

fnrs news

99

Décembre 2014

LE MAGAZINE DU FONDS DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE - FNRS - TRIMESTRIEL N°99 • Décembre 2014

Epidémiologie
la loi des grands nombres
appliquée aux individus

DOSSIER
Epidémiologie,
la loi des grands
nombres appliquée
aux individus

10



12 Un pan de notre histoire
14 La santé pour tous d'abord...
16 Catastrophes et urgences
sanitaires, au-delà des
chiffres...
18 Rester critique et bienveillant
20 Les maladies ne tombent
pas du ciel...
23 Ebola : le nouveau parangon
épidémiologique ?



PORTRAIT
Pauline ERPICUM
Un rein de perdu...

24

**PHILOSOPHIE
ET HISTOIRE**
Société et religions :
le paradoxe

26

SOCIOLOGIE
La délinquance des élites,
vaste, touffue
et peu
stigmatisée

28



LINGUISTIQUE
Le premier laboratoire
de langue des signes
en Belgique francophone

30

**BIOLOGIE
MOLÉCULAIRE**
Comment réactiver les
réservoirs du VIH ?

32

**BIOLOGIE
MARINE**
Les oursins antarctiques
font face à l'acidification
des océans

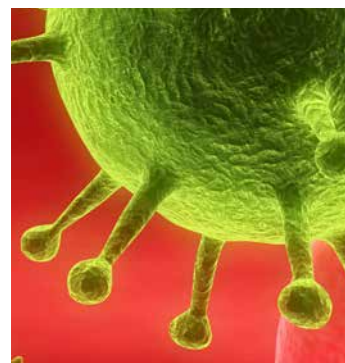
34

**ARCHÉO-
SISMOLOGIE**
Quand l'archéologie
traque les tremblements
de terre

36

PHYSIQUE
Au coeur de
l'électronique
moléculaire !

38



PHYSIQUE
La limite quantique
des télécommunications

40



**BIOLOGIE
MOLÉCULAIRE**
Le cycle bactérien
à l'intérieur des cellules

42

TÉLÉVIE
45 Télévie 2015
46 Liste des 107 projets de
recherches financés grâce
au Télévie 2014

La limite quantique des télécommunications

Shannon l'avait démontré dans le cadre de la physique classique, des chercheurs de l'ULB, notamment, viennent d'y parvenir dans un cadre quantique : établir la formule de la capacité maximale d'un canal de télécommunications. Des résultats publiés dans *Nature Photonics*¹.

« La question de savoir quel est le débit maximum possible dans un canal de communication est un problème vieux comme le monde », s'enthousiasme le professeur Nicolas Cerf (Centre for Quantum Information and Communication, Ecole polytechnique de Bruxelles, ULB). Vieille question en effet, mais il faut tout de même attendre l'après-guerre pour qu'une réponse y soit apportée. Ingénieur américain, chercheur aux laboratoires de la compagnie Bell Telephone, Claude Shannon est en effet le premier à avoir démontré qu'un canal de communication admet un taux maximum théorique de transmission qu'on appelle

sa capacité. D'où sa formule emblématique, établie en 1948, toujours très utilisée aujourd'hui : $C = W \log_2 (1 + S/N)$ où W est la largeur de bande du canal et S/N le rapport de la puissance du signal sur la puissance du bruit. Une capacité qui s'exprime en bits/sec.

Fibres optiques

La formule de Shannon est universelle, s'appliquant à toutes les communications électriques ou électromagnétiques telles, par exemple, des ondes radio ou des impulsions électriques circulant dans des fils. Elle n'est cependant valable que dans

le cadre de la physique classique car elle ignore complètement les porteurs microscopiques de l'information (par exemple, les électrons individuels qui forment le courant électrique). Or depuis l'invention du laser et des fibres optiques, nous communiquons de plus en plus souvent via des impulsions lumineuses : tout le squelette d'internet repose aujourd'hui sur des communications par fibres. « La question de la capacité de transmission s'est donc aussi posée naturellement pour les communications optiques, enchaîne Raul García-Patrón, coauteur de l'article et chercheur – ancien Chargé de recherches du F.R.S.-FNRS – au Centre for Quantum Information and Communication de l'ULB. On a vite compris que puisqu'il s'agit de lumière, laquelle est constituée de photons, la limite du taux de transmission serait dictée en définitive par la physique quantique. » Cette fois, plus question d'ignorer les particules individuelles porteuses de l'information, comme Shannon l'avait fait avec les électrons constitutifs des signaux qu'il étudiait. Un des tout premiers à avoir eu cette intuition est le physicien américain James Gordon qui publie un article sur le sujet dès 1962, mais les recherches sur la capacité des canaux bosoniques gaussiens – telle est leur dénomination exacte – ont pris de l'ampleur surtout dans les années 1990, quand les sciences de l'information quantique se sont développées. Le terme « bosonique » se réfère simplement au fait que les porteurs individuels d'information



DES RETOMBÉES PRATIQUES ?

La théorie quantique de l'information est née au fil des dernières décennies, à partir des années 1990, notamment sur la base de travaux dans le domaine de la cryptographie. Pour Nicolas Cerf, le codage quantique introduit en 1995 par Ben Schumacher marque le véritable début de la théorie quantique de l'information, avec la définition du bit quantique ou q-bit pour désigner l'unité quantique d'information, un système à deux états. Mais l'un des éléments essentiels de cette théorie est aussi lié au phénomène d'intrication quantique, qui apparaît par exemple lorsqu'un atome émet simultanément deux photons. On dit que ceux-ci sont intriqués et ils le restent, quelle que soit la distance qui les sépare. Ils forment un seul objet quantique et toutes les mesures faites sur ces photons sont corrélées. Si ces photons portent de l'information, on dira que les q-bits correspondants sont intriqués, et c'est le processus qui est à l'œuvre notamment pour assurer l'invulnérabilité des messages cryptés par la technique de cryptographie quantique. Par essence, cette technique nécessite que les partenaires échangent leurs clés cryptographiques à l'aide d'un canal quantique. Analyser ces canaux et déterminer leur capacité grâce à la nouvelle formule déterminée par Nicolas Cerf et ses collègues est donc un outil de base pour faire de la cryptographie quantique, ce dont les expérimentateurs devraient s'emparer.



L'APPORT DE SHANNON

Ingénieur américain rompu au décodage des codes nazis pendant la guerre, Claude Shannon a été le premier à proposer une théorie mathématique de l'information, même s'il était plus correct de parler d'une théorie des télécommunications (à aucun moment, Shannon ne s'intéresse au sens de ce qui est véhiculé dans les canaux). Cette théorie très complète (l'ensemble des deux articles publiés en 1948 compte plus de 80 pages !) se base sur un modèle probabiliste : fournir une information, c'est réduire l'incertitude, faire diminuer les occurrences parmi toutes celles possibles. A partir de là, il va donner une valeur mathématique à l'information en terme de bits, unité élémentaire qui vaut 1 ou 0. Mais il introduit aussi, comme on l'a vu, la notion de capacité d'un canal de communication et, en corollaire, de codes correcteurs d'erreurs. Ses travaux ont eu des implications énormes pour nos technologies de communications et sont encore utilisés quotidiennement aujourd'hui (les codes correcteurs d'erreurs sont cruciaux pour écouter nos CD sans les griffes caractéristiques des disques vinyle ou pour converser par GSM sans trop de signaux parasites). Compléter en quelque sorte la formule emblématique de Shannon pour la rendre « quantiquement compatible » n'est donc pas anecdotique !



Dr Raul García-Patrón et Pr Nicolas Cerf, ULB

sont ici des bosons, en l'occurrence des photons (ce qui veut dire que la formule établie par les chercheurs de l'ULB est valable pour tous les bosons même si nous n'utilisons pas les gluons ou le Z^0 pour communiquer !). Quant au qualificatif « gaussien », il rappelle que la résultante de tous les bruits qui peuvent affecter un canal tend, en vertu d'un théorème statistique, vers une courbe de Gauss.

Pour tenter de résoudre le problème, les physiciens sont partis de la théorie classique en imaginant une fibre idéale, dans laquelle aucun bruit ne perturbe le signal et aucune atténuation ne l'affecte. Résultat ? Selon la formule de Shannon, la capacité d'un tel canal serait infinie même si la source est de puissance finie. Un résultat sans doute correct du point de vue mathématique, mais impossible du point de vue physique... Il y a donc bien « quelque chose », un bruit non classique, qui interdit d'avoir cette capacité infinie. Le « coupable » a été assez vite cerné : le « bruit de grenaille », dû aux grains de lumière, les photons. Fondamentalement, le caractère corpusculaire de la lumière prend son importance lorsque les impulsions lumineuses envoyées sont ultra-courtes et de très faible puissance, et ne contiennent plus que quelques photons. On observe alors ce bruit intrinsèquement quantique qui est responsable, comme l'ont montré les chercheurs de l'ULB, d'une limitation ultime de la capacité.

Conjecture enfin prouvée

Au début des années 2000, le problème mathématique était bien posé. « Alexander Holevo, un chercheur russe coauteur de notre article, a alors développé les outils mathématiques adéquats », précise Nicolas Cerf, « et il a publié un article qui résolvait en partie la question. En partie seulement car sa démonstration reposait sur une conjecture mathématique non résolue ! Bien des physiciens ont alors évidemment tenté de résoudre cette conjecture ». Où était le problème ? En physique classique, il avait été possible de se limiter à un cadre entièrement gaussien : les signaux à l'entrée sont gaussiens, le bruit aussi et donc le signal de sortie l'est également, ce qui simplifie radicalement le problème. Dans le cas

des communications quantiques, on a donc « conjecturé » qu'on pouvait agir également de la sorte, mais sans en avoir la preuve. Pendant longtemps, les chercheurs n'ont pas eu d'arguments permettant d'étayer cette conjecture, dont la preuve était considérée comme l'un des problèmes ouverts les plus difficiles dans le domaine. Finalement, cette conjecture a pu être démontrée par nos chercheurs en ramenant le problème à son niveau le plus fondamental : quel est l'état quantique qu'on doit injecter dans un canal pour obtenir l'entropie – le désordre – minimale à sa sortie ? Les chercheurs ont prouvé qu'il s'agissait d'un état cohérent, l'état du vide quantique. Or le vide est un état gaussien. On revient donc au cadre gaussien comme dans la théorie de Shannon. « C'est très intuitif comme solu-

tion, explique Raul García-Patrón, puisque cela revient à dire que le mieux à faire pour réduire le bruit à la sortie de la fibre optique, c'est ne rien envoyer ! » Encore fallait-il le démontrer ! C'est aujourd'hui chose faite et l'équivalent quantique de la formule de Shannon peut s'écrire dans le cas le plus simple en remplaçant $\log_2(1+S/N)$ par $f(S+N) - f(N)$, où $f(x) = (x+1) \log_2(x+1) - x \log_2(x)$. Ici, l'énergie du signal S et celle du bruit N s'expriment en nombre de photons contribuant respectivement au signal et au bruit. On vérifie d'ailleurs que cette formule quantique se ramène bien à la formule de Shannon lorsque le nombre de photons est très grand, en remarquant que la fonction $f(x)$ tend asymptotiquement vers $\log_2(x)$ lorsque x tend vers l'infini.

Henri DUPUIS

1. V. Giovannetti, R. García-Patrón, N. J. Cerf, A. S. Holevo. 'Ultimate classical communication rates of quantum optical channels'. *Nature Photonics* 8, 796 (2014). DOI : 10.1038/nphoton.2014.216

« C'est très intuitif comme solution, explique Raul García-Patrón, puisque cela revient à dire que le mieux à faire pour réduire le bruit à la sortie de la fibre optique, c'est ne rien envoyer ! »



Nicolas Cerf
Centre for Quantum
Informatics and Communications, ULB
Nicolas.Cerf@ulb.ac.be