

Du « sens » dans les réseaux

Par Laurent CLAVIER
IMT-NE

Et Marios KOUNTOURIS
EURECOM

Les réseaux de communications sont conçus et opérés sur la base de l'information telle que définie par Shannon, dépouillée de son sens et de son contexte. Si cette base a permis de faire évoluer les réseaux de façon incroyable, elle montre aujourd'hui certaines limites pour faire face à la fois aux applications toujours plus exigeantes et aux limites planétaires (à la durabilité). La théorie initiée par Shannon a permis le développement de solutions toujours plus performantes, mais sans regard sur la raison pour laquelle une information est transmise. La performance se mesure alors en débit, en efficacité – spectrale ou énergétique – mais pas en efficacité pour l'usage envisagé. Remettre le sens de l'information, la raison de sa transmission, au cœur de la conception et de l'orchestration des réseaux permettra d'atteindre les mêmes objectifs, ou même de remplir plus de fonctionnalités, tout en limitant, voire en réduisant, la quantité de données transmises et donc l'impact environnemental du réseau. *Less is more.*

HISTORIQUE ET MOTIVATION

Omniprésente, l'information se présente sous diverses formes, constituant un concept polymorphe et polysémantique. Claude Shannon, dans son ouvrage fondateur [1], a dépouillé l'information de son sens, de son contexte et de son interprétation. Ce faisant, il a rendu l'information mesurable. Il a délibérément considéré les aspects sémantiques comme sans rapport avec le problème de communication. Cette dichotomie entre information et signification est l'élément fondateur des systèmes de communication classiques ciblant une transmission de données à haut débit et sans erreur. Elle ne parvient plus cependant à répondre aux nouveaux besoins et aux contraintes de durabilité des réseaux émergents, 6G et au-delà.

Prenons l'exemple d'un très grand nombre de robots mobiles autonomes qui communiquent entre eux et cherchent un consensus visant à éviter les collisions. Atteindre cet objectif n'est pas une simple question de compromis débit-fiabilité-délai. La génération et l'échange de quantités excessives de données distribuées, en temps réel, parfois obsolètes, redondantes ou inutiles pour l'utilisateur final, vont saturer le réseau. Cette saturation risque d'empêcher le réseau de fournir le service attendu et soulèvera d'importants problèmes de sécurité pour les robots autonomes. Elle risque aussi de générer une augmentation exponentielle de la consommation d'énergie pour faire face aux volumes de données et aux contraintes de fiabilité anticipés. Pour une opération robuste et performante, il devient crucial de prendre en compte dans le processus de communication l'urgence et la valeur des messages fournis et de prioriser les transmissions pour satisfaire au mieux les exigences des applications.

Dans ce contexte, la Communication Sémantique Orientée vers un Objectif (CSOO), a récemment attiré une attention considérable. Elle introduit un nouveau paradigme de gestion de l'information qui permet une utilisation parcimonieuse des ressources de

communication et de calcul. Cette vision remonte à l'introduction du modèle de communication de C. Shannon écrite par W. Weaver [2]. Le problème de la communication est présenté sur trois niveaux :

- niveau A : avec quelle précision les symboles de communication peuvent-ils être transmis ? (le problème technique) ;
- niveau B : dans quelle mesure les symboles transmettent-ils précisément la signification souhaitée ? (le problème sémantique) ;
- niveau C : dans quelle mesure la signification reçue permet-elle la conduite souhaitée ? (le problème de l'efficacité).

Diverses tentatives ont visé la mise en œuvre du niveau B (communication sémantique). Les efforts les plus importants incluent les approches de logique probabiliste [3] [4], la théorie de la complexité [5], la théorie des jeux et le codage sémantique [6] [7]. Le niveau C a été abordé en utilisant les concepts d'information pragmatique [8] et de valeur de l'information [9] [10]. Néanmoins, le niveau A, le modèle de communication de Shannon, est, dans la pratique, resté incontesté. Aucune des extensions proposées n'a jamais été reconnue comme une théorie générale de l'information sémantique. Toutes les tentatives sont restées à un niveau conceptuel et n'ont pas abouti à une théorie élégante avec des applications immédiates, notamment dans les réseaux de communication.

Un nouvel élan pousse aujourd'hui la quête d'une théorie de la CSOO [11] [12]. Cet élan est motivé par les attentes, toujours plus grandes, placées dans les réseaux (débit, densité, fiabilité, latence) qui se confrontent aux exigences de durabilité. Qui plus est, cet élan peut aujourd'hui s'appuyer sur les développements envisagés pour les réseaux du futur. En particulier, les travaux autour de *communication and sensing* [13] [14] qui permettront une connaissance poussée de l'environnement en vue d'une meilleure prise en compte du contexte ; et la distribution de l'intelligence [15] [16] à tous les niveaux des réseaux, jusqu'aux objets faisant l'acquisition des données.

LA SÉMANTIQUE DE L'INFORMATION

Un élément indispensable pour libérer le potentiel de la CSOO est une définition concise, opérationnelle et universelle (si possible) de la sémantique de l'information (SoI). La SoI doit aller au-delà des mesures de substitution proposées jusqu'à maintenant telles que l'âge de l'information (AoI) [17] [18], l'âge de l'information incorrecte (AoII) [19], la qualité de l'information (QoI) [20] ou la valeur de l'information (VoI) [9] [10]. Ces mesures se limitent à certains attributs de la sémantique, adaptés dans certains contextes, mais loin d'être suffisants. La définition d'une SoI permettra d'adapter le processus de communication et les fonctionnalités clés associées (par exemple détection, apprentissage, traitement) aux besoins de l'utilisateur (ou application) final.

Contrairement à son usage courant en linguistique, en logique ou en informatique (*web* sémantique, bases de données, ontologies, etc.), la sémantique est ici employée avec son sens étymologique, celui de signification. La sémantique est une mesure de la signification, de l'importance et de l'utilité des messages par rapport à l'objectif de l'échange de données.

En premier lieu, la SoI est liée à l'importance relative de différents événements de même probabilité. Imaginons deux événements rares, se produisant chacun avec une probabilité très faible ($p \ll 1$), mais l'un comporte un risque majeur tandis que l'autre n'est qu'une particularité. Formellement, ils fournissent la même quantité d'informations ($\log p$), mais l'information véhiculée par le premier est évidemment d'une importance plus élevée. Cette disparité peut être intégrée à l'entropie source, ce qui entraîne une entropie dépendante du contexte et des mesures dérivées.

En deuxième lieu, la SoI peut être définie comme une fonction multivariée non linéaire d'attributs qualitatifs innés (objectifs) et contextuels (subjectifs). Les premiers sont inhérents à la génération d'information, quelle que soit son utilisation, comme la fraîcheur (AoI) et la précision. Les seconds dépendent de l'utilisation et du contexte, les plus pertinents étant la ponctualité, l'exactitude et l'exhaustivité. Il est important de souligner la dualité selon laquelle l'information a une valeur en soi, en plus de sa valeur « utilitaire » dépendante du contexte. Par exemple, la précision d'une mesure de capteur a une valeur intrinsèque liée à la qualité de sa représentation d'un phénomène, alors que cette même mesure a une valeur « utilitaire » différente selon son contexte d'utilisation, les mesures précédentes et les exigences de l'application (par exemple, s'il surveille la température dans une maison ou dans une centrale nucléaire).

CHANGER DE PARADIGME

Jusqu'à présent, la conception et l'évolution des systèmes de communication ont été principalement motivées par une approche maximaliste, qui fixe des objectifs audacieux mais souvent difficiles à atteindre. Dimensionnées pour les contextes les plus exigeants, les solutions vont bien au-delà des besoins la plupart du temps et dans beaucoup d'endroits, générant une inutile surconsommation. À l'opposé, la CSOO pourrait être considérée comme une approche de conception minimaliste (*less is more*), prônant un changement de paradigme de performances extrêmes vers des performances durables, où l'efficacité est garantie tout en améliorant considérablement l'utilisation des ressources (bande passante, énergie, calcul...).

La SoI ne fait pas de la communication une fin en soi mais un moyen d'atteindre des objectifs précis. La communication sémantique constitue alors un véritable changement de paradigme qui permet d'apporter où et quand cela est nécessaire les informations permettant la réalisation de l'objectif.

Grâce à l'intelligence distribuée dans le réseau, la communication sémantique permet de n'acquérir, traiter et transmettre que le contenu significatif et pertinent par rapport à l'objectif. Le nombre de symboles inutiles, traités et envoyés, est drastiquement réduit. Autrement dit, suivant le mantra selon lequel « tous les bits ne sont pas égaux », la communication sémantique pourrait renforcer « l'efficacité de l'information » des futurs systèmes de communication, au sens de maximiser le nombre de bits d'informations utiles extraits et fournis par ressource consommée. La SoI permet aussi d'exploiter la synergie entre le traitement des données, la transmission de l'information et la reconstruction du signal source. Cette approche disruptive permet de concevoir de nouvelles technologies de communication qui adaptent l'ensemble du cycle de vie de la donnée – depuis sa génération jusqu'à son utilisation, voire son obsolescence – à l'importance et à l'utilité de l'information.

Mettre en œuvre cette approche nécessite de remettre en question, voire radicalement changer, plusieurs principes de conception dominants. Il faut en particulier développer de nouvelles représentations des données, axées sur les objectifs, et introduire des mécanismes de priorisation des informations, qui permettront d'effectuer : un filtrage sémantique pour supprimer la redondance en générant et en envoyant uniquement des informations utiles et pertinentes ; un traitement sémantique, tel que l'extraction et l'étiquetage de caractéristiques, qui permet la reconstruction partielle ou approximative d'un processus ; et un contrôle sémantique pour orchestrer avec agilité la génération et la fusion d'informations multi-sources et de qualités multiples pour une utilisation efficace des ressources.

Les approches actuelles sont entièrement quantitatives et n'utilisent pas de contexte. Au contraire, Kountouris et Pappas [12] adoptent une approche qualitative pour différencier les informations et diffuser leur valeur dans les différentes couches protocolaires

des réseaux. Ce changement radical capitalise sur la capacité des dispositifs intelligents distribués à contrôler l'acquisition des données *via* un échantillonnage actif, dans lequel les échantillons sont prélevés en fonction de la variabilité de la source et du taux d'innovation du processus sous-jacent (la dynamique du phénomène à observer). De cette façon, seuls les échantillons « les plus informatifs » sont sélectionnés pour la transmission afin de répondre aux exigences sémantiques de l'application.

Cette approche structurellement nouvelle et synergique a le potentiel de découvrir des liens profonds et surprenants entre la théorie de l'échantillonnage, le traitement du signal parcimonieux, le calcul distribué, l'apprentissage et la théorie de la communication.

QUELQUES PISTES DE RECHERCHES

Baser la conception des réseaux sur une SoI pose en revanche de nombreuses questions de recherche. Nous en discutons certaines ci-dessous.

Métriques sémantiques

Un défi majeur consiste à établir des métriques et des mesures d'information sémantique concrètes, intégrant les attributs qualitatifs de l'information dans l'édifice théorique de la communication. Ces nouvelles mesures doivent capturer la dynamique des sources et du réseau, les interconnexions, non triviales, entre les attributs de l'information et les paramètres du réseau.

Accès multiple sémantique

Pour utiliser de manière optimale le medium partagé, les dispositifs doivent adapter leurs modèles d'accès non seulement au trafic exogène généré par les autres nœuds, mais également à la variabilité de la source ou du processus observé et donc à la sémantique de l'information, incluant les objectifs des applications.

Gestion des ressources axée sur les objectifs

Les informations multimodales multi-sources, souvent corrélées, acquises à différents niveaux de qualité sémantique, permettent d'atteindre les objectifs applicatifs de diverses manières. C'est une question à choix multiples de planification en temps réel, pour laquelle des algorithmes en ligne peuvent sélectionner quelle information, depuis où et quand, collecter et transmettre sous contraintes de ressources, de communication et de traitement.

Intégration de la communication et du contrôle

D'un point de vue de la théorie de l'information, il n'est pas clair de savoir comment les aspects de la communication orientée vers un objectif sont liés aux systèmes de contrôle en réseau avec des boucles de rétroaction sur les canaux de communication. Ces aspects peuvent être pertinents pour établir un cadre unifié intégrant les dimensions de génération, de communication et de contrôle des données.

Impact sur les protocoles et la couche OSI

Une mise en œuvre performante et efficace des systèmes de communication sémantique nécessite la génération de signalisations et de métadonnées spécifiques, reliant implicitement la couche physique à la couche applicative. Une conception et une utilisation efficaces des métadonnées sont clés pour obtenir des gains de performances élevés. De plus, certains processus réseau peuvent être transparents dans certaines couches ou

nécessiter de contourner certaines couches OSI pour un fonctionnement en temps réel ou pour éviter une congestion.

Sécurité et vie privée

La signification de la donnée est au cœur de l'ordonnement des communications sémantiques. Une première conséquence est l'augmentation potentielle de l'impact des attaques qui peuvent directement modifier la décision attendue. Une seconde conséquence est que la donnée transportée peut contenir une information plus importante et que la valeur sémantique des flux est partagée sur le réseau, ce qui peut rendre ces flux plus vulnérables à des vols d'information.

Autres possibilités

Au-delà du profond changement structurel nécessaire pour mettre la SoI au cœur de la vie de la donnée, l'évaluation même de cette sémantique repose sur les capacités des réseaux à s'adapter au contexte, nécessitant également de poursuivre certaines pistes de recherche actuelles. L'intelligence distribuée du cœur aux extrémités du réseau : chaque élément doit avoir des capacités de calcul et de prise de décision, en particulier les objets de périphérie qui doivent aussi être très peu consommateurs pour garantir une longue durée de vie sans maintenance (comme changer une batterie). La perception du contexte : au-delà des techniques de communication et de perception intégrées, chaque élément du réseau doit être en mesure d'évaluer son contexte de communication, aussi bien l'environnement physique que l'état des connaissances acquises par ses différents interlocuteurs. L'association de ces deux aspects pousse vers le *Joint Computation, Communication and Sensing*, un élément certainement clé des futurs réseaux et de la connexion des intelligences.

POUR CONCLURE

Mettre le sens au cœur de l'organisation des réseaux représente un profond changement et donc une indéniable difficulté. L'introduction de la SoI pourrait se faire dans le cadre de l'internet des objets. Les réseaux, généralement déployés pour un contexte précis, peuvent plus simplement introduire un contrôle basé sur la sémantique [21]. Pour une vision plus globale, la définition de l'Open-RAN (Radio Access Network) introduit une interface d'orchestration du réseau (RIC – RAN intelligent Controllers) [22] où peut se mettre en œuvre la SoI. La résolution des défis mentionnés, et de quelques autres, fournira la technologie fondamentale pour une pléthore de services socialement utiles et durables, comme le transport autonome, la robotique grand public, la surveillance environnementale ou la télésanté.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] SHANNON C. E. (1948), "A mathematical theory of communication", *Bell Labs Technical Journal*, vol. 27, n°3, pp. 379-423.
- [2] SHANNON C. E. & WEAVER W. (1949), *The mathematical theory of communication*, University of Illinois Press, Urbana.
- [3] BAR-HILLEL Y. & CARNAP R. (1953), "Semantic information", *British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 4, n°14, pp. 147-157.
- [4] FLORIDI L. (2005), "Semantic Conceptions of Information", in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Winter.

- [5] BAO J. *et al.* (2011), “Towards a theory of semantic communication”, in *IEEE Network, Science Workshop*.
- [6] GULER B., YENER A. & SWAMI A. (2018), “The semantic communication game”, *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 4, n°4, pp. 787-802.
- [7] WILLEMS F. M. & KALKER T. (2008), “Semantic coding: Partial transmission”, in *Proc. IEEE Intern. Symp. on Inf. Theory (ISIT)*, pp. 1617-1621.
- [8] SHARMA B. D., MITTER J. & MOHAN M. (1978), “On measures of ‘useful’ information”, *Information and Control*, vol. 39, n°3, pp. 323-336.
- [9] STRATONOVICH R. L. (1965), “On the value of information”, *Izv. USSR Acad.Sci. Tech. Cybern.*, n°5.
- [10] HOWARD R. A. (1966), “Information value theory”, *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, vol. 2, n°1, pp. 22-26.
- [11] POPOVSKI P. *et al.* (2020), “Semantic-effectiveness filtering and control for post-5G wireless connectivity”, *Journal of the Indian Institute of Science*, vol. 100, n°2, pp. 435-443.
- [12] KOUNTOURIS M. & PAPPAS N. (2021), “Semantics-empowered communication for networked intelligent systems”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, n°6, pp. 96-102.
- [13] DONG F. *et al.* (2024), “Sensing as a Service in 6G perceptive mobile networks: Architecture, advances, and the road ahead”, *IEEE Network*, vol. 38, n°2, pp. 87-96, March.
- [14] ZHOU S. *et al.* (2024), “Task-oriented wireless communications for collaborative perception in intelligent unmanned systems”, in *IEEE Network*, doi: 10.1109/MNET.2024.3414144.
- [15] XU H., SENG K. P., ANG L. M. & SMITH J. (2024), “Decentralized and distributed learning for AIoT: A comprehensive review, emerging challenges and opportunities”, in *IEEE Access*, doi: 10.1109/access.2024.3422211.
- [16] GARAVAGNO A. M. *et al.* (2024), “An affordable hardware-aware neural architecture search for deploying convolutional neural networks on ultra-low-power computing platforms”, *IEEE Sensors Letters*, vol. 8, n°5, pp. 1-4, May.
- [17] KOSTA A. *et al.* (2017), “Age of information: A new concept, metric, and tool”, *Foundations and Trends in Networking*, vol. 12, n°3, pp. 162-259.
- [18] PAPPAS N. *et al.* (2023), “Age of information: Foundations and applications”, Cambridge University Press.
- [19] MAATOUK A. *et al.* (2022), “The age of incorrect information: An enabler of semantics-empowered communication”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, n°4, pp. 2621-2635.
- [20] BISDIKIAN C. *et al.* (2013), “On the quality and value of information in sensor networks”, *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 9, n°4, pp. 1-26, doi: 10.1145/2489253.2489265, July.
- [21] ZHANG C. *et al.* (2022), “Goal-oriented communications for the IoT and application to data compression”, *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 5, n°4, pp. 58-63, Dec.
- [22] MARINOVA S. & LEON-GARCIA A. (2024), “Intelligent O-RAN beyond 5G: Architecture, use cases, challenges, and opportunities”, *IEEE Access*, vol. 12, pp. 27088-27114.