous devons nous situer en un point de la ligne temporelle, $t = t_0$. La mesure établit ce point de référence et rend connu le résultat qui demeurait inconnu avant elle. Le cadre

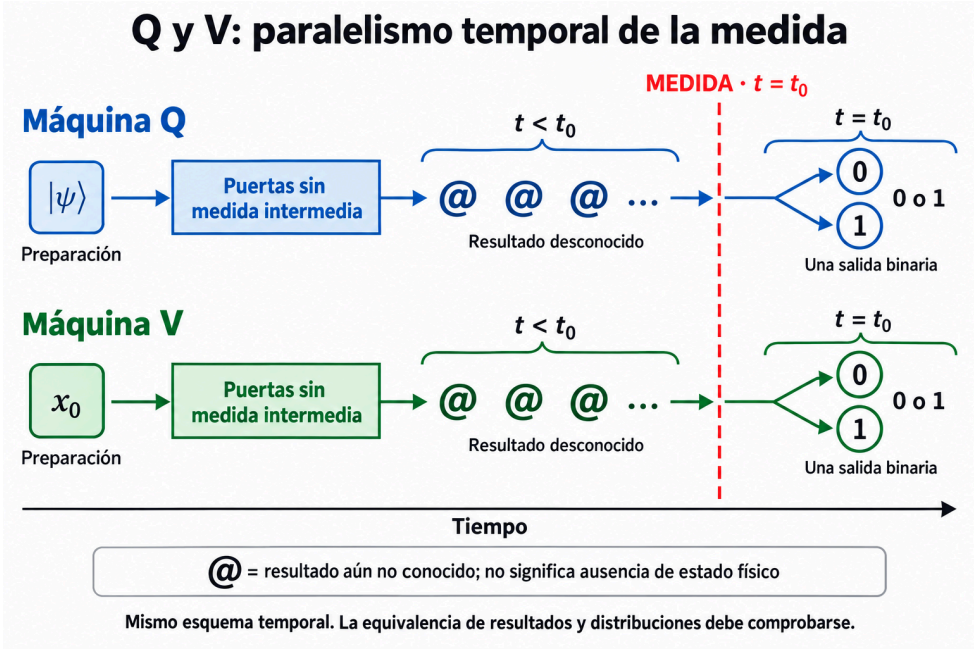
UNIHOLOG de l'auteur explique cette relation au moyen de la fonction $f(t)$, comprise comme une fonction interne de l'espace-temps : depuis la référence $t = t_0$, elle distingue ce qui est défini pour $t < t_0$ de ce qui reste indéfini pour $t > t_0$. Ici, « indéfini » renvoie aux connaissances disponibles, et non à l'inexistence physique du passé ou du futur. Dans cette interprétation, le temps ne disparaît pas du fait de le vivre : se situer en $t = t_0$ fixe la référence de connaissance et de mesure, sans éliminer les autres points de la ligne temporelle. C'est cette idée temporelle qui guide la construction de V et sa comparaison avec Q ; elle n'assimile pas l'ignorance à l'inexistence d'un état physique.

Dans V, `@` indique un résultat individuel inconnu et non lu avant la mesure. Les connexions et les relations entre unités peuvent être connues sans lire leurs résultats. Une préparation spécifiée, par exemple un auxiliaire initialisé à zéro, ne doit pas être confondue avec une lecture intermédiaire.

La lecture finale conjointe s'effectue à $t = t_0$. Chaque résultat binaire enregistré appartient à $\{0, 1\}$. `@` n'est pas une troisième valeur physique. La description d'une règle et la connexion exécutable de cette règle sont des étapes distinctes de la construction, que ce document identifie.

Les images sont incluses depuis le répertoire relatif `./img/` , équivalent à `.\img` . Les formules utilisent exclusivement des délimiteurs dollar simples pour les mathématiques en ligne et doubles pour les mathématiques en bloc. Cette annexe ne remplace pas le document principal FR_52_Maquina_V_UNIHOLOG.pdf.

1. Parallélisme temporel de la mesure

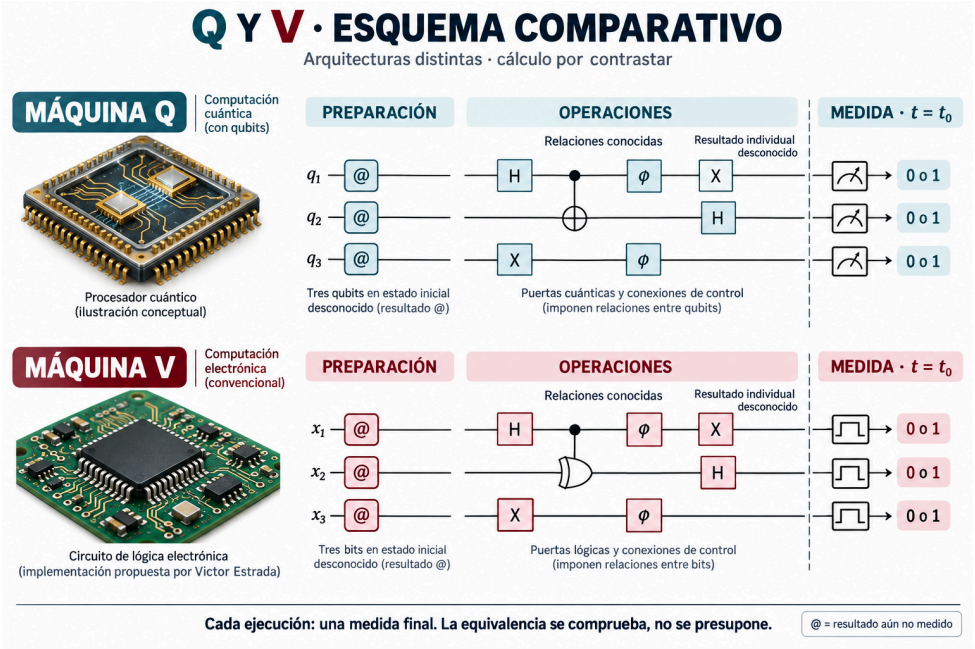


La rangée supérieure représente Q ; la rangée inférieure, la construction proposée de V. Dans V, les valeurs internes ne sont pas consultées pendant l'exécution. Le symbole @ représente le résultat encore inconnu, et non l'absence d'un état physique. La mesure à $t = t_0$ enregistre une sortie binaire :

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

Le dessin exprime le parallélisme temporel de la préparation, des opérations sans mesures intermédiaires et de la lecture finale. Il ne représente pas une réponse calculée au préalable puis cachée. La concordance des résultats et des distributions des deux réalisations doit être vérifiée par protocole ; elle ne se déduit pas uniquement de l'ignorance antérieure à la mesure.

2. Vue d'ensemble Q1-V1



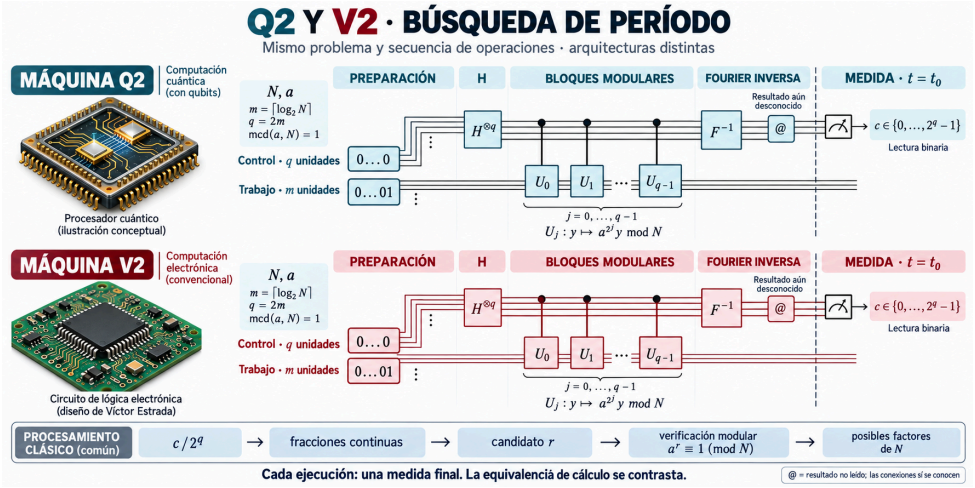
La planche place Q en haut et V en bas. Elle aligne préparation, opérations et mesure finale pour distinguer l'architecture de la tâche effectuée. Les portes peuvent établir des relations sans révéler les résultats individuels. C'est une vue d'ensemble conceptuelle : le détail du protocole de Deutsch est développé dans le document principal ; il n'est pas spécifié par l'ensemble des portes génériques du dessin.

Ce protocole utilise l'oracle réversible

$(x, y) \longmapsto (x, y \oplus f(x))$.

Le registre est préparé avec $x = 0$ et $y = 1$; H est appliquée aux deux unités, puis l'oracle et enfin H à la première. Dans Q, la lecture idéale de la première unité distingue les fonctions constantes des fonctions équilibrées. La construction de V1 doit relier ces opérations à sa lecture finale.

3. Vue d'ensemble Q2-V2

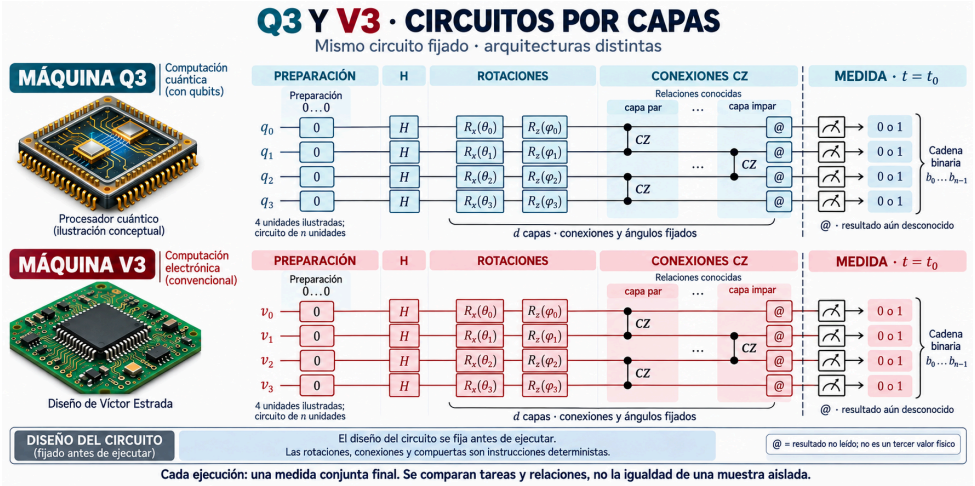


Q2 et V2 sont organisées pour étudier la période de la fonction modulaire avec les mêmes paramètres connus N et a, où $\gcd(a, N) = 1$. Le registre de contrôle reçoit H, commande les multiplications modulaires et passe par Fourier inverse avant la mesure. Le registre de travail est préparé à un et le contrôle à zéro.

$$m = \lceil \log_2 N \rceil, \qquad q = 2m\,.$$

La lecture binaire c permet de former $c / 2^q$ et de proposer une période au moyen de fractions continues. Le candidat est vérifié de manière modulaire avant d'obtenir d'éventuels facteurs. Une seule lecture ne garantit pas l'obtention de facteurs.

4. Vue d'ensemble Q3-V3



La planche représente la famille locale de circuits en couches du projet. La préparation, les angles et les connexions sont fixés avant l'exécution. Les couches combinent H, rotations et CZ, en alternant les paires connectées. Le circuit illustré n'est pas identifié à une instance originale de Willow.

La lecture finale d'un registre de n unités fournit un mot binaire

$$b = (b_0, \dots, b_{n-1}), \qquad b_j \in \{0, 1\}.$$

On compare les réponses du même circuit préparé, sans exiger l'égalité de deux mots obtenus lors d'exécutions différentes.

5. Inverseur X et NOT

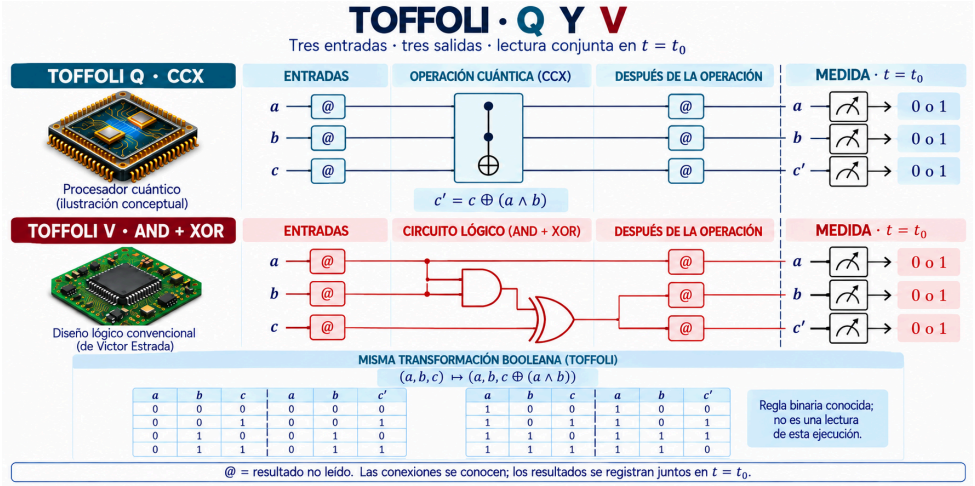


Avec une entrée dont le résultat est inconnu, l'inversion est définie sans lire ce résultat. X échange les deux vecteurs de la base ; NOT complémente la valeur binaire. Une entrée de base connue peut permettre de prédire la sortie : l'ignorance est la condition du cas illustré, et non une propriété universelle de toute préparation.

$$X\,|\,0\rangle = |\,1\rangle, \qquad X\,|\,1\rangle = |\,0\rangle, \qquad b' = 1 - b\,.$$

La construction de V maintient la lecture individuelle bloquée jusqu'à $t = t_0$.

6. Toffoli : trois entrées et trois sorties

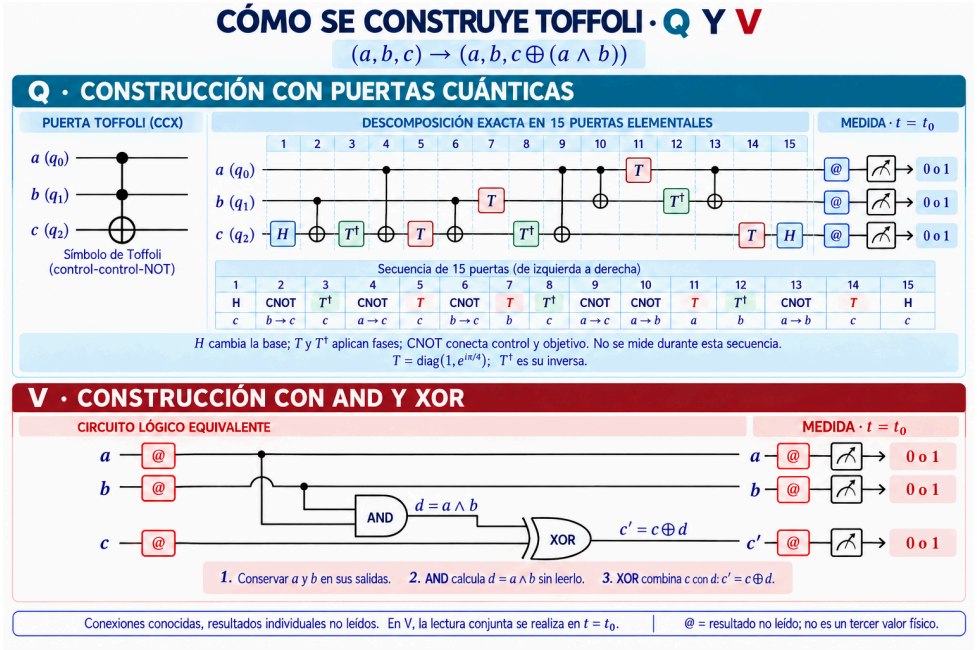


Toffoli conserve les deux contrôles et complémente la troisième valeur uniquement lorsque les deux contrôles valent un. Ce n'est pas une AND qui élimine ses entrées. La comparaison conserve les trois entrées et les trois sorties :

$$(a, b, c) \longmapsto (a, b, c'), \qquad c' = c \oplus (a \wedge b).$$

Dans V, AND forme un signal intermédiaire et XOR le combine avec c, sans lire ce signal pendant l'opération. La table de la planche exprime la règle binaire, et non des observations d'une exécution en cours.

7. Construction de Toffoli

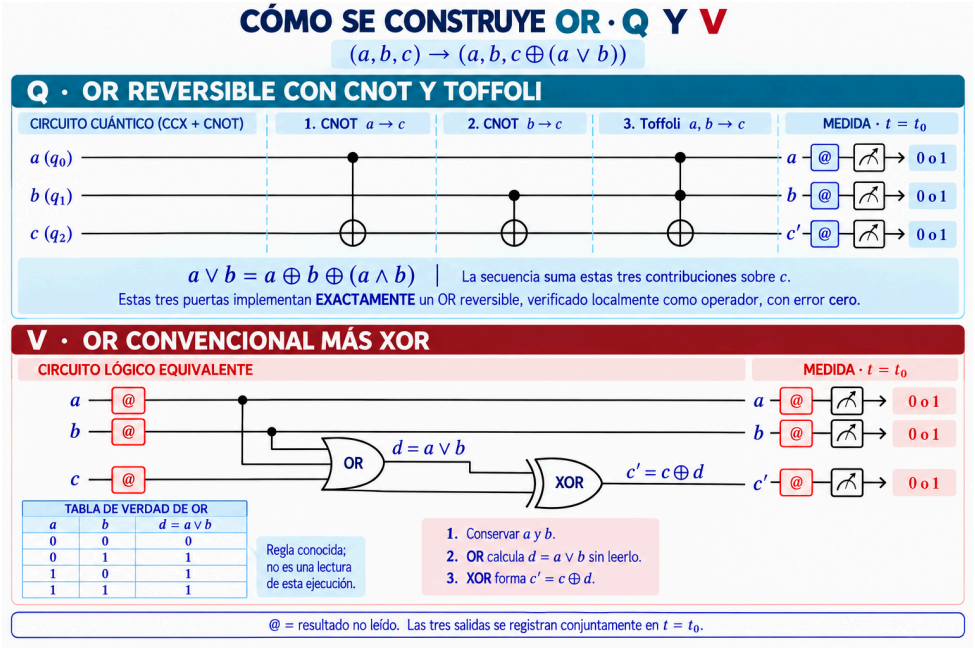


Dans Q, la planche développe une décomposition exacte de CCX avec six CNOT, deux H et sept portes de phase T ou leur inverse. Les étiquettes des phases sont

$$T = \mathrm{diag}\,(1, e^{i\pi/4}), \qquad T^\dagger = \mathrm{diag}\,(1, e^{-i\pi/4}).$$

Dans V, les étapes de la construction binaire consistent à conserver a, b, à former $d = a \wedge b$ et à produire $c' = c \oplus d$. Les dérivations de signaux ne doivent pas relier directement les lignes d'entrée entre elles. Le schéma de lecture conserve les trois sorties jusqu'à la mesure conjointe.

8. Construction de OR réversible



Pour comparer les mêmes entrées et sorties, OR est insérée dans une transformation réversible de trois unités :

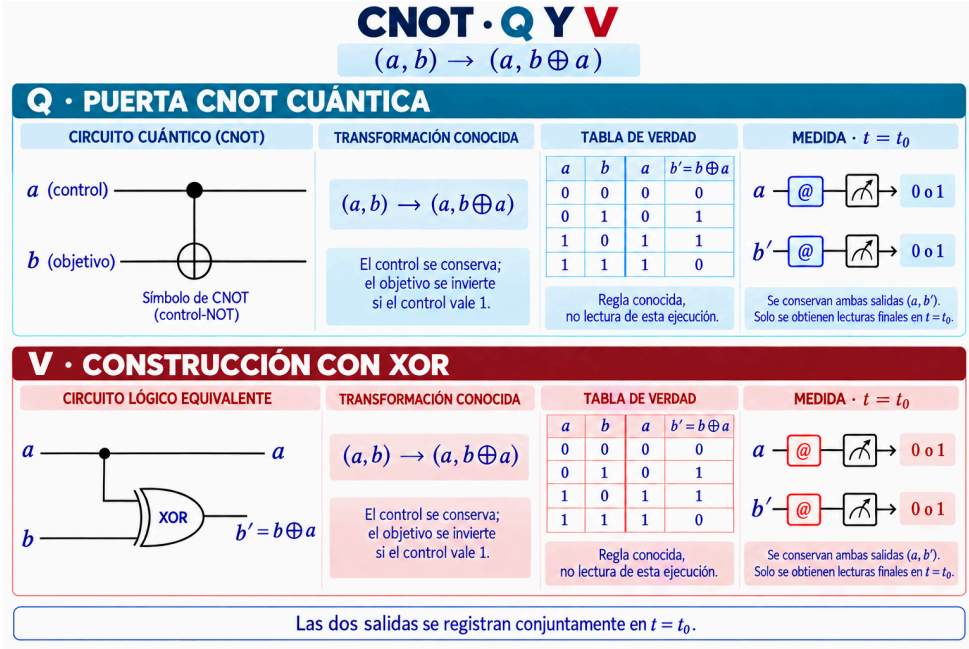
$(a, b, c) \longmapsto (a, b, c \oplus (a \vee b))$.

Dans Q, on applique, dans l'ordre, CNOT de a vers c, CNOT de b vers c et Toffoli avec les contrôles a, b et la cible c. La construction repose sur

$a \vee b = a \oplus b \oplus (a \wedge b)$.

Dans V, OR produit $d = a \vee b$ et XOR combine c avec d, en conservant a, b. Les étiquettes de réseau répétées indiquent les mêmes signaux, et non des générateurs supplémentaires ou des lectures intermédiaires.

9. CNOT et XOR contrôlée

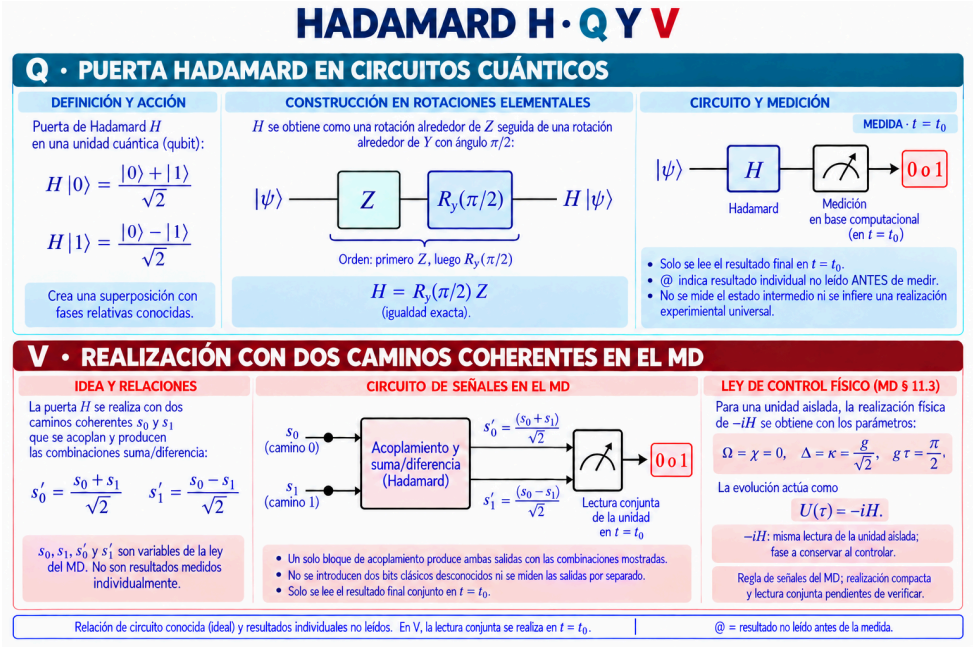


CNOT conserve le contrôle et met à jour la cible. Le circuit conventionnel de V utilise XOR avec les deux mêmes entrées et conserve la sortie de contrôle :

$(a, b) \mapsto (a, b'), \qquad b' = b \oplus a.$

Le résultat de la cible n'a pas besoin d'être lu pour connecter l'opération. La concordance de la table binaire décrit cette fonction ; l'évolution des phases d'un registre général est une autre partie de la comparaison des machines.

10. Hadamard H



H combine les deux vecteurs de la base par une somme et une différence normalisées :

$$H\,|\,0\rangle = \frac{|0\rangle + |\,1\rangle}{\sqrt{2}}, \qquad H\,|\,1\rangle = \frac{|0\rangle - |\,1\rangle}{\sqrt{2}}.$$

La construction par rotations applique d'abord Z puis la rotation Y :

$H = R_y(\pi/2)Z$.

Pour V, on représente les lois de deux chemins de signal du document :

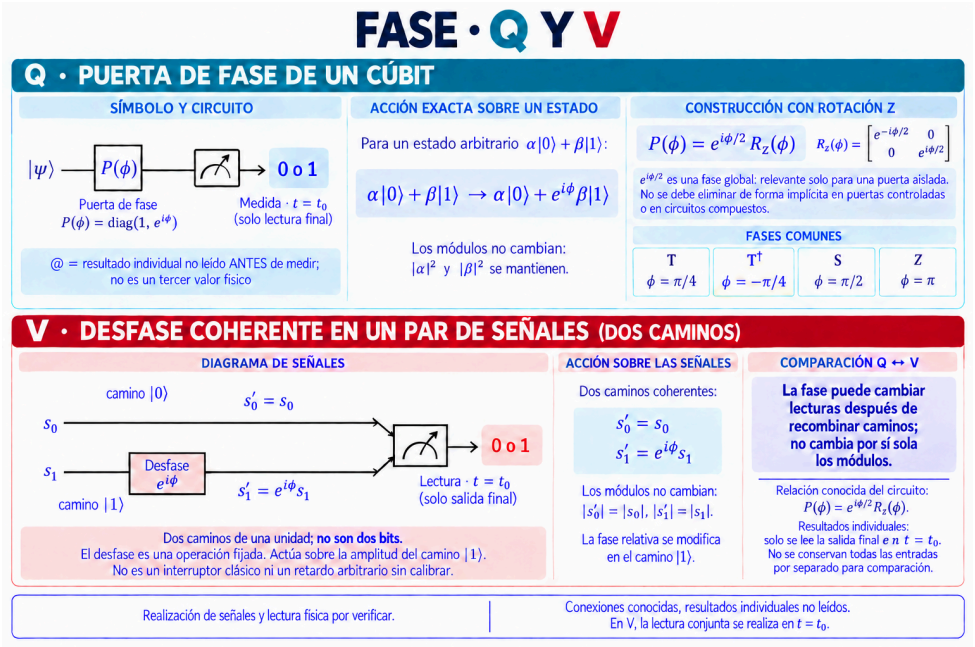
$$s_0' = \frac{s_0 + s_1}{\sqrt{2}}, \qquad s_1' = \frac{s_0 - s_1}{\sqrt{2}}.$$

Ces chemins appartiennent à une seule unité, et non à deux bits mesurés. Dans le bloc de couplage du MD, les paramètres $\Omega = \chi = 0$, $\Delta = \kappa = g/\sqrt{2}$ et $g\tau = \pi/2$ produisent $-iH$. Cette phase globale n'altère pas la lecture de l'unité isolée, mais doit être conservée lors de la construction d'une

opération contrôlée. La connexion compacte de la loi des signaux avec la lecture de V reste une tâche de construction ; elle n'est pas remplacée par un tirage au sort.

11. Phase : T, inverse de T, S, Z et phase générale

Dans ce protocole, l'opération de phase ne demande pas de mesurer ni de connaître au préalable la phase interne de Q ou de V. On n'impose pas à V une lecture qui n'est pas demandée à Q. Elle s'exécute sans lecture intermédiaire ; la capture a lieu en $t = t_0$. Un angle fourni comme instruction n'est pas une lecture de l'état inconnu.



La porte de phase agit sans changer les modules des coefficients :

$$P(\varphi) = \mathrm{diag}\,(1, e^{i\varphi}), \qquad P(\varphi) = e^{i\varphi/2} R_z(\varphi).$$

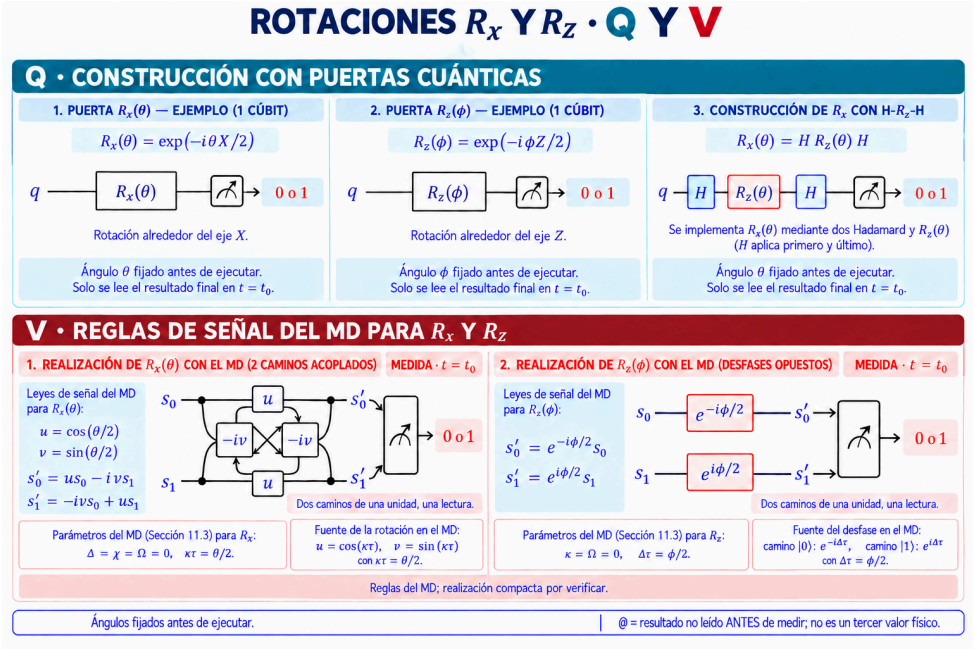
Les choix $\varphi = \pi/4, -\pi/4, \pi/2$ et π correspondent respectivement à T, à son inverse, à S et à Z. Une phase relative peut modifier les lectures ultérieures lorsque les chemins sont combinés.

Dans la description des signaux de V :

$$s_0' = s_0, \qquad s_1' = e^{i\varphi} s_1 .$$

Le déphasage est fixé comme opération et ne constitue pas une lecture de la valeur individuelle. Une phase globale d'une unité isolée ne doit pas être écartée automatiquement lorsque cette opération devient contrôlée.

12. Rotations Rx et Rz



Les rotations et leur composition satisfont

$$R_x(\theta) = e^{-i\theta X/2}, \qquad R_z(\varphi) = e^{-i\varphi Z/2}, \qquad R_x(\theta) = HR_z(\theta)H.$$

Avec $u = \cos(\theta/2)$ et $v = \sin(\theta/2)$, les lois de Rx sur les deux chemins de V sont

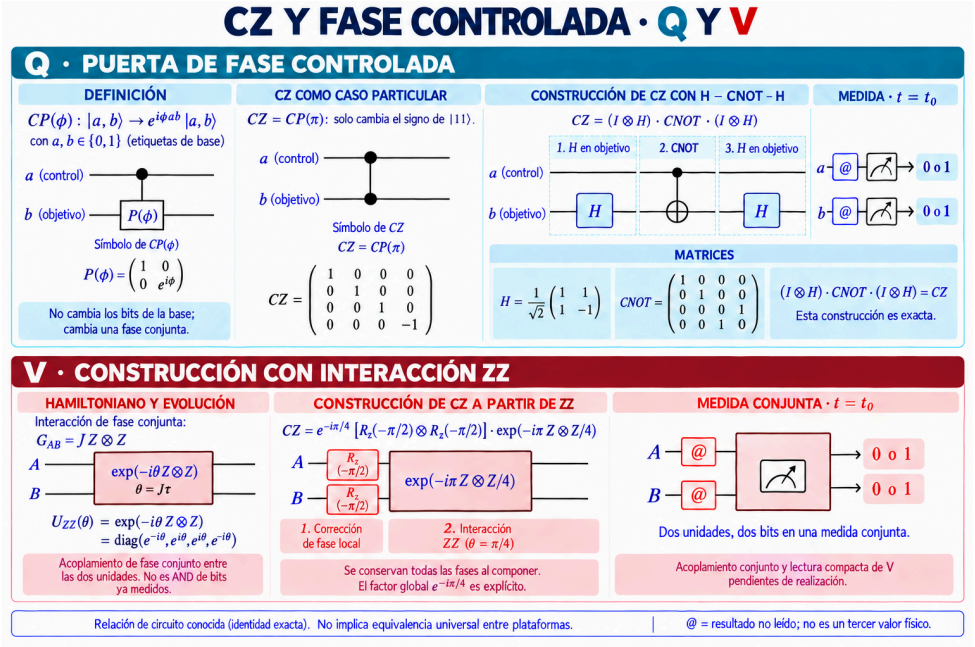
$$s_0' = us_0 - ivs_1, \qquad s_1' = -ivs_0 + us_1.$$

Pour Rz, les phases des chemins ont des signes opposés :

$$s_0' = e^{-i\varphi/2} s_0, \qquad s_1' = e^{i\varphi/2} s_1.$$

Les angles sont connus avant l'exécution. Les chemins de chaque exemple alimentent une seule lecture d'unité, et non des mesures binaires séparées.

13. CZ et phase contrôlée



La phase contrôlée est définie sur les vecteurs de base par

$$\mathrm{CP}(\varphi)\,|a,b\rangle = e^{i\varphi ab}\,|a,b\rangle, \qquad \mathrm{CZ} = \mathrm{CP}(\pi).$$

CZ change le signe de la composante de base dont les deux étiquettes sont égales à un. Dans Q, elle peut être construite avec H sur la cible, CNOT et H sur la cible à nouveau. L'interaction du MD utilise

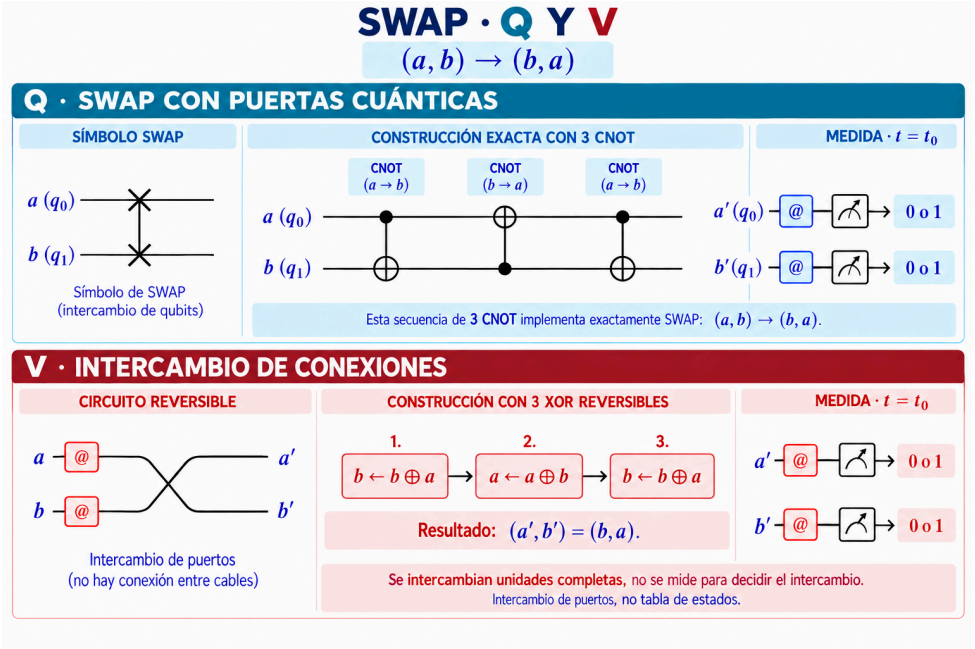
$$G_{AB} = JZ \otimes Z, \qquad U_{ZZ}(\theta) = e^{-i\theta Z\otimes Z}, \qquad \theta = J\tau.$$

L'interaction ZZ seule ne doit pas être confondue avec CZ. La construction comprend les corrections de phase locales et le facteur global :

$$\mathrm{CZ} = e^{-i\pi/4}\,[R_z(-\pi/2)\otimes R_z(-\pi/2)]\,e^{-i\pi Z\otimes Z/4}.$$

Dans V, on décrit un couplage conjoint, et non une AND sur des bits déjà lus. Les deux unités fournissent deux bits lors d'une seule mesure conjointe. La loi conjointe doit être reliée à la réalisation du circuit avant la mesure.

14. SWAP



SWAP échange les deux unités complètes :

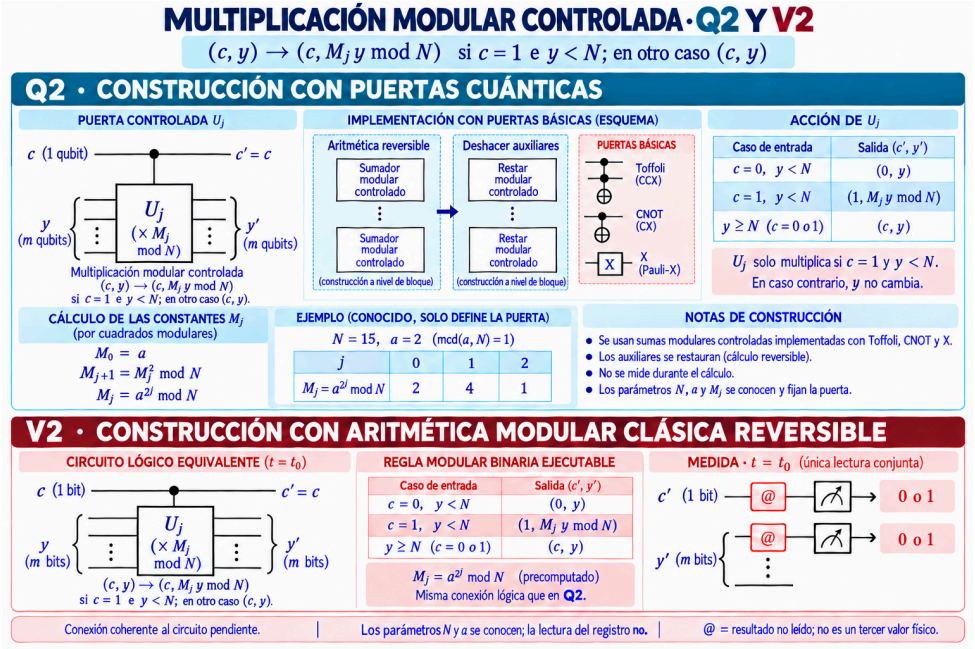
$(a, b) \mapsto (b, a)$.

Dans Q, elle est construite avec trois CNOT, orientées dans l'ordre de a vers b, de b vers a et de a vers b. Dans V, on peut connecter un échange de ports ou effectuer la séquence de mises à jour réversibles

$$b \leftarrow b \oplus a, \qquad a \leftarrow a \oplus b, \qquad b \leftarrow b \oplus a\,.$$

Les affectations sont appliquées de gauche à droite et utilisent le résultat mis à jour de l'étape précédente. Ce ne sont pas des instructions pour mesurer puis décider quel fil échanger.

15. Multiplication modulaire contrôlée



La porte est configurée avec des constantes connues ; la période et les facteurs ne sont pas fournis comme réponses :

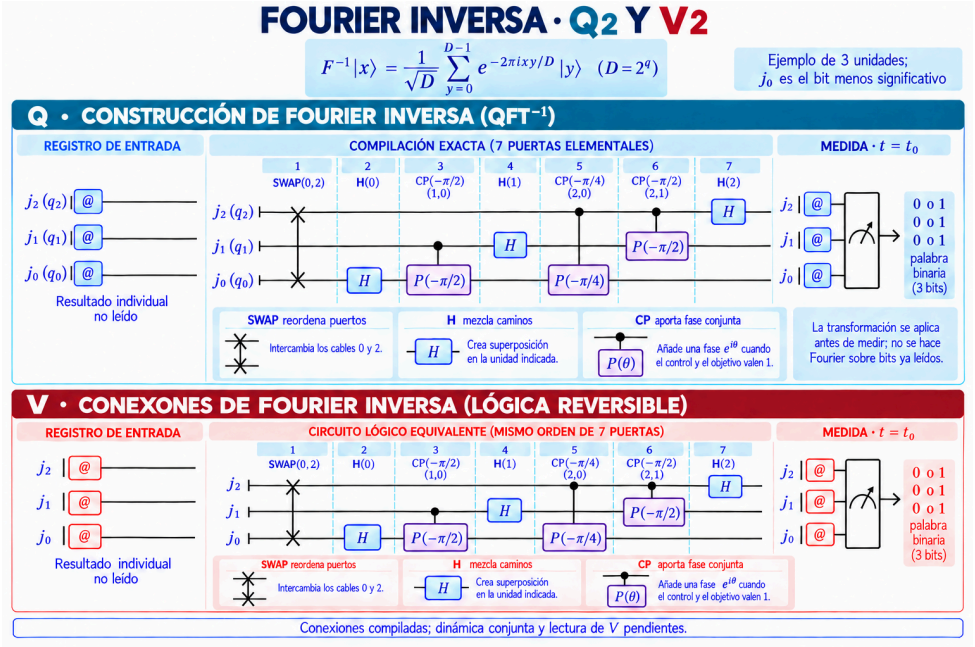
$$M_j = a^{2^j} \mod N, \qquad M_0 = a, \qquad M_{j+1} = M_j^2 \mod N\,.$$

Pour un contrôle c et un registre de travail y, le contrôle est conservé et l'action est définie sur l'ensemble du domaine du registre :

$$y' = \begin{cases} M_j\, y \bmod N, & c = 1 \text{ y } y < N, \\ y, & c = 0 \text{ o } y \geq N\,. \end{cases}$$

La coprimalité permet une permutation à l'intérieur de l'intervalle modulaire. Le schéma Q identifie l'arithmétique réversible, les additions modulaires contrôlées et la restauration des auxiliaires ; il ne constitue pas une liste exhaustive de toutes ses portes élémentaires. V dispose de la relation modulaire binaire, dont la connexion cohérente avec H, les phases et la lecture du circuit complet doit être construite.

16. Fourier inverse



Pour q unités et $D = 2^q$, la transformation mathématique est

$$F^{-1} \mid x\rangle = \frac{1}{\sqrt{D}} \sum_{y=0}^{D-1} e^{-2\pi i x y / D} \mid y\rangle .$$

La somme définit la transformation ; elle n'exige pas que V stocke une table d'états ou d'amplitudes. La planche montre l'exemple de trois unités, avec l'unité zéro comme bit de poids faible. L'ordre est le suivant :

1. SWAP entre les unités zéro et deux.
2. H sur l'unité zéro.
3. Phase contrôlée d'angle $-\pi / 2$ entre les unités un et zéro.
4. H sur l'unité un.
5. Phase contrôlée d'angle $-\pi / 4$ entre les unités deux et zéro.
6. Phase contrôlée d'angle $-\pi / 2$ entre les unités deux et un.
7. H sur l'unité deux.

Une phase contrôlée utilise P, et non Rz sans sa correction de phase. Dans V, cette séquence de connexions est conservée : H mélange les chemins, CP apporte une phase conjointe et SWAP réordonne les ports. Leur exécution

conjointe doit être reliée à la lecture finale ; Fourier n'est pas appliquée à des bits déjà mesurés.