



HAL
open science

Softwarisation et Webification, la révolution logicielle des réseaux

Bruno Chatras, Dominique Barthel, Emmanuel Bertin, Philippe Bertin,
Prosper Chemouil, Fabice Guillemin, Christian Jacquenet

► **To cite this version:**

Bruno Chatras, Dominique Barthel, Emmanuel Bertin, Philippe Bertin, Prosper Chemouil, et al..
Softwarisation et Webification, la révolution logicielle des réseaux. De nouvelles architectures de
communication, Dec 2016, Paris, France. hal-02838785

HAL Id: hal-02838785

<https://hal.science/hal-02838785>

Submitted on 7 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Softwarisation et Webification, la révolution logicielle des réseaux

Softwarization and Webization: the Software Revolution in Networking

Bruno Chatras¹, Dominique Barthel², Emmanuel Bertin³, Philippe Bertin⁴, Prosper Chemouil¹, Thierry Coupaye², Fabrice Guillemin⁵, Christian Jacquenet⁴

¹ Orange Labs, Châtillon, France, {bruno.chatras, prosper.chemouil}@orange.com

² Orange Labs, Meylan, France, {dominique.barthel, thierry.coupaye}@orange.com

³ Orange Labs, Caen, France, emmanuel.bertin@orange.com

⁴ Orange Labs, Cesson-Sévigné, France, {philippe.bertin, christian.jacquenet}@orange.com

⁵ Orange Labs, Lannion, France, fabrice.guillemin@orange.com

Résumé: Le monde des télécommunications connaît une transformation sans précédent avec l'introduction de modèles issus du monde informatique, largement adoptés aujourd'hui par les acteurs industriels majeurs. Deux concepts essentiels sous-tendent cette évolution sont introduits : la *softwarisation* des réseaux et la *webification* des services. Cet article se propose d'analyser l'impact de ces concepts sur les architectures de réseaux et leur conception d'une part, et sur l'exploitation des réseaux qui devient inéluctablement automatisée d'autre part. Cette transformation majeure améliore également l'agilité des modes de déploiement des nouveaux réseaux. Les processus de standardisation sont aussi quelque peu bouleversés par l'arrivée de ces nouvelles technologies.

Abstract: The Telecom industry is experiencing unprecedented transformation with the introduction of paradigms developed in the IT world that are nowadays adopted by major industry players. Two concepts that illustrate this trend are introduced: network *softwarization* and service *webization*. This paper aims at analyzing the impact of these models on network architecture and design on the one hand, and on network operations that inevitably get automated on the other hand. This huge transformation additionally improves the deployment of this new generation of networks. Standardization processes are somehow disrupted with the introduction of these new technologies which call for fast development and integration.

Mots-clés: softwarization ; webification ; réseaux ; SDN ; NFV ; Architecture ; Automatisation

Keywords: Softwarization; Webization; Networks; SDN; NFV; Architecture; Automation

Introduction

Depuis plusieurs années, l'industrie des télécommunications se transforme tant sur les plans technique qu'économique, tandis que les paysages concurrentiels et réglementaires évoluent également de manière profonde. Après la mutation des réseaux à commutation de circuits en des réseaux à commutation de paquets (IP) au milieu des années 1990 et le déploiement massif des accès radio (Wi-Fi et cellulaire) dans les années 2000, de nouvelles évolutions technologiques majeures gagnent aujourd'hui en maturité. On constate à la fois une évolution significative des réseaux vers l'utilisation massive de techniques et composants logiciels, reléguant le matériel au rang de commodité – on parle de « *softwarisation des réseaux* », et l'adoption massive des technologies Web pour le développement des applications et des systèmes de gestion de réseau – on parle de « *webification des services* ».

Ces transformations remettent non seulement en cause le métier des opérateurs, mais aussi les architectures traditionnelles des réseaux de communication – dans leur découpage « horizontal » (entre réseaux d'accès et réseau cœur) comme dans leur découpage « vertical » (entre plans de transfert et de contrôle, notamment). Dans ce contexte, l'objet de cet article est d'analyser ces divers changements et comment les opérateurs pourront en tirer parti pour offrir les services et usages du futur.

L'article est organisé de la façon suivante : la section 1 détaille les notions de *softwarisation* et de *webification*. La section suivante considère les évolutions d'architectures induites par les modèles de programmabilité et virtualisation de réseau. La Section 3 présente les transformations dans la conception fonctionnelle des réseaux, puis la Section 4 expose les atouts et les exigences liés à l'automatisation de la production et de l'exploitation de services réseau. L'impact de ces évolutions sur l'interconnexion avec des réseaux tiers est analysé en Section 5. La conclusion propose quelques pistes de réflexions sur les modèles d'affaires que cette révolution nécessite ainsi que sur les outils d'analyse qui devront être déployés.

1. Softwarisation et Webification

Le terme de *softwarisation* désigne dans le contexte des réseaux l'importance croissante du logiciel. Si les équipements réseaux ont toujours reposé sur des composants logiciels, ceux-ci étaient indissociables d'un environnement d'exécution et d'un environnement matériel spécifiques, allant parfois jusqu'à l'utilisation de processeurs spécialisés. Aujourd'hui, les technologies logicielles de virtualisation permettent une conception et une exécution de composants logiciels indépendantes de l'infrastructure sous-jacente.

Ces évolutions ont des conséquences qui vont bien au-delà des aspects purement techniques : les métiers et les compétences des opérateurs sont profondément remis en cause. En effet, ceux-ci reposaient jusqu'à présent sur une conception fine de l'architecture des réseaux de communication, suivie de leur déploiement, leur configuration et leur exploitation, à partir d'équipements matériels conçus par des constructeurs spécialisés pour assurer un ensemble prédéfini de fonctions (par exemple, routage, qualité de service, sécurité), avec des systèmes de gestion réservés à l'usage exclusif des opérateurs.

A contrario, la *softwarisation* permet la mise en œuvre de réseaux ouverts et programmables, c'est-à-dire offrant (y compris à des tiers) la possibilité de programmer puis de gérer certaines des fonctions ou ressources disponibles dans le réseau selon les besoins de l'opérateur, mais aussi des utilisateurs ou de tiers. Cette fonctionnalité est en grande partie rendue possible grâce à l'architecture SDN (*Software-Defined Networking*) [1]. Cette *softwarisation* soulève néanmoins de nombreux défis pour les opérateurs, notamment ceux relatifs à l'ingénierie et l'exploitation de ces nouvelles infrastructures réseau, qui s'appuient sur des plates-formes matérielles banalisées (« *commodity hardware* ») telles que proposées avec la technologie NFV (*Network Functions Virtualisation*) [2]. Au-delà des questions d'architecture et de conception, la *softwarisation* fait entrer de plain-pied les réseaux dans le monde informatique (IT), avec la possibilité de mises à jour logicielles en tant que de besoin, et l'adoption possible de méthodes de développement et d'exploitation agiles et quasi-continues [3]. Tout ceci bouleverse également les relations opérateurs/constructeurs, ces derniers fournissant traditionnellement des solutions clefs en main.

En parallèle de la transformation des modèles de développement et d'exploitation provoquée par la *softwarisation*, les évolutions des réseaux sont au cœur des enjeux de la société numérique. Ainsi, ces réseaux doivent évoluer de manière constante afin de répondre aux besoins de connectivité omniprésente, de croissance des usages et du trafic des utilisateurs, de l'arrivée massive d'objets connectés (Internet des Objets), etc. Les exigences associées concernent ici le déploiement généralisé d'infrastructures d'accès à haut débit, la réduction des latences de services réseau, le passage à l'échelle dans des conditions économiquement viables, la réduction et le contrôle de la consommation énergétique des réseaux et terminaux. La *softwarisation* des réseaux se doit également de fournir des solutions pour satisfaire ces nouvelles exigences.

De manière concomitante à la *softwarisation* des réseaux, on assiste également à la *Webification* des services et de la gestion de réseau. Le web a été une révolution majeure qui a permis au plus grand nombre d'utiliser facilement Internet, sans nécessiter de compétences informatiques particulières. Du côté des terminaux, les navigateurs Internet (Mozilla, Chrome, etc.) ne cessent de s'enrichir et embarquent de plus en plus de services et de capacités (par exemple pour la gestion des notifications et des flux temps-réel). Du côté des services, leur architecture se compose le plus souvent d'un ensemble de modules indépendants, faiblement couplés les uns avec les autres, et qui ne communiquent entre eux que par l'intermédiaire d'API (*Application Programming Interface*), c'est-à-dire par des interfaces de programmation explicites et ouvertes. De plus en plus de services peuvent ainsi être mis à disposition et gérés en mode Web. Mais cette tendance ne se limite pas aux services et s'étend à la gestion de réseaux. L'apparition d'API REST (*REpresentational State Transfer*) est révélatrice de cette vague de fond [4].

Jusqu'à présent, les réseaux étaient gérés via des plateformes fournies par les équipementiers, la configuration des équipements se faisant à travers des interfaces propriétaires (syntaxe de type CLI (Command Line Interface), caractéristique de la technologie de l'équipement géré). Aujourd'hui, grâce aux API REST de plus en plus répandues, équipements et fonctions peuvent être configurés et interrogés sur leur état de façon plus standardisée. Ceci permet de développer des outils de gestion « web compatibles » qu'un opérateur de réseau peut utiliser, mais aussi les utilisateurs du réseau. En effet les API REST, largement répandues dans le monde des services Web, sont réputées intuitives et permettent de mettre en œuvre des procédures complexes à partir de quelques primitives simples offertes par le protocole HTTP (*HyperText Transfer Protocol*).

Les fonctions de gestion de réseau qui sont par exemple fournies par un orchestrateur NFV ou un gestionnaire d'infrastructure Cloud exposent également des API REST. Dans cette approche, les logiciels deviennent interrogeables à distance et le réseau peut être vu comme un ensemble de logiciels également pilotables à distance, à l'instar des contenus disponibles sur un site Web.

Un exemple emblématique de Webification : la technologie WebRTC [5]

Les communications interpersonnelles, en particulier la téléphonie, reposent sur des procédures d'interconnexion où interviennent le réseau de l'appelant, le réseau de l'appelé et parfois un ou plusieurs réseaux de transit. Cette forme d'interconnexion nécessite la mise en œuvre de protocoles de signalisation complexes (SIP (*Session Initiation Protocol*), H.323, ISUP (*ISDN User Part*), etc.) qui soulèvent fréquemment des problèmes d'interopérabilité entre terminaux et réseaux et entre les serveurs des réseaux traversés. Avec la technologie WebRTC, il devient possible d'établir une communication ne faisant intervenir que le serveur associé à l'appelé. En effet, le terminal WebRTC de l'appelant peut récupérer un script HTML (*HyperText Markup Language*) de traitement d'appels (avec tous les services supplémentaires usuels, renvoi d'appels, filtrage, etc.) auprès du serveur associé à l'appelé, simplement en envoyant une requête HTTP vers une URL (*Uniform Resource Locator*) correspondant à ce serveur (par exemple trouvée sur une vcard), l'identité de l'appelé figurant parmi les paramètres véhiculés dans la requête. Le script qui s'exécute alors dans le navigateur de l'appelant émet et reçoit des messages de signalisation selon un protocole nécessairement compris par le serveur en charge de l'appelé. Il n'y a plus qu'une interconnexion de réseaux au niveau de la couche IP.

Encadré 1. Exemple de webification : WebRTC

2. Vers une disparition des frontières entre réseaux d'accès et réseaux cœur ? Entre réseaux et services ?

Ces ruptures technologiques impactent les principes d'architecture couramment mis en œuvre pour l'ingénierie, le déploiement et l'exploitation des réseaux. Ainsi, l'industrie des télécommunications est historiquement habituée à raisonner en termes de réseaux d'accès et de réseaux cœur. Cette distinction reste aujourd'hui très marquée dans les organismes de normalisation et les lignes de produits des industriels, en particulier dans le cas des réseaux mobiles. En introduisant un découplage entre les fonctions des réseaux de communication et les infrastructures qui les hébergent, la technologie de virtualisation des fonctions de réseau (NFV) [2] apporte une flexibilité dans le choix des sites et des serveurs pour déployer ces fonctions. Les fonctions réseau deviennent en effet des packages logiciels, qui peuvent être installés sur un serveur quelconque. Il n'y a plus de lien direct entre le rôle joué par une fonction réseau dans une architecture fonctionnelle et l'endroit où elle est installée : sa localisation est maintenant déterminée dynamiquement par un système de gestion et d'orchestration. Pour instancier une fonction sur un serveur donné, ce système va prendre en compte des critères tels que la charge des serveurs, les exigences de qualité de service (en particulier la sensibilité à la latence), les besoins de redondance géographique, etc. Ce n'est donc plus la dépendance à une technologie d'accès qui détermine si une fonction réseau doit être déployée au cœur du réseau d'un opérateur ou sur un site en périphérie de ce réseau, voire chez le client lui-même.

Ainsi, en combinant des architectures telles que *Mobile Edge Computing* (MEC) [6] et *Cloud-RAN* (*Cloud Radio Access Network*) [7], des fonctions habituellement centralisées (que ce soient des fonctions applicatives comme des caches vidéo ou des fonctions du cœur de réseau mobile) peuvent migrer en périphérie de réseau, pour être typiquement hébergées sur les mêmes serveurs que les fonctions de traitement de signal radio. Inversement, certaines fonctions liées à la technologie d'accès radio peuvent être déployées dans des sites plus centralisés [8]. Dans ce contexte, on peut penser que l'architecture fonctionnelle des réseaux dits de 5^{ème} génération (5G) sera conçue sans s'appuyer sur cette dichotomie entre réseaux d'accès et réseaux cœur. Plus généralement, la possibilité de revisiter des répartitions de fonctions jusqu'alors spécifiques à chaque type de réseau devrait faciliter une réelle convergence fixe/mobile. La virtualisation offre en effet davantage de flexibilité pour réaliser cette convergence, avec pour objectif de faire face à la croissance exponentielle de la volumétrie de trafic sur les réseaux d'accès radio et filaires.

Un exemple de *softwarisation*: les réseaux longue portée bas débit pour les objets intelligents

Le déploiement de réseaux répondant à l'émergence de nouveaux services de communications tels que les services machine-à-machine est l'occasion d'exploiter les techniques de *softwarisation*. C'est le cas des réseaux longue portée bas débit pour les objets intelligents tels que LoRa™ [11]. Dans un réseau LoRa (*Long Range*), les fonctions réseau sont exécutées sur des machines virtuelles hébergées dans des data centers, quelle que soit leur localisation (par exemple, en périphérie de réseau ou dans des PoP (*Point of Presence*) régionaux). Ces fonctions incluent les algorithmes de la couche liaison de données tels que l'envoi des acquittements sur réception. La communication entre les stations radio et le serveur réseau s'effectue sans faire d'hypothèse sur la nature du réseau les reliant (c'est-à-dire via Internet, ou parfois même via des liaisons cellulaires), le protocole d'accès au medium de LoRa permettant des latences de plusieurs centaines de millisecondes. L'émission et la réception radio (sélection de canal, synchronisation, démodulation, décodage) sont faites dans un circuit intégré développé par l'entreprise Semtech, incluant du traitement de signal programmé. Les interactions avec les serveurs réseau sont essentiellement réalisées via des API de type REST. Le réseau Sigfox™ pousse plus loin encore la *softwarisation* en exécutant les fonctions radio essentiellement en logiciel. Le signal est de bande tellement étroite que les objets à bas coût ne peuvent s'aligner sur des canaux fixes. C'est l'ensemble de la sous-bande qui est échantillonnée et numérisée pour être traitée par un ordinateur local pour retrouver les signaux émis par les différents objets. En cas d'échec du décodage, les informations partielles issues des différentes stations radio sont recombinaées dans le cloud pour reconstituer l'information.

Encadré 2. Exemple de *softwarisation* : les réseaux longue portée à bas débit

Dans le même mouvement, l'introduction d'équipements informatiques (serveurs) dans les points de présence réseaux pour exécuter des fonctions réseau, offre la possibilité d'utiliser ces équipements pour réaliser également traitements et stockage de données pour le compte des services applicatifs. Pour de nombreux services mobiles, ou pour les services associés à l'Internet des Objets (IoT), il est très profitable de rapprocher des terminaux et objets l'exécution des services et/ou le stockage de leurs données, plutôt que de réaliser traitement et stockage de façon centralisée dans de grands centres de données éloignés. Les bénéfices techniques attendus incluent la diminution de la latence, l'amélioration de la sécurisation des données, ou la réduction de la volumétrie du trafic acheminé dans le cœur du réseau.

Ceci explique l'intérêt actuel pour le *Mobile Edge Computing* [6], le *fog computing* [9],] et autres déclinaisons des techniques de *edge computing* [10], où calculs et stockage applicatifs sont en partie déplacés vers la périphérie du réseau, à proximité (voire parfois au sein) des terminaux et objets. Au final, une gestion combinée et une co-localisation des ressources de calcul, stockage et connectivité, devraient permettre une utilisation optimisée des différents types de ressources, au bénéfice des services (temps de production de service réduits, amélioration de l'expérience utilisateur) et des infrastructures informatiques et réseau (optimisation des investissements et de la consommation d'énergie).

3. Faciliter l'émergence d'architectures multifonctionnelles et multi-services

Au-delà des transformations de la topologie des réseaux, évoquées dans la section précédente, la *softwarisation* et la *Webification* questionnent également leur structuration fonctionnelle et leur mode de conception.

3.1. Remise en cause d'une découpe en entités fonctionnelles

Jusqu'à présent, les services de connectivité fournis par un opérateur reposent principalement sur des « entités fonctionnelles », souvent standardisées, implémentées dans les équipements de différents constructeurs qui sont déployés dans différents réseaux (fixe, mobile, entreprise...). Ainsi, dans l'architecture du cœur des réseaux mobiles, les SGSN (*Serving GPRS Support Node*), GGSN (*Gateway GPRS Support Node*) ou PCRF (*Policy and Charging Rules Function*) sont des entités qui regroupent d'une façon indissociable plusieurs fonctions élémentaires (par exemple, inspection des paquets, optimisation TCP, etc.). Le choix d'activer telle ou telle entité fonctionnelle était conditionné par la nature du service à fournir au risque parfois de consommer inutilement des ressources, voire de pénaliser l'efficacité d'acheminement du trafic dans le réseau. Il n'est en général pas possible d'activer sélectivement un sous-ensemble de fonctions élémentaires au sein d'une même entité.

Le mouvement vers la *softwarisation* et le découplage entre équipement physique et fonction réseau apporté par la virtualisation favorisent une approche plus flexible : une architecture fonctionnelle unique peut servir à déployer plusieurs instances du même réseau physique, chacune de ces instances étant optimisée pour un service particulier; on parle alors de *network slicing*. Ainsi, il devient possible de concevoir une architecture fonctionnelle unique intégrant des fonctions de gestion de mobilité, sans instancier ces dernières dans le cas d'un déploiement optimisé pour des services IoT ou pour l'émulation d'un réseau fixe.

Plus globalement, à partir du moment où les fonctions réseau deviennent logicielles, c'est toute une méthodologie de conception des architectures réseau qui est potentiellement remise en cause. En effet, la conception de ces architectures reposait notamment sur la décomposition d'un service de communication en entités fonctionnelles standardisées. Dans un premier temps, la *softwarisation* conserve cette découpe fonctionnelle, en dissociant simplement la fonction réseau de son environnement d'exécution (machine virtuelle – VM, *Virtual Machine*), permettant ainsi une localisation des fonctions indépendamment de leur rôle dans le réseau, comme explicité dans la section précédente. Dans un second temps, la *softwarisation* pourra remettre en cause cette découpe fonctionnelle, en permettant d'optimiser l'architecture logicielle selon d'autres critères, comme par exemple la résistance aux pannes matérielles. Des environnements d'exécution moins consommateurs de ressources que les machines virtuelles (par exemple des containers Linux) pourront également être utilisés (par exemple, dans des cas où le temps d'instanciation d'une fonction doit être minimum ou lorsqu'il s'agit de déployer un nombre important d'instances d'une même fonction).

Dans le monde web, les approches micro-services visent précisément à décomposer un code monolithique en modules logiciels indépendants pour assurer davantage de flexibilité et de performance. Une *Webification* des réseaux conduira probablement à adopter le même type d'approche, remettant ainsi en cause la granularité des architectures fonctionnelles actuelles. Un basculement rapide d'un serveur physique vers un autre en cas de panne sera typiquement recherché, par exemple via une architecture logicielle à base de composants de petite taille et minimisant le nombre de composants à maintenance d'états. D'autre part, ce mouvement de *Webification* pourra également conduire à l'exposition d'interfaces ouvertes, indépendamment de l'entité qui en sera consommatrice (alors qu'aujourd'hui une interface fonctionnelle est typiquement spécifiée comme reliant deux entités fonctionnelles déterminées), par exemple via des API REST.

3.2. Rôle de l'Open Source

Par ailleurs, les relations entre standardisation et produits évoluent également avec l'importance croissante des communautés Open Source. Le développement de fonctions réseau et en particulier des interfaces entre ces fonctions s'appuie traditionnellement sur des standards, avec le double objectif d'assurer une interopérabilité entre équipements développés par des industriels différents (cette interopérabilité est essentielle lorsque le standard spécifie un protocole de communication) et de faire baisser les coûts en adoptant une approche « prêt-à-porter » plutôt que « sur mesure ».

A ce jour, les processus de normalisation et de développement de fonctions réseau et de leurs systèmes de gestion restent souvent séquentiels (i.e. la phase de développement industriel est précédée par une phase de standardisation). Et les processus de normalisation sont eux-mêmes très largement séquentiels, avec par exemple une phase de spécification de besoins fonctionnels suivie d'une phase de spécification d'une solution protocolaire. Ce double séquençement est souvent critiqué, car considéré comme trop lent par rapport aux besoins d'un marché en mutation permanente.

On oppose parfois à la normalisation le développement dit "*Open Source*". Pourtant Les deux processus ne sont pas contradictoires, et leur articulation existe depuis plusieurs décennies. Ainsi, il existe de nombreuses implémentations Open Source des protocoles

spécifiés par l'IETF (Internet Engineering Task Force) et le code logiciel de bon nombre de fonctions réseau standardisées intègre déjà des modules Open Source.

Avec le mouvement de la *softwarisation*, on observe que non seulement le rôle de l'Open Source s'accroît mais aussi que son articulation avec les processus de normalisation évolue, les communautés Open Source ayant de plus en plus tendance à engager des développements dès que les exigences fonctionnelles sont connues, pouvant ainsi conduire à un standard de facto. Cette manière d'accélérer le processus de standardisation trouve ses limites en matière d'interopérabilité, dès lors que plusieurs communautés Open Source travaillent en concurrence sur le développement des mêmes protocoles ou API. Les produits et les communautés Open Source sont aujourd'hui au cœur des processus de production industrielle de logiciels, et pourraient être au cœur de la conception de fonctions réseau « softwarisées ».

4. Automatiser le processus de production de services de connectivité : les atouts de l'intelligence SDN

Après avoir introduit les impacts architecturaux de la *softwarisation* et de la *webification*, nous détaillons dans cette section les besoins et les solutions émergentes pour automatiser la production de services de connectivité dans ce nouveau contexte technologique reposant sur l'utilisation de techniques SDN.

4.1. Les enjeux de l'automatisation

L'automatisation du processus de production de service réseau (Figure 1) est la clé de la simplification des opérations de négociation, de configuration et d'exploitation des services de connectivité.



Figure 1 : Processus de production de services en environnement SDN.

Malheureusement, l'automatisation ne se résume pas à une sorte de « bouton magique » qu'un administrateur réseau utiliserait à chaque fois qu'une demande de souscription à un service de connectivité devrait être traitée. Derrière ce « bouton magique » se cache en fait une grande complexité, due à la nécessité de combiner l'ensemble des fonctions nécessaires à la production et à l'exploitation d'un service de connectivité donné d'une manière intelligente (c'est-à-dire de façon déterministe, en adéquation avec les besoins exprimés par le client, les ressources disponibles dans le réseau et conformément aux politiques de planification, d'acheminement et de routage de trafic, de qualité de service, de sécurité, etc., définies par le fournisseur de service).

4.2 Une intelligence flexible

L'intelligence d'une architecture SDN, clé de voûte de la *softwarisation* des réseaux, réside dans les plans de contrôle et de gestion/orchestration des services. Une architecture SDN (Figure 2) repose ainsi sur une intelligence logiquement centralisée, capable de prendre en compte différentes données d'entrée pour instancier les politiques appliquées par les fonctions impliquées dans la fourniture du service.

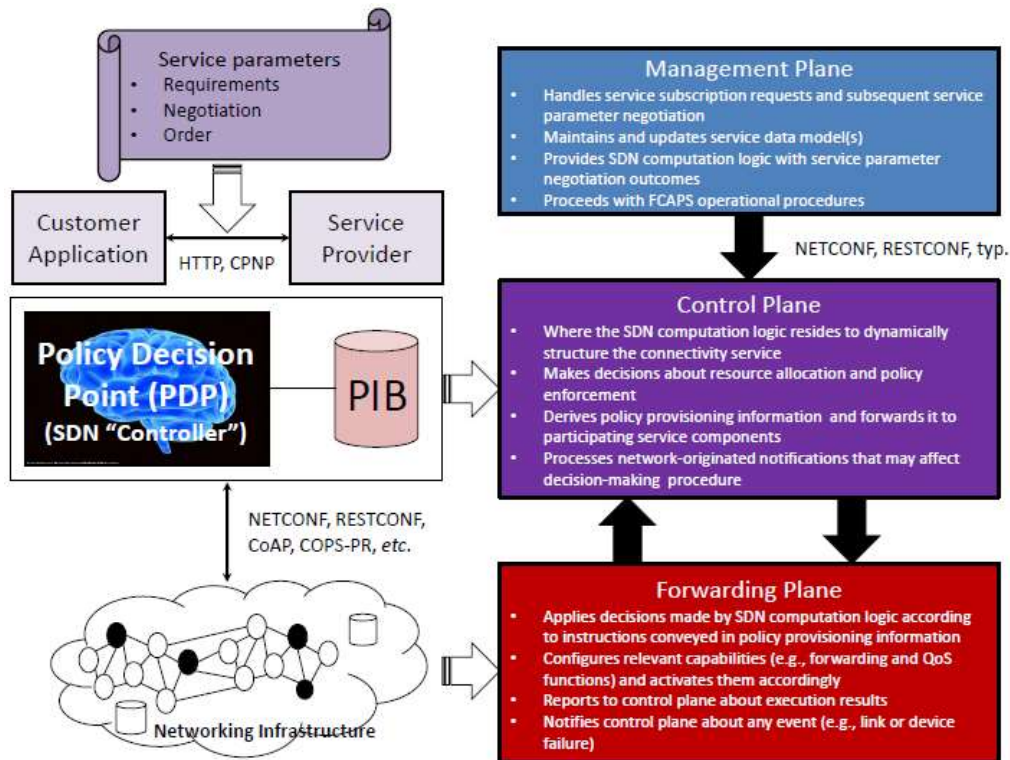


Figure 2 : Architecture SDN [12]

Ces données d'entrée comprennent notamment les matrices de trafic prévisionnelles, les résultats de la négociation dynamique des paramètres caractérisant le service de connectivité demandé, l'état des ressources disponibles dans le réseau, etc. La conception et la gestion d'une telle intelligence d'une manière compatible avec un déploiement à l'échelle (fonction du nombre et de la nature des différents services de connectivité proposés) constitue l'une des principales difficultés techniques de mise en œuvre d'une architecture SDN au sein d'environnements opérationnels.

4.3 Les défis de l'automatisation

Une automatisation complète du processus de production de service de connectivité doit relever de nombreux défis, tels que:

- La nécessité de simplifier le processus de production d'un service de connectivité tout en améliorant son temps de production et sa gestion (détection plus rapide de fautes, établissement de diagnostic plus efficace, etc.). L'automatisation est une réponse naturelle à un tel besoin. L'intelligence associée repose notamment sur la mise en œuvre d'algorithmes capables d'intégrer différentes données d'entrée pour déterminer quelles sont les politiques les mieux adaptées aux besoins du client en fonction du nombre et de la nature des services souscrits, mais également la description des comportements attendus selon différents événements (par exemple,

modification de la topologie du réseau, indisponibilité de ressources à l'accès, etc.).

- Le besoin de couches d'abstraction, qui permettent de disposer d'interfaces claires entre les différents acteurs (clients, fournisseurs de service, administrateurs réseau, applications, etc.), et qui facilitent les interactions entre couches. Un niveau d'abstraction élevé permet de structurer différents services réseau d'une manière agile, tout en facilitant l'exposition de ces différents services aux clients, réseaux pairs, applications, et autres fournisseurs de contenus. Cette capacité d'abstraction est également utile pour s'assurer de l'adéquation des besoins de connectivité réseau aux objectifs d'ingénierie de réseaux qui tiennent notamment compte de politiques de planification pluriannuelles.
- La capacité de prendre en compte des environnements technologiques très hétérogènes impose la mise en place de procédures de production de services réseaux indépendantes des technologies sous-jacentes: l'usage de politiques génériques et agnostiques à quelque technologie que ce soit doit être privilégié. Ce besoin suppose la disponibilité d'outils capables d'orchestrer l'allocation des ressources tout en facilitant la gestion des équipements impliqués dans la fourniture d'un service de connectivité, de sorte qu'il soit possible de s'affranchir de fonctions relais (*proxy*) embarquées dans les équipements, au profit d'une interaction directe avec les différents processus (fonctions de routage et d'acheminement du trafic, par exemple).

4.4 Les différents niveaux d'orchestration

La fonction d'orchestration de services repose sur l'exposition, la sélection et la négociation des paramètres caractéristiques d'un service de connectivité, y compris son périmètre, comme par exemple :

- des paramètres d'acheminement et de routage tels que l'ensemble des sites devant être interconnectés au travers d'un réseau privé virtuel, le plan d'adressage associé, etc.,
- des paramètres de performance (par exemple, ceux associés à la classification et au traitement du trafic),
- des paramètres de sécurité (par exemple, les filtres de trafic à mettre en œuvre), etc.

La négociation dynamique [13] des paramètres d'un service entre un client et un fournisseur s'établit dans ce plan d'orchestration de service. La sélection des différentes fonctions élémentaires participant à la conception d'un service de connectivité et les résultats de la négociation reflétant les besoins du client (utilisateur final, application, opérateur tiers) alimentent ainsi le processus de prise de décision (d'allocation dynamique de ressources, de mise en place de politiques instanciées par la nature du service de connectivité) caractéristiques de l'intelligence SDN.

En complément à l'orchestration de services, l'orchestration du processus de déploiement et de gestion du cycle de vie de ces services est à considérer également. Cette forme d'orchestration, focalisée sur la gestion de ressources, fait l'objet de travaux de standardisation importants au sein de l'ISG (*Industry Specification Group*) NFV de l'ETSI: l'architecture MANO (*MANagement and Orchestration*, [14]) est ainsi constituée d'un orchestrateur de fonctions réseau virtualisées (NFVO), en charge notamment de

la gestion du cycle des services réseau, de leur production à leur exploitation, et de la supervision des processus d'allocation de ressources à ces services (voir figure 3).

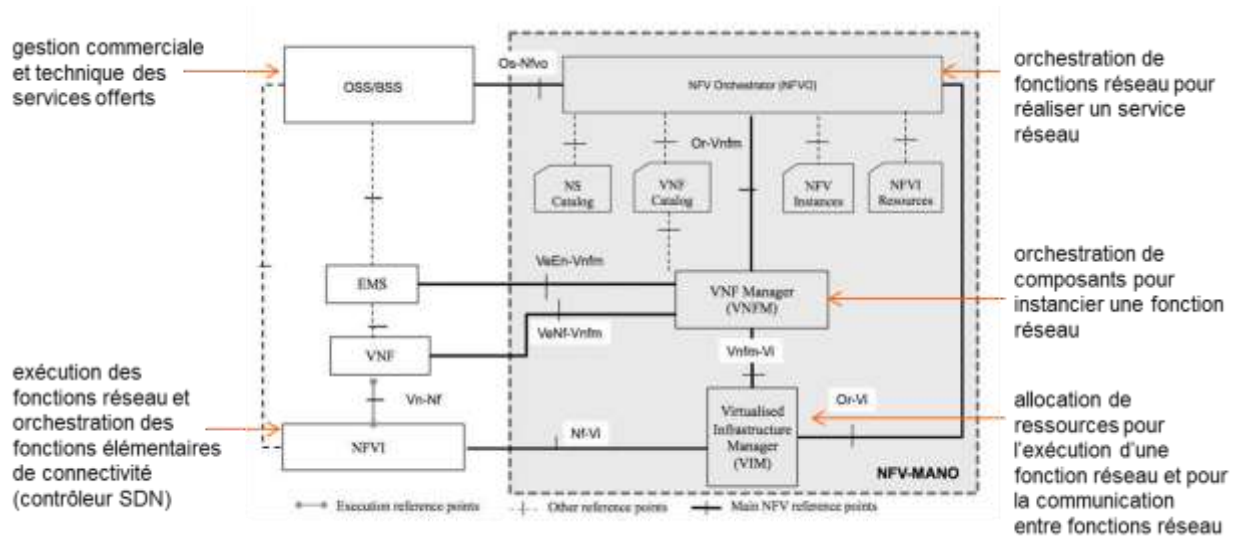


Figure 3 : L'infrastructure MANO [14].

Un NFVO s'appuie sur des gestionnaires de fonctions réseau virtualisées et de leur cycle de vie (VNFM, *Virtualized Network Function Manager*), ainsi que sur des gestionnaires de l'infrastructure virtualisée (VIM, *Virtualized Infrastructure Manager*).

La structure VIM est notamment responsable des décisions d'allocation de ressources de calcul, de stockage et des ressources réseaux dans une portion d'infrastructure NFV (NFVI, *Network Function Virtualisation Infrastructure*). Un VIM est aujourd'hui typiquement mis en œuvre sur la base de logiciels OpenStack et peut à son tour s'appuyer sur un contrôleur SDN pour gérer la connectivité entre ressources de calcul. Des projets comme OPNFV [15] travaillent par exemple à l'intégration d'un VIM avec des contrôleurs tels que ceux développés par les initiatives OpenDayLight [16] ou ONOS [17].

On peut remarquer que chacun des trois blocs MANO met en œuvre un processus d'orchestration, mais à différents niveaux d'abstraction. Pour simplifier, on peut dire qu'un NFVO orchestre des VNF (*Virtualized Network Function*, fonction réseau virtualisée) pour en faire des services réseaux, un VNFM orchestre des composants pour en faire des VNF tandis qu'un VIM orchestre l'allocation des ressources nécessaires pour déployer un composant de VNF.

AT&T a par ailleurs défini l'architecture ECOMP (*Enhanced Control, Orchestration, Management and Policy*), dont la composante d'orchestration permet entre autres capacités d'instancier en temps réel des machines virtuelles et de gérer dynamiquement la mobilité des machines virtuelles selon les ressources disponibles et en fonction des services de connectivité souscrits par les clients [18]). L'architecture ECOMP recouvre largement celle de MANO mais intègre d'autres aspects connexes, en particulier une orchestration de services articulant les fonctions MANO avec les fonctions de configuration des applications réseaux elles-mêmes (Figure 4). On retrouve des principes similaires dans l'architecture logicielle du projet open source Open-O [19]. Orange s'est récemment associé à AT&T pour évaluer et développer l'approche ECOMP.

Concernant la gestion des fonctions virtualisées (instanciation, cycle de vie, migration, etc.), Orange travaille depuis plusieurs années, en complément de MANO et d'ECOMP, sur le concept de GlobalOS [20] qui propose une vision globale du réseau de demain. A l'instar de l'OS embarqué dans un ordinateur, GlobalOS a pour objectif de gérer tout type de ressource, non seulement IT (stockage, calcul) mais aussi bande passante, type de connectivité, etc., et à ordonnancer leur usage. Il offre ainsi aux applications une gestion optimisée, dynamique et de bout en bout de la connectivité réseau, en prenant en compte l'ensemble des ressources disponibles (par exemple, les terminaux, box, points de présence réseau, data centers centralisés, etc.).

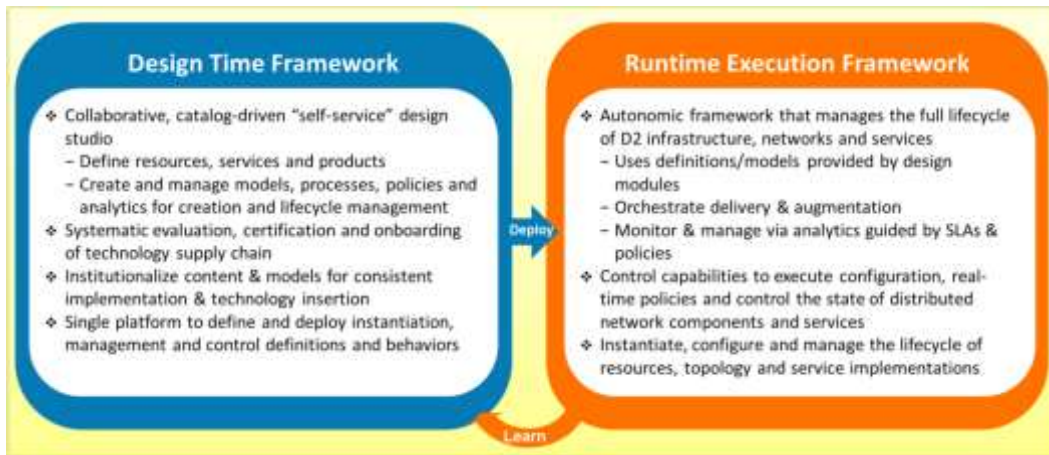


Figure 4 : Principes de la plateforme ECOMP d'AT&T [18].

A titre d'illustration, les outils de gestion de plateformes cloud comme OpenStack agissent sur les ressources informatiques mais n'ont pas une vision du réseau d'interconnexion. De la même manière, les outils comme OpenDayLight peuvent avoir une vision des ressources du réseau d'interconnexion et du routage mais ne contrôlent pas du tout les ressources IT; ils offrent au mieux des modules d'extension ou plugins (comme Neutron) pour établir une connectivité entre data centers sans pour autant disposer d'une vision globale.

Or, le manque de vision globale des ressources peut avoir un impact sur les performances de fonctions réparties, notamment pour les fonctions réseau avec des contraintes de latence et dont la réactivité est directement liée à la perception client. Les premières démonstrations de GlobalOS ont été réalisées par Orange pour illustrer la gestion de fonctions de cœur mobile capables de migrer en fonction de différents critères (par exemple le taux d'occupation des liens du réseau) ou l'instanciation à la demande de fonctions de réseau d'accès radio. Des travaux ont également été réalisés pour instancier dynamiquement des fonctions réseaux liées aux communications Web temps-réel [21].

4.5 De l'importance des modèles d'information et de données

Un service de connectivité repose sur la combinaison d'un ensemble de fonctions élémentaires (routage et acheminement, qualité de service, sécurité, etc.) et sa production est conditionnée par l'application d'un ensemble de politiques caractéristiques de la stratégie technique d'un fournisseur de services. Les informations descriptives de ces services et politiques alimentent le processus de prise de décision. L'allocation dynamique de ressources s'appuie par exemple sur ces informations structurées selon des modèles d'information et des modèles de données.

L'une des caractéristiques de l'effort d'abstraction associé à ces modèles est de s'affranchir des technologies sous-jacentes et, par conséquent, de limiter la dépendance d'un fournisseur de service vis-à-vis d'un constructeur. Cette indépendance est particulièrement critique dans un contexte où le déploiement de réseaux et de services s'appuie sur des environnements technologiquement hétérogènes. C'est dire l'importance de pouvoir disposer de modèles d'information et de données standards, capables de faciliter l'orchestration, la production et l'exploitation d'un ensemble de services. Des travaux sont actuellement en cours à l'ETSI comme à l'IETF pour définir ces modèles, tant au niveau sémantique que syntaxique.

A l'ETSI, le format TOSCA [22], adossé au langage YAML, a été sélectionné pour permettre une représentation standard des descripteurs de VNF spécifiant les contraintes de déploiement d'une VNF, ses besoins en ressources d'infrastructure et autres éléments nécessaires à la gestion de son cycle de vie.

A l'IETF, le protocole NETCONF [23] a la capacité de véhiculer des informations de configuration formatées selon le langage de modélisation YANG. La récente spécification RESTCONF [24] permet quant à elle de réaliser ces opérations de configuration par des API REST, dans une optique de *webification*.

L'approche SDN permet d'introduire un niveau d'automatisation élevé dans le processus de production de services de connectivité, de l'exposition et la négociation des paramètres caractéristiques de ces services à l'allocation dynamique des ressources nécessaires à la mise en place de ces services. La logique de calcul SDN repose sur la définition et la mise en place d'un ensemble de politiques (acheminement de trafic, routage, qualité de service, sécurité). Ces politiques reposent ainsi sur un ensemble d'instructions (configuration et activation de fonctions) qui sont transmises à l'ensemble des ressources impliquées dans la fourniture et l'exploitation d'un service de connectivité : à ce titre, des architectures de contrôle de qualité de service et de comptage comme PCC (*Policy and Charging Control*) dans les réseaux cœur mobiles 4G peuvent également bénéficier des techniques SDN.

Ce principe de commande à base de politiques trouve des applications dans la gestion de réseau bien au-delà de la commande de fonctions réseau, par exemple dans la prise de décision de déploiement de fonctions réseau virtualisées (choix de la localisation d'un serveur où déployer une application ou une fonction réseau, choix du nombre d'instances à déployer, choix des ressources à lui allouer, etc...). Ainsi, l'ETSI vient de démarrer des travaux sur le couplage des fonctions MANO précédemment évoquées à un système de décision à base de politiques [25]. Les architectures de services applicatifs pourront également bénéficier de ce mode de commande/gestion [26].

5. Vers une révolution dans l'interconnexion des réseaux et services

Dans les sections précédentes, nous avons présenté les impacts de la *softwarisation* et de la *webification* au sein d'un réseau opérateur. Ces transformations peuvent également impacter les mécanismes d'interconnexion entre les réseaux. Aujourd'hui, fournir des services de communication à des utilisateurs raccordés à des réseaux différents nécessite de mettre en œuvre des procédures d'interconnexion complexes, faisant appel à des protocoles de signalisation de la couche application. Ceci pose souvent des problèmes d'interopérabilité, à cause des nombreuses options spécifiées dans les standards (mais non

nécessairement implémentées) ou plus simplement lorsque plusieurs standards concurrents existent ou encore lorsque des technologies différentes sont employées dans les réseaux concernés (par exemple, des appels établis depuis un réseau téléphonique commuté vers l'utilisateur d'un Softphone SIP). La *softwarisation* et la *webification* permettent d'envisager des approches alternatives.

Certains scénarios d'architecture pour les réseaux 5G envisagent ainsi une refonte totale des procédures d'itinérance [27]. Dans les réseaux de 2^{ème} et 3^{ème} générations, lors de l'arrivée d'un client mobile dans un réseau visité, le profil de cet utilisateur est rapatrié depuis son réseau nominal dans un commutateur desservant la zone visitée. Ce commutateur vient alors paramétrer l'exécution de services normalisés, minimisant ainsi l'impact de choix d'ingénierie qui peuvent varier d'un opérateur à l'autre.

Dans les réseaux de 4^{ème} génération employant la technologie IMS (*IP Multimedia Subsystem*) pour les services conversationnels, les services sont entièrement exécutés dans le réseau nominal, ce qui règle en partie le problème précédent mais présente dans certains cas des difficultés d'interconnexion (par exemple dues à des variantes du protocole SIP incompatibles entre deux réseaux) ou en termes de latence.

La virtualisation permet d'envisager des solutions dans lesquelles, lors de l'arrivée d'un client mobile dans un réseau visité, un ou plusieurs serveurs d'applications virtualisés sont déplacés depuis le réseau nominal vers une infrastructure de ce réseau visité. Le réseau visité peut alors rendre au client les services personnalisés auxquels il a souscrit sans intervention du réseau nominal. On évite ainsi de complexes procédures de signalisation inter-réseaux nécessaires à la mise en œuvre de ces services, tout en bénéficiant des avantages (tels que la réduction de latence) d'une exécution des services au plus près des utilisateurs.

Des politiques de sécurité restent néanmoins à construire pour ces approches, afin que le code issu du réseau nominal ne risque pas de mettre en danger l'intégrité du réseau visité. Les services personnalisés à garantir en cas d'itinérance (ou roaming) restent également à préciser. D'une façon similaire, dans le cadre de l'interconnexion entre réseaux de distribution de contenus (CDN, *Content Delivery Networks*) [28], il devient envisageable de migrer dynamiquement un serveur de contenu virtualisé vers des serveurs physiques situés sur un site proche des clients à desservir [29]. De même, dans le cadre des services conversationnels, la technologie WebRTC permet également au terminal de l'appelant de récupérer auprès du serveur associé à l'appelé un script logiciel incluant le protocole de signalisation, son paramétrage, et les services à exécuter.

Conclusion

La *softwarisation* et la *webification* impactent l'ensemble des modes de production et d'exploitation des réseaux, tant les aspects techniques, architecturaux, qu'humains et organisationnels. Dans cet article, nous avons fait le point sur les transformations induites des réseaux, leur conception, leur production et leur interconnexion. En résumé, les réseaux de demain seront de véritables plates-formes d'infrastructure distribuées et programmables, offrant de la connectivité couplée à des capacités d'exécution et de stockage de données.

Les différentes fonctions réseau et services seront supportées par des modules logiciels qui pourront être assemblés dynamiquement grâce à des API. Ces transformations pourraient donner naissance à de nouvelles segmentations de marché, par exemple inspirées du Cloud Computing, qui supportent différents modes d'ouverture (infrastructure, réseau et plateforme, logiciel offerts « en tant que service »). De fait, une telle segmentation sonne le glas de la typologie classique des réseaux (accès/collecte/cœur) au bénéfice de la convergence des différents accès (fixes et mobiles).

En outre, la *softwarisation* des réseaux permet d'englober dans l'infrastructure des éléments qui en étaient jusqu'alors exclus, en particulier les terminaux des utilisateurs qui, au rythme des développements des Smartphones et des tablettes, deviennent de plus en plus sophistiqués. Ces derniers sont des éléments informatiques qu'il devient possible d'intégrer à l'infrastructure logicielle d'un réseau comme n'importe quel autre élément de réseau. Ainsi, sous l'impulsion de la *softwarisation*, les réseaux deviennent capables de s'étendre jusqu'au terminaux, ceux-ci hébergeant alors eux-mêmes des fonctions réseau.

Plus généralement, la périphérie des réseaux deviendra un enjeu majeur pour les opérateurs avec un foisonnement de capacités informatiques (calcul, stockage, connectivité) offertes non seulement par les terminaux mais aussi par de nouveaux équipements tels que les drones, les ballons, etc. La détermination de nouveaux modèles économiques devient une nécessité impérieuse pour exploiter au mieux toutes ces évolutions (*uberisation*, marché de connectivité, etc.).

D'autres ruptures connexes vont également contribuer à transformer les réseaux dans les prochaines années : une exploitation plus systématique des données qu'ils produisent, couplée avec l'utilisation de sources de données de plus en plus diversifiées, telles que celles fournies par les réseaux sociaux. Cette rupture qui combine la mise à disposition de méga-données ou *big data* et leur traitement par des mécanismes d'intelligence artificielle (par exemple l'apprentissage machine ou *machine learning*) pour automatiser encore plus l'exploitation des réseaux représente de fait un axe supplémentaire de la révolution logicielle que vivent les réseaux et services de communication.

Bibliographie

- [1] Manzalini A. et al, *Software-Defined Networks for Future Networks and Services*, White Paper, IEEE SDN Initiative, Avril 2014
- [2] ETSI, *Network Functions Virtualisation – Introductory White Paper*, Octobre 2014
- [3] Humble J. and Farley D., *Continuous Delivery: Reliable Software Releases Through Build, Test, and Deployment Automation*, Addison-Wesley Professional, Octobre 2010
- [4] Li L. and al, *Design Patterns and Extensibility of REST API for Networking Applications*, IEEE Transactions on Network and Service Management, Vol. 13, No1, Mars 2016.
- [5] Bertin E., Cubaud S., Tuffin S., Crespi N. and Beltran V., *WebRTC, the Day After: What's Next for Conversational Services?*, 17th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks (ICIN), pp. 46-52, Octobre 2013.
- [6] ETSI, *Mobile Edge Computing – Introductory Technical White Paper*, Septembre 2014
- [7] China Mobile Research Institute, *C-RAN - The Road Towards Green RAN*, White Paper, Version 1.0.0, Avril 2010
- [8] Gosselin S., Mamouni T., Bertin P., Torrijos J., Breuer D., Weis E., Point J-C., *Converged fixed and mobile broadband networks based on next generation point of presence*, Future Network and Mobile Summit, Juillet 2013.

- [9] Bonomi F. and al, *Fog Computing and Its Role in the Internet of Things*, ACM SIGCOMM International Conference on Mobile Cloud Computing, 2012.
- [10] Coupaye T., *Fog Computing and Geo-Distributed Cloud*, Blog de la Recherche d'Orange, Novembre 2014.
- [11] Sornin N., Luis M., Eirich T., Kramp T., Hersent O., *LoRaWAN Specification*, LoRa Alliance, v1.0, Janvier 2015.
- [12] Boucadair M., Jacquenet C., *Software-Defined Networking: A Perspective from within a Service Provider Environment*, RFC 7149, Mars 2014.
- [13] Boucadair M., Jacquenet C., *IP Connectivity Provisioning Profile (CPP)*, RFC 7297, Juillet 2014.
- [14] ETSI, *Network Functions Virtualisation (NFV): Management and Orchestration*, ETSI GS NFV-MAN 001, v1.1.1, Decembre 2014.
- [15] *OPNFV: Paving the Way to Open Source NFV*, White Paper, Novembre 2015.
- [16] Meyer D., *OpenDaylight: Introduction and Overview*, Octobre 2013.
- [17] Open Network Operating System (ONOS), www.onosproject.org.
- [18] AT&T, *ECOMP (Enhanced Control, Orchestration, Management & Policy) Architecture*, White Paper, 2016.
- [19] *Open Source Orchestration Platform, Open-O*, <https://www.open-o.org/>, 2016
- [20] Duprez M., Guillouard K., Hatefi A., *Vers une plateforme ouverte et programmable: GlobalOS*, Blog de la recherche Orange, Mars 2016.
- [21] Boubendir A., Bertin E., Simoni N., *On-Demand, Dynamic and at-the-Edge VNF Deployment Model Application to Web Real-Time Communications*, 3rd International Workshop on Management of SDN and NFV Systems (ManSDN/NFV 2016), co-located with CNSM 2016, Novembre 2016.
- [22] OASIS Forum, *TOSCA Simple Profile for Network Functions Virtualization (NFV)*, Version 1.0, Mars 2016.
- [23] Enns R., Bjorklund M., Schoenwalder J., and Bierman A., *Network Configuration Protocol (NETCONF)*, RFC 6241, Juin 2011.
- [24] Bierman, A., et al., *RESTCONF Protocol*, draft-ietf-netconf-restconf, Work in Progress, Octobre 2016.
- [25] ETSI, *Network Functions Virtualisation (NFV); Management and Orchestration*, ETSI GS NFV-IFA 023; Report on Policy Management in MANO, Avril 2016
- [26] Kim W., Youn C.-H., *A Policy-Based Application Service Management in Mobile Cloud Broker*, International Conference on Cloud Computing, 2014, Guilin, China, Octobre 2014.
- [27] Lundqvist H. et al., *Service Program Mobility: A New Paradigm for Mobile Operators' Service Delivery*, Journal of Communications, Vol. 7, N° 2, Février 2012.
- [28] Niven-Jenkins B., Le Faucheur F., Bitar N., *Content Distribution Network Interconnection (CDNI)*, RFC 6707, Septembre 2012.
- [29] ETSI, *Network Functions Virtualisation (NFV); Use Cases*, ETSI GS NFV 001, Octobre 2013.