

## Dimensionnement et optimisation des architectures de réseaux: Revue de la littérature

### [ Review on network architecture sizing and optimization ]

*Maloba Mbuya Firmin<sup>1</sup>, Kaseraka Selain<sup>2</sup>, Fyama Mwepu Blaise<sup>3</sup>, Kalombo Nshimba Daily<sup>4</sup>, and Kasoro Mulenda Nathanael<sup>5</sup>*

<sup>1</sup>Chef de Travaux, Institut Supérieur de Statistique de Lubumbashi, RD Congo

<sup>2</sup>Professeur, Université de Kinshasa, Faculté des Sciences et Technologies, RD Congo

<sup>3</sup>Professeur, Université de Lubumbashi, Faculté Polytechnique, RD Congo

<sup>4</sup>Professeur, Institut Supérieur de Statistique de Lubumbashi, RD Congo

<sup>5</sup>Professeur ordinaire, Université de Kinshasa, Faculté des Sciences et Technologies, RD Congo

---

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** The increase in the number of workstations, the need to diversify applications and the rise in traffic are prompting a reassessment of network capacity in order to guarantee quality of service and cope with increasingly frequent congestion. Many authors address the sizing of networks, whether physical, virtual, software-based, fibre optic or wireless, by quantifying traffic in order to determine network behaviour.

By superimposing each of these studies, it becomes clear that future research on dimensioning will be based on machine learning models with a view to continuously adapting to the overall behaviour of the network.

**KEYWORDS:** sizing, optimization, network, metrics.

**RESUME:** L'augmentation du nombre de postes, le besoin de diversification des applications et la montée en charge du trafic poussent les organisations à réévaluer la capacité de leurs réseaux pour garantir la qualité de service et faire face à la congestion de plus en plus récurrente. De nombreux auteurs abordent le dimensionnement des réseaux qu'ils soient physiques, virtuels, logiciels, sur fibres optiques ou sans fils à partir de la quantification du trafic afin de déterminer le comportement du réseau.

En superposant chacune des recherches, il est apparu que les futures recherches sur le dimensionnement seront basées sur des modèles d'apprentissage automatiques en vue de s'adapter continuellement au comportement global du réseau.

**MOTS-CLEFS:** dimensionnement, optimisation, réseau informatique, métriques.

## 1 INTRODUCTION

Les besoins d'adéquation entre les ressources des réseaux et les usages présents et futurs dans le but de garantir la performance et la fiabilité conduisent les organisations à revoir les architectures de leurs réseaux informatiques.

A ce jour, l'évolution des besoins des utilisateurs notamment l'augmentation du nombre de postes, le besoin de diversification des applications et la montée en charge du trafic poussent à réévaluer la capacité du réseau pour garantir la qualité de service et faire face à la congestion de plus en plus récurrente.

Les problèmes de performances constatés, notamment des dégradations du service durant les heures de pointes ont conduit à des incidents récurrents.

Ainsi, administrer les systèmes informatiques exige la mobilisation de ressources suffisantes capable de couvrir toutes les succursales pour escompter un traitement efficient et en temps réel.

La présente étude porte sur la revue de la littérature du dimensionnement des architectures des réseaux informatiques et leur optimisation.

## **2 METHODES, TECHNIQUES ET OBJECTIFS**

Dans cette recherche, nous explorons les différents travaux de synthèses, normes recherches et publications sur le dimensionnement des architectures de réseaux.

L'objectif de cette recherche est de présenter les solutions et tendances proposées par les chercheurs sur le dimensionnement des réseaux d'entreprises, qu'ils soient locaux ou étendus, virtuels ou physiques, « lot » ou réseaux de capteurs.

Il s'agit donc d'explorer de manière intelligible la littérature et les travaux existants pour en faire le point.

Cette étude offre un intérêt réel parce qu'elle permet de circonscrire les connaissances dans le domaine de l'optimisation des réseaux et d'offrir un support technique et scientifique en termes de dimensionnement et d'amélioration des performances dans les réseaux.

En effet, les problèmes de performances constatées, notamment des dégradations du service durant les heures de pointe ont conduit à des incidents récurrents sur les réseaux informatiques. Le temps de réponses des applications, les perturbations de la connexion, le ralentissement de la transmission et les interruptions des services amènent les architectes réseaux à revoir leurs infrastructures en raison des données massives qu'ils produisent et utilisent quotidiennement.

## **3 CRITERES DE PERFORMANCE D'UN RESEAU INFORMATIQUE**

### **3.1 LA PERFORMANCE DES RESEAUX**

La performance en informatique fait référence aux valeurs chiffrées qui déterminent la qualité optimale d'un matériel, d'un logiciel ou d'un système (Chen 2014).

Conformément à la Recommandation E.800 de l'Union Internationale des télécommunications, la qualité de service correspond l'effet général de la performance d'un service qui détermine le degré de satisfaction d'un utilisateur du service. La qualité de service fait référence aux mécanismes du réseau qui permettent de partager aux utilisateurs, équitablement et suivant les besoins requis des applications, la qualité de ressources dont ils ont besoin (Giusti 2024).

Les performances d'un réseau informatique sont déterminées à l'aide d'indicateurs chiffrés appelées métriques (Andrew Tanenbaum 2014) (Cabantous 2023) (Pujolle 2024):

- La bande passante;
- Le débit du réseau;
- La latence;
- La gigue;
- La perte des paquets;
- La disponibilité du réseau;
- La durée de vie du paquet;
- Le taux d'erreur;
- Le temps de réponse du réseau;
- La scalabilité du réseau;
- La capacité du canal de communication;
- La capacité de stockage des nœuds du réseau.

### **3.2 LES METRIQUES**

Les métriques de performance sont définies comme étant les paramètres des objectifs traduisant les besoins des utilisateurs et la qualité de service demandée. Ces paramètres sont mesurables et permettent d'évaluer la performance du réseau. Parmi ces paramètres, les plus utilisés sont (Jean Luc Montagnier 2011) (Pujolle 2018):

### 3.2.1 LA LATENCE

La latence ou délai détermine la durée d'un qui sépare l'envoi d'un paquet et sa réception. C'est une métrique particulièrement importante pour les applications temps réel.

On distingue:

- Le délai de transmission: dépendant du flot de bits et lié au partage de la bande passante;
- Le délai de propagation: dépendant de la distance qui sépare la destination de la source;
- Le délai d'attente ou de traitement: dépendant de la charge du réseau ainsi politique implémentée dans le routeur afin d'obtenir la fluidité du trafic.

Le délai peut être influencé par plusieurs autres facteurs quantifiables en temps. C'est notamment (DORDOIGNE 2015):

**Tableau 1. Source de la latence**

| Numéro | Source de la latence                   | Valeur de la latence en ms |
|--------|----------------------------------------|----------------------------|
| 1.     | Capture d'un échantillon sur le réseau | 0.1                        |
| 2.     | Délai d'encodage                       | 17.5                       |
| 3.     | Délai d'encapsulation/désencapsulation | 20                         |
| 4.     | Délai de file d'attente                | 0.5                        |
| 5.     | Délai d'accès au lien                  | 10                         |
| 6.     | Délai de transmission sur le réseau    | Variable                   |
| 7.     | Gigue du tampon                        | 60                         |
| 8.     | Délai de décodage                      | 2                          |
| 9.     | Délai de sortie                        | 0.5                        |

La latence est calculée par la formule:

$$Latence = Te + Tp + Ttr \quad (1)$$

$$Te = \frac{\text{Quantité de données}}{\text{Débit}} \quad (2)$$

$$Tp = \frac{\text{Distance}}{\text{Vitesse de Propagation}} \quad (3)$$

- Te: temps d'émission ou temps de transmission;
- Tp: temps de propagation;
- Ttr: temps de traitement.

Lorsque la latence augmente, le temps de réponse des applications est aussi augmenté. Suivant la recommandation UIT-T G114, l'Union International des Télécommunications (UIT) défini des seuils acceptables de latence pour certaines applications.

**Tableau 2. Valeur de la latence dans les réseaux**

| CLASSE | DELAI          | COMMENTAIRES                                         |
|--------|----------------|------------------------------------------------------|
| 1      | 0-150 ms       | Communications en temps réel, interactives           |
| 2      | 150-300 ms     | Communications par bond                              |
| 3      | 300-700 ms     | Communications semi-duplex                           |
| 4      | Plus de 700 ms | Communications semi-duplex à applications militaires |

### 3.2.2 LA GIGUE

La gigue correspond aux variations de la latence sur les paquets dans un réseau de bout en bout. Elle précise l'évolution du temps aller simple d'un poste à l'autre (Cabantous 2023).

### 3.2.3 LA PERTE DE PAQUET

La perte de paquet représente le rapport entre les données envoyés et celles qui peuvent atteindre leur destination à intervalle de temps défini.

La perte de paquet peut être due à la saturation des ressources ou au dépassement d'échéance pour la transmission (DORDOIGNE 2015).

### 3.2.4 LE TAUX D'ERREURS

Les erreurs sur la transmission de paquets sont généralement dues à l'intégrité de ces derniers. De nos jours c'est un paramètre marginal pour les réseaux filaires et déterminants pour les réseaux sans fils (Stéphane Lohier 2010), notamment à cause de la nature du canal de communication qui influent considérablement sur les probabilités de pertes.

### 3.2.5 LE DÉBIT

Définit comme la quantité de données numériques qui transitent par un nœud pendant une période (Pujolle 2018), le débit est un indicateur clé et déterminant dans le dimensionnement des réseaux.

### 3.2.6 LA DISPONIBILITÉ DU RÉSEAU

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (4)$$

Avec:

- MTBF: Mean Time Before Failure (Temps Moyen de fonctionnement normal)
- MTTR: Mean Time To Repair (Temps moyen de réparation)

### 3.2.7 INTENSITÉ DU TRAFIC DANS LE RESEAU

L'intensité du trafic est l'expression de la quantité de trafic à satisfaire sur le réseau. En utilisant le modèle d'Erlang, nous avons la relation (Vaulot et Rabe 1947)

La première forme de l'intensité du trafic est donnée par l'équation ci-après:

$$E = \frac{1}{t} \int nt \, dt \quad (5)$$

La deuxième forme de l'intensité du trafic est tout simplement:

$$E = \frac{nt}{3600} \quad (6)$$

Avec:

- E: la charge de trafic en erlang;
- t: le temps exprimé en seconde;
- n: le nombre de session par heure.

Un erlang représente l'occupation permanente d'une ligne pendant une heure, ou l'occupation effective de deux lignes à 50% pendant une heure. L'intensité du trafic sur une ligne représente le taux de connexion de celle-ci, c'est-à-dire le temps d'appropriation de la ligne par unité de temps.

Dans un système de pénurie de ressource, lorsque le nombre de clients (n) est supérieur au nombre d'équipement de traitement de l'information (m), erlang a établi que la probabilité (p) de refus d'appel, que nous appelons facteur de blocage, par suite de congestion du trafic à écouler de E erlang est donnée par la relation:

$$p = \frac{\frac{E^m}{m!}}{\sum_{k=0}^{k=m} \frac{E^k}{k!}} \quad (7)$$

En sachant que les collisions sont inévitables, une partie du trafic à écouler ou du trafic demandé peut être perdue. La transformation de l'équation donne la relation entre le trafic demandé et le trafic perdu de la forme:

$$\text{trafic perdu} = \text{trafic demandé} \times p \quad (8)$$

Avec:

p: probabilité de refus d'appel

La formule devient alors:

$$\text{trafic écoulé} = \text{trafic demandé} - \text{trafic perdu} = \text{trafic demandé} (1 - p) \quad (9)$$

Ce modèle suppose que toute demande qui n'est pas satisfaite est mise dans une file d'attente de capacité quasi infinie et sera traitée dès qu'un équipement de traitement de l'information est libéré.

Ce modèle est utilisé par les routeurs.

On a:

$$p_a = \frac{\left(\frac{E^m}{m!}\right) \left(\frac{m}{m-E}\right)}{\left(\sum_{k=0}^{m-1} \frac{E^k}{k!}\right) + \left(\frac{E^m}{m!} \times \frac{m}{m-E}\right)} \quad (10)$$

#### 4 SATURATION ET CONGESTION DU RESEAU

La saturation du réseau est un déséquilibre entre la demande de ressources réseau et la capacité disponible. La résultante de cette inadéquation est la dégradation des performances (Nathanael Kasoro 2021).

La saturation trouve ses causes dans:

- L'augmentation du trafic: une augmentation soudaine du volume de données échangées ou du nombre d'utilisateurs peut saturer le réseau;
- Les applications gourmandes en bande passante: certaines applications sont consommatrices de bande passante. C'est notamment les applications de streaming, les jeux vidéo ou encore les transferts de fichiers.
- L'infrastructure inadéquate: lorsque le réseau est configuré avec une capacité insuffisante ou obsolète, cela peut-être à la base de la saturation du réseau;
- Les problèmes matériels: quand les équipements d'interconnexion sont sous-dimensionnés ou défectueux, cela peut créer les goulots d'étranglement dans le réseau;
- Les attaques de déni de services DOS ou DDOS, qui par essence envoient des requêtes en dépassement de capacités, ce qui empêche l'utilisation de la ressource saturée.

L'encombrement du réseau dans le nuage (I. Martinez 2021), résulte de la distance entre les centres de données du nuage qui contribue à un délai de réponse de bout en bout peu fiable. L'informatique en nuage a été introduite comme une alternative fournissant un service à faible latence en apportant des ressources de traitement et de stockage à la périphérie du réseau. Dans cette étude il présente de manière séquentielle les phases nécessaires à la mise en œuvre et à la réalisation de systèmes de fog computing pratiques. Matinez et Jarray (I. Martinez 2021) préconisent la conception et le dimensionnement d'une infrastructure de brouillard; l'approvisionnement en ressources de brouillard pour l'utilisation d'applications IoT et l'allocation de ressources IoT au brouillard; l'installation de cadres de brouillard pour la gestion des ressources de brouillard; et l'évaluation de l'infrastructure de brouillard par le biais de la simulation et de l'émulation.

Selon Tanenbaum (Andrew Tanenbaum 2014), pour éviter la congestion, la solution simple consiste à créer un réseau adapté au trafic qu'il transporte. Les routes s'adaptent à des modèles de trafic qui varient le jour et la nuit en fonction du rythme de vie des utilisateurs et des fuseaux horaires. La modélisation du trafic dans les réseaux informatiques permet de prévoir le comportement qu'aurait un réseau lorsqu'il est soumis à différentes charges. La simulation, nous amènera à évaluer les performances du réseau dans un environnement de test.

Il est fréquent d'utiliser la théorie des graphes pour implémenter le routage. Ainsi, l'algorithme de Dijkstra (Maman Abdurachman Djauhar 2013) est utilisé pour analyser le plus court chemin, les flux de données et les connexions entre nœuds.

Lorsque qu'un grand nombre de données tentent de circuler dans le réseau, celui-peut-être saturé en provoquant des pertes de paquets.

Ils existent plusieurs outils de surveillance réseau qui permettent de surveiller le taux

## 5 PROBLEMATIQUE DU DIMENSIONNEMENT DANS LES RESEAUX

### 5.1 DES CONCEPTS

Le dimensionnement d'un réseau d'entreprise consiste à définir la structure globale du réseau en matière de capacité, de couverture et de qualité de service, estimer la quantité des ressources nécessaires et évaluer le coût global du déploiement. C'est donc connaître les applications présente et futures, les supports disponibles et tenir comptes des capacités des équipements (ELIA 2013). Dimensionner une architecture de réseau est un processus méthodique qui commence par la définition des besoins, le choix de la topologie du réseau, le calcul des ressources matérielles, la planification de l'adressage et la mise en place des mesures de sécurité tout en minimisant les coûts (I. Martinez 2021).

L'ingénierie des réseaux recouvre l'ensemble des moyens mis en œuvre pour le choix d'une solution de télécommunication et la réalisation d'un réseau informatique et de télécommunication comprenant la structure du réseau, son dimensionnement, l'évaluation des performances et l'optimisation (Andrew Tanenbaum 2014) (Stéphane Lohier 2010).

Pour répondre à la demande croissante de calculs dans les réseaux cellulaires, les plates-formes d'informatique en nuage conventionnelles ont été mises en place (LINA A. HAIBEH 2022), cela a l'avantage d'augmenter les capacités de leurs serveurs et améliorer ainsi la qualité du service (QoS) qu'elles fournissent.

Cependant, pour diverses raisons, de nouvelles plateformes et architectures informatiques sont nécessaires. Pour que les utilisateurs mobiles puissent accéder aux services traditionnels en nuage, le trafic mobile doit passer par plusieurs étapes, notamment le « backhaul » mobile et éventuellement le cœur de réseau de l'opérateur mobile, ce qui crée une latence de communication supplémentaire qui peut dépasser les exigences de latence des services critiques. Pour contourner cette difficulté, Haibeh (LINA A. HAIBEH 2022) préconise des investissements intensifs en ressources informatiques et de communication.

### 5.2 DU DIMENSIONNEMENT DES RESEAUX

#### 5.2.1 DIMENSIONNEMENT DANS LES RESEAUX OPTIQUES

Pour Abdallah Jarray (A. Jarray 2009), (A. J. Jarray 2012) l'étude des problèmes de conception et de planification d'un réseau optique de longue distance, aussi appelé réseau de cœur (OWAN-Optical Wide Area Network en anglais) a permis de transporter des flots agrégés en mode commutation de circuits, qui relie différents sites à l'aide de fibres optiques connectées par des commutateurs/routeurs optiques et/ou électriques à l'échelle d'un pays ou d'un continent et permet le transit des données à très haut débit. Ainsi, le problème d'agilité est motivé par la croissance de la demande en bande passante et par la nature dynamique du trafic.

#### 5.2.2 DIMENSIONNEMENT DES RESEAUX SANS FILS

Quentin Bailleul (Bailleul 2023), étudie le dimensionnement de la synchronisation d'un réseau TSN dans différents contextes embarqués. Il étudie la précision de synchronisation atteignable avec la norme IEEE 802.1AS, la capacité des protocoles à résister aux pannes de lien et d'équipements et enfin simulant sur un réseau satellite embarqué, il étudie l'impact de la précision et de la robustesse.

Pour dimensionner le trafic GSM, (Ouadia 2010), utilise la formule d'Erlang B qui définit les critères de GoS (Grade of Service) ou la probabilité de blocage permise. Il accorde une priorité au trafic de la voix au détriment du trafic de la donnée. Ainsi, pour calculer le nombre de PDCH (Packet Data Channel, ce sont des canaux physiques dédiées à la transmission de données utilisateurs ou de contrôles et qui permettent d'atteindre des débits supérieurs à ceux du GSM classiques). On procède par le calcul du débit global par cellule ensuite on le divise par la capacité d'un seul PDCH.

#### 5.2.3 DIMENSIONNEMENT DYNAMIQUE DES RESEAUX

Le Dimensionnement dynamique permet d'ajuster les ressources du réseau en temps réel, en fonction des besoins fluctuants. Il conçoit et implémente les architectures SDN (Thomas Nadeau 2013) (Brij B Gupta 2024) afin d'assurer une gestion flexible et centralisée des ressources utiles.

Les travaux d'Ahmed-Nacer analysent et dimensionnent des réseaux hétérogènes embarqués. Il constate que le défi majeur à relever lors de l'utilisation d'un réseau fédérateur est de respecter les contraintes temporelles des applications qui sollicitent les différents réseaux. Il préconise l'encapsulation des trames pour atteindre l'optimum en tenant compte du nombre de trames à encapsuler, les ordonnancements utilisés, le coût de la bande passante et la gigue (Ahmed-Nacer 2023). Il aborde ainsi l'étude par comparaison et chute

par une proposition de techniques permettant l'interconnexion de réseaux hétérogènes temps réels à la fois pour les applications à faibles et à fortes contraintes temporelles. La gestion de la qualité de service permet de garantir une bande passante nécessaire

La virtualisation des réseaux est une technique qui permet la création de réseaux virtuels pour compenser le déficit des ressources et offrir une flexibilité, offrant ainsi au réseau les capacités changeantes en fonctions des exigences des utilisateurs.

En matière de sécurité, les principaux objectifs de l'audit interne, proactif ou réactif, sont de s'assurer que les contrôles mis en place pour mesurer les risques sont efficaces (Gheraoui 2019) (Cabantous 2023). Brooks (Charles Brooks 2021) précise les moyens d'intégrer les aspects de la sécurité incluant l'évaluation des vulnérabilités et l'implémentation des mesures de sécurité.

### **5.3 DIMENSIONNEMENT ET MODELISATION**

#### **5.3.1 LE PROCESSUS**

Le dimensionnement du réseau consiste à déterminer la capacité optimale du réseau pour gérer le trafic prévu tout en garantissant la qualité des services (QoS). La démarche proposée par Nick Feamster (Nick Feamster 2022) pour le dimensionnement est proche de la norme proposée par l'Union International des Télécommunications (Union International desTélécommunications 2001) sur le réseau RNIS qui comprend: l'évaluation des besoins, la modélisation du trafic, le calcul de la capacité des voies, la sélection des équipements, la validation par simulation et enfin l'optimisation par test.

Le dimensionnement et l'analyse des performances créent un système adaptatif qui équilibrent la planification de la capacité et la surveillance des performances en temps réel. Le dimensionnement permet au réseau de gérer efficacement les pics de charge, tandis que l'analyse des performances identifie les zones de sous-performance du réseau et permet une optimisation ciblée.

Ce processus comprend (Atienza 2003):

1. La prévision du trafic: la prévision du trafic vise à estimer la demande de trafic en fonction du comportement des abonnés et des modèles d'utilisation du réseau. Comme le montrent les indicateurs de prévision du trafic, cela comprend:
  - Les taux d'arrivée des appels;
  - Les temps de maintien;
  - L'analyse du trafic afin de prévoir les besoins futurs;
2. Les outils d'optimisation, permettent d'améliorer les performances du réseau en calculant la solution la plus rentable, qu'il s'agisse d'un réseau complexe ou national.
3. La conception d'une hiérarchie de routage, dont les principes sont définis afin d'optimiser le flux de trafic. Cela implique la création de matrices de trafic afin de cartographier le comportement des abonnés et la conception d'une hiérarchie des équipements centraux pour une transmission efficace des données.
4. Processus de conception itératif: le processus de conception implique souvent des calculs pour optimiser les itinéraires à forte utilisation, le trafic de débordement et le routage physique des circuits.

Dans la gestion des réseaux, la saturation et le dimensionnement sont des concepts liés. L'analyse de la saturation a pour objet de relever les goulots d'étranglements et les sources de congestion (Nathanael Kasoro 2021) (Pujolle 2024). Pour y parvenir, les données collectées (utilisation de la bande passante, temps de réponse, taux de perte) servent de base pour planifier le redimensionnement du réseau. Le dimensionnement du réseau est donc une réponse proactive et réactive à la saturation du réseau.

#### **5.3.2 MODELE DE DIMENSIONNEMENT DES RESEAUX**

Il existe plusieurs modèles pour dimensionner un réseau informatique (Kasoro 2024):

1. Modèle statistique:
  - ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average): Utilisée pour les séries temporelles, intégrant dépendances temporelles et tendances;
  - Régression Linéaire et non-linéaire: utilise des variables indépendantes pour prédire la demande future
2. Modèle basé sur les processus stochastiques:
  - Chaînes de Markov: modélisent les transitions entre différents états du réseau;
  - Processus de poisson; utilisé pour modéliser des événements se produisant de manière aléatoire dans le temps.
3. Modèle d'apprentissage automatique:
  - Forêts aléatoires: utilise un ensemble d'arbres de décision pour améliorer la précision de prévision

- Réseaux de neurones artificiels: modèles capables de capturer les relations complexes non linéaires dans les données.

### 5.3.3 TECHNIQUE DE DIMENSIONNEMENT DES RESEAUX

Trois techniques essentielles pour le dimensionnement des réseaux (Kasoro 2024):

#### 1. Techniques de sous-réseautage hiérarchique

Il consiste à organiser un réseau en plusieurs couches ou niveaux. Cela a l'avantage de garantir une gestion facile et une meilleure allocation des ressources en termes de scalabilité, de réduction de la congestion et de simplification de la gestion;

#### 2. Techniques de sous-réseautage dynamique

Il induit l'ajustement automatique des configurations en fonction de la charge du réseau. Il offre les avantages d'adaptabilité, d'optimisation des ressources et de résilience accrue. Souvent utilisé dans le Cloud Computing et les réseaux mobiles

#### 3. Super-réseautage et agrégation de routes dans les environnements complexes. Calcul des super-réseaux.

Il fait référence à des réseaux unifiés pour améliorer l'efficacité de gestion et le routage. Il offre les avantages de réduction des coûts d'infrastructure, de simplification de la gestion, d'amélioration de la sécurité et de la résilience.

### 5.3.4 MODELISATION DES PAQUETS

L'équipement d'interconnexion peut constituer un goulot d'étranglement lorsque sont pris en compte l'écart de débit entre les liens d'interconnexion et les systèmes locaux. On peut ainsi constater que l'échange d'information entre applications ou entre application et équipement de traitement de données varie en termes de volume et de fréquence d'échange.

En conséquence, les informations ne sont pas transmises instantanément. Ils sont placés dans une file d'attente. Le temps de réponse correspond à la relation:

$$t_r = t_p + t_t + t_q \quad (11)$$

Avec:

- $t_r$  : temps de réponse du système;
- $t_p$  : temps de propagation sur le support;
- $t_t$  : temps de traitement par les équipements d'interconnexion;
- $t_q$  : temps de queue, temps mis par l'information dans le système.

Ainsi donc, la difficulté est d'évaluer  $t_q$  par rapport aux caractéristiques du système, parce qu'au fur et mesure que le nombre de message augmente, le temps de queue devient important et les autres variables de la relation du temps de réponse deviennent négligeables.

Par caractéristiques du système, nous entendons:

- Le nombre d'unité d'information traité par unité de temps;
- La longueur du message;
- Le débit de la ligne;

### 5.3.5 FORMULE DE LITTLE

Dans un système à file d'attente en équilibre, le nombre moyen d'entrées  $\delta$  est égal au nombre moyen de sorties par unité de temps. Le nombre moyen d'utilisateurs (clients) dans le système ( $n$ ) est donné par:

$$n = \delta \cdot t_q \quad (12)$$

Avec:

- $n$ : le nombre moyen d'utilisateurs (clients) dans le système;
- $\delta$  : le nombre moyen de sorties par unité de temps
- $t_q$ : le temps de queue;

Cette relation est dite de Little. Elle s'applique à tous les types files d'attente, lorsque la condition d'équilibre est respectée.



### 5.3.6 NOTATION DE KENDAL

Dans la notation de Kendal, la file d'attente est caractérisée par le modèle:

$$\frac{M}{\frac{M}{1}}_{\infty} \quad (13)$$

Avec:

- M: le processus Markovien en entrée (distribution exponentielle des arrivées);
- M: le processus Markovien en sortie;
- 1: dans un système mono-processeur;
- $\infty$ : la file d'attente à une capacité infinie.

En considérant dans ce système, que les arrivées sont indépendantes, la relation de kendal donne:

$$n_a = \rho \cdot t_a \quad (14)$$

Et

$$n_s = \rho \cdot t_s \quad (15)$$

En décomposant la formule de Little, le nombre d'utilisateurs (clients) dans le système peut s'écrire:

$$n = n_a + n_s = \rho (t_a + t_s) \quad (16)$$

Avec:

- $n_a$ : le nombre d'utilisateurs ou de clients en attente de traitement ;
- $n_s$ : le nombre d'utilisateurs ou de clients en cours de traitement ;
- $\rho$  : le taux d'arrivée des utilisateurs dans la file d'attente ;
- $t_a$  : le temps de séjour dans la file d'attente ;
- $t_s$ : le temps de traitement par le système ;
- $\mu = \frac{1}{t_s}$ : représente l'inverse du temps de traitement, il représente le nombre d'information traités par unité de temps, c'est le taux de service. il est désigné par  $\mu$ .
- $t_q$ : le temps de séjour

Pour tout nouvel entrant dans le système, le temps d'attente correspond au temps nécessaire pour traiter toutes les informations déjà présentes dans la file d'attente:

$$t_a = n \cdot t_s \quad (17)$$

En remplaçant la valeur du temps de séjour dans la file d'attente, dans l'équation 10, on obtient la relation:

$$n = \rho \frac{t_s}{1 - \rho t_s} \quad (18)$$

Si  $\mu = \frac{1}{t_s}$ , le taux de service du système, alors

$$\sigma = \frac{\rho}{\mu} = \rho \cdot t_s \quad (19)$$

On obtient donc par l'équation:

$$t_a = n \cdot t_s \quad (20)$$

$$\text{Que } t_a = \frac{\sigma}{1 - \sigma} t_s \quad (21)$$

Ainsi, le temps de séjour dans le système ou temps de queue est de:

$$t_q = t_a + t_s = t_s \frac{\sigma}{1-\sigma} = t_s \frac{1}{1-\sigma} \quad (22)$$

En fonction des caractéristiques du message (l: longueur en bits) et du système (d: débit de la ligne en bit/s) on a:

$$\sigma = \frac{\rho}{\mu} = \frac{\rho}{1/t_s} \quad (23)$$

Ce qui donne:

$$\rho \cdot t_s = \frac{\rho \cdot l}{d} \quad (24)$$

Le temps de séjour dans le système ou temps de queue est alors:

$$t_q = t_s \frac{\sigma}{1-\sigma} = \frac{l}{d} \cdot \frac{1}{1-\frac{\rho \cdot l}{d}} \quad (25)$$

On obtient:

$$t_q = \frac{l}{d - \rho \cdot l} \quad (26)$$

Avec:

$$d > \rho \cdot l \quad (27)$$

Compte tenu que le système ne doit pas être chargé à plus de 50%, le débit minimal requis pour la ligne est:

$$d_{min} \geq 2 \rho \cdot l \quad (28)$$

Dans le cas d'espèce, nous nous retrouvons dans une file d'attente en série. Dans ces conditions, les entrées et les sorties suivent la loi de poisson. Le temps de traversée global est la somme des temps de traversées de chacune des files.

En plus, lorsqu'il s'agit de file d'attente à entrées multiples, si les messages ont la même longueur moyenne sur toutes les voies incidentes, la file d'attente est équivalente à une file d'attente où le taux d'arrivée est la somme des taux d'arrivée, par le principe de superposition:

$$\rho = \sum \rho_i \quad (29)$$

Le modèle  $\frac{M}{M/\infty}$  à file d'attente infinie, satisfait généralement la majorité des cas. Cependant, dans le contexte des réseaux informatiques où la file d'attente est limitée par les contraintes technologiques, notamment la capacité de la mémoire et donc la taille du buffer (mémoire tampon) de l'équipement de transmission, on a:

Pour une file d'attente de taille k, qui contient n informations, la probabilité pour qu'un nouvel arrivant soit perdu  $p_n$  est:

$$Si \sigma \neq 1, p_n = \frac{\sigma^n (1-\sigma)}{1-\sigma^{k+1}} \quad (30)$$

Avec :  $0 \leq n \leq k$

$$Si \sigma = 1, p_n = \frac{1}{k+1} \quad (31)$$

Avec :  $0 \leq n \leq k$

Ainsi, dans une structure de réseau, en admettant que le système est en équilibre, c'est-à-dire que toute information entrée est sortie, la modélisation nous permet de remplacer chaque élément actif du réseau par une file d'attente.

### 5.3.7 LE ROUTAGE

Les recherches de Fortz et Thorup créent le concept de voisinage composé d'un côté de voisins aléatoires permettant de sortir des minimas locaux et de voisins ajoutant du partage de charge de l'autre. Comme ce voisinage est relativement important l'exploration est aléatoire. Les deux points clés associés à l'évaluation des voisins sont le routage et la propagation. Pour éviter des temps de calculs inacceptables, les auteurs proposent les techniques de propagation dynamique et de retoutage ciblé. Ainsi, le routage OSPF (Open Shortest Path First) optimisé peut être proche de la solution de répartition optimale des flots.

Partant de ces résultats, Cédric Fortuny propose dans sa thèse la modification de la structure de voisinage et du fonctionnement de l'algorithme menant à deux résultats: une diminution des temps de calcul de part un voisinage plus petit et une solution exploitable par les opérateurs de par son aspect incrémental.

A chaque arc  $a$  du graphe est associé un poids  $w_a$  qui représente la métrique de l'interface correspondante et qui peut prendre toute valeur dans l'intervalle de  $\theta = [1, 2^{16} - 1]$ . On désigne par  $N$ , le nombre de nœuds du graphe et par  $L$ , le nombre d'arcs du graphe.

Pour une solution admissible,  $w = (w_1, w_2, \dots, w_L)$  on a:

- $D_i^x(w)$  est la distance du nœud  $i$  au nœud de destination  $x$ ;
- $\delta_{i,j}^x(w) = \begin{cases} 1, & \text{si l'arc } (i, j) \text{ est un plus court chemin vers la destination } x \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$
- $N_i^x(w) = \sum_j \delta_{i,j}^x(w)$ , qui représente le nombre d'arcs sortants du nœud  $i$  qui sont sur un plus court chemin vers la destination  $x$ .

Les réseaux de types IP possèdent un flot de bits supérieur à  $N^2$  afin de prendre en compte tous les indicateurs de la communication notamment les protocoles de transport, les protocoles applicatifs, le type de service, la qualité de service, les ports de destinations, les ports sources, les codecs.

Le trafic émis du nœud  $i$  pour une destination  $x$  s'écrit:

$$\rho_i^x = \sum_k d^k \quad (32)$$

Avec:

- $s(k) = i$
- $t(k) = x$

Le trafic reçu au nœud  $i$ , direct et en transit, pour la destination  $x$ , avec une répartition équitable de la charge sur chaque chemin. En considérant qu'il existe  $N$  chemin, on a:

$$\gamma_i^x(w) = \rho_i^x + \sum_{j \neq x} \frac{\delta_{i,j}^x(w)}{n_j^x(w)} \gamma_j^x(w) \quad (33)$$

Par voie de conséquence, la charge de l'interface  $(i, j)$  devient:

$$Y_{i,j} = \sum_{x=1}^N \frac{\delta_{i,j}^x(w)}{n_i^x(w)} \gamma_j^x(w) \quad (34)$$

A partir de la quantification du trafic, les données en transit des points d'entrée vers la sortie permettent de déterminer le comportement du réseau. En superposant chacun des trafics élémentaires dans chaque file d'attente, on détermine le comportement point à point, puis on en déduit le comportement global et la matrice volumétrique par calculs numériques.

## 5.4 TRAVAUX DE RECHERCHES SUR LE DIMENSIONNEMENT DES RESEAUX

Ci-après, nous présentons quelques travaux sur le dimensionnement des réseaux informatiques:

Tableau 3. Recherches sur le dimensionnement dans les réseaux informatiques

| N°  | Auteur et année                         | Métriques                     | Problèmes                                                               | Applications                                  | Résultats                                                                                                         |
|-----|-----------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | (Kodjo 2014)                            | Bande passante ;<br>Routage   | Allocations de capacités,<br>cout minimum, partage de<br>bande passante | Réseaux sans fils,<br>réseaux cognitifs       | Optimisation robuste à deux<br>niveaux avec un programme<br>linéaire                                              |
| 2.  | (Nacer 2018)                            | Bande passante,<br>gigue      | Interconnexion des<br>réseaux hétérogènes                               | Systèmes<br>embarqués,<br>avionique           | Architecture réseau<br>interconnectant un réseau Can<br>via un réseau fédérateur Ethernet<br>PQSE et Ethernet AVB |
| 3.  | (Randriamasinoro<br>2021)               | Qualité de service            | Combinaison de Edge et<br>infonuagique                                  | Edge computing                                | Optimisation de l'environnement<br>Edge computing                                                                 |
| 4.  | (Vasconcelos 2023)                      | Variables linéaires           | Consommation d'énergie,                                                 | Cloud, datacenter                             | Carbon-responsive                                                                                                 |
| 5.  | (Brij B Gupta 2024)                     | Virtualisation                | Dimensionnement<br>dynamique                                            | SDN                                           | Flexibilité et centralisation des<br>ressources                                                                   |
| 6.  | (MAALEJ 2009)                           | Coût                          | Minimisation de la<br>fonction coût                                     | Ovlan (Optical Virtual<br>Local Agile Network | Modélisation mathématique,<br>modélisation avec les chaines de<br>Markov                                          |
| 7.  | (I. Martinez 2021)                      | Coût de conception<br>réduit  | Programme linéaire Mixte<br>et modèle de génération<br>de colonnes      | Fog Computing,<br>infrastructure IoT          | Construction d'une infrastructure<br>Fog et IoT                                                                   |
| 8.  | (A. Jarray 2009) (A. J.<br>Jarray 2012) | Bande passante, haut<br>debit | Commutation de circuits                                                 | OWAN-Optical Wide<br>Area Network             | Transport de flots agrégés sur<br>fibre optiques                                                                  |
| 9.  | (Ouadia 2010)                           | Grade of Service,             | Formule d'Erlang B                                                      | Edge Computing,<br>GSM                        | Calcul du debit global                                                                                            |
| 10. | (Ahmed-Nacer 2023)                      | Qualité de service            | Algorithme<br>d'apprentissages                                          | Réseaux hétérogènes<br>embarqués              | Interconnexion des applications à<br>faibles et fortes contraintes<br>temporelles                                 |
| 11. | (Bailleul 2023)                         | Liens, pannes                 | Synchronisation TSN                                                     | Réseaux satellite<br>embarqué                 | Résistance aux pannes                                                                                             |

## 6 OPTIMISATION DES RESEAUX

### 6.1 DEFINITION

L'optimisation est l'activité qui consiste à améliorer les performances de l'infrastructure. Dans notre cas il s'agit d'améliorer la qualité de service du réseau (Kasoro 2024). L'optimisation de l'architecture réseau repose sur trois axes essentiels (Giusti 2024):

- La surveillance et l'analyse de contenu qui circule sur le réseau en utilisant le monitoring;
- La gestion intelligente de la bande passante, en allouant les ressources suivant les priorités pour améliorer la qualité de service;
- L'équilibrage des charges en répartissant le trafic sur des différents liens afin d'éviter la surcharge.

### 6.2 MAILLAGE DES RESEAUX

L'intérêt principal de mailler des réseaux est de les rendre robustes aux aléas tout en évitant de dupliquer les infrastructures. Afin d'offrir la qualité de service attendue en toute circonstance, on ne peut plus appréhender le dimensionnement du réseau en agrégeant l'ensemble des trafics. Il devient nécessaire de traiter chaque type de trafic de manière différenciée.

### 6.3 OPTIMISATION DU ROUTAGE

Trois indicateurs retiennent généralement l'attention dans l'optimisation du trafic de routage:

- Le délai: temps de transfert d'un flux entre son entrée et sa sortie dans le réseau;
- La perte: proportion de flux non acheminée dans le réseau;
- La gigue: délai en sortie du réseau pour absorber les aléas et restituer un flux continu. La gigue est caractérisée par la variabilité du délai de transfert.

Le trafic en temps réel, résulte de la superposition des phénomènes agissant à différentes échelles. Pour les réseaux filaires, il existe des corrélations du trafic sur des longues périodes de temps conduisant à l'autosimilarité ou la non-stationnarité.

Les protocoles tels que OSPF et MPLS induisent des contraintes spécifiques sur les routes acheminant le trafic de leur origine à leur destination dans le réseau.

Le multiroutage, où le nombre de route pour acheminer le trafic n'est pas limité, n'induit pas de contrainte spécifique; le monoroutage où l'on admet une route unique pour acheminer le trafic est généralement abordé par les modèles linéaires en nombres entiers; les k-routage où pour acheminer le trafic seules k-routes sont permises nécessite généralement des modèles spécifiques.

Ainsi, des solutions d'optimisation peuvent être abordées telles que:

La minimisation du délai moyen par la formule:

$$Min = \sum_{p \in P} \pi_p \cdot D_p \quad (35)$$

Où:

- $\pi_p$ : proportion du trafic;
- $D_p$ : délai du chemin p;

La grande difficulté de cette relation est de dégrader fortement la qualité de service de certaines parties du réseau, généralement la partie où le trafic est faible.

En utilisant la fonction de Lagrange:

$$Min = \sum_{p \in P} \lambda_p (D_p \cdot d_{max}) \quad (36)$$

Où:

$\lambda_p$ : le facteur multiplicateur lagrangien qui pénalise le dépassement du délai  $D_p$  obtenu sur le chemin p.

On constate que l'inconvénient de ce modèle de relaxation lagrangienne ne garantit pas une solution réalisable qui satisfait aux contraintes de qualité de service.

Il existe plusieurs algorithmes d'optimisation du routage réseau. C'est notamment:

- a. Algorithmes de Dijkstra et Bellman-Ford pour les plus courts chemins;
- b. Algorithme de Ford-Fulkerson et Edmonds-Karp pour le flot maximum;
- c. Algorithme de Kuhn-Munkres pour le couplage maximal;
- d. Algorithme de Prim et Kruskal pour les arbres couvrants minimaux.

Une autre approche consiste à minimiser la grande valeur induite. On minimise le délai maximum. Pour remédier aux difficultés induites par les précédents modèles, une solution équilibrée serait d'appliquer de nouveau le critère basé sur les extremums aux variables de décision encore libres. L'approximation de la charge moyenne totale de la k-ième classe de service se présente de la manière suivante:

$$4X_k = \frac{\lambda_k}{\mu_k} + \lambda_k \frac{\sum_{j=1}^k \sigma_j^2 \cdot \lambda_j}{2-2\rho} \quad (37)$$

Avec:

$$\rho = \sum_{j=1}^k \frac{\lambda_j}{\mu_j} \quad (38)$$

#### 6.4 LES METHODES LOGICIELLES D'OPTIMISATION DU TRAFIC RESEAU

Il existe plusieurs méthodes logicielles d'optimisation du trafic réseau, les plus courantes sont (Cabantous 2023) (UIT-R 2018):

##### 6.4.1 UTILISATION DE LA QUALITE DE SERVICE

La qualité de service a pour mérite de minimiser la latence pour les applications sensibles (Nick Feamster 2022). En implémentant la qualité de service on peut prioriser un type de trafic en fonction de son importance (Penchev 2023).

#### 6.4.2 LA COMPRESSION DES DONNÉES

La compression des données permet de réduire la taille des données pendant leur transmission, ce qui a pour mérite d'alléger le trafic du réseau. Cette technique est rendue efficace pour les fichiers volumineux.

#### 6.4.3 LE CACHING

La mise en cache des données permet de réduire le trafic tout en gardant localement les données fréquemment demandées. Le caching permet de réduire le temps de chargement et la consommation de la bande passante.

#### 6.4.4 LE LOAD BALANCING

Le load balancing permet la répartition des charges entre plusieurs nœuds, ce qui permet d'équilibrer le trafic et d'éviter les surcharges sur un seul nœud (Muhammad Asim Shahid 2020). Le load balancing maximise la disponibilité et la fiabilité des services.

#### 6.4.5 LA LIMITATION DU TRAFIC

On limite le trafic sur certains ports et applications. Il est possible de gérer le volume des données traversant le réseau. La limitation du trafic permet d'éviter la saturation qui diminue les performances.

### 6.5 L'EQUATION DU TRAFIC ELEPHANT

Pour calculer le seuil, on utilise l'équation de Tchebychev (Sivalingam et al., 2024) (Wang et al., 2024). Le seuil est défini afin de comptabiliser le trafic éléphant, cette équation considère pour référence la moyenne et les écarts type. Lorsque la valeur est supérieure au seuil, le trafic est considéré comme éléphant (Lan & Heidemann, 2006):

$$Seuil = f + 3 \left( \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - f)^2}{n-1}} \right) \quad (39)$$

## 7 GESTION DU TRAFIC RÉSEAU

### 7.1 LES RÈGLES DE GESTION

La gestion du trafic réseau nous amène à observer 3 règles essentielles:

- L'allocation dynamique de la bande passante est cruciale pour répondre à la demande fluctuante des applications, cela garantit que les applications critiques disposeraient toujours de ressources suffisantes;
- La surveillance du trafic en temps réel pour détecter les anomalies. Pour cela on utilise des outils de monitoring;
- La configuration de la qualité de service, les politiques de qualité de service permettent de garantir la priorité des applications critiques.

Pour optimiser la gestion du trafic réseau, les indicateurs ci-après sont généralement évalués:

**Tableau 4. Indicateurs de gestion du trafic**

|    | Indicateur                                 | Formule                                            | Unité                 | Observations                                      |
|----|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------|
| 1. | Débit                                      | Débit = volume de données/temps                    | Bit par seconde / bps | Le débit est l'indicateur clé de performance      |
| 2. | Latence                                    | Latence = temps de réponse + temps de transmission | Seconde               | Le temps nécessaire pour atteindre la destination |
| 3. | Le taux d'utilisation de la bande passante | Utilisation = (débit réel / débit maximum) x 100%  |                       |                                                   |
| 4. | Maximum Transmission Unit                  | MTU = Taille de paquet maximum – entêtes           |                       |                                                   |

### 7.2 OUTILS DE GESTION DU TRAFIC RESEAU

Nous énumérons, ci-après quelques outils de gestion du trafic réseau (Giusti 2024) (Pujolle 2018):

- Zabbix, un outil qui fournit les fonctionnalités de surveillance de l'infrastructure réseau et d'audit de la capacité en temps réel (Zabbix LLC 2025). Il est capable de s'adapter aux besoins spécifiques d'une administration réseaux, c'est un outil libre avec licence GNU;
- Wireshark (Bock 2022) est un outil d'analyse en profondeur, il permet d'analyser les paquets et de diagnostiquer les flux réseau, c'est un outil libre avec licence GNU;
- Solarwinds (SolarWinds 2025), fournit des fonctionnalités avancées pour analyser et surveiller les réseaux complexes en offrant une série d'alertes personnalisées lorsqu'une anomalie est détectée;
- PRTG Network Monitor, il permet de surveiller la bande passante, les applications en temps réel et d'identifier les problèmes liés au trafic à l'aide d'une interface intuitive;
- Netflow analyser, c'est un outil d'analyse du trafic qui permet de visualiser les flux de données sur le réseau, facilitant la détection des goulots d'étranglement. Il permet l'élaboration des rapports pour l'optimisation des trafics réseaux.

## 8 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le dimensionnement est une activité de l'ingénierie de réseau qui mérite d'être conduite avec beaucoup d'attention.

Ainsi, les futures recherches pourraient se pencher sur l'utilisation des algorithmes de machine Learning avec des solutions d'optimisation des réseaux définis par logiciels tels que sdn et sdwan. On pourrait aborder dans le sens des recherches (Jorge GOMEZ 2023) qui utilisent sept modèles d'apprentissage supervisés tels que la « regression logistc », le « Support Vector Machine (SVM) », le « Random Forest Classifier », le « Linear Discriminant Analysis (LDA) », le « K-Neighbors Classifier (KNN) », le « Naive Bayes Gaussian (Gaussian NB) » et le « Decision Tree Classifier ».

L'intelligence artificielle (Jean-Paul Haton 2023) (Peter Norvig 2021) permettrait ainsi de prédire les besoins futurs, par l'apprentissage automatique ou par renforcement multi-agents. On anticipe le changement en analysant le trafic pour ajuster le dimensionnement et améliorer l'efficacité opérationnelle.

## REFERENCES

- [1] Ahmed-Nacer, Abdelaziz. 2023. Analyse et dimensionnement de réseaux hétérogènes embarqués. Toulouse: Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT.
- [2] Andrew Tanenbaum, David Wetherall. 2014. Réseaux. 5ème. Traduit par Jean-Alain Hernandez et René Joly. Paris: Nouveaux Horizons.
- [3] Atienza, Eric. 2003. Méthodologie et outils pour le dimensionnement, Modélisation et simulation. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 157.
- [4] Bailleul, Quentin. 2023. Dimensioning TSN network synchronization in different embedded context Networking and Internet Architecture. Toulouse: Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT.
- [5] Bock, Lisa. 2022. Learn Wireshark, a definitive guide to expertly analyzing protocols and troubleshooting network usign wireshark. Birmingham: Packt.
- [6] Brij B Gupta, Amrita Dahiya, Elhadj Benkhelifa. 2024. Sdn And Nfv: A New Dimension To Virtualization. World Scientific.
- [7] Cabantous, Pierre. 2023. Les réseaux informatiques - Guide pratique pour l'administration, la sécurité et la supervision. Eni Editions.
- [8] Charles Brooks, Christopher Grow, Philip Craig, Donald Short. 2021. Cybersécurité, sécurisation des systèmes informatiques. Traduit par Philippe Van Goethem Anne-Sophie Vilret. Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur.
- [9] Chen, Ken. 2014. Evaluation de performances par simulation et analyse. London: Hermes Sciences Publishing.
- [10] DORDOIGNE, José. 2015. Réseaux informatiques: Notions fondamentales. 6ème Edition. Paris: Eni Editions.
- [11] Elia, Mohamad. 2013. Étude et dimensionnement d'un réseau de communications pour le support des services de téléopération de véhicules dans un environnement minier souterrain. Québec: Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- [12] Ghernaouti, Solange. 2019. Cybersécurité, analyser les risques et mettre en oeuvre les solutions. 6ème. Paris: Dunod.
- [13] Giusti, Luca. 2024. Architectures réseau d'entreprise - Concevoir des infrastructures réseau évolutives. Paris: Eni - Editions.
- [14] I. Martinez, A. S. Hafid and A. Jarray,. 2021. «Design, Resource Management, and Evaluation of Fog Computing Systems: A Survey,» IEEE Internet of Things Journal (I.) vol. 8 (no. 4): pp. 2494-2516.
- [15] Jarray, A., Jaumard, B. & Houle, A.C. 2012. « CAPEX/OPEX effective optical wide area network design.» Telecommun Syst 329–344.
- [16] Jarray, Abdallah. 2009. Planification et dimensionnement des réseaux optiques de longues distances. Montréal: Université de Montréal.
- [17] Jean Luc Montagnier. 2011. Réseaux d'entreprises par la pratique. Édité par Eyrolles. 1 vols. Paris: Eyrolles.
- [18] Jean-Paul Haton, Emmanuel Haton, Marie-Christine Haton. 2023. Intelligences artificielles: de la théorie à la pratique: Modèles, applications et enjeux des IA. Paris: Dunod.
- [19] Jorge GOMEZ, Velssy Hernandez Riano, Gustavo Ramize Gonzalez. 2023. «Traffic Classification in IP Networks Through Machine Learning Techniques in Final Systems.» IEEE Access 1-9.
- [20] Kasoro, Nathanael. 2024. Dimensionnement et optimisation des réseaux. Lubumbashi: Université Don Bosco de Lubumbashi.

- [21] Kodjo, Alvinice. 2014. Dimensionnement et optimisation des réseaux de collecte sans fil. Nice: Ecole doctorale sciences et technologies de l'information et de la communication de Nice.
- [22] LINA A. HAIBEH, MUSTAPHA C. E. YAGOUR, ABDALLAH JARRAY. 2022. «A Survey on Mobile Edge Computing Infrastructure: Design, Resource Management, and Optimization Approaches.» IEEE Accès 27591-27610.
- [23] MAALEJ, Ramzi. 2009. Evaluation des performances de l'OVLAN et son application aux reseaux optiques d'accès. Quebec: UNIVERSITY DE SHERBROOKE.
- [24] Maman Abdurachman Djuhar, Siew Lee Gan. 2013. «Minimal spanning tree problem in stock networks analysis: An efficient algorithm.» Physica A: Statistical, mechanics and its applications 2226-2234.
- [25] Mouret, Pascal. 2017. «Haute disponibilité réseau: et pour quelques neuf de plus.» JRES 10.
- [26] Muhammad Asim Shahid, Noman Islam, Muhammad Mansoor Alam, Mazliham Mohd Su'ud. 2020. «A Comprehensive Study of Load Balancing Approaches in the Cloud Computing Environment and a Novel Fault Tolerance Approach.» IEEE ACCESS (IEEE Access) 1-27.
- [27] Mur, Jean-Michel. 2019. Les fibres optiques: Notions fondamentales (Câbles, Connectique, Composants, Protocoles, Réseaux...). 3ème Édition. Paris: Eni Editions.
- [28] Nacer, Abdelaziz Ahmed. 2018. Analyse et dimensionnement de réseaux hétérogènes embarqués. Toulouse: École doctorale Mathématiques, informatique et télécommunications de Toulouse.
- [29] Nathanael Kasoro, SK Kasereka, GK Alpha, K Kyamakya. 2021. «ABCSS: A novel approach for increasing the TCP congestion window in a network.» Édité par Elsevier. The 8th International Symposium on Emerging Inter-network, Communication Mobility (ScienceDirect) 437-444.
- [30] Nick Feamster, Andrew Tanenbaum, David J. Wetherall. 2022. Les réseaux. 6ème. Paris: Pearson France.
- [31] Ouadia, Manal Senhaji. 2010. Dimensionnement et optimisation du réseau EDGE. Fès, Maroc: Université Sidi Mohamed Ben Abdellah.
- [32] Penchev, Miroslav Slavov and Pencho. 2023. «Quality of Service (QoS) for converging Service Technologies.» Journal of Information Organization 8.
- [33] Peter Norvig, Stuart Russell. 2021. Intelligence artificielle 4e édition: Une approche moderne Tome 4. Paris: Pearson Education.
- [34] Pujolle, Guy. 2024. Les Réseaux - Édition 2024-2026: Wi-Fi 7 / 8, 5G / 6G, réseaux quantiques, constellations de satellites... 10ème. Paris: Eyrolles.
- [35] —. 2018. Les réseaux: l'ère des réseaux cloud et de la 5G - Edition 2018-2020. 9ème édition. Paris: Eni Éditions.
- [36] Randriamasinoro, Njakarison Menja. 2021. École doctorale Mathématiques, informatique et télécommunications calcul périphérique. MONTREAL: ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC.
- [37] Sara Akbarzadeh, Jean Schwoerer, Bertrand Bailly, Wael Labidi. 2020. Les réseaux 5G. Paris: Eni Editions.
- [38] SolarWinds. 2025. «<https://www.solarwinds.com/fr>.» Solarwinds. Accès le 02 22, 2025. <https://www.solarwinds.com/fr>.
- [39] Stéphane Lohier, Aurélie Quidelleur. 2010. Le Réseau Internet: des services aux infrastructures. Paris: Dunod.
- [40] Thomas Nadeau, Ken Gray. 2013. SDN – Software Defined Networks. Maryland: O'REILLY.
- [41] UIT-R. 2018. Rapport UIT-R SM.2356-2, Procédures de planification et d'optimisation des réseaux de contrôle du spectre en ondes métriques/décimétriques. Paris: Union International des télécommunications.
- [42] Union International desTélécommunications,. 2001. «Méthodes de dimensionnement pour le RNIS à large bande.» Recommandation UIT-T E.737. New-York: UIT-T, 02. 43.
- [43] Vasconcelos, Miguel Felipe Silva. 2023. Stratégies pour l'opération et le dimensionnement des centres de données cloud à faible émission de carbone. Grenoble Alpes: École doctorale Mathématiques, sciences et technologies de l'information, informatique de Grenoble.
- [44] Vaulot, A. E., et F. W. Rabe. 1947. «Démonstration des formules d'erlang en usage pour le calcul du trafic.» Annales des Télécommunications, décembre: 387-389.
- [45] Zabbix LLC. 2025. «<https://www.zabbix.com/fr/index>.» Zabbix. Accès le 02 23, 2025. <https://www.zabbix.com/fr/index>.