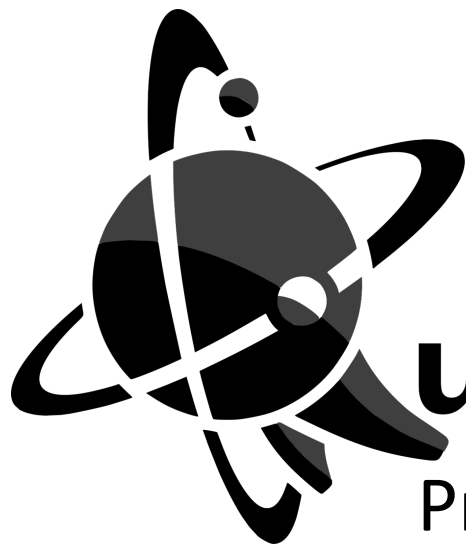


EQIP, 19.11.2021



uaCS



Laboratoire
Méthodes
Formelles

Proposition EPC INRIA

Quantum Computation Structures

Pablo Arrighi

Benoît Valiron

Renaud Vilmart ISFP

Pablo Arnault CRCN

Marc de Visme CRCN

université
PARIS-SACLAY



CentraleSupélec

Inria



* **Composition**

* Recherche

* Contexte

Composition » Benoît Valiron



1980		Pessac
1998-2002	1er cycle	Prépa / U. Grenoble
2002-2008	MSc + PhD	U. of Ottawa (Canada)
2008-2009	Postdoc	INRIA TYPICAL—LIX
2009-2010	ATER	CAPP—U. Grenoble
2010-2011	ATER	LIPN—IUT Villetaneuse
2011-2013	Postoc	U. Penn (US)
2013-2015	Postdoc	PPS - U. Paris 7
2015-2021	Equiv. MCF	CentraleSupélec

Mobilité » Canada (2002-2008), US (2011-2013)

Réseaux » Expert AFNOR (2021 - en cours)

Industrie » Atos (CIFRE, ANR, BPI), QuantFi (CIFRE).

Thèses » 3 en cours, 2 soutenues (1 postdoc, 1 R&D quantique).

Logiciel » Co-fondateur du langage de prog. quantique Quipper.

Responsabilités » Conseil de labo (2015-2020), CA CentraleSupélec (2019-2021),

Visibilité » 13 exposés invités, 14 PC/OC, 1 comité de thèses, 31 publications référées (POPL, LICS, PLDI, ICCS, ETAPS, MSCS, Inf. Comm, CACM, Comput. Phys. Commun).

Composition » Renaud Vilmart *Inria*



<i>1993</i>		Reims
<i>2013-2016</i>	Ing	Mines Nancy
<i>2015-2016</i>	MSc	U. de Lorraine
<i>2016-2019</i>	PhD	Loria, U. de Lorraine
<i>2019-2020</i>	Postdoc	U. Paris Saclay
<i>2020-</i>	ISFP	Inria Saclay

Réseaux » Membre ANR SoftQPRO, PIA/GDN Quantex

Visibilité » 9 publications référées (LICS, ICALP, LMCS, QIP, MFCS, QPL). 2 séminaires invités (LAACL, LIG). Prix Kleene (LICS 2019).

Composition » Pablo Arnault *Inria*



<i>2011 - 2014</i>	ENS	Paris-Saclay
<i>2014 - 2017</i>	PhD	U. Pierre et Marie Curie
<i>2018 - 2020</i>	Postdoc	U. Valencia, Espagne
<i>Début 2020</i>	Visit	IQC, Canada
<i>Fin 2020</i>	Long visit	QuaCS du LMF, Saclay
<i>Début 2021</i>	Postdoc	CEA/IRFU/LARSIM, Saclay
<i>2021 -</i>	CRCN	INRIA Saclay

Mobilité



Bourse compétitive JSPS Summer Program (Japon), Invité à Bonn, groupe expérimental (Allemagne), Projet PICS (France-Espagne)

Visibilité



9 publications référées (Phys. Rev. A, Physica A, Annals of Physics, JPA)

Composition » Marc de Visme *Inria*



2013 - 2018	ENS	Paris
2017 - 2020	PhD	LIP ENS-Lyon & U. Cambridge
2020 - 2021	Postdoc	INRIA Loria
2021 -	CRCN	INRIA Saclay

Mobilité » 3 mois à Cambridge (co-direction)

Visibilité »

1 exposé invité,
5 publications référées (POPL (3), CSL (2), CONCUR)

Composition » Pablo Arrighi



<i>1978</i>		Paris
<i>1997-2000</i>	BEng	Imperial, Londres
<i>2000-2003</i>	PhD	U. of Cambridge
<i>2003-2004</i>	ATER	U. Paris-Est
<i>Fin 2004</i>	Prof. Adj.	UdelaR, Uruguay
<i>Début 2005</i>	Postdoc	U. Grenoble Alpes
<i>2005-2014</i>	MCF	U. Grenoble Alpes
<i>2014-2020</i>	Prof.	Aix-Marseille U.
<i>2020-</i>	Prof.	U. Paris-Saclay

Mobilité » Danemark (2002), ENS-Lyon (2009-2011), ENS Paris-Saclay (2019-2020)

Réseaux » Resp. WP Projet UE, coord. ANR JCJC, membre projet ANR, co-fond. GdR IQFA, composition projet QISS (14 sites, 2M€).

Industrie » Compilateur DGA-Astrid.

Thèses » 2 en cours, 4 soutenues (2 enseignant-chercheurs, 2 R&D quantique).

Responsabilités » L1 Aix, LDD2, MPRI1, membre Section 6 CoNRS (2019-2021).

Visibilité » 8 exposés invités, 14 PC, 13 comités de thèses, ~70 publications référées (ICALP, MFCS, QIP, JCSS, LMCS, Phys Rev Lett).

Composition »



+ 1 CPJ



* Composition

* **Recherches**

* Contexte

Recherches » Qu'est-ce qu'un réseau d'ordinateurs quantiques? Comment le programmer?

Parallelisme spatial.

Parallelisme quantique.

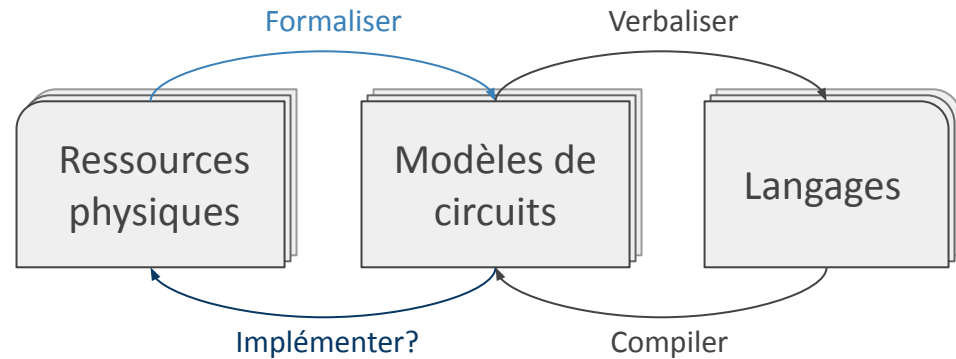
Conséquences:

- » Calculabilité
- » Universalité

Applications:

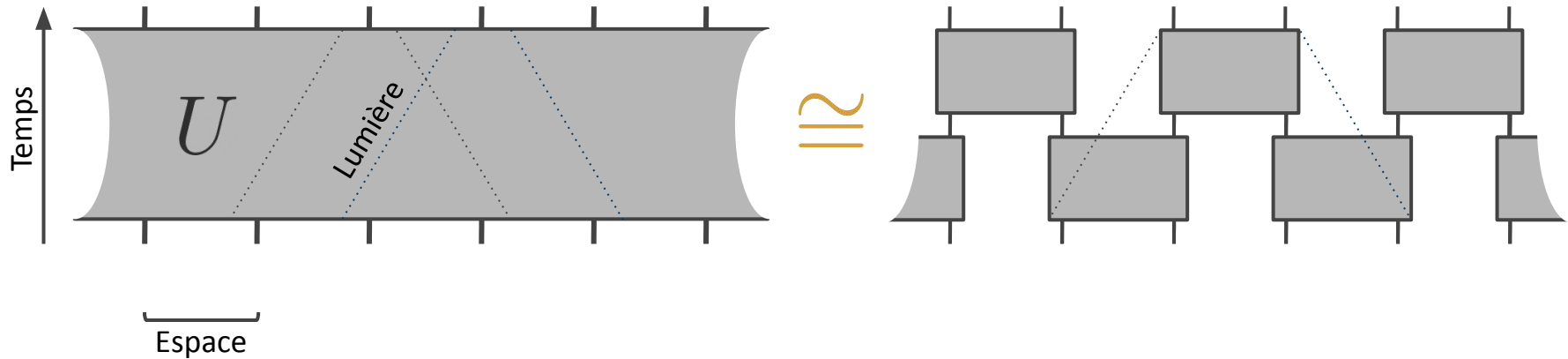
- » Simulation
- » Architectures
- » Compilation
- » Vérification
- » En physique: **discrétisation nécessaire** / nouveaux phénomènes.

Méthodes »



Recherches » Les évolutions quantiques... sous forme de circuits.

Th. Toute évolution quantique en espace-temps discret est un circuit quantique de profondeur finie, de portes locales.

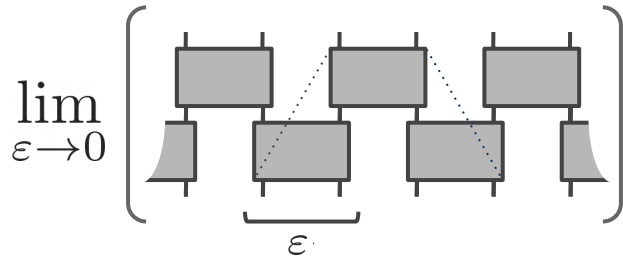


Les états sont non-locaux, mais les évolutions qui les produisent le sont!

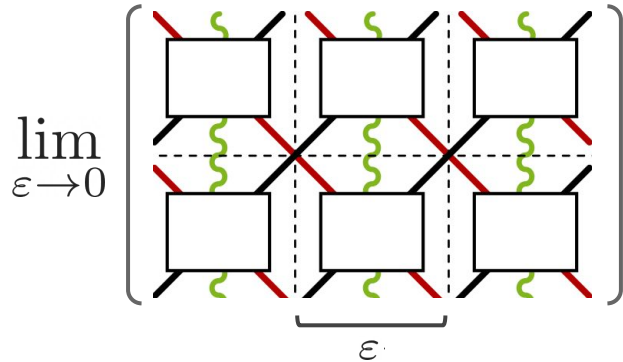
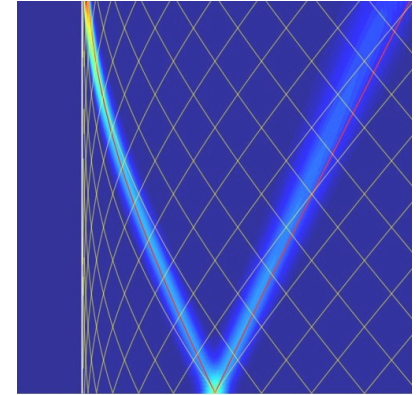
Lié à la réversibilité.

[A., Nesme, Werner^φ, 10][A., Grattage, 12]

Recherches » Application: algorithmes de simulation quantique



= Eq. aux dérivées partielles des électrons, y compris en espace courbe :



= Interactions : électrons + photons.

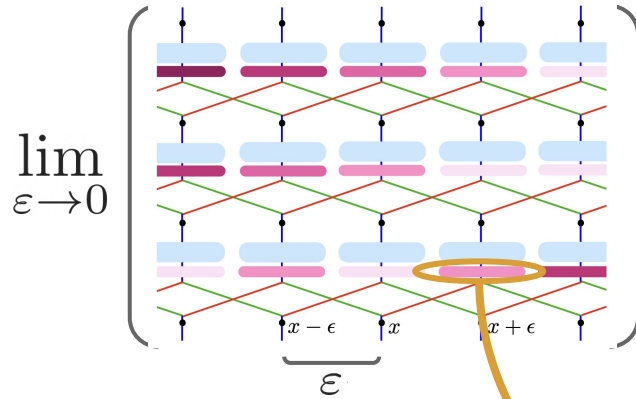


↳ pasqal.io?

Recherches » Application: algorithmes de simulation quantique



Exemple :



= Éq. d'un électron interagissant avec
un champ électromagnétique

(équation de Dirac dans un champ électromagnétique)

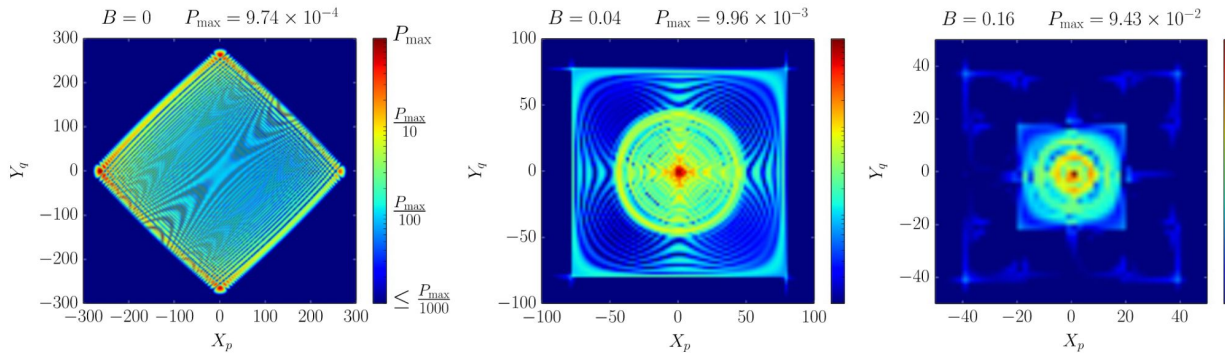
Phase shift operator

$$F = \begin{bmatrix} e^{i\varphi(x,t)} & 0 \\ 0 & e^{-i\varphi(x,t)} \end{bmatrix}$$

Recherches » Application: algorithmes de simulation quantique



» Électron confiné par un champ magnétique : [Arnault, Debbasch]

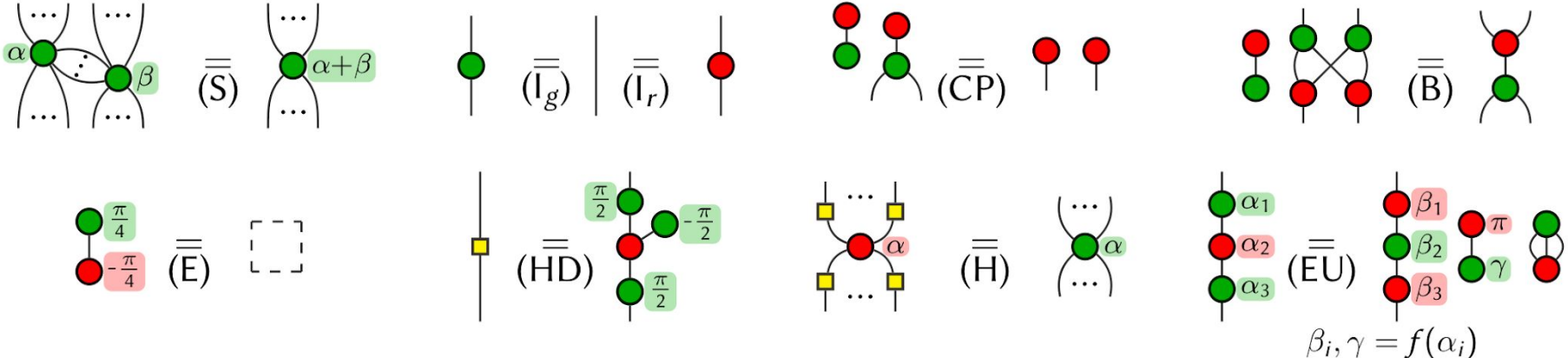


→ Symétrie de jauge abélienne nativement discrète : [Arnault, Debbasch]

» Théorie de jauge non abélienne :
[Arnault, Di Molfetta, Brachet, Debbasch, 16]

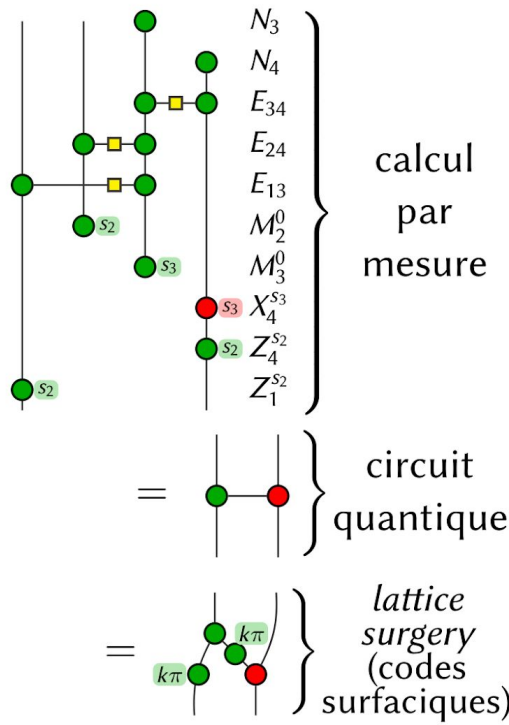
qubit devient qudit → $\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_d \end{pmatrix}$
phase φ devient matrice

Recherches » Complétude des langages graphiques

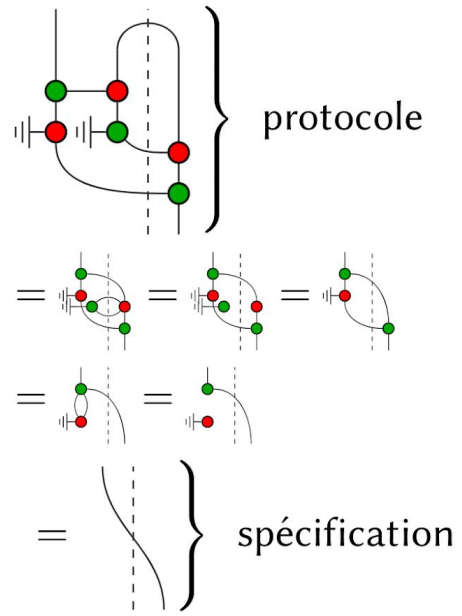


Recherches » Application des langages graphiques

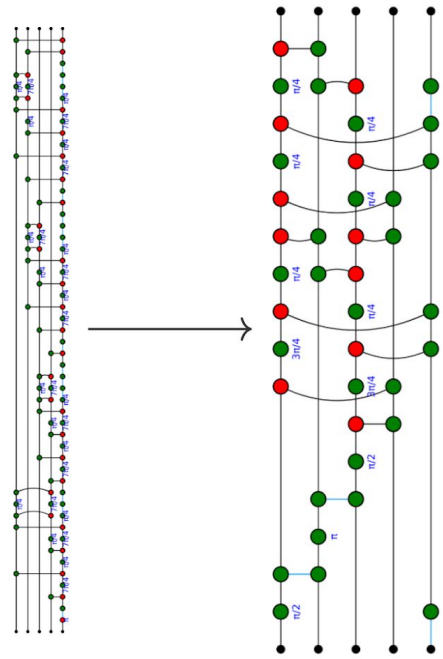
Unification



Vérification



Optimisation



Recherches » Méthodes formelles et compilation quantique

» Quantum programming languages

```

qft_internal :: [Qubit] -> Circ [Qubit]
qft_internal [] = return []
qft_internal [x] = do
  hadamard x
  return [x]
qft_internal (x:xs) = do
  xs' <- qft_internal xs
  xs'' <- rotations x xs' (length xs')
  x' <- hadamard x
  return (x':xs'')
where
  -- Auxiliary function used by 'qft'.
  rotations :: Qubit -> [Qubit] -> Int -> Circ [Qubit]
  rotations _ [] _ = return []
  rotations c (q:qs) n = do
    qs' <- rotations c qs n
    q' <- rGate ((n + 1) - length qs) q `controlled` c
    return (q':qs')
    
```

Quipper QFT circuit building function

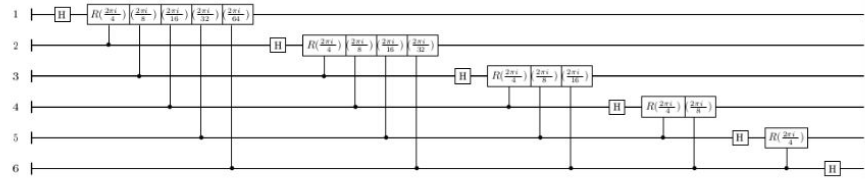
» ...their meaning/effects

$$\left\{ \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,n} \end{pmatrix} \right\}_{n \in \mathbb{N}}$$

[Selinger, Pagani, Valiron -- POPL 2014]

» Circuit synthesis
 » Trade-off resources
 classiques/quantiques

[Baboulin, Goubault de B., Valiron 17, 19, 20]



» Resource estimation

[Selinger, Valiron - MSCS 2006]
 [Valiron 2016]
 [Scherer, Valiron, Mau, et al. -- QIP 2019]

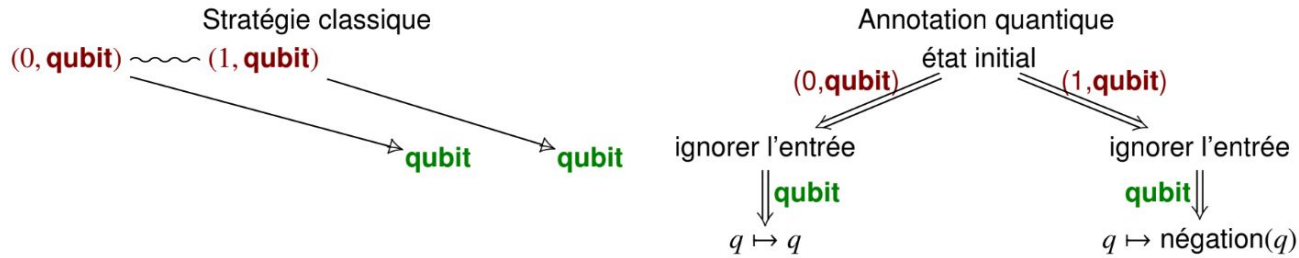
Recherches » Méthodes formelles et compilation quantique



- » Denotational semantics
- » Game semantics
- » Structures d'évènements mixtes
- » Pleine adéquation

» Geo
» Tok

gani,
DPL 2014]



[Dal Lag
Yoshimi

S
ues
aliron 17, 19, 20]

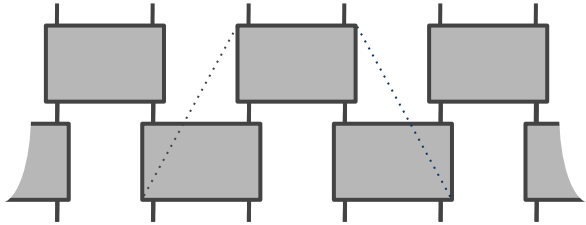
[Visme et al.]



[Valiron 2016]

[Scherer, Valiron, Mau, et al. -- QIP 2019]

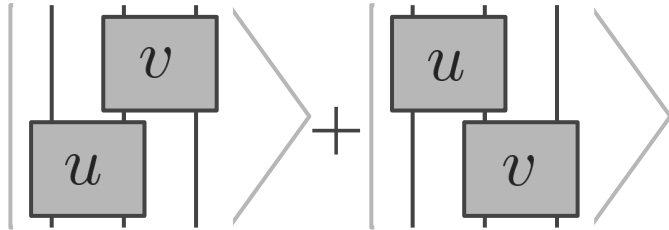
Recherches » Du flot de contrôle classique...



Précédemment...

- » Données quantiques.
- » Contrôle (ordre d'application des portes) classique.

Recherches » ... au flot de contrôle quantique...



... exprimé en langage de prog. quantique :

$$\lambda u \lambda v \lambda x \frac{u(v(x)) + v(u(x))}{\sqrt{2}}$$

[A., Dowek, 08]

[A., Diaz-Caro, Valiron 17]

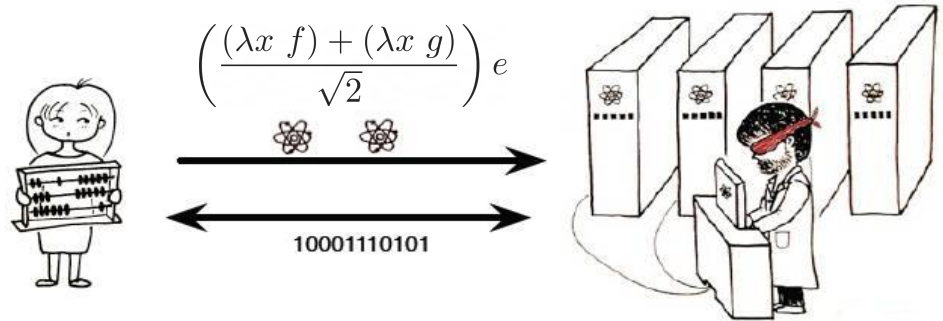
Le quantum switch:

Au delà des circuits

[Valiron *et al.* 09]

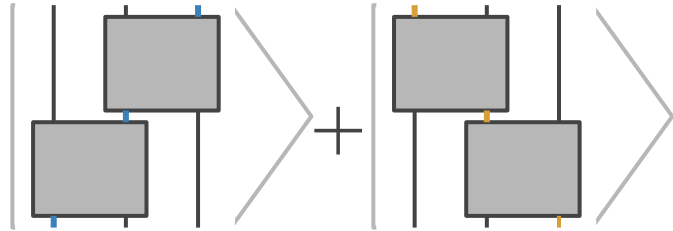
- » Implémenté expérimentalement
[Walther *et al.* 17]
- » Apporte des gains de complexité
[Oreshkov, Costa, Brukner 12]
[Araujo, Costa, Brukner 14]

Application: calcul quantique à l'aveugle.

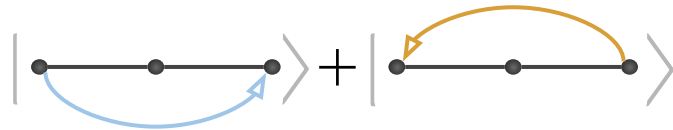


[A., Salvail, 06][Broadbent, Fitzsimons, Kashefi 09]

Recherches » Modèles : quantum causal graph dynamics.



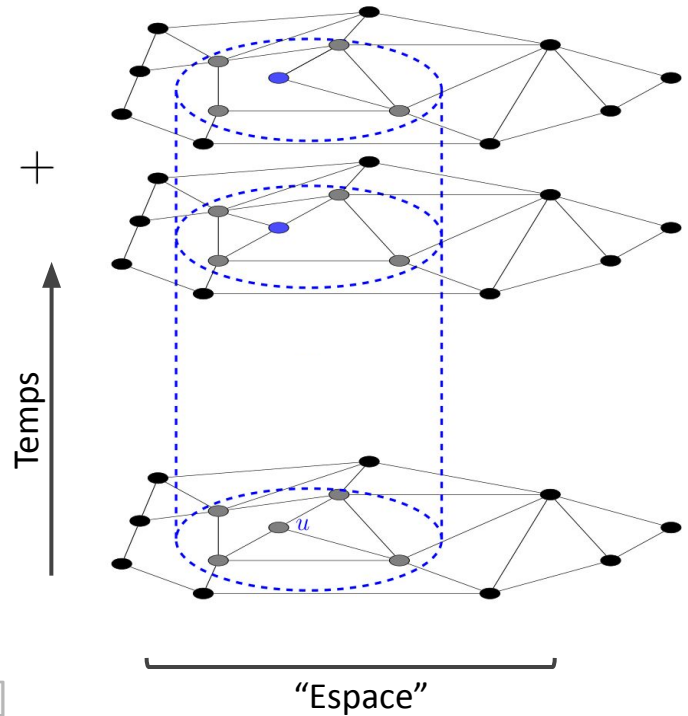
... a pour graphe d'interaction causale:



Un réseau **quantique** d'ordinateurs quantiques!

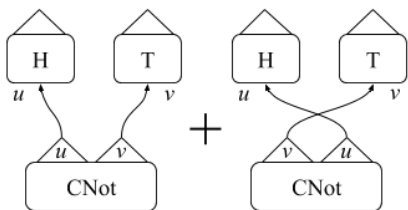
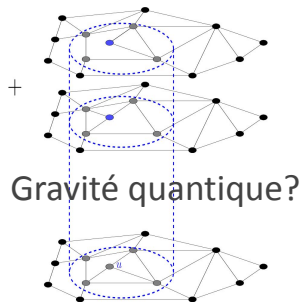
- » Formalisation.
- » Évolutions.

[A., Martiel, 17]

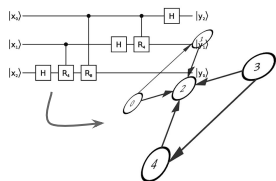


Recherches » Dans les cartons

Ressources physiques

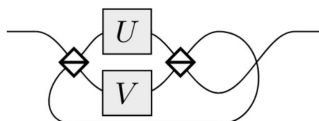


Portes quantiques adressables

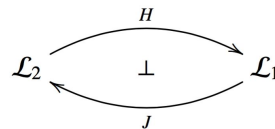


Circuit layout

Modèles de circuits



PBS unifié avec ZX

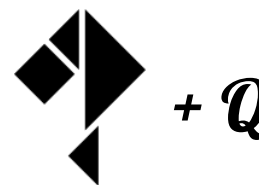


Categorical model Of computation

Langages

$$\bar{u}\langle m \rangle.P + \bar{v}\langle m \rangle.P$$

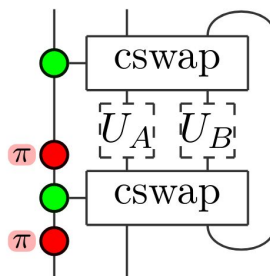
Algèbre de processus quantique?



Vérification déductive de programmes quantiques Avec Why3

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m_n} \nabla^2 + W_p$$

Synthèse d'Hamiltoniens



Switch quantique en ZX



* Composition

* Recherche

*** Contexte**

Contexte »

Masse critique:

- » 4 thèses
- » 3 postdocs
- » 1 délégation

Atos



THALES



Collaborateurs directs:

Marc Baboulin (Prof. LRI/Parsys)

Gilles Dowek (DR INRIA LMF/Deducteam)

Alexei Grimbaum (Chercheur CEA/LARSIM)

Positionnant Inria Saclay et le LMF dans l'ère de l'information quantique,

Ex. membres Comex recherche (BV)
enseignement (PA) de


quantum | université
PARIS-SACLAY



Contexte » Logiciel

Quipper :

Family=research; Audience=community; evolution=Its; Duration>=8; contribution=devel

- Langage de description de circuits
- Inscrit en Haskell
- Collaboration internationale 
- Maintient à l'état de l'art

PyZX:

Family=research; Audience=community; evolution=Its; Duration>=1; contribution=devel;

- Python pour ZX-Calculus
- Réécriture
- But d'optimisation de circuits

Qbrick :

- Inscrit en Why3
- Vérification déductive pour le quantique
- Collaboration avec le CEA-LIST