REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE IBN KHALDOUN - TIARET

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTÉ DES MATHEMATIQUES ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER

Spécialité : Réseaux et Télécommunications
Par :

MANSOUR CHAIMAA
et
REBAI ASMAA

Sur le thème

Étude par simulation des performances des politiques de remplacement de cache dans les réseaux NDN

Soutenu publiquement le 15/ 06 /2025 à Tiaret devant le jury composé de :

Mr Bekkar Khaled	Grade	Université MCB	Président
Mr Nassane Samir	Grade	Université MAA	Encadrant
Mr Elaiche Fatima	Grade	Université MAA	Examinatrice

2024-2025

Dédicace

À mes chers parents, battement de mon cœur et piliers de ma vie, pour tout l'amour, les sacrifices et les prières inlassables qu'ils m'ont offerts… Je vous dédie ce travail en témoignage de fidélité et de gratitude.

À mes frères et sœur : Hadjer, Anis et Mostapha, sources de réconfort et de soutien, je vous adresse toute ma reconnaissance pour votre patience et votre présence constante à mes côtés.

À mes respectables enseignants, qui n'ont jamais hésité à partager leur savoir et à m'orienter avec bienveillance, je vous exprime toute ma considération et mon respect.

À mes chers amis, compagnons de route, merci pour votre soutien, vos encouragements et votre précieuse amitié.

À tous ceux qui ont laissé une empreinte bienveillante dans cette aventure, je dédie humblement ce travail, en espérant qu'il soit à la hauteur des attentes.

ASMAA

Dédicace

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à mes parents, véritables piliers de mon existence, pour leur amour inconditionnel, leurs innombrables sacrifices et leurs prières constantes. Ce travail leur est humblement dédié en témoignage de ma reconnaissance et de mon attachement sincère.

Ma gratitude s'adresse également à mes frères et à ma sœur, pour leur soutien moral, leur patience et leur présence réconfortante tout au long de ce parcours.

Je remercie vivement l'ensemble de mes enseignants pour la qualité de leur encadrement, la richesse de leur enseignement et la bienveillance dont ils ont fait preuve à chaque étape de ma formation.

À mes amis proches, je suis particulièrement reconnaissant pour leur amitié précieuse, leur encouragement indéfectible et leur appui dans les moments les plus décisifs.

Enfin, à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué positivement à cette aventure, je dédie respectueusement ce mémoire, avec l'espoir qu'il reflète fidèlement les efforts déployés et les attentes placées en moi.

CHAIMAA

Remerciements

Louange à Dieu, par la grâce de qui les œuvres se réalisent, et que la paix et les bénédictions soient sur le meilleur des messagers, notre Prophète Mohammed, ainsi que sur sa famille et ses compagnons.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Tout d'abord, je remercie chaleureusement NASSANE SAMIR pour son accompagnement, ses conseils pertinents, sa disponibilité et son soutien tout au long de ce projet.

Je remercie également l'Université Ibn Khaldoun – Tiaret, ainsi que le département d'informatique, pour m'avoir accueilli et offert un environnement de travail favorable à l'apprentissage et à la recherche.

Je souhaite aussi remercier mes enseignants pour la qualité de l'enseignement dispensé tout au long de ma formation, qui m'a permis d'acquérir les compétences nécessaires à la réalisation de ce travail.

Enfin, j'adresse un grand merci à ma famille et à mes amis pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et leur présence précieuse.

Table des matières

RESUME ix
INTRODUCTION GENERALE 1
CHAPITRE 1 Architeture NDN 2
INTRODUCTION 2
1) Architecture IP 2
1.1) Limites de l'architecture IP 3
1.1.1) Sécurité et confidentialité 3
1.1.2) La Mobilite 4
1.1.3) Accessibilité 4
1.1.4) Problèmes de latence et de congestion 4
2) L'approche des réseaux orientés contenus 4
3) Les Origines de NDN 5
4) NDN (Named-Data Networking 7
4.1) Architecture du Named Data Networking (NDN) 7
4.2) Les entités principales de l'architecture NDN 8
4.3) Le nommage 8
5) Mise en cache dans le NDN 10
5.1) Principe de la mise en cache dans NDN 10
5.2) Les avantages du caching dans NDN 10
5.3) Stratégies de mise en cache dans NDN 11
5.4) Problèmes et défis du caching en NDN 11
6) Les paquets dans le NDN 11
6.1) Paquet Interest (Requête de données) 11
6.2)Paquet Data (Réponse aux requêtes) 12
6.3) Mécanisme de fonctionnement 13
6.4) Différences paquets NDN avec les paquets IP classiques 13
7)Routage des paquets dans NDN 13
7.1)Structures de routage en NDN 13
7.2)Processus de routage des paquets Interest 14
7.3)Processus de routage des paquets Data 14
7.4)Stratégies de routage en NDN 14
7.5) Différences entre le routage NDN et IP classique 15

8) Mobilité dans NDN 15
8.1) Mobilité des consommateurs 15
8.2) Mobilité des producteurs 16
8.3) Comparaison de la mobilité entre NDN et IP 17
9) Sécurité dans NDN 17
9.1) Principe de sécurité centré sur les données 17
9.2) Mécanismes de sécurité en NDN 17
9.3) Comparaison avec la sécurité en IP 18
10) Défis du NDN 19
10.1) Confidentialité 19
10.2) Interopérabilité avec les réseaux IP 19
10.3) Gestion des ressources réseau 20
10.4) Comparaison défis entre NDN et IP 20
CONCLUSION 22
CHAPITRE 2 Politiques de remplacement de cache 23
INTRODUCTION 23
1)Politique de placement de cache 24
1.1) Leave Copy Everywhere(LCE) 24
1.2) La stratégie de mise en cache LCD (Leave Copy Down) 25
2) Politique de remplacement du cache 27
2.1) Les stratégies de remplacement de cache basées sur la récence . . . 28
2.2) Les stratégies de remplacement de cache basées sur la fréquence . . 29
2.3) Les stratégies de remplacement de cache basées sur la taille 30
2.4) Les stratégies de remplacement de cache basées sur les fonctions . 31
2.5) Les stratégies de remplacement de cache dédiées aux environnements mobiles 33
2.6) stratégies basées sur le partitionnement 34
3) Autres politiques de remplacement 36
3.1) FIFO (First In, First Out) 37
3.2) RAND(Aléatoire) 37
3.3) Cache Aging (Vieillissement ducache) 38
3.4) Multi-Criteria Replacement Policy (Politique de remplacement multi-critères) 38
3.5) Hop-BasedProbabilisticCaching (Mise en cache probabiliste basée sur le nombre de sauts) 39
3.6) Popularity-Aware Cache Replacement (Remplacement basé sur la popularité) 39
CONCLUSION 41
CHAPITRE 3 Simulation et interprétation 41

INTRODUCTION 41
CONCLUSION GENERAL 57

Liste des tableaux

1 Comparaison entre paquets NDN et IP 13
2 Comparaison entre le routage NDN et IP classique 15
3 Comparaison de la mobilité entre NDN et IP 17
4 Protection contre les attaques 18
5 Comparaison avec la sécurité en IP 19
6 Comparaison défis entre NDN et IP 20

Table des figures

Figure 1 Architectures ICN [51] 6
Figure 2 L'architecture de réseau ICN [51] 6
Figure 3 L'architecture du NDN [51] 8
Figure 4 Paquet de donnes [58] 12
Figure 5 paquet de requete [58] 12
Figure 6 Les classifications des stratégies de mise en cache 24
Figure 7 La stratégie de mise en cache LCE [5] 25
Figure 8 La stratégie de mise en cache LCD [45] 26
Figure 9 Exemple de l'algorithme LRU 28
Figure 10 Exemple de l'algorithme LFU 30
Figure 11 Les spectres de LRFU selon la fonction $F(x)$ [37] 32
Figure 13 Algorithme ARC [32] 35
Figure 14 fonctionnement de cache FIFO [20] 37

RESUME

Le Named Data Networking (NDN) est une architecture réseau émergente qui repense les principes fondamentaux de communication sur Internet. En rupture avec l'architecture classique basée sur les adresses IP, le NDN privilégie l'acheminement des données selon des noms explicites, plaçant ainsi l'information au cœur du réseau. Cette approche permet d'améliorer la sécurité, l'efficacité et la résilience du système grâce à des mécanismes natifs tels que la mise en cache de contenu.

Dans ce contexte, ce mémoire s'intéresse particulièrement à l'étude des mécanismes de mise en cache, et plus précisément aux politiques de remplacement qui régissent la gestion du contenu en cache. À travers une démarche expérimentale reposant sur des simulations, l'objectif est d'évaluer les performances de différentes politiques (telles que LRU,FIFO, etc.) selon plusieurs critères, notamment le Le taux de réussite du cache et latence. Cette analyse permet de mieux comprendre l'impact de ces stratégies sur les performances globales du réseau NDN et d'identifier les choix les plus adaptés en fonction des contextes d'usage.

En fournissant des résultats concrets et comparatifs, cette étude contribue à l'optimisation des mécanismes de cache dans les réseaux NDN et ouvre la voie à des améliorations futures pour un Internet plus rapide, plus sûr et plus évolutif.

mots-clés :

Named Data Networking (NDN), Mise en cache, Politiques de remplacement, Routage basé sur le nom.

ABSTRACT

Named Data Networking (NDN) is an emerging network architecture that redefines the fundamental principles of Internet communication. Unlike the traditional IP-based architecture, which routes data packets based on IP addresses, NDN focuses on routing content based on its explicit name, placing information at the core of the network. This paradigm shift enhances the system's security, efficiency, and resilience through inherent mechanisms such as content caching.

This thesis focuses specifically on the simulation of cache replacement policies within the NDN framework. Through an experimental approach based on simulations, the objective is to evaluate the performance of various replacement strategies (such as LRU, FIFO, etc.) according to key metrics including The cache hit rate, transmission latency. The analysis aims to assess the impact of these strategies on the overall performance of the NDN and to determine the most suitable approaches for different use cases.

By providing concrete and comparative results, this study contributes to the optimization of caching mechanisms in NDN and opens new perspectives for building a faster, more secure, and scalable future Internet.

Keywords :

Named Data Networking (NDN), Caching, Replacement Policies, Name-based Routing.

INTRODUCTION GENERAL

INTRODUCTION GENERAL

Les réseaux de communication modernes sont confrontés à des défis croissants liés à la gestion efficace des données, notamment en raison de l'explosion du volume de contenu généré et consommé par les utilisateurs. Dans ce contexte, les architectures de réseau traditionnelles, basées sur la communication hôte à hôte, montrent leurs limites. Le Named Data Networking , une nouvelle architecture de réseau centrée sur les données, émerge comme une solution prometteuse pour répondre à ces défis.Contrairement aux modèles traditionnels, le NDN se concentre sur la diffusion et la récupération de contenu en utilisant des noms sémantiques plutôt que des adresses IP, ce qui permet une meilleure gestion du trafic et une réduction de la latence. L'un des mécanismes clés du NDN est la mise en cache des données au niveau des nœuds du réseau.

Cette fonctionnalité permet de stocker temporairement les contenus fréquemment demandés, réduisant ainsi la charge sur les serveurs d'origine et améliorant les performances globales du réseau.

Cependant, la gestion efficace de ce cache repose sur des politiques de remplacement de cache, qui déterminent quels contenus doivent être conservés ou évincés lorsque l'espace de cache est limité. Les politiques de remplacement de cache classiques, telles que LRU(Least Recently Used) , FIFO ,ou Topologie Abilene , ont été largement étudiées dans les réseaux traditionnels.

Cependant, leur application dans les réseaux NDN nécessite une réévaluation, car ces réseaux présentent des caractéristiques uniques, telles que la nature hiérarchique des noms de données, la forte variabilité des modèles de trafic, et la nécessité de prendre en compte des facteurs comme la popularité des contenus et leur durée de vie.

L'objectif de cette étude est d'explorer, par le biais de simulations, les performances des différentes politiques de remplacement de cache dans les réseaux NDN.

En utilisant des outils de simulation spécialisés, nous chercherons à évaluer l'efficacité de ces politiques en termes de taux de succès du cache, de réduction de la latence, et de charge sur le réseau.

De plus, nous examinerons comment des facteurs tels que la taille du cache, la topologie du réseau, et les modèles de trafic influencent les performances des politiques de remplacement.

Cette recherche vise à fournir des insights précieux pour les concepteurs de réseaux NDN, en identifiant les politiques de remplacement de cache les plus adaptées à différents scénarios d'utilisation.

Enfin, cette étude pourrait ouvrir la voie à de nouvelles approches innovantes,

telles que l'intégration de techniques d'apprentissage automatique pour optimiser les décisions de remplacement de cache en temps réel.

CHAPITRE 1

Architeture NDN

INTRODUCTION

L'Internet actuel est basé sur le protocole de communication IP, conçu pour permettre à différents ordinateurs et périphériques de communiquer entre eux en utilisant des adresses IP uniques. Les données sont transmises sous forme de paquets qui sont routés via des serveurs intermédiaires jusqu'à leur destination. Cependant, avec la croissance exponentielle des données et l'évolution des exigences des utilisateurs, plusieurs défis émergent, notamment en matière de sécurité, de mobilit, et de gestion efficace du contenu. Ces limitations rendent le protocole IP actuel insuffisant pour répondre aux besoins actuels et futurs de l'Internet.

Pour relever ces défis, de nouvelles architectures de réseau ont été développées, telles que Information-Centric Networking, dont Named Data Networking est une implémentation majeure. Contrairement au modèle IP traditionnel, qui se concentre sur les adresses des hôtes, le NDN utilise des noms de contenu pour identifier et router les données.

Chaque paquet de données est considéré comme un objet identifié par un nom unique, ce qui permet une communication centrée sur le contenu plutôt que sur les adresses IP.

Dans ce chapitre, nous présenterons les limites de l'architecture actuelle de l'Internet et les défis qu'elle pose. Nous introduirons brièvement l'architecture Content-Centric Networking, une approche pionnière de l'ICN, puis nous nous concentrerons sur l'architecture NDN et ses principales caractéristiques : le nommage, la résolution des noms, et le routage. Enfin, nous discuterons des avantages et des défis de cette nouvelle approche, ainsi que de son potentiel pour répondre aux besoins des réseaux de demain .

1)Architecture IP

L'architecture IP (Internet Protocol) est la base du fonctionnement de l'Internet actuel. Elle permet la communication entre des dispositifs connectés à un réseau en utilisant des adresses uniques pour identifier chaque appareil.

Définition

L'architecture IP est un ensemble de protocoles et de standards qui définissent comment les données sont transmises entre des dispositifs sur un réseau. Elle repose sur

le principe de l'adressage logique (adresses IP) pour acheminer les paquets de données de la source à la destination, indépendamment du matériel ou de la topologie du réseau sous-jacent.

1.1) Limites de l'architecture IP

L'architecture actuelle d'Internet a été initialement conçue pour assurer l'interconnexion et la communication entre différents réseaux. Toutefois, avec l'essor exponentiel de son utilisation pour la distribution de contenus, notamment dans le commerce électronique, les médias numériques et les applications mobiles, ses limites structurelles sont devenues manifestes. En effet, la distribution de contenu repose sur la disponibilité et l'accessibilité des informations plutôt que sur leur simple acheminement. Or, l'utilisation d'un protocole de communication de type point-à-point pour gérer ces besoins distributifs introduit une complexité accrue et une vulnérabilité aux erreurs. Par ailleurs, d'autres problématiques inhérentes à cette architecture restent non résolues et nécessitent une réévaluation des paradigmes actuels de mise en réseau.

1.1.1) Sécurité et confidentialité

À l'origine, l'Internet a été conçu pour interconnecter un nombre restreint d'hôtes de confiance. Toutefois, son expansion rapide a engendré d'importants défis en matière de sécurité, notamment l'augmentation des attaques sophistiquées [61].Pour atténuer ces vulnérabilités, plusieurs protocoles ont été développés, tels que TLS [2], IPsec [11], et DNSSEC [40]. Cependant, ces solutions présentent des limitations, notamment des coûts en termes de performance et une approche fragmentée, chaque protocole étant dédié à la sécurisation d'un composant spécifique du réseau, sans pour autant garantir une protection globale du système [70].

Par ailleurs, le modèle de sécurité de l'architecture IP actuelle repose sur une association entre la sécurité d'un contenu et la confiance accordée à l'hôte qui le stocke ainsi qu'à la connexion utilisée pour son acheminement, généralement via TLS [47, 74]. Or, ce modèle présente une vulnérabilité structurelle, car la connexion étant temporaire, elle ne permet pas de garantir l'intégrité et l'authenticité du contenu au-delà de la session de communication [13].

Ainsi, un utilisateur ayant récupéré un contenu depuis une source d'origine ne peut pas s'assurer que celui-ci n'a pas été altéré ultérieurement, par exemple par un logiciel malveillant. De même, un autre utilisateur souhaitant accéder au même contenu ne peut pas le récupérer auprès du premier utilisateur, faute de mécanismes de confiance établis. En conséquence, la vérification de l'intégrité et de l'authenticité des contenus repose uniquement sur la nécessité d'une connexion directe et sécurisée avec la source d'origine,

ce qui limite l'efficacité des mécanismes de distribution et accroit la dépendance aux infrastructures centralisées.

Une alternative plus appropriée à l'approche traditionnelle basée sur la sécurisation des connexions consiste à adopter un modèle de sécurité centré sur les contenus, dans lequel les mécanismes de protection sont directement intégrés aux données elles-mêmes. Cette approche permet d'assurer l'authenticité et l'intégrité des contenus de manière intrinsèque, indépendamment de leur source ou du canal de distribution.

Ainsi, les utilisateurs peuvent vérifier la fiabilité d'un contenu récupéré à tout moment et sans dépendre d'une connexion sécurisée avec l'émetteur d'origine, renforçant ainsi la résilience et la confiance dans les échanges d'informations [13].

1.1.2) La Mobilite

La mobilité constitue un défi supplémentaire dans l'architecture actuelle de l'Internet. En effet, les adresses IP remplissent simultanément les fonctions de localisateur et d'identifiant des hôtes [25]. Lorsqu'un hôte se déplace, le changement de localisateur entraîne inévitablement un changement d'adresse IP, ce qui engendre une interruption de la connectivité. Plusieurs propositions ont été avancées pour résoudre cette problématique, bien qu'aucune n'apporte de solution radicale. Certaines de ces solutions préconisent l'utilisation d'adresses IP distinctes pour séparer les rôles de localisateur et d'identifiant, impliquant ainsi une refonte significative du modèle de dénomination des hôtes. D'autres approches modifient la hiérarchie de routage, ce qui compromet la scalabilité du système et pourrait affecter son efficacité à grande échelle [3].

1.1.3) Accessibilité

Bien que la couverture d'Internet continue de s'étendre de manière significative, il subsiste des zones géographiques où l'accès à Internet est soit inexistant, soit fortement limité. De nouveaux défis émergent ainsi, notamment la nécessité d'améliorer l'accessibilité pour les populations n'ayant pas encore de connexion à Internet [16].

1.1.4) Problèmes de latence et de congestion

L'augmentation du volume de données entraîne des problèmes de latence et de congestion dans les réseaux IP traditionnels. La multiplication des demandes pour les mêmes contenus surcharge les serveurs centraux. En revanche, NDN utilise un cache distribué pour réduire ces problèmes en stockant localement les données fréquemment demandées.

2) L'approche des réseaux orientés contenus

Le réseau orienté contenu (ICN) constitue une architecture de réseautage qui privilégie le contenu plutôt que les hôtes. Cette approche repose sur l'utilisation de noms de contenu, un routage basé sur le contenu, ainsi que sur la livraison et le stockage décentralisés des informations au sein du réseau. Parmi les architectures orientées contenu, on retrouve des modèles tels que DONA (Data-Oriented Network Architecture), NetInf (Network of Information), CCN (Content-Centric Networking) et NDN (Named Data Networking). Dans le cadre de l'ICN, les utilisateurs finaux expriment leurs besoins en termes de contenu, tandis que les routeurs sont responsables du cache, de la récupération et de la distribution des contenus demandés [13].

3) Les Origines de NDN

L'architecture de réseau ICN(Information-Centric Networking)

Le réseau centré sur l'information (ICN) représente un paradigme de réseautage innovant qui offre des solutions potentielles pour améliorer les applications de communication. Ce modèle a émergé en réponse aux évolutions notables dans l'utilisation d'Internet et aux défis évoqués précédemment [3].

L'objectif principal de l'ICN est de permettre la distribution de contenu de manière indépendante des hôtes d'origine. Contrairement aux réseaux traditionnels basés sur le protocole IP, où les communications reposent sur les adresses IP des hôtes, l'ICN se focalise sur le routage et la récupération de contenu à travers des noms uniques attribués aux données.

Dans un réseau ICN, les noms, et non les adresses IP, servent à identifier les données. Peu importe la localisation physique des ressources, les utilisateurs peuvent solliciter un contenu en utilisant son nom, et le réseau prend en charge la recherche et la livraison de ce contenu.

Cette approche permet une gestion plus efficiente des ressources réseau et optimise la récupération du contenu. L'ICN vise à fournir une infrastructure réseau plus résiliente et adaptable pour la distribution de contenu et la mobilité, en exploitant des mécanismes tels que la mise en cache, la communication multipartite et des modèles d'interaction déconnectée [3].

Figure 1 Architectures ICN [51]

L'architecture des réseaux centrés sur l'information (ICN) présente plusieurs avantages significatifs par rapport aux réseaux IP traditionnels. Tout d'abord, elle permet une distribution de contenu plus efficace en intégrant des mécanismes de mise en cache à différents niveaux du réseau, ce qui réduit la congestion et améliore les performances globales.

Par ailleurs, l'ICN renforce la sécurité grâce à l'utilisation des mécanismes de signature numérique, garantissant ainsi l'authenticité et l'intégrité des contenus échangés.

Cependant, cette approche soulève également plusieurs défis. La gestion des politiques de contrôle d'accès ainsi que l'administration des noms de contenu constituent des problématiques complexes à résoudre. De plus, la transition d'une infrastructure IP traditionnelle vers une architecture ICN requiert des efforts considérables en matière de déploiement et de compatibilité.

Bien que la mise en cache améliore significativement la rapidité de distribution des données, des défis persistent quant à son déploiement et sa gestion optimale, nécessitant ainsi des recherches approfondies pour surmonter ces limitations [57].

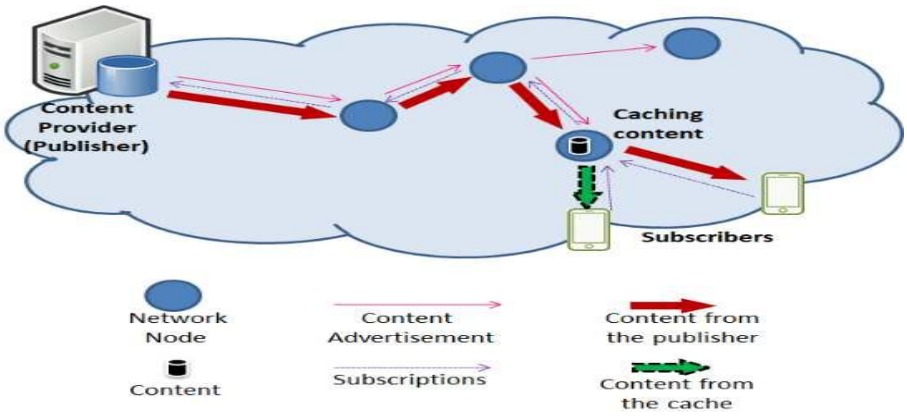


Figure 2 L'architecture de réseau ICN [51]

4) NDN (Named-Data Networking)

Le NDN est une architecture de réseau orientée contenu, issue du Content-Centric Networking (CCN), qui vise à surmonter les limitations des réseaux IP traditionnels en optimisant la gestion, la sécurité et la distribution des données. Contrairement aux modèles basés sur l'adressage IP, NDN utilise un schéma de dénomination explicite des contenus via des noms hiérarchiques, permettant une transmission unique des données sur un lien, indépendamment de la temporalité des requêtes. Il intègre des mécanismes cryptographiques intrinsèques garantissant l'authenticité et l'intégrité des données, tout en préservant la confidentialité des destinataires.

En améliorant les principes du CCN, NDN offre une gestion plus efficiente des ressources réseau, renforçant ainsi sa résilience et son adéquation aux exigences modernes en matière de sécurité, de mobilité et d'efficacité du trafic.

4.1) Architecture du Named Data Networking (NDN)

Bien que NDN constitue une refonte fondamentale de l'architecture réseau, sa structure en sablier assure une compatibilité avec l'Internet actuel, facilitant ainsi une transition progressive et efficace (comme illustré dans la figure). Dans cette architecture, les contenus et leurs identifiants nommés remplacent les adresses IP au cœur de la pile protocolaire. L'architecture NDN est composée de plusieurs couches fonctionnelles :

La couche Strategy : Responsable de l'acheminement adaptatif des paquets de données nommés en fonction des politiques de transmission et des conditions dynamiques du réseau.

La couche de sécurité : Intègre des mécanismes cryptographiques garantissant l'authenticité, l'intégrité et la confidentialité des données afin de les protéger contre d'éventuelles attaques malveillantes.

La couche de routage : Assure la prise de décisions stratégiques pour l'orientation des paquets de données nommés vers leurs destinations optimales en exploitant les tables de routage et les stratégies de forwarding.

La couche application : Fournit des interfaces standardisées permettant aux applications de s'interfacer avec l'architecture NDN pour exploiter ses fonctionnalités de diffusion et de récupération de contenu. Cette architecture modulaire permet une gestion efficace des ressources réseau et renforce la sécurité tout en optimisant la distribution des contenus.

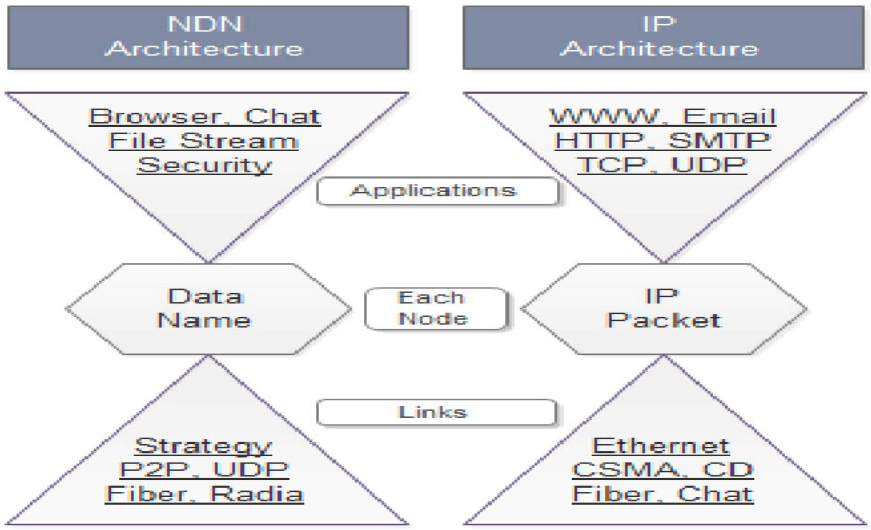


Figure 3 L'architecture du NDN [51]

4.2) Les entités principales de l'architecture NDN

L'architecture Named Data Networking (NDN) repose sur plusieurs entités fondamentales qui assurent la gestion, la transmission et la sécurisation des données. Ces entités sont :

— **Les consommateurs (Consumers)** :

Ce sont les entités qui initient la communication en émettant des paquets d'Intérêt pour demander des données spécifiques identifiées par un nom.

— **Les producteurs (Producers)** :

Ce sont les sources des données qui génèrent et signent cryptographiquement les paquets de données, garantissant ainsi leur authenticité et leur intégrité.

— **Les routeurs NDN (NDN Routers)** :

Ils assurent le transit des paquets à travers le réseau en utilisant trois structures principales :

Content Store (CS) :
un cache temporaire pour stocker les données fréquemment demandées.

Pending Interest Table (PIT :
une table qui maintient les requêtes en attente de réponse.

Forwarding Information Base (FIB) :
une table utilisée pour router les requêtes vers les producteurs de contenu.

4.3)Le nommage

Le NDN est un paradigme de communication réseau basé sur l'identification des données par des noms explicites, en lieu et place des adresses IP utilisées dans les

architectures TCP/IP conventionnelles. Cette approche confère aux noms NDN une indépendance vis-à-vis de l'emplacement des ressources, permettant ainsi une identification unique et cohérente des mêmes données, quel que soit leur point de distribution au sein du réseau [72].

Dans l'architecture NDN, un nom possède une structure hiérarchique comparable à celle d'une URL (Uniform Resource Locator) ou d'une URI (Uniform Resource Identifier) dans les systèmes Internet classiques. Ce nom est constitué de plusieurs composants distincts, séparés par le caractère "/", où chaque composant est une chaîne de caractères non nulle pouvant inclure des caractères alphanumériques, des tirets, des points ainsi que certains caractères spéciaux. L'organisation de ces composants suit un ordre allant du plus général au plus spécifique, facilitant ainsi la structuration, la gestion et la résolution des noms au sein du réseau, par exemple, un nom NDN pour un document spécifique peut ressembler à ceci :

/université/cours/réseaux/slides/introduction.pdf

Analyse de la structure du nom

- **/université** : Composant général indiquant l'institution.
- **cours** : Sous-catégorie précisant qu'il s'agit d'un contenu lié aux cours.
- **réseaux** : Désignation d'une discipline spécifique (réseaux informatiques).
- **slides** : Indique le type de ressource (diapositives).
- **introduction.pdf** : Nom du fichier représentant le document demandé.

Ce nom suit la structure hiérarchique de NDN, où les composants sont organisés du plus général au plus spécifique. Grâce à cette approche, une même donnée peut être récupérée depuis différentes sources sans dépendre d'une adresse IP unique.

Voici quelques détails du nommage dans NDN [72] :

- **Hiérarchie** :

Dans le cadre du modèle Named Data Networking (NDN), les identifiants de données sont organisés de manière hiérarchique, permettant une structuration imbriquée des noms. Cette hiérarchie est assimilable à un répertoire, où des noms de répertoires supérieurs contiennent des sous-répertoires et des éléments de données, facilitant l'organisation et l'accès aux ressources à différents niveaux de granularité.

- **Structure arborescente** :

Les noms au sein de NDN suivent une structure arborescente, où chaque segment du nom correspond à un nœud dans l'arbre hiérarchique. Chaque nœud peut représenter

un composant distinct de l'identifiant, pouvant inclure des métadonnées relatives au contenu, telles que le type de données, l'entité responsable de la publication, ainsi que des informations temporelles (date et heure de publication) et spatiales (informations de localisation), permettant ainsi une identification précise et une gestion fine des ressources dans le réseau.

— **Unicité des noms** :

Dans l'architecture Named Data Networking (NDN), chaque nom est unique et sert d'identifiant exclusif pour une ressource donnée. L'unicité des noms est assurée par les éditeurs de contenu à travers l'intégration d'identifiants de version, permettant ainsi de distinguer différentes instances d'une même donnée.

— **Gestion des segments et des versions** :

L'inclusion d'informations de segmentation et de versionnement dans les noms des données permet une récupération granulaire des contenus. Plutôt que d'extraire un objet dans son intégralité, les consommateurs peuvent requérir des segments ou des versions spécifiques, optimisant ainsi l'efficacité de la transmission et améliorant la robustesse du système face aux variations des conditions réseau. Cette approche favorise une distribution plus efficiente et résiliente des contenus sur les réseaux NDN.

5) Mise en cache dans le NDN

La mise en cache est un mécanisme essentiel du NDN, visant à améliorer l'efficacité du réseau, réduire la redondance du trafic et optimiser la latence.

Contrairement aux réseaux IP traditionnels, où les données sont stockées uniquement sur des serveurs spécifiques, le NDN exploite un modèle de mise en cache distribué, permettant à chaque nœud du réseau de conserver temporairement et de retransmettre les données demandées.

5.1) Principe de la mise en cache dans NDN

Contrairement aux réseaux IP traditionnels, où les paquets transitent d'un serveur vers un client sans être stockés en chemin, NDN permet aux routeurs intermédiaires de mémoriser les données transférées pour les futures requêtes. Cela repose sur deux types de paquets :

— **Paquets Interest** :Ils sont envoyés par un consommateur pour demander un contenu spécifique.

— **Paquets Data** :Ils contiennent la réponse et peuvent être mis en cache dans les routeurs traversés.

5.2) Les avantages du caching dans NDN [64]

Réduction de la latence : Un contenu populaire peut être récupéré plus rapidement depuis un routeur intermédiaire au lieu de contacter le serveur d'origine.

Économie de bande passante : Moins de trafic redondant traverse le réseau.

Résilience aux pannes : Même en cas d'indisponibilité du serveur d'origine, les données peuvent être accessibles via le cache des nœuds intermédiaires.

5.3) Stratégies de mise en cache dans NDN [56]

Différentes stratégies de cache sont utilisées dans NDN pour gérer l'espace mémoire des routeurs efficacement :

Leave Copy Everywhere (LCE) : Chaque routeur qui a transféré un paquet Data le stocke localement.

Probabilistic Caching : Seul un sous-ensemble de routeurs stocke le contenu en fonction de critères spécifiques.

Leave Copy Down (LCD) : Seul le dernier routeur avant le consommateur final stocke le contenu.

Edge Caching : La mise en cache est priorisée sur les routeurs proches des consommateurs finaux.

5.4) Problèmes et défis du caching en NDN [56]

Les mécanismes de mise en cache en NDN posent plusieurs défis :

Gestion de la mémoire : Les routeurs ont une capacité limitée, il faut des algorithmes intelligents pour remplacer les anciens contenus.

Sécurité et confidentialité : Un contenu mis en cache peut être accessible à plusieurs utilisateurs, ce qui pose des questions sur la gestion des accès et des droits.

Stratégies de remplacement : Différentes stratégies comme LRU (Least Recently Used) ou LFU (Least Frequently Used) sont utilisées pour optimiser l'espace cache.

6) Les paquets dans le NDN [65]

Les paquets dans le NDN sont composés de deux types principaux :

6.1) Paquet Interest (Requête de données)

Figure 4 Paquet de donnes [58]

Les consommateurs (utilisateurs ou applications) envoient des paquets Interest pour demander des données spécifiques. Ces paquets contiennent :

- **Nom des données** : Une chaîne hiérarchique décrivant le contenu demandé (ex. /video/clip.mp4/segment1).
- **Sélecteurs (facultatif)** : Critères pour affiner la recherche des données (ex. version récente, producteur spécifique).
- **Nonce** : Valeur aléatoire pour éviter les boucles de requêtes en réseau.
- **Durée de vie (Lifetime)** :Temps pendant lequel l'Interest reste valide avant d'expirer.

Le paquet Interest ne contient pas d'adresse IP, ce qui change totalement la manière dont les données sont récupérées par rapport à l'Internet classique.

6.2) Paquet Data (Réponse aux requêtes)

Figure 5 paquet de requete [58]

Lorsqu'un nœud du réseau possède la donnée demandée (soit en cache, soit via le producteur d'origine), il répond avec un paquet Data contenant :

— **Nom des données** :Doit correspondre exactement au nom du paquet Interest reçu.
— **Données** :contenu réel demandé.
— **Signature** :Une signature cryptographique pour assurer l'authenticité des données.
— **Métadonnées** :Informations supplémentaires comme la date d'expiration ou l'éditeur du contenu.

6.3) Mécanisme de fonctionnement

1. L'utilisateur envoie un paquet Interest.
2. Le réseau recherche la donnée :
o Si un routeur l'a déjà en cache, il envoie directement le paquet Data.
o Sinon, il transmet l'Interest au prochain nœud en suivant la table de routage (FIB).
3. Le producteur ou un cache du réseau répond avec un paquet Data.
4. Le paquet Data suit le chemin inverse vers l'émetteur de l'Interest.
5. Les routeurs intermédiaires peuvent stocker le paquet Data pour répondre aux futures demandes plus rapidement.

6.4)Différences entre paquets NDN et paquets IP classiques

Critère	**NDN**	**IP**
Basé sur	Le nom des données	L'adresse IP des hôtes
Mise en cache	Oui (sur tous les routeurs)	Non (cache local uniquement)
Sécurité	Authentification des données	Sécurisation des connexions
Flux de données	Pull (données demandées via Interest)	Push (données envoyées selon l'adresse IP)

TABLE 1 – Comparaison entre paquets NDN et IP

7)Routage des paquets dans NDN [63] :

Dans l'architecture NDN, le routage des paquets repose sur les noms des données et non sur des adresses IP. Il utilise des structures spécifiques pour gérer les requêtes et les réponses.

7.1)Structures de routage en NDN

Les nœuds NDN (routeurs et producteurs) utilisent trois principales tables pour gérer le routage des paquets :

Content Store (CS) : Un cache temporaire qui stocke les paquets Data récemment transmis pour éviter de contacter le producteur à chaque requête.

Pending Interest Table (PIT) : Une table qui garde une trace des paquets Interest en attente et des interfaces par lesquelles ils ont été reçus

Forwarding Information Base (FIB) : Une table de routage qui enregistre les noms des données et les chemins possibles pour les atteindre.

7.2)Processus de routage des paquets Interest

1.Un consommateur envoie un paquet Interest en spécifiant le nom de la donnée souhaitée.

2. Le routeur vérifie son Content Store (CS) :

o Si la donnée est disponible, elle est immédiatement renvoyée via un paquet Data.

o Sinon, l'Interest est traité plus loin.

3. Le routeur consulte sa Pending Interest Table (PIT :

o Si un Interest similaire est déjà en attente, le routeur agrège la requête pour éviter d'envoyer des doublons.

o Sinon, l'Interest est ajouté à la PIT.

4. Le routeur utilise sa FIB pour transmettre l'Interest vers le prochain nœud capable de fournir la donnée.

7.3)Processus de routage des paquets Data

1. Une fois la donnée trouvée (chez un routeur ou le producteur), un paquet Data est généré.

2. Le paquet Data suit l'inverse du chemin emprunté par l'Interest, grâce aux entrées stockées dans la PIT.

3. Chaque routeur sur le chemin de retour peut stocker le paquet Data dans son Content Store (CS), optimisant ainsi les futures requêtes.

4. Le consommateur reçoit finalement la donnée demandée

7.4)Stratégies de routage en NDN

Plusieurs stratégies sont utilisées pour optimiser la transmission des paquets Interest et Data :

— **Routage basé sur les préfixes de noms** :
Les entrées dans la FIB sont organisées sous forme de préfixes hiérarchiques (/youtube/videos/…).

— **Multipath Forwarding** :
Un paquet Interest peut être envoyé sur plusieurs chemins en parallèle pour maximiser les chances de trouver la donnée plus rapidement.

— **Adaptive Forwarding** :
Les routeurs ajustent dynamiquement les décisions de routage en fonction des performances des chemins (latence, perte de paquets, etc.).

— **Stratégies basées sur la popularité** :
Un contenu fréquemment demandé peut être mis en cache plus largement ou bénéficier d'un routage prioritaire.

7.5)Différences entre le routage NDN et IP classique

Critère	**NDN**	**IP**
Basé sur	Le nom des données	L'adresse IP
Mécanisme	Interest , Data packets	Paquets IP , TCP/UDP
Mise en cache	Oui, à tous les niveaux du réseau	Non, sauf proxy/CDN
Sécurité	Intégrité et signature des données	Sécurisation des connexions (TLS, VPN)

TABLE 2 – Comparaison entre le routage NDN et IP classique

8) Mobilité dans NDN

Le NDN est conçu pour gérer efficacement la mobilité des consommateurs et des producteurs grâce à son approche centrée sur les données. Contrairement aux réseaux IP traditionnels où la mobilité nécessite des solutions complexes comme le Mobile IP, NDN facilite la mobilité de manière native grâce à ses mécanismes de routage et de mise en cache.

8.1) Mobilité des consommateurs [73]

Dans NDN, un consommateur mobile (ex. un utilisateur se déplaçant avec un smartphone) peut changer de point d'accès réseau sans avoir besoin d'une adresse IP fixe.

Comment ça fonctionne ?

1. Re-transmission des paquets Interest :Si un consommateur change de réseau et ne reçoit pas de réponse à ses paquets Interest, il peut simplement les renvoyer sans avoir à gérer une adresse IP.

2. Multipath Forwarding :Les paquets Interest peuvent être envoyés par plusieurs chemins en même temps, ce qui permet une meilleure résilience en cas de changement de connexion.

3. Mise en cache réseau : Grâce au cache distribué dans les routeurs, un consommateur mobile peut récupérer des données plus rapidement sans devoir toujours contacter le producteur d'origine

Avantages

Réduction des pertes de paquets, pas besoin de mécanismes comme le handover IP, et meilleure expérience utilisateur en mobilité.

8.2) Mobilité des producteurs [62]

Un producteur mobile (ex. un capteur IoT ou un serveur mobile) peut également changer de réseau. Cependant, comme les consommateurs envoient des paquets Interest en fonction des noms de contenu et non des adresses IP, la question est de savoir comment les routeurs peuvent rediriger les requêtes vers le nouveau point d'attachement du producteur.

Solutions possibles

1. Mises à jour dynamiques de la FIB (Forwarding Information Base :Lorsqu'un producteur change de réseau, il annonce son nouveau chemin aux routeurs qui mettent à jour leurs entrées FIB.

2. NDN Anycast Routing :Les paquets Interest sont envoyés à n'importe quel nœud pouvant répondre, ce qui permet une meilleure résilience si le producteur d'origine est temporairement inaccessible.

3. Data Synchronization (NDN Sync) : : Des protocoles comme ChronoSync et PSync aident à synchroniser les nouvelles annonces de données entre les producteurs et les consommateurs, facilitant ainsi la gestion de la mobilité.

Avantage

Pas besoin de MIP (Mobile IP), pas de dépendanceaux adresses fixes, et récupération rapide des nouvelles localisations.

8.3) Comparaison de la mobilité entre NDN et IP [66]

Critère	NDN	IP
Gestion de la mobilité	Basée sur les noms des données et le routage adaptatif	Basée sur les adresses IP et Mobile IP
Latence du handover	Faible (grâce à la retransmission des Interests et au cache)	Élevée (nécessite des mises à jour d'adresse IP)
Mise en cache	Native (réduction de la charge du réseau)	Nécessite des Content Delivery Networks (CDN)
Infrastructure requise	Aucune modification majeure	Nécessite des serveurs et du support Mobile IP

TABLE 3 – Comparaison de la mobilité entre NDN et IP

9) Sécurité dans NDN

L'architecture NDN adopte une approche native de la sécurité en protégeant les données elles-mêmes, plutôt que les connexions entre hôtes comme dans les réseaux IP classiques. Cela apporte une meilleure résilience contre les attaques et garantit l'authenticité et l'intégrité des contenus.

9.1) Principe de sécurité centré sur les données [69]

Contrairement aux réseaux IP où la sécurité repose sur des solutions comme TLS (Transport Layer Security) et IPsec, NDN intègre directement des mécanismes de sécurité au niveau des données :

Authentification des données :Chaque paquet Data contient une signature numérique qui prouve son authenticité.

Vérification de l'intégrité :Les consommateurs peuvent vérifier que les données n'ont pas été modifiées ou falsifiées.

Contrôle d'accès basé sur le nom : L'accès à certaines données peut être restreint en fonction des règles de sécurité définies par le producteur.

La sécurité est indépendante de la source et du transport, ce qui la rend plus robuste aux attaques réseau.

9.2) Mécanismes de sécurité en NDN [23]

Signature et authentification des données

Chaque paquet Data en NDN est signé numériquement par le producteur, garantissant que :

- L'émetteur est bien légitime.
- Les données n'ont pas été altérées en transit.
- Chaque contenu est sécurisé indépendamment de son canal de transmission.

Technologies utilisées

- Cryptographie à clé publique (PKI) pour signer et vérifier les données.
- Certificats NDN qui assurent qu'un producteur est bien autorisé à diffuser du contenu.

Chiffrement et contrôle d'accès

NDN permet d'encrypter directement les contenus, contrairement aux réseaux IP où seules les connexions sont sécurisées.

- Chaque utilisateur peut utiliser des clés spécifiques pour accéder à certaines données.
- Le producteur peut appliquer un chiffrement sélectif selon le niveau d'accès des consommateurs.

Protection contre les attaques

NDN propose une meilleure résilience face aux attaques réseau courantes :

Type d'attaque	**Protection en NDN**
DDoS (Déni de service)	Le cache réseau réduit la charge sur le producteur et atténue l'impact d'une attaque volumétrique.
Usurpation d'identité	Chaque paquet Data est signé, ce qui empêche la falsification de contenu
Man-in-the-Middle (MITM)	La signature numérique permet de détecter toute modification ou injection de données malveillantes.

TABLE 4 – Protection contre les attaques

9.3) Comparaison avec la sécurité en IP [6]

Critère	NDN	IP traditionnel
Sécurité des connexions	Sécurité intégrée aux données	Dépend deTLS/IPsec
Authentification	Chaque paquet Data est signé	Basée sur des certificats de connexion
Chiffrement	Possible sur les données elles-mêmes Sur le transport (VPN, HTTPS)	Sur le transport (VPN, HTTPS)
Protection DDoS	Cache distribué	Solutions centralisées (firewall, anti-DDoS)

TABLE 5 – Comparaison avec la sécurité en IP

10) Défis du NDN

Le Named Data Networking (NDN) est une architecture prometteuse qui repense le fonctionnement des réseaux en se basant sur le contenu plutôt que sur les adresses IP [72]. Cependant, malgré ses nombreux avantages, plusieurs défis majeurs freinent son adoption généralisée.

10.1) Confidentialité

Même si NDN intègre la sécurité au niveau des données, cela entraîne d'autres défis :

Confidentialité des requêtes :

les paquets *Interest* peuvent révéler les préférences des utilisateurs, mettant en jeu la protection de la vie privée [19].

Gestion des certificats :

chaque paquet *Data* étant signé, cela entraîne une charge computationnelle importante et nécessite une gestion efficace des clés publiques [68].

Attaques spécifiques à NDN :

Interest Flooding Attack (IFA) :

un attaquant peut envoyer de nombreuses requêtes sans jamais récupérer les données, saturant la PIT (Pending Interest Table) [17].

Exploitation du cache :

des contenus malveillants peuvent être injectés dans le cache pour manipuler la distribution des données [30].

10.2) Interopérabilité avec les réseaux IP

NDN ne peut pas être adopté immédiatement à grande échelle. Une coexistence avec les réseaux IP est donc essentielle :

Traduction entre architectures : des mécanismes doivent permettre la conversion entre les requêtes IP et NDN [28].

Déploiement progressif : il faut assurer la compatibilité avec les infrastructures existantes tout en introduisant progressivement NDN [71].

10.3) Gestion des ressources réseau

Le déploiement de NDN demande une utilisation optimale des ressources :

Utilisation efficace du cache : déterminer où et combien de temps stocker les données, tout en évitant la surcharge [60].

Allocation de bande passante : le trafic généré par la duplication des paquets *Interest* peut être plus important qu'en IP [15].

Optimisation de l'énergie : la gestion des tables PIT et FIB dans des environnements contraints comme l'IoT peut poser des problèmes énergétiques [8].

10.4) Comparaison défis entre NDN et IP

Critère	**IP**	**NDN**
Adressage	Basé sur les adresses IP	Basé sur les noms de contenu
Sécurité	Sécurisation des connexions	Sécurisation des données elles-mêmes
Gestion du cache	Absente	Intégrée au réseau
Mobilité	Problématique	Optimisée

TABLE 6 – Comparaison défis entre NDN et IP

Applications et cas d'usage du NDN

NDN trouve des applications dans plusieurs domaines clés :

— **Streaming vidéo** : des plateformes comme Netflix ou YouTube pourraient tirer avantage du NDN en stockant localement les contenus les plus populaires, ce qui permettrait de réduire la latence et la charge sur les serveurs centraux [50, 18].

— **Internet des Objets (IoT)** : des projets exploitant des capteurs intelligents pour les maisons connectées utilisent le NDN pour permettre une communication rapide, sécurisée et indépendante de l'infrastructure IP traditionnelle [7, 43].
— **Smart Cities** : dans certaines villes intelligentes, le NDN est testé pour gérer les feux de signalisation ou diffuser des alertes de sécurité en temps réel, assurant une diffusion plus rapide et résiliente de l'information aux citoyens et services publics [9, 67].

Avantages du Named Data Networking (NDN)

Le modèle Named Data Networking (NDN) présente plusieurs bénéfices significatifs pour les utilisateurs et les infrastructures réseau, contribuant à une meilleure efficacité, sécurité et gestion des ressources :

Simplification de la configuration réseau : NDN utilise des paquets d'intérêt et de données basés sur des noms applicatifs, éliminant la nécessité de gérer des adresses IP. Cela réduit la complexité dans les environnements densément connectés, notamment l'IoT [72, 7].

Sécurité intrinsèque des données : NDN intègre un mécanisme de sécurité directement au niveau des données, assurant leur authenticité et leur intégrité, quel que soit le canal utilisé [68, 71].

Optimisation de la distribution de contenu : Grâce à sa nature orientée contenu et à l'utilisation de caches intermédiaires, NDN améliore la fluidité du streaming et réduit les délais de mise en mémoire tampon [50, 18].

Applications dans le domaine médical : Dans le secteur de la santé, NDN permet un accès sécurisé et rapide aux données médicales, ce qui facilite la prise de décision clinique et la coordination des soins [49, 42].

Réduction de la congestion réseau : En favorisant la récupération de contenu depuis les caches distribués, NDN diminue la surcharge sur les serveurs centraux et les liaisons principales [15, 24].

Amélioration des performances grâce à la mise en cache : La capacité native de mise en cache des contenus dans les routeurs NDN améliore la disponibilité et réduit la latence d'accès aux contenus populaires [60, 48].

CONCLUSION

L'architecture Named Data Networking (NDN) représente une évolution majeure dans la conception des réseaux modernes en remplaçant le modèle traditionnel basé sur les adresses IP par un paradigme centré sur le contenu. En mettant l'accent sur le nommage explicite des données, le routage intelligent et la mise en cache efficace, NDN offre des avantages significatifs en matière de sécurité, de gestion de la mobilité et d'optimisation des ressources réseau.

Toutefois, malgré ses nombreux atouts, la mise en œuvre de NDN soulève plusieurs défis, notamment en matière de gestion des noms, de scalabilité et d'intégration avec les infrastructures existantes. La transition vers cette nouvelle approche nécessite donc des recherches approfondies pour surmonter ces obstacles et exploiter pleinement son potentiel.

Dans le prochain chapitre, nous approfondirons performances des politiques de remplacement de cache dans les réseaux NDN et leur impact sur la performance globale du réseau. Cette analyse permettra d'évaluer la pertinence du NDN dans divers scénarios d'application et d'explorer les perspectives d'amélioration pour son adoption à grande échelle.

CHAPITRE 2

Politiques de remplacement de cache

INTRODUCTION

Dans NDN, le cache des routeurs stocke des données qui ont été demandées et sont susceptibles d'être réutilisées par d'autres nœuds du réseau. Le placement et le remplacement des données dans ces caches sont essentiels pour garantir une utilisation efficace de la bande passante et une faible latence dans la récupération des données. Le réseau de données nommées utilise deux stratégies de décision de mise en cache à savoir : Les stratégies de remplacement du cache dans les routeurs NDN jouent un rôle essentiel dans l'optimisation des performances du réseau. Lorsqu'un cache est plein et qu'un nouveau contenu doit être stocké, une politique de remplacement est appliquée pour décider quelles données doivent être supprimées. Une bonne stratégie permet de maximiser le taux de succès (hit rate), de réduire la latence et d'optimiser l'utilisation de la bande passante. Il existe de nombreux types de stratégies de remplacement de cache, telles que FIFO (Premier entré, premier sorti), LRU (Moins récemment utilisé), LFU (Moins fréquemment utilisé) et Aléatoire.

Chaque stratégie présente ses propres avantages et inconvénients, en fonction de la charge de travail et des caractéristiques de l'élément de données. Par exemple, FIFO est simple à mettre en œuvre mais peut entraîner un thrashing du cache, tandis que LRU est plus adaptatif mais nécessite plus de surcharge matérielle.

LFU fonctionne bien avec les éléments de données avec des fréquences stables, mais peut provoquer une pollution du cache. Le hasard est juste mais peut être inefficace. En fin de compte, le meilleur choix dépend de la situation spécifique [4].

Les Stratégies de placement des données dans les caches des routeurs NDN est une décision stratégique visant à maximiser l'efficacité du réseau en minimisant la latence et l'utilisation de la bande passante. Plusieurs approches peuvent être adoptées pour décider où et comment les données doivent être stockées dans les routeurs intermédiaires

Nous allons expliquer ci-dessous

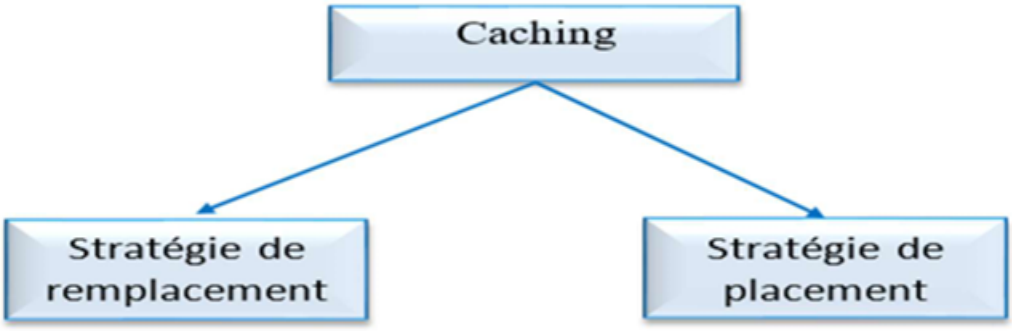


Figure 6 Les classifications des stratégies de mise en cache

Stratégie de placement : où le contenu doit être stocké.

Stratégie de remplacement : comment le contenu doit être changé pour faire de la placeaux nouveaux.

1) Politique de placement de cache

Dans les réseaux NDN (Named Data Networking), les routeurs intermédiaires stockent temporairement les données dans un cache pour améliorer les performances du réseau. La stratégie de placement du cache détermine où et comment les données doivent être stockées dans les routeurs pour maximiser l'efficacité du réseau, en réduisant la latence et en optimisant l'utilisation de la bande passante. Voici un exemple de stratégies de placement :

1.1) Leave Copy Everywhere(LCE) [44]

LCE est la stratégie de mise en cache par défaut utilisée dans l'architecture NDN. Son principe repose sur le stockage d'une copie du contenu demandé à chaque routeur situé le long du chemin de la requête. Cette approche vise à garantir un accès rapide aux données pour les prochaines demandes similaires. Par défaut, LCE utilise LRU (Least RecentlyUsed) comme stratégie de remplacement pour libérer de l'espace dans le cache lorsque celui-ci est plein.

Fonctionnement de la stratégie LCE

1. Un consommateur envoie un paquet d'intérêt en direction du producteur.

2. Chaque routeur traversé par la requête vérifie si le contenu demandé est déjà dans son cache (Content Store).

o Si le contenu est présent, il est immédiatement renvoyé au consommateur.

o Sinon, la requête est transmise au routeur suivant, tout en étant ajoutée à la PIT (PendingInterest Table).

3. Lorsque le producteur reçoit la requête, il envoie le paquet de données en sens inverse.

4. Chaque routeur traversé stocke une copie du contenu avant de le transmettre au prochain routeur en aval.

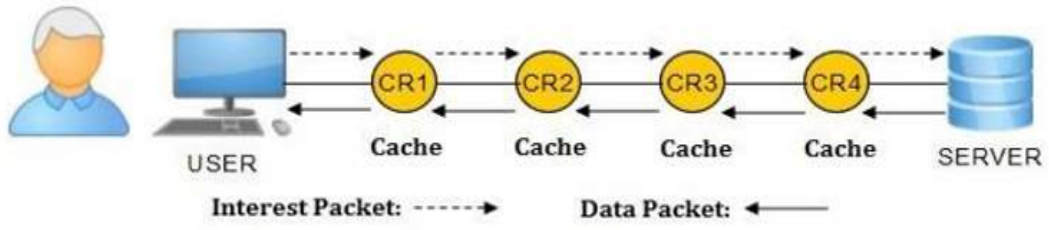


Figure 7 La stratégie de mise en cache LCE [5]

Avantages de LCE

Temps de réponse réduit : Les futures demandes peuvent être satisfaites directement à partir des caches intermédiaires, sans atteindre le producteur.

Amélioration de la disponibilité des données : Le contenu devient plus accessible grâce à la duplication sur plusieurs routeurs du réseau.

Inconvénients de LCE

Surutilisation des ressources : Le contenu est dupliqué sur tous les routeurs du chemin, ce qui entraîne une consommation excessive de la mémoire cache.

Redondance inefficace : Les données populaires peuvent être remplacées par des données moins demandées en raison du remplissage rapide des caches.

Bande passante et stockage sollicités inutilement : Une gestion inefficace du cache peut entraîner un remplacement prématuré des contenus pertinents.

1.2) La stratégie de mise en cache LCD (Leave Copy Down)

La stratégie de mise en cache LCD (Leave Copy Down) consiste à stocker une copie du contenu demandé uniquement au niveau du premier routeur rencontré sur le chemin de retour de la réponse, après l'obtention du contenu par le consommateur. À l'instar de la stratégie LCE (Leave Copy Everywhere), LCD adopte l'algorithme LRU (Least RecentlyUsed) comme mécanisme par défaut de remplacement, afin de gérer les cas de saturation de la mémoire cache.

Le fonctionnement de LCD peut être décrit comme suit :

• Lorsqu'un consommateur émet un paquet d'intérêt vers un producteur, chaque routeur sur le chemin examine si le contenu demandé est déjà présent dans son Content Store (CS). En cas d'absence, le routeur inscrit la requête dans sa PendingInterest Table (PIT), puis la transmet au prochain nœud du chemin.

• Une fois le contenu localisé, le producteur renvoie le paquet de données en empruntant le chemin inverse. Contrairement à LCE, dans LCD, seul le premier routeur sur ce chemin effectue une copie du contenu dans son cache. Le reste du paquet est directement acheminé jusqu'au consommateur. Lors d'une requête ultérieure pour le même contenu, une nouvelle copie est effectuée sur le routeur suivant, en aval, créant ainsi une progression contrôlée de la mise en cache vers l'utilisateur.

Objectifs et limites de la stratégie LCD

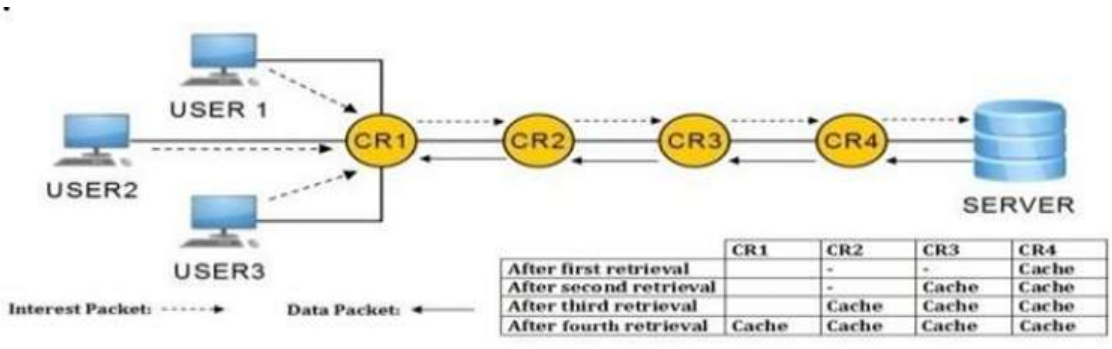
L'objectif principal de LCD est de réduire la redondance des contenus mis en cache au sein du réseau, en évitant de dupliquer les données sur tous les routeurs du chemin, comme c'est le cas dans la stratégie LCE. Cependant, cetteapprocheprésenteplusieurslimitations :

• Elle induit une consommation élevée de la bande passante, du fait du manque d'optimisation dans la distribution des copies de contenu.

• Le processus de rapprochement des données vers l'utilisateur final est relativement lent, ce qui peut dégrader les performances globales du système de mise en cache.

• Une redondance inutile peut apparaître, notamment lorsque des demandes successives créent des copies trop proches les unes des autres, le long du chemin de retour.

Ces caractéristiques peuvent compromettre l'efficacité de la stratégie LCD en termes de latence et d'utilisation optimale des ressources [59].



	CR1	CR2	CR3	CR4
After first retrieval		-	-	Cache
After second retrieval		-	Cache	Cache
After third retrieval		Cache	Cache	Cache
After fourth retrieval	Cache	Cache	Cache	Cache

Figure 8 La stratégie de mise en cache LCD [45]

Avantages de la stratégie LCD

1. Réduction de la redondance du cache

o En ne stockant le contenu que sur un seul routeur (le premier rencontré sur le chemin de retour), LCD limite la duplication excessive des données dans le réseau.

2. Économie de mémoire cache

o Moins de routeurs conservent une copie du contenu, ce qui permet une meilleure utilisation de l'espace de stockage disponible.

3. Contrôle progressif du placement de cache

o Le contenu se rapproche graduellement du consommateur au fil des demandes successives, permettant une adaptation dynamique selon la popularité du contenu.

Inconvénients de la stratégie LCD

1. Temps élevé de rapprochement du contenu

o Il faut plusieurs requêtes successives pour qu'un contenu populaire soit mis en cache près du consommateur, ce qui augmente la latence initiale.

2. Sous-utilisation du potentiel de la bande passante o Comme seule une copie est faite par demande, les autres routeurs sur le chemin ne bénéficient pas du contenu, ce qui peut entraîner un surcoût en cas de nouvelles requêtes venant d'autres utilisateurs.

3. Efficacité faible pour les contenus peu demandés

o Les contenus peu populaires risquent de ne jamais atteindre les caches proches de l'utilisateur, limitant ainsi les gains de performance.

4. Risque de redondance locale o Lors de requêtes successives, le contenu peut être dupliqué sur des routeurs très proches, ce qui n'améliore pas significativement l'efficacité globale du cache.

2) Politique de remplacement du cache

La capacité du Content Store (CS) étant restreinte, il est essentiel de gérer efficacement l'espace disponible afin d'accueillir de nouveaux contenus lorsque cela est nécessaire. Pour cela, une stratégie de remplacement est mise en place afin d'éliminer les données obsolètes et optimiser l'utilisation du cache [27].

Diverses politiques de remplacement ont été développées pour répondre aux besoins spécifiques de ces environnements. Ces stratégies sont conçues en fonction des caractéristiques et des contraintes du système, garantissant ainsi une gestion efficace du cache et une amélioration des performances globales du réseau [27].

Six stratégies de mise en cache ont été mise en évidence () à savoir :

- Les stratégies de remplacement de cache basées sur la récence .

- Les stratégies de remplacement de cache basées sur la fréquence.
- Les stratégies de remplacement de cache basées sur la taille.
- Les stratégies de remplacement de cache basées sur les fonctions .
- Les stratégies de remplacement de cache dédiées aux environnements mobile.
- Les stratégies basées sur le partitionnement.

2.1) Les stratégies de remplacement de cache basées sur la récence [33]

La politique LRU (Least RecentlyUsed) consiste à supprimer le contenu le moins récemmentutilisé afin de libérer de l'espace pour les nouvelles données à mettre en cache. C'est l'une des stratégies de remplacement les plus courantes en raison de sa simplicité d'implémentation et de son efficacité en termes de succès de cache.

Voici un exemple de l'algorithme LRU en pseudocode :

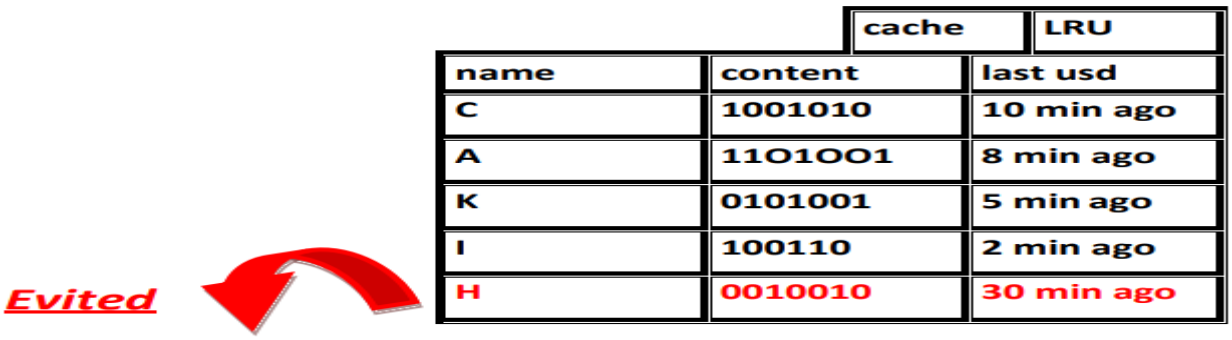


Figure 9 Exemple de l'algorithme LRU

2.1.1) LRU-Threshold [34] :

Cette variante de LRU introduit une seuil de taille pour le stockage des contenus. Si un contenu dépasse ce seuil, il ne sera pas stocké en cache ; sinon, il sera traité comme dans la politique LRU classique. Cette approche permet d'optimiser l'espace en évitant le stockage de contenus trop volumineux .

2.1.2) LRU-Hot [36] :

est une autre extension de LRU qui différencie les contenus selon leur popularité. Elle utilise deux listes LRU distinctes :

o Une pour les contenus chauds (les plus populaires).

o Une pour les contenus froids (moins populaires).

-Lorsqu'un contenu est accédé, un indicateur de fréquence d'accès est évalué :

o Si la fréquence dépasse un certain seuil, le contenu est classé comme chaud et stocké dans la liste correspondante.

o Sinon, il est stocké dans la liste des contenus froids.

-Deux compteurs sont utilisés :

o Un compteur de base incrémenté à chaque requête.

o Un compteur spécifique aux contenus chauds, incrémenté toutes les α requêtes **(α > 1)**.

Lorsqu'un contenu est reçu, il est placé au début de sa liste avec une valeur d'accès basée sur le compteur de base. Lors du remplacement, les valeurs des contenus en fin de liste sont recalculées pour décider de l'élimination [27].

$$hot\_value = tail_{hot} - hot\,reference\,counter$$

$$cold\_value = tail\_cold - cold\,reference\,counter$$

Ces politiques sont faciles à implémenter grâce à l'utilisation de la liste LRU, largement adoptée. Celle-ci enregistre les nouveaux contenus en tête de liste et, lorsqu'un contenu est accédé (hit), il est replacé en haut de la liste.

Cependant, leur principal inconvénient est qu'elles ne tiennent pas compte de la fréquence d'accès, ce qui peut entraîner l'élimination de contenus encore pertinents mais temporairement moins sollicités.

2.2.1) Les stratégies de remplacement de cache basées sur la fréquence

Least FrequentlyUsed (LFU)

La politique LFU (Least FrequentlyUsed) élimine le contenu le moins souvent accédé afin de libérer de l'espace pour les nouvelles données à mettre en cache. Cette approche favorise la conservation des contenus les plus populaires sur le long terme.

Voici un exemple de l'algorithme LFU en pseudocode :

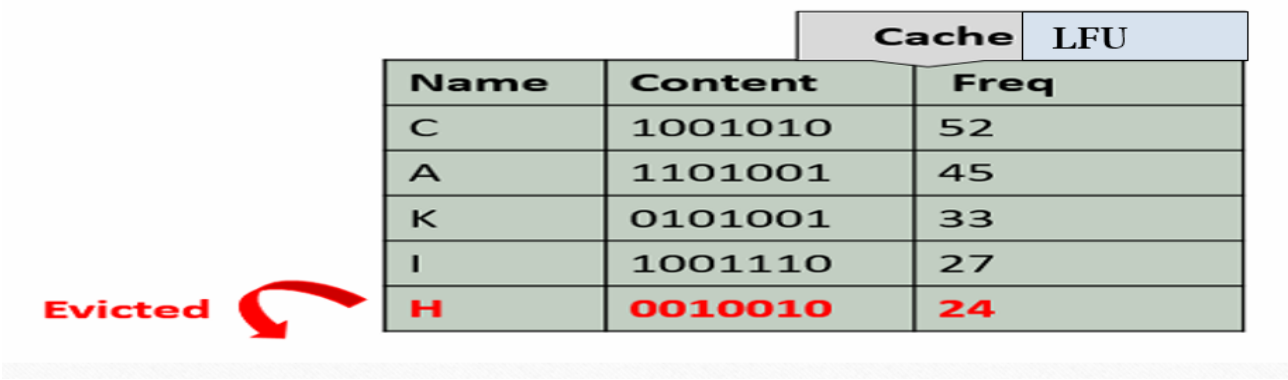


Figure 10 Exemple de l'algorithme LFU

2.2.2)LFU-Aging [35]

LFU-Aging est une variante de LFU qui vise à éviter la pollution du cache, c'est-à-dire l'accumulation de contenus qui étaient populaires mais qui ne sont plus sollicités. Pour cela, un seuil est défini : si tous les compteurs de fréquence dépassent cette valeur, ils sont divisés par deux. Cette technique permet d'actualiser la pertinence des contenus stockés et d'empêcher qu'un ancien contenu reste indéfiniment dans le cache.

2.2.3) HYPER-G [38]

HYPER-G est une stratégie hybride qui combine LFU et LRU, tout en intégrant un critère de taille des contenus. Son fonctionnement suit plusieurs étapes :

- D'abord, il applique LFU en supprimant le contenu le moins fréquemment accédé.
- Si plusieurs contenus ont la même fréquence d'accès, il applique LRU et élimine celui qui a été utilisé le moins récemment.
- En cas d'égalité, il choisit le contenu le plus volumineux pour maximiser l'espace disponible.

Une stratégie de remplacement hybride repose sur l'utilisation de plusieurs critères pour déterminer quel contenu éliminer. Ces stratégies prennent en considération des facteurs cruciaux tels que la fréquence et la récence des accès.

Cependant, l'une des limitations de cette approche est la pollution du cache, qui survient lorsque des contenus anciens mais fréquemment accédés persistent dans le cache. Pour résoudre ce problème, la méthode Aging est utilisée, afin de réduire progressivement l'importance des contenus moins pertinents. De plus, il peut arriver que plusieurs contenus aient la même fréquence d'accès, compliquant ainsi la décision de remplacement.

2.3) Les stratégies de remplacement de cache basées sur la taille

2.3.1) LRU-Min [34]

LRU-Min est une variante de la stratégie LRU visant à réduire le nombre de documents à remplacer. Elle se déroule en quatre étapes :

1. Étape 1 : Un contenu de taille N est ajouté.

2. Étape 2 : Une liste A est constituée des documents ayant une taille inférieure ou égale à N (la liste peut être vide).

3. Étape 3 : La stratégie LRU est appliquée sur cette liste A, jusqu'à ce que celle-ci atteigne sa capacité maximale ou que sa taille soit au moins égale à N.

4. Étape 4 : Si la taille de A est inférieure à N, alors la valeur de N est réduite de moitié et le processus recommence à l'étape 2.

2.3.2) SIZE [39]

La stratégie SIZE consiste à remplacer le contenu le plus volumineux dans le cache. Pour les contenus ayant la même taille, la politique LRU est appliquée pour déterminer lequel évacuer.

Avantages et Inconvénients des stratégies basées sur la taille [27]

L'avantage de ces stratégies hybrides réside dans leur capacité à combiner la récence et la fréquence, permettant ainsi de limiter les inconvénients des stratégies individuelles. Cependant, elles présentent des inconvénients, notamment une mauvaise gestion du cache, car elles nécessitent la prise en compte simultanée de la taille et de la fréquence des contenus. Par exemple, une modification de la valeur de la fréquence peut entraîner une réorganisation des listes, car l'objet concerné doit être déplacé dans une nouvelle liste.

2.4) Les stratégies de remplacement de cache basées sur les fonctions

2.4.1) LRFU (Least Recently/FrequentlyUsed) [37]

LRFU est une stratégie de remplacement hybride qui prend en compte à la fois la fréquence et la récence d'accès. Elle combine les stratégies LRU et LFU en attribuant à chaque bloc une valeur appelée CRF (CombinedRecency and Frequency), qui quantifie

la probabilité qu'un bloc soit référencé à l'avenir. Cette valeur CRF est déterminée par une fonction de pondération, $F(x)$, qui est fonction du temps d'accès des blocs.

Voici La figure permet de bien se situer dans LRFU.

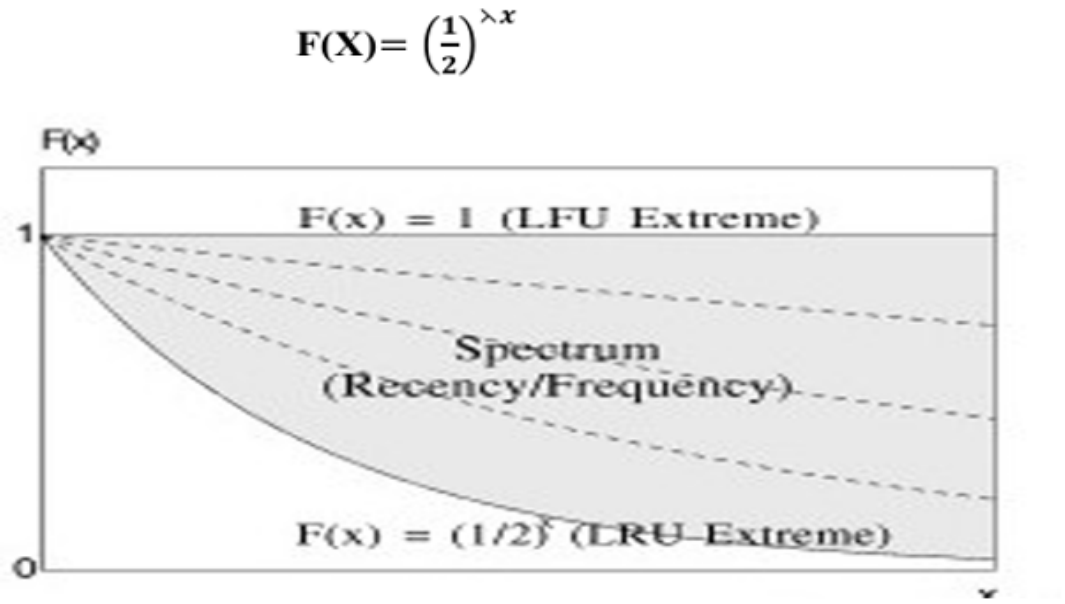


Figure 11 Les spectres de LRFU selon la fonction $F(x)$ [37]

La fonction $F(x)$ est définie comme suit :

- Si $F(x)$ = 1, LRFU se transforme en LFU (lorsque λ = 0).
- Si $F(x)$ = 1/2, LRFU devient LRU (lorsque λ = 1).

2.4.2) SP (Taylor Series)Prediction [26]

Le modèle TSP (Taylor Series Prediction) est utilisé pour prédire les valeurs caractéristiques des documents, représentées par H_i.Ce calcul permet de déterminer quelle stratégie de remplacement sera la plus appropriée en fonction des besoins de gestion du cache

$$H_i = \frac{f_i \times C_i}{S_i \times T_i} \quad et \quad T_i = t_p - t_c$$

où :

— C_i est le coût de chargement du document i depuis son serveur ;
— S_i est la taille du document i ;
— f_i est la fréquence du document i ;
— T_i décrit l'"accroissement" temporel de la requête vers le document i ;

— t_p est une prédiction de temps prévue de la prochaine requête pour ce document i ;
— t_c est le temps courant. Le t_p est déterminé avec la série de Taylor de second degré.

Avantages et Inconvénients des stratégies basées sur les fonctions [27]

L'un des principaux avantages de ces stratégies est qu'elles n'exigent pas une combinaison fixe des facteurs utilisés. Grâce à un choix approprié des paramètres, elles permettent d'optimiser diverses métriques de performance et de s'adapter à différents types de charges de travail. Cependant, l'un des inconvénients majeurs réside dans l'utilisation du poids dans les paramètres de remplacement, ce qui peut rendre l'optimisation complexe et entraîner des problèmes de performance si mal géré.

2.5) Les stratégies de remplacement de cache dédiées aux environnements mobiles

Les environnements mobiles présentent des contraintes spécifiques telles que la limitation des ressources (bande passante, énergie, mémoire) et la mobilité des utilisateurs. Les stratégies de remplacement de cache doivent donc être adaptées à ces particularités afin d'optimiser les performances des systèmes de cache sur les appareils mobiles et dans les réseaux sans fil.

Voici quelques stratégies couramment utilisées dans ces environnements :

2.5.1) M-LRU (Mobile-LRU [52]

Une extension de la stratégie LRU adaptée aux réseaux mobiles. Elle prend en compte la mobilité des utilisateurs en ajustant la priorité des contenus en fonction de leur emplacement actuel et de leur historique d'accès récent.

2.5.2) M-LFU (Mobile-LFU) [29]

Inspirée de LFU, cette approche privilégie le stockage des contenus les plus fréquemment consultés, tout en tenant compte de la consommation d'énergie et de la bande passante. Elle applique une pondération qui diminue progressivement la fréquence des contenus moins pertinents.

2.5.3) P-LRU (Predictive LRU [31]

Une version améliorée de LRU, qui intègre des modèles prédictifs pour anticiper les demandes futures en fonction des modèles de mouvement des utilisateurs et des tendances d'accès.

2.5.4) E-LRU (Energy-Aware LRU) [12]

Une variante de LRU qui prend en compte la consommation énergétique des transferts de données. Elle privilégie les contenus qui minimisent l'utilisation du réseau et réduit le cache des contenus nécessitant des ressources élevées en matière d'énergie.

2.5.5) Geo-LRU / Geo-Caching [53]

Cette approche exploite la localisation géographique des utilisateurs pour stocker en priorité les contenus pertinents dans la zone où ils se trouvent. Elle permet de réduire la latence et d'optimiser l'accès aux données en fonction des déplacements des utilisateurs.

2.5.6) H-LRU (Hybrid LRU) [31]

Une stratégie hybride combinant la récence, la fréquence et la localisation. Elle ajuste dynamiquement les critères de remplacement pour améliorer la performance dans les environnements mobiles.

2.6) stratégies basées sur le partitionnement

2.6.1)L'Adaptive Replacement Cache (ARC) [55]

est une stratégie avancée de remplacement de cache développée par IBM Research. Elle vise à optimiser la gestion du cache en combinant deux critères clés : la récence (LRU - Least RecentlyUsed) et la fréquence (LFU - Least FrequentlyUsed). Contrairement aux stratégies statiques, ARC s'adapte dynamiquement aux modèles d'accès aux données, améliorant ainsi les performances du cache.

Principes de Fonctionnement :

ARC utilise quatre listes pour gérer les objets en cache : • T1 : Contient les objets récemment accédés une seule fois (approche LRU).

- T2 : Contient les objets fréquemment accédés (approche LFU).
- B1 : Liste fantôme des objets récemment évincés de T1.
- B2 : Liste fantôme des objets récemment évincés de T2.

Les listes fantômes B1 et B2 permettent de suivre l'historique des objets supprimés pour ajuster dynamiquement la taille des listes T1 et T2.

Mécanisme d'Adaptation :

1. Si le cache détecte que les objets récemment accédés sont plus susceptibles d'être réutilisés, il augmente la taille de T1 (favorisant LRU).

2. Si les objets fréquemment accédés doivent être conservés, il augmente la taille de T2 (favorisant LFU).

3. Grâce aux listes fantômes, ARC analyse les accès passés et ajuste dynamiquement l'équilibre entre récence et fréquence.

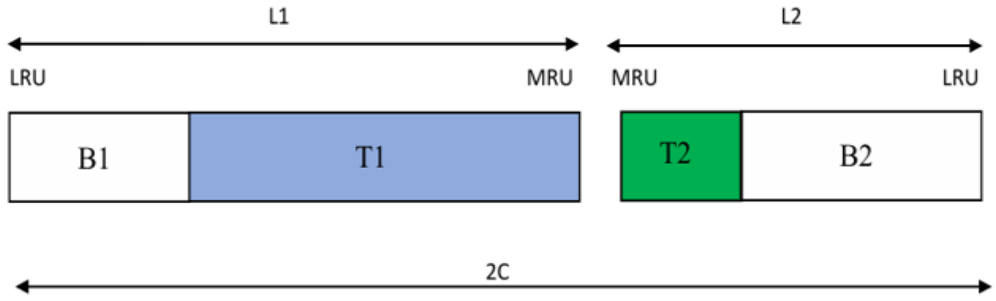


Figure 13 Algorithme ARC [32]

Avantages d'ARC

Adaptation dynamique aux modèles d'accès aux données. Optimisation automatique sans besoin de réglages manuels. Meilleure gestion des objets en cache, réduisant les erreurs de remplacement. Efficace dans les environnements à charge variable, comme les bases de données et les systèmes de stockage.

Inconvénients d'ARC

Complexité de mise en œuvre plus élevée que LRU et LFU. Besoin de stockage supplémentairepour gérer les listes fantômes.

2.6.2)La stratégie SLRU (Segmented Least Recently Used) [1]

est une amélioration du classique LRU (Least Recently Used). Elle est conçue pour mieux gérer les contenus en cache en tenant compte à la fois de la récence et de la durabilité des accès aux données.

Principe de Fonctionnement

1. Segment Protégé (Protected Segment - PS) :

- Contient les objets fréquemment accédés.
- Les objets restent dans ce segment tant qu'ils sont régulièrement sollicités.
- Si le segment est plein, les objets les moins récemment utilisés sont déplacés vers le segment non protégé.

2. Segment Non Protégé (Probationary Segment - PNS) :

- Contient les nouveaux objets insérés en cache.
- Lorsqu'un objet dans ce segment est accédé plusieurs fois, il est promu au segment protégé.
- Si un objet n'est pas réutilisé avant d'être évincé, il est supprimé du cache.

Avantages de SLRU

Réduction des erreurs de remplacement : en évitant d'éjecter prématurément des objets qui pourraient être réutilisés.

Optimisation du cache : en différenciant les objets "chauds" (fréquemment utilisés) des objets "froids" (peu accédés).

Meilleure gestion des accès récents et répétés : utile pour les applications nécessitant une haute performance (bases de données, systèmes de fichiers, caches web, etc.).

Inconvénients de SLRU

Complexité de mise en œuvre plus élevée que LRU. Risque de saturation du segment protégé, si de nombreux objets sont fréquemment accédés. Moins efficace si les accès aux données sont très irréguliers, car les promotions entre segments peuvent ne pas bien refléter la charge de travail réelle.

3) Autres politiques de remplacement [29]

3.1) FIFO (First In, First Out)

La stratégie FIFO est l'une des plus simples, où les contenus sont ajoutés à une file d'attente. Le contenu le plus ancien est évacué lorsque de l'espace doit être libéré. C'est une approche simple, mais elle peut ne pas être optimale pour certains scénarios de cache.

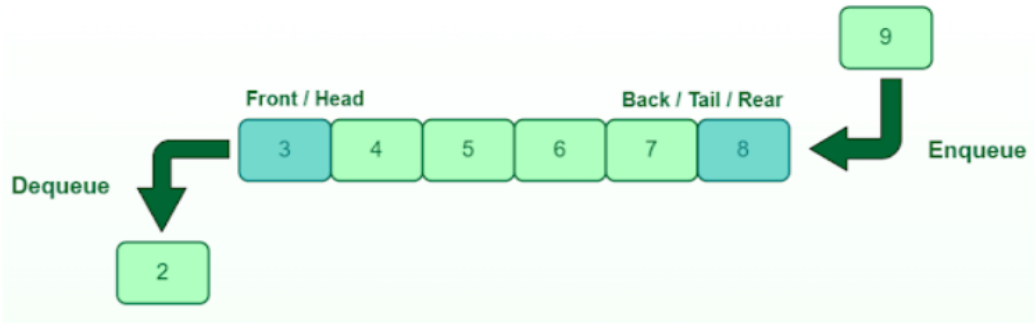


Figure 14 fonctionnement de cache FIFO [20]

Avantages [54]

1. Simplicité : Facile à implémenter, il suffit de conserver l'ordre d'arrivée des pages.

2. Peu de surcharge : Ne nécessite pas de calculs complexes ni de structures de données avancées.

3. Prévisible : Le comportement est déterministe, ce qui facilite l'analyse et la détection d'erreurs.

Inconvénients

1. Mauvaise performance (souvent) [21] : Il peut retirer une page fréquemment utilisée simplement parce qu'elle est « ancienne », même si elle est encore utile.

2. Anomalie de Belady [46] : Ajouter plus de mémoire peut paradoxalement augmenter le nombre de défauts de page avec FIFO, ce qui est contre-intuitif.

3. Ignorance de la fréquencd'utilisation [21] : Contrairement à d'autres algorithmes comme LRU (Least RecentlyUsed), FIFO ne tient pas compte de la récence ou de la fréquence d'accès des pages

3.2) RAND(Aléatoire) [22]

RAND sélectionne un contenu à évacuer de manière aléatoire. Bien que cette approche soit facile à mettre en œuvre, elle peut être moins performante car elle ne prend pas en compte la fréquence ou la récence des accès.

Avantages

1. Simplicité d'implémentation : Très facile à coder : il suffit de générer un nombre aléatoire pour choisir une page.

2. Faible surcharge système : Pas besoin de suivre l'historique d'accès ou d'utiliser des compteurs.

3. Résistance aux schémas d'accès mal optimisés : Contrairement à FIFO ou LRU, l'algorithme aléatoire ne peut pas être facilement "piégé" par un motif d'accès particulier.

Inconvénients

1. Performances instables : Peut expulser une page très fréquemment utilisée par hasard, causant un grand nombre de défauts de page.

2. Non-déterministe : Le comportement change à chaque exécution, ce qui complique le débogage et l'analyse.

3. Pas de prise en compte d'informations utiles : Ignore complètement la fréquence ou la récence des accès, contrairement à LRU ou LFU.

3.3) Cache Aging (Vieillissement ducache) [10]

• Chaque contenu dans le cache est attribué à un compteur de temps.

• Plus un contenu reste longtemps dans le cache sans être accédé, plus il a de chances d'être supprimé.

• Cette approche évite que des contenus obsolètes restent en mémoire trop longtemps.

Avantage

Empêche le stockage prolongé de données inutilisées.

Inconvénient

Peut supprimer des contenus encore utiles si la période d'inactivité est mal définie.

3.4) Multi-Criteria Replacement Policy (Politique de remplacement multi-critères) [41]

- Combine plusieurs stratégies pour décider quel contenu remplacer :
  - o Récenced'accès (LRU)
  - o Fréquenced'accès (LFU)
  - o Taille du fichier
  - o Distance au producteur

- Un score de remplacement est attribué à chaque contenu, et le fichier avec le score le plus faible est supprimé.

Avantage

Stratégie équilibrée et optimisée pour différents scénarios.

Inconvénient

Complexité de calcul plus élevée.

3.5) Hop-BasedProbabilisticCaching (Mise en cache probabiliste basée sur le nombre de sauts) [14]

• Plus un contenu est stocké loin du producteur (nombre élevé de sauts), plus il a de chances d'être remplacé.

• Les caches situés près des consommateurs ont une plus grande rétention des données populaires.

Avantage

Optimise le positionnement des contenus en réduisant les requêtes longues.

Inconvénient

Peut supprimer des contenus utiles sur des routeurs intermédiaires si le calcul de distance est mal optimisé.

3.6) Popularity-Aware Cache Replacement (Remplacement basé sur la popularité) [75]

• Le remplacement des contenus est basé sur leur nombre total de requêtes. • Les fichiers les moins populaires sont supprimés en premier. • Permet de conserver les contenus qui ont le plus de chances d'être demandés à nouveau.

Avantage

Améliore les performances en priorisant les contenus recherchés.

Inconvénient

Nécessite une mise à jour constante des statistiques de popularité.

CONCLUSION

Dans ce chapitre,nous avons étudié en profondeur les stratégies de placement et de remplacement du cache, en analysant leurs mécanismes, avantages et limites. Des stratégies basées sur la récence et la fréquence aux celles basées sur la taille et les fonctions, nous avons exploré un large éventail de méthodes utilisées pour optimiser les ressources de cache dans les réseaux NDN.

CHAPITRE 3

Simulation et interprétation

INTRODUCTION

À l'ère du numérique, où les volumes de données ne cessent de croître, l'optimisation des mécanismes de mise en cache constitue un enjeu majeur pour assurer l'efficacité des systèmes de distribution de contenu. Les réseaux à dénomination de contenu (Named Data Networking – NDN) se sont imposés comme une architecture prometteuse, capable de répondre aux exigences de diffusion de données à grande échelle. Le mécanisme de mise en cache, élément central de cette architecture, joue un rôle déterminant dans la réduction de la latence, l'augmentation du débit global et l'atténuation de la charge exercée sur les serveurs de contenu.

Ce chapitre se consacre à l'analyse comparative des performances de différentes politiques de remplacement de cache dans le contexte des réseaux NDN, en s'appuyant sur l'environnement de simulation ccnSim. L'étude porte en particulier sur les algorithmes Least RecentlyUsed (LRU) et First-In First-Out (FIFO). À travers l'évaluation de métriques clés telles que le taux de satisfaction des requêtes (cache hit ratio) et la latence, l'objectif est d'identifier les politiques les plus efficaces, de caractériser leur comportement respectif et de fournir des éléments d'aide à la décision pour leur déploiement dans des environnements NDN réels.

CONCLUSION GENERAL

CONCLUSION GENERAL

L'accélération constante des besoins en communication et l'augmentation exponentielle du trafic Internet révèlent les limites structurelles de l'architecture IP traditionnelle. Face à ces contraintes, l'approche Named Data Networking (NDN) émerge comme une alternative innovante, reposant sur un paradigme centré sur les données plutôt que sur les hôtes. Cette architecture vise à améliorer l'efficacité de la distribution de contenu, à offrir une meilleure scalabilité, une tolérance accrue aux pannes, ainsi qu'un renforcement des mécanismes de sécurité et de confidentialité.

Au sein de cette architecture, les mécanismes de mise en cache jouent un rôle fondamental dans l'optimisation des performances du réseau. Les travaux empiriques et les simulations menées dans ce domaine mettent en évidence l'importance stratégique du choix de la politique de remplacement de cache, celui-ci ayant un impact direct sur le taux de succès des requêtes, les délais d'accès aux données, et par conséquent sur l'efficience globale du réseau.

Dans cette optique, les résultats obtenus dans le cadre de cette étude constituent une référence utile pour orienter les futures décisions en matière de conception et de déploiement des réseaux NDN. Ils contribuent notamment à améliorer l'expérience utilisateur tout en assurant une gestion plus rationnelle des ressources réseau.

En définitive, l'architecture NDN représente une piste prometteuse pour l'évolution de l'Internet. Toutefois, la transition vers ce nouveau paradigme nécessite une approche progressive et des efforts coordonnés afin de garantir une interopérabilité fluide et une scalabilité durable.

Bibliographie

Bibliographie

[1] Ibrahim ABDEL-BASET et al. « Cache Policies for Smartphone in Flexible Learning : A Comparative Study ». In : *Mansoura Engineering Journal* 41.3 (2020), p. 1-10. DOI : 10.21608/bfemu.2020.99005. URL : https://mej.researchcommons.org/home/vol41/iss3/2/.

[2] Marc ABRAMS et al. « Removal policies in network caches for World Wide Web documents ». In : *Proceedings of the ACM SIGCOMM Conference*. 1995, p. 293-305.

[3] Bengt AHLGREN et al. « A survey of information-centric networking ». In : *IEEE Communications Magazine*. T. 50. 7. Network of Information (NetInf) - an information-centric networking architecture. IEEE, 2012, p. 26-36.

[4] Nasir AHMED, Jianli Pan ZHANG et Dipankar RAYCHADHURI. « On performance of cache policies in named-data networking ». In : *Proceedings of the 8th International Conference on Future Internet Technologies*. ACM. 2013, p. 1-6.

[5] Mohammad ALKHAZALEH et N. S. S. A. A. « A Comprehensive Survey of Information-Centric Network : Content Caching Strategies Perspective ». In : *Journal with ISSN 2394-5125* 7.1 (2020). ISSN : 2394-5125.

[6] Marica AMADEO, Claudia CAMPOLO et Antonella MOLINARO. « Security Issues in Named Data Networking ». In : *Proceedings of the International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*. IEEE, 2014, p. 1-6. DOI : 10.1109/DRCN.2014.6834920.

[7] Marica AMADEO, Claudio CAMPOLO et Antonella MOLINARO. « Information-centric networking for the Internet of Things : challenges and opportunities ». In : *IEEE Network* 28.6 (2014), p. 92-97.

[8] Marica AMADEO, Claudio CAMPOLO et Antonella MOLINARO. « Named data networking for IoT : an architectural perspective ». In : *European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*. 2014.

[9] Marica AMADEO, Claudio CAMPOLO et Antonella MOLINARO. « Named data networking for smart cities : A survey ». In : *Computer Communications* 93 (2016), p. 49-64.

[10] Alper ARCAKLIOGLU et al. « An Analytical Approach to Cache Aging ». In : *ACM Computing Surveys* 35.4 (2003), p. 374-398. DOI : 10.1145/954339.954341. URL : https://dl.acm.org/doi/10.1145/954339.954341.

[11] Sandeep BHATIA et Vishal SHARMA. « Least Recently Frequently Used Replacement Policy in Named Data Network ». In : *Procedia Computer Science* 85 (2016), p. 431-438.

[12] Guohong CAO. « Proactive Power-Aware Cache Management for Mobile Computing Systems ». In : *IEEE Transactions on Computers* 51.6 (juin 2002), p. 608-621. DOI : 10.1109/TC.2002.1009147. URL : https://doi.org/10.1109/TC.2002.1009147.

[13] Abdelberi CHAABANE, Emiliano DE CRISTOFARO et Mohamed Ali KAAFAR. « On preserving privacy in content-oriented networks ». In : *Proceedings of the ACM SIGCOMM workshop on Information-centric networking*. 2013, p. 19-24.

[14] Wei CHAI et al. « Cache "less for more" in Information-Centric Networks (ICN) ». In : *Proceedings of the 11th International IFIP TC 6 Conference on Networking (NETWORKING'12)*. Springer, 2012, p. 27-40. DOI : 10.1145/2342488.2342501. URL : https://dl.acm.org/doi/10.1145/2342488.2342501.

[15] Wun-Cheol CHAI et al. « Cache "less for more" in information-centric networks ». In : *IFIP Networking*. 2012.

[16] Marshini CHETTY, Srikanth SUNDARESAN et Nick FEAMSTER. « Mobile Internet Connectivity : An Empirical Study of What Improves the Quality of Service in Developing Countries ». In : *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 43.2 (2013), p. 5-12.

[17] Alfredo COMPAGNO, Mauro CONTI et et AL. « Poseidon : mitigating interest flooding DDoS attacks in named data networking ». In : *IFIP Networking Conference*. 2013.

[18] Haowei DAI, Jianshu LIU et Bo WANG. « Video streaming over content centric networking : a survey ». In : *Computer Networks* (2012).

[19] Nikos FOTIOU et George C. POLYZOS. « Privacy preservation in content oriented networking : threats and countermeasures ». In : *SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking*. 2012.

[20] GEEKSFORGEEKS. *Advantages and Disadvantages of Various Page Replacement Algorithms*. Accessed : 2025-05-12. 2020. URL : https://www.geeksforgeeks.org/advantages-and-disadvantages-of-various-page-replacement-algorithms.

[21] GeeksforGeeks. *Advantages and Disadvantages of Various Page Replacement Algorithms*. https://www.geeksforgeeks.org/advantages-and-disadvantages-of-various-page-replacement-algorithms. Accessed : 2025-05-07. n.d.

[22] GeeksforGeeks. *Page Replacement Algorithms in Operating Systems*. https://www.geeksforgeeks.org/page-replacement-algorithms-in-operating-systems. Accessed : 2025-05-07. n.d.

[23] Christina Ghali, Gene Tsudik et Ersin Uzun. « Securing Named Data Networks : Challenges and the Way Forward ». In : *IEEE Network* 28.3 (2014), p. 52-58. DOI : 10.1109/MNET.2014.6843236.

[24] Ali Ghasemi, Mohammad Fatemi et et al. « Performance analysis of NDN caching policies for multimedia applications ». In : *Journal of Network and Computer Applications* (2018).

[25] Joseph Gwertzman et Margo Seltzer. « Improving the effectiveness of web caching ». In : *Proceedings of the 1996 Workshop on Hot Topics in Operating Systems (HotOS)*. In Recent Advances in Distributed Systems. IEEE, 1996, p. 85-90.

[26] Auteur Inconnu. « A Cache Replacement Policy Based on Second-Order Trend Analysis ». In : *Nom du journal* volume.numéro (année). Introduction du modèle Taylor Series Prediction (TSP), pages.

[27] Auteur Inconnu. *Mécanisme de mise en cache dans le réseau Ad hoc*. Consulté pour la compréhension du fonctionnement du cache en environnement Ad hoc. année.

[28] Van Jacobson et et al. « Networking named content ». In : *CoNEXT*. 2009.

[29] Preetha Theresa Joy et K. Polouse Jacob. « A Comparative Study of Cache Replacement Policies in Wireless Mobile Networks ». In : *Advances in Computing and Information Technology*. Sous la dir. de Natarajan Meghanathan, Dhinaharan Nagamalai et Nabendu Chaki. T. 176. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, p. 609-619. DOI : 10.1007/978-3-642-31513-8_62.

[30] Mohammad Karami et Haowei Dai. « Collaborative caching in NDN ». In : *Computer Networks* (2016).

[31] Pooja Khulbe, Sanjay Kumar et Nidhi Yadav. « An Assessment of Hybrid LRU (H-LRU) with Existing Page Replacement Algorithms ». In : *International Journal of Computer Applications* 99.17 (août 2014), p. 51-53. DOI : 10.5120/17469-8415. URL : https://www.ijcaonline.org/archives/volume99/number17/17469-8415/.

[32] Young-Jin KIM et Jihong KIM. « ARC-H : Adaptive Replacement Cache Management for Heterogeneous Storage Devices ». In : *Journal of Systems Architecture* 58.2 (2012), p. 86-97. DOI : 10.1016/j.sysarc.2011.12.002. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383762111001354.

[33] Nom de L'AUTEUR. « A Comparative Survey on Different Caching Mechanisms in Named Data Networking (NDN) Architecture ». In : *Proceedings of the Conference, Pondicherry*. Étude comparative des mécanismes de cache dans l'architecture NDN. année.

[34] Nom de L'AUTEUR. « Caching Proxies : Limitations and Potentials ». In : *Nom du journal ou revue* volume.numéro (année). Référence à la stratégie LRU-Threshold, pages.

[35] Nom de L'AUTEUR. « Evaluating Content Management Techniques for Web Proxy Caches ». In : *Nom du journal ou conférence* volume.numéro (année). Discussion sur la stratégie LFU-Aging, pages.

[36] Nom de L'AUTEUR. « Improving Effectiveness of Web Caching ». In : *Recent Advances in Distributed Systems*. Présentation de la stratégie LRU-Hot. année.

[37] Nom de L'AUTEUR. « Least Recently Frequently Used Replacement Policy in Named Data Network ». In : *Nom du journal* volume.numéro (année). Présentation de la stratégie LRFU et de la fonction CRF, pages.

[38] Nom de L'AUTEUR. « Removal Policies in Network Caches for World Wide Web Documents ». In : *Nom de la conférence ou du colloque*. Discussion de la stratégie HYPER-G. année.

[39] Nom de L'AUTEUR. « Removal Policies in Network Caches for World Wide Web Documents ». In : *Nom de la conférence*. Analyse de la politique de remplacement SIZE. année.

[40] Donghee LEE et Jihong CHOI. « LRFU : A spectrum of policies that subsumes the least recently used and least frequently used policies ». In : *IEEE Transactions on Computers* 50.12 (2001), p. 1352-1361.

[41] Yong LI et al. « A Multi-Criteria Cache Replacement Policy for Information-Centric Networks ». In : *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, 2016, p. 1-6. DOI : 10.1109/GLOCOM.2016.7856987. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/7856987.

[42] Zhiyuan LI, Chao WANG et et AL. « NDN in healthcare : A case study of a medical records retrieval system ». In : *IEEE ICC*. 2019.

[43] Andreas LINDGREN, Martin ARLITT et et AL. « NDN over bluetooth low energy (BLE) in the IoT ». In : *Proceedings of the 5th ACM Conference on Information-Centric Networking*. 2018.

[44] Author(s) NAME(S). « A Comprehensive Survey of Information-Centric Network : Content Caching Strategies Perspective ». In : *Journal Name* XX.X (2020), p. XX-XX. DOI : 10.xxxx/xxxxx.

[45] NOMAUTEUR1, NOMAUTEUR2 et NOMAUTEUR3. « A Comprehensive Survey of Information-Centric Network : Content Caching Strategies Perspective ». In : *Nom de la revue ou conférence* Volume.Numéro (Année), Pages. DOI : doi:... URL : https://....

[46] PORIYAAN. *Page Replacement*. https://cse.poriyaan.in/topic/page-replacement-50805. Accessed : 2025-05-07. n.d.

[47] Named Data Networking PROJECT. *Named Data Networking (NDN) Project*. https://named-data.net/. Consulté en 2025. 2010.

[48] Ioannis PSARAS, Wun-Cheol CHAI et George PAVLOU. « Modelling cache performance in information-centric networks ». In : *IFIP Networking*. 2012.

[49] Vaskar RAYCHOUDHURY et Vladimir A. OLESHCHUK. « NDNHealth : A Named Data Networking Approach for Health Data Security and Privacy ». In : *IEEE Access* (2018).

[50] Gianluca ROSSINI et Dario ROSSI. « Multi-path forwarding strategies in content-centric networks with application to video streaming ». In : *Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. IEEE. 2013.

[51] Lorenzo SAINO, Ioannis PSARAS et George PAVLOU. « A comprehensive survey of information-centric networking : Content caching strategies perspective ». In : *Computer Networks* 121 (2017), p. 44-64.

[52] Manju SHARMA et Sanjeev JAIN. « A Comparative Study of Cache Replacement Policies in Wireless Mobile Networks ». In : *2021 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*. IEEE, 2021, p. 1-6. DOI : 10.1109/WINCOM52173.2021.9596207.

[53] Manju SHARMA et Sanjeev JAIN. « A Comparative Study of Cache Replacement Policies in Wireless Mobile Networks ». In : *2021 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*. IEEE, 2021, p. 1-6. DOI : 10.1109/WINCOM52173.2021.9596207.

[54] Vishwas SHARMA. *FIFO Page Replacement Algorithm*. Consulté le 7 mai 2025. 2023. URL : https://www.scaler.com/topics/fifo-page-replacement-algorithm/.

[55] Sandeep SINGH, Rakesh KUMAR et Anil SHARMA. « Adaptive Replacement Cache Policy in Named Data Networking ». In : *International Journal of Computer Applications* 183.19 (2021), p. 1-5. DOI : 10.5120/ijca2021921617. URL : https://www.ijcaonline.org/archives/volume183/number19/32167-2021921617.

[56] SLIDEPLAYER.FR. *Stratégies de mise en cache dans NDN*. Consulté le 2 mai 2025. 2024. URL : https://slideplayer.fr/slide/13582680/.

[57] Reza TOURANI, Travis MICK et Satyajayant MISRA. « Caching in information-centric networking : Strategies, challenges, and future research directions ». In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 20.3 (2018), p. 2353-2387.

[58] FUN MOOC UNISCIEL. *La sécurité des communications dans les NDN (Named Data Networks)*. Consulté le 2 mai 2025. 2020. URL : https://www.fun-mooc.fr/fr/cours/la-securite-des-communications-dans-les-ndn/.

[59] UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN - MED BOUDIAF. *Étude sur les politiques de remplacement de cache dans les réseaux NDN*. Rapport universitaire. 2022.

[60] Jia WANG et al. « Cache placement strategy in named data networking ». In : *ICN*. 2013.

[61] Jia WANG et Jon CROWCROFT. « Evaluating content management techniques for Web proxy caches ». In : *Computer Networks* 33.1-6 (2000), p. 77-89.

[62] Yannis Thomas WANG, Beichuan WANG et Athanasios V. VASILAKOS. « KITE : Producer Mobility Support in Named Data Networking ». In : *Proceedings of the ACM Conference on Information-Centric Networking (ICN)*. 2014, p. 179-180. DOI : 10.1145/2660129.2660152.

[63] WIKIPEDIA. *Named Data Networking*. Consulté en avril 2024. 2024. URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Named_data_networking.

[64] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Content-centric networking – Wikipedia, the free encyclopedia*. Page consultée le 2 mai 2025. 2024. URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Content-centric_networking.

[65] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Named Data Networking – Wikipedia*. Consulté le 2 mai 2025. 2024. URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Named_data_networking.

[66] George XYLOMENOS et al. « Mobility Support in Named Data Networking : A Survey ». In : *Computer Networks* 130 (2018), p. 12-35. DOI : 10.1016/j.comnet.2017.10.002.

[67] Zhi YANG, Xun LI et al. « Smart city data sharing based on named data networking ». In : *IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*. 2019.

[68] Yingdi YU, Alexander AFANASYEV et Lixia ZHANG. « Name-based access control for named data networking ». In : *NDSS* (2015).

[69] Lan ZHANG et al. « An Overview of Security Support in Named Data Networking ». In : *IEEE Communications Magazine* 56.11 (2018), p. 62-68. DOI : 10.1109/MCOM.2018.1700862.

[70] Lan ZHANG et al. *NDN naming conventions*. Rapp. tech. NDN Project, Technical Report NDN-0019, 2010.

[71] Lixia ZHANG et et AL. « Named data networking (NDN) project ». In : *PARC Technical Report* (2010).

[72] Lixia ZHANG et al. « Named data networking ». In : *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 44.3 (2014), p. 66-73.

[73] Lixia ZHANG et al. « Supporting Mobility in Named Data Networking ». In : *Communications of the ACM* 57.12 (2014), p. 90-98. DOI : 10.1145/2662685.

[74] Wei ZHANG, Ming LIU et Xiaoming WANG. « A cache replacement policy based on second-order trend analysis ». In : *Computer Networks* 150 (2019), p. 62-72.

[75] Yicheng ZHANG et al. « Popularity-Aware Cache Replacement Policy for Content Centric Networks ». In : *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2017, p. 1-6. DOI : 10.1109/ICC.2017.8233202. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/8233202.