

Codage réseau inter-machines : performances

Dans cette partie, nous tenons à montrer d'abord l'impact prospectif du codage réseau sur différents types de réseaux de capteurs. Il s'agit d'identifier comment les codes linéaires et opportunistes améliorent des critères de performances clés à ces réseaux tels que le débit, le délai et le temps de convergence. Nous proposons trois protocoles d'acheminement basés, l'un (WSC) sur le codage aléatoire linéaire et les autres (CoZi et CNC) sur un codage réseau opportuniste. Contrairement aux mécanismes de codage actuels, les deux derniers codes que nous présentons sont conçus pour exploiter des propriétés spécifiques aux réseaux de capteurs telles que la topologie, la nature du trafic et l'application du réseau. Nous verrons que bien que le codage réseau linéaire assure des performances supérieures à celle du codage opportuniste dans le cas de la dissémination de données, il n'en reste pas moins un mécanisme coûteux, qui ne peut être appliqué que pour une certaine catégorie de réseaux inter-machines avec des capacités supérieures à la normale. Dans le cas de réseaux plus contraints, nous proposons d'utiliser un codage opportuniste qui se base sur la topologie hiérarchique des réseaux de capteurs et qui permet d'améliorer significativement le débit et le délai en comparaison à un modèle d'acheminement classique.

1.1.2. Codage réseau fiable : robustesse

Alors que l'étude entreprise en première partie permet de définir différentes stratégies de codage selon le type de réseau inter-machines et ses applications, les performances constatées résultent d'une évaluation dans un environnement idéal dépourvu de pertes. Dans un second travail, nous proposons d'étudier l'impact des pertes de paquets sur l'efficacité des mécanismes de codage réseau. Nous démontrons que les critères de fiabilité usuellement utilisés pour les algorithmes basés sur le *store-and-forward* ne sont pas

¹ Dans la suite du document, par réseau *inter-machines* nous ferons implicitement référence au cas général des réseaux de capteurs libérés d'une de leur contraintes majeures.

suffisants pour évaluer des protocoles de codage réseau. En effet, la fiabilisation de flux codés ne répond pas uniquement aux métriques de robustesse telles que le délai et le taux d'acheminement des paquets. Nous complétons donc ces métriques en introduisant la notion de codage fiable : un code est dit fiable s'il permet de coder des paquets de manière suffisamment efficace pour que le maximum de ses destinataires puissent en extraire de l'information utile, quelque soient les conditions du réseau (erreurs, collisions, pannes, etc.).

A partir de cette définition, nous proposons un schéma de retransmissions opportunistes appelé ReCoZi qui permet l'acquittement non pas de paquets reçus, mais de paquets effectivement décodés et dont de l'information utile a pu être extraite. Nous évaluons cette méthode de fiabilisation de flux codés par simulation et montrons que grâce aux nouvelles métriques de codage fiable, il est facile d'évaluer et concevoir des mécanismes de codage robustes qui garantissent une amélioration des performances même lorsque le réseau subit des taux de pertes élevés.

1.1.3. Codage réseau contraint : adaptabilité

De récents travaux théoriques ont montré la possibilité d'atteindre le débit théorique maximal en utilisant des mécanismes de codage dans les réseaux dits en *incast*. Dans ces réseaux, les communications se font à partir de plusieurs sources vers une seule destination. Il s'agit ici du schéma de trafic le plus commun dans les réseaux de capteurs. Cependant, la conception d'un tel mécanisme de codage n'a jamais pu être constatée dans la littérature. On peut penser intuitivement qu'une adaptation directe des mécanismes de codage existants pourrait résoudre le problème, si ce n'est que la plupart des propositions existantes sont basés sur l'écoute passive de paquets. Ce qui implique qu'elles ne sont pas applicables aux réseaux contraints pour des raisons de conservation d'énergie et de mémoire. De plus il est courant de constater que les algorithmes de codage existants requièrent une surcharge réseau, certes, négligeable dans le cas de réseaux sans fil à haut débit, mais qui s'avère fortement contraignante dans les réseaux de capteurs avec une capacité intrinsèque très réduite.

Dans ce dernier travail, et après avoir signifié l'apport indéniable du codage réseau aux architectures inter-machines en général, nous nous intéressons à son applicabilité dans le cas de réseaux contraints avec très peu de ressources par nœud. Nous montrons que l'amélioration du débit et des délais de bout-en-bout ne peut se faire que via l'utilisation d'une version simplifiée et moins coûteuse du codage réseau opportuniste. Ainsi, nous développons l'idée de codage par index (InC), un code contraint entièrement distribué où les symboles sont codés à la volée et décodés par la destination en une seule réception. Nous apportons une étude théorique sur l'efficacité du code avec pour métriques, le délai, le débit et la surcharge induite par InC. Puis nous évaluons ses performances et son impact sur les ressources grâce une implémentation sur une pile protocolaire IEEE 802.15.4 avec des topologies réalistes et de vrais capteurs sans fil.

1.2. Organisation du document

Les chapitres de cette thèse sont organisés dans une logique didactique traitant l'un après l'autre de la performance, de la robustesse et de l'adaptabilité des mécanismes de codage réseau dans les réseaux inter-machines.

Nous commençons par une revue des réseaux inter-machines et des différents efforts de la communauté scientifique (y compris un état de l'art complet de ceux usant du codage réseau) pour y améliorer les performances et la fiabilité.

Dans le chapitre 3, nous décrivons deux solutions différentes basées sur des algorithmes spécifiques issus de la théorie du codage réseau afin d'améliorer les performances de différentes applications des réseaux de capteurs sans fil.

Le chapitre 4 est consacré à ce que l'on a défini comme le codage réseau fiable. Dans un premier temps, une étude de l'impact du taux de perte sur l'efficacité du codage réseau y est détaillée. Puis, nous définissons de nouvelles métriques d'évaluation de la fiabilité des réseaux codés, lesquelles sont utilisées pour améliorer la robustesse de mécanismes de codage opportuniste.

Au chapitre 5, nous présentons InC, un code qui allie des concepts de codage réseau et de gestion des ressources. Nous détaillons les principes de cette nouvelle technique de codage contraint, et étudions ses propriétés théoriques. Nous aborderons ensuite son application dans un réseau de capteurs réels, et montrons qu'il permet d'améliorer sensiblement les performances des réseaux *incast* tout en offrant une consommation de ressources très faible comparée aux mécanismes en *store-and-forward*.

Le dernier chapitre conclut ce travail et introduit des idées et perspectives nouvelles qui pourront succéder à cette thèse.

