

Auto-organisation des réseaux pervasifs pour l'Internet des Objets

Mots clés : Internet des Objets, réseaux pervasifs, auto-organisation, multi-échelle, Big Data

Résumé

L'Internet des Objets (Internet of Things – IoT) représente non seulement une grande source de données à explorer mais aussi des nouveaux cas d'utilisation où les dispositifs raisonnent et se coordonnent automatiquement afin d'offrir des services dans les plus divers domaines, comme par exemple la domotique, l'adaptation au contexte ou la gestion de la sécurité. En se positionnant dans la suite des travaux que j'ai mené jusqu'à présent, ce projet vise l'étude des aspects liés à **l'auto-organisation des réseaux IoT** et comment optimiser le réseau et le traitement de données selon une approche orientée **flux de données**. Ce projet a aussi un volet lié au développement de **stratégies multi-échelle** pour le traitement des données (allant du réseau local jusqu'au cloud) tout en garantissant la qualité de service et la disponibilité des services pour les dispositifs connectés.

Introduction

L'analyse des données et l'extraction de connaissances sont devenues des composantes stratégiques dans la gestion des entreprises modernes. Le traitement de grands volumes de données intégrés à partir de sources et formats multiples et l'extraction de connaissances utiles n'a été rendu possible qu'à partir du développement de nouvelles techniques et outils faisant partie de ce qu'on appelle aujourd'hui *Big Data*. Sans surprises, ce domaine de l'informatique fédère des chercheurs de différents horizons, allant des experts en systèmes d'information, réseaux informatiques, calcul distribué et calcul haute performance, sécurité, intelligence artificielle ou encore la visualisation des données.

Avec une augmentation exponentielle du nombre et de la nature des sources d'information, il est devenu essentiel de comprendre comment gérer cette information et comment organiser les ressources computationnelles afin de mieux l'exploiter. Dans un passé récent, les réseaux de capteurs ont marqué une première avancée dans le but de collecter et gérer les réseaux éphémères qui interconnectent ces capteurs. Ces systèmes restent néanmoins peu complexes, ayant dans la plupart des cas des flux de données unidirectionnels, avec une claire distinction entre les sources (les capteurs) et les collecteurs (ordinateurs, data centers). Notre vie est de plus en plus entourée de dispositifs connectés (et même portés) afin de suivre notre activité physique, notre santé, la sécurité de nos maisons ou le niveau d'eau des plantes dans notre balcon. Très souvent ces équipements disposent d'une connexion à Internet (Wi-Fi, Bluetooth, etc.) mais pour l'instant sont encore trop limités aux services et applications propriétaires de leurs fabricants, n'ayant pas la liberté d'interagir avec d'autres dispositifs.

La barrière de l'interopérabilité des dispositifs est censée tomber avec la mise en place de l'Internet des Objets (en anglais *Internet of Things*, IoT), ce qui pose sans doute des défis autant dans la gestion de ces équipements que dans la sécurité des utilisateurs et de leurs informations. L'IoT représente un volume encore plus exceptionnel de données à exploiter par rapport au *Big Data* actuel, obligeant non seulement des techniques encore plus efficaces de traitement et analyse, comme aussi des nouvelles stratégies pour la distribution, le stockage, la protection de la vie privée et l'intégration aux systèmes d'information des entreprises. Dans cette logique, la coordination, la gestion des données et l'efficacité des services issus des dispositifs IoT doit évoluer dans plusieurs domaines : des systèmes d'information pervasifs, des réseaux pervasifs et même le calcul pervasif et multi-échelle. Plusieurs termes à la mode comme "*edge computing*"

[10] ou "*fog computing*" [4] essayent de regrouper ces domaines dont la caractéristique essentielle est celle de s'adapter aux environnements hétérogènes, volatiles et pervasifs qui caractérisent l'IoT.

Dans ce projet personnel de recherche, mon premier objectif est d'étudier l'**auto-organisation** et la **gestion des réseaux pervasifs** de l'Internet des Objets **d'un point de vue orienté flux de données**. En effet, les architectures réseau traditionnelles, ancrées sur des équipements peu mobiles et des fonctions applicatives facilement caractérisées (serveurs, clients), n'ont pas été conçues pour l'hétérogénéité et la dynamique de l'IoT. Afin de s'adapter aux besoins des applications et dispositifs IoT nous devons concevoir des réseaux **orientés par les flux de données** (*dataflow-centered networks*). Si l'Internet des Objets est caractérisé par des équipements hétérogènes (tant en puissance de calcul, mémoire, stockage, autonomie ou vitesse de communication), c'est aussi la nature spontanée des interactions entre les dispositifs qui rend l'IoT si innovatrice. Dans cette nouvelle approche de la communication entre les dispositifs, la localisation et les caractéristiques physiques ne servent plus à déterminer l'appartenance à un réseau ou à une entité gestionnaire de ce réseau. Dans un monde composé d'une myriade de dispositifs mobiles communicants, les seules constantes sont les flux de données entre ces équipements. En choisissant les flux de données comme clé de l'organisation des dispositifs, j'estime qu'un réseau pervasif peut être organisé d'une manière plus efficace et proactive, renforçant la qualité des services et s'adaptant à la dynamique des réseaux.

Si l'objectif primaire de ce projet est l'étude et le développement de réseaux IoT auto-organisés, nous ne pouvons pas oublier les problèmes liés à la gestion et à l'analyse des données collectées et échangées entre les dispositifs. Les systèmes et plates-formes *Big Data* actuels se concentrent majoritairement l'analyse d'agrégats massifs de données, ce qui nécessite des machines puissantes capables de stocker et traiter toutes ces données, et souvent dans une échelle de l'ordre d'un data center ou cloud. Alors que le regroupement des données dans une plate-forme distante peut présenter certaines avantages (plate-forme dédiée, élasticité des ressources), il faut aussi considérer les inconvénients de cette approche comme par exemple la protection des données, la latence des services ou, comme dans le cas de ce projet, la configuration asymétrique du réseau lors d'une migration massive de données des dispositifs IoT vers la plate-forme de stockage et traitement.

La "centralisation" des informations dans une plate-forme dédiée étant intrinsèquement contraire aux principes de l'Internet des Objets, il est nécessaire de renforcer les aspects de la localité des données et de son traitement afin de transformer les dispositifs en acteurs pleinement intégrés au processus de collecte et de traitement des données (bien sûr, selon leurs capacités respectives). À cette fin, je m'intéresse aux stratégies de traitement et analyse de données **multi-échelle**, une approche qui permet une meilleure distribution des tâches entre les dispositifs et qui optimise l'usage des ressources et la qualité de service. Des services multi-échelle sont aussi des éléments importants dans le développement des applications IoT, une fois que la dynamique et la volatilité d'un réseau ne devrait pas empêcher l'offre d'un service. L'application du principe du calcul multi-échelle dans les domaines telles que la domotique, l'adaptation au contexte ou la sécurité peut donner origine à des services plus réactifs et tolérants aux pannes, ce qui amplifie la satisfaction de l'utilisateur et l'efficacité du système.

En résumé, ce projet vise l'étude de l'Internet des Objets dans le cadre de l'auto-organisation des réseaux selon une approche orientée flux de données. De plus, le développement de stratégies multi-échelle pour le traitement des données offre une application concrète capable de tirer profit des réseaux orientés flux de données.

État de l'Art

Les architectures réseau traditionnelles comme celles utilisées dans l'Internet actuelle ne sont pas adaptées pour fournir tous les services requis par l'Internet des Objets. En effet, l'IoT est caractérisée par une panoplie de dispositifs avec des objectifs et capacités variés (puissance de calcul, mémoire, autonomie, vitesse de connexion) et par un réseau dynamique où les interactions sont souvent spontanées et impliquent des dispositifs multiples. Dans ce projet, on explore une hypothèse dans laquelle les services IoT ont besoin d'un réseau pervasif orienté flux

de données, c'est à dire, d'un réseau dynamique organisé autour des patrons d'échange de données et pas autour des facteurs plus traditionnels comme la localisation ou l'entité d'appartenance.

Afin d'implémenter un réseau IoT orienté flux de données, nous devons associer les concepts de la **clusterisation des ressources** et celui du **Software Defined Networking (SDN)**. Avec les SDN, il est possible d'établir une abstraction logique (*overlay*) entre le transfert des données et l'équipement réseau, séparant ainsi la partie opérationnelle et la partie décisionnelle (plan de contrôle). Du fait de ce découplage, le réseau devient une couche virtuellement indépendante des connexions physiques et qui peut donc être programmée et adaptée selon les besoins des applications. Dans le cas d'un guidage orienté flux de données, l'utilisation d'algorithmes de clusterisation permet d'associer des métriques réseau et les patrons de communication entre les dispositifs IoT afin de contrôler le SDN et ainsi répondre au comportement dynamique d'un réseau pervasif. Comme ce projet inclut un volet application, l'implémentation de **services multi-échelle** s'intègre au concept de la clusterisation. Les services multi-échelle sont une réponse au paradigme du "*cluster computing*", qui offre de la puissance de calcul grâce à des ressources distantes, ce qui implique des latences accrues et des risques potentiels de sécurité des données. Les services multi-échelle sont plus adaptés aux besoins de l'Internet des Objets car les services sont composés de manières incrémentale, utilisant les capacités du réseau local pour offrir un service minimal et faisant appel à des ressources éloignées uniquement si les ressources locales sont insuffisantes.

Dans les prochaines sections, un bref résumé de l'état de l'art dans ces trois sujets de recherche est présenté.

Auto-organisation basée sur la clusterisation des ressources

Afin d'offrir une interconnexion efficace pour les dispositifs de l'Internet des Objets, nous pouvons nous inspirer des travaux conduits ces dernières années autour des réseaux de capteurs sans fil (*Wireless Sensor Networks* - WSN). Dans les WSN, les capteurs ont des ressources énergétiques souvent limitées à cause de leur taille, ce qui fait que la communication devient l'une des opérations les plus chères d'un point de vue énergétique. Plusieurs travaux comme ceux de Yu et al. [10] et Younis et Fahmy [20] attirent l'attention sur les avantages de la clusterisation des ressources comme un schéma efficace tant pour l'augmentation de la vie utile des dispositifs que pour une plus grande passage à l'échelle d'un réseau de capteurs.

Comme les WSN sont aussi sujets à des défaillances, l'une des propriétés les plus recherchées dans les réseaux de capteurs est la tolérance aux fautes et l'adaptation au changement topologique du réseau, ce qui peut être obtenu grâce à l'auto-stabilisation. L'auto-stabilisation est une approche très répandue pour la mise en place de systèmes distribués tolérants aux fautes et qui s'adaptent aux changements du réseau [11]. L'usage de techniques de clusterisation auto-stabilisante sont ainsi proposées dans la littérature, comme par exemple afin de gérer le routage des informations des capteurs vers une station collectrice.

La clusterisation s'effectue en partitionnant le réseau en groupes appelés "*clusters*" et en les organisant selon une structure hiérarchique [11]. En général, un nœud particulier appelé *cluster-head* effectue les tâches liées à la gestion d'un *cluster*. La définition d'un *cluster-head* se fait souvent par l'élection d'un nœud selon une métrique préétablie, comme par exemple le degré de mobilité d'un nœud, son identité, la densité des nœuds, etc. ou bien la combinaison de divers paramètres. La littérature fait part de plusieurs algorithmes de clusterisation auto-stabilisante, lesquels peuvent être classés dans deux groupes, ceux appelés "*1-hop*" (un saut) ou "*k-hops*" (k sauts). Dans les solutions 1-hop [5][6][8], les nœuds doivent se trouver à une distance maximale de 1 saut du *cluster-head* et donc le diamètre maximal du cluster est de 2 sauts. Dans les algorithmes *k-hops* [11][14][15], les nœuds peuvent se trouver à des distances allant jusqu'à *k* sauts du *cluster-head*, avec un diamètre maximal égal à 2k sauts.

Dans la plupart des cas ces algorithmes utilisent des métriques simples comme la densité du réseau environnant et choisissent le *cluster-head* à partir de leurs identifiants uniques (ID), ce qui n'est pas suffisant pour garantir une clusterisation dans un scénario IoT réel. Grâce à

l'expérience de l'équipe SysCom avec les systèmes auto-stabilisants et les algorithmes de clustering [2], il est tout à fait réaliste le développement et l'implémentation d'algorithmes qui utilisent les flux de données comme métrique de clusterisation.

Software-defined networks

La séparation entre le plan de contrôle d'un réseau et celui de la transmission physique des données est un concept qui commence à s'instaurer, comme par exemple dans la technologie MPLS ou bien dans la gestion des réseaux Wi-Fi.

L'un des avantages des *software-defined networks* est celui de pouvoir accéder aux différents équipements réseau et les contrôler finement. Ainsi, les SDN offrent la possibilité d'accéder aux interfaces réseau et de les reconfigurer à la volée, ce qui permet d'automatiser l'exécution de tâches administratives et l'implémentation de politiques de sécurité. Il faut reconnaître cependant que la majorité des efforts sur les SDN sont liés à des aspects de basse niveau tels que l'optimisation de la latence du réseau, mais pas forcément à l'adaptation des besoins des applications et dispositifs[13]. Des travaux récents dans le domaine des SDN tendent à se concentrer sur la définition d'interfaces programmables capables d'interagir avec les dispositifs réseau intermédiaires (routeurs, commutateurs), avec comme résultat la possibilité de contrôler les flux de communication.

Plusieurs constructeurs se sont lancés sur cette nouvelle tendance, avec par exemple les compagnies Cisco, Arista, Extreme Networks ou Juniper Networks, qui offrent un accès direct à leurs produits phare grâce à des API de programmation. Malgré cela, l'utilisation des interfaces SDN reste trop dépendante des APIs fournies par les constructeurs, et seulement quelques protocoles tels que OpenFlow proposent la gestion générique des dispositifs en tant qu'entités abstraites. Comme la logique derrière cette gestion est encore peu développée, seulement quelques travaux essayent de l'utiliser dans l'adaptation au contexte des IoT [3][16].

Dans ce projet, les interfaces de contrôle SDN seront utilisés pour adapter la configuration du réseau de manière à répondre aux besoins des dispositifs et applications IoT. En associant la gestion du réseau par les SDN avec les algorithmes de clusterisation auto-stabilisants, nous sommes capables d'offrir l'intelligence requise pour la construction de réseaux pervasifs efficaces pour l'IoT.

Services multi-échelle et le big data

Le concept du "cloud computing" est aujourd'hui très répandu, avec une approche basée sur l'externalisation des services vers une plate-forme distante avec une capacité de calcul virtuellement illimitée. Ce n'est pas hasard que le traitement massif des données (le *big data*) s'est vite associé à ces plates-formes afin de franchir les limitations de puissance de calcul et de stockage des équipements plus traditionnels (clusters, data centers). Un inconvénient de cette association est le fait que l'accès à une plate-forme distante impose souvent des latences réseau importantes, une complète dépendance des communications de longue distance et la transmission de données potentiellement sensibles à travers l'Internet [7].

Dans le cas des réseaux de capteurs sans fil ces limitations sont relativement peu importantes car dans ce type d'architecture les données sont naturellement conduites des capteurs vers un collecteur qui fera le stockage et l'analyse des données. Avec l'Internet des Objets, toutefois, les dispositifs ne sont plus des simples transmetteurs de données brutes mais deviennent aussi des consommateurs d'information et même des acteurs sur l'environnement physique. Avec cette considération, il est clair que certains dispositifs et services IoT ne pourront pas bénéficier d'un traitement externe des données, vu que cela impose un transfert bidirectionnel massif de données et une grande latence, tout cela dans un réseau intrinsèquement dynamique. Pour cette raison, il est nécessaire trouver des solutions spécifiques pour le déploiement d'applications *big data* sur les réseaux pervasifs [18][19].

Le principe des systèmes multi-échelle est une alternative intéressante au *cloud computing* car il permet la définition de services multicouches autour des équipements, chaque couche fournissant des services incrémentaux qui peuvent être accédés selon le contexte des dispositifs.

Arcangeli et al. [1] formalise les systèmes multi-échelle comme des systèmes distribués où les services s'organisent en couches selon une ou plusieurs dimensions (dispositifs, réseaux, localisation géographique, etc.).

Un exemple de service multi-échelle est présenté par Satyanarayanan [17]. Dans cet article, les auteurs explorent les limitations des dispositifs mobiles et l'inaptitude des solutions actuelles qui externalisent les services mobiles. La solution proposée est conçue avec des serveurs de proximité appelés *cloudlets*, lesquels sont contactés par les dispositifs mobiles voisins grâce au Wi-Fi. Ces *cloudlets* peuvent être déployés au même titre que les points d'accès Wi-Fi dans les bibliothèques, cafés, etc., offrant assez de puissance de calcul pour des tâches complexes tout en gardant la proximité avec les dispositifs pour une réactivité accrue.

Un autre exemple de service multi-échelle est présenté par [1], où l'information de contexte des utilisateurs est collectée, filtrée et analysée de manière incrémentale par les différentes couches du service. Ainsi, des actions contextuelles de base peuvent être décidées et exécutées dans une zone restreinte à proximité des usagers, alors qu'une analyse plus profonde des informations de contexte est déléguée à des serveurs distants, comme illustré dans la Figure 1

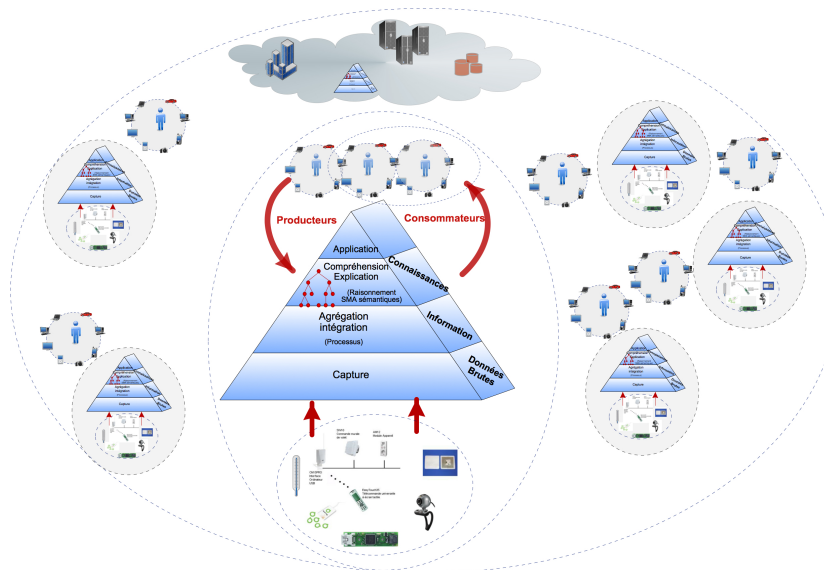


Figure 1 - Gestion distribuée du contexte [1]

Cette analyse en couches permet aussi de renforcer les propriétés de sécurité et vie privée, avec par exemple l'anonymisation des données qui seront envoyés aux couches distantes. Comme pour le contexte, cette approche peut être implémentée aussi pour tout type d'analyse *big data* sur des données issues des capteurs, comme par exemple les logs d'accès d'un détecteur de mouvement ou les informations sur l'activité physique d'un utilisateur.

Les systèmes multi-échelle peuvent aussi être utilisés de manière active pour la gestion de la sécurité d'un réseau, comme nous avons proposé en [9]. En effet, dans les réseaux mobiles (ou dans les réseaux pervasifs IoT), les dispositifs ne peuvent plus faire confiance à un seul dispositif de sécurité tel qu'un pare-feu ou un anti-virus car l'accès aux réseaux est devenu multimodale, les équipements étant de plus en plus connectés à plusieurs réseaux à la fois via le Wi-Fi, le réseau téléphonique 3G/4G, le Bluetooth, etc. Dans ce cas, il faut un système de surveillance mutuel capable de créer une zone de confiance, une communauté. L'entrée dans une telle zone de confiance ne peut être possible que si le dispositif valide certains contrôles d'accès imposés par les membres de la communauté ; de même manière, des dispositifs devenus "dangereux" à cause de virus ou d'autres logiciels malveillants doivent être bloqués et exclus de la communauté. Si tel filtrage est possible avec les technologies actuelles (authentification 802.1x, réseaux VPN et "sondes" logiciel), leur configuration demeure complexe et la connaissance technique pour sa mise en place reste importante. Dans une approche multi-échelle, les dispositifs exécutent des outils de surveillance mutuelle (selon leurs capacités) et la sécurité de la zone de confiance est assurée de manière autonome grâce à l'échange d'informations entre ces dispositifs (Figure 2).

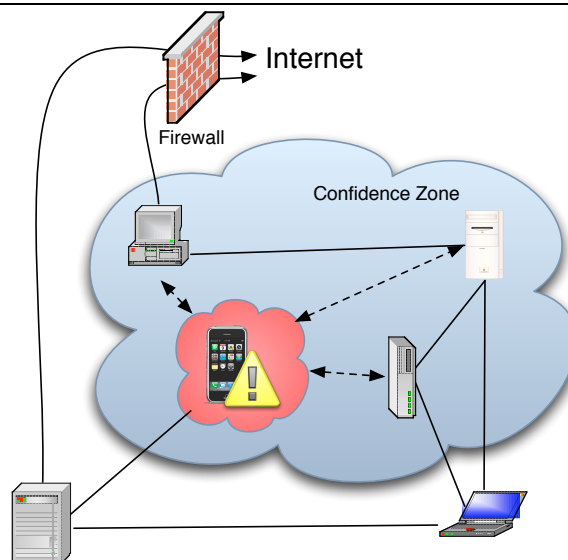


Figure 2 - Une zone de confiance [9]

Le déploiement de tels services multi-échelle est naturellement adapté aux réseaux IoT, vu que l'hétérogénéité et la dynamique des dispositifs impose l'adaptation continue des interconnexions réseau et des besoins des applications et systèmes.

Méthodologie et Outils

Une partie importante de ce projet repose sur l'association de concepts tels que les SDN et les algorithmes de clustering, formant ainsi des solutions et applications réelles. La méthodologie prévue est composée donc d'un mélange de recherche bibliographique, de l'implémentation et d'expériences pratiques sur des équipements réels. Avec un prototype de contrôle du réseau opérationnel, nous pouvons élargir les expériences aux applications et services *big data* et à leur implémentation en tant que services multi-échelle. Cette étape servira aussi comme *feedback* permettant l'amélioration incrémentale des mécanismes de clusterisation et de gestion du réseau.

Ces expériences peuvent bénéficier de la plate-forme RemoteLabz (<http://netacad.univ-reims.fr/>), un équipement conçu par l'équipe SysCom avec des objectifs pédagogiques. RemoteLabz est une plate-forme réseau reconfigurable par logiciel qui mélange des équipements réels (routeurs, commutateurs, serveurs) et des dispositifs virtuels, ce qui permet la création de scénarios à pour l'exécution d'applications et pour l'apprentissage des réseaux informatiques. De plus, RemoteLabz peut être enrichi avec des dispositifs IoT (des travaux d'intégration de tels dispositifs sont déjà commencés), ce qui fait de cette plate-forme notre premier choix.

Selon les résultats obtenus, d'autres solutions telles que la plate-forme IoT européenne FiWare (<https://www.fiware.org/>) peuvent aussi être envisagées pour une passage à l'échelle et pour une validation par des utilisateurs.

Toutes ces étapes seront validées à travers la soumission des résultats et des outils développés à des conférences et revues scientifiques dans les domaines concernés. Ce projet, a aussi l'intérêt d'associer les membres de l'équipe de recherche SysCom du CReSTIC vu que ces thèmes sont au cœur des activités de recherche développées par ses membres. La participation d'étudiants de master et de doctorat est fondamentale dans le cadre de mes activités d'enseignant-chercheur, ainsi que l'ouverture de ces travaux à des partenaires grâce à des projets de collaboration futurs.

Références

- [1] Arcangeli, J.-P., Chabridon, S., Conan, D., Desprats, T., Laborde, R., Leriche, S., Lim, L., Taconet, C., Boujbel, R., Machara Marquez S., Marie, P., Rottenberg, S. "**Gestion de contexte multi-échelle pour l'Internet des objets**". *UbiMob2014 : 10èmes journées francophones Mobilité et Ubiquité*. Juin 2014
- [2] Ba, M., Flauzac, O., Makhoulfi, R., Nolot, F., Niang, I., "**Fault-Tolerant and Energy-Efficient Generic Clustering Protocol for Heterogeneous WSNs**", *International Journal On Advances in Networks and Services*, ISSN 1942-2644, Volume 6, Issue 3&4, pp. 231 - 245, 2013.
- [3] Baskett, P.; Yi Shang; Wenjun Zeng; Guttersohn, B., "**SDNAN: Software-defined networking in ad hoc networks of smartphones**," *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, 2013 IEEE , vol., no., pp.861,862, 11-14 Jan. 2013
- [4] Bonomi, F., Milito, R., Zhu, J., Addepalli, S., "**Fog Computing and Its Role in the Internet of Things**", *MCC Workshop on Mobile Cloud Computing*, Helsinki, Finland. August 2012.
- [5] Caron, E., Datta, A. K., Depardon, B., Larmore, L.L., "**A self-stabilizing k-clustering algorithm for weighted graphs**," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 70, no. 11, pp. 1159–1173, 2010.
- [6] Datta, A. K., Devismes, S., Larmore, L. L., "**A Self-Stabilizing O(n)-Round k-Clustering Algorithm**," in *Proceedings of the 28th IEEE International Symposium on Reliable Distributed Systems, SRDS'09*, pp. 147–155, 2009.
- [7] Diallo, T.H., Ndiaye, S., Flauzac, O., Steffemel, L.A., "**GRAPP&S, une Architecture Multi-Échelle pour les Données et le Services**". *Proceedings of 9èmes Journées Francophones Mobilité et Ubiquité (UbiMob 2013)*, June 5-6, 2013, Nancy, France.
- [8] Flauzac, O., Hagggar, B. S., Nolot, F., "**Self-stabilizing clustering algorithm for ad hoc networks**," in *Proceedings of the 5th International Conference on Wireless and Mobile Communications, ICWMC '09*, pp. 24–29, 2009.
- [9] Flauzac, O., Nolot, F., Rabat, C., Steffemel, L.A., "**Grid of Security : a decentralized enforcement of the network security**" in Manish Gupta, John Walp, and Raj Sharman (Eds.), *Threats, Countermeasures and Advances in Applied Information Security*, IGI Global, april 2012. pp. 426-443.
- [10] Garcia Lopez, P., Montresor, A., Epema, D., Datta, A., Higashino, T., Iamnitchi, A., Barcellos, M., Felber, P., Riviere, E., "**Edge-centric Computing: Vision and Challenges**", *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 45 n. 5, pp. 37-42, October 2015.
- [11] Johnen, C., Mekhaldi, F., "**Self-stabilization versus robust self- stabilization for clustering in ad-hoc network**," in *Proceedings of the 17th international conference on Parallel processing, Euro-Par'11*, pp. 117–129, 2011.
- [12] Johnen, C., Nguyen, L., "**Self-stabilizing weight-based clustering algorithm for ad hoc sensor networks**", *Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks*, 2006, pp. 83–94.
- [13] Mendonca, M., Obraczka, K., Turletti, T., "**The case for software-defined networking in heterogeneous networked environments**", *Proceedings of the 2012 ACM conference on CoNEXT student workshop*, ACM, 2012
- [14] Mitton, N., Busson, A., Fleury, E., "**Self-organization in large scale ad hoc networks**," in *Proceedings of the 3rd Annual Workshop Mediterranean Ad Hoc Networking, MED-HOC-NET*, 2004.
- [15] Mitton, N., Fleury, E., Guerin Lassous, I., Tixeuil, S., "**Self-stabilization in self-organized multihop wireless networks**," in *Proceedings of the 2nd International Workshop on Wireless Ad Hoc Networking, ICDCSW '05*, pp. 909–915, 2005.
- [16] Papageorgiou, A., Zahn, M., Kovacs, E., "**Auto-configuration System and Algorithms for Big Data-Enabled Internet-of-Things Platforms**", *2014 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress)* , vol., no., pp.490,497, June 27 2014-July 2 2014
- [17] Satyanarayanan, S. , Bahl, P., Caceres, R., Davies, N., "**The case for VM-based cloudlets in mobile computing**". *IEEE Pervasive Computing*, (8) :14–23, Dec. 2009.
- [18] Steffemel, L. A., Flauzac, O., Charao, A. S., P. Barcelos, P., Stein, B., Cassales, G., Nesmachnow, S., Rey, J., Cogorno, M., Kirsch-Pinheiro, M. and Souveyet, C., "**Mapreduce**

challenges on pervasive grids", *Journal of Computer Science*, vol. 10 n. 11, pp. 2192-2207, July 2014.

- [19] Steffemel, L. A., Flauzac, O., Schwertner Charao, A., Pitthan Barcelos, P., Stein, B., Nesmachnow, S., Kirsch Pinheiro, M., Diaz, D. "**PER-MARE: Adaptive Deployment of MapReduce over Pervasive Grids**". *Proceedings of the 8th International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing (3PGCIC'13)*, Compiègne, France, October 28-30 2013.
- [20] Younis, O., Fahmy, S., "**Heed: a Hybrid, Energy-Efficient, Distributed clustering approach for ad hoc sensor networks**" *IEEE Transactions on Mobile Computing*, pp. 366 – 379, 2004.
- [21] Yu, J., Qi, Y., Wang, G., Gu, X., "**A cluster-based routing protocol for wireless sensor networks with nonuniform node distribution,**" *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, pp. 54 – 61, 2012.