

L'intrication en imagerie quantique pour résister au bruit

Nicolas GILLARD, Étienne BELIN, François CHAPEAU-BLONDEAU

Laboratoire Angevin de Recherche en Ingénierie des Systèmes (LARIS),
Université d'Angers, 62 avenue Notre Dame du Lac, 49000 Angers, France.

nicolas.gillard@univ-angers.fr etienne.belin@univ-angers.fr chapeau@univ-angers.fr

Nous présentons un traitement d'image dans un cadre quantique, où une image numérique codée quantiquement peut bénéficier d'une propriété spécifiquement quantique constituée par l'intrication [1], et ainsi disposer de capacités originales de résistance au bruit inaccessibles en classique. On considère l'image quantique d'une scène, où chaque pixel est codé au moyen d'un système quantique constitué par un qubit représentant par exemple un photon avec ses deux états de polarisation. Pour la formation de l'image, on considère en chaque pixel un qubit (photon) sonde qui est d'abord préparé dans l'état quantique de référence $|+\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$. Un tel photon sonde, s'il interagit avec l'objet à imager dans la scène, subit un retard de phase de π qui transforme son état en $|-\rangle = (|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$. En dehors de l'objet, sur le fond, le photon sonde n'est pas modifié et reste dans l'état initial $|+\rangle$. Un faisceau structuré spatialement de tels photons sonde, quand il interagit avec la scène, réalise donc une image quantique binaire codée en phase où sur l'objet le pixel est dans l'état $|-\rangle$ et sur le fond dans l'état $|+\rangle$. Cette image est ensuite affectée par un bruit quantique, de type bruit dépolarisant, qui est un bruit quantique commun [2]; ce bruit altère de façon aléatoire l'état quantique en chaque pixel. Sur l'image bruitée, on réalise alors une mesure en chaque pixel dans la base orthonormale de codage $\{|+\rangle, |-\rangle\}$ afin de détecter l'information binaire objet/fond en chaque pixel. À cause de l'action du bruit, on enregistre une certaine probabilité d'erreur de détection P_{er} qui augmente naturellement avec le niveau du bruit.

Dans ce cadre quantique, pour mieux résister au bruit, il est possible de tirer un parti tout à fait inattendu de l'intrication, selon le protocole suivant. Chaque photon sonde, avant d'être envoyé pour interagir avec la scène à imager, est intriqué avec un deuxième photon auxiliaire, en préparant la paire de photons dans l'état intriqué de référence $|\beta_{00}\rangle = (|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$. Une fois intriqué avec le photon sonde, le photon auxiliaire reste, disons, bien à l'abri au laboratoire, alors que le photon sonde, comme précédemment, est envoyé à l'extérieur pour interagir avec la scène à imager, capter l'information binaire objet/fond en chaque pixel, et aussi se voir affecté par le bruit. Une fois récupéré en chaque pixel le photon sonde bruité, on réalise au laboratoire une mesure sur la paire intriquée, afin comme précédemment de détecter l'information binaire objet/fond en chaque pixel. Il apparaît alors que la mesure quantique sur la paire intriquée conduit à une erreur de détection P_{er} significativement réduite, comme illustré sur la Fig. 1, où l'on aboutit sur l'image décodée (C) dans sa moitié droite à une moindre proportion de pixels erronés.

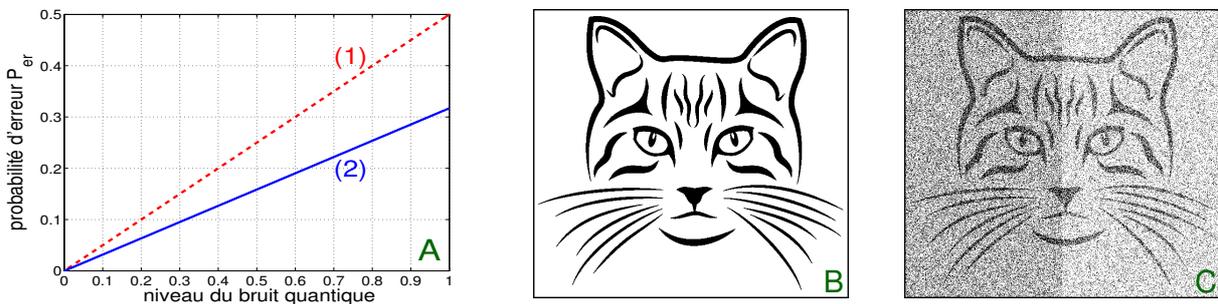


Fig. 1 : (A) Probabilité d'erreur avec un (1) ou deux (2) photons, pour l'image initiale (B) bruitée puis décodée (C) avec pour la moitié gauche de l'image le codage à un photon et pour la droite à deux photons.

Il s'agit d'un effet tout à fait paradoxal, spécifiquement quantique et inexistant en classique. Ainsi, en intriquant le photon sonde avec un photon auxiliaire qui n'interagit jamais avec la scène à imager, on améliore néanmoins la capacité, en présence de bruit, à extraire de l'information utile de la scène imagée.

[1] F. Chapeau-Blondeau, E. Belin, "Quantum image coding with a reference-frame-independent scheme," *Quantum Information Processing*, vol. 15, pp. 2685–2700, 2016.

[2] F. Chapeau-Blondeau, "Optimization of quantum states for signaling across an arbitrary qubit noise channel with minimum-error detection," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 61, pp. 4500–4510, 2015. ■