



La virtualisation des fonctions des réseaux (NFV)

Bruno Chatras

Président du groupe de travail ETSI NFV

Alors que le processus de virtualisation des fonctions des réseaux (NFV) s'accélère avec l'arrivée de la 5G, cet article propose de faire le point sur cette technologie et son évolution.

Introduction

Le principe de la virtualisation des fonctions des réseaux (en abrégé, fonctions réseau) et l'acronyme NFV (*Network Functions Virtualisation*) sont apparus pour la première fois dans un livre blanc fondateur signé par treize des plus grands opérateurs de télécommunication, présenté en octobre 2012 lors du congrès "SDN and OpenFlow World

Congress", à Darmstadt, en Allemagne¹. Ce document exposait les motivations de cette approche et invitait les acteurs des industries de l'informatique et des télécommunications à collaborer pour la concrétiser. Dans ce contexte, le terme

¹ Network Functions Virtualisation: An Introduction, Benefits, Enablers, Challenges & Call for Action, White Paper – https://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper.pdf

virtualisation porte une double signification. D'une part, il fait référence à l'idée que les équipements de réseau deviennent virtuels au sens où les fonctions réseau ne sont plus indissociables d'un équipement physique spécialisé pour chacune d'elles. D'autre part, il fait référence à la technique informatique dite de virtualisation qui est employée pour partitionner les serveurs d'une infrastructure NFV en plusieurs environ-

nements d'exécution étanches pouvant héberger les logiciels de plusieurs fonctions réseau indépendantes.

NFV est aujourd'hui une réalité dans l'industrie des télécommunications et la 5G va jouer un rôle particulier dans l'accélération de l'adoption de cette technologie. Il s'agit en effet du premier cas d'usage où l'architecture fonctionnelle d'un réseau a été élaborée après son apparition. Ainsi l'architecture fonctionnelle des réseaux 5G est conçue pour tirer profit des avantages de NFV et tenir compte des contraintes que cela amène. On dit parfois qu'il s'agit d'une conception *cloud-native*.

Presque dix ans après la publication de ce livre blanc et à l'ère de la 5G, cet article se propose de faire le point sur la technologie NFV et ses applications, tout en examinant son influence sur l'industrie des télécommunications.

Les principes fondateurs, les motivations

Les réseaux de télécommunication sont constitués de multiples fonctions assurant le contrôle des communications et le transport de leur contenu. La notion

de fonction réseau est à prendre au sens le plus large. Elle désigne aussi bien les fonctions de base des réseaux telles que des routeurs ou commutateurs de paquets que des fonctions spécifiques à certains usages comme des serveurs de téléphonie sur IP² ou de distribution de contenus vidéo, ou celles spécifiques aux réseaux mobiles. Pour un éventail plus complet des cas d'usage de la technologie NFV le lecteur pourra consulter le document ETSI GR NFV 001³.

La virtualisation des fonctions des réseaux est une transformation fondamentale de la manière de les déployer et de gérer leur cycle de vie. Avant l'avènement de la technologie NFV, ces fonctions étaient pour la plupart indissociables de l'équipement spécialisé qui les hébergeait, le couple matériel/logiciel étant vendu aux opérateurs comme un produit intégré par les grands équipementiers du secteur des télécommunications. NFV vise à briser ce couplage, en appliquant les principes de l'informatique en nuage (*cloud computing*).

Les logiciels de ces fonctions sont alors achetés indépendamment de tout équipement matériel puis installés sur des serveurs informatiques banalisés, offrant des capacités importantes de traitement, de stockage et de transport d'information. Ces serveurs sont typiquement équipés de processeurs polyvalents par opposition à des processeurs spécialement conçus pour les équipements de télécommunication. Ils sont regroupés en pools déployés sur différents sites, formant une infrastructure d'exécution répartie. Le lecteur reconnaîtra ici le principe des centres de données (*data centres*) déjà largement employés pour l'hébergement d'autres types d'applications informatiques. Une infrastructure NFV peut être considérée comme une fédération de *data centres* répartis géographiquement. Le placement des instances logicielles sur les serveurs de l'infrastructure est effectué dynamiquement sous le contrôle de fonctions de gestion et d'orchestration spécifiques (figure 1).

La particularité de NFV réside dans les fortes exigences des services de télécommunication en matière de performance et disponibilité. Les performances attendues dépendent du type

² IP: Internet Protocol

³ ETSI GR NFV 001 « Network Functions Virtualisation (NFV); Use Cases » – <https://tinyurl.com/jfxwrrxh>

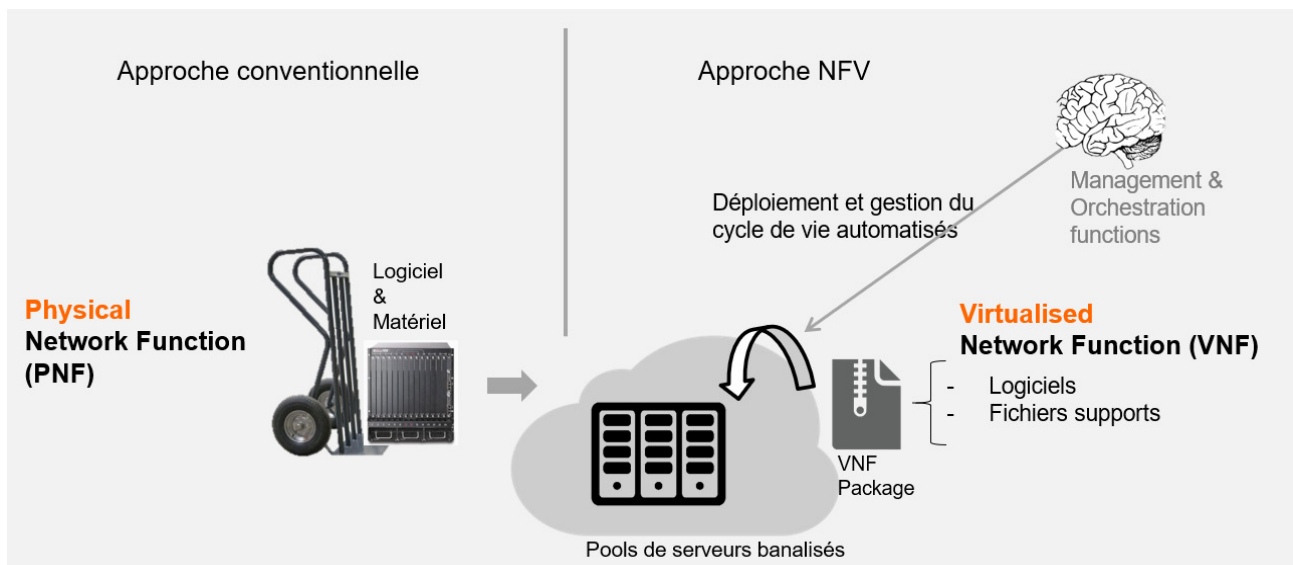


Figure 1 : Le principe d'évolution vers la virtualisation des fonctions des réseaux.

de fonction réseau et sont caractérisées par de très gros volumes de trafic à transférer ou de requêtes à traiter dans des délais fortement contraints. Notons que la disponibilité attendue d'un réseau de télécommunication est supérieure à 99,999 % du temps, c'est-à-dire qu'une indisponibilité de plus de 5 minutes par an n'est pas acceptable. Ces exigences sont appelées à croître puisque certains cas d'usage de la 5G, en particulier dans le domaine de l'industrie dite 4.0, imposent une disponibilité de 99,9999 %. La haute disponibilité des fonctions réseau est d'autant plus critique que contrairement à la majorité des applications hébergées traditionnellement dans des *data centres*, beaucoup de ces fonctions ne sont pas des extrémités de communications mais des intermédiaires en coupure de l'intégralité du trafic émis et reçu par un grand nombre d'utilisateurs, de sorte que l'impact de leur défaillance a des conséquences amplifiées par rapport à celle par exemple d'un serveur Web. Ces exigences en matière de disponibilité et performance conduisent beaucoup d'opérateurs à déployer des infrastructures physiques spécifiques

à NFV ou du moins configurées et optimisées pour ce type d'usage, parfois désignées par le terme « *Telco Cloud* ». Toutefois, les acteurs du *cloud* public, s'intéressent de plus en plus au sujet, en proposant des offres d'infrastructure NFV ou en devenant eux-mêmes fournisseurs de fonctions réseau. Les solutions AWS d'Amazon ⁴ sont un exemple du premier cas. L'acquisition récente des entreprises Affirmed Networks (réseaux mobiles) et Metaswitch (services vocaux et messagerie) par Microsoft illustre le second cas.

Pour les opérateurs, les avantages attendus d'une telle approche sont une réduction des coûts d'investissement et d'exploitation mais surtout un gain sans précédent en matière d'agilité. La réduction des coûts d'investissement est liée à la mutualisation des serveurs et à leur nature banalisée mais dépend fortement du contexte spécifique à chaque opérateur. Par exemple, NTT DOCOMO

annonçait en 2018 avoir déjà observé une réduction de 10 % de ses coûts d'investissement en virtualisant une partie des équipements de son réseau mobile ⁵, alors que d'autres considèrent que ce n'est pas l'aspect sur lequel les gains apportés par NFV seront déterminants.

La réduction des coûts d'exploitation est directement liée à l'automatisation complète des processus de déploiement et de gestion des fonctions réseau, rendue possible par l'approche NFV. Toutefois, au-delà de la réduction des coûts, ce sont bien la flexibilité et la rapidité qu'apporte cette technologie pour déployer et faire évoluer des réseaux à la demande qui justifient son adoption dans l'industrie.

Le cadre architectural

La première action lancée dans l'industrie au moment de la publication du livre blanc mentionné en introduction fut la

4 Amazon EC2 Overview and Networking Introduction for Telecom Companies Implementation Guide – <https://tinyurl.com/n4z9vm2>

5 News Analysis; Light Reading; 10/10/2018 – <https://tinyurl.com/p69wsj54>

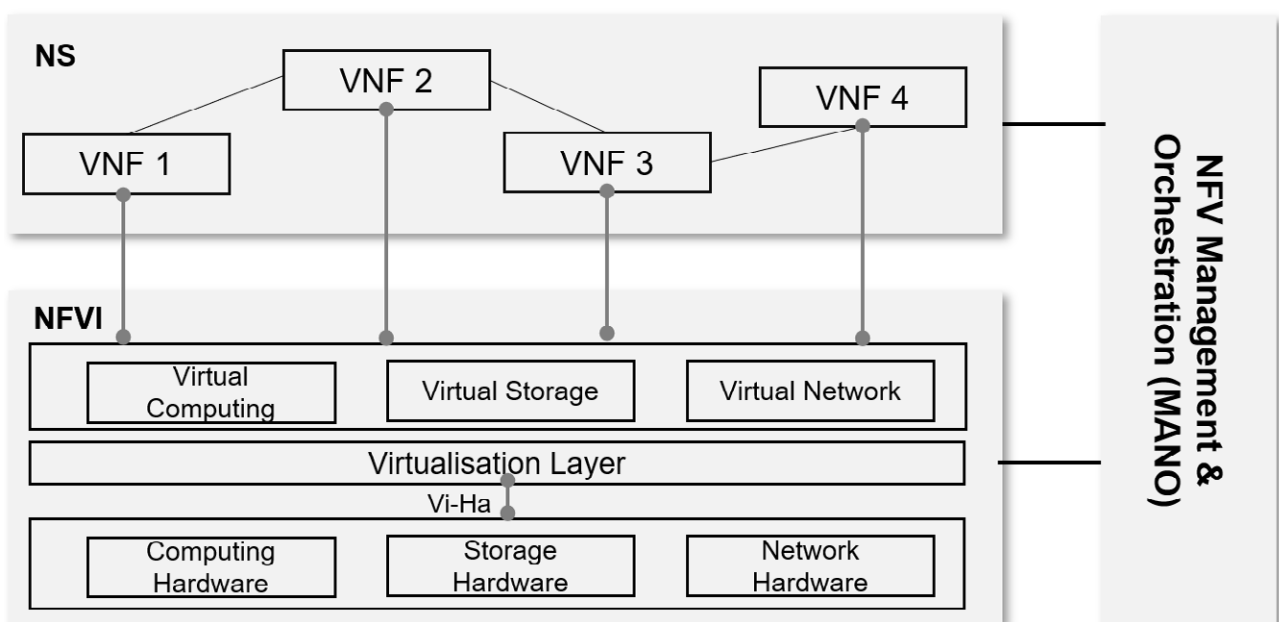


Figure 2 : Cadre architectural NFV simplifié.

création à l'ETSI ⁶ d'un groupe spécial réunissant des acteurs du secteur des télécommunications et de l'industrie informatique au plan mondial, avec pour mandat de développer les recommandations et spécifications permettant la mise en œuvre du concept NFV dans un environnement multi-vendeurs. Selon le cadre architectural de référence spécifié par l'ETSI un système NFV est constitué de trois domaines (figure 2) :

- les fonctions réseau virtualisées (*Virtualised Network Function – VNF*) et les services réseau (*Network Service – NS*) constitués en assemblant celles-ci ;
- l'infrastructure NFV (*NFV Infrastructure – NFVI*) fournissant les ressources permettant l'exécution du logiciel de ces fonctions (serveurs) et la communication entre-elles (routeurs) ;
- les fonctions de gestion et d'orchestration (*NFV-MANO – NFV Management and Orchestration*) qui assurent l'articulation entre les deux autres domaines, en effectuant, par exemple, le choix d'un serveur de l'infrastructure sur lequel déployer une instance de fonction réseau particulière.

Les serveurs d'une infrastructure NFV sont répartis sur plusieurs sites appelés NFVI-PoP ⁷. En ce sens NFV est compatible avec une approche dite *edge computing*. Certaines initiatives industrielles se focalisent sur ce type de déploiement où les fonctions réseaux sont déployées dans des NFVI-PoP périphériques, plus petits que les *data centres* centralisés. C'est en particulier le cas du groupe MEC⁸ de l'ETSI et de l'alliance O-RAN ⁹. Le livre blanc fondateur évoqué au début de cet article va même plus loin en mentionnant

la possibilité de déployer une partie des serveurs d'une infrastructure NFV dans les locaux d'un client. Certaines études envisagent même le cas de serveurs mobiles embarqués dans des drones ¹⁰.

Chaque serveur au sein d'un NFVI-PoP est partitionné en plusieurs environnements d'exécution virtuels indépendants, au moyen d'une solution informatique de virtualisation. La technologie NFV n'est pas intrinsèquement liée à une solution particulière. Dans leur grande majorité les premiers déploiements de cette technologie ont reposé sur la solution la plus ancienne et donc la mieux maîtrisée, à savoir la création de machines virtuelles sous contrôle d'une couche logicielle appelée hyperviseur, par exemple le logiciel KVM ¹¹. Toutefois, une alternative, considérée comme plus flexible et légère, a rapidement émergé et semble même s'imposer majoritairement dans le cadre de la virtualisation des réseaux 5G : les conteneurs. Alors qu'une machine virtuelle est la reproduction virtuelle d'une machine physique et dispose de son propre système d'exploitation, les conteneurs partagent le système d'exploitation du serveur sur lequel ils sont créés. Les mises en œuvre actuelles reposent quasi exclusivement sur le système d'exploitation Linux combiné à une couche logicielle de gestion de conteneurs appelée *Docker Engine* ¹², installée directement sur un serveur physique (approche dite *bare metal*) ou dans une machine virtuelle.

La plupart des VNF sont constituées de plusieurs composants (*VNF component – VNFC*), chacun contribuant à fournir une partie de la fonctionnalité globale de la VNF. Le nombre de composants est librement déterminé par le fournisseur de VNF et les interfaces entre ces com-

“ Les serveurs d'une infrastructure NFV sont répartis sur plusieurs sites appelés NFVI-PoP . En ce sens NFV est compatible avec une approche dite *edge computing*.”

posants sont typiquement propriétaires. Chaque instance de VNFC tourne dans sa propre machine virtuelle ou ses propres conteneurs. Les VNFC sont généralement instanciés plusieurs fois pour atteindre le dimensionnement voulu mais aussi pour garantir la haute disponibilité attendue. En effet la disponibilité typique des serveurs banalisés utilisés dans une NFVI étant inférieure à celle attendue d'une fonction réseau, le recours à la redondance intra-VNF constitue un moyen de garantir quand même une haute disponibilité.

Les fonctions de gestion et d'orchestration sont le cerveau d'un système NFV. Elles prennent en charge le cycle de vie des services réseau et des fonctions virtualisées qui les constituent, depuis leur instanciation jusqu'à leur suppression, en passant par les redimensionnements dynamiques (on parle d'élasticité). Leur comportement est piloté par une série de descripteurs contenant les caractéristiques des fonctions réseau à déployer et les informations nécessaires à leur assemblage pour former un service réseau cohérent. Ainsi, un descripteur de VNF (*VNFD – VNF Descriptor*) est un fichier fourni par le vendeur de la fonction, inclus dans une archive appelée VNF Package avec les logiciels à installer. Un VNFD permet de déterminer les ressources nécessaires pour déployer puis gérer la fonction réseau, par exemple : nombre et capacité des machines virtuelles à créer, type de connectivité interne et externe, ●●●

6 ETSI : European Telecommunications Standards Institute — Institut européen des normes de télécommunications

7 NFVI-PoP : NFVI Point of Présence – Point de présence de l'infrastructure NFV

8 MEC: Multiservices Edge Computing – <https://portal.etsi.org/TB-SiteMap/MEC/MEC-White-Papers>

9 Site de l'alliance O- RAN : <https://www.o-ran.org/>

10 A NFV system to support configurable and automated multi-UAV service deployments - Borja Nogales DroNet'18: Proceedings of the 4th ACM Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3213526.3213534>

11 KVM: Kernel-based Virtual Machine

12 Voir <https://docs.docker.com/engine/>

ainsi que les contraintes à respecter, par exemple ne pas déployer deux instances d'un même composant sur un même serveur physique pour des raisons de fiabilité.

Pour être interprétables par des systèmes de gestion et d'orchestration développés indépendamment des VNF, ces descripteurs doivent être conformes à un standard. Il existe deux standards ETSI applicables, l'un basé sur le langage TOSCA ¹³, l'autre sur le langage YANG ¹⁴.

Trois fonctions de gestion et d'orchestration principales sont définies par l'ETSI ¹⁵:

- l'orchestrateur NFV (NFVO – *NFV Orchestrator*) ;
- le gestionnaire de fonction réseau virtualisée (VNFM – *VNF Manager*) ;
- le gestionnaire d'infrastructure virtualisée (VIM – *Virtualised Infrastructure Manager*).

D'autres fonctions viennent compléter le paysage lorsque la technologie de virtualisation repose sur la création de conteneurs plutôt que de machines virtuelles.

Le NFVO dispose d'une vue globale sur les services réseau ainsi que sur les ressources de l'infrastructure. Il est le point de contact auquel s'adresse le système d'information de l'opérateur ¹⁶ pour lancer une action ou obtenir des informations sur une instance de service réseau. Le lecteur comprendra mieux le rôle de ces trois entités en suivant le processus d'instanciation d'un service réseau (figure 3).

Sur réception d'une demande d'instanciation d'un service réseau, le NFVO détermine les actions à entreprendre en examinant le contenu d'un descripteur de service réseau (NSD – *Network Service Descriptor*) identifié dans la demande. Ce descripteur contient la liste des VNF à instancier ainsi que des instructions sur la manière de les interconnecter. A partir de ces données, le NFVO fait appel à un ou plusieurs VNFM pour l'instanciation des VNF et à un ou plusieurs VIM pour créer des réseaux virtuels dans l'infrastructure permettant de transporter le trafic inter-VNF en respectant les objec-

tifs de qualité de service (débit, latence maximum, taux maximum de perte de paquets, etc.) indiqués dans le descripteur. Par exemple, un NSD peut imposer la création de deux réseaux virtuels, l'un pour transporter le trafic de signalisation, l'autre les données de l'utilisateur final du service réseau.

Un VNFM recevant une demande d'instanciation de VNF, détermine les actions à entreprendre en examinant le contenu d'un autre type de descripteur évoqué précédemment : un VNFD. A partir de ce contenu, le VNFM fait à son tour appel à un ou plusieurs VIM pour créer dans l'infrastructure des machines virtuelles pour héberger les composants logiciels de la VNF ainsi que des réseaux virtuels permettant de transporter le trafic entre ces composants en respectant également les objectifs de qualité de service indiqués dans le descripteur, comme pour le trafic inter-VNF.

On comprend à travers ce qui précède qu'un VIM est une entité en charge de gérer les ressources de l'infrastructure et de les allouer en fonction des besoins, jouant un rôle de *cloud manager*. Plusieurs VIM peuvent être impliqués dans le déploiement d'un service réseau dans la mesure où un VIM est généralement responsable d'un sous-ensemble de l'infrastructure, typiquement un site physique. Les principaux éléments d'infrastructure avec les-

13 TOSCA : Topology and Orchestration Specification for Cloud Applications

14 YANG: Yet Another Next Generation language – Il s'agit d'un langage de modélisation de données spécifié par l'IETF dans le document RFC 6020.

15 ETSI GS NFV 006, Network Functions Virtualisation (NFV) Release 2; Management and Orchestration; Architectural Framework Specification – <https://tinyurl.com/m3msayt8>

16 Désigné aussi par l'acronyme OSS/BSS (Operations Support Systems / Business Support Systems) dans la littérature NFV.

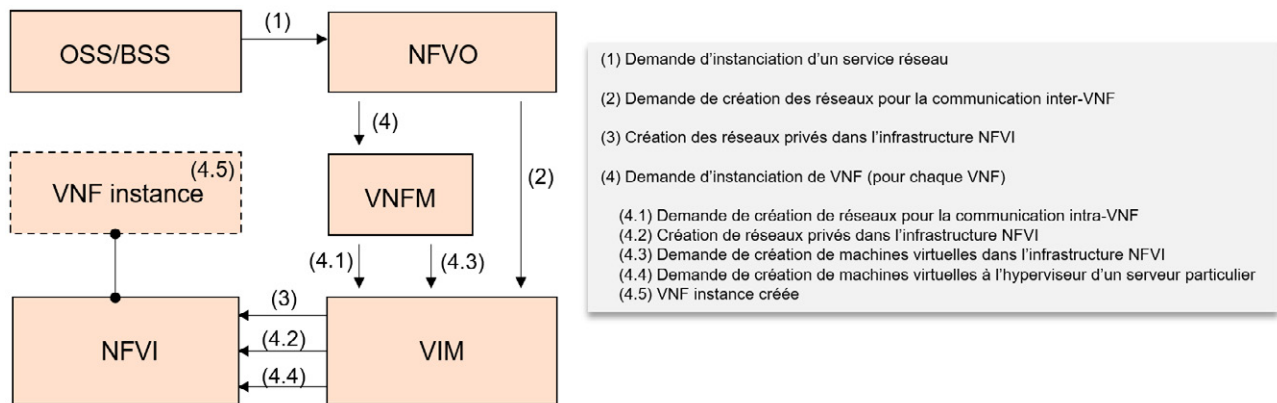


Figure 3 : Principe simplifié d'instanciation d'un service réseau.

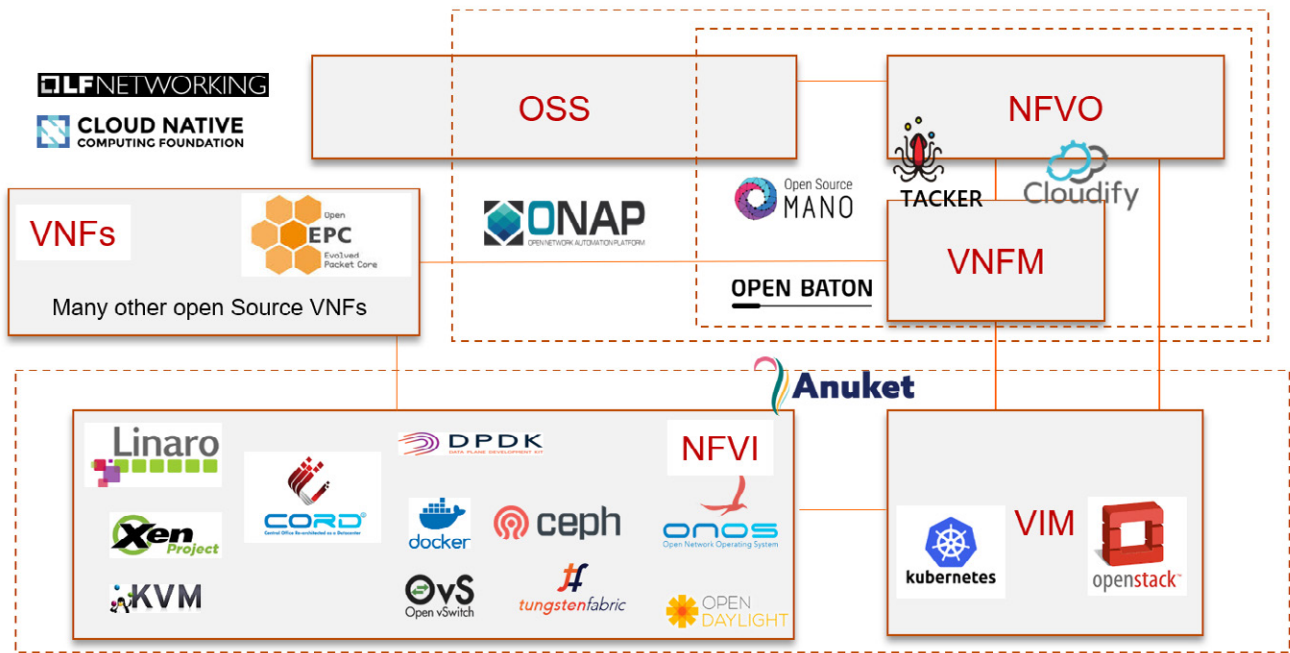


Figure 4 : Panorama non exhaustif des communautés open source impliquées dans NFV.

quels la fonction VIM est amenée à intégrer sont les hyperviseurs (pour la création des machines virtuelles), les commutateurs de trames Ethernet, les routeurs et les contrôleurs SDN ¹⁷. La suite de logiciels *open source* OpenStack ¹⁸ est l'une des solutions les plus utilisées pour réaliser la fonction VIM, même si les acteurs du *cloud* public se positionnent aussi avec leurs propres solutions.

Ces fonctions de gestion et d'orchestration communiquent en utilisant des API ¹⁹ REST ²⁰, standardisées spécifiquement à l'ETSI pour NFV ²¹ ou selon des standards de facto associés aux logiciels open source utilisés (ex. les API de la suite logiciel OpenStack dans le cas d'un VIM).

Le rôle des communautés open source

Les logiciels dits à code source ouvert (*open source*) sont omniprésents dans un système NFV (figure 4). On peut distinguer deux types de communautés *open source* : celles qui développent des logiciels spécifiquement pour NFV et celles qui en développent pour les technologies sous-jacentes (virtualisation et *cloud computing* en particulier). Dans la première catégorie, on trouve principalement des communautés qui développent et maintiennent des solutions de mise en œuvre des fonctions NFVO et VNFM, en particulier ONAP ²², OSM ²³ et la communauté OpenStack avec son projet Tacker ²⁴.

L'hyperviseur KVM, les autres composants de la suite logicielle OpenStack ou des logiciels de gestion et d'orchestration de conteneurs tels que Docker et Kubernetes sont des exemples emblématiques de la seconde catégorie, tout comme des contrôleurs SDN tels qu'OpenDaylight,

Tungsten Fabric ou ONOS. Notons que même si NFV est un cas d'utilisation parmi d'autres de ce type de logiciels, certaines exigences qui lui sont spécifiques peuvent conduire à les faire évoluer. Ainsi certaines évolutions récentes d'OpenStack ont été motivées par le besoin de répondre à des exigences spécifiques à la virtualisation des fonctions réseau.

NFV et les conteneurs

Conteneurs et approche *Cloud-Native*

L'évolution de NFV vers la conteneurisation fait partie intégrante d'un mouvement plus général vers une conception dite *cloud-native* du logiciel des fonctions réseau. Une VNF dite *cloud-native* est une VNF dont le logiciel a été pensé pour le *cloud*. C'est-à-dire conçu pour tirer profit des avantages du *cloud* (élasticité des ressources) mais aussi de ses contraintes (ex. pannes éventuelles des serveurs). La fondation CNCF ²⁵ définit le terme CNF (*Cloud Native Function*) ²⁶ ●●●

17 Software Defined Networks

18 Un panorama de ces logiciels est disponible sur le site de la communauté OpenStack – <https://www.openstack.org/>

19 API: Application Programming Interface

20 REST : Representational State Transfer

21 B. Chatras, «On the Standardization of NFV Management and Orchestration APIs,» in IEEE Communications Standards Magazine, vol. 2, no. 4, pp. 66-71, December 2018, doi: 10.1109/MCOMSTD.2018.1800032.

22 <https://www.onap.org/>

23 <https://osm.etsi.org/>

24 <https://docs.openstack.org/tacker/latest/>

25 CNCF: Cloud Native Computing Foundation

26 <https://github.com/cncf/toc/blob/main/DEFINITION.m>

●●● pour désigner ce type de VNF. Parmi les caractéristiques du logiciel d'une CNF, notons qu'il est développé pour s'exécuter dans des conteneurs mais aussi que son architecture repose sur des *microservices* ²⁷. Ainsi, ce logiciel est constitué de composants élémentaires (les *microservices*) les plus indépendants possible (faiblement couplés) les uns des autres de manière à pouvoir être mis à jour ou remplacés sans perturber le fonctionnement des autres composants. Le principe de structuration d'une VNF en composants n'est pas nouveau dans la mesure où les standards ETSI prévoient dès le début qu'une VNF soit structurée sous forme de plusieurs VNFC chacun dans sa machine virtuelle, mais une conception de type *microservices* induit un nombre de composants plus élevés que dans les architectures logicielles plus conventionnelles. Notons que cela conduit à un accroissement de complexité pour la communication entre ces composants, de sorte qu'on asso-

cie souvent à chaque *microservice* un *proxy* en charge de cet aspect pour simplifier le logiciel du *microservice* lui-même. Ce type de solution est désigné par le terme *service mesh*. Un exemple typiquement rencontré dans le cas des fonctions réseau 5G est la solution Istio ²⁸.

Evolution de NFV-MANO pour la gestion de conteneurs

L'intégration de la technologie de conteneurisation dans un système NFV ne se limite pas à remplacer chaque machine virtuelle par un conteneur. En effet, une instance de VNFC peut utiliser plusieurs conteneurs par exemple un conteneur hébergeant le logiciel principal et un second hébergeant le *proxy* évoqué précédemment. D'autre part cette intégration se fait avec pour objectif de pouvoir capitaliser sur les solutions de gestion de conteneurs du marché, en particulier le logiciel Kubernetes et son écosystème, dont le fonctionnement est différent de celui d'un VIM. Le système NFV-MANO

est complété par trois nouvelles fonctions (figure 5) ²⁹ :

- le gestionnaire du service d'infrastructure de conteneurs (CISM – *Container Infrastructure Service Management*) ;
- le registre d'images logicielles (CIR – *Container Image Registry*) ;
- le gestionnaire de groupes de conteneurs (CCM – *Container Cluster Management*).

Le CISM est la fonction à laquelle s'adressent le VNFM et le NFVO pour créer les conteneurs et réseaux virtuels d'infrastructure nécessaires au déploiement de VNF conteneurisées. Les mises en œuvre actuelles de cette fonction s'appuient majoritairement sur le logiciel open source Kubernetes. Les images lo-

27 Pour une définition du concept de microservices, le lecteur pourra consulter le site Web consacré à ce sujet : <https://microservices.io/>

28 <https://istio.io/>

29 ETSI GS NFV-IFA 040: "Network Functions Virtualisation (NFV) Release 4; Management and Orchestration; Requirements for service interfaces and object model for OS container management and orchestration specification" – <https://tinyurl.com/nkfd2e5d>

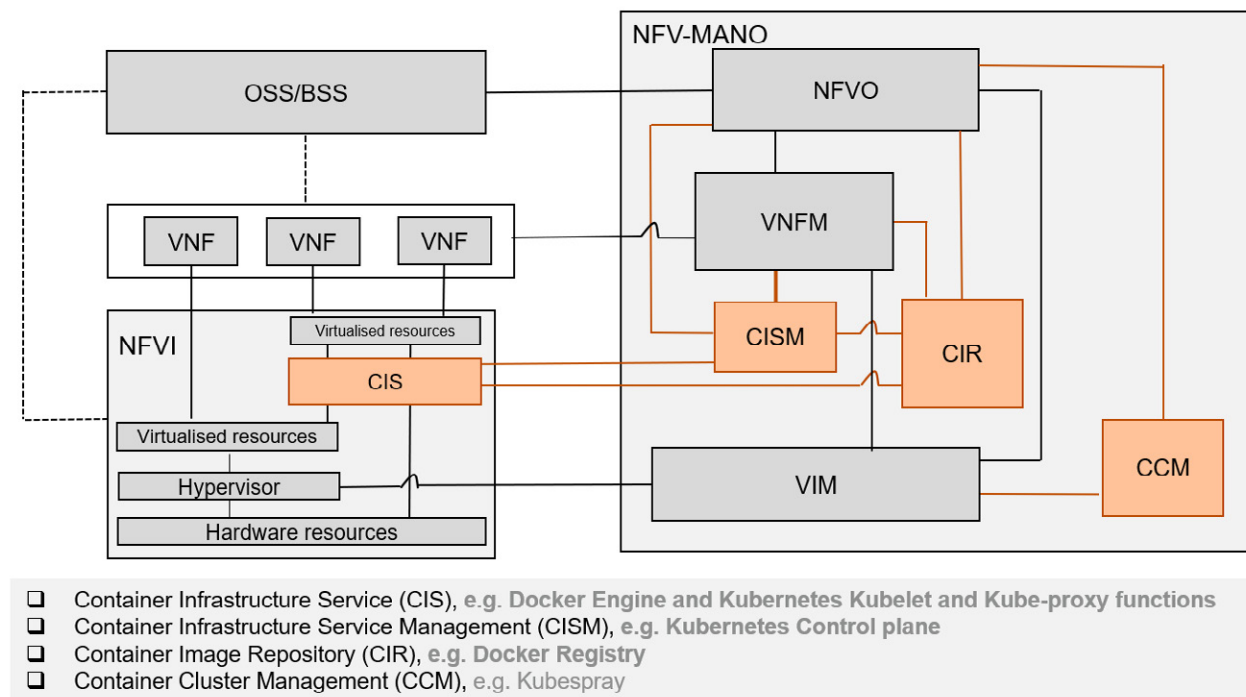


Figure 5 : Cadre architectural NFV étendu pour la gestion de conteneurs (représentation simplifiée).

gicielles à installer dans les conteneurs sont téléchargées depuis le CIR, dans lequel elles ont été préalablement déposées. Le CCM a pour mission de gérer des grappes de serveurs physiques ou virtuels appelées *clusters* sur lesquels le CISM a créé les conteneurs. Cela inclut en particulier la capacité à demander au VIM la création de machines virtuelles pour y déployer des conteneurs.

Performance et Portabilité

NFV présente une équation difficile à résoudre au premier abord : même virtualisées, les fonctions réseau doivent continuer de fournir des performances élevées en termes de volume de trafic écoulé et de temps de traitement d'un paquet, tout en s'exécutant sur des serveurs informatiques banalisés. La difficulté est particulièrement prégnante dans le cas des fonctions du plan de transfert des données émises et reçues par les utilisateurs. En pratique pour conserver de hautes performances l'industrie a recours à des solutions dites d'accélération. Il s'agit soit d'optimiser le logiciel de ces fonctions pour qu'il utilise les ressources de l'infrastructure de manière optimale (on parle d'accélération logicielle), soit d'ajouter au processeur principal, des processeurs auxiliaires vers lesquels il est possible de déporter l'exécution de certaines tâches fortement consommatrices de ressources de calcul (on parle d'accélération matérielle). Selon la nature des tâches à leur faire exécuter, les accélérateurs matériels peuvent prendre la forme d'une carte réseau évoluée (Smart NIC³⁰), d'une carte spécialisée ou même être externes aux serveurs hébergeant les fonctions réseau. Les processeurs embarqués dans ces accélérateurs peuvent être spécialisés ou reconfigurables, par exemple un circuit intégré de type FPGA³¹. Un exemple fréquemment cité

est celui d'une fonction réseau de type passerelle IPSec³² hébergée sur un serveur disposant d'une carte réseau capable de chiffrer/déchiffrer les entêtes de paquets IPSec de manière à ce que le logiciel de la fonction réseau n'ait à traiter que des paquets « en clair ». Toutefois, le recours à cette forme d'accélération crée souvent une dépendance du logiciel au matériel, allant à l'encontre de l'esprit initial sous-jacent à la technologie NFV, c'est-à-dire la portabilité des VNF d'un serveur à un autre. Dans l'exemple cité, la VNF doit communiquer avec l'accélérateur pour configurer les clés de sécurité nécessaires au traitement de chaque flux de données. A ce jour il n'existe pas d'interface standard pour cela. Il est donc nécessaire que le logiciel de la VNF soit compatible avec l'interface exposée par l'accélérateur installé dans le serveur hébergeant la VNF. Pour pallier cet inconvénient, l'ETSI a introduit l'idée d'une couche d'abstraction³³ permettant à l'infrastructure d'exposer des services d'accélération via des APIs génériques, en masquant celles exposées par les accélérateurs eux-mêmes. Des travaux dans cette direction sont en cours dans différentes communautés *open source* ainsi que dans le cadre de l'alliance O-RAN.

L'articulation entre NFV et SDN

NFV et SDN sont les deux facettes d'une transformation générale de l'industrie des télécommunications vers les technologies de l'information (on parle parfois d'« ITzation » du réseau). Alors que NFV vise essentiellement à changer la manière dont sont déployées et gérées les fonctions des réseaux, l'objectif principal de la technologie SDN est

“NFV et SDN sont les deux facettes d'une transformation générale de l'industrie des télécommunications vers les technologies de l'information (on parle parfois d'« ITzation » du réseau).”

de rendre le réseau dynamiquement programmable, en externalisant les fonctions de commande des routeurs et commutateurs de paquets. Ainsi une application peut s'adresser à une entité de commande centralisée appelée « contrôleur SDN », pour l'établissement d'un réseau virtuel privé respectant certaines caractéristiques de qualité de service. Le contrôleur se charge de déterminer par quels routeurs le trafic de cette application devra passer et de les configurer en fonction des besoins exprimés.

Les deux technologies NFV et SDN contribuent à la désagrégation des équipements des réseaux. Alors que NFV découple le logiciel du matériel, SDN découple le plan de commande d'un équipement de routage de son plan de transfert. Les deux concepts sont donc plutôt orthogonaux. Les fonctions des réseaux peuvent être virtualisées et déployées sans avoir recours à la technologie SDN et inversement mais les deux technologies peuvent s'apporter mutuellement bien des avantages. Tout d'abord, un contrôleur SDN est lui-même une fonction réseau dont la virtualisation peut apporter beaucoup d'avantages en termes de disponibilité et d'élasticité face aux variations de la charge de trafic à traiter. D'autre part, une mise en œuvre efficace des principes de NFV suppose d'être capable

30 Smart NIC : Smart Network Interface Card

31 FPGA : Field-Programmable Gate Array

32 IPSec : Internet Protocol Security – Ensemble de protocoles permettant le transport sécurisé d'information sur un réseau IP.

33 B. Chatras and F. F. Ozog, «Network functions virtualization: the portability challenge,» in IEEE Network, vol. 30, no. 4, pp. 4-8, July-August 2016, doi: 10.1109/MNET.2016.7513857.

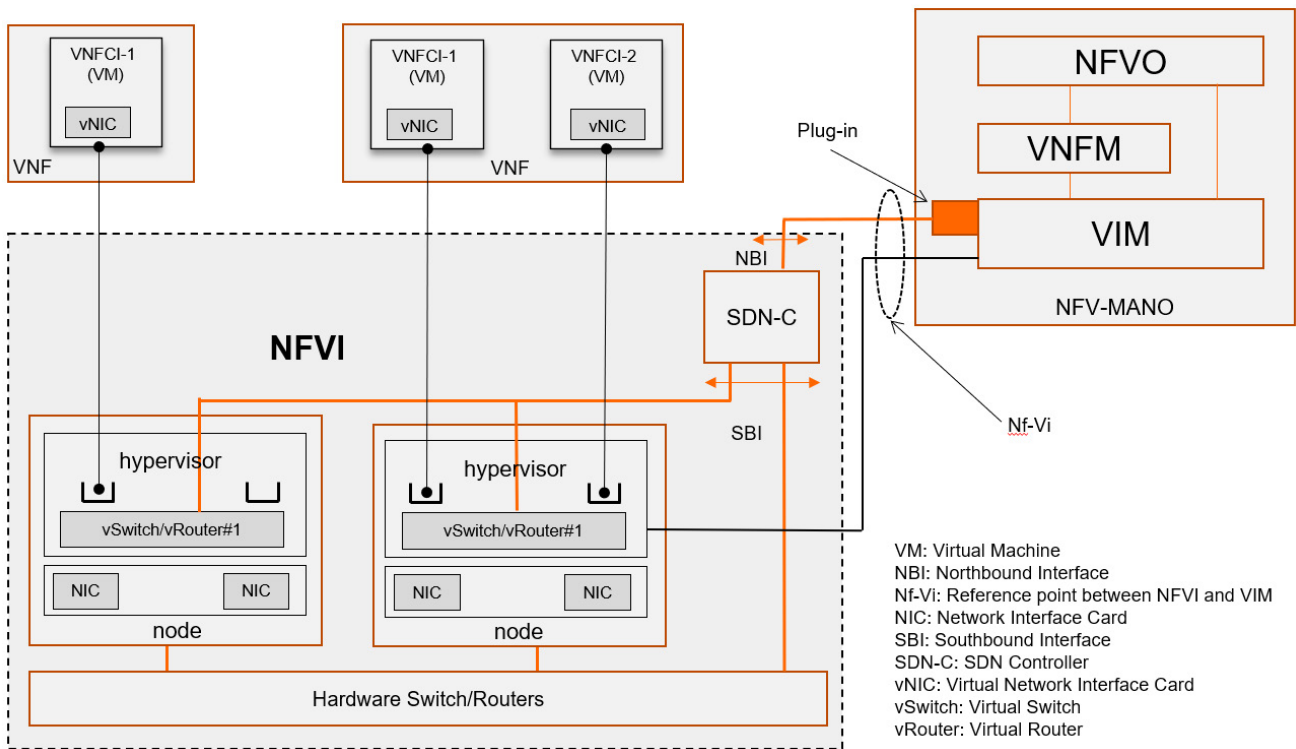


Figure 6 : Un exemple d'intégration SDN et NFV.

● ● ● d'établir automatiquement et quasi instantanément des réseaux virtuels dans l'infrastructure permettant aux machines virtuelles ou conteneurs constituant une même fonction ou un même service réseau de communiquer entre elles tout en isolant le trafic qu'elles échangent du reste des flux portés par cette infrastructure. Pour ce faire, les fonctions de gestion et d'orchestration, plus spécifiquement le VIM dans le cas de machines virtuelles, peuvent alors s'appuyer sur un contrôleur SDN pour configurer les fonctions de routage de cette infrastructure plutôt que de s'interfacer directement avec chacune d'elles (figure 6). Le VIM joue alors le rôle d'une application vis-à-vis du contrôleur SDN.

L'importance de l'automatisation

Les bénéfices de la technologie NFV sont directement liés à la capacité d'automatisation des processus de test, de déploiement et de gestion du cycle de vie des fonctions réseau. L'automatisation est source de réduction des coûts d'explo-

“Les bénéfices de la technologie NFV sont directement liés à la capacité d'automatisation des processus de test, de déploiement et de gestion du cycle de vie des fonctions réseau.”

tation mais aussi un moyen de gagner en efficacité, aussi bien en termes de rapidité d'action (déployer un réseau en quelques minutes plutôt qu'en quelques semaines ou mois) que de minimisation des risques d'erreurs humaines. Le livre blanc évoqué en introduction soulignait déjà que cette technologie ne pourrait être déployée à grande échelle que si tous les processus associés étaient automatisés. En effet, par rapport aux déploiements classiques en matière de

réseaux, la fréquence, la complexité et la diversité des procédures de gestion du cycle de vie d'une fonction réseau augmentent. D'autre part, la désagrégation des fonctions réseau induite par NFV nécessite des formes d'automatisation impliquant plusieurs systèmes de gestion. Ainsi un incident au niveau d'un serveur de l'infrastructure aura un impact sur les VNF dont les composants sont exécutés sur ce serveur et le système de gestion de l'infrastructure comme ceux de chaque VNF recevront typiquement chacun une alarme. La corrélation automatique de ces alarmes est cruciale pour déterminer rapidement la cause de l'incident et les actions à entreprendre pour y remédier.

Les fonctions dites de gestion et d'orchestration sont le socle de cette automatisation. Elles sont conçues pour prendre en charge le déploiement automatique d'un ensemble de fonctions réseau en tenant compte des contraintes et règles spécifiées par les descripteurs prévus à cet effet et de règles globales configurées par l'opérateur. Soulignons

“Globalement les analystes prévoient une croissance annuelle moyenne de 20 à 30 % du marché des solutions NFV sur la décennie en cours.”

aussi que l'automatisation ne se limite pas au déploiement initial, mais concerne l'intégralité du cycle de vie de ces fonctions jusqu'à leur suppression. Ceci inclut leur redimensionnement dynamique (*scaling*), les mises à jour de leur logiciel, leur migration d'un serveur vers un autre et même la résolution de certaines anomalies. Cette forme d'automatisation repose sur la définition a priori de règles précisant les actions à entreprendre lorsqu'un événement prévisible survient. Par exemple, une règle peut spécifier que lorsqu'une fonction réseau consomme 80 % de la mémoire qui lui a été allouée sur un serveur, un redimensionnement automatique doit être effectué. Il n'est toutefois pas possible de tout prévoir sous forme de règles interprétables par un système de gestion et d'orchestration NFV. Tout d'abord parce que certaines décisions ne peuvent être prises qu'en tenant compte de la sémantique des services rendus par chaque fonction réseau alors que le système NFV-MANO ne s'intéresse aux fonctions réseau que sous l'angle des ressources d'infrastructure qui leurs sont allouées. Il est alors nécessaire d'escalader ces décisions vers des orchestrateurs de services. De plus, le recours à des règles prédéfinies n'est pas envisageable lorsque la décision peut dépendre d'un ensemble complexe d'événements survenant non seulement sur la fonction réseau elle-même mais aussi sur son environnement, et doit parfois tenir compte de l'historique des événements précédents. C'est typiquement le cas lorsqu'on doit décider d'actions

correctives face à une anomalie et que ces décisions nécessitent de trouver la cause de cette anomalie. C'est aussi le cas si l'on veut prévoir des actions de maintenance préventive déclenchées automatiquement en fonction d'un historique d'événements.

Ainsi, cette forme d'automatisation fondée uniquement sur des règles prédéfinies ne permet pas encore d'atteindre l'idéal absolu d'un réseau totalement autonome, pouvant se gérer sans intervention humaine. On désigne parfois cet idéal par le slogan « *zero-touch management* »³⁴. Pour l'atteindre, un certain nombre d'évolutions d'un système NFV sont nécessaires et sont en cours d'étude à l'ETSI. Les études actuellement menées à l'ETSI dans le cadre de la Release 4³⁵ consistent à coupler à l'orchestrateur NFV un système d'analyse de données embarquant une intelligence artificielle, capable de lui fournir des instructions ou des recommandations d'actions à exécuter dans un contexte donné.

Les déploiements aujourd'hui

Aujourd'hui l'industrie des télécommunications a globalement adopté la technologie NFV et la question de virtualiser ou non les fonctions des réseaux ne se pose plus vraiment, du moins lorsqu'il s'agit de nouveaux déploiements. Globalement les analystes prévoient une croissance annuelle moyenne de 20 à 30 % du marché des solutions NFV sur la décennie en cours. Il faut toutefois noter que cette transformation se fait par étapes successives. Dans les premiers temps, une majorité de déploiements reposait sur des configurations où les différents éléments d'un système NFV étaient encore sous la responsa-

34 ETSI White Paper - ETSI White Paper No. #32 - Network Transformation (Orchestration, Network and Service Management Framework) - Octobre 2019

35 https://portal.etsi.org/webapp/WorkProgram/Report_WorkItem.asp?WKI_ID=58467

L'auteur



Bruno Chatras préside le groupe de travail chargé d'établir les standards sur la virtualisation des fonctions des réseaux (NFV) au sein de l'ETSI. Pendant les plus de 35 ans qu'il a passés au Centre de recherche et développement de France Télécom puis à Orange Labs Networks, il a contribué aux travaux de spécification des différentes générations de réseaux fixes et mobiles. Il est membre de la communauté d'experts d'Orange sur les réseaux du futur.

bilité d'un seul industriel fournissant l'infrastructure et les fonctions réseau virtualisées, reproduisant ainsi d'une certaine manière le modèle antérieur, même si les serveurs hébergeant les fonctions réseaux étaient banalisés. Selon le cabinet d'étude Analysys Mason, c'était le cas de 83 % des déploiements en 2018 mais cette proportion diminue. AT&T annonçait fin 2020 avoir virtualisé 75 % de son réseau³⁶. NTT DOCOMO indique avoir virtualisé 50 % du cœur de réseau mobile et prévoit d'atteindre les 100 % en 2025³⁷.

La majorité des déploiements NFV à ce jour concerne trois domaines techniques : le cœur de réseau mobile 4G, la voix sur IP (IMS³⁸) et les réseaux d'entreprise (vE-CPE³⁹). Ils représentent les trois quarts des investissements

36 <https://www.fiercetelecom.com/telecom/at-t-target-for-virtualizing-75-its-network-by-2020>

37 <https://www.telecomtv.com/content/etsi-nfv-evolution-event/experience-in-developing-and-operating-nfv-and-future-expansion-41261/>

38 IMS : IP Multimedia Subsystem

39 Virtual Enterprise Customer Premises Equipment (vE-CPE)

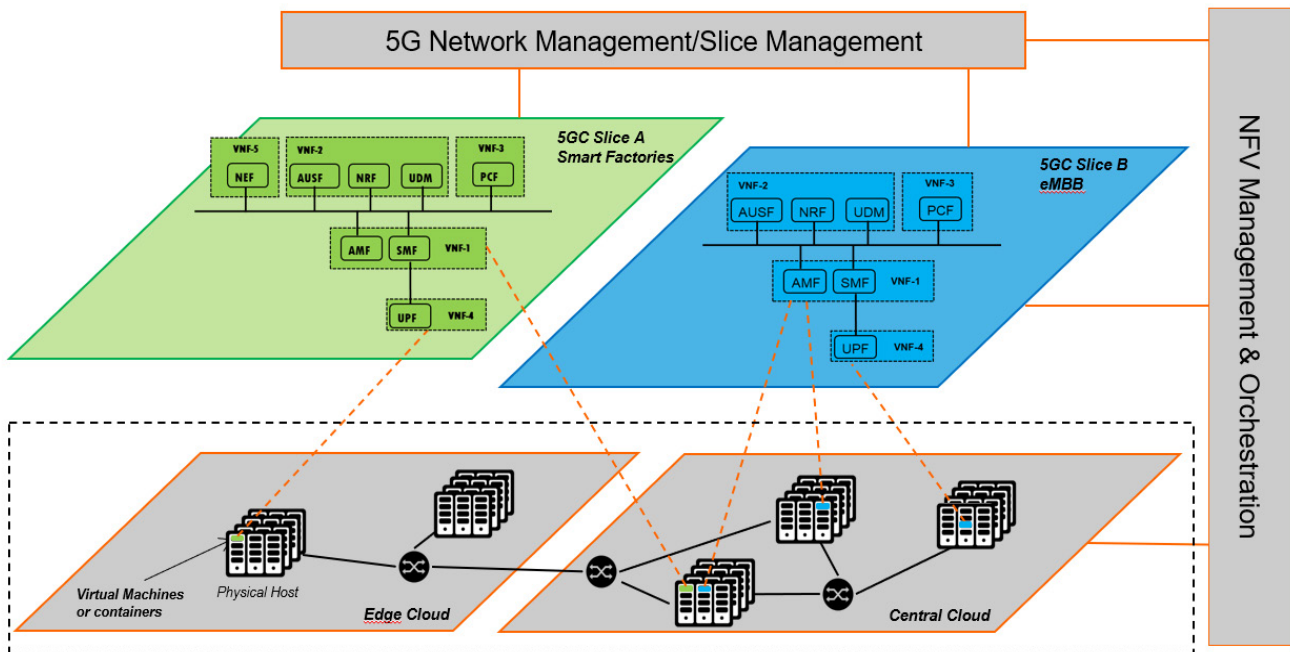


Figure 7 : Mise en œuvre NFW du concept de Network Slicing.

●●● selon Analysys Mason. Certains diront que la transformation des réseaux vers NFW est trop lente. En réalité la vitesse d'adoption de cette technologie varie fortement selon le domaine considéré et la stratégie de chaque opérateur. Tout d'abord il faut être conscient qu'il s'agit d'une transformation complexe et que les bénéfices apportés dépendent fortement des cas d'usage, de la nature des réseaux à transformer et des investissements à effectuer pour construire une infrastructure NFW. La complexité de la transformation comporte deux volets. Sur un plan technique, comme déjà évoqué, la séparation entre logiciel et matériel induite par NFW ainsi que l'apparition de nouveaux systèmes de gestion et d'orchestration nécessitent un travail d'intégration complexe dans un environnement multi-vendeurs. Le rôle d'intégrateur prend une part significativement plus importante dans le processus de déploiement d'un réseau. Il ne s'agit plus seulement de s'assurer de la compatibilité de deux équipements réseaux entre eux mais de la compatibilité de nombreux éléments logiciels entre eux ainsi que de leur compatibilité avec l'in-

“NFW est un changement d'approche dans le développement, le déploiement et l'exploitation des fonctions des réseaux.”

frastructure sur laquelle ils s'exécutent, un travail précédemment pris en charge par les fournisseurs d'équipements de télécommunication. De plus, les enjeux en termes de sécurité des réseaux nécessitent une attention particulière ⁴⁰.

Au-delà de la complexité technique, NFW induit un niveau de convergence sans précédent entre les industries de l'informatique et des télécommunica-

tions, conduisant à redéfinir les modèles d'affaires et de nombreux aspects de la façon dont les réseaux peuvent être conçus, construits et exploités, nécessitant chez les opérateurs comme chez les industriels des évolutions d'organisation et de compétences. C'est aussi l'occasion pour de nouveaux fournisseurs de fonctions réseaux d'entrer sur ce marché, sans devoir apporter une offre matériel/logiciel complète. Metaswitch, Affirmed Network, Aliostar et Athonet sont des exemples de telles compagnies qui viennent concurrencer les poids lourds de l'écosystème.

La vitesse de la transformation des réseaux vers NFW est aussi dépendante des bénéfices escomptés. On comprend intuitivement que les éléments justifiant une décision de virtualiser des fonctions réseaux ne seront pas les mêmes selon que des équipements portant ces fonctions sont déjà déployés sous forme conventionnelle ou non. Ainsi l'apparition de nouvelles fonctions réseau ou les travaux de normalisation sur la décomposition de fonction réseau existantes sont des occasions d'accélérer

40 S. Lal, T. Taleb and A. Dutta, «NFW: Security Threats and Best Practices.» in IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 8, pp. 211-217, Aug. 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600899.

cette transformation. C'est le cas avec la désagrégation des équipements des réseaux fixes haut-débit tels que les BNG (*Broadband Network Gateway*)⁴¹, et la désagrégation des équipements des réseaux d'accès mobile, en particulier avec les travaux de l'alliance O-RAN.

C'est bien entendu aussi le cas avec l'arrivée de la 5G puisqu'elle nécessite de déployer de nouvelles fonctions qui n'existeront probablement que sous forme virtualisée, de sorte que la question de savoir si basculer en mode virtualisé présente un intérêt économique ne se pose plus vraiment. De plus, certaines fonctionnalités attendues des réseaux 5G dépendent directement de la technologie NFV, en particulier la capacité à déployer à la demande des instances (ou tranches) d'un même réseau, optimisées pour des familles d'applications particulières (ex. Internet des objets ou téléphonie) ou des clients particuliers. Ce principe connu sous le

terme de *network slicing*⁴² ne peut être mis en œuvre à grande échelle sans virtualisation et automatisation. En effet, créer une « tranche de réseau » consiste à créer des instances spécifiques de tout ou partie de l'ensemble des fonctions réseau, optimisées pour les usages prévus pour la tranche en question. La figure 7 illustre le cas de deux tranches d'un réseau cœur 5G constituées des mêmes types de fonctions réseau mais regroupées et déployées différemment sous forme de VNF sur les serveurs d'une infrastructure NFV réparties entre un site centralisé et un site périphérique. Notons que sur ce sujet les grands acteurs du cloud comme Amazon⁴³ se positionnent également.

Conclusion

NFV est un changement d'approche dans le développement, le déploiement et l'exploitation des fonctions des réseaux. Il s'agit d'un pas de plus vers

la fusion des industries de l'informatique et des télécommunications. NFV repose sur trois leviers technologiques de l'industrie informatique : le *cloud computing* (pour la capacité à allouer des ressources à la demande), la virtualisation (pour la capacité à partitionner des serveurs de grande capacité) et l'accroissement des performances des processeurs à usage général (pour la capacité à utiliser des serveurs banalisés). Notons aussi qu'il ne s'agit pas que d'une transformation technique de l'industrie des télécommunications mais aussi d'un changement profond touchant aussi bien les relations entre industriels et opérateurs que l'organisation du travail et des compétences pour les deux types d'entreprises. Ainsi le simple fait de gérer et exploiter séparément les fonctions des réseaux de télécommunication et l'infrastructure physique qui les héberge est une transformation majeure. Concluons en soulignant que la virtualisation des réseaux devient la norme avec l'arrivée de la 5G et que le prochain défi sera d'atteindre l'idéal des réseaux autogérés, profitant des progrès en cours sur l'application des techniques d'intelligence artificielle dans la gestion de réseau. ■

41 Broadband Forum TR-459: "Control and User Plane Separation for a disaggregated BNG" – <https://www.broadband-forum.org/technical/download/TR-459.pdf>

42 Didier Berthoumieux, Laurent Thiebaut, "Le cœur de réseau 5G", REE 2018-3

43 5G Network Evolution with AWS ; July 2020 – <https://tinyurl.com/37f5pvk6>

Résumé

La virtualisation des équipements des réseaux de télécommunication, appelée aussi virtualisation des fonctions des réseaux (NFV, *Network Functions Virtualisation*) va offrir aux opérateurs des facilités sans précédent en termes de flexibilité et de rapidité pour déployer et exploiter des réseaux et services de communication à la demande. Démarré en 2012, le processus de transformation des réseaux vers la virtualisation s'accélère de manière spectaculaire avec l'arrivée de la 5G. Cet article se propose de faire le point sur la technologie NFV, ses évolutions et applications, tout en examinant son influence sur l'industrie des télécommunications. Après un rappel sur les principes fondamentaux, il aborde en particulier l'évolution vers la virtualisation sous forme de conteneurs et l'approche cloud-native, les défis en matière de performance, l'articulation entre SDN et NFV, ainsi que l'importance de l'automatisation. ■

Abstract

The virtualisation of telecommunication network equipment, also known as network functions virtualisation (NFV), will provide operators unprecedented flexibility and speed to deploy and manage on-demand communication networks and services. Started in 2012, the network transformation process towards virtualisation is accelerating dramatically with the arrival of 5G. This article provides an update on NFV technology, its developments and applications, while reviewing its influence on the telecommunications industry. After a reminder on the technical foundations, this article addresses the evolution of NFV towards container-based virtualisation and the cloud-native approach, the challenges in terms of performance, the interplay between SDN and NFV, as well as the importance of automation. ■