

Groupage et Assignation de Longueurs d'onde dans un réseau WDM à l'aide des algorithmes génétiques

Moussang Gaétan Arnaud¹, Tonye Emmanuel²

^{1&2} (Département de Génie Electrique et de Télécommunications ; Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé ; Université de Yaoundé I, CAMEROUN)

Abstract : Les réseaux optiques sont de nos jours l'élément de base des systèmes de communications modernes vu la quantité importante de données qu'une seule longueur d'onde peut transporter. Les requêtes individuelles quant à elles demandent une bande passante moins importante par rapport à celle que peut offrir une longueur d'onde. Le groupage de trafic associé à la technologie WDM (Wavelength Division Multiplexing) permet d'utiliser de manière efficace la bande passante offerte par une longueur d'onde. Dans cet article, un algorithme génétique appliquant le groupage a été conçu afin de réduire le coût du réseau, évalué comme le nombre de longueurs d'onde et le nombre d'équipements au sein d'un réseau physique. Des résultats obtenus sont comparés à ceux établis préalablement à partir d'un algorithme génétique matérialisant seul le routage et l'affectation de longueurs d'onde. On peut conclure que l'algorithme génétique de groupage développé a permis d'optimiser le coût du réseau.

Mots clés : algorithme génétique, assignation de longueurs d'onde, groupage, réseau WDM.

I. Introduction

L'avènement de la technologie optique a été une solution majeure dans le transport des données à haut débit et plusieurs modèles de réseaux optiques ont été proposés pour la mettre en œuvre. Cependant, le transport optique s'est vraiment développé après l'apparition de la technologie WDM (Wavelength Division multiplexing) où plusieurs longueurs d'onde peuvent être multiplexées dans une même fibre optique. Disposant d'une possibilité de transmettre une quantité des données de 10 ou 40 giga bits par secondes (Gbps), une longueur d'onde est sous-utilisée si on lui affecte une seule connexion, sachant que la majorité des connexions dans les réseaux sont des connexions de l'ordre de 51.84 Mbps. Si on a une requête pour une connexion de 51.84 Mbps avec une longueur d'onde qui peut transmettre jusque dans l'ordre de 10 Gbps, alors presque toute la bande passante est gaspillée. Le groupage de trafic est un moyen de remédier à ce problème, dont le principe est de regrouper plusieurs connexions de petites granularités dans une seule longueur d'onde de telle sorte que la somme des bandes passantes de ces connexions ne dépasse pas la capacité de la longueur d'onde. Pour résoudre ce problème, une approche d'algorithme génétique est proposée vue la réduction de leur temps à converger vers la solution optimale.

Plusieurs auteurs se sont intéressés sur ce sujet dont les suivants sont cités :

W. Yao, M. Li et B. Ramamurthy [1] ont étudié le problème de groupage de trafic dans un réseau maillé où seulement quelques nœuds ont la capacité de grouper le trafic (appelés nœuds G). Yueguang Jiao, Bingkun Zhou, Hanyi Zhang et Yili Guo [2], ont étudié le problème de groupage dans un réseau maillé à partir d'un trafic arbitraire. Sivakumar K.M. Sivalingam et S. Subramaniam [3] ont travaillé sur le problème de groupage de trafic dans un réseau maillé où le groupage du trafic peut se faire à chaque nœud. P. Paul et al. [4], ont étudié le problème de groupage de trafic dans un réseau maillé où les nœuds qui ont la capacité de groupage sont ceux ayant le maximum de connexions. O. Awwad, Ala I. Al-Fuqaha, and M. Guizani [5], ont résolu le problème de GRWA (Grooming Routing Wavelength Assignment) à l'aide d'un algorithme génétique combinant deux heuristiques d'assignation de longueurs d'onde.

Dans notre étude, nous utilisons un réseau physique existant sur lequel sont basés nos tests. Un algorithme génétique appliquant le routage et l'affectation de longueurs d'ondes est d'abord établi. Ensuite un autre algorithme génétique implémentant le groupage est développé. Les résultats obtenus à partir de ces deux algorithmes sont ensuite comparés pour montrer l'intérêt du groupage.

Cet article sera articulé comme suit : dans le paragraphe 2, les éléments du réseau WDM seront présentés suivi de la méthodologie du groupage employée dans le paragraphe 3. Les résultats issus des implémentations des algorithmes génétiques du RWA [6] et du groupage seront expliqués dans le paragraphe 4. Et enfin une conclusion sera faite dans le dernier paragraphe.

II. Éléments d'un réseau WDM

En plus de la fibre optique, un réseau WDM est constitué de plusieurs équipements dont les principaux sont :

OADM (Optical Add/Drop Multiplexer): c'est un équipement utilisé dans un nœud qui sert, comme leur nom l'indique, à ajouter (en multiplexant) une longueur d'onde à une fibre de sortie et terminer (en démultiplexant) une longueur d'onde dans ce nœud à partir d'une fibre d'entrée.

ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer): c'est un OADM reconfigurable, comme son nom l'indique. Il offre, en plus des fonctions d'un OADM, la possibilité de commuter des signaux de transport optiques à distance au niveau de la couche de longueurs d'onde.

OXC (Optical Cross Connect): les OADMs ne sont plus suffisants quand on a plusieurs fibres qui sont connectées à un nœud donné et que chaque fibre a plusieurs longueurs d'onde (comme dans les réseaux maillés). L'élément le mieux adapté dans ce cas est l'OXC. Un OXC simple permet de commuter les données d'une longueur d'onde λ d'une fibre d'entrée vers la même longueur d'onde λ d'une fibre de sortie dans le domaine optique.

MSPP (MultiService Provisioning Platform): les MSPPs sont des systèmes très complexes, impliquant une variété de technologies matérielles et logicielles. Un MSPP combine plusieurs fonctionnalités offertes par les différents équipements qu'on a mentionnés plus haut et en plus la particularité d'effectuer le groupage.

1. Méthodologie du groupage utilisée

Supposons le réseau suivant et dont la capacité d'une longueur d'onde est : **10 Gbps**.

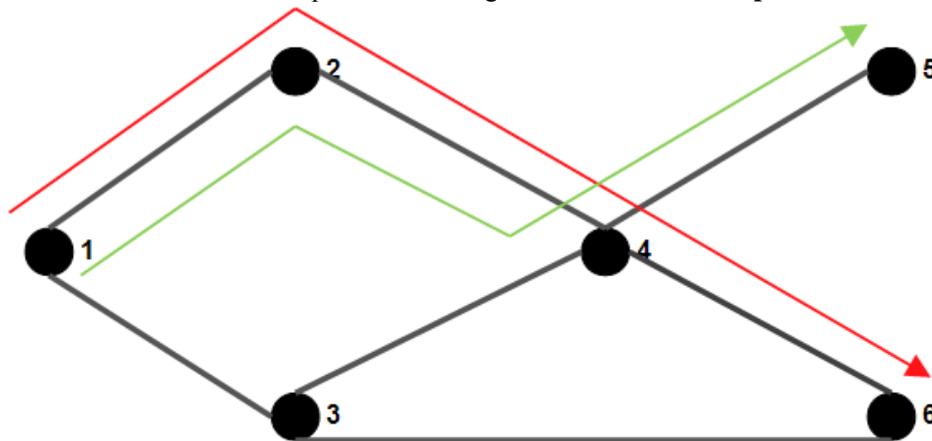


Figure 1 : Réseau illustrant la méthodologie utilisée

Considérons deux requêtes (1, 5) et (1, 6) qui transitent dans le réseau et dont les capacités sont respectivement **5** et **4 Gbps**. L'ensemble des chemins pour la première requête est : [1 2 4 5]; [1 3 4 5]; [1 3 6 4 5] et pour la deuxième [1 2 4 6]; [1 3 6] [1 3 4 6]. En évaluant chaque chemin avec la fonction coût donnée (1) s'il revient que le meilleur chemin pour chaque requête est respectivement [1 2 4 5] et [1 2 4 6], le groupage des données est possible entre le chemin [1 2 4]. Puisque la somme des deux bandes passantes est égale à 9 Gbps et est inférieure à celle de la longueur d'onde définie. Ces deux requêtes peuvent alors être groupées dans la longueur d'onde représentée en bleu (voire figure 2) pour être acheminées jusqu'à leur destination.

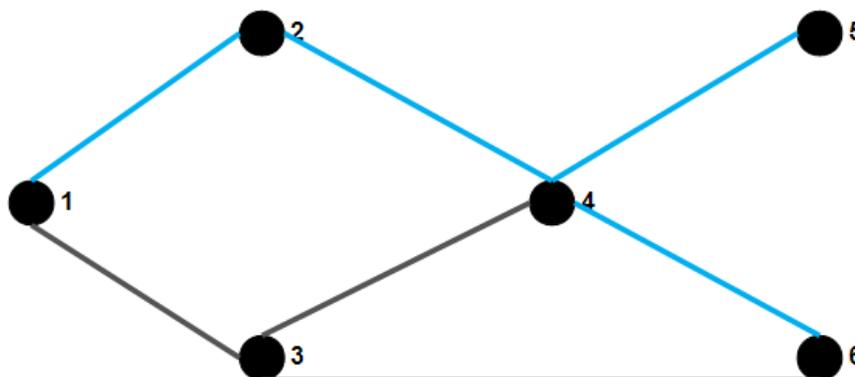


Figure 2 : Réseau avec illustrant les connexions virtuelles

3.1. Organigramme de l'algorithme du groupage

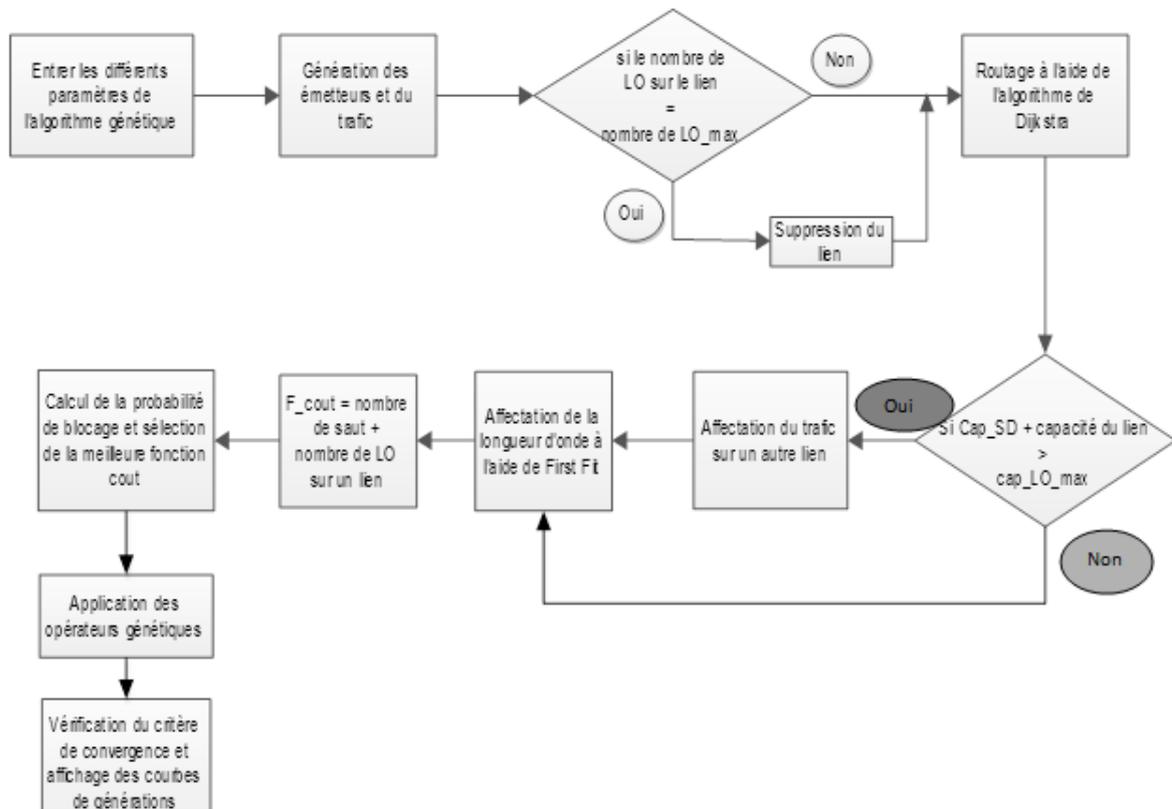


Figure 3 : Organigramme de l'algorithme génétique du groupage

LO_{max} : longueur d'onde maximale

Cap_{SD} : capacité d'une requête

$Cap_{LO_{max}}$: capacité maximale d'une longueur d'onde.

Etant donné qu'une longueur d'onde est une ressource très couteuse, la fonction cout définie dans ce travail lui fait référence et est définie comme suit :

$$F_{cout} = \text{nombre de bonds} + \text{nombre de LO sur un lien} \quad (1)$$

L'un des paramètres qui nous ai utile pour l'évaluation des nos résultats est probabilité de blocage et défini par la formule de **Erlang B**.

$$P(L, C) = (L^C / C!) / \sum_{k=0}^C L^k / k! \quad (2)$$

L : trafic en Erlang

C : nombre de longueurs d'onde disponibles

3.2. Algorithme du groupage

Begin

$Cap_{LO_{max}}=10$;%capacité maximale d'une longueur d'onde

$NG_{max}=10$;%nombre maximal de générations

$Nbr_{LO_{max}}=2$;%nombre de longueur d'onde maximal par fibre

while ($Cap_{SD} \geq Cap_{LO_{max}}$)

 Générer un trafic de manière aléatoire

end

 Déterminer l'ensemble des plus courts chemins pour chaque requête ;

 Déterminer le nombre de chemins de chaque requête a;

For $l=1:a$

For $t=1 :nbre_de_bonds$

if chaque chemin n'est pas vide

if $Cap_{SD} + \text{trafic sur un lien}$ est supérieur à $Cap_{LO_{max}}$

```

    affecter le trafic sur un autre lien ;
  else
    affecter le trafic dans une longueur d'onde ;
  end
  F_cout=nombre de saut + nombre de LO sur un lien
  Pr_blo=proba_blo(max(L),Nbr_LO_max,max(Nbr_LO_SD));
end
else
  Pr_blo=proba_blo(max(L),0,0);
end
end
sélection naturelle ;
croisement ;
mutation ;
end

```

3.3 Approche de résolution du problème par algorithme génétique

3.3.1. Génération de la population

La population générée dans cet article utilise un algorithme de Dijkstra modifié. Cette population est obtenue en déterminant tous les plus courts chemins correspondant à chaque requête. L'organigramme ci-dessous illustre comment la population a été générée.

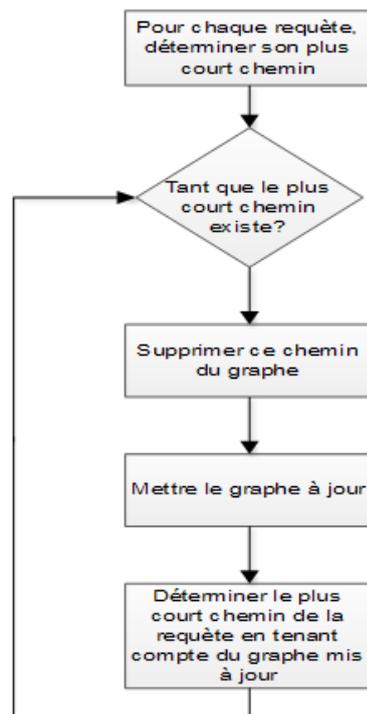


Figure 4 : organigramme de construction de la population

A titre d'exemple, considérons la figure 1 et la requête 3 – 4. A partir de ce qui précède, on obtient l'ensemble des chemins suivant :

- 3 - 4
- 3 - 6 - 4
- 3 - 1 - 2 - 4

3.3.2. Sélection naturelle

Calcul de la probabilité de sélection

Si N est le nombre total d'une génération, i un individu quelconque et $F_cout(i)$ sa fonction coût. La probabilité de sélection de cet individu est donnée par la formule suivante :

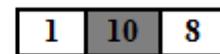
$$prSN(i) = \frac{F_cout(i)}{\sum_{i=1}^N F_cout(i)} \quad (3)$$

La stratégie de sélection naturelle des individus pour la génération future est inspirée de la « Roulette wheel » où chaque section est représentée par la probabilité de l'individu.

3.3.3. Croisement

Le croisement utilisé est le croisement en un point. Il est appliqué aux routes ayant au moins un nœud en commun et ne gère pas les nœuds sources et les nœuds destinations. Si l'on considère les routes [1 3 5 10 9 8] et [1 10 8] (Figure 6), après croisement on obtient de nouvelles routes illustrées comme ci-dessous.

Croisement de deux routes :



Routes obtenues après croisement :

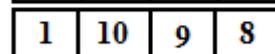
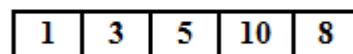


Figure 5 : Illustration du croisement

3.4. Présentation de la topologie et des matrices utilisées

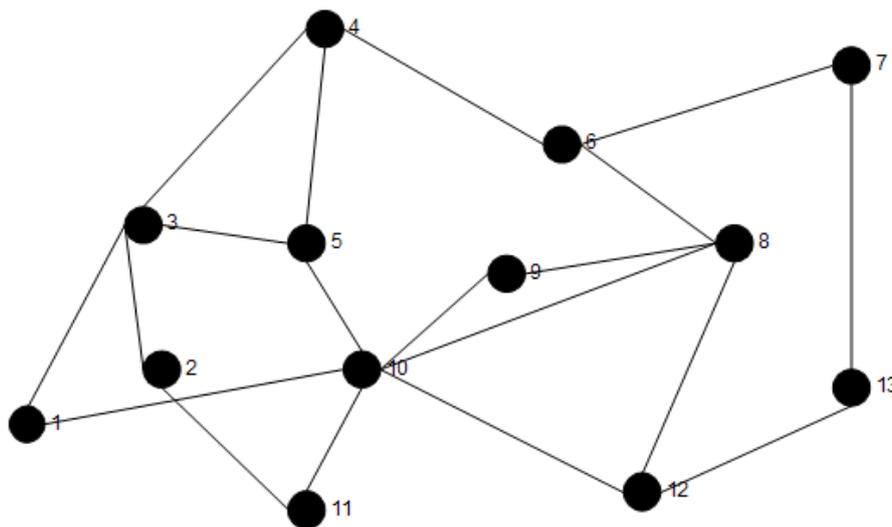


Figure 6 : Topologie utilisée pour les simulations

$$G = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Dans cette matrice,

$$\begin{cases} G(i,j) = 1, \text{ s'il existe une connexion physique entre les noeuds } i \text{ et } j \\ G(i,j) = 0, \text{ s'il n'existe une connexion physique entre les noeuds } i \text{ et } j \end{cases}$$

$$S_D = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 1 & 4 \\ 1 & 7 \\ 1 & 10 \\ 3 & 1 \\ 4 & 1 \\ 1 & 5 \\ 2 & 5 \\ 5 & 1 \\ 4 & 1 \\ 2 & 4 \end{pmatrix}$$

Figure 8 : Matrice logique

III. Résultats et commentaires

Tableau 1 : Paramètres d'entrées de l'algorithme génétique de RWA [6]

Nombre de longueur d'onde	2
Capacité d'une longueur d'onde	10 Go
Taux d'arrivée entre deux paquets	10
Taux de mutation	0.1
Fonction coût	$Proba_bloc(L, NbreCmax, max(Nbre_LO_SD)) + nbre\ de\ bonds * 0.01$

Tableau 2 : Paramètres d'entrées de l'algorithme génétique du groupage

Nombre de longueur d'onde	2
Capacité d'une longueur d'onde	10 Go
Taux d'arrivée entre deux paquets	10
Taux de mutation	0.1
Fonction coût	$nbre\ de\ bonds + max(Nbr_LO_SD)$

$max(Nbre_LO_SD)$ étant le nombre de longueurs maximal utilisé sur une requête S-D paire.

4.1. Résultats obtenus à partir de l'algorithme génétique du RWA

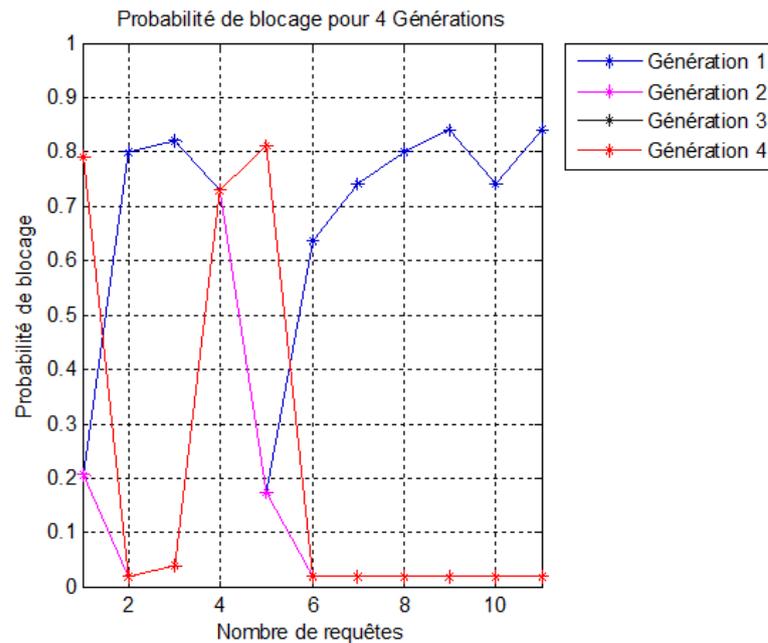


Figure 9 : Courbes des probabilités de blocage pour le RWA

La figure 8 présente la probabilité de blocage des chemins de chaque génération. Le nombre de générations ici est de 4 ce qui permet de dire que l'algorithme converge à partir de la quatrième génération. Les tableaux 3 et 4 illustrent respectivement le trafic écoulé entre chaque requête et longueurs d'onde utilisées.

Tableau 3 : Trafic écoulé entre chaque lien (cas du RWA)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	0	7	6	9	0	2	0	0	6	0	0	0
2	0	0	0	9	5	0	0	0	0	0	0	0	0
3	9	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0
4	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 4 : Longueurs d'onde utilisées sur chaque lien (cas du RWA)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	[]	[]	[1,2]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[1,2]	[]	[]	[]
2	[]	[]	[1,2]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[1,2]	[]	[]
3	[1,2]	1	[]	[1,2]	[1,2]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]
4	[]	[]	[1,2]	[1,2]	[1,2]	[1,2]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]
5	[]	[]	[1,2]	[]	[]	[]	[]	[1,2]	[]	[1,2]	[]	[]	[]
6	[]	[]	[]	[1,2]	[]	[]	1	[]	[]	[]	[]	[]	[]
7	[]	[]	[]	[]	[]	[1,2]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]
8	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	1	1	[]	1	[]
9	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	1	[]	[]	[]
10	[1,2]	[]	[]	[]	[1,2]	[]	[]	[1,2]	[]	[]	[]	1	[]
11	[]	1	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[1,2]	[]	[]	[]
12	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	1	[]	[]	1
13	[]	[]	[]	[]	[]	[]	1	[]	[]	[]	[]	[]	[]

4.2. Résultats obtenus à partir de l'algorithme génétique du groupage

Deux (02) cas de résultats se présentent ici : le cas où le nombre de générations est 2 et le cas où il est 3. Cela peut s'expliquer par le fait que le trafic utilisé est dynamique.

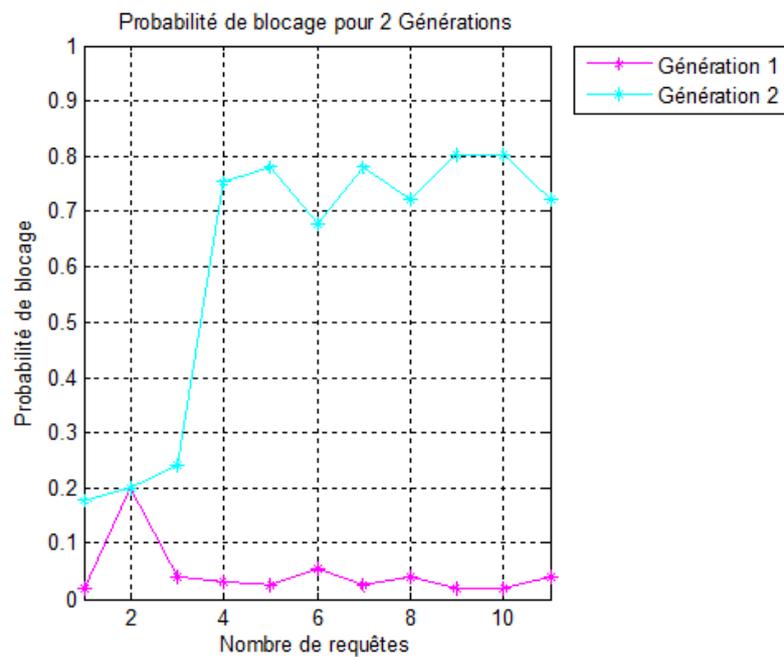


Figure 10 : Courbes des probabilités de blocage (cas 1 du groupage)

Figure 10 : Courbes des probabilités de blocage (cas 1 du groupage)

Tableau 5 : Trafic écoulé sur chaque lien (cas 1 du groupage)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	0	19	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0
2	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	31	0	0	8	14	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
13	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0

Tableau 6 : Longueurs d'onde utilisées sur chaque lien (cas 1 du groupage)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	∅	[1,2]	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	[1,2]	∅	∅	∅
2	∅	[1,2]	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
3	[1,2]	∅	∅	[1,2]	[1,2]	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
4	∅	∅	[1,2]	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
5	∅	∅	1	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
6	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
7	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
8	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
9	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
10	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	1	∅
11	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
12	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	1
13	∅	∅	∅	∅	∅	∅	1	∅	∅	∅	∅	∅	∅

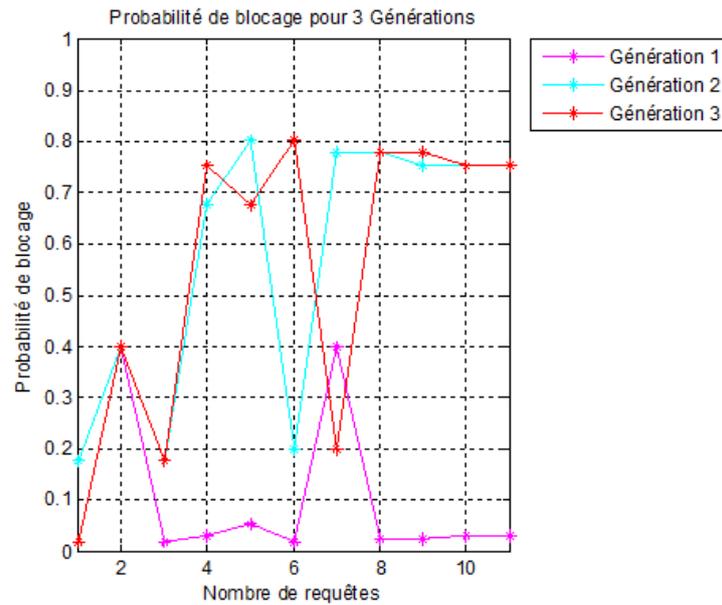


Figure 11 : Courbe des probabilités de blocage (cas 2 du groupage)

Tableau 7 : Trafic écoulé pour chaque lien (cas 2 du groupage)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	0	11	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0
2	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	29	0	0	8	9	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
13	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0

Tableau 8 : Longueurs d'onde utilisées sur chaque lien (cas 2 du groupage)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	[]	[]	[1,2]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[1,2]	[]	[]	[]
2	[]	[1,2]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[1,2]	[]	[]
3	[1,2]	[]	[]	[1,2]	[1,2]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]
4	[]	[]	[1,2]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]
5	[]	[]	1	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]
6	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]
7	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]
8	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]
9	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]
10	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	1	[]
11	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]
12	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	1
13	[]	[]	[]	[]	[]	[]	1	[]	[]	[]	[]	[]	[]

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que la probabilité de blocage de la première génération de la méthode du groupage (cas 1 et cas 2) est meilleure que celle du RWA. De plus, le nombre de générations se limite au maximum à 3 dans le cas du groupage contrairement à celui du RWA qui est de 4 pour dire que le groupage converge plus vite vers la solution par rapport au RWA. Mais pour la deuxième génération (cas 1 et cas 2 de la méthode du groupage) et la troisième génération (cas 2 de la méthode du groupage), les probabilités de ces générations sont moins meilleures que celles de la méthode du RWA. Cela est dû probablement à la non

utilisation de la même fonction coût. Néanmoins, le tableau 5 et le tableau 7 mentionnent trafic important par rapport au tableau 3 : ce qui évoque l'emploi du groupage. De plus les tableaux 6 et 8 montrent l'utilisation d'un nombre moins important de longueurs d'onde par rapport au tableau 4. Ce qui implique que le groupage a réduit le nombre de longueurs d'onde dans le réseau.

IV. Conclusion

Dans cet article, un algorithme génétique du groupage a été présenté pour l'optimisation des ressources dans un réseau WDM. Il a été appliqué sur un réseau existant et on a obtenu des résultats qui ont été comparés à partir de ceux obtenus au préalable par un algorithme génétique du routage et d'affectation de longueurs d'onde. On peut conclure que cet algorithme est efficace par les résultats assez satisfaisants que l'on a pu obtenir. Cet algorithme génétique du groupage peut aussi s'appliquer à d'autres réseaux.

References

- [1] W. Yao, M. Li et B. Ramamurthy. "Performance Analysis of Sparse Traffic Grooming in WDM Mesh Networks". IEEE International Conference on Communications. ICC, 3:1766–1770, 2005.
- [2] Yueguang Jiao, Bingkun Zhou, Hanyi Zhang, Yili Guo. "Grooming of Arbitrary Traffic in Optical WDM Mesh Networks Using a Genetic Algorithm". Electronic Engineering Department, 10:2, 193–198, 2005.
- [3] M. Sivakumar, K.M. Sivalingam et S. Subramaniam. On Factors Affecting the Performance of Dynamically Groomed Optical WDM Mesh Networks. Workshop on High Performance Switching and Routing HPSR, pages 411–415, 2005.
- [4] P. Paul et al., "Traffic grooming in WDM optical network with grooming resources at Max Connectivity nodes", Opt. Fiber Technol. (2012).
- [5] O. Awwad, Ala I. Al-Fuqaha, and M. Guizani, "Genetic Approach for Traffic Grooming, Routing, and Wavelength Assignment in WDM Optical Networks with Sparse Grooming Resources", Computer Science Department, Western Michigan University.
- [6] « Analyse et modélisation de la performance des réseaux IP/WDM : Cas de MTN Cameroun ».