

## Algorithmes de construction de sous-topologie dans les réseaux optiques élastiques multi-domaines définis par logiciel

Eba Victoire KIE<sup>1\*</sup>, Nogbou Georges ANOH<sup>2</sup>, Boko AKA<sup>3</sup> et Michel BABRI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny (INP-HB) Yamoussoukro, Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunication (LARIT), Côte d'Ivoire

<sup>2</sup> Université Virtuelle de Côte d'Ivoire (UVCI), Abidjan

<sup>3</sup> Université Nangui Abrogoua, Laboratoire de Mathématiques et Informatique et IREN, Abidjan, Côte d'Ivoire

(Reçu le 10 Mars 2023 ; Accepté le 22 Avril 2023)

---

\* Correspondance, courriel : [kievictoire@gmail.com](mailto:kievictoire@gmail.com)

### Résumé

Lorsqu'une demande de connexion arrive dans un réseau optique élastique multi-domaines définis par logiciel (SDON-M), l'utilisation de la topologie générale peut augmenter le temps d'établissement de ladite connexion. Par conséquent, la question qui se pose est de savoir quel critère permettrait de construire une sous-topologie dans le but de réduire le temps d'établissement de la connexion. Dans cet article, nous proposons des approches de construction de sous-topologie dans les réseaux optiques élastiques multi-domaines définis par logiciel. Pour la construction de sous-topologie, nos approches sont basées sur la sélection d'interlien de faible délai de transmission de bout en bout (SS-IL) et sur la sélection de tous les interliens (SS-TIL) existant entre deux domaines adjacents. Les résultats de la simulation montrent que l'approche SS-IL offre un temps d'établissement de connexion plus faible par rapport à l'approche SS-TIL.

**Mots-clés :** *sous-topologie, temps d'établissement, interliens, SDON-M.*

### Abstract

**Algorithms for sub-topology construction in software-defined multi-domain elastic optical networks**

When a connection request arrives in a software-defined elastic multi-domain optical network (SDON-M), the use of the general topology can increase the time to establish a connection. Therefore, the question appears as to what criterion would allow the construction of a sub-topology with the aim of reducing the establishment time of connection. In this paper, we propose approaches for sub-topology construction in software-defined multi-domain elastic optical networks. For the construction of sub-topology construction, our approaches are based on the selection of low delay end-to-end transmission delay (SS-IL) and on the selection of all existing links (SS-TIL) between two adjacent domains. The simulation results show that the SS-IL approach offers a lower connection setup time compared to the SS-TIL approach.

**Keywords :** *sub-topology, establishment time, inter-links, SDON-M.*

## 1. Introduction

Les réseaux optiques élastiques multi-domaines permettent d'offrir des réseaux de transmission haut débit et flexible permettant une gestion optimale des ressources. Lors du routage et l'allocation de ressources dans les réseaux optiques élastiques multi-domaines définis par logiciel, la gestion d'une demande de connexion inter-domaines, le contrôleur SDN (*Software-Defined Networking*) parcourt la topologie générale pour déterminer le meilleur chemin. En effet, le parcours de la topologie générale peut augmenter le temps d'établissement de connexion. La construction de sous-topologie en fonction des domaines sources et destination permettrait de réduire le temps d'établissement de connexion. On trouve dans la littérature plusieurs solutions pour répondre au problème de construction de sous-topologie dans les réseaux optiques élastiques multi-domaines définis par logiciel. Des auteurs [1] ont proposé un plan de contrôle hiérarchique pour leur approche de routage et allocation de ressources spectrales dans les réseaux hétérogènes multi-domaines (domaines à grilles fixe et flexible), afin de permettre une utilisation efficace des ressources spectrales. De plus, ils ont introduit une méthode de construction de sous-topologie lors du transfert de la connexion du nœud source vers le nœud destination, entre les domaines du réseau. Si le nœud source et le nœud destination appartiennent à des domaines de grilles fixe et flexible, les domaines source et destination ne peuvent être interconnectés. Cependant, si les domaines source et destination ont le même type de grille de fréquences (fixe ou flexible), les deux domaines sont fusionnés pour former un domaine. D'autres auteurs [2], ont proposé une méthode de construction de sous-topologie basée sur la qualité de service. En effet, leur approche consiste à construire les sous-topologies en tenant compte du poids du chemin qui prend en compte la bande passante, la distance entre les nœuds, le taux d'erreurs de bits qui détermine l'intégrité du service. Ces auteurs déterminent les  $k$  domaines plus proches voisins et le poids de chaque interlien. Ensuite, les interliens sont triés par ordre décroissant. Puis le premier lien de la liste est sélectionné pour fusionner les domaines. Les auteurs des références [3, 4] ont proposé un modèle de construction de sous-topologie en tenant compte de la qualité de services.

En effet, ces auteurs sélectionnent le lien entre deux domaines ayant la plus faible probabilité de blocage pour fusionner le domaine source et le domaine destination. Étant donné que les réseaux optiques élastiques (EON) multi-domaines peuvent améliorer l'évolutivité des réseaux, étendre la portée des services et résoudre les problèmes d'interopérabilité, il est très important de les inclure dans l'exploitation pratique des réseaux. Au vu de ce constat, des chercheurs [5] ont étudié le problème de la mise en place d'un transfert de service tenant compte de la consommation de l'énergie dans les réseaux optiques élastiques multi-domaines, où les régénérateurs optoélectroniques n'existent que dans les nœuds frontières. Dans ces travaux, les auteurs ont tenu compte des demandes de chemins optiques dynamiques pour proposer des algorithmes afin d'assurer l'optimisation conjointe du routage, de la modulation, de l'affectation du spectre (RMSA) et de la répartition des régénérateurs. L'objectif principal de la nouvelle génération de réseaux informatiques est d'améliorer la gestion des services de réseau, en renforçant le contrôle et les flux de trafics. Pour ce faire, les auteurs de la référence [6] ont présenté une étude sur les différentes approches d'une architecture SDN multi-domaines. Il ressort de cette étude que, les approches horizontales et verticales du plan de contrôle SDN permettent une architecture multi-domaines. De plus, l'emplacement et le nombre de contrôleurs influencent également de manière considérable les performances du réseau. De même, les problématiques d'évolutivité doivent également être prises en compte dans les recherches actuelles. Il faut savoir que la subdivision d'une architecture réseaux optique constitue un réseau optique multi-domaines. Pour résoudre le problème de routage et d'allocation de ressources dans les réseaux optiques élastiques multi-domaines, les auteurs de [7] ont proposé une architecture de plan de contrôle à plusieurs niveaux. Les résultats de cette étude ont montré que l'architecture hiérarchique du plan de contrôle réduit la complexité du temps de calcul des contrôleurs et améliore le taux d'utilisation des ressources spectrales. Dans l'optique d'optimiser le routage et l'allocation

de ressources dans les réseaux optiques élastiques multi-domaines définis par logiciel lorsqu'une demande de connexion existe entre deux domaines, les auteurs de [8] ont, à leur tour, proposé différentes approches de construction de sous topologie. En effet, ces auteurs ont tenu compte des paramètres de consommation de l'énergie, de la fragmentation des ressources spectrales pour la sélection d'interlien en vue de la construction de sous topologie. L'état de l'art nous relève que, la plupart des auteurs qui ont travaillé sur la construction de sous-topologie dans les réseaux multi-domaines n'ont pas pris en compte plus de deux domaines. En effet lorsqu'une demande de connexion arrive dans un réseau multi-domaines, quel critère prendre en compte pour la construction de sous-topologie, dans le but de réduire le temps d'établissement de connexion. Dans ce travail, nous nous intéressons au problème de construction de sous-topologie dans les réseaux optiques élastiques multi-domaines définis par logiciel.

## 2. Méthodologie

Dans cette partie, nous définissons les principaux concepts nécessaires à la compréhension du contexte.

### 2-1. Modèle du réseau

#### *2-1-1. Réseau optique élastique multi-domaines défini par logiciel*

Un réseau optique élastique multi-domaine défini par logiciel est représenté par un graphe  $G_{MD} = (D, I, C_e, C_p)$ , où  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$  est l'ensemble de domaines,  $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$  est l'ensemble d'interliens,  $C_e = \{c_{e1}, c_{e2}, \dots, c_{en}\}$  est l'ensemble de contrôleurs enfant chargé de la gestion du routage intra-domaine,  $C_p = \{c_{p1}, c_{p2}, \dots, c_{pn}\}$  est l'ensemble des contrôleurs parent qui gèrent le routage inter-domaines. Ce type de contrôleur a une vue globale sur l'ensemble du réseau. Dans le cadre des réseaux optiques élastiques multi-domaines définis par logiciel chaque domaine est géré par un contrôleur [9 - 12].

#### *2-1-2. Domaine*

Un domaine dans un réseau optique élastique multi-domaine défini par logiciel est représenté par un graphe  $G_D = (N, L, c)$  où  $N = \{n_1, n_2, \dots, n_k\}$  représente l'ensemble des nœuds,  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$  représente l'ensemble des liens et  $c$  le contrôleur du domaine.

#### *2-1-3. Sous-topologie*

Une sous-topologie est un sous-graphe de  $G_{MD} = (D, I, C_e, C_p)$ . Il peut être représenté par le graphe  $G^* = (D^*, I^*, C_e^*, C_p)$  où  $D^* \subset D, I^* \subset I$  et  $C_e^* \subset C_e$ .

#### *2-1-4. Interlien entre domaines adjacents*

Un interlien entre domaines adjacents est une liaison caractérisée par un nœud source et un nœud destination appartenant respectivement au domaine source  $D_s$  et au domaine destination  $D_d$  [3, 7, 8]. Il est représenté par  $I_{D_s, D_d} = \{n_s, n_d\}$  où  $n_s \in D_s$  et  $n_d \in D_d$ .

## 2-2. Algorithme de construction de sous topologie

Dans les réseaux optiques élastiques multi-domaines définis par logiciel, lorsqu'une demande de connexion inter-domaines arrive dans le réseau, le contrôleur SDN parcourt la topologie générale pour déterminer le meilleur chemin. En effet, le parcours de la topologie générale peut augmenter le temps d'établissement de la connexion. La construction de sous-topologies en fonction des critères spécifiques permettraient de réduire le temps d'établissement de connexion, ainsi que la probabilité de blocage des demandes de connexions.

### 2-2-1. Construction de sous topologies basé sur un interlien entre deux domaines adjacents

Cette approche permet la construction de sous topologies qui sélectionne l'interlien entre deux domaines adjacents. En effet, lorsque les nœuds source et destination d'une demande de connexion appartiennent à des domaines différents, nous déterminons les  $k$  plus courts chemins en termes de nombre de sauts à partir de la matrice des domaines. Par la suite, si un chemin est trouvé nous déterminons les domaines les domaines concernés par ce chemin. Nous calculons le délai sur chaque interlien se trouvant entre domaines adjacents du chemin trouvé et sélectionnons l'interlien qui a le plus faible délai. Nous mettons à jour la sous topologie avec les interliens sélectionnés entre domaines adjacents, ainsi que la topologie de chaque domaine du chemin. On obtient alors *l'Algorithme 1*.

### 2-2-2. Construction de sous topologie avec tous les interliens

Nous proposons un deuxième algorithme en tenant compte de tous les interliens. Dans *l'Algorithme 2*, nous déterminons les  $k$  plus courts chemins à partir de la matrice des domaines, du domaine source au domaine destination. Si un chemin est trouvé, nous déterminons les domaines adjacents concernés par ce chemin qui forme la nouvelle sous topologie et mettons à jour la sous-topologie avec la topologie trouvée. On obtient ainsi *l'Algorithme 2*.

## 3. Résultats et discussion

### 3-1. Propositions algorithmiques

La première approche, décrite au paragraphe 2.2.1, nous a permis d'écrire *l'Algorithme 1*.

<b>Algorithme 1 : Construction de sous topologie avec un interlien (SS-IL)</b>	
1	<b>Entrée :</b> Topologie des domaines ( $TD = \{D_1, D_2, D_3, \dots, D_n\}$ ), Domaine Source, Domaine Destination, Matrice de Distance, Matrice de Domaine
2	<b>Sortie :</b> Sous topologie entre DomaineSource et DomaineDestination
3	Début
4	Déterminer $k$ plus courts chemin entre les domaines sources et destination à partir de la Matrice de Domaine
5	SI un chemin est trouvé ALORS
6	POUR chaque domaine $i$ du chemin FAIRE
7	POUR chaque nœud $k$ du domaine $i$ FAIRE
8	POUR chaque nœud $h$ du domaine $i+1$ FAIRE
9	SI MatriceDistance [ $k, h$ ] $\neq 0$ ALORS
10	SI $\text{délai}(k,h) \leq \text{délaiMin}$
11	$\text{délaiMin} := \text{délai}(k,h)$
12	$iMin := k$ et $i+1Min := h$
13	FinSI
14	FSI
15	FINPOUR
16	FINPOUR
16	Mettre à jour la sous topologie avec celle du domaine $i$
18	FINPOUR
19	FINSI
20	FIN

La deuxième approche, décrite au *paragraphe 2-2-2*, nous a permis de proposer *l'Algorithme 2*.

---

**Algorithme 2 : Construction de sous topologie avec tous les interliens**

---

```

1  Entrée : Topologie des domaines (  $TD = \{D_1, D_2, D_3, \dots, D_n\}$  ), Domaine Source, Domaine Destination, MatriceDistance,
    MatriceDomaine
2  Sortie : Sous topologie entre DomaineSource et DomaineDestination
3  Début
4  Déterminer les k plus courts chemin entre les domaines sources et destination à partir de la MatriceDomaine
5  SI un chemin est trouvé ALORS
6      SI la taille du chemin = nombre de domaine ALORS
7          Sous topologie identique à topologie globale
8      SINON
9          POUR chaque domaine i du chemin FAIRE
10             POUR chaque nœud k de domaine i FAIRE
11                 POUR chaque nœud h de domaine i+1 FAIRE
12                     SI MatriceDistance [k, h] ≠ 0 ALORS
13                         Mettre à jour la sous topologie avec celle du domaine i
14                         FSI
15                     FPOUR
16                 FINPOUR
17             FINSI
18         FIN
    
```

---

### 3-2. Complexité des algorithmes

Dans cette étude, le nombre de domaines  $n = |D|$ ,  $m$  le nombre de nœuds dans un domaine  $i$  est  $m = |N|$ ,  $k$  le nombre de nœuds dans le domaine  $i + 1$ .  $T(n)$  représente le nombre d'opérations élémentaires (temps de fonctionnement de l'algorithme). Le calcul de la complexité de *l'Algorithme 1* donne :

$$T_1(n) = o(n^2) + o(1) + o(n) + o(m) + o(k) + o(1) + o(1)$$

$$T_1(n) = o(n^2) + o(m) + o(k)$$

Le calcul de la complexité de *l'Algorithme 2* donne :

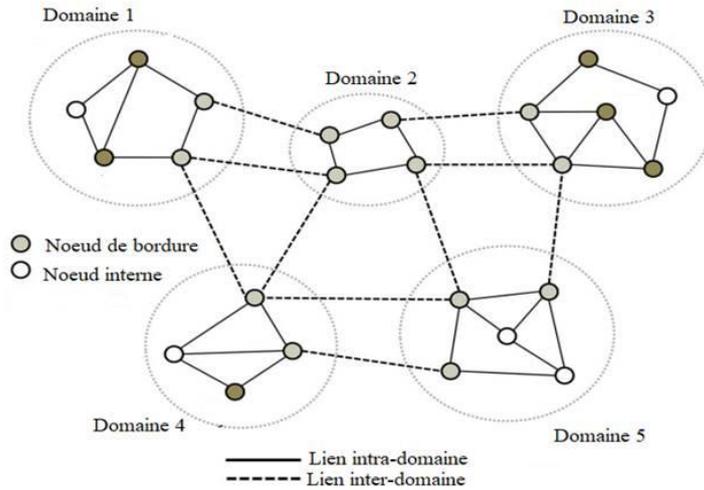
$$T_2(n) = o(n^2) + o(1) + o(1) + o(n) + o(m) + o(k) + o(1) + o(1)$$

$$T_2(n) = o(n^2) + o(m) + o(k)$$

Nous remarquons que ces deux algorithmes ont la même complexité en termes d'opérations élémentaires de base à exécuter.

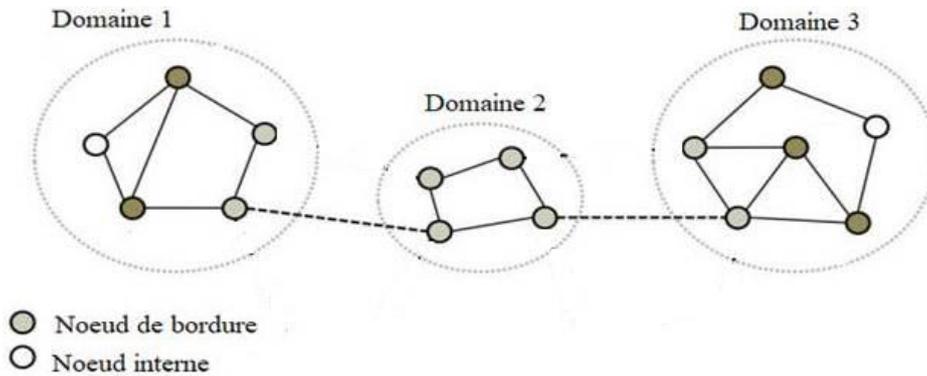
### 3-3. Exemples de sous-topologie

Supposons qu'on dispose d'une topologie réseau constituée de plusieurs domaines comme indiqué sur la *Figure 1*.



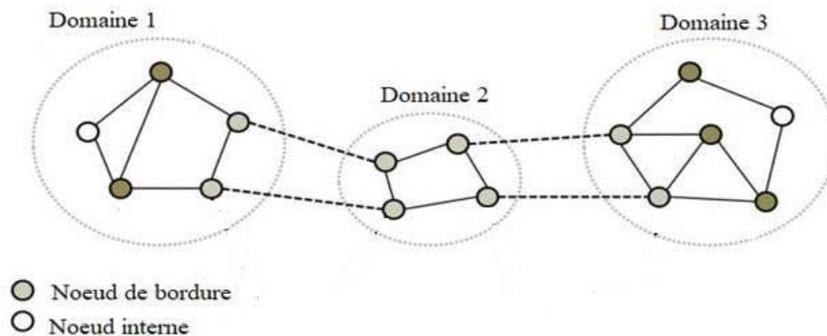
**Figure 1 : Topologie multi-domaines**

Supposons qu'on décide d'établir une connexion ayant pour domaine source « Domaine 1 » et « Domaine 3 » comme domaine de destination. La **Figure 2** présente une sous-topologie construite en tenant compte d'un seul interlien entre les domaines adjacents.



**Figure 2 : Sous-topologie avec un seul interlien entre domaines adjacents**

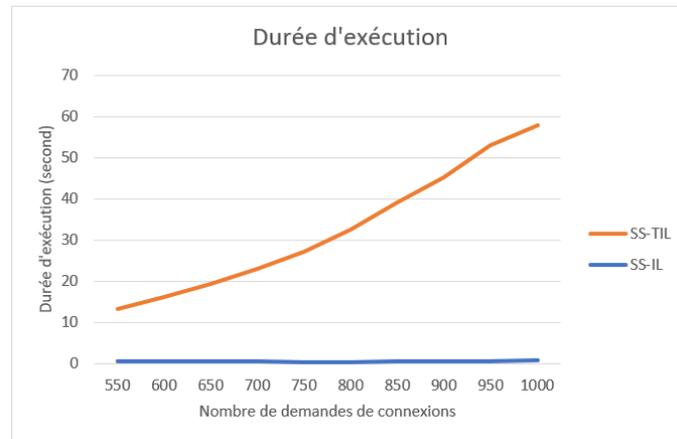
La **Figure 3** présente une sous topologie construite en tenant compte de tous les interliens entre les domaines adjacents.



**Figure 3 : Sous topologie avec tous les interliens entre domaines adjacents**

### 3-4. Simulation

Cette section présente les résultats de la simulation de notre contribution. L'environnement de simulation est constitué d'un PC corei7 avec 16 Go de RAM et du langage de programmation Java. Les connexions sont générées de façon aléatoire et traitées de façon séquentielle. Nous avons supposé qu'un lien optique contient 100 slots de fréquence de 12,5 GHz et les débits des connexions sont générés de façon aléatoire entre 40 et 100 Gbps.



**Figure 4 : Durée d'exécution**

Nous observons au niveau de la **Figure 4** que, plus le nombre de demandes de connexion augmente, la durée d'exécution avec l'approche de construction de sous topologie avec tous les interliens (SS-TIL) croit, et la durée d'exécution avec l'approche de construction de sous-topologie avec un interlien (SS-IL) reste approximativement constante. Cependant, les temps d'exécution avec SS-IL sont considérablement inférieurs aux temps obtenus avec SS-TIL. En effet, lorsqu'on tient compte de tous les liens entre domaines adjacents, la sous-topologie construite est plus dense contrairement à la sous topologie qui prend en compte un interlien entre les domaines adjacents.

### 4. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté de nouvelles approches de construction de sous topologie. La première approche permet une construction de sous-topologie en sélectionnant un interlien entre deux domaines adjacents et la deuxième approche sélectionne tous les interliens trouvés entre deux domaines adjacents pour construire la sous topologie. Les résultats de la simulation démontrent que l'approche SS-IL permet de réduire le temps d'exécution. Par conséquent il serait avantageux en termes de temps d'établissement de connexions, de construire la sous-topologie avec l'approche SS-IL afin d'établir plus de connexions pour une faible durée. Cependant, cette approche de construction de sous-topologie minimise-t-elle la probabilité de blocage des demandes de connexions ? Dans nos futurs travaux, nous intégrerons nos approches de construction de sous-topologie à des méthodes de routage et allocation de ressources dans les réseaux optiques élastiques multi-domaines définis par logiciel, dans le but de minimiser la probabilité de blocage.

### Références

- [1] - Y. LI, F. LI, Q. GUO, X. WANG, X. GUO et B. WANG, « An innovative RSA scheme in multi-domain heterogeneous software », in *2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, Chongqing, (Oct. 2017) 812 - 816. DOI: 10.1109/ITOEC.2017.8122465
- [2] - J. LIU, Q. WANG, G. YU, L. WANG et N. YE, « Augmentation-Based Topology Control Algorithm for Space Information Networks », in *2012 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Shanghai, China, (Sept. 2012) 1 - 4. DOI : 10.1109/WiCOM.2012.6478439
- [3] - J. ZHAO, F. LI, D. REN, J. HU, Q. YAO et W. LI, « An intelligent inter-domain routing scheme under the consideration of diffserv QoS and energy saving in multi-domain software-defined flexible optical networks », *Opt. Commun.*, Vol. 366, (2016) 229 - 240, DOI: 10.1016/j.optcom.2015.12.041
- [4] - J. ZHAO, Q. YAO, D. REN, W. LI et W. ZHAO, « A multi-domain control scheme for diffserv QoS and energy saving consideration in software-defined flexible optical networks », *Opt. Commun.*, Vol. 341, (2015) 178 - 187, DOI: 10.1016/j.optcom.2014.12.027
- [5] - J. ZHU, X. CHEN, D. CHEN, S. ZHU and Z. ZHU, "Service Provisioning with Energy-Aware Regenerator Allocation in Multi-Domain EONs," 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), San Diego, CA, USA (2015) 1 - 6 p., DOI: 10.1109/GLOCOM.2015.7416966
- [6] - F. X. A. WIBOWO, M. A. GREGORY, K. AHMED et K. M. GOMEZ, « Multi-domain Software Defined Networking: Research status and challenges », *J. Netw. Comput. Appl.*, Vol. 87, (2017) 32 - 45, DOI: 10.1016/j.jnca.2017.03.004
- [7] - Z. LI, C. YANG, Z. ZHANG et S. HU, « Inter-domain resource optimization method of software-defined multi-domain optical network », *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, 'J Wireless Com Network 2020', N°41 (2020), <https://doi.org/10.1186/s13638-020-1662-3>
- [8] - K. E. VICTOIRE, A. N. GEORGES, A. J. CHRISTIAN et B. MICHEL, « Optimization of Inter-Domain Routing and Resource Allocation in Elastic Multi-Domain Optical Networks », *Int. J. Comput. Netw. Appl.*, Vol. 9, N° 3 (2022) 279 p., juin 2022, DOI: 10.22247/ijcna/2022/212554
- [9] - E. P. NETO, F. S. D. SILVA, L. M. SCHNEIDER, A. V. NETO et R. IMMICH, « Seamless MANO of multi-vendor SDN controllers across federated multi-domains », *Comput. Netw.*, Vol. 186, (2021) 107752 p., DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107752
- [10] - P. BHAUMIK, S. ZHANG, P. CHOWDHURY, S.-S. LEE, J. H. LEE et B. MUKHERJEE, « Software-defined optical networks (SDONs) : a survey », *Photonic Netw. Commun.*, Vol. 28, N° 1 (2014) 4 - 18 p., DOI : 10.1007/s11107-014-0451-5
- [11] - B. ISONG, R. R. S. MOLOSE, A. M. ABU-MAHFOUZ et N. DLADLU, « Comprehensive Review of SDN Controller Placement Strategies », *IEEE Access*, Vol. 8, (2020) 170070 - 170092 p., DOI : 10.1109/ACCESS.2020.3023974
- [12] - D. KREUTZ, F. M. V. RAMOS, P. ESTEVES VERISSIMO, C. ESTEVE ROTHENBERG, S. AZODOLMOLKY et S. UHLIG, « Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey », *Proc. IEEE*, Vol. 103, N° 1 (2015) 14 - 76, DOI: 10.1109/JPROC.2014.2371999